# Effizienter Umgang mit Energie

## Wissenschaftliche Arbeit

 ${\it Vorgelegt\ von}$  Nina Carola Steffens Geboren am 11.03.1991 in Frankfurt am Main

Stuttgart, den 3. September 2015

Betreuer:

Prof. Dr. Tilman Pfau Dr. Robert Löw Prof. Franz Kranzinger

Universität Stuttgart 5. Physikalisches Institut Schülerlabor

## Erklärung

Ich erkläre, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken, gegebenenfalls auch elektronischen Medien, entnommen sind, sind von mir durch Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Entlehnungen aus dem Internet sind durch Angabe der Quelle und des Zugriffsdatums sowie dem Ausdruck der ersten Seite belegt; sie liegen zudem für den Zeitraum von 2 Jahren entweder auf einem elektronischen Speichermedium im PDF-Format oder in gedruckter Form vor.

Stuttgart, den 3. September 2015

ii

## **Vorwort**

Die vorliegende Ausarbeitung entstand im Rahmen der viermonatigen wissenschaftlichen Arbeit "Konzeption und Implementierung einer Schülerversuchsreihe zum Thema Energie" am 5. Physikalischen Institut der Universität Stuttgart.

An dieser Stelle möchte ich allen meinen Dank aussprechen, die mich beim Erstellen der wissenschaftlichen Arbeit unterstützt haben.

#### Herzlichen Dank an ...

- ...Prof. Dr. Tilman Pfau dafür, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat, die Arbeit am Schülerlabor des 5. Physikalischen Instituts der Universität Stuttgart anzufertigen.
- ...Dr. Robert Löw für die umfassende Betreuung.
- ...Prof. Franz Kranzinger für die didaktische Beratung.
- ... Karin Otter, die bei organisatorischen Fragen stets weiter half.
- ... Christian Molter vom IFB für die freundliche Beratung zur Station 3 (Windenergie).
- ...Dr. Renate Zapf-Gottwick vom IPV für die Hinweise und das Bereitstellen von Anschauungsmaterial zu Station 4 (Solarenergie).
- ... Karl Westphal für den Ausdruck zahlreicher in der Versuchsreihe eingesetzter Objekte mit dem 3D-Drucker.
- ...der mechanischen Werkstatt für die intensive Beratung und das Erstellen von wichtigen Versuchsbestandteilen.
- ... Stephan Schikora, der bei praktischen Problemen schnelle Hilfe wusste.
- ... Sebastian Weber für zahlreiche Anregungen zur Versuchsreihe.
- ... die motivierten Betreuer, die eine reibungslose Durchführung der Testläufe der Versuchsreihe ermöglicht haben.
- ... alle Testklassen und -lehrer, deren Hinweise sehr beim Erstellen des Laborbuchs geholfen haben.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einl	eitung		1
2	The	oretisc	he Grundlagen	3
	2.1	Theme	en aus der Mechanik	3
		2.1.1	Grundlegendes zu Arbeit, Energie und Leistung	3
		2.1.2	Windenergie	7
		2.1.3	Drehmoment	11
	2.2	Theme	en aus der Elektrizitätslehre	11
		2.2.1	Elektrischer Widerstand	11
		2.2.2	Themen aus dem Bereich Elektromagnetismus	11
		2.2.3	Thermoelektrische Effekte	14
	2.3	Theme	en aus der Festkörperphysik	18
		2.3.1	Funktionsweise einer Solarzelle	18
	2.4	Theme	en aus der Wärmelehre	22
		2.4.1	Wärmeleitung in Festkörpern	22
		2.4.2	Wärmestrahlung	23
3	Vers	suchsre	ihe	27
	3.1	Statio	n 1: Diskussion	27
	3.2	Statio	n 2: Energieumwandlung	27
		3.2.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	28
		3.2.2	Messergebnisse und Auswertung	31
	3.3	Statio	n 3: Windenergie	40
		3.3.1	Versuchsaufbau	40
		3.3.2	Messergebnisse und Auswertung	43
	3.4	Statio	n 4: Solarenergie	46
		3.4.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	46
		3.4.2	Messung und Auswertung	47
	3.5	Statio	n 5: Effizienz von Haushaltsgeräten	53
		3.5.1	Versuchsaufbau	53

## In halts verzeichn is

		3.5.2	Messergebnisse und Auswertung	54
	3.6	Statio	n 6: Wirkungsgrad eines Elektromotors	57
		3.6.1	Versuchsaufbau	57
		3.6.2	Messergebnisse und Auswertung	57
	3.7	Statio	n 7: Pumpspeicherkraftwerk	60
		3.7.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	61
		3.7.2	Messergebnisse und Auswertung	63
	3.8	Statio	n 8: Thermische Energie und Wärmeleitfähigkeit	65
		3.8.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	65
		3.8.2	Messergebnisse und Auswertung	67
4	Dida	aktik		73
	4.1	Übers	icht zu den Stationen der Versuchsreihe	73
	4.2	Bezug	zu den Bildungsstandards für Physik	73
		4.2.1	Leitgedanken zum Kompetenzerwerb	73
		4.2.2	Kompetenzen und Inhalte	74
	4.3	Ziel de	er Versuchsreihe	76
	4.4	Ablau	f der Versuchsreihe	76
		4.4.1	Vorwissen	76
		4.4.2	Vorbereitung	77
		4.4.3	Versuchstag	77
	4.5	Didak	tische Anmerkungen zur Versuchsreihe	78
		4.5.1	Allgemeines	78
		4.5.2	Einführung des Begriffs "Energie"	78
		4.5.3	Hilfekarten	78
		4.5.4	Anmerkungen zu den einzelnen Stationen	79
	4.6	Testlä	ufe	81
		4.6.1	1. Testlauf am 10.07.2015	81
		4.6.2	2. Testlauf am 17.07.2015	82
		4.6.3	3. Testlauf am 21.07.2015	83
		4.6.4	4. Testlauf am 24.07.2015	84
5	Zusa	ammen	fassung und Ausblick	85
	5.1	Zusam	nmenfassung	85
	5.2	Ausbli	ick	86
Li	teratı	ur		92
ΔΙ	shilde	ıngsver	zeichnis	94

## Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis				
Anhang	5	97		
1	Laborbuch	98		
2	Hilfezettel und Anleitungen	160		
3	Zusatzmaterial zu Station 4	174		
4	Internetseiten	178		

## 1 Einleitung

Dem Thema Energie begegnen wir tagtäglich. Darüber hinaus stellt die Sicherung einer zukunftsfähigen Energieversorgung eine gesellschaftliche Herausforderung dar, der man sich zur Zeit weltweit stellen muss. In diesem Zusammenhang spielt auch das Energiesparen eine entscheidende Rolle. Nicht zuletzt im schulischen Bildungsplan, im Theoriegebäude und in der experimentellen Anwendung der Physik ist das Konzept Energie grundlegend.

Das sind nur einige von vielen Gründen, die eine Beschäftigung mit diesem interessanten Thema rechtfertigen. Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit wird daher eine neue Versuchsreihe zum Thema "Effizienter Umgang mit Energie" entwickelt. Die Versuchsreihe beinhaltet acht Stationen zu den Themen Energiequellen, Energieumwandlung, Energieeffizienz, Energietransport und Energiespeicherung.

Die Versuchsreihe wird für das Schülerlabor "Spiel der Kräfte" des 5. Physikalischen Instituts der Universität Stuttgart erstellt. Sie ist für Klassen der Stufe 9/10 konzipiert. Die Klassen erhalten vor dem Besuch des Schülerlabors das Laborbuch und erledigen eine Vorbereitungsaufgabe. Am Versuchstag ist eine Klasse vier Stunden im Schülerlabor und führt anhand des Laborbuchs selbstständig Versuche durch. Bei Fragen werden die Schülerinnen und Schüler von einem studentischen Betreuerteam unterstützt.

In der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit wird zunächst auf die theoretischen Grundlagen zum Thema Energie eingegangen. Anschließend werden die einzelnen Stationen und ihr jeweiliger physikalischer Hintergrund erläutert. Im Kapitel Didaktik behandeln den Bezug zum Bildungsplan, didaktische Überlegungen zur Versuchsreihe sowie die Ergebnisse der ersten Testläufe ein.

## 2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die physikalischen Grundlagen der Experimente aus der Versuchsreihe erläutert.

## 2.1 Themen aus der Mechanik

## 2.1.1 Grundlegendes zu Arbeit, Energie und Leistung

Was ist Energie? Auf diese Frage antwortete Max Planck folgendermaßen:

"Energie ist die Fähigkeit eines Systems, äußere Wirkungen (z. B. Wärme, Licht) hervorzubringen." [1, S. 19]

Auf eher theoretischem Weg wird der Begriff "Energie" in der Literatur über den Begriff "Arbeit" erklärt: $^1$ 

#### **Arbeit**

Legt ein Massenpunkt in einem Kraftfeld  $\vec{F}(\vec{r})$  das Wegelement  $\Delta \vec{r}$  zurück, so wird das Skalarprodukt

$$\Delta W = \vec{F}(\vec{r}) \cdot \Delta \vec{r} \tag{2.1}$$

die mechanische **Arbeit** genannt, die von der Kraft  $\vec{F}$  am Massenpunkt entlang des Weges  $\Delta \vec{r}$  verrichtet wird [2].

Bewegt sich der Massenpunkt unter dem Einfluss der Kraft  $\vec{F}(\vec{r})$  vom Punkt  $P_1$  nach  $P_2$ , so ist die gesamte Arbeit gegeben durch

$$W = \int_{P_1}^{P_2} \vec{F} \left( \vec{r} \right) \cdot d\vec{r}. \tag{2.2}$$

Die Einheit der Arbeit ist: [Arbeit] = 1 N  $\cdot$  m = 1 J.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Zur Einführung des Begriffs in der Schule siehe Kapitel 4.

#### **Energie**

Die an einem Körper verrichtete Arbeit wird in diesem in Form von **Energie** gespeichert [3]. Das Verrichten von Arbeit entspricht einer Energieübertragung. Arbeit ist eine Transportgröße, Energie eine Zustandsgröße.

Für die Energie wir der Formelbuchstabe E verwendet. Ihre Einheit ist wie die der Arbeit: [Energie] =  $1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ J}$ . Im Alltag wird außerdem häufig die Einheit Kilowattstunde verwendet. Es gilt 1 kWh = 3.6 MJ.

#### **Energieformen**

Energie tritt in verschiedenen Formen auf. Es seien die folgenden Beispiele genannt.

#### Mechanische Energieformen

Die mechanische Energie, die einem Körper durch Verrichten von mechanischer Arbeit zugeführt wird, ist allgemein [2]

$$\Delta E = \vec{F}(\vec{r}) \cdot \Delta \vec{r} \tag{2.3}$$

mit dem Kraftfeld  $\vec{F}(\vec{r})$ , in dem der Körper das Wegelement  $\Delta \vec{r}$  bewegt wird.

- Kinetische Energieformen [2]:
  - Die **Translationsenergie** eines Körpers berechnet sich über

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2. \tag{2.4}$$

Hier ist m die Masse und v die Geschwindigkeit des Körpers.

Die **relativistische** Translationsenergie eines Körpers mit der Ruhemasse  $m_0$  und der Geschwindigkeit v ist gegeben durch

$$E = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},\tag{2.5}$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist. Für den Fall v=0 ist dies Einsteins berühmte Formel  $E=m\cdot c^2$ . Jeder Masse m entspricht dann die Energie  $E=m\cdot c^2$ , Masse und Energie sind proportional zueinander.

- Die **Rotationsenergie** eines Körpers ist gegeben durch

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2, \tag{2.6}$$

wobei I sein Trägheitsmoment und  $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit seiner Rotation

sind.

- Potentielle Energieformen [3]:
  - Die potentielle Energie eines K\u00f6rpers der Masse m, der in einem Gravitationsfeld mit Gravitationsfeldst\u00e4rke g um die Strecke h angehoben wird, berechnet als ein Spezialfall von Gleichung (2.3) sich durch

$$E = m \cdot g \cdot h. \tag{2.7}$$

Auf der Erde gilt  $g = 9.81 \, \frac{\text{N}}{\text{kg}}$ .

 Die Spannenergie einer Feder mit Federkonstante D, die einem linearen Kraftgesetz gehorcht und um die Strecke s gedehnt wird, ergibt sich aus

$$E = \frac{1}{2} \cdot D \cdot s^2. \tag{2.8}$$

#### Nicht mechanische Energieformen

• Die **thermische Energie** bei der Temperatur T (gemessen in Kelvin) eines Ensembles aus N Molekülen, die jeweils f Bewegungsfreiheitsgrade besitzen, ergibt sich durch [4]

$$E = \frac{f}{2} \cdot k_B \cdot T \tag{2.9}$$

mit der Boltzmannkonstanten  $k_B = 1{,}381 \cdot 10^{-23} \, \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}.$ 

Erhöht man die Temperatur eines Körpers mit Masse m und spezifischer Wärmekapazität c um  $\Delta T$ , so erhöht sich dessen thermische Energie um [3]

$$\Delta E = c \cdot m \cdot \Delta T. \tag{2.10}$$

• Die **elektrische Energie**, die einem elektrischen Widerstand R in der Zeitspanne t zugeführt wird, ist gegeben durch [5]

$$E = U \cdot I \cdot t, \tag{2.11}$$

wenn an ihm die Spannung U abfällt und durch ihn der Strom I fließt.

Dies kann mithilfe der Definition des elektrischen Widerstands  $R=\frac{U}{I}$  umgeformt werden zu

$$E = \frac{U^2}{R} \cdot t. \tag{2.12}$$

• Die Energie eines Photons der Frequenz f wird berechnet durch [6]

$$E = h \cdot f \tag{2.13}$$

mit dem Planck'schen Wirkungsquantum  $h = 6,6260693 \cdot 10^{-34} \,\mathrm{Js}.$ 

• Chemische Energie bezeichnet die Energie, die in chemischen Verbindungen gespeichert ist und durch chemische Reaktionen frei werden kann [7]. Es handelt sich dabei um einen makroskopischen Ausdruck, der verwendet wird, um Energie zu beschreiben, welche mit elektrischen Wechselwirkungen in Atomen und Molekülen verbunden ist [8].

#### Energieerhaltungssatz

Ein wichtiges Grundgesetz ist der Energieerhaltungssatz [2]:

Die Gesamtenergie eines abgeschlossenen physikalischen Systems bleibt zeitlich konstant, wobei die verschiedenen Energieformen ganz oder teilweise ineinander umgewandelt werden können.

Energie ist eine Erhaltungsgröße. Dies gilt auch für die relativistische Energie.

#### Leistung

Die Arbeit pro Zeit wird **Leistung** P genannt [2]:

$$P = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} \tag{2.14}$$

Thre Einheit ist [Leistung] =  $1 \frac{J}{s} = 1 W$ .

#### Elektrische Leistung

Aus den Gleichungen (??) und (2.14) folgt für die elektrische Leistung:

$$P = U \cdot I \tag{2.15}$$

Mit Gleichung (2.12) lässt sich dies umformen zu

$$P = \frac{U^2}{R}. (2.16)$$

#### Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad einer Umwandlung der Energie  $E_1$  in die Energie  $E_2$  ist definiert durch

$$\eta = \frac{E_2}{E_1}. (2.17)$$

Der gesamte Wirkungsgrad eines Prozesses, der aus mehreren Teilprozessen besteht, ergibt sich aus dem Produkt der einzelnen Wirkungsgrade.

## 2.1.2 Windenergie

Die folgende Herleitung geht auf Betz zurück.

Die maximal aus dem Wind entnehmbare Leistung berechnet sich wie folgt [9]:

Wir betrachten ein Windpaket der Breite dx und Masse m, das aus Luft der Dichte  $\varrho$  besteht und sich durch eine Fläche F bewegt:

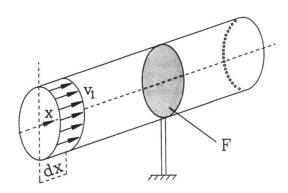


Abb. 2.1: Strömung des Windes der Geschwindigkeit  $v_1$  durch die Kontrollfläche F. Abbildung aus [9]

Für die kinetische Energie des Windpaketes gilt bei einer Geschwindigkeit von  $v_1$ 

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2. \tag{2.18}$$

Für den Durchfluss  $\dot{m}$  des Windes durch die Fläche F gilt nach der Definition der Dichte  $\varrho=\frac{m}{V}$ 

$$\dot{m} = \varrho \cdot F \cdot \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \tag{2.19}$$

$$= \varrho \cdot F \cdot v_1. \tag{2.20}$$

Damit folgt für die Leistung des durch die Fläche F strömenden Windes

$$P = \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t} \tag{2.21}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v \qquad (2.22)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \varrho \cdot F \cdot v_1^3. \qquad (2.23)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \varrho \cdot F \cdot v_1^3. \tag{2.23}$$

Diese Leistung lässt sich jedoch nicht vollständig dem Wind entnehmen, wie im folgenden gezeigt wird. Dafür geht man von einem idealisierten Windrad aus, das dem Wind in einer aktiven Ebene durch Verzögerung verlustlos Leistung entnimmt. Er geht von einer homogenen Windströmung  $v_1$  aus, die durch das Windrad auf die Geschwindigkeit  $v_3$  weit hinter der Radebene verzögert wird. In der Radebene besitzt der Wind die Geschwindigkeit  $v_2$ . Es wird also eine Stromröhre vorausgesetzt, die sich aus Kontinuitätsgründen aufweiten muss. Die Kontinuitätsgleichung für die beschriebene Situation lautet

$$\varrho \cdot v_1 \cdot F_1 = \varrho \cdot v_2 \cdot F = \varrho \cdot v_3 \cdot F_3. \tag{2.24}$$

Dabei wurde die Dichte  $\varrho$  aufgrund der geringen Druckänderungen als konstant angenommen.

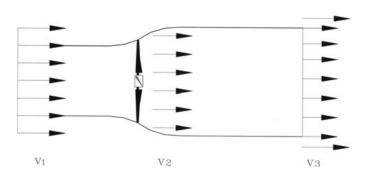


Abb. 2.2: Strömung durch ein stark idealisiertes Windrad nach Betz. Die durchströmten Kontrollflächen tragen von links nach rechts die Bezeichnungen  $F_1$ , F und  $F_3$ . Abbildung aus [9]

Die dem Wind entzogene kinetische Energie ergibt sich aus der Differenz der kinetischen Energie beim Eintritt und der beim Austritt:

$$E_{\text{Ent}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left( v_1^2 - v_3^2 \right) \tag{2.25}$$

Damit folgt die dem Wind entnommene Leistung:

$$\dot{E}_{\text{Ent}} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot \left(v_1^2 - v_3^2\right)$$
 (2.26)

Zwischen den Situationen  $v_3 = v_1$  (der Wind wird nicht verzögert und keine Leistung entnommen) und  $v_3 = 0$  (der Wind wird vollständig abgebremst und dadurch der Durchsatz  $\dot{m}$  auf Null geschrumpft) gibt es einen Wert der günstigsten Leistungsaufnahme. Dieser kann berechnet werden, wenn  $v_2$  bekannt ist, da daraus die Höhe des Durchsatzes

$$\dot{m} = \rho \cdot F \cdot v_2 \tag{2.27}$$

folgt. Dazu kann man folgende plausible Annahme² machen:

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \tag{2.28}$$

Einsetzen der Gleichungen (2.27) und (2.28) in Gleichung (2.26) ergibt:

$$\dot{E}_{\text{Ent}} = \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \varrho \cdot F \cdot v_1^3}_{\text{Windleistung}} \cdot \underbrace{\left[\frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_3}{v_1}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{v_3}{v_1}\right)^2\right)\right]}_{\text{Leistungsbeiwert } c_P}$$
(2.29)

Der Leistungsbeiwert hängt vom Verhältnis  $\frac{v_3}{v_1}$  ab. Der maximal erreichbare Leistungsbeiwert kann durch Bestimmung des Maximums des Ausdrucks in der 2. geschweiften Klammer von Gleichung (2.29) ermittelt werden zu

$$c_{\text{P, Betz}} = \frac{16}{27} = 0.59.$$
 (2.30)

Er tritt für den Fall  $v_3 = \frac{1}{3} \cdot v_1$  auf.

In realen Windturbinen treten zusätzliche Verluste auf, sodass diese Werte von bis zu  $c_P \approx 0.5$  aufweisen.

Die elektrische Leistung einer Windturbine ist proportional zu der hergeleiteten maximal dem Wind entnehmbaren Leistung. Sie ist aufgrund des Wirkungsgrads von Getriebe und Generator um einen entsprechenden Faktor nach unten skaliert.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Diese wird durch das Froude-Rankinesche Theorem belegt. Näheres dazu in [9].

#### Daten zur Windenergie

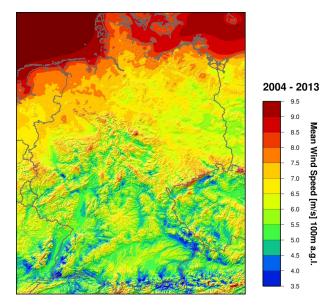


Abb. 2.3: Mittlere Windgeschwindigkeit in  $\frac{m}{s}$  100 m über Grund von 2004 bis 2013. Abbildung aus [10]

Typische Windkraftanlagen besitzen eine Nennleistung im kleinen einstelligen MW-Bereich [10]. Das folgende Diagramm stellt beispielhaft die Leistung einer realen Windkraftanlage in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit dar:

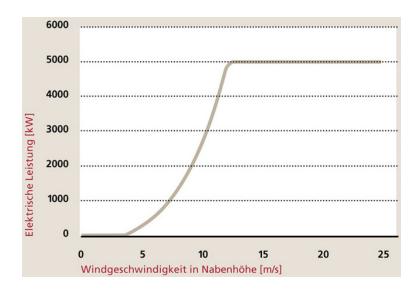


Abb. 2.4: Berechnete Leistungskennlinie der Windkraftanlage Multibird M5000 (Nennleistung 5000 kW) aus dem Windpark Trianel Borkum. Ab einer Windgeschwindigkeit von 12,5  $\frac{m}{s}$  wird die Anlage gedrosselt. Abbildung aus [11]

Ab einer Windgeschwindigkeit von  $3.5 \, \frac{m}{s}$  (Windstärke 3) produziert die Anlage, deren Leistungskennlinie in Abbildung 2.4 dargestellt ist, Strom [12, 13]. Ab einer Windgeschwindigkeit von  $12.5 \, \frac{m}{s}$  (Windstärke 6) wird die Nennleistung von  $5000 \, \mathrm{kW}$  erreicht. Bei höheren Windgeschwindigkeiten könnte mehr Energie produziert werden, doch die Windkraftanlage wird konstant auf diese konstante Ausgabeleistung geregelt, um die Belastung des Rotors zu minimieren. Zum Schutz wird die Anlage bei Windgeschwindigkeiten über  $25 \, \frac{m}{s}$  (Windstärke 10) abgeschaltet.

#### 2.1.3 Drehmoment

Das **Drehmoment** der über den wirksamen Kraftarm  $\vec{r}$  angreifenden Kraft  $\vec{F}$  ist gegeben durch [3]

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}.\tag{2.31}$$

## 2.2 Themen aus der Elektrizitätslehre

#### 2.2.1 Elektrischer Widerstand

Bei Ohmschen Leitern sind Strom I und Spannungsabfall U entlang des Leiters einander proportional [14]. Ihr **elektrischer Widerstand** ist der Proportionalitätsfaktor:

$$R = \frac{U}{I} \tag{2.32}$$

## 2.2.2 Themen aus dem Bereich Elektromagnetismus

#### Magnetfeld einer Spule

Für das Magnetfeld im Innern einer langgestreckten Spule gilt [14]

$$B = \mu_0 \cdot \frac{n}{l} \cdot I, \tag{2.33}$$

wobei  $\mu_0=1,2566371\cdot 10^{-6}\,\frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$  die Permeabilitätskonstante, n die Windungszahl, l die Spulenlänge und I der sie durchfließende Strom sind.

#### Lorentzkraft

Für die Kraft auf ein Teilchen mit Ladung q und Geschwindigkeit v, das von einem elektrischen Feld  $\vec{E}$  und einem Magnetfeld  $\vec{B}$  umgeben ist, gilt [14]

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right). \tag{2.34}$$

#### Induktion

Der magnetische Fluss  $\Phi_{\text{mag}}$  durch eine von einem Magnetfeld  $\vec{B}$  durchsetzte Fläche mit Flächenvektor  $\vec{A}$  ist [14]

 $\Phi_{\text{mag}} = \int \vec{B} \cdot \vec{A}. \tag{2.35}$ 

Das **Faraday'sche Induktionsgesetz** besagt, dass die in einer Leiterschleife induzierte Spannung gleich der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses durch diese Leiterschleife ist:

$$U_{\rm ind} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \int \vec{B} \cdot \vec{A} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_{\rm mag}}{\mathrm{d}t}$$
 (2.36)

Hierbei sind  $\vec{A}$  der Flächenvektor der Windungsfläche und  $\vec{B}$  das die Spule durchsetzende Magnetfeld.

Das negative Vorzeichen im Induktionsgesetz hat folgende Auswirkung:

Die durch Induktion entstehenden Ströme, Felder und Kräfte behindern stets den die Induktion einleitenden Vorgang.

#### **Motor und Generator**

Eine wichtige elektrotechnische Anwendung stellen elektrische Motoren und Generatoren dar [14].

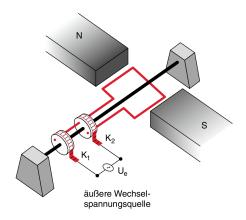


Abb. 2.5: Einfaches Modell eines Wechselstromsynchronmotors mit einer drehbaren Spule. Abbildung aus [14]

In Abbildung 2.5 ist ein Modell eines Wechselstromgenerators dargestellt: Eine rechteckige Spule mit Windungsfläche F wird in einem homogenen Magnetfeld B mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  gedreht. Da sich hierdurch der magnetische Fluss durch die Spule zeitlich ändert, liefert sie die induzierte Spannung

$$U_{\text{ind}} = B \cdot F \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t). \tag{2.37}$$

Ein Generator wandelt also mechanische Energie (die zum Antrieb der Spule gebraucht wird) in elektrische Energie um.

Legt man andererseits an die Klemmen  $K_1$  und  $K_2$  eine Wechselspannung  $U_e$ , so dreht sich die Spule (eventuell erst nach Anstoßen) mit der Frequenz dieser Wechselspannung. Die Bewegung der Spule wird dabei von der Lorentzkraft hervorgerufen, die auf die durch den Stromfluss bewegten Elektronen im äußeren Magnetfeld wirkt. Bei jeder Umpolung des Stroms kehrt sich die Richtung der Lorentzkraft um, wodurch die Drehbewegung der Spule entsteht. Dadurch ist der Generator zum **Motor** geworden.

Um obigen Aufbau als **Gleichstrommotor** zu benutzen zu können, muss die Richtung des angelegten Stroms jeweils im richtigen Moment umgepolt werden. Dies geschieht durch den Einbau eines sich mitdrehenden geschlitzten Schleifkontakts, dem Kommutator, der in diesem Fall aus zwei voneinander isolierten Hälften besteht, die mit den beiden Enden der Spule leitend verbunden sind.

Im umgekehrten Betrieb kann dieser Aufbau als **Gleichstromgenerator** verwendet werden. Allerdings liefert der Generator mit dem bisherigen Aufbau eine pulsierende Gleichspannung. Zur Glättung dieser Spannung verwendet man einen Generator mit N Spulen statt einer Spule, deren Ebenen um den Winkel  $\frac{\pi}{N}$  gegeneinander verdreht sind. Mit N zwei-

teiligen Kommutatoren können die Wechselspannungen der Spulen gleichgerichtet und dann überlagert werden.

#### 2.2.3 Thermoelektrische Effekte

#### Seebeck-Effekt

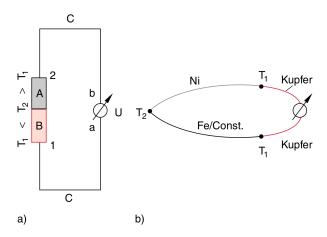


Abb. 2.6: Zur Thermospannung a) Schematische Darstellung des Schaltkreises b) Beispiel für ein Thermoelement. Abbildung aus [14]

Mit dem in Abbildung 2.6 eingezeichneten Spannungsmessgerät misst man eine Spannung am Thermoelement, die sogenannte **Thermospannung** [15]. Die oben beschriebene Kontaktspannung tritt zwar an den einzelnen Kontakten auf, summiert sich aber insgesamt zu Null, liefert also keinen Beitrag zur gemessenen Thermospannung. Diese ist auf das Phänomen der **Thermodiffusion** zurückzuführen<sup>3</sup>. Diese entsteht folgendermaßen:

Wir betrachten einen Metallstab. Je höher die Temperatur ist, desto größer ist die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen im Metallstab.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>In einigen Lehrbüchern wird die Entstehung der Thermospannung falsch dargestellt. Ein interessanter Artikel hierzu ist [15].

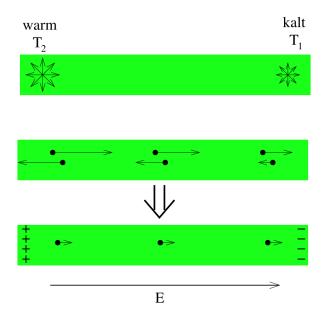


Abb. 2.7: Klassisches Erklärungsmodell zur Entstehung der Thermodiffusion. Abbildung aus [15]

Bringt man die Stabenden auf unterschiedliche Temperaturen, sind in jedem Abschnitt des Stabes die von der warmen Seite kommenden Elektronen schneller als die in umgekehrter Richtung laufenden. Dies führt insgesamt zu einer Diffusion zum kalten Ende. Die so entstehende Thermodiffusionsspannung führt zu einem Diffusionsstrom in umgekehrter Richtung. Das dadurch aufgebaute elektrische Feld bringt den Diffusionsstrom schließlich zum Erliegen. Die Thermodiffusionsspannung ist in erster Näherung proportional zur Temperaturdifferenz zwischen den Stabenden. Es gilt

$$U_{\rm TD} = -Q \cdot dT \tag{2.38}$$

mit dem Seebeck-Koeffizienten Q. Da dieser materialspezifisch ist, misst man bei unterschiedlichen Materialien unterschiedlich große Spannungen. Typische Werte für Metalle sind  $Q = 10^{-5} - 10^{-6} \frac{\text{V}}{\text{K}}$ , für Halbleiter  $Q = 10^{-3} \frac{\text{V}}{\text{K}}$  [14].

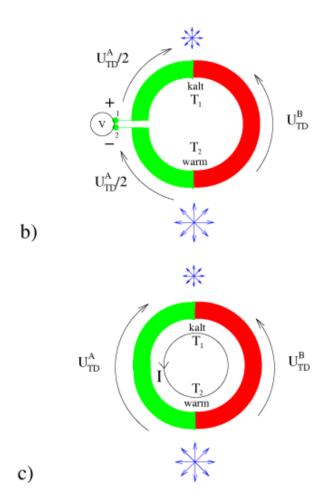


Abb. 2.8: Zur Entstehung eines Thermoelements. Abbildung aus [15]

Zum Bau eines **Thermoelements** Fügt man zwei Metallstäbe wie in Abbildung 2.8 zusammen [15]. Das in Abbildung 2.8b) eingebaute Spannungsmessgerät misst die **Thermospannung**, die sich aus der Differenz der beiden Thermodiffusionsspannungen ergibt:

$$U_{\text{Thermo}} = U_{\text{TD}}^{\text{A}} - U_{\text{TD}}^{\text{B}} \tag{2.39}$$

Verbindet man die Metallstäbe wie in Abbildung 2.8c) ohne eingebautes Spannungsmessgerät miteinander, fließt ein durch die Thermospannung bedingter Strom. Seine Richtung wird vom Material mit der größeren Thermodiffusionsspannung bestimmt.

Die auch "Peltier-Element" genannten Thermoelemente sind häufig folgendermaßen aufgebaut:

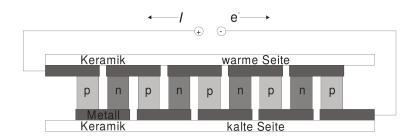


Abb. 2.9: Typischer Aufbau eines Peltier-Elements aus p- und n-dotierten Bauelementen. Abbildung aus [16]

Man verwendet meist einen Aufbau aus verschiedenen dotierten Halbleitern, da diese im Vergleich zu Aufbauten aus verschiedenen Metallen bei selber Temperaturdifferenz höhere Spannungen liefern.

Aufgrund des ungewollten Wärmestroms von heißer zu kalter Seite des Thermoelements ist sein Wirkungsgrad begrenzt.

#### Peltier-Effekt

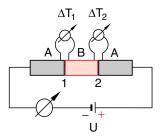


Abb. 2.10: Zum Nachweis des Peltier-Effektes. Abbildung aus [14]

Der **Peltier-Effekt** stellt eine Umkehrung der Erzeugung eines Thermostromes dar [14, 17]: Lässt man durch einen Stab, der wie in Abbildung 2.10 aus aneinander gelöteten verschiedenen Metallen besteht, einen Strom, so kühlt sich ein Kontakt ab und der andere erwärmt sich. Dieser Effekt entsteht, da ein isothermer elektrischer Strom in einem Metall mit einem Wärmestrom einhergeht.

Für die an der Kontaktstelle 1 erzeugte Wärmeleistung gilt

$$\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = (\Pi_A - \Pi_B) \cdot I \tag{2.40}$$

mit den **Peltier-Koeffizienten**  $\Pi_A$ ,  $\Pi_B$  der Materialien. Die Werte der Peltier-Koeffizienten liegen typischerweise im Bereich  $\Pi \approx 10^2 \, \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}}$ .

Die Stromrichtung bestimmt das Vorzeichen von  $\frac{dW}{dt}$ . Ist der Quotient positiv, wird Wärme erzeugt, ist er negativ, wird dem Kontakt Wärme entzogen.

## 2.3 Themen aus der Festkörperphysik

#### 2.3.1 Funktionsweise einer Solarzelle

Eine Solarzelle wandelt Lichtenergie in elektrische Energie um.

Das Herzstück einer Solarzelle ist ein **p-n-Übergang** [18]. Dieser besteht aus einem p-dotierten Halbleiter (z. B. p-dotiertes Silizium), der direkt an einen n-dotierten Halbleiter grenzt. Im Grenzbereich zwischen beiden Halbleitern bildet sich aufgrund des Diffusion von Elektronen in den p-Halbleiter ("Diffusionsstrom") und Löchern in den n-Halbleiter eine Raumladungszone. Diese ist mit der Diffusionsspannung  $V_D$  verbunden. Die Diffusionsspannung ruft den Feldstrom hervor, dessen Richtung dem Diffusionsstrom entgegengesetzt ist. Es stellt sich ein Gleichgewicht ein. In der folgenden Abbildung ist der p-n-Übergang im Gleichgewicht im Bänderschema dargestellt:

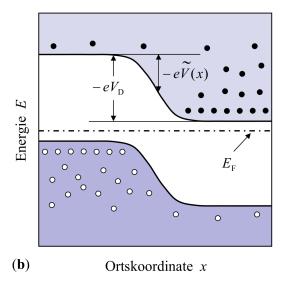


Abb. 2.11: p-n-Übergang im Gleichgewicht. Die Bandkanten sind um die Diffusionsspannung  $V_D$  gegeneinander verschoben. Die Punkte deuten Elektronen, die offenen Kreise Löcher an. Abbildung aus [18]

Trifft ein Photon auf einen Halbleiter, so wir dadurch ein Elektronen-Loch-Paar erzeugt. Geschieht dies in der Raumladungszone eines p-n-Übergangs, so werden die erzeugten Ladungsträger durch das dort herrschende elektrische Feld getrennt. Es entsteht ein zusätzlicher Strom im p-n-Übergang in Richtung des Feldstroms.

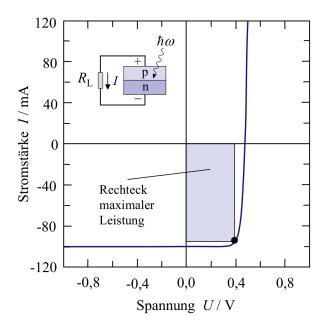


Abb. 2.12: Strom-Spannungscharakteristik einer Siliziumsolarzelle bei Beleuchtung. Zur Berechnung der Kennlinie wurden die Parameterwerte  $I_L=100\,\mathrm{mA}$  und  $I_s=1\,\mathrm{nA}$  benutzt.

Inlay: Prinzipschaltkreis mit dem Verbraucherwiderstand  $R_L$  (I ist die Stromrichtung der Elektronen). Abbildung aus [18]

Baut man die Solarzelle wie in Abbildung 2.12 (Inlay) in einen Stromkreis ein, fließt aufgrund des eingestrahlten Lichts ein Strom.

Wird der Verbraucherwiderstand so gewählt, dass das eingezeichnete Rechteck maximalen Flächeninhalt besitzt, so bezeichnet man dessen Eckpunkt auf der Messkurve als **Maximum Power Point**, da so die elektrische Leistung am höchsten ist [1].

Für den **Gesamtstrom** der Schaltung aus Abbildung 2.12 gilt [18]:

$$I = I_S \cdot \left[ \exp\left(\frac{e \cdot U}{k_B \cdot T}\right) - 1 \right] - I_L \tag{2.41}$$

Hierbei ist  $I_S$  die Summe der Feldströme und  $I_L$  der Kurzschlussstrom.

Als **Kurzschlussstrom** wird der Strom bezeichnet, der durch die Solarzelle fließt, wenn sie kurzgeschlossen wird, das heißt, wenn zwischen ihren Anschlüssen die Spannung 0 V beträgt. Er ist proportional zur Bestrahlungsstärke.

Die **Leerlaufspannung** ist die Spannung, die zwischen den beiden Anschlüssen der Solarzelle vorliegt, wenn I = 0 gilt. Sie wächst logarithmisch mit der Bestrahlungsstärke [1].

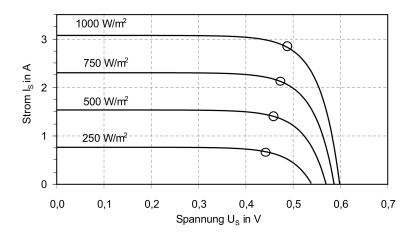


Abb. 2.13: Kennlinien einer Standard-Solarzelle bei verschiedenen Bestrahlungsstärken. Der Maximum Power Point ist jeweils als Kreis eingezeichnet. Abbildung aus [19]

Um die Kennlinie realer Solarzellen beschreiben zu können, muss in Gleichung (2.41) noch der Idealitätsfaktor  $\alpha$  eingefügt werden [1]. Die Kennlinie einer realen Solarzelle wird damit durch folgende Gleichung beschrieben:

$$I = I_S \cdot \left[ \exp\left(\frac{e \cdot U}{\alpha \cdot k_B \cdot T}\right) - 1 \right] - I_L \tag{2.42}$$

Der Idealitätsfaktor einer idealen Diode, bei der ausschließlich strahlende Rekombination stattfindet, ist  $\alpha=1$  [20]. Für einen reinen Rekombinationsstrom im Falle von Rekombination in der Raumladungszone eines pn-Übergangs durch Störstellen in der Bandlücke kann theoretisch maximal der Wert 2 angenommen werden. In der Praxis sind jedoch auch höhere Werte möglich.

#### Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad von Solarzellen ist unter anderem dadurch begrenzt, dass Photonen mit Energien, die kleiner als die Bandlücke sind, nicht absorbiert werden und dadurch, dass der Energieüberschuss der energiereichen Photonen verloren geht, da sie nur ein Elektron-Loch-Paar erzeugen [18]. Abhilfe verschaffen mehrschichtige Solarzellen, die aus Materialien mit unterschiedlichen Bandlücken aufgebaut sind. So lassen sich mit GaAs-Solarzellen Wirkungsgrade von bis zu 25 % erzielen.

Um einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen, müssen die Solarzellen möglichst gut zum Sonnenspektrum passen. Am höchsten ist dieser, wenn die Bandlücke genau so groß ist wie die Photonenenergie im Maximum des Sonnenspektrums.

Reale polykristalline Solarzellen wie sie in der Versuchsreihe eingesetzt werden erreichen einen Wirkungsgrad von bis zu 15 %.

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle sinkt mit steigender Temperatur, da sich durch die Erwärmung der Bandabstand im Halbleiter verringert [1]. Der Kurzschlussstrom bleibt bei einem Temperaturen praktisch unverändert, die Leerlaufspannung jedoch nimmt ab, sodass die Leistung der Solarzelle geringer wird.

#### Daten zur Solarenergie

Die Solarkonstante beträgt  $E_S = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  [1]. Sie gibt die Bestrahlungsstärke außerhalb der Erdatmosphäre an. Am Erdboden kommen davon an einem klaren Sommertag auf einer Fläche senkrecht zur Sonneneinstrahlung  $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  an.

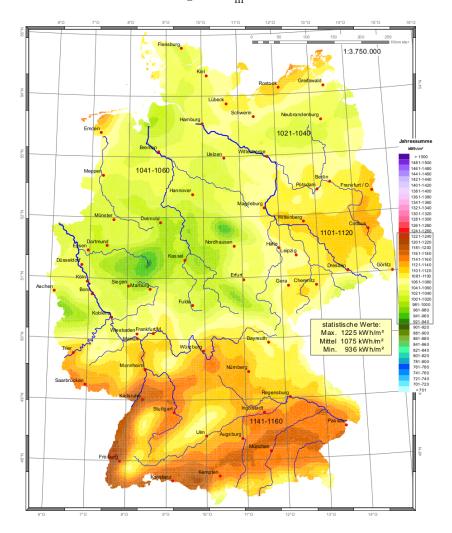


Abb. 2.14: Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland: Jahressummen 2014. Die Globalstrahlung wird in  $\frac{W}{m^2}$  gemessen und gibt die Summe aus Direktstrahlung der Sonne und Diffusstrahlung an [1]. In der Karte sind die Werte der Globalstrahlung für das Jahr 2014 aufsummiert und die sich daraus ergebenden Energien pro Fläche eingezeichnet. Abbildung aus [21]

## 2.4 Themen aus der Wärmelehre

## 2.4.1 Wärmeleitung in Festkörpern

Wärmeleitung ist neben Konvektion und Wärmestrahlung einer der Mechanismen des Wärmetransports. Wärmeleitung ist an Materie gebunden [2]. Dabei findet ein Energietransport, im Allgemeinen aber kein Massentransport statt. Die Wärmeleitung in festen Stoffen basiert auf der Kopplung zwischen benachbarten Atomen, wodurch die Schwingungsenergie der Atome an der Stelle x zur Stelle x dx übermittelt werden kann, ohne dass die Atome selbst dorthin wandern.

Wir betrachten einen Stab der Länge L mit der Querschnittsfläche A, der an seinen beiden Enden ständig auf den Temperaturen  $T_1$  bzw.  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ) gehalten wird. Nach einiger Zeit stellt sich ein stationärer Zustand ein, in dem im Stab ein Temperaturgefälle  $\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}$  vorliegt. Falls Wärmeverluste durch die Seitenwände vernachlässigt werden können, fließt pro Zeiteinheit die konstante Wärmemenge

$$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} \tag{2.43}$$

durch die Querschnittsfläche A. Dabei ist  $\lambda$  ( $[\lambda] = \frac{W}{m \cdot K}$ ) eine materialabhängige Konstante. Sie heißt **Wärmeleitfähigkeit**. In Tabelle 2.1 sind die Wärmeleitfähigkeiten einiger Stoffe aufgeführt:

Stoff	$\lambda/(Wm^{-1}K^{-1})$
Aluminium	221
Eisen	67
Gold	314
Kupfer	393
Zink	112
Blei	35
Normalbeton	2,1
Gasbeton	0,22
Glas	0,8
Glaswolle	0,04
Holz	0,13
Eis	2,2
Wasser	0,6
Luft ( $p = 1$ atm)	0,026
$CO_2$ ( $p = 1$ atm)	0,015
Helium ( $p = 1$ atm)	0,14

Tab. 2.1: Die Wärmleitfähigkeit einiger Stoffe bei 20 °C. Tabelle aus [2]

In Metallen tragen die frei beweglichen Elektronen durch Stöße untereinander und mit den Atomrümpfen wesentlich zum Energietransport bei. Bei nicht zu tiefen Temperaturen ist die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  gemäß dem **Wiedemann-Franz-Gesetz** proportional zur elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$  [6]:

$$\frac{\lambda}{\sigma} = T \cdot 2,45 \cdot 10^{-8} \, \frac{V^2}{K^2} \tag{2.44}$$

### 2.4.2 Wärmestrahlung

#### Die Gesetze von Planck und Wien

Jeder Körper mit einer Temperatur T > 0 K sendet abhängig von seiner Oberflächentemperatur **Wärmestrahlung**<sup>4</sup> aus [3]. Diese Art des Energieaustauschs eines Körpers mit seiner Umgebung ist nicht an Materie gebunden, da es sich dabei um transversale elektromagnetische Wellen handelt [2].

Das Planck'sche Strahlungsgesetz<sup>5</sup> beschreibt die Wärmestrahlung eines Hohlraumstrahlers (Schwarzer Strahler) im thermischen Gleichgewicht [6]. Demnach gilt für die spektrale Energiedichteverteilung der Hohlraumstrahlung

$$w_f(f,T) df = \frac{8\pi h f^3}{c^3} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hf}{k_B T}\right) - 1} df.$$
 (2.45)

Sie gibt die räumliche Energiedichte pro Frequenzintervall d $f=1\,\frac{1}{\rm s}$  an  $([w_f(f,T)]=\frac{\rm Js}{\rm m}^3)$ . Für die sich daraus ergebende spektrale Verteilung der **Strahlungsdichte** pro Wellenlängenintervall d $\lambda=1\,\rm m$  gilt

$$S_{\lambda}^{*}(\lambda, T) \, d\lambda \, d\Omega = \frac{c}{4\pi} \cdot w_{\lambda} \, d\lambda \, d\Omega \qquad (2.46)$$

Sie hat folgendes Aussehen (Im Diagramm wurde ein anderer Wellenlängenbereich gewählt.):

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Da ein Körper i. A. nicht nur elektromagnetische Strahlung aus dem infraroten Spektralbereich aussendet, ist die Bezeichnung etwas irreführend. Die Wärmestrahlung heißt auch "Thermische Strahlung". Umgangssprachlich wird sie auch "Infrafotstrahlung" genannt, da das elektromagnetische Spektrum von Körpern bei Raumtemperatur die höchste Intensität im infraroten Spektralbereich besitzt.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Plancks wesentliche Annahme bei der Aufstellung des Gesetzes war, dass monochromatisches Licht der Frequenz f bei Absorptions- und Emissionsvorgängen nur in **Energiequanten** der Größe  $E = h \cdot f$  auftritt.

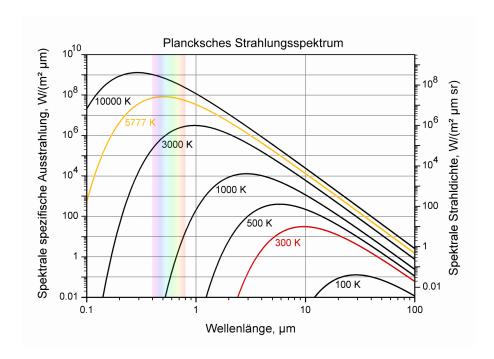


Abb. 2.15: Spektrale Verteilung  $S^*(\lambda)$  der Strahlungsdichte eines Schwarzen Strahlers im Wellenlängenintervall  $\Delta\lambda=1~\mu\mathrm{m}$  (rechte Achse). Das Spektrum der Sonne entspricht in etwa dem eines Schwarzen Strahlers der Oberflächentemperatur 5777 K. Die Oberflächentemperatur der Erde beträgt ungefähr 300 K. Quelle: [22]

Mit steigender Temperatur erhöht sich die Intensität und das Maximum der Strahlungsdichte verschiebt sich zu kleineren Wellenlängen. Das **Wien'sche Verschiebungsgesetz** verknüpft das Maximum der Intensitätsverteilung der Wärmestrahlung mit der Temperatur T der Strahlungsquelle:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2,898 \,\text{mm} \cdot \text{K}}{T} \tag{2.47}$$

Durch eine Messung des von einem Körper ausgesandten elektromagnetischen Spektrums kann also dessen Oberflächentemperatur kontaktlos bestimmt werden [4]. Dies wird in der Thermografie genutzt. Dabei muss allerdings die Oberflächenbeschaffenheit des untersuchten Körpers berücksichtigt werden, weil es sich dabei oft nicht um Schwarze Strahler handelt. Im nächsten Abschnitt wird auf den Einfluss der Oberfläche auf das ausgesandte Spektrum eingegangen.

Aus dem Planck'schen Strahlungsgesetz kann das **Stefan-Boltzmann-Gesetz** abgeleitet werden, welches die abgestrahlte Leistung eines Körpers beschreibt [4]:

$$P = \varepsilon \cdot \sigma_{\rm SB} \cdot A \cdot T^4 \tag{2.48}$$

Hier sind  $\sigma_{\rm SB}=5{,}67\cdot 10^{-8}\,\frac{\rm W}{\rm m^2K^4}$ die Stefan-Boltzmann-Konstante, Adie Oberfläche des

Körpers und  $0 \le \varepsilon \le 1$  der Emissionsgrad des Körpers. Im Fall eines Schwarzen Strahlers gilt  $\varepsilon = 1$ . Genaueres hierzu folgt im nächsten Abschnitt.

#### Absorptions- und Emissionsvermögen

Die Intensität der Wärmestrahlung eines Körpers hängt nicht nur von seiner Temperatur, sondern auch von seiner Oberflächenbeschaffenheit ab.

Für das **Absorptionsvermögen** gilt [3]

$$a = \frac{\text{absorbierte Strahlungsleistung}}{\text{einfallende Strahlungsleistung}} = \frac{I_{\text{abs}}}{I_{\text{ein}}}$$
(2.49)

und für das Reflexionsvermögen

$$r = \frac{\text{reflektierte Strahlungsleistung}}{\text{einfallende Strahlungsleistung}} = \frac{I_{\text{refl}}}{I_{\text{ein}}}.$$
 (2.50)

Falls keine Transmission vorliegt, gilt

$$a + r = 1. (2.51)$$

Analog wird das Emissionsvermögen definiert:

$$e = \frac{\text{emittierte Strahlungsleistung}}{\text{einfallende Strahlungsleistung}} = \frac{I_{\text{em}}}{I_{\text{ein}}}$$
(2.52)

Das **Kirchhoff'sche Gesetz** besagt, dass für alle Körper im thermischen Gleichgewicht mit der Hohlraumstrahlung das Verhältnis von Emissions- zu Absorptionsvermögen bei der Frequenz f gleich der spektralen Strahlungsdichte  $S_f^*$  der Hohlraumstrahlung ist [6]:

$$\frac{e_f}{a_f} = S_f^* \tag{2.53}$$

Für einen Schwarzen Strahler gilt a=1. Daher ist bei fester Frequenz sein Emissionsvermögen gleich der spektralen Strahlungsdichte  $S_f^*$  der Hohlraumstrahlung.

Da dies für beliebige Körper nicht gilt, muss bei auf der Wärmestrahlung basierenden Temperaturmessungen immer der **Emissionsgrad** des Stoffes, aus dem die Oberfläche des Körpers besteht, berücksichtigt werden [23]. Er gibt das Verhältnis der spektralen Strahlungsdichte des Messobjektes und der spektralen Strahlungsdichte eines Schwarzen Strahlers an:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{S_{\lambda, \text{ Messobjekt}}^*(\lambda, T)}{S_{\lambda, \text{ Schwarzer Strahler}}(\lambda, T)}$$
(2.54)

Stark reflektierende Stoffe beispielsweise besitzen einen niedrigen Emissionsgrad.

Material	0,65	0,7 · · · 1,1	1,45 · · · 1,7	2 · · · 2,5	4,5 · · · 5,5	8 · · · 14
Aluminium, blank	_	0,05 - 0,25	0,05 - 0,25	0,04 - 0,2	0,03 - 0,15	0,02 - 0,15
eloxiert	-	0,2 - 0,4	0,1 - 0,4	0,1 - 0,4	0,1 - 0,4	0,5 - 0,9
Asphalt	-	-	-	-	-	0,9 - 0,98
Backofen	-	-	-	-	-	$\approx 0.96$
Beton	-	-	-	-	-	0,55 - 0,65
Bitumen	-	-	-	-	-	$\approx 0.96$
Eis	-	-	-	-	0,9 - 0,95	0,9 - 0,95
Emaille	-	-	-	-	-	0,84 - 0,88
Erde	-	-	-	-	0,5 - 0,8	0,6 - 0,95
Farben und Lacke	-	-	-	-	0,9 - 0,95	0,92 - 0,96
Gips	-	-	-	-	0,4 - 0,97	0,8 - 0,9
Glas	-	-	-	-	$\approx 0.95$	0,85 - 0,95
Gold	0,1 - 0,3	0,01 - 0,1	0,01 - 0,1	-	-	-
Grafit/Kohle/Ruß	0,7 - 0,95	0,7 - 0,95	0,7 - 0,95	0,7 - 0,95	0,7 - 0,95	
Gummi, schwarz	-	-	-	-	-	$\approx 0.94$
Haut, menschlich	-	-	-	-	-	$\approx 0.98$
Heizkörper	-	-	-	-	-	0,8 - 0,85
Holz	-	-	-	-	-	0,8 - 0,9
Kalkputz	-	-	-	-	-	$\approx 0.91$
Klinker, glasiert	-	-	-	-	-	$\approx 0.75$
Kunststoff, intr.	-	-	-	-	0,65 - 0,95	0,65 - 0,95
Kupfer, blank	0,1 - 0,12	0,06 - 0,2	0,06 - 0,2	0,06 - 0,1	0,05 - 0,1	0,03 - 0,1
oxidiert	0,6 - 0,8	0,5 - 0,8	0,4 - 0,8	0,2 - 0,7	0,2 - 0,7	0,2 - 0,7
Lacke, Farben	-	-	-	-	0,6 - 0,9	0,7 - 0,95
Leder	-	-	-	-	-	0,75 - 0,8
Messing, blank	-	-	-	0,1 - 0,2	0,05 - 0,1	0,05 - 0,1
oxidiert	-	-	-	-	-	0,56 - 0,64
NiCr, blank	0,2 - 0,4	0,2 - 0,4	0,2 - 0,4	0,2 - 0,4	0 ,2 - 0,4	0,1 - 0,3
oxidiert	0,5 - 0,9	0,65 - 0,9	0,65 - 0,8	0,65 - 0,8	0,65 - 0,8	0,5 - 0,8
Oxid-Keramik	0,4 - 0,6	0,4 - 0,7	0,4 - 0,7	0,4 - 0,7	0,5 - 0,8	0,6 - 0,95
Papier	-	-	-	-	0,6 - 0,9	0,8 - 0,95
Sand	-	-	-	-	-	$\approx 0.9$
Schamotte	-	0,3 - 0,45	0,4 - 0,5	0,4 - 0,5	0,8 - 0,9	0,8 - 0,9
Schnee	-	-	-	-	0,9 - 0,95	0,9 - 0,95
Silber	0,1 - 0,3	0,01 - 0,1	0,01 - 0,1	-	-	-
Stahl, angelassen	0,75 - 0,8	0,7 - 0,85	0,7 - 0,85	0,45 - 0,7	0,3 - 0,6	0,3 - 0,6
blank	0,45 - 0,55	0,4 - 0,45	0,3 - 0,4	0,2 - 0,35	0,1 - 0,3	0,1 - 0,3
gewalzt	0,5 - 0,6	0,45 - 0,55	0,35 - 0,5	0,25 - 0,4	0,2 - 0,3	0,2 - 0,3
oxidiert		0,8 - 0,9	0,8 - 0,9	0,75 - 0,85	0,7 - 0,9	0,6 - 0,8
Steine	0,4 - 0,6	0,4 - 0,7			0,5 - 0,8	
Textilien	-	-	0,7 - 0,85	- , ,		0,75 - 0,95
Wasser	-	-	-	0,6 - 0,9		0,9 - 0,95
Ziegel	-	0,85 - 0,9	0,85 - 0,9	0,85 - 0,9	0,9 - 0,95	0,93 - 0,96

Tab.~2.2: Emissionsgrade verschiedener Materialien für typische Mess-Wellenlängenbereiche in  $\mu{\rm m}$  von Strahlungsthermometern. Tabelle aus [23]

## 3 Versuchsreihe

In diesem Kapitel werden die einzelnen Stationen der Versuchsreihe aus physikalisch-teschnischer Sicht vorgestellt.

### 3.1 Station 1: Diskussion

In Station 1 führen die Schülerinnen und Schüler keine Versuche durch, sondern diskutieren grundsätzliche Fragen zum Thema Energie, Energieerhaltungssatz und Wirkungsgrad. Zur Einbindung der Station in den Versuchstag siehe Kapitel 4.

## 3.2 Station 2: Energieumwandlung

Station 2 beschäftigt sich mit dem Thema Energieumwandlung. Zentraler Bestandteil der Station ist die Umwandlung von kinetischer Energie in elektrische Energie durch einen Handgenerator. Bei den Aufgaben für die Schülerinnen und Schüler steht jeweils im Vordergrund, welche Energieumwandlungsprozesse im Experiment stattfinden sowie welche Energieformen und Energiewandler in der jeweiligen Energieumwandlungskette<sup>1</sup> vorliegen.

Zunächst untersuchen die Schülerinnen und Schüler die Funktionsweise des Handgenerators und lernen, wie man aus einem Elektromotor einen Generator machen kann. In der zweiten Aufgabe bauen sie eine Energiewandlerkette aus Handgenerator, Halogenlampe, Solarzelle und LED. In Aufgabe 3 lernen sie ein Peltierelement kennen und konstruieren aus Handgenerator, Heizfolie, Peltierelement und Motor eine weitere Energiewandlerkette.

In Zusatzaufgabe I betreiben die Schülerinnen und Schüler ein Radio mithilfe des Handgenerators. Zusatzaufgabe II beschäftigt sich genauer mit Energieflussdiagrammen. In Zusatzaufgabe III wird die vom Handgenerator gelieferte Spannung mithilfe eines Oszilloskops untersucht und eine Abschätzung der Wirkungsgrads des Handgenerators vorgenommen.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Die Energieumwandlungsketten in den Aufgaben 2 und 3 der Station wurden auf Basis von [24] konzipiert.

## 3.2.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Für diese Station wurde in Zusammenarbeit mit der mechanischen Werkstatt ein Handgenerator unter Verwendung von Bauteilen der Firma Mädler selbst konstruiert und gefertigt. Dies war aufwendig und nahm viel Zeit in Anspruch.

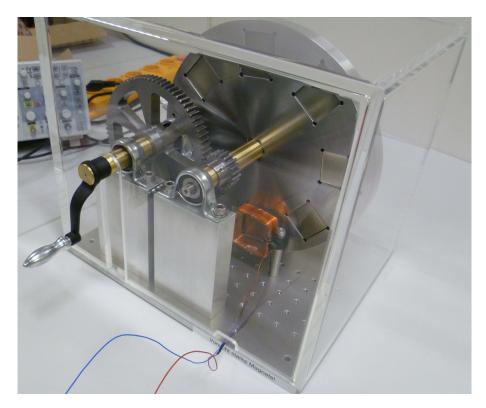


Abb. 3.1: Foto vom Handgenerator

Das Herzstück des Handgenerators ist eine Metallscheibe, in die Neodymmagnete<sup>2</sup> mit abwechselnder Polarität eingelassen sind. Kurbelt man am Handgenerator, so wird über eine mechanische Übersetzung die Metallscheibe in eine Drehbewegung versetzt. Vor der Metallscheibe steht eine flache Spule mit 240 Windungen und Drahtdurchmesser 0,5 mm, in der durch die sich vorbei bewegenden Permanentmagnete eine Wechselspannung induziert wird. In der ersten Version des Handgenerators bremsten Wirbelströme, die durch die bewegten Permanentmagnete in zwei Lagerböcken aus Aluminium hervorgerufen wurden, die Metallscheibe stärker als erwartet. Daher wurden diese dicht an der Metallscheibe stehenden Lagerböcke gegen Lagerböcke aus Kunststoff ausgetauscht. Zum Schutz des Benutzers ist ein Hülsenfreilauf<sup>3</sup> in den Generator eingebaut und eine selbst konstruierte durchsichtige

 $<sup>^2</sup>$  Die Neodymmagnete tragen die Bezeichung "Quadermagnet 40 x 40 x 20 mm, Neodym, N42, vernickelt" und wurden unter der Bestellnummer Q-40-40-20-N bei supermagnete bestellt.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Der Hülsenfreilauf trägt die Bezeichnung "Hülsenfreilauf HFL 1626-L564 INA" und wurde unter der Bestellnummer 506550 bei Reiff bestellt.

Abdeckung über den Generator gestülpt.

Für zukünftige Tests mit dem Handgenerator wurde eine weitere Spule (500 Windungen, Drahtdurchmesser 1 mm) gewickelt. Die in diesem Abschnitt aufgeführten Messwerte beziehen sich alle auf einen Betrieb des Handgenerators mit der ersten Spule (240 Windungen).

### Aufgabe 1

Zur Messung der an der Spule des Handgenerators anliegenden Spannung wird in Aufgabe 1 ein bipolares Zeigermessinstrument verwendet. Dieses wird an die Spule des Handgenerator angeschlossen. Da das Zeigermessinstrument nur einen Messbereich von  $-25\,\mathrm{mV}$  bis  $+25\,\mathrm{mV}$  besitzt, wird zum Schutz und zur besseren Sichtbarkeit des Zeigerausschlags ein  $1\,\mathrm{k}\Omega$ -Widerstand in Reihe geschaltet.

Zur Versuchsdurchführung wird am Handgenerator gekurbelt und der Ausschlag des Zeigermessinstruments beobachtet.

Für die letzte Teilaufgabe ist ein Gleichstrommotor<sup>4</sup> mit einer Stativklemme an einem Stativ befestigt. Es handelt sich um den gleichen Motor wie an Station 6. Auf die Achse des Motors ist mithilfe eines Stellrings eine Plastikscheibe geschraubt. Diese dient dazu, dass die Achse des Motors von Hand gedreht werden kann (Dreht man nur an der Achse des Motors, kann man nicht das nötige Drehmoment aufbringen.). Für den Versuch wird der Motor mit einer blauen LED verbunden. Zum Schutz der LED ist ein  $150\,\Omega$ -Widerstand in Reihe geschaltet. Zur Versuchsdurchführung dreht man an der Scheibe des Motors und beobachtet die LED.

### Aufgabe 2

Für die Energiewandlerkette, die in dieser Aufgabe gebaut werden soll, stehen mehrere Bauteile zur Verfügung. Die Schülerinnen und Schüler müssen sich den im folgenden beschriebenen Aufbau selbst überlegen.

Der Handgenerator wird dazu verwendet, eine Halogenlampe<sup>5</sup> zum Leuchten zu bringen. Diese ist in den Deckel einer mit einem 3D-Drucker gedruckten nach unten offenen Kiste eingeklebt. Die Kiste ist innen mit Alufolie ausgekleidet, damit das Licht von den Wänden reflektiert wird. Die Kiste dient dazu, mit der Halogenlampe abgeschirmt von der Zimmerbeleuchtung eine genau unter die Kiste passende Solarzelle<sup>6</sup> zu beleuchten. Der letzte Teil der Energieumwandlungskette ist eine rote LED, die an die Solarzelle angeschlossen wird.

 $<sup>^4</sup>$ Es wird der Motor "Motraxx Getriebemotor 33G-50-24V-1" verwendet, der unter der Bestellnummer 1081979 - 62 bei Conrad bestellt werden kann.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Die Halogenlampe trägt die Bezeichnung "Stiftsockellampe, 12V, Sockel G4, 10W, EEK C" und wurde unter der Bestellnummer HAL 10 G4 bei Reichelt bestellt.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>Die verwendete Solarzelle trägt die Bezeichnung "Solarzelle Polykristallin Conrad YH-75X90 18 V 40 mA" und wurde bei Conrad unter der Bestellnummer 191347 - 62 bestellt.

### Aufgabe 3

Analog zu Aufgabe 2 wird in dieser Aufgabe eine Energiewandlerkette aus mehreren Bauteilen aufgebaut. Der Handgenerator ist an eine Heizfolie<sup>7</sup> angeschlossen. Mit Wäscheklammern ist ein Peltierelement<sup>8</sup> mit einer Seite an der Heizfolie befestigt. Legt man die andere Seite des Peltierelements auf den Tisch, so ist die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten des Peltierelements bereits hoch genug, um ausreichend Spannung für die Versuche zu erzeugen. Das Peltierelement wiederum betreibt einen Motor<sup>9</sup>, welcher einen kleinen Propeller dreht.

### Abschätzung des Seebeck-Koeffizienten des Peltierelements

Mithilfe der Daten des in Aufgabe 3 verwendeten Peltierelements [25] wird dessen Seebeck-Koeffizient aus Gleichung (2.38) des Peltierelements abgeschätzt, da dieser nicht im Datenblatt angegeben wird:

Bei einer maximalen Spannung von 15,4 V beträgt die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten des Peltierelements 67 K. Aus diesen Werten und Gleichung (2.38) folgt für eine einzelne Halbleiterkomponente

$$Q_{\text{gesamt}} = \frac{U}{\Delta T} = \frac{15.4 \text{ V}}{67 \text{ K}} = 2.30 \cdot 10^{-1} \frac{\text{V}}{\text{K}}.$$

Das Peltierelement ist aus 127 in Reihe geschalteten Halbleiterkomponenten aufgebaut. Aus obigem Wert folgt für den Seebeck-Koeffizienten einer einzelnen Halbleiterkomponente

$$Q_{\text{Komponente}} = \frac{Q_{\text{gesamt}}}{127} = 1.81 \cdot 10^{-3} \frac{\text{V}}{\text{K}}.$$

Dies liegt in der Größenordnung der Seebeckkoeffizienten, die Halbleiter typischerweise aufweisen (siehe Abschnitt 2.2.3).

#### Zusatzaufgabe I

In dieser Aufgabe schließt man den Handgenerator über eine Schutzschaltung an ein Radio<sup>10</sup> an. Das Radio benötigt 6 V Gleichspannung und 0,5 A. In der Schutzschaltung wird die vom Handgenerator gelieferte Wechselspannung durch einen Brückengleichrichter gleichgerichtet.

 $<sup>^7\</sup>mathrm{Die}$  Heizfolie trägt die Bezeichnung "Heizfolie  $47\mathrm{x}60~\mathrm{mm}$  12 V ca. 3W" und wurde unter der Bestellnummer 189204-62 bei Conrad bestellt.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>Das Peltierelement trägt die Bezeichung "Thermo-Modul, Peltierelement, 40x40x4,1 mm" und wurde unter der Bestellnummer TEC1 127 05 bei Reichelt bestellt.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>Der Propellermotor stammt aus dem Set "Wassergenerator + Indikatormotor f. ETS", das unter der Artikelnummer 1080701 bei Conatex bestellt wurde.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup>Das Radio trägt die Bezeichung "Philips Radiowecker" und hat die Modellnummer AJ3115/12.

Nach dem Brückengleichrichter liegt eine alternierende Gleichspannung vor. Zur Glättung dieser Spannung ist parallel zum Radio ein  $2200\,\mu\text{F}$ -Kondensator geschaltet. Die Kapazität ist passend zu Frequenz und Amplitude der alternierenden Gleichspannung gewählt. Um das Radio vor zu hohen Spannungen zu schützen, ist eine  $500\,\text{mW}$ -Zenerdiode mit einem  $16,5\,\Omega$ -Vorwiderstand parallel zum Radio geschaltet, die die Spannung auf 6 V begrenzt. Die gewählte Art der Spannungsbegrenzung durch eine Zenerdiode ist vermutlich nicht der beste Weg, da im Experiment sehr unterschiedlich hohe Maximalspannungen auftreten. Wird sehr schnell am Handgenerator gekurbelt, könnte es sein, dass die Zenerdiode aufgrund eines zu hohen Stroms zerstört wird. Um Radio hören zu können, muss man auf den Schalter "RADIO ON/OFF" drücken, sobald am Handgenerator so schnell gekurbelt wird, dass auf dem Display des Radios rote Striche erscheinen.

### Zusatzaufgabe III

In Zusatzaufgabe III schließt man an den Handgenerator einen  $47\,\Omega$ -Widerstand an und misst parallel zu ihm mit dem Oszilloskop die Spannung. Es wird kein niedrigerer Widerstand verwendet, weil sonst die Stromstärke auf Dauer für den dünnen Spulendraht zu hoch wäre. Zur Abschätzung des Wirkungsgrads des Handgenerators im letzten Teil der Aufgabe stehen zusätzlich zu Oszilloskop und Widerstand ein Kraftmessers (max.  $5\,\mathrm{N}$ ), eine Stoppuhr und ein Maßband zur Verfügung. Mit dem Maßband kann der Radius der Kurbel gemessen werden. Der Kraftmesser dient dazu, die zum Kurbeln nötige Kraft abzuschätzen. Mit der Stoppuhr wird die Zeit gemessen, in der man mit konstanter Frequenz am Handgenerator kurbelt, um daraus die Leistung zu bestimmen.

# 3.2.2 Messergebnisse und Auswertung

## Handgenerator

#### Messung mit dem Zeigermessinstrument

Schließt man das Zeigermessinstrument wie im Aufbau zu Aufgabe 1 beschrieben an den Handgenerator an, beobachtet man bei langsamem Kurbeln, dass sich der Zeiger ausgehend von der Nullposition hin und her bewegt. Wenn man nicht zu schnell kurbelt, ist erkennbar, dass Wechselspannung vorliegt, deren Frequenz und Amplitude sich erhöhen, wenn schneller am Handgenerator gekurbelt wird. Hierzu später mehr.

### Messung mit dem Oszilloskop

Eine genauere Beobachtung der Spannung, die vom Handgenerator geliefert wird, erlaubt

Messungen mit dem Oszilloskop, wie sie in Zusatzaufgabe III vorgesehen ist. Dazu wird der  $47\,\Omega$ -Widerstand an den Handgenerator angeschlossen. Kurbelt man so schnell am Handgenerator, dass die Frequenz der Wechselspannung 33 Hz beträgt, sieht die am Oszilloskop gemessene Spannung folgendermaßen aus:

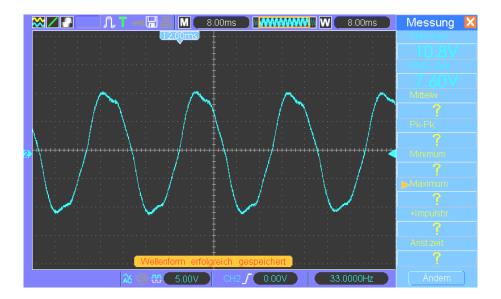


Abb. 3.2: Mit dem Oszilloskop parallel zum 47 Ω-Widerstand gemessenes t-U-Diagramm für den Handgenerator

Die Signalform ist näherungsweise sinusförmig. Die Dellen im Diagramm kommen dadurch zustande, dass die Spule nicht ganz symmetrisch vor dem Magnetrad steht und der Spulendurchmesser ähnlich groß wie der Abstand der Magnete ist. Dies bewirkt, dass das Eintreten und das Austreten der Magnete in den sensitiven Bereich der Spule nicht ganz symmetrisch erfolgen.

Erhöht man die Frequenz, mit der man am Handgenerator kurbelt, so steigen Amplitude, Effektivwert und Frequenz der Wechselspannung. Die Frequenz steigt, da häufiger Magnete die Spule passieren. Die Amplitude steigt, da sich ein einzelner Wechsel der Polarität des Magnetfeldes, das die Spule aufgrund der sich vorbei drehenden Magnete umgibt, schneller vollzieht. Da die Signalform abgesehen von der Skalierung ungefähr gleich bleibt, steigt damit auch der Effektivwert.

Berührt man direkt nach dem Kurbeln am Handgenerator den Widerstand, spürt man, dass sich dessen Temperatur erhöht hat. Dies passiert, da der Widerstand elektrische Energie in thermische Energie umwandelt.

### Kennlinie

Das Erstellen einer Kennlinie vom Handgenerator ist nicht Teil der Aufgaben, die die Schülerinnen und Schüler an dieser Station bearbeiten. Zur Vermessung der Kennlinie des Handgenerators (mit der Spule, die 240 Windungen besitzt) verbindet man verschiedene Widerstände im Bereich von  $1\,\Omega$  bis  $100\,\Omega$  mit dem Handgenerator und misst mit dem Oszilloskop parallel dazu die effektive Spannung (am Oszilloskop bezeichnet mit "RMS zykl"<sup>11</sup>). Um die Ergebnisse vergleichbar zu machen, wird bei jedem Widerstand so am Handgenerator gekurbelt, dass die mit dem Oszilloskop gemessene Frequenz der Wechselspannung 30 Hz beträgt. Über Gleichung (2.32) kann zu einer gemessenen Spannung die zugehörige Stromstärke berechnet werden. Mit Gleichung (2.15) folgt daraus der Wert der elektrischen Leistung. Die aus den Messergebnissen berechneten Werte von Stromstärke und Leistung in Abhängigkeit von der effektiven Spannung sind in folgendem Diagramm dargestellt.

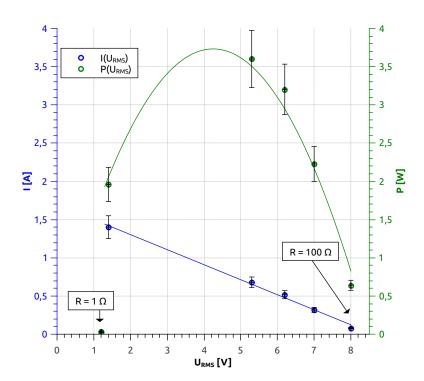


Abb. 3.3: U-I-Diagramm (blau) und U-P-Diagramm (grün) des Handgenerators, jeweils bezogen auf die effektive Spannung. Die Messwerte von I(U) sind als blaue Punkte dargestellt. Ein linearer Fit durch die Messwerte ab 1,4V ist als blaue durchgezogene Kurve eingezeichnet. Die aus den Messwerte von I mit Gleichung (2.15) berechneten Werte für P(U) sind als grüne Punkte dargestellt. Wegen Gleichung (2.15) und der linearen Fitfunktion für I(U) wurde als Fitfunktion für P(U) eine quadratische Funktion verwendet. Dieser Fit ist als grüne durchgezogene Linie eingezeichnet und berücksichtigt ebenfalls nur die Messwerte ab 1,4 V.

 $<sup>^{11}</sup>$ "RMS" ist die Abkürzung für "root me<br/>an square" [26]. Bei einem sinusförmigen Spannungssignal (Wechselspannung) berechnet sich der Effektiv<br/>wert  $U_{\rm eff}$  durch  $U_{\rm eff}=\frac{1}{\sqrt{2}}\cdot U_{\rm max}$ . Der vom Oszilloskop angezeigte Effektiv<br/>wert bezieht sich auf die erste vollständige Periode, die im Diagramm sichtbar ist.

Die Fehlerbalken wurden mittels Fehlerfortpflanzung auf der Basis der Fehler  $\Delta R = 0.1 \cdot R$  und  $\Delta U = 0.01 \, \text{V}$  berechnet.

Für die Stromstärke wurde als Fitfunktion

$$I(U) = a_1 \cdot U + b_1$$

gewählt. Der Wert, der aus der Messung bei einem Lastwiderstand von  $1\,\Omega$  folgt, wurde nicht mit einbezogen. Der Fit liefert folgende Werte für die Parameter:

$$a_1 = -1.97 \cdot 10^{-1} \pm 7.64 \cdot 10^{-3}$$
  
 $b_1 = 1.70 \pm 4.60 \cdot 10^{-2}$ 

Da ein linearer Zusammenhang zwischen U und I vorliegt, wurde wegen Gleichung (2.15) für die **Leistung** die quadratische Fitfunktion

$$P(U) = a_2 \cdot U^2 + b_2 \cdot U$$

gewählt. Wie oben wurde der Wert, der aus der Messung bei einem Lastwiderstand von  $1\,\Omega$  folgt, nicht in den Fit mit einbezogen. Folgende Werte ergeben sich für die Fitparameter:

$$a_2 = -2.06 \cdot 10^{-1} \pm 8.07 \cdot 10^{-3}$$
  
 $b_2 = 1.76 \pm 5.34 \cdot 10^{-2}$ 

Die Werte dieser Fitparameter ähneln wie erwartet den Fitparametern für die Stromstärke. Differenzieren der Fitfunktion der Leistung ergibt, dass der Punkt maximaler Leistung bei 4,25 V liegt. Die zugehörige Stromstärke beträgt 0,86 A und die Leistung 3,66 W.

### Abschätzung des Wirkungsgrads

Ebenfalls in Zusatzaufgabe III soll der Wirkungsgrad des Handgenerators abgeschätzt werden. Dies kann beispielsweise auf folgendem Weg geschehen:

Für die Abschätzung wird am Handgenerator so kurbelt, dass am Oszilloskop eine Frequenz von 32 Hz angezeigt wird. Der Handgenerator ist mit dem  $47\,\Omega$ -Widerstand verbunden, zu dem parallel mit dem Oszilloskop die Spannung gemessen wird.

Man misst dann eine effektive Spannung von 9,2 V gemessen. Damit ergibt sich folgende elektrische Leistung:

$$P_{\rm el} = \frac{(U_{\rm RMS\ zykl})^2}{R} = \frac{(9.2\,{\rm V})^2}{47\,\Omega} = 1.8\,{\rm W}$$

Für die beim Kurbeln aufgebrachte mechanische Leistung gilt

$$P_{\text{mech}} = \frac{F \cdot \Delta s}{\Delta t}.$$

Wir bestimmen daher die zum Kurbeln nötige Kraft, den Weg, entlang derer diese Kraft bei einer Umdrehung der Kurbel wirkt und die Zeit für eine Umdrehung der Kurbel.

Die zum Kurbeln nötige Kraft wird abgeschätzt durch Vergleich mit der Kraft, die zum Ziehen mit der Hand am Kraftmesser nötig ist. (Direkt den Kraftmesser an die Kurbel zu hängen funktioniert nur bei niedrigen Frequenzen.) Dies ergibt eine Kraft von

$$F = 10 \, \text{N}.$$

Die Zeit pro Umdrehung wird durch die Messung der Dauer von 40 Umdrehungen berechnet. Daraus ergibt sich für die Dauer einer Umdrehung die Zeit

$$\Delta t = 0.48 \,\mathrm{s}.$$

Der Weg, entlang dessen man die Kraft aufbringt, ist der Umfang des Kreises, den der Kurbelgriff beim Kurbeln beschreibt. Er kann aus dem Radius der Kurbel berechnet werden:

$$\Delta s = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{Kurbel}} = 2 \cdot \pi \cdot 0.85 \,\text{m} = 0.53 \,\text{m}$$

Damit ergibt sich für die mechanische Leistung, die man beim Kurbeln aufgewendet hat:

$$P_{\text{mech}} = \frac{F \cdot \Delta s}{\Delta t} = \frac{10 \,\text{N} \cdot 0.53 \,\text{m}}{0.48 \,\text{s}} = 11 \,\text{W}$$

Der Wirkungsgrad des Handgenerators beträgt damit in diesem Versuch

$$\eta = \frac{P_{\text{el}}}{P_{\text{mech}}} = \frac{1.8 \,\text{W}}{11 \,\text{W}} = 0.16,$$

das entspricht 16 %. Dies ist verglichen mit Werten von käuflich zu erwerbenden Geräten eher gering.

#### Elektromotor und LED

In Aufgabe 1 c) liegt die folgende Energieumwandlungskette vor:

Rotationsenergie  $\rightarrow$  elektrische Energie ( $\rightarrow$  Lichtenergie)

Der Elektromotor, an den eine LED angeschlossen ist, wird als Generator verwendet. Dreht man an der Scheibe, die an der Motorachse befestigt ist, so beobachtet man je nach Drehrichtung Unterschiedliches. Die LED leuchtet nur bei einer Drehrichtung. Man spürt, dass sich die Scheibe schwerer drehen lässt, wenn man diese Drehrichtung wählt. Die LED ist eine Diode, daher leuchtet sie nur, wenn der Strom in der richtigen Richtung (Pluspol der Spannungsquelle am Pluspol der LED angeschlossen) fließt. Dreht man in dieser Richtung, muss man sich mehr anstrengen, um den Generator zu drehen, weil ein Verbraucher an den Generator angeschlossen ist. Die Helligkeit der LED erhöht sich, wenn man schneller in der richtigen Richtung an der Scheibe dreht, denn dadurch ist die Rotationsenergie am Beginn der Energieumwandlungskette höher.

#### **Energiewandlerkette aus Aufgabe 2**

Die in diesem Abschnitt und den beiden folgenden Abschnitten aufgeführten Messwerte für Stromstärke und Spannung werden von den Schülerinnen und Schülern nicht aufgenommen. Sie führen die Versuche qualitativ durch.

In Aufgabe 2 wird zunächst nur die Halogenlampe an den Handgenerator angeschlossen. Sie beginnt zu glimmen ab einer Spannungsamplitude von 8 V. Je schneller man am Handgenerator kurbelt, desto heller leuchtet die Halogenlampe.

Die folgende Abbildung zeigt das Energieflussdiagramm der Energiewandlerkette, die anschließend in Aufgabe 2 aufgebaut wird:

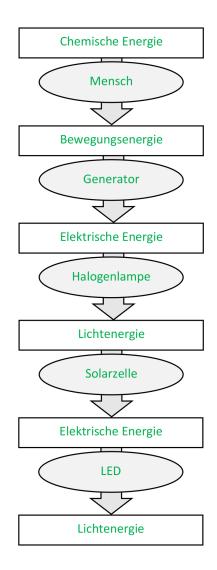


Abb. 3.4: Energieflussdiagramm zu Aufgabe 2

Für die folgenden Messwerte wurde so am Handgenerator gekurbelt, dass die Frequenz der Wechselspannung 30 Hz beträgt. Dann misst man im obigen Versuchsaufbau an der Solarzelle eine Leerlaufspannung von 12 V. Sobald die LED an die Solarzelle angeschlossen wird, beträgt die Spannung zwischen den Anschlüssen der Solarzelle 1,64 V und die Stromstärke im Stromkreis von Solarzelle und LED beträgt 0,5 mA. Es ist deutlich zu erkennen, dass die LED leuchtet.

### **Energiewandlerkette aus Aufgabe 3**

Bevor in Aufgabe 3 die Energiewandlerkette aufgebaut wird, experimentieren die Schülerinnen und Schüler mit dem Peltierelement, an das später der Propellermotor angeschlossen wird. Das Peltierelement wird mit einer Seite auf den Tisch gelegt und von der anderen

Seite mit der Hand erwärmt. Nach kurzer Zeit misst man eine Leerlaufspannung von 160 mV am Peltierelement. Schließt man den Propellermotor an das Peltierelement an, beginnt dieser sich zu drehen. Dann misst man am Propellermotor eine Spannung von 0,1 mV und die Stromstärke beträgt 11 mA. Die Drehrichtung des Propellers ändert sich, wenn man das Peltierelement umgekehrt auf den Tisch legt, weil sich dadurch die Richtung des Stroms umdreht. Nach dem Loslassen des Peltierelements dreht sich der Propeller noch kurz weiter, da sich die zuvor mit der Hand erwärmte Seite des Peltierelements nicht sofort auf Zimmertemperatur abkühlt.

Das Energieflussdiagramm zur Energiewandlerkette, die anschließend in Aufgabe 3 aufgebaut wird, sieht folgendermaßen aus:

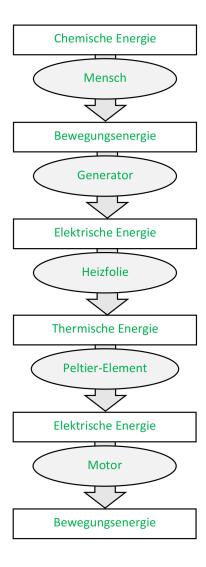


Abb. 3.5: Energieflussdiagramm zu Aufgabe 3

Für die folgenden Messwerte wurde so am Handgenerator gekurbelt, dass die Frequenz der

Wechselspannung 40 Hz beträgt. Etwa ab dieser Frequenz beginnt sich der Propellermotor am Ende der Energiewandlerkette zu drehen, nach dem er in der passenden Richtung angestoßen wurde. Die Leerlaufspannung am Peltierelement beträgt dann in diese Energiewandlerkette 100 mV. Wird der Propellermotor an das Peltierelement angeschlossen, misst man eine Spannung von 44 mV und die Stromstärke im Stromkreis von Peltierelement und Propellermotor beträgt 11 mA.

#### **Betrieb eines Radios**

Die Energiewandlerkette für den Betrieb des Radios sieht folgendermaßen aus:

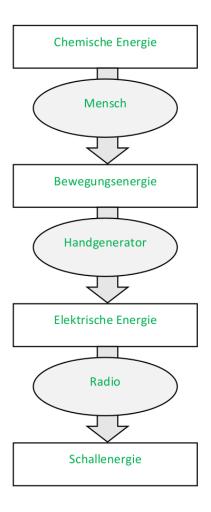


Abb. 3.6: Energieflussdiagramm zu Zusatzaufgabe I

# 3.3 Station 3: Windenergie

An dieser Station geht es um die Abhängigkeit der Leistung des Windes von der Windgeschwindigkeit. Dazu werden an einer modellhaften Windkraftanlage in einem Windkanal Messungen vorgenommen und mithilfe einer Software ausgewertet. In den Zusatzaufgaben setzen sich die Schülerinnen und Schüler mit Anwendungen und der Herleitung des experimentell untersuchten Zusammenhangs sowie der dem Wind entnehmbaren Leistung auseinander.

## 3.3.1 Versuchsaufbau



Abb. 3.7: Foto vom gesamten Versuchsaufbau an Station 3

Die verwendete modellhafte Windkraftanlage besteht aus einem Gleichstrommotor, der als Generator betrieben wird, mit Rotor, die in der Messkammer eines Windkanals steht. Die Stromkabel des Motors werden aus der Messkammer geführt und der Motor an einen Lastwiderstand angeschlossen. Durch die Messung der Spannung am Lastwiderstand mit einem Multimeter kann die elektrische Leistung der Windkraftanlage bestimmt werden.

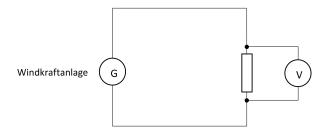


Abb. 3.8: Schaltung zur Messung der elektrischen Leistung der Windkraftanlage

Der Windkanal wurde im Rahmen von früheren wissenschaftlichen Arbeiten konstruiert. Die Windgeschwindigkeit kann von  $2 \, \frac{m}{s}$  bis  $15 \, \frac{m}{s}$  eingestellt werden. In der Messkammer strömt die Luft laminar. In die Messkammer ist unter anderem ein Sensor eingebaut, der die Windgeschwindigkeit misst. Dessen Messwerte werden mit einem GLXplorer und der Software DataStudio erfasst.

Die Suche nach einem geeigneten Motor gestaltete sich schwierig. Die zunächst verwendeten Gleichstrommotoren arbeiteten bei unserer Anwendung in einem für sie ungünstigen Drehzahlbereich, wodurch die Leistung der Windkraftanlage nicht wie in der Theorie mit  $v_{\text{Wind}}^3$ , sondern mit  $v_{\text{Wind}}^2$  skalierte. Erst mit dem jetzt im Experiment eingesetzten Gleichstrommotor<sup>12</sup>, der in einem vergleichsweise niedrigen Drehzahlbereich die höchste Effizienz besitzt, wird die erwartete Abhängigkeit sichtbar.

Zur Befestigung des Motors dient ein selbst konstruierten Metallhalter.



Abb. 3.9: Befestigung von Rotor und Motor

An der Motorachse ist ein mit einem 3D-Drucker ausgedruckter Rotor befestigt. Dazu wurde auf den Rotor ein Stellring zentriert aufgeklebt 13. Das Rotormodell ist ein Horizontalachser und ein Auftriebsläufer. 14 Das CAD-Modell für den Rotor stammt von Christian Molter 15 vom Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart. Es hatte ursprünglich einen Rotordurchmesser von 30 cm und war auf eine Windgeschwindigkeit von  $2.5 \, \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ausgelegt. Aufgrund der begrenzten Abmessungen der Messkammer des Windkanals wurde der Rotor für

 $<sup>^{12}\</sup>mathrm{Der}$  verwendete Motor trägt die Bezeichnung "DC-Motor JOHNSON HF243LG-72689000" und wurde unter der Bestellnummer 94-310561 bei Pollin bestellt.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup>Hier hilft ein genau passender Bohrer zum Zentrieren.

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup>Weitere Informationen hierzu finden sich in [9].

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup>molter@IFB.Uni-Stuttgart.de

diese Station auf einen Durchmesser von 27,3 cm skaliert. Simulationen mit dem ursprünglichen Modell zeigen, dass die Leistung einer Windkraftanlage mit diesem Rotor ab einer Windgeschwindigkeit von  $9 \, \frac{\text{m}}{\text{s}}$  in Sättigung geht. Es wird der Rotor verwendet, bei dem die Rotorblätter senkrecht von oben in die Rotormitte gesteckt werden (Beschriftung "0°").



Abb. 3.10: Foto vom Rotor

Bei den verwendeten Lastwiderständen handelt es sich um Ohm'sche Widerstände, die für jede betrachtete Windgeschwindigkeit so gewählt sind, dass die elektrische Leistung der Windkraftanlage möglichst hoch ist. Dies ist erforderlich, um die Verluste möglichst gering zu halten, die durch den Betrieb des Motors in einem für ihn ungünstigen Drehzahlbereich zu vermeiden.

# 3.3.2 Messergebnisse und Auswertung

Da unsere Windkraftanlage sich erst ab einer Windgeschwindigkeit von etwa 4,5  $\frac{m}{s}$  zu drehen anfängt, beginnt der Messbereich bei einer Windgeschwindigkeit von 5  $\frac{m}{s}$ . Der Messbereich beginnt nicht bei 4,5  $\frac{m}{s}$ , um Reibungseffekte möglichst gering zu halten.

Für die an den Lastwiderständen gemessenen Spannungen ergeben sich die in Tabelle 3.1 aufgeführten Werte. Mithilfe von Gleichung (2.16) kann daraus die elektrische Leistung berechnet werden.

$v_{\mathrm{Wind}} \left[ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \right]$	$R\left[\Omega\right]$	<i>U</i> [V]	P[W]
5	68	2,3	0,0778
6	47	2,4	0,123
7	47	3,0	0,191
8	47	3,6	0,276
9	47	4,3	0,393
10	47	4,7	0,470
11	47	5,3	0,598
12	47	5,6	0,667
13	47	6,0	0,766
14	47	6,5	0,899
15	47	7,0	1,043

Tab. 3.1: Messwerte und Auswertung für die elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

Die Leistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit ist in folgendem Diagramm dargestellt:

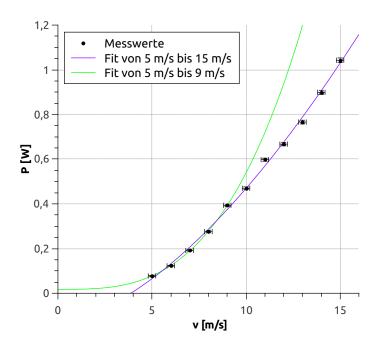


Abb. 3.11: Leistung der Windkraftanlage in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Die Messwerte sind als schwarze Punkte eingezeichnet. Die blaue Kurve ist ein Fit gemäß Gleichung (2.29) mit zusätzlichem Offset-Parameter über den gesamten Messbereich. Die grüne Kurve ergibt sich, wenn man den selben Fit nur für Windgeschwindigkeiten bis  $9 \, \frac{m}{s}$  durchführt.

Der Fehler in v-Richtung beträgt jeweils  $0.2\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ . Der Fehler in P-Richtung wurde mithilfe einer Fehlerfortpflanzung aus den Fehlern für Widerstand und Spannung,  $\Delta\Omega=0.2\,\Omega$  und  $\Delta U=0.05\,\mathrm{V}$  ermittelt. Es gilt

$$\Delta P = \left| \frac{\partial P}{\partial U} \right| \cdot \Delta U + \left| \frac{\partial P}{\partial R} \right| \cdot \Delta R \tag{3.1}$$

$$= \frac{2 \cdot U}{R} \cdot \Delta U + \frac{U^2}{R^2} \cdot \Delta R. \tag{3.2}$$

Die eingezeichneten Fehlerbalken beruhen auf diesen Fehlern.

Passend zu Gleichung (2.29) wurde die Funktion

$$P(v) = a \cdot v^n + b$$

für zwei verschiedene Geschwindigkeitsbereiche an die Messwerte gefittet. Der Offset b wurde zusätzlich eingeführt, um eine mögliche Verschiebung der Messwerte gegenüber Gleichung (2.29) zu berücksichtigen.

• Für den Bereich von 5  $\frac{m}{s}$  bis 15  $\frac{m}{s}$  ergeben sich für die Parameter folgende Werte:  $a_1=1,37\cdot 10^{-2}\pm 5,11\cdot 10^{-3}$ 

$$b_1 = -1.26 \cdot 10^{-1} \pm 4.34 \cdot 10^{-2}$$
  

$$n_1 = 1.63 \pm 1.27 \cdot 10^{-1}$$

• Für den Bereich von  $5 \frac{m}{s}$  bis  $9 \frac{m}{s}$  ergeben sich für die Parameter folgende Werte:

$$a_2 = 4.02 \cdot 10^{-4} \pm 1.12 \cdot 10^{-4}$$
  
 $b_2 = 1.74 \cdot 10^{-2} \pm 6.78 \cdot 10^{-3}$   
 $a_2 = 3.11 \pm 1.20 \cdot 10^{-1}$ 

Man erwartet gemäß der Theorie, dass die Leistung der Windkraftanlage proportional zu  $v_{\mathrm{Wind}}^3$  ist. Der Fit über den gesamten Messbereich liefert näherungsweise eine quadratische Abhängigkeit. Nur wenn man den Fit auf kleine Windgeschwindigkeiten beschränkt, zeigt sich die erwartete Abhängigkeit. Daher wird an der Station mit der Software DataStudio eine Kurvenanpassung für Windgeschwindigkeiten von  $5\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$  bis  $9\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$  vorgenommen.

Es gibt mehrere Gründe für die Abweichung der Messwerte von einer kubischen Abhängigkeit. Einerseits ist der Rotor für kleine Windgeschwindigkeiten (in der ursprünglichen Konzeption auf  $v_{\rm Wind}=2.5\,\frac{\rm m}{\rm s}$ ) ausgelegt. Andererseits hat der verwendete Motor bei einer Drehzahl von 2045 min<sup>-1</sup> die höchste Effizienz<sup>16</sup>. Möglicherweise wird diese Drehzahl bei zu hohen Windgeschwindigkeiten überschritten und die Leistung des Motors steigt daher bei einem Anstieg der Windgeschwindigkeit nicht wie erwartet an. Man könnte die Drehzahl des Rotors messen, um sich hier weitere Klarheit zu verschaffen.

### Leistungsbeiwert

Aus dem Werten des Paramters  $a_2$  des Fits von  $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  bis  $9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  wird der Leistungsbeiwert der Windkraftanlage aus Gleichung (2.29) abgeschätzt. Die effektive Rotorfläche beträgt im Versuch  $A = 4,06 \cdot 10^{-3} \,\text{m}^2$ . Die Dichte der Luft betrug bei Versuchsdurchführung  $\varrho = 1,20 \,\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ . Der maximale Wirkungsgrad des in der Windturbine verbauten Motors beträgt  $\eta = 0,4342$  [27]. Unter der Annahme, dass der Motor im Versuch mit dieser Effizienz gearbeitet hat, ergibt sich gemäß Gleichung (2.29) ein Leistungsbeiwert von

$$c_p = \frac{2 \cdot a_2}{\varrho \cdot A \cdot \eta}$$

$$= \frac{2 \cdot 4,02 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}}}{1,20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,06 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 0,434}$$

$$= 37,5.$$

Das bedeutet, dass im Versuch knapp 38 % der im Wind vorhandenen Energie in mechanische Energie umgesetzt wurden. Reale Windrotoren von ähnlichem Typ erreichen heutzutage

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup>Quelle: http://www.pollin.de/shop/downloads/D310561D.PDF, Stand: 21.08.2015

maximal Werte von 50 % [9]. Damit scheint die Abschätzung einigermaßen realistisch zu sein.

Diese Abschätzung nehmen die Schülerinnen und Schüler an der Station nicht vor.

# 3.4 Station 4: Solarenergie

An Station 4 werden Solarzellen genauer untersucht. Die Schülerinnen und Schüler nehmen die Kennlinie einer Solarzelle auf und bestimmen den Maximum Power Point. In Zusatzaufgabe I setzen sie sich mit dem Aufstellwinkel der Solarzelle auseinander. Zusatzaufgabe II thematisiert die Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen sowie die Verschaltung einzelner Solarzellen zu einem Solarmodul.

# 3.4.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Als Lichtquelle dient ein herkömmlicher 500 W-Halogenbaustrahler, der mit einem Stativ so oberhalb des Versuchstischs befestigt ist, dass seine Unterkante 75 cm vom Tisch entfernt ist. 25 cm entfernt von der Tischkante, an der sich das Stativ des Baustrahlers befindet, ist eine Schablone auf dem Tisch angebracht, die die Position der eingesetzten Solarzellen markiert. Für die Solarzellen<sup>17</sup> wurden Halterungen mit dem 3D-Drucker ausgedruckt. Zur Bestimmung der Kennlinie wird die Solarzelle an verschiedene Ohm'sche Widerstände angeschlossen und bei jeweils kurz angeschaltetem Strahler (dadurch wird eine Erwärmung der Solarzelle vermieden) die Spannung am Widerstand mithilfe eines Multimeters gemessen.

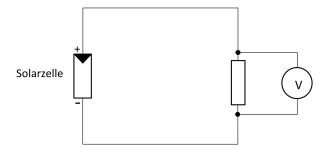


Abb. 3.12: Schaltung zur Vermessung der Kennlinie der Solarzelle

Zum Stecken der elektrischen Schaltung steht ein Steckbrett für Laborkabel zur Verfügung, das ebenfalls mithilfe des 3D-Druckers selbst hergestellt wurde. Da die Stabilität dieses Ausdrucks vom 3D-Drucker noch etwas gering ist, wurde eine stabilere Variante des Steckbretts

 $<sup>^{17} \</sup>rm Die$  verwendeten Solarzellen tragen die Bezeichnung "Solarzelle Polykristallin Conrad YH-75X90  $18\,\rm V$   $40\,\rm mA$ " und wurden bei Conrad unter der Bestellnummer 191347 - 62 bestellt.

bei einem anderen 3D-Drucker in Auftrag gegeben. Die Solarzellen können in Zusatzaufgabe II mit einer schwarzen Pappkarte abgedeckt werden.

# 3.4.2 Messung und Auswertung

### Kennlinie der Solarzelle

Die an den verschiedenen Lastwiderständen gemessene Spannung ist in der folgenden Tabelle aufgeführt. Der Strom wird jeweils über Gleichung (2.32) berechnet.

$R [\Omega]$	U [V]	[A]
100	0,33	0,0033
1000	3,3	0,0033
3200	10,1	0,0032
4700	13,1	0,0028
8200	15,8	0,0019
10000	16,1	0,0016

Tab. 3.2: Messergebnisse und Auswertung zur Bestimmung der Kennlinie einer Solarzelle

Die sich aus den Messwerten Kennlinie der Solarzelle ist in folgendem Diagramm dargestellt:

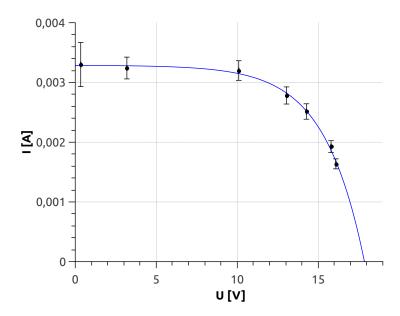


Abb. 3.13: Kennlinie von Solarzelle 1, berechnet mit den Werten aus Tabelle 3.2. Die Datenpunkte für I(U) sind als schwarze Punkte eingezeichnet. Die blaue Kurve ist ein exponentieller Fit passend zu Gleichung (2.42).

Für die Fehlerbalken wurden die Fehler  $\Delta U = 0.02 \,\mathrm{V}$  und  $\Delta R = 0.05 \cdot R$  angenommen. Der Fehler der berechneten Stromstärke ergibt sich mittels Fehlerfortpflanzung durch

$$\begin{split} \Delta I &= \left| \frac{\partial I}{\partial U} \right| \cdot \Delta U + \left| \frac{\partial I}{\partial R} \right| \cdot \Delta R \\ &= \frac{\Delta U}{R} + \frac{U \cdot \Delta R}{R^2}. \end{split}$$

An die Messwerte wurde passend zu Gleichung (2.42) die Funktion

$$I(U) = -I_{S,1} \cdot \left[ \exp\left(\frac{e}{k_B \cdot T} \cdot \frac{U}{\alpha_1}\right) - 1 \right] + I_{L,1}$$
(3.3)

verwendet. Das Vorzeichen wurde gegenüber Gleichung (2.41) umgedreht, da hier im Vergleich zu dem in Abschnitt 2.3.1 betrachteten Diagramm I anders herum gegen U geplottet wird. Die Temperatur betrug bei Versuchsdurchführung  $T=25\,^{\circ}\mathrm{C}$ . Für die Fitparameter ergeben sich folgende Werte:

$$I_{S,1} = -2.32 \cdot 10^{-6} \pm 1.34 \cdot 10^{-6}$$
  
 $\alpha_1 = 78.6 \pm 6.9$   
 $I_{L,1} = 3.29 \cdot 10^{-3} \pm 3.66 \cdot 10^{-5}$ 

Der Idealitätsfaktor  $\alpha$  weist gegenüber der Literatur, welche einstellige Werte angibt (sie-

he [20]), einen eine Größenordnung zu großen Wert auf. Die Ursache für diese Abweichung konnte noch nicht abschließend geklärt werden.

Mithilfe der Messwerte kann über Gleichung (2.15) jeweils die elektrische Leistung berechnet werden. Damit erhält man folgendes U-P-Diagramm (dieses ist nicht Teil der Schüleraufgaben an der Station):

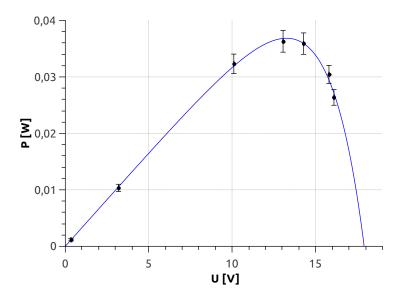


Abb. 3.14: Spannungs-Leistungs-Diagramm von Solarzelle 1, berechnet aus den Messwerten aus Tabelle 3.2

Die Datenpunkte für P(U) sind als schwarze Punkte eingezeichnet. Die blaue Kurve ist ein Fit passend zu der mit U multiplizierten Gleichung (2.42).

Die Fehlerbalken ergeben sich aus den oben angenommenen Fehlern und folgender Fehlerfortpflanzung für die Leistung:

$$\Delta P = \left| \frac{\partial P}{\partial U} \right| \cdot \Delta U + \left| \frac{\partial P}{\partial I} \right| \cdot \Delta I$$
$$= I \cdot \Delta U + U \cdot \Delta I$$

Als Fitfunktion wurde passend zu den Gleichungen (2.41) und (2.15) die Funktion

$$P(U) = U \cdot \left( -I_{S,2} \cdot \left[ \exp\left(\frac{e}{k_B \cdot T} \cdot \frac{U}{\alpha_2}\right) - 1 \right] + I_{L,2} \right)$$
 (3.4)

gewählt. Für die Parameter ergeben sich die folgenden Werte:

$$I_{S,2} = -2.98 \cdot 10^{-6} \pm 3.05 \cdot 10^{-6}$$
  

$$\alpha_2 = 82.9 \pm 12.8$$
  

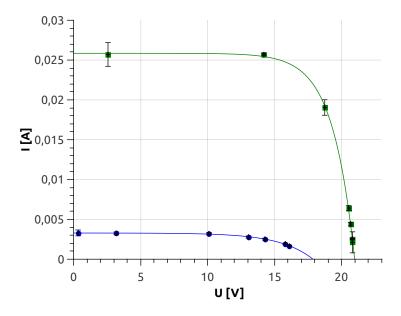
$$I_{L,2} = 3.31 \cdot 10^{-3} \pm 1.12 \cdot 10^{-4}$$

Wie erwartet ergeben sich fast die selben Werte für die Fitparameter wie beim Fit der Messwerte der Kennlinie.

Durch Differenzieren der Fitfunktion für P(U) findet man den Maximum Power Point bei einer Spannung von  $13,26\,\mathrm{V}$  und einer Leistung von  $0,037\,\mathrm{W}$ . Die zugehörige Stromstärke beträgt  $0,028\,\mathrm{A}$ .

## Einfluss der Bestrahlungsstärke

Zur Überprüfung der bisherigen Messungen und zur weiteren Untersuchung wurde die Kennlinie von Solarzelle 1 analog zur oben beschriebenen Messung ein weiteres Mal aufgenommen, allerdings bei einer höheren Bestrahlungsstärke. Das Ergebnis der Messung ist in folgendem Diagramm in grün dargestellt.



#### Abb. 3.15: Kennlinie von Solarzelle 1 bei verschiedenen Bestrahlungsstärken.

Die runden blauen Datenpunkte stellen die selben Daten wie die Messpunkte in Diagramm 3.14 dar und wurden bei schwacher Bestrahlungsstärke (Strahler 75 cm von der Solarzelle entfernt) und aufgenommen. Die quadratischen grünen Datenpunkte wurden aus dem Ergebnis der Messung bei hoher Bestrahlungsstärke (Strahler 21 cm von der Solarzelle entfernt) berechnet. Während beider Messungen betrug die Temperatur der Solarzelle 25 °C. Die blaue und die grüne Kurve sind jeweils ein Fit gemäß Gleichung (2.42).

Die Kennlinie verändert sich bei Erhöhung der Bestrahlungsstärke wie aufgrund der Theorie erwartet (siehe Abbildung 2.13): Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke steigen an. Aus dem Fit der Messwerte bei hoher Bestrahlungsstärke ergibt sich für den Idealitätsfaktor ein Wert von  $\alpha_3 = 51.8 \pm 2$ . Dieser ist geringer als der Wert von  $\alpha_1$ , der bei niedrigerer Bestrahlungsstärke ermittelt wurde. Dies deutet darauf hin, dass möglicherweise eine besser an den Versuch angepasste Fitfunktion verwendet werden muss, um die hohen Werte für den Faktor  $\alpha$  aus den bisherigen Fits zu klären.

Der Einfluss der Bestrahlungsstärke auf die Kennlinie der Solarzelle wird aktuell im Laborbuch indirekt durch die Variation des Einfallswinkels thematisiert.

#### **Einfallswinkel**

In Zusatzaufgabe I messen die Schülerinnen und Schüler die Leerlaufspannung mit einem Multimeter, während sie den Winkel des einfallenden Lichts durch Kippen der Solarzelle verändern. Es lässt sich beobachten, dass die Leerlaufspannung umso höher ist, je senkrechter das Licht auf die Solarzelle trifft. Der Grund ist, dass sich dadurch die Beleuchtungsstärke erhöht.

### Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen

Zusatzaufgabe II beschäftigt sich mit der Verschaltung mehrerer Solarzellen.

Die Leerlaufspannungen der verwendeten Solarzellen betragen beim oben beschriebenen Versuchsaufbau

$$U_{1,1} = 18.0 \text{ V},$$
  
 $U_{1,2} = 17.6 \text{ V} \text{ und}$   
 $U_{1,3} = 16.4 \text{ V}.$ 

Die Kurzschlussstromstärken der einzelnen Solarzellen sind

$$I_{k,1} = 3,35 \text{ mA},$$
  
 $I_{k,2} = 3,32 \text{ mA und}$   
 $I_{k,3} = 2,94 \text{ mA}.$ 

Der Grund dafür, dass Spannung und Stromstärke mit steigender Nummer der Solarzelle sinken, ist, dass sie immer weiter weg von der Lichtquelle liegen.

Schaltet man die drei Solarzellen in Reihe, so addieren sich die einzelnen Leerlaufspannungen: Man misst als Leerlaufspannung der gesamten Reihenschaltung 52,9 V. Die Stromstärke bei dieser Schaltung ist mit 3,09 mA ungefähr so groß wie die einzelnen Kurzschlussstromstärken. Eine Reihenschaltung von Solarzellen zu einem Modul eignet sich also dazu, die Spannung gegenüber den einzelnen Solarzellen zu erhöhen.

Die Leistung der in Reihe geschalteten Solarzellen beträgt im Leerlauf 0,16 W.

Hält man Solarzelle Nr. 3 mit einer Pappkarte zu, so sinkt der Strom auf 0,22 mA ab. Dies zeigt, dass beim Ausfall einer Solarzelle in einer Reihenschaltung aus Solarzellen die gesamte Schaltung praktisch keine elektrische Energie mehr liefern kann.

Bei einer Parallelschaltung der drei Solarzellen ist die gesamte Leerlaufspannung mit 17,2 V so hoch wie die der einzelnen Solarzellen im Mittel. Die Kurzschlussstromstärken der einzelnen Solarzellen addieren sich zur gesamten Leerlaufstromstärke von 9,4 mA. Daraus ergibt sich eine Leistung von 0,16 W. Eine Parallelschaltung dient also einer Erhöhung der Stromstärke gegenüber der Stromstärke einzelner Solarzellen.

Die Leistung der beiden Schaltungen unterscheidet sich also nicht.

Verdeckt man Solarzelle Nr. 3 in der Schaltung mit einer Pappkarte, so misst man mit einem gesamten Kurzschlussstrom von 6,55 mA nur noch die Summe der Kurzschlussströme der beiden anderen Solarzellen. Die Leerlaufspannung der Parallelschaltung beträgt dann 16,3 V. Durch den Ausfall einer Solarzelle in einer Parallelschaltung fällt also im Unterschied zur Reihenschaltung nicht die gesamte Schaltung aus.

In einem Solarmodul werden üblicherweise Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen kombiniert, um die genannten Vorzüge der einzelnen Schaltungsarten zu verbinden.

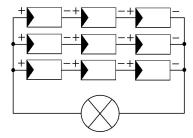


Abb. 3.16: Schaltung von Solarzellen in einem Solarmodul. Abbildung aus [28]

# 3.5 Station 5: Effizienz von Haushaltsgeräten

An dieser Station geht es um die Energieeffizienz von Haushaltsgeräten aus der Küche. Mithilfe von zwei Energiemessgeräten<sup>18</sup> wird bei jedem der untersuchten Haushaltsgeräte gemessen, wie viel Energie und Zeit diese zum Erhitzen von 500 ml kaltem Leitungswasser auf 100 °C benötigen. Daraus wird der Wirkungsgrad der Geräte berechnet und miteinander verglichen. Es kommen ein Wasserkocher, ein Mikrowellenherd, eine Elektrokochplatte und eine Induktionskochplatte zum Einsatz.

In den Zusatzaufgaben berechnen die Schülerinnen und Schüler die elektrische Leistung, die die Geräte im Mittel umgewandelt haben. Außerdem vergleichen sie den Kochvorgang auf einer der Herdplatten bei geöffnetem und geschlossenem Topfdeckel.

## 3.5.1 Versuchsaufbau

Das Leitungswasser wird mit einem Messbecher und die Temperatur des Leitungswasser mit einem Thermometer gemessen. Zum Erhitzen des Wassers auf den Herdplatten wird ein geeigneter Kochtopf mit Deckel verwendet. Für die Durchführung des Versuchs mit dem Mikrowellenherd steht ein Becherglas zur Verfügung, in welches zur Verhinderung eines Siedeverzugs Siedesteine gelegt werden. Da eine Abdeckung des Becherglases im Mikrowellenherd die Messergebnisse nicht verändert, wird darauf verzichtet.

Zur Messung der elektrischen Energie, die ein Haushaltsgerät während des Versuchs umwandelt, wird ein Energiemessgerät zwischen das Haushaltsgerät und die Steckdose gesteckt. Im Betriebsmodus "REC" integriert das Energiemessgerät die momentan dem Haushaltsgerät zugeführte elektrische Leistung über die Zeit, sodass nach Ende des Versuchs die gesamte zugeführte elektrische Energie abgelesen werden kann.

Der Zeitpunkt, zu dem das Wasser eine Temperatur von 100°C erreicht hat, ist dann erreicht, wenn das Wasser zu Sieden beginnt. Dies wird per Augenmaß ermittelt.

Die Geräte mit verstellbarer Leistung werden im Versuch alle auf die höchste Stufe eingestellt.

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup>Die Energiemessgeräte tragen die Bezeichnung "VOLTCRAFT Energy Check 3000 Energiekosten-Messgerät, Speicherfunktion mit Langzeitüberwachung LCD 0,001 - 9999 kWh 2376" und wurde unter der Bestellnummer 125330 - 62 bei Conrad bestellt.



Abb. 3.17: Foto vom Energiemessgerät

# 3.5.2 Messergebnisse und Auswertung

Die Temperatur des Leitungswasser betrug bei der Messung 20 °C. Damit ergibt sich für die thermische Energie, die 500 ml Leitungswasser auf 100 °C zugeführt werden beträgt gemäß Gleichung (2.10)

$$E_{\text{koch}} = 4.18 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}} \cdot 500 \,\text{g} \cdot (100 \,^{\circ}\text{C} - 20 \,^{\circ}\text{C}) = 167 \,\text{kJ} = 0.046 \,\text{kWh}.$$
 (3.5)

Die gemessenen Energien und Zeitspannen sind in folgender Tabelle aufgeführt:

Gerät	zugeführte	Dauer	Dauer	$\eta$
	Energie [kWh]	[mm:ss]	[s]	
Elektroplatte	0,179	7:40	460	0,26
Mikrowellenherd	0,102	5:32	332	0,45
Induktionsplatte	0,064	2:13	133	0,72
Wasserkocher	0,055	1:52	112	0,84

Tab. 3.3: Messung und Auswertung zu Station 5

Der Wirkungsgrad ergibt sich jeweils aus dem Quotienten von  $E_{\rm koch}$  und der dem Gerät zugeführten Energie. Er unterscheidet sich deutlich zwischen den einzelnen Geräten. Die genauen Werte unterscheiden sich, je nach dem, welches Modell eines Geräts man genau verwendet. Doch die grundsätzlichen Unterschiede der Geräte werden gut deutlich. Besonders effizient

erhitzt der Wasserkocher das Wasser. Die schlechteste Energiebilanz weist die Elektroherdplatte auf. Der Grund für ihr schlechteres Abschneiden ist unter anderem, dass nicht nur der
Topf, sondern die Herdplatte bei der Elektroherdplatte selbst mit erhitzt werden muss. Den
Wasserkocher macht besonders effizient, dass seine Heizspirale sehr dicht am zu erhitzenden
Wasser liegt. Außerdem ist er auf diese Aufgabe optimiert.

Die zum Erhitzen benötigte Zeit ist bei den im Versuch verwendeten Geräten umso länger, je schlechter der Wirkungsgrad des Geräts ist.

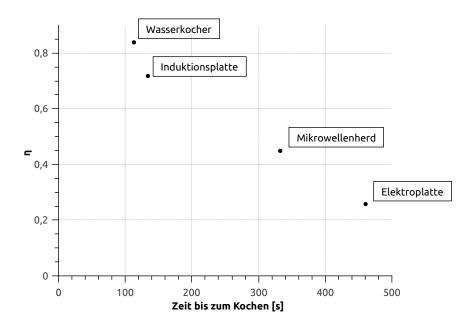


Abb. 3.18: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Zeit, die das jeweilige Gerät zum Erhitzen von  $500\,\mathrm{ml}$  Wasser von  $20\,^\circ\mathrm{C}$  auf  $100\,^\circ\mathrm{C}$  benötigt hat

#### **Durchschnittliche Leistung**

In Zusatzaufgabe I ermitteln die Schülerinnen und Schüler die durchschnittliche elektrische Leistung, die den Geräten jeweils während des Erhitzens zugeführt wurde. Die momentane Leistung, die ein Gerät umwandelt, ist in der Regel nicht konstant während des Versuchs. Die durchschnittliche Leistung ergibt sich aus dem Quotienten

$$durchschnittlich zugeführte Leistung = \frac{zugeführte Energie}{Dauer}.$$
 (3.6)

Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle dargestellt:

Gerät	Ø zugeführte	
	Leistung [kW]	
Elektroplatte	1,4	
Mikrowellenherd	1,1	
Wasserkocher	1,8	
Induktionsplatte	1,7	

Tab. 3.4: Durchschnittlich zugeführte elektrische Leistung

Tendenziell benötigen die Geräte, denen im Durchschnitte eine höhere Leistung zugeführt wurde, weniger Zeit, um das Wasser zum Sieden zu bringen. Allerdings trifft dies nicht immer zu. Der Elektroherdplatte wird zwar durchschnittliche mehr Energie zugeführt als dem Mikrowellenherd, doch die Elektroherdplatte benötigt mehr Zeit, um das Wasser zum Sieden zu bringen, als der Mikrowellenherd. Dies zeigt erneut, dass die Elektroherdplatte in diesem Versuch im Vergleich zum Mikrowellenherd einen geringeren Wirkungsgrad besitzt.

#### Kochen ohne Deckel

Führt man den Versuch für die beiden Herdplatten ohne Topfdeckel durch, so erhält man folgende Ergebnisse:

Gerät	Dauer [m:ss]	Energie [kWh]	$\eta$
Induktionsplatte	2:19	0,067	0,69
Elektroplatte	8:20	0,195	0,24

Tab. 3.5: Messergebnisse und Auswertung für die Versuche mit den Herdplatten ohne Topfdeckel

Wie erwartet verlängert sich der Vorgang, erhöht sich die benötigte elektrische Energie und verringert sich der Wirkungsgrad durch das Weglassen des Deckels.

Der Grund dafür ist, dass die im verdunsteten Wasser gespeicherte thermische Energie aus dem Topf entweichen kann. Lässt man den Deckel auf dem Topf, so erwärmt dieses Wasser den Topf und trägt so dazu bei, dass das Wasser schneller zum Sieden gebracht wird.

Außerdem wird die Luft über dem Wasser erhitzt. Bei geschlossenem Deckel trägt diese ebenfalls zur Erwärmung des Topfes bei. Ist der Deckel dagegen geöffnet, steigt die erwärmte Luft auf und kühlere Luft gelangt zur Wasseroberfläche, die wieder aufgewärmt wird. Dadurch geht thermische Energie für den gewünschten Erhitzungsvorgang des Wassers verloren.

# 3.6 Station 6: Wirkungsgrad eines Elektromotors

An dieser Station bestimmen die Schülerinnen und Schüler den Wirkungsgrad eines Elektromotors. Dazu lässt man den Motor ein Gewichtsstück hochziehen und vergleicht die dem Gewichtsstück dadurch zugeführte potentielle Energie im Gravitationsfeld der Erde mit der elektrischen Energie, die der Motor dafür benötigt hat. Es stehen verschiedene Gewichtsstücke zur Verfügung. In der Zusatzaufgabe berechnen die Schülerinnen und Schüler die Leistung, die der Motor jeweils erbracht hat.

### 3.6.1 Versuchsaufbau

Der Elektromotor<sup>19</sup> ist mit einer Stativklemme befestigt an einem Stativ. Auf die Achse des Motors ist eine Scheibe geschraubt, an welcher der Faden, an dem die Gewichtsstücke hängen, befestigt wird. Der Durchmesser des Innenteils der Scheibe, auf dem sich der Faden aufwickelt, hat einen Durchmesser von 30 mm.

Die Gewichtsstücke wurden so konstruiert, dass sie die Massen  $0.5 \,\mathrm{kg}$ ,  $1 \,\mathrm{kg}$  und  $1.5 \,\mathrm{kg}$  besitzen. Sie werden mit einem Haken in die Öse des Fadens eingehakt.

Auf dem Faden und der Scheibe ist jeweils eine rote Markierung angebracht, welche die Schülerinnen und Schüler zur Festlegung der Strecke verwenden können, um die ein Gewichtsstück hochgezogen wird. Zur Messung der Stecke liegt ein Maßband bereit.

Der Elektromotor wird durch ein Netzgerät mit elektrischer Energie versorgt. Das Netzgerät wird auf 24 V eingestellt. Zur Messung der Stromstärke wird ein Multimeter in Reihe mit dem Motor geschaltet. Um zu bestimmen, wie lange der Motor dafür braucht, das Gewichtsstück hoch zu ziehen, steht eine Stoppuhr zur Verfügung.

# 3.6.2 Messergebnisse und Auswertung

Wir wählen als Höhendifferenz zum Hochziehen der Gewichtsstücke jeweils  $\Delta h=1.0\,\mathrm{m}$ . Damit erhält man folgende Messergebnisse, die zur Bestimmung der elektrischen Energie benötigt werden:

 $<sup>^{19}\</sup>mathrm{Es}$  wird der Motor "Motraxx Getriebemotor 33G-50-24V-1" verwendet, der unter der Bestellnummer 1081979 - 62 bei Conrad bestellt werden kann.

m [kg]	0,5	1,0	1,5
U [V]	24		
I [mA]	96	154	214
t [s]	5,8	6,3	7,5

Tab. 3.6: Messergebnisse zu der vom Motor umgewandelten elektrischen Energie

Über die Gleichung

$$E_{\rm el} = \frac{P_{\rm el}}{t} = \frac{U \cdot I}{t} \tag{3.7}$$

kann daraus die vom Motor benötigte elektrische Energie berechnet werden.

Die potentielle Energie, die einem Gewichtsstück der Masse m im Gravitationsfeld der Erde dadurch zugeführt wird, dass es um die Strecke h nach oben gezogen wird, folgt aus

$$E_{\text{pot}} = m \cdot 9.81 \,\frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot h. \tag{3.8}$$

Der Wirkungsgrad des Elektromotors berechnet sich aus diesen beiden Energien über

$$\eta = \frac{E_{\text{pot}}}{E_{\text{el}}}. (3.9)$$

Die Ergebnisse der Rechnungen für die verschiedenen Gewichtsstücke sind in folgender Tabelle aufgeführt:

m [kg]	0,5	1,0	1,5
$E_{\rm el}$ [J]	13,4	23,3	38,5
$E_{\rm pot}$ [J]	4,91	9,81	14,7
η	0,37	0,42	0,38

Tab. 3.7: Auswertung zum Wirkungsgrad des Elektromotors

In Zusatzaufgabe I berechnen die Schülerinnen und Schüler die vom Motor erbrachte Leistung. Diese folgt aus der Gleichung

$$P_{\text{Motor}} = \frac{E_{\text{pot}}}{t}.$$
 (3.10)

Damit erhält man die Werte in folgender Tabelle:

m [kg]	0,5	1,0	1,5
P [W]	0,85	1,56	1,96

Tab. 3.8: Vom Motor erbrachte Leistung in Abhängigkeit von der Masse des Gewichtsstücks

Die Ergebnisse sind in folgenden Diagrammen dargestellt:

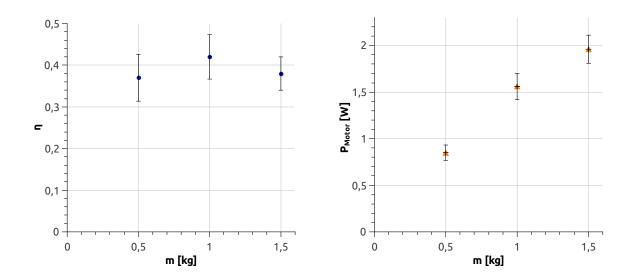


Abb. 3.19: links: Wirkungsgrad des Motors in Abhängigkeit von der Masse des verwendeten Gewichtsstücks, rechts: vom Motor erbrachte Leistung in Abhängigkeit von der Masse des verwendeten Gewichtsstücks

Die Fehlerbalken im Diagramm wurden über eine Fehlerfortpflanzung ausgehend von folgenden Fehlern berechnet:

$$\Delta U = 0.1 \,\mathrm{V}$$
 
$$\Delta I = 0.005 \,\mathrm{A}$$
 
$$\Delta t = 0.5 \,\mathrm{s}$$
 
$$\Delta h = 0.01 \,\mathrm{m}$$

Obwohl sich die Fehlerbalken der Wirkungsgrade bei verschiedenen Gewichtsstücken überlappen, ist erkennbar, dass sich die Wirkungsgrade unterscheiden. Der Grund dafür ist, dass der Elektromotor nicht bei allen Drehzahlen bzw. Drehmomenten, die er aufbringen muss, gleich gut arbeitet. Von den im Versuch verwendeten Gewichtsstücken ist der Motor bei dem

1 kg-Gewichtsstück am effizientesten.

Da der Motor bei schwereren Gewichtsstücken ein größeres Drehmoment aufbringen muss, um diese nach oben zu bewegen, steigt die vom Motor erbrachte Leistung mit steigender Masse des Gewichtsstücks.

Die Messergebnisse passen zu den Angaben im Datenblatt des Motors [27]. Dort wird angegeben, dass er die höchste Effizienz (37 %) bei einem Drehmoment von 200 Nmm besitzt. Die Masse des Gewichtsstücks, bei dem der Motor in der Phase, in der er dieses gleichförmig nach oben bewegt, mit der verwendeten Scheibe am effizientesten arbeitet, folgt aus Gleichung  $(2.31)^{20}$ :

$$m_{\text{opt}} = \frac{M}{r \cdot g} = \frac{200 \,\text{Nmm}}{15 \,\text{mm} \cdot 9.81 \,\frac{\text{N}}{\text{kg}}} = 1.36 \,\text{kg}$$
 (3.11)

In unserem Experiment muss der Motor bei den beiden schwereren Gewichtsstücken während der Phase, in der sich die Gewichtsstücke gleichförmig nach oben bewegen, folgende Drehmomente aufbringen:

• 
$$m=1$$
 kg: 
$$M=r\cdot F=15\,\mathrm{mm}\cdot 9.81\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}}\cdot 1.0\,\mathrm{kg}=147\,\mathrm{Nmm} \eqno(3.12)$$

• 
$$m = 1.5 \text{ kg}$$
:  
 $M = r \cdot F = 15 \text{ mm} \cdot 9.81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 1.5 \text{ kg} = 221 \text{ Nmm}$  (3.13)

# 3.7 Station 7: Pumpspeicherkraftwerk

Station 7 beschäftigt sich mit der Speicherung von elektrischer Energie mithilfe eines Pumpspeicherkraftwerks. Im ersten Teil der Station wird Wasser aus einem tiefen Reservoir in ein hohes gepumpt. Die Schülerinnen und Schüler ermitteln die potentielle Energie, die das Wasser dadurch im Gravitationsfeld der Erde gewinnt und die elektrische Energie, welche die Pumpe zum Hochpumpen benötigt. Im zweiten Teil der Station wird das Wasser aus dem hohen Reservoir in das tiefe Reservoir abgelassen, wodurch es eine Wasserturbine antreibt. Die Schülerinnen und Schüler bestimmen die potentielle Energie im Gravitationsfeld der Erde, die das Wasser dadurch verliert sowie die elektrische Energie, die von der Turbine geliefert wird. In der Auswertung bestimmen sie die Wirkungsgrade der einzelnen Vorgänge sowie den Gesamtwirkungsgrad.

In den Zusatzaufgaben geht es um Verständnisfragen zum Versuch sowie eine theoretische

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup>Bei den folgenden Rechnungen kann mit den Beträgen der Vektoren gerechnet werden, da Kraft und wirksamer Kraftarm senkrecht aufeinander stehen.

Untersuchung der Energieumwandlungen, die darin geschehen.

# 3.7.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung



Abb. 3.20: Foto von beiden Wasser-Reservoirs mit Schläuchen, Pumpe und Turbine

Die Wasserreservoirs sind im Experiment durch Plastikkisten mit Löchern realisiert. Diese sind untereinander sowie mit Pumpe und Turbine durch abgedichtete Schläuche in geeigneter Weise verbunden. Zur Befestigung und Abdichtung der Schläuche werden Schlauchschellen und eine Kabelverschraubung verwendet. Pumpe und Turbine stehen auf dem Deckel der

unteren Kiste. Über den magnetischen Fuß der Turbinenhalterung ist die Turbine auf einem zylindrischen Stativfuß befestigt. Die obere Kiste steht auf einem Regal. Es wird in beiden Versuchsteilen mit 51 Wasser gearbeitet. Der Füllstand der Kisten kann anhand von Markierungen abgelesen werden. Zur Messung der Höhendifferenzen steht ein Maßband zur Verfügung.

Die Pumpe<sup>21</sup> erhält die elektrische Energie von einem Netzgerät, das auf 24 V eingestellt wird. Zur Messung der elektrischen Energie, die zum Hochpumpen des Wassers nötig ist, wird mit einer Stoppuhr die dafür benötigte Zeit gestoppt und mit einem in Reihe geschalteten Multimeter die Stromstärke gemessen.

Oberhalb der Turbine<sup>22</sup> befindet sich ein Zwei-Wege-Hahn, um die Wasserzufuhr zu regulieren. Möchte man Wasser aus dem oberen Reservoir in das untere Reservoir über die Turbine ablassen, muss der Hahn langsam geöffnet werden. Die Messung der von der Turbine gelieferten elektrischen Energie erfolgt über einen Ohm'schen Widerstand von  $3,2\,\Omega$ , an dem parallel die abfallende Spannung mit einem Multimeter gemessen wird. Der Lastwiderstand wurde so ausgewählt, dass die Turbine möglichst effizient arbeitet.

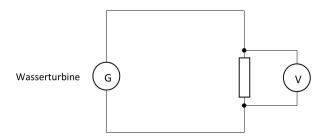


Abb. 3.21: Schaltung zur Bestimmung der von der Turbine gelieferten elektrischen Energie

Während das Wasser abgelassen wird, liest man alle 10 Sekunden die Spannung am Multimeter ab. Anschließend wird ein sinnvoller Mittelwert gebildet.

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup>Die Pumpe trägt die Bezeichnung "ITT Flojet Verdrängerpumpe Membran, max. 3.8l/min, max. 2.4 bar, 24 V dc" und wurde unter der Bestellnummer 7059330 bei RS bestellt.

 $<sup>^{22}\</sup>mathrm{Die}$  Turbine stammt aus dem Set "Wassergenerator + Indikatormotor f. ETS" , das unter der Artikelnummer 1080701 bei Conatex bestellt wurde.

# 3.7.2 Messergebnisse und Auswertung

#### Hochpumpen des Wassers

Das Wasser wird die Strecke  $h_1 = 1,93$  m nach oben gepumpt. Dadurch wird ihm im Gravitationsfeld der Erde folgende potentielle Energie zugeführt:

$$E_1 = m \cdot g \cdot h_1 = 5 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 1.93 \text{ m} = 94.6 \text{ J}$$
 (3.14)

Die Pumpe wird mit der Spannung  $U_{\text{Pumpe}} = 24 \text{ V}$  versorgt. Man misst während des Pumpvorgangs die Stromstärke  $I_{\text{Pumpe}} = 0,665 \text{ A}$ . Zum Hochpumpen des Wassers benötigt die Pumpe die Zeit  $t_{\text{Pumpe}} = 82 \text{ s}$ . Daraus kann die elektrische Energie berechnet werden, welche die Pumpe für einen Pumpvorgang benötigt:

$$E_2 = U_{\text{Pumpe}} \cdot I_{\text{Pumpe}} \cdot t_{\text{Pumpe}} = 24 \,\text{V} \cdot 0,665 \,\text{A} \cdot 82 \,\text{s} = 1309 \,\text{J}$$
 (3.15)

Damit hat das Hochpumpen folgenden Wirkungsgrad:

$$\eta_{\text{Pumpen}} = \frac{E_1}{E_2} = 0.072$$
(3.16)

Dies entspricht 7.2 %.

Dies ist relativ gering. Vermutlich geht viel Energie durch Reibung und durch nicht laminare Strömungen in den Schläuchen verloren. Außerdem wird die Pumpe im Versuchsaufbau möglicherweise nicht an ihrem optimalen Betriebspunkt betrieben.

#### Ablassen des Wassers

Die Fallstrecke des Wassers zwischen oberem Reservoir und Turbine beträgt  $h_2 = 1,65 \,\mathrm{m}$ . Damit verliert das Wasser im Gravitationsfeld der Erde durch das Ablassen bis zum Erreichen der Turbine folgende potentielle Energie:

$$E_3 = m \cdot g \cdot h_2 = 5 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 1.65 \text{ m} = 81 \text{ J}$$
 (3.17)

Die am  $3,2\,\Omega$ -Widerstand gemessene Spannung während des Ablassens des Wassers beträgt im Mittel  $U_{\text{Turbine}} = 0,163\,\text{V}$ . Sie sinkt während der Messung ab, da die durchschnittliche potentielle Energie des Wassers im oberen Reservoir während des Ablassens des Wassers sinkt. Es dauert  $t_{\text{Turbine}} = 101\,\text{s}$ , bis 51 Wasser aus dem oberen Reservoir über die Turbine in das untere Reservoir gelaufen sind. Daraus lässt sich die elektrische Energie bestimmen,

welche die Turbine liefert:

$$E_4 = \frac{U_{\text{Turbine}}^2 \cdot R}{t_{\text{Turbine}}} = \frac{(0.163 \,\text{V})^2}{3.2 \,\Omega} \cdot 101 \,\text{s} = 0.84 \,\text{J}$$
 (3.18)

Damit ergibt sich für die Turbine folgender Wirkungsgrad:

$$\eta_{\text{Turbine}} = \frac{E_4}{E_3} = 0.010$$
(3.19)

Das entspricht 1 %.

Ein Grund für den niedrigen Wirkungsgrad der Turbine ist der Kopplungsmechanismus, durch den die Bewegungsenergie des vorbei strömenden Wassers auf den Generator der Turbine übertragen wird. Das Wasserrad ist magnetisch. Seine Drehbewegung wird berührungslos durch magnetische Anziehungskraft vom Wasserrad auf eine magnetische Scheibe übertragen, die fest mit dem Generator verbunden ist. Diese magnetische Kraftübertragung ist verlustbehaftet, da sich teilweise die Scheibe nicht so schnell dreht wie das Wasserrad, hier liegt vermutlich ein Schlupf vor.

Ein weiterer Grund könnten Reibungsverluste im Zwei-Wege-Hahn sein. Der Austausch des zuerst verwendeten Hahns gegen ein anderes Modell führte bereits zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades der Turbine auf den hier angegebenen Wert.

Wie beim Hochpumpen liegen zudem Reibungsverluste am Schlauch vor. Die Strömung im Schlauch ist vermutlich nicht laminar.

Ein Umbau des Versuchsaufbaus, der möglicherweise den Wirkungsgrad der Turbine verbessern könnte, wäre der Austausch des Schlauchs gegen einen dickeren Schlauch.

#### Wirkungsgrad insgesamt

Der gesamte im Experiment untersuchte Vorgang zur Speicherung von elektrischer Energie hat einen Wirkungsgrad von

$$\eta_{\text{gesamt}} = \eta_{\text{Pumpen}} \cdot \eta_{\text{Turbine}} = 0.072 \cdot 0.010 = 0.0072,$$
(3.20)

das entspricht knapp 0.72 %. Die Gründe für die geringe Höhe des Wirkungsgrades wurden bereits in den beiden vorherigen Abschnitten erläutert.

Reale Pumpspeicherkraftwerke erreichen einen Wirkungsgrad von 80 % [29].

## 3.8 Station 8: Thermische Energie und Wärmeleitfähigkeit

Station 8 beschäftigt sich mit thermischer Energie und Wärmeleitfähigkeit. Im ersten Teil der Station untersuchen die Schülerinnen und Schüler die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Stoffe mithilfe einer Infrarotkamera. Im Zweiten Teil führen sie weitere Experimente mit der Infrarotkamera durch zu den Themen Temperaturmessung, Begutachtung von Gebäuden und technischen Geräten hinsichtlich thermischer Energie, Eigenschaften von infraroter elektromagnetischer Strahlung und häufige Anwendungen von Infrarotkameras.

#### 3.8.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

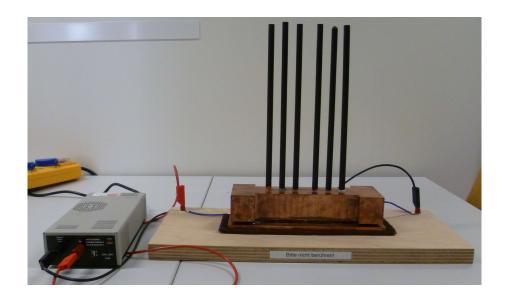


Abb. 3.22: Versuchsaufbau zu Aufgabe 1 von Station 8

Für den ersten Teil der Station wurde ein Versuchsaufbau konstruiert, der sechs geometrisch gleiche Stäbe aus unterschiedlich gut wärmeleitenden Stoffen (Kupfer, Aluminium, Messing, Edelstahl, Glas und Teflon) über einen beheizten Kupferblock erwärmt. Die Stäbe sind matt schwarz besprüht, um ihre Oberfläche der eines Schwarzen Strahlers möglichst ähnlich zu machen. So haben alle Stäbe trotz der unterschiedlichen Stoffe eine gleichartige Oberfläche und diese besitzt einen hohen Emissionsgrad, was für die Messung der Temperatur mit der Infrarotkamera von Vorteil ist.

Die Stäbe sind mit Wärmeleitkleber in den Kupferblock geklebt. Dieser wird durch zwei Heizelemente<sup>23</sup> von unten erwärmt. Zur Energieversorgung der Heizelemente wird ein Netz-

 $<sup>^{23}</sup>$  Die Heizelemente tragen die Bezeichnung "Heizelement 12 V/DC 150 W (L x B x H) 90 x 27 x 17 mm" und wurden unter der Bestellnummer 532894-62 bei Conrad bestellt. Ihr Plastikrahmen wurde abgeschraubt.

gerät<sup>24</sup> mit 22 V Festspannung, 150 W verwendet.

Der Versuchsaufbau ist ein wenig wackelig und daher anfällig für Störungen. Man könnte ihn stabiler gestalten. Um eine höhere Temperatur des Kupferblocks zu erreichen, könnte man ein anderes Netzgerät oder andere Heizelemente verwenden.

Im Versuch wird zunächst die Heizung einige Minuten angeschaltet. Mit einer Infrarotkamera<sup>25</sup> nehmen die Schülerinnen und Schüler anschließend ein Bild von den Stäben auf. In der Infrarotkamera werden die Einstellungen Emissionsgrad  $\varepsilon = 0,95$  und Bildmodus = Infrarot gewählt.

Zur Auswertung der Messung wird das Bild auf einen Laptop übertragen. Mithilfe der kostenlosen *Flir Tools Software* messen die Schülerinnen und Schüler die Temperatur der Stäbe in der Mitte der Stäbe und am oberen Ende der Stäbe.

Im zweiten Versuchsteil werden zum Großteil Gegenstände verwendet, die sich schon im Labor befinden und nicht extra aufgebaut werden müssen. Für eine der Aufgaben ist ein Raum mit Fenster nötig. Für eine weitere Aufgabe wird ein großer undurchsichtiger aufgeschnittener Müllsack aufgehängt, um mit der Infrarotkamera durch ihn "hindurch zu sehen".

Die Infrarotkamera speichert bei jedem Foto zwei Versionen: ein Infrarotbild und ein Digitalfoto. Es ist wichtig, dass als Bildmodus der Infrarotkamera bei allen Versuchen "Infrarot" eingestellt wird. Bei anderen Bildmodi wird das Infrarotbild mit dem Bild einer normalen Digitalkamera überlagert. Dies kann dazu führen, dass das sichtbare Bild falsch interpretiert wird. Häufig sieht man bei falsch eingestelltem Bildmodus Temperaturunterschiede bei Versuchsobjekten, die nicht existieren, sondern nur durch eine andere Farbe der Oberfläche suggeriert werden. Möchte man Temperaturen messen, muss der richtige Emissionsgrad  $\varepsilon$  in der Kamera eingestellt werden. Dieser unterscheidet sich je nach Material, das mit der Infrarotkamera betrachtet wird. Beispielsweise ist für menschliche Haut der Wert  $\varepsilon=0.98$  einzustellen. Während der Messungen ist darauf zu achten, dass das Ergebnis nicht durch Reflexion von infraroter Strahlung am betrachteten Versuchsobjekt, die von anderen Objekten als dem Versuchsobjekt stammt, verfälscht wird.

 $<sup>^{24}</sup>$  Das Netzgerät trägt die Bezeichnung "Netzgerät, DC, 1 Kanal 22-29V/5,2A, 150W, Festspan." und wurde unter der Bestellnummer ps524-05t bei datatec bestellt.

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup>Die Infrarotkamera trägt die Bezeichnung "FLIR E6" und wurde unter der Bestellnummer FLIR E6 EDU bei Reichelt bestellt.

## 3.8.2 Messergebnisse und Auswertung

#### Versuch zur Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeiten der Stoffe, aus denen im Versuch die von unten beheizten Stäbe bestehen, sind in folgender Tabelle angegeben.

Stoff	$\lambda \left[ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K \cdot m}} \right]$
Kupfer	380
Aluminium	200
Messing	90
Edelstahl	21
Glas	0,8
Teflon	0,23

Tab. 3.9: Wärmeleitfähigkeit der im Versuch verwendeten Stoffe. Werte aus [30, 31]

Das mit der Infrarotkamera nach 10 Minuten Heizen aufgenommene Bild sieht folgendermaßen aus:

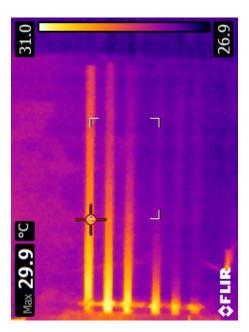
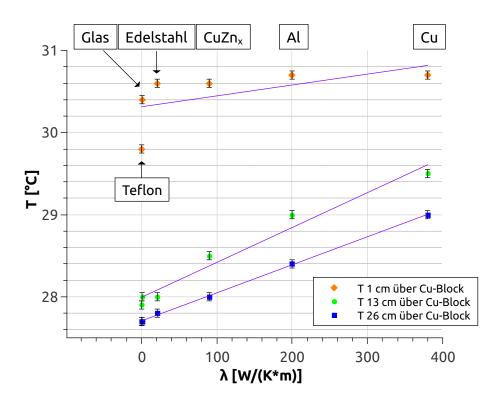


Abb. 3.23: Infrarotbild der von unten geheizten Stäbe.

Materialien der Stäbe von links nach rechts: Kupfer, Aluminium, Messing, Edelstahl, Glas und Teflon

Trägt man die in verschiedenen Höhen gemessenen Temperaturen gegen die Wärmeleitfähig-

keit auf, erhält man folgendes Diagramm:



# Abb. 3.24: Temperatur der Stangen in verschiedenen Höhen über dem Kupferblock in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Stoffs.

In orange sind die Messwerte für  $T(\lambda)$  in 1 cm Höhe über dem beheizten Kupferblock dargestellt. In grün sind die Messwerte für  $T(\lambda)$  in 13 cm Höhe über dem beheizten Kupferblock dargestellt. In blau sind die Messwerte für  $T(\lambda)$  in 26 cm Höhe (am Stabende) über dem beheizten Kupferblock dargestellt. Die blauen Kurven sind jeweils ein linearer Fit durch die zu einer Höhe gehörenden Messwerte.

Für die Fehlerbalken wurde ein Fehler von  $\Delta T = 0.05 \,\mathrm{K}$  angenommen.

Die jeweils zu einer Höhe gehörenden Messwerte weisen einen linearen Zusammenhang auf. Mit der Funktion

$$T(\lambda) = a \cdot \lambda + b$$

wurde jeweils ein linearer Fit durchgeführt. Für die Temperaturen in den verschiedenen Höhen über dem Kupferblock ergeben sich folgende Fitparameter:

• 1 cm über dem Kupferblock:

$$a_1 = 1.35 \cdot 10^{-3} \pm 1.67 \cdot 10^{-1}$$

$$b_1 = 3.03 \cdot 10^1 \pm 1.67 \cdot 10^{-1}$$

• 13 cm über dem Kupferblock:

$$a_{13} = 4,25 \cdot 10^{-3} \pm 3,86 \cdot 10^{-4}$$
  
 $b_{13} = 2,80 \cdot 10^{1} \pm 6,92 \cdot 10^{-2}$ 

• 26 cm über dem Kupferblock:

$$a_{26} = 3.41 \cdot 10^{-3} \pm 4.54 \cdot 10^{-5}$$
  
 $b_{26} = 2.77 \cdot 10^{1} \pm 8.14 \cdot 10^{-3}$ 

Anhand des Diagramms in Abbildung 3.24 wird deutlich, dass die thermische Energie entlang der Stäbe aus Stoffen mit höherer Wärmeleitfähigkeit schneller fließt als bei den anderen Stoffen. Die Steigung der Fitgeraden wächst daher tendenziell, je weiter oben man misst. Die Stoffe mit niedriger Wärmeleitfähigkeit haben sich in 13 cm und 26 cm Höhe kaum erwärmt. Dagegen besitzen die Stäbe dicht über dem heißen Kupferblock fast die selbe Temperatur. Die Ausnahme bildet der Teflon-Stab, der 1 cm über dem Kupferblock eine deutlich geringere Temperatur aufweist als die anderen Stäbe.

Die Schülerinnen und Schüler messen an der Station nur die Temperaturen in 13 cm und 26 cm Höhe.

#### Weitere Experimente mit der Infrarotkamera

#### Temperaturmessung am menschlichen Körper

Mit der Infrarotkamera misst man bei der Stirn eines Menschen eine niedrigere Temperatur als in der Mundhöhle. In der im folgenden Infrarotbild dargestellten Messung liest man für die Temperatur der Stirn 36,0 °C ab und für die Temperatur der Mundhöhle 37,5 °C.



Abb. 3.25: Infrarotbild eines menschlichen Kopfes mit zwei Messpunkten

#### Infrarotstrahlung und Glas

Richtet man die Infrarotkamera auf eine Glasscheibe, so sieht man nicht das Infrarotbild der Gegenstände jenseits des Fensters, sondern sein eigenes infrarotes Spiegelbild:

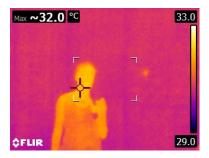


Abb. 3.26: Infrarotbild einer Glasscheibe: Der Betrachter sieht sein eigenes Infrarotbild.

Dieser Versuch verdeutlicht, dass Glas zwar sichtbares Licht passieren lässt, infrarotes jedoch nicht.

#### Analyse von Gebäuden

Betrachtet man mit der Infrarotkamera das dem Schülerlabor gegenüber liegende Gebäude, so erkennt man Wände, die durch Sonneneinstrahlung aufgeheizt sind. Bei niedrigen Außentemperaturen sind an den Außenwänden des Gebäudes Bereiche mit höherer und Bereiche mit niedrigerer Temperatur zu erkennen. Mithilfe von Infrarotkameras können z. B. unerwünschte "Brücken" identifiziert werden, die einen Transport von thermischer Energie zwischen innen und außen ermöglichen.

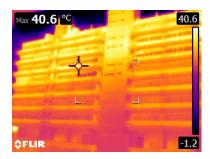


Abb. 3.27: Infrarotbild eines Gebäudes. Der obere Teil hat wegen der darauf scheinenden Sonne eine höhere Temperatur.

#### Spurensuche

Legt man seine Hand kurz auf den Tisch und entfernt sie wieder, so fühlt man mit der Hand keinen Temperaturanstieg des berührten Bereichs. Mit der Infrarotkamera jedoch ist des Handabdruck noch eine Weile gut sichtbar:

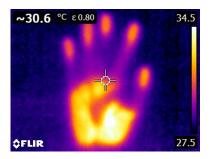


Abb. 3.28: Infrarotbild eines Tisches, auf den zuvor eine Hand gelegt wurde

#### Ein Blick durch's Undurchsichtige

Stellt sich hinter den aufgehängten Müllsack eine Person, so ist sie mit den Augen nicht sichtbar. Die von ihm ausgesandte infrarote Strahlung kann aber die Plastikfolie passieren, sodass die Person sichtbar wird, wenn man den Müllsack mit der Infrarotkamera betrachtet.

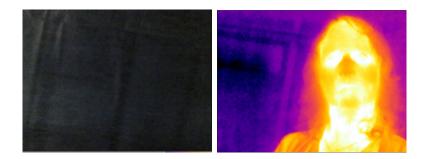
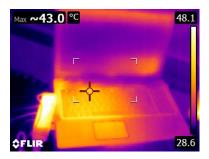


Abb. 3.29: Blick durch die Mülltüte mit der Infrarotkamera auf eine dahinter stehende Person. Links: Foto der Digitalkamera, Rechts: Foto der Infrarotkamera

#### Untersuchung technischer Geräte

Die Schülerinnen und Schüler betrachten technische Geräte durch die Infrarotkamera, beispielsweise den zur Auswertung des ersten Versuchs verwendeten Laptop. Besonders hohe Temperaturen haben das Netzgerät im Ladekabel und der Bereich unter der Tastatur an der Seite, wo sich der Lüfter des Laptops befindet (vermutlich ist dort der Prozessor). Ein Blick mit der Infrarotkamera auf technische Geräte kann z. B. aufschlussreich sein bei der Suche nach Defekten oder für Verschleiß anfälligen Teilen.



 $Abb.\ 3.30:$  Infrarotbild eines Laptops

# 4 Didaktik

Die Versuchsreihe "Effizienter Umgang mit Energie" ist für die Klassenstufe 9/10 im Fach Physik konzipiert.

## 4.1 Übersicht zu den Stationen der Versuchsreihe

- 1. Diskussion (Abschnitt 3.1)
- 2. Energieumwandlung (Abschnitt 3.2)
- 3. Windenergie (Abschnitt 3.3)
- 4. Solarenergie (Abschnitt 3.4)
- 5. Effizienz von Haushaltsgeräten (Abschnitt 3.5)
- 6. Wirkungsgrad eines Elektromotors (Abschnitt 3.6)
- 7. Pumpspeicherkraftwerk (Abschnitt 3.7)
- 8. Thermische Energie und Wärmeleitfähigkeit (Abschnitt 3.8)

## 4.2 Bezug zu den Bildungsstandards für Physik

Dieser Abschnitt behandelt, welche Leitgedanken zum Kompetenzerwerb bzw. Kompetenzen und Inhalte aus den Bildungsstandards für Physik, Klasse 10 (Baden-Württemberg) [32] in der Versuchsreihe aufgegriffen werden.

## 4.2.1 Leitgedanken zum Kompetenzerwerb

Die Bildungsstandards fordern vom Physikunterricht unter anderem...

• die "Vermittlung von Fertigkeiten bei der Beobachtung und Beschreibung physikalischer Phänomene sowie von Grundlagen im Experimentieren" [32, S. 180].

- ▶ Dies wird an allen Stationen der Versuchsreihe gefördert.
- die Befähigung der Schülerinnen und Schüler dazu, das im Physikunterricht erworbene Grundlagenwissen und die dort gelernten Fachmethoden im Alltag gewinnbringend einsetzen zu können.
  - ▶ Durch die vielschichtige Beschäftigung mit den Themen Energie, Leistung und Wirkungsgrad in der Versuchsreihe wird den Schülerinnen und Schülern der physikalisch richtige Umgang damit im Alltag erleichtert.
- "Handlungsorientiertes und entdeckendes Lernen und Arbeiten in Teams", auch zur "Entwicklung der kooperativen Fähigkeiten" [32, S. 180].
  - ▶ Die Schülerinnen und Schüler bearbeiten die Stationen in kleinen Teams. Bei vielen Stationen müssen sich die Gruppen selber organisieren, um die Aufgaben erfolgreich durchführen zu können.

#### 4.2.2 Kompetenzen und Inhalte

#### 2. Physik als theoriegleitete Erfahrungswissenschaft

"Die Schülerinnen und Schüler können die naturwissenschaftliche Arbeitsweise Hypothese, Vorhersage, Überprüfung im Experiment, Bewertung, … anwenden; […]" [32, S. 184]

▶ Dies steht an allen experimentellen Stationen im Mittelpunkt.

#### 3. Formalisierung und Mathematisierung in der Physik

"Die Schülerinnen und Schüler können

- den funktionalen Zusammenhang zwischen physikalischen Größen erkennen, grafisch darstellen und Diagramme interpretieren.
- funktionale Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen, die zum Beispiel durch eine Formel vorgegeben werden, verbal beschreiben und interpretieren.
- vorgegebene (auch bisher nicht im Unterricht behandelte) Formeln zur Lösung von physikalischen Problemen anwenden." [32, S. 185]
- ▶ Alle Stationen erfordern die Beschäftigung mit dem funktionalen Zusammenhang mit physikalischen Größen.
- ▶ In den Stationen 2, 3, 4 und 8 stellen die Schülerinnen und Schüler ihre Messergebnisse in Diagrammen dar und interpretieren diese.

► An Station 3 arbeiten die Schülerinnen und Schüler mit einer ihnen unbekannten Formel.

#### 4. Spezifisches Methodenrepertoire der Physik

"Die Schülerinnen und Schüler können

- Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen untersuchen.
- Experimente unter Anleitung planen, durchführen, auswerten, grafisch veranschaulichen und einfache Fehlerbetrachtungen vornehmen.
- computerunterstützte Messwerterfassungs- und Auswertungssysteme im Praktikum unter Anleitung einsetzen.
- geeignete Größen bilanzieren.

[...]" [32, S. 185]

- ▶ Die ersten beiden Punkte werden an allen experimentellen Stationen der Versuchsreihe aufgegriffen.
- ▶ An Station 3 arbeiten die Schülerinnen und Schüler mit einer computergestützten Messwerterfassung- und Auswertung.

#### 8. Grundlegende Physikalische Größen

"Neben dynamischen Betrachtungsweisen kennen die Schülerinnen und Schüler die Erhaltungssätze und können sie vorteilhaft zur Lösung physikalischer Fragestellungen einsetzen. Die Schülerinnen und Schüler kennen technische Möglichkeiten zum "Energiesparen" und zur Reduzierung von "Entropieerzeugung". Die Schülerinnen und Schüler können mit weiteren grundlegenden physikalischen Größen umgehen:

• Energie (Energieerhaltung)

[...]" [32, S. 185]

- ► Energie ist Thema aller Stationen.
- ▶ Der Energieerhaltungssatz steht besonders bei den Stationen 1 und 2 im Mittelpunkt. Durch die Berechnung von Wirkungsgraden in den Stationen 3-7 wird er indirekt thematisiert.

#### 9. Strukturen und Analogien

"Die Schülerinnen und Schüler erkennen weitere Strukturen und Analogien und können mit den bisher schon bekannten komplexere Fragestellungen bearbeiten: • Energiespeicher, Beschreibung von mechanischen, elektrischen und thermischen Energietransporten

[...]" [32, S. 185]

- ▶ Station 7 beschäftigt sich mit der Speicherung von elektrischer Energie.
- ▶ Der Energieerhaltungssatz steht besonders bei den Stationen 1 und 2 im Mittelpunkt. Durch die Berechnung von Wirkungsgraden in den Stationen 3-7 wird er indirekt thematisiert.

#### 10. Naturerscheinungen und technische Anwendungen

"Die Schülerinnen und Schüler können weitere Erscheinungen in der Natur und wichtige Geräte funktional beschreiben. Sie sind immer mehr in der Lage, physikalische Modelle auch in ihrem Alltag gewinnbringend einzusetzen.

- Alltagsgeräte (zum Beispiel Elektromotor)
- Energieversorgung: Kraftwerke und ihre Komponenten (zum Beispiel Generator) auch regenerative Energieversorgung (zum Beispiel Solarzelle, Brennstoffzelle)

[...]" [32, S. 185]

- ▶ Die Funktionsweise von Elektromotor und Generator wird in Station 2 zum Teil thematisiert.
- ▶ Station 4 beschäftigt sich mit Solarzellen.

### 4.3 Ziel der Versuchsreihe

Ziel der Versuchsreihe ist es, dass die Schülerinnen und Schüler mit Freude durch selbstständiges Experimentieren ihre Kompetenzen in den genannten Bereichen erweitern und festigen sowie für verantwortungsvolles Handeln beim Thema Energie sensibilisiert werden.

#### 4.4 Ablauf der Versuchsreihe

#### 4.4.1 Vorwissen

Die Schülerinnen und Schülern sollten folgende Themen und Begriffe vor dem Besuch der Versuchsreihe behandelt haben:

- Energie
- Leistung
- Wirkungsgrad
- Grundbegriffe der Elektrizitätslehre (Stromstärke, Spannung, elektrischer Widerstand, einfache Schaltungen, Umgang mit einem Multimeter)

#### 4.4.2 Vorbereitung

Zur Wiederholung wichtiger Begriffe und zur Einstimmung auf den Versuchstag bearbeiten die Schülerinnen und Schüler vor ihrem Besuch die Aufgaben aus Kapitel 4 des Laborbuchs. Darin werden die Themen Energie, Leistung, Wirkungsgrad und Messung von Stromstärke bzw. Spannung im Stromkreis behandelt. Dies kann im Unterricht oder als Hausaufgabe geschehen.

Die Zusatzaufgaben sollen das Interesse an dem Thema fördern und einen Bezug zum Alltag der Schülerinnen und Schüler herstellen.

#### 4.4.3 Versuchstag

Die Versuchsreihe ist so konzipiert, dass die Schülerinnen und Schüler die Stationen 2-8 in nicht festgelegter Reihenfolge in kleinen Gruppen durchlaufen. Ist eine Gruppe mit einer Station fertig, wechselt sie an die nächste freie Station. Es muss nicht unbedingt jede Gruppe jede Station bearbeiten. So können sich die Schülerinnen und Schüler die Stationen aussuchen, die sie besonders interessieren. Die erhöht vielleicht auch ihre Motivation. Außerdem soll den Schülerinnen und Schülern genügend Zeit gegeben werden, sich mit einer Station zu beschäftigen. Station 1 ist als Puffer gedacht. Sie kann bearbeitet werden, wenn alle Stationen besetzt sind, die eine Gruppe noch nicht besucht hat. Zudem kann sie die Grundlage für eine Nachbearbeitung des Besuchs der Versuchsreihe im Unterricht dienen. Zur weiteren Erhöhung der Flexibilität beim Wechsel der Stationen sind die Stationen 3, 6 und 7 so aufgebaut, dass die Auswertung der Messergebnisse nicht am Versuchstisch stattfinden muss. So ist der Versuchsaufbau nicht "blockiert" und kann bereits von der nächsten Gruppe genutzt werden.

Der Versuchstag beginnt mit einer Einteilung der Gruppen, in denen die Schülerinnen und Schüler während des Tages zusammen arbeiten. Für zukünftige Durchführungen der Versuchsreihe ist ein Einführungsvortrag zu Beginn des Versuchstages denkbar, in dem die Schülerinnen und Schüler auf das Thema eingestimmt werden und wichtige Aspekte aus den Vorbereitungsaufgaben gemeinsam unter Federführung der Schülerinnen und Schüler bespro-

chen werden.

Die Dauer des Versuchstags beträgt vier Zeitstunden inklusive Pause. In dieser Zeit schaffen es die meisten Gruppen erfahrungsgemäß nicht, alle Stationen zu bearbeiten. Dies ist wie oben geschildert im Konzept der Versuchsreihe berücksichtigt. Falls es der zeitliche Rahmen einer Besuchsklasse erfordert, kann auch ein kürzerer Versuchstag durchgeführt werden.

# 4.5 Didaktische Anmerkungen zur Versuchsreihe

#### 4.5.1 Allgemeines

Der Besuch der Versuchsreihe bietet für Schulklassen den Vorteil, dass sie viele aufwändig konzipierte und aufgebaute Praktikumsversuche durchführen können, ohne, dass dies vom Lehrer selbst getan werden muss. Zudem stehen für die Versuchsreihe beispielsweise mit dem Windkanal, der Infrarotkamera und den eigens für die Versuchsreihe konstruierten Versuchsaufbauten in Station 2 und 8 Geräte bzw. Experimentierstationen zur Verfügung, die in vielen Schulen nicht vorhanden sind.

In einer sich an den Versuchstag anschließenden Führung durch die Labore des 5. Physikalischen Instituts gewinnen die Schülerinnen und Schüler einen anregenden Einblick in die universitäre Forschung und werden so langfristig vielleicht ebenfalls für ein naturwissenschaftliches Studium motiviert.

# 4.5.2 Einführung des Begriffs "Energie"

Der Begriff "Arbeit" ist im aktuellen Bildungsplan nicht vertreten. Daher wird er im Laborbuch nicht erwähnt. Im Unterschied zur eher mathematischen Herleitung des Begriffs "Energie" aus dem Begriff "Arbeit", wie sie an der Universität gelehrt wird, führt man den Begriff "Energie" in der Schule ein, ohne zuvor oder später den Begriff "Arbeit" zu behandeln. Stattdessen werden beispielsweise auf Basis der Präkonzepte und dem Vorwissen der Schülerinnen und Schüler anhand von Energiewandlerketten die verschiedenen Energieformen, Energiewandler und Grundlegendes zu Energieumwandlungsprozessen sowie zum Energieerhaltungssatz eingeführt.

#### 4.5.3 Hilfekarten

Zu den meisten Station stehen Hilfekarten zur Verfügung. Diese sind nach dem Laborbuch im Anhang dieser Arbeit abgedruckt. Sie ermöglichen eine sensible Hilfe, die erst sichtbar ist, wenn die Schülerinnen und Schüler sie benötigen. Die Hilfekarten tragen zur differenzierenden Gestaltung der Versuchsreihe bei.

#### 4.5.4 Anmerkungen zu den einzelnen Stationen

Statt der in der ausgefüllten Version des Laborbuchs, welche im Anhang dieser Arbeit abgedruckt ist, vorhandenen ausgefüllten Diagramme ist in der Schülerversion des Laborbuchs jeweils ein Karopapier abgedruckt. Bei den Stationen 4 und 8 sind die Achsen des Diagramms bereits zum Teil vorgegeben, da die Schülerinnen und Schüler in den Testläufen lange dafür brauchten, diese festzulegen.

#### Station 1

Diese Station wurde in den Testläufen zwei bis vier von jeder Gruppe als erstes bearbeitet und beinhaltete auch den Vergleich der Vorbereitungsaufgaben. In der aktuellen Version des Laborbuchs ist diese Station jedoch als Pufferstation vorgesehen, die an einer beliebigen Stelle im Verlauf des Versuchstags bearbeitet werden kann. Der Vergleich der Vorbereitungsaufgaben kann in den Einführungsvortrag verlegt werden.

#### Station 2

Eine wertvolle Erfahrung ist für Schülerinnen und Schüler an dieser Station ist vermutlich, dass sie selber beim Drehen am Motor in Aufgabe 1 c) beziehungsweise beim Kurbeln am Handgenerator direkt spüren, dass sie mehr Energie in den Anfang einer Energieumwandlungskette stecken müssen, um am Ende mehr heraus zu bekommen. Überraschend dürfte für die Schülerinnen und Schüler zunächst die Beobachtung sein, dass die Höhe der Energie, die zum Drehen den Motors nötig ist, auch von der Drehrichtung abhängt. Diese direkten Erfahren prägen sich den Schülerinnen und Schülern vermutlich besonders gut ein.

In Aufgabe 1 wird der gleiche Motor wie an Station 6 verwendet, allerdings als Generator. Dies verdeutlicht gut, dass ein Elektromotor auch als Generator verwendet werden kann und umgekehrt.

Die Pfeile in den Energieflussdiagrammen zu den in der Station aufgebauten Energiewandlerketten nehmen nicht an Dicke ab, je weiter man in der jeweiligen Energiewandlerkette voranschreitet. In Zusatzaufgabe III der Station werden mögliche Verbesserungen an den Energieflussdiagrammen diskutiert. Hier können die Schülerinnen und Schüler selber darauf kommen, dass man die Dicke der Pfeile von Schritt zu Schritt verringert, um den Energieverlust bei der Energieumwandlung abzubilden.

Zusatzaufgabe I (Betrieb eines Radios) dürfte für Schülerinnen und Schüler interessant sein, da mit einfachen Mitteln der Betrieb eines "normalen" Elektrogeräts möglich gemacht wird.

#### Station 3

Die Schülerinnen messen anders als im Abschnitt 3.3 die elektrische Leistung des Windgenerators nur bis zu einer Windgeschwindigkeit von  $12 \frac{m}{s}$ , um den Zeitaufwand zu begrenzen. Bei den Messwerten von  $9 \frac{m}{s}$  bis  $12 \frac{m}{s}$  sieht man schon, dass die Kurve, die durch die Messwerte gezeichnet werden kann, abflacht.

Der Leistungsbeiwert, den man bei der Berechnung der tatsächlich dem Wind entnehmbaren Leistung berücksichtigen muss, wird in Zusatzaufgabe I b) thematisiert.

#### Station 4

Die Schülerinnen und Schüler ermitteln den Maximum Power Point direkt aus dem U-I-Diagramm darüber, dass sie den Eckpunkt des Rechtecks mit maximalem Flächeninhalt auf der Messkurve bestimmen, wenn das Rechteck als gegenüberliegenden Eckpunkt den Ursprung besitzt und zwei Seiten auf den Koordinatenachsen liegen. Falls die Schüler Probleme damit haben, kann man sie auch ein U-P-Diagramm zeichnen lassen. Darin ist das Maximum der Kurve gut sichtbar. Damit die Station nicht zu lang dauert, wurde im Laborbuch darauf verzichtet.

#### Station 5

Diese Station soll dazu dienen, die Schülerinnen und Schüler für einen verantwortungsvollen Umgang mit Energie im Alltag zu sensibilisieren.

#### Station 6

Die Aufgabe ist an dieser Station zunächst sehr offen gestellt. Bei Bedarf erhalten die Schülerinnen und Schüler durch die in zwei Stufen vorhandenen Hilfekarten schrittweise eine genauere Versuchsanleitung.

#### Station 7

Die Versuchsbeschreibung ist an dieser Station eher genau gehalten, da eine falsche Versuchsdurchführung zu einer großen zeitlichen Verzögerung führt.

#### Station 8

In dieser Station haben die Schülerinnen und Schüler die Gelegenheit, mit einer Infrarotkamera zu experimentieren. Da sie oft noch keine Gelegenheit dazu hatten, dies zu tun, ist die Station für Schülerinnen und Schüler besonders spannend. Aufgabe 2 soll sie dazu anregen, eigene Ideen für Experimente mit der Infrarotkamera umzusetzen.

#### 4.6 Testläufe

Aufgrund der knappen Zeit entstanden die einzelnen Stationen zum Teil während der Testphase und veränderten sich währenddessen noch stark. Daher testeten nicht alle Klassen alle
jetzt im Laborbuch verzeichneten Stationen. Die vorgenommenen Änderungen konnten zum
Teil noch nicht von Klassen getestet werden. Dies wird in Kürze folgen.

Alle Testläufe halfen dabei, die Bearbeitungszeit der Stationen besser einschätzen zu können. So konnten die Aufgaben an den Stationen besser in normale Aufgaben und Zusatzaufgaben unterschieden werden. Hierzu wurde ein Zeiterfassungsbogen eingesetzt.

Außerdem zeigte sich bei allen Testläufen, dass die Schülerinnen und Schüler Probleme beim Aufbau einfacher Schaltungen haben. Daher wurden zu allen Stationen Hilfekarten mit den Schaltplänen erstellt Diese konnten erst nach dem vierten Testlauf geschehen.

Alle Klassen meldeten zurück, dass sie sich eine genauere Versuchsanleitung wünschten. Es wurde versucht, die entscheidenden Dinge im Laborbuch zu beschreiben und hervorzuheben, aber dennoch die Texte nicht zu lang werden zu lassen.

Die bisher genannten Verbesserungen werden bei den einzelnen Testläufen unten nicht gesondert erwähnt.

#### 4.6.1 1. Testlauf am 10.07.2015

Die erste Testklasse war eine 10. Klasse von Frau Kobiela mit dem Fach Physik aus 13 Schülerinnen und Schülern des Herzog-Christoph-Gymnasiums Beilstein. Die Klasse war eine Stunde im Schülerlabor und testete die damalige Version der Stationen 4, 5 und 7. Die Klasse war motiviert. Da dies der erste Testlauf war, hakte es noch an einigen Stellen. Trotzdem hatten die Schülerinnen und Schüler Spaß beim Experimentieren und waren insgesamt zufrieden mit ihrem Besuch der Versuchsreihe.

Aufgrund der Erfahrungen aus diesem Testlauf wurden folgende Änderungen an der Versuchsreihe vorgenommen:

Einige Tippfehler wurden korrigiert und Aufgabenstellungen verständlicher formuliert.

Vor allem an Station 4 hatten die Schülerinnen und Schüler Probleme bei der Messung von Stromstärke und Spannung mit einem Multimeter. Daher wurden für alle Stationen, an denen solche Messungen nötigt sind, Hilfekarten erstellt.

Da während der Experimente an Station 5 zum Teil Wartezeiten entstehen, wurde ein zweites Energiemessgerät angeschafft, sodass jeweils zwei Messungen gleichzeitig durchgeführt werden können. Außerdem wurde das Laborbuch so verändert, dass die Rechnungen während der langen Wartezeiten durchgeführt werden.

Station 7 wurde verkürzt. Hier war ursprünglich eine Wiederholung der Messungen vorgesehen, bei der sich das oberer Reservoir auf einer anderen Höhe befindet. Dies wird nun nur theoretisch behandelt. Außerdem wurde der Versuchsaufbau sicherer gestaltet durch den Austausch eines Hahns, der sich ungewollt geöffnet hatte. Die Messung der Zeit in Aufgabe 2 d) war zunächst ohne Vorgabe der Zeitintervalle vorgesehen. Da dies zu schwierig war, wurde die Versuchsanleitung so geändert, dass alle 10 Sekunden die Spannung abgelesen wird. Da die Schülerinnen und Schüler sich nicht an die zur Auswertung benötigte Formel erinnern konnten, wurde in Aufgabe 3 e) die Herleitung der Formel durch die Schüler eingefügt.

#### 4.6.2 2. Testlauf am 17.07.2015

Die zweite Testklasse war eine 10. Klasse von Herrn Mundt mit dem Fach NwT aus 13 Schülerinnen und Schülern des Dillmann-Gymnasiums Stuttgart. Die Klasse testete den damaligen Stand der Vorbereitungsaufgabe und der Stationen 1, 3, 4, 5, 7 und 8. Es handelte sich um eine interessierte Gruppe. Nützlich war die kleine Gruppengröße und die im Verhältnis hohe Zahl von Betreuern. Die Klasse hatte im Unterricht zuvor das Thema Energieeffizienz und Solarenergie durchgenommen. Für die Schüler waren die Stationen dennoch nicht langweilig. Die Schülerinnen und Schüler waren sehr angetan von der Versuchsreihe.

Aufgrund der Erfahrungen in diesem Testlauf wurden folgende Änderungen an der Versuchsreihe vorgenommen:

Die Organisation der Stationen wurde dahingehend optimiert, dass für die Schüler zwischen zwei Stationen möglichst keine Wartezeiten entstehen. Zu diesem Zweck wurde die Auswertung von Station 3 an einen anderen PC verlagert und an Station 7 die Aufgaben so umstrukturiert, dass zuerst die Messung am Versuchsaufbau gemacht wird und dann die Auswertung an einem anderen Tisch stattfinden kann.

Da die Schülerinnen und Schüler an Station 3 alleine nicht auf die richtige Formel für die Auswertung der Versuchsergebnisse kamen, wurde in Aufgabe 2 a) die Herleitung der Formel durch die Schüler eingefügt.

An Station 4 brauchten die Schülerinnen und Schüler lange für das Zeichnen des Diagramms. Daher wurde in die Schülerversion des Laborbuchs ein leeres Diagramm mit beschrifteten Achsen eingefügt, in das sie ihre Ergebnisse eintragen.

Die Versuchsbeschreibung zur Benutzung der empfindlichen Turbine an Station 7 konnte verbessert werden dadurch, dass man vor Beginn der Messung erst die Turbine zum Laufen bringt und die Messung startet, sobald der Wasserstand im oberen Reservoir die 5 Liter-Markierung erreicht hat.

An Station 8 hatten die Schülerinnen und Schüler Probleme beim Zeichnen des Diagramms. Daher wurde in der Vorlage für die Schüler bereits ein Diagramm mit beschrifteter x-Achse eingefügt. Damit für die erste Gruppe an dieser Station keine Wartezeit entsteht, wurde in der Aufbauanleitung zur Station festgehalten, dass die Heizung bereits etwas vor Kursbeginn angeschaltet wird.

#### 4.6.3 3. Testlauf am 21.07.2015

Die dritte Testklasse war eine 9. Klasse von Frau Bell mit dem Fach Physik aus 28 Schülerinnen und Schülern des Fanny-Leicht-Gymnasiums aus Stuttgart Vaihingen. Die Klasse testete die Vorbereitungsaufgabe und alle Stationen außer Station 2. Es handelte sich - vielleicht auch wegen des heißen Wetters an diesem Tag - um eine weniger motivierte und konzentrierte Gruppe. Viele Stationen wurden nur angefangen, aber nicht fertig bearbeitet. Die Gruppengröße war mit vier bis fünf Schülern pro Station zum Teil zu hoch. Außerdem besaß die Klasse noch nicht so viel Vorwissen aus dem Unterricht. Beides dürfte ebenfalls einen Beitrag zur geringeren Motivation geleistet haben. Die Rückmeldungen der Schülerinnen und Schüler waren heterogen, aber insgesamt trotzdem positiv.

Auf Basis der Erfahrungen in diesem Testlauf erfolgten folgende Veränderungen an der Versuchsreihe:

Zur besseren Orientierung im Laborbuch wurden die Kopfzeilen entsprechend den Stationsnummern und -namen beschriftet. Die Texte im Laborbuch wurden verkürzt, damit das Wesentliche besser zur Geltung kommt.

Da Schaltungen oft fehlerhaft aufgebaut wurden, wurde bei allen Stationen die Aufforderung eingefügt, die Schaltung vor dem Einschalten von Geräten einem Betreuer zu zeigen.

An den Stationen, in denen ein Lastwiderstand zum Einsatz kommt, wurde dessen Einsatz im Laborbuch besser begründet.

Station 1 wurde zur Pufferstation umfunktioniert.

An Station 4 wurde der Aufbau durch ein Umsetzen des Strahlers so verbessert, dass die Schülerinnen und Schüler den Versuch besser erreichen können.

In Station 6 wurde die Aufgabenstellung offener formuliert. Dies konnte erst nach dem letzten Testlauf umgesetzt werden.

#### 4.6.4 4. Testlauf am 24.07.2015

Die vierte Testklasse war eine Eingangsklasse eines beruflichen Gymnasiums, der Kerschensteiner-Schule aus Stuttgart Feuerbach und kam mit ihrer Lehrerin, Frau Rentschler. Die Klasse hatte Chemie als Profilfach und bestand aus 25 Schülerinnen und Schülern. Laut der Lehrerin stammten die meisten Schüler von Realschulen und besaßen beim Eintritt in die Klasse wenige Physik-Grundkenntnisse. Im Testlauf ist aber im Vergleich zu den anderen Testklassen kaum Unterschiede aufgefallen. Die Schülerinnen und Schüler waren sehr motiviert und konzentriert bei der Sache. Ihnen hat die Versuchsreihe sehr gut gefallen.

Aufgrund der Erfahrungen mit dieser Testklasse wurden folgende Veränderungen an der Versuchsreihe vorgenommen:

In der Versuchsanleitung zu allen Stationen wurde deutlicher aufgeschrieben, wie der Messmodus für Gleichspannung bzw. Gleichstrom eingestellt wird, da das verwendete Multimetermodell meist zunächst im Wechselstrom-Modus ist, wenn man es anschaltet. Dies führte zu falschen Messergebnissen.

Die Vorbereitungsaufgabe 2 wurde ausführlicher gestaltet, um die Messungen mit dem Multimeter besser zu verdeutlichen.

Die Versuchsbeschreibung zu Station 3 wurde verständlicher formuliert.

Der Versuchsaufbau zu Aufgabe 1 von Station 8 fiel aus. Daher wurde eine alte Aufnahme der Infrarotkamera vom Versuch auf den Laptop geladen, sodass die Klassen zur Not anhand von diese Aufnahme die Auswertung durchführen können. Die Einstellung des Bildmodus der Infrarotkamera wurde verbessert, um aussagekräftigere Bilder zu erhalten.

# 5 Zusammenfassung und Ausblick

# 5.1 Zusammenfassung

Energie stellt sowohl gesellschaftlich als auch in der Physik an der Universität sowie im Schulunterricht ein wichtiges Thema dar. Es ist gelungen, zu diesem Thema von der Konzeption über den Aufbau und Test von acht Stationen, das Erstellen eines umfassenden Laborbuches und die Einarbeitung der Ergebnisse von mehreren Testläufen eine vollständige Versuchsreihe für Klassen ab Klassenstufe 9/10 aufzubauen. Ein Schwerpunkt der Versuchsreihe ist das Thema Effizienz. Dieses konnte in vielen der Stationen auf unterschiedliche Art und Weise thematisiert werden.

Die Stationen beschäftigen sich mit den Themen Energieumwandlung, Windenergie, Solarenergie, Effizienz von Haushaltsgeräten, Wirkungsgrad eines Elektromotors, Energiespeicherung mit einem Pumpspeicherkraftwerk, Thermische Energie und Wärmeleitfähigkeit. Die in Kapitel 3 untersuchten Versuche zu den einzelnen Stationen werden dort ausführlicher behandelt als von den Schülerinnen und Schülern am Versuchstag.

Die Testläufe zur Versuchsreihe verliefen erfolgreich und lieferten viele Hinweise zu deren Verbesserung. Viele Lehrer interessieren sich für die neue Versuchsreihe und möchten einen Besuch im Schülerlabor zu dieser Versuchsreihe zukünftig in ihren Unterricht integrieren.

Da im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit die erste Neukonzeption einer Versuchsreihe vorgenommen wurde, gibt es noch einige Ansatzpunkte für Verbesserungen an den Versuchsaufbauten und dem Laborbuch. Außerdem konnten viele Ideen während der viermonatigen Bearbeitungszeit nicht ausgeführt werden. Mit Vorschlägen für eine mögliche weitere Arbeit an der Versuchsreihe beschäftigt sich der folgende Abschnitt.

#### 5.2 Ausblick

Im Laufe der Arbeit an der Versuchsreihe haben sich folgende Ideen für ihre weitere Optimierung ergeben.

#### **Allgemeines**

Die Versuchsreihe konnte in der hier dargestellten Form noch nicht vollständig von Testklassen getestet werden. Dies sollte erfolgen, um weitere Verbesserungsmöglichkeiten zu erkennen.

Je nach weiterer Gestaltung des Kurses könnte noch eine Präsentation für den Einführungsvortrag erstellt werden.

Außerdem sollten die Versuchsaufbauten daraufhin überprüft werden, ob sie stabil genug für den Dauerbetrieb sind. Das Laborbuch könnte noch einmal überarbeitet werden, um die Texte auf das Wesentliche zu reduzieren.

Für den Schulunterricht könnte Nachbearbeitungsmaterial zu dieser Versuchsreihe erstellt werden.

Bei den Stationen, zu denen aktuell eine genauere Versuchsbeschreibung im Laborbuch von Anfang an vorgesehen ist, könnte man versuchen, die Aufgaben zunächst offener und mit weniger Anleitung zu formulieren. Dadurch müssten sich die Schülerinnen und Schüler mehr Gedanken zur Planung der Experimente machen und könnten mehr eigene Ideen umsetzen. Durch Hilfekarten könnte eine Unterstützung für schwächere Schülerinnen und Schüler gewährleistet werden.

#### Station 2

Diese Station wurde als einzige noch nicht von einer Klasse getestet. Daher muss hier bei einem Testlauf noch das richtige Verhältnis von regulären Aufgabe zu Zusatzaufgaben sowie deren Umfang ermittelt werden.

Zur Erweiterung der Station könnte man am Anfang in Aufgabe 1 einfache Handexperimente zum Thema Induktion einfügen.

Die Vorkehrungen zur Spannungsbegrenzung, die die an den Handgenerator angeschlossenen Geräte schützt, könnte noch verbessert werden. Dazu war im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu wenig Zeit.

Schön wäre, wenn die Schülerinnen und Schüler längere Energiewandlerketten bauen könnten und freier in der Kombination von deren einzelnen Komponenten wären.

Es wurde eine Spule mit mehr Windungen und dickerem als die momentan im Handgenerator eingebaute gewickelt. Mit dieser kann weiter am Handgenerator experimentiert werden. Wegen des größeren Drahtdurchmesser ist diese auch für höhere Ströme geeignet. Dies erweitert die experimentellen Möglichkeiten an der Station.

Es wurde eine Lichtmaschine aus einem Auto angeschafft (sie stammt von Stephan Schikora), die in die Station eingebaut werden kann.

#### Station 3

Herr Kamella aus der mechanischen Werkstatt versucht, mit dem neuen 3D-Drucker Rotorblätter zu drucken. Man könnte versuchen, ob damit bessere Messergebnisse erzielt werden können.

#### Station 4

Beim 3D-Drucker, der von Herrn Kamella in der mechanischen Werkstatt betrieben wird, wurde eine neue stabilere Variante des Grundkörpers von dem Steckbrett in Auftrag gegeben, das an dieser Station verwendet wird. Hieraus kann eine stabilere Variante des Steckbretts gebastelt werden.

Die Station eignet sich dazu, dass man sie ein zweites Mal aufbaut, um bei großen Schulklassen eine kleinere Gruppengröße zu haben. Man könnte auch zwei verschiedene Stationen zum Thema Solarenergie aufbauen. Im Laufe dieser wissenschaftlichen Arbeit sind viele Aufgaben hierzu entstanden (siehe Auch Zusatzmaterial im Anhang). Eine neue Aufgabe könnte den Einfluss der Bestrahlungsstärke auf die Kennlinie einer Solarzelle untersuchen.

#### Station 5

Hier könnte der Einfluss der verwendeten Wassermenge auf die Ergebnisse untersucht werden.

#### Station 6

Diese Station könnte ein zweites Mal aufgebaut werden. Es wurden Scheiben mit verschiedenen Durchmessern angefertigt. Man könnte die Schülerinnen und Schüler den Einfluss der Scheibengröße auf die Ergebnisse untersuchen lassen.

#### Station 7

An dieser Station könnte man versuchen, den Versuchsaufbau weiter zu optimieren, um die Wirkungsgrade zu erhöhen.

#### Station 8

Es wurden Handwärmekissen und Gelkühlkissen angeschafft, die in diese Station eingebaut werden könnten.

Zum Thema thermische Energie gibt es Stirlingmotoren<sup>1</sup>, die mit Handwärme betrieben werden können. Nähere Informationen hierzu kann Herr Kranzinger liefern.

Zum Schwarzkörperspektrum wäre ein Plakat schön, das im Schülerlabor aufgehängt werden kann.

Mit der vorhandenen Rettungsdecke und dem vorhandenen Dämmmaterial könnte man sich weitere Versuche mit der Infrarotkamera überlegen.

Passend zu Aufgabe 1 könnten Heatpipes bzw. Coolpipes angeschafft werden. Diese leiten thermische Energie besonders gut mithilfe einer zirkulierenden Flüssigkeit.

Der neue Versuch W12 des Physikalischen Anfängerpraktikums beschäftigt sich mit der Temperaturmessung mit einer Infrarotkamera. Hier könnte man Kontakt aufnehmen, um weitere Anregungen zu erhalten.

#### Weitere Ideen

Zum Thema Energiespeicherung wäre eine Station mit Akkus schön.

Denkbar wäre, eine zweite Version der Versuchsreihe für jüngere Schülerinnen und Schüler aufzubauen. Hierzu wurde der Begleitordner zum Projekt "TeCbox" von Herrn Professor Peter von der Hochschule Heilbronn erworben.

Der studentische Verein Crossing Borders Stuttgart e. V.<sup>2</sup> hat seine Kooperation zum Thema Energie mit dem Schülerlabor angeboten. Hier könnte man ein gemeinsames Projekt aufbauen.

<sup>1</sup>http://www.stirlingparadise.de/coll\_schager/coll\_schager.html

<sup>2</sup>http://www.ee.uni-stuttgart.de/cbs/

# Literaturverzeichnis

- [1] MERTENS, Konrad: Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologien und Praxis; mit ... 31 Tab. München: Fachbuchverl. Leipzig im Hanser-Verl., 2011. 290 S. http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=3791886&prov=M&dok\_var=1&dok\_ext=htm. ISBN 978-3-446-42172-1
- [2] Demtröder, Wolfgang: *Mechanik und Wärme*. 5., neu bearb. u. aktualis. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2008. XVII, 513 S.. ISBN 978–3–540–79294–9
- [3] PAUS, Hans J.: *Physik in Experimenten und Beispielen.* 3., aktualisierte Aufl. München : Hanser, 2007. XXX, 1043 S.. ISBN 978–3–446–41142–5
- [4] MERTINS, Hans-Christoph; GILBERT, Markus: Prüfungstrainer Experimentalphysik: Physik verstehen und lernen für die mündliche Prüfung im Bachelor (Haupt- und Nebenfach). 2. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl., 2011. XII, 394 S.. ISBN 978-3-8274-2826-4
- [5] ZASTROW, Dieter: *Elektrotechnik: ein Grundlagenlehrbuch.* 16., verb. u. aktualis. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2006. XIII, 438 S.. ISBN 3–8348–0099–6
- [6] Demtröder, Wolfgang: Atome, Moleküle und Festkörper. 4., überarb. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2010. XXI, 650 S.. ISBN 978–3–642–03910–2
- [7] Taschenbuch der Chemie. 21., vollst. überarb. Aufl. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer, 2013. – XIV, 917 S.. – ISBN 978–3–8085–5778–5
- [8] ALONSO, Marcelo; FINN, Edward J.: Quantenphysik und Statistische Physik. 5., unveränd. Aufl. München: Oldenbourg-Verl., 2012. XIII, 643 S. http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=3907743&prov=M&dok\_var=1&dok\_ext=htm. ISBN 978-3-486-71340-4
- [9] GASCH, Robert: Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb. 4.,
   vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage 2005. Wiesbaden: Vieweg+Teubner
   Verlag, 2005. Online-Ressource (XXIV, 588 S, online resource) S. http://

- [10] ROHRIG, Kurt (Hrsg.). Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik: Windenergie Report Deutschland 2014 / Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik. Version: 21.08.2015. http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de/opencms/export/sites/windmonitor/img/Windenergie\_Report\_2014.pdf. 21.08.2015. Forschungsbericht
- [11] Berechnete Leistungskennlinie Multibird M 5000. http://www.trianel-borkum.de/typo3temp/pics/6b9cb9edce.jpg. Version: 21.08.2015. (Bildquelle)
- [12] Facts and Figures (Borkum wind farm). http://www.trianel-borkum.de/en/wind-farm/facts-and-figures.html. Version: 02.09.2015
- [13] Wind Turbine Performance. http://people.bu.edu/dew11/turbineperformance. html. Version: 02.09.2015
- [14] Demtröder, Wolfgang: *Elektrizität und Optik.* 5. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. XIX, 495 S.. ISBN 978–3–540–68219–6
- [15] PELSTER, Rolf; PIEPER, Reinhard; HÜTTL, Ingo: Thermospannungen: Viel genutzt und fast immer falsch erklärt. In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 4 (2005), S. 10–22
- [16] Peltier-Wärmepumpe. http://www3.physnet.uni-hamburg.de/TUHH/Peltiereffekt.pdf. Version: 18.08.2015. (Bildquelle)
- [17] ASHCROFT, Neil W.; MERMIN, N. D.: Festkörperphysik. 4., verb. Aufl. München: Oldenbourg, 2013. XXX, 1050 S.. ISBN 978–3–486–71301–5
- [18] Hunklinger, Siegfried: Festkörperphysik. 2., verb. Aufl. München: Oldenbourg-Verl., 2009. XII, 595 S.. ISBN 978–3–486–59045–6
- [19] WESSELAK, Viktor; VOSWINCKEL, Sebastian (Hrsg.): Photovoltaik: Wie Sonne zu Strom wird. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. Online-Ressource (VIII, 129 S. 57 Abb., 10 Abb. in Farbe, digital). http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=10.1007/978-3-642-24297-7. ISBN 978-3-642-24297-7
- [20] HANISCH, Jonas: Optimierung von Kathoden und Zwischenschichten für Polymersolarzellen, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2009. http://creativecommons. org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/. - 166 S.

- [21] Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland: Jahressummen 2014. http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU1/KU12/Klimagutachten/Solarenergie/Globalkarten\_entgeltfrei/Jahressummen/2014, templateId=raw,property=publicationFile.pdf/2014.pdf. Version: 03.09.2015. (Bildquelle)
- [22] Spektrale Verteilung der Intensität der Schwarzkörperstrahlung in doppeltlogarithmischer Auftragung. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:
  BlackbodySpectrum\_loglog\_150dpi\_de.png#/media/File:BlackbodySpectrum\_
  loglog\_150dpi\_de.png. Version: 31.08.2015. (Bildquelle)
- [23] BERNHARD, Frank: Handbuch der Technischen Temperaturmessung. 2. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014. – Online-Ressource (XXIV, 1619 S. 1104 Abb., 102 Abb. in Farbe, online resource). http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=10.1007/978-3-642-24506-0. – ISBN 978-364-22450-6-0
- [24] Kranzinger, Franz: Differenzierter Unterricht. Beispiele zum aufgabengesteuerten Unterricht im Fach Physik. Februar 2006. herausgegeben vom Landesinstitut für Schulentwicklung Stuttgart
- [25] Datenblatt vom Peltierelement TEC1 127 05. http://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/C800/TEC1-12705.pdf. Version: 02.09.2015
- [26] Effektivwert. https://de.wikipedia.org/wiki/Effektivwert. Version:01.09.2015
- [27] Datenblatt vom Motor 33G-50-24V-1. http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/1000000-1099999/001081979-da-01-de-GETRIEBEMOTOR\_33G\_50\_24V\_1.pdf. Version: 25.08.2015
- [28] Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen. http://www.solar.lucycity.de/index.php/reihen-und-parallelschaltung. Version: 12.06.2015. (Bildquelle)
- [29] Pumpspeicherkraftwerk. https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherkraftwerk. Version: 01.09.2015
- [30] Wärmeleitfähigkeit von Metallen. http://www.schweizer-fn.de/stoff/wleit\_metall/wleit\_metall.php. Version: 27.08.2015
- [31] Wärmeleitfähigkeit von Gestein, Holz und Glas. http://www.schweizer-fn.de/stoff/wleit\_sonstiges/wleit\_sonstiges.php. Version: 27.08.2015
- [32] Bildungsstandards für Physik Gymnasium Klassen 6, 8, 10, Kursstufe. http://bildung-staerkt-menschen.de/service/downloads/Bildungsstandards/

Gym/Gym\_Ph\_bs.pdf. Version: 05.05.2015. – veröffentlicht vom Ministerium für Kultus, Jugend und Sport des Landes Baden-Württemberg

# **Abbildungsverzeichnis**

2.1	Strömung des Windes der Geschwindigkeit $v_1$ durch die Kontrollfläche $F$	7
2.2	Strömung durch ein stark idealisiertes Windrad nach Betz	8
2.3	Mittlere Windgeschwindigkeit in Deutschland	10
2.4	Diagramm zur Leistung einer realen Windkraftanlage	10
2.5	Modell eines Wechselstromsynchronmotors	13
2.6	Zur Thermospannung	14
2.7	Zur Thermodiffusion	15
2.8	Zur Entstehung eines Thermoelements	16
2.9	Aufbau eines Peltier-Elementes	17
2.10	Zum Nachweis des Peltier-Effektes	17
2.11	Der p-n-Übergang im Bänderschema	18
2.12	Strom-Spannungscharakteristik einer Solarzelle	19
2.13	Kennlinien einer Standard-Solarzelle bei verschiedenen Bestrahlungsstärken .	20
2.14	Globalstrahlung Deutschland 2014	21
2.15	Strahlungsdichte eines Schwarzen Strahlers	24
3.1	Foto vom Handgenerator	28
3.2	Diagramm zur Messung mit dem Oszilloskop am Handgenerator	32
3.3	U- $I$ -Diagramm und $U$ - $P$ -Diagramm des Handgenerators	33
3.4	Energieflussdiagramm zu Aufgabe 2 (Station 2)	37
3.5	Energieflussdiagramm zu Aufgabe 3 (Station 2)	38
3.6	Energieflussdiagramm zu Zusatzaufgabe I (Station 2) $\ \ldots \ \ldots \ \ldots \ \ldots$	39
3.7	Foto von Station 3	40
3.8	Schaltung an Station 3	40
3.9	Foto Halterung Station 3	41
3.10	Foto vom Rotor	42
3.11	Leistung der Windkraftanlage	44
3.12	Schaltung zur Vermessung der Kennlinie der Solarzelle	46
3.13	Kennlinie der Solarzelle	48
3.14	P(U)-Diagramm der Solarzelle	49

# Abbildungsverzeichnis

3.15	Kennlinie der Solarzelle bei verschiedenen Bestrahlungsstärken	50
3.16	Schaltung in einem Solarmodul	52
3.17	Foto vom Energiemessgerät	54
3.18	Wirkungsgrad in Abhängigkeit von Erwärmungszeit	55
3.19	Wirkungsgrad und Leistung des Motors	59
3.20	Foto von beiden Wasser-Reservoirs mit Schläuchen, Pumpe und Turbine $$ . $$	61
3.21	Schaltung zur Bestimmung der von der Turbine gelieferten elektrischen Energie	62
3.22	Versuchsaufbau zu Aufgabe 1 von Station 8	65
3.23	Infrarotbild der von unten geheizten Stäbe	67
3.24	$\lambda$ -T-Diagramm	68
3.25	Infrarotbild eines menschlichen Kopfes mit zwei Messpunkten	69
3.26	Infrarotbild einer Glasscheibe: Der Betrachter sieht sein eigenes Infrarotbild.	70
3.27	Infrarotbild eines Gebäudes	70
3.28	Infrarotbild eines Tisches, auf den zuvor eine Hand gelegt wurde	71
3.29	Infrarotbild durch Müllsack aufgenommen	71
3.30	Infrarotbild eines Laptops	72

# **Tabellenverzeichnis**

2.1	Wärmeleitfähigkeit einiger Stoffe	22
2.2	Emissionsgrade verschiedener Materialien für typische Mess-Wellenlängenbereich	ne
	in $\mu$ m von Strahlungsthermometern. Tabelle aus [23]	26
3.1	Messung und Auswertung Station 3	43
3.2	Messung zur Kennlinie der Solarzelle	47
3.3	Messung und Auswertung zu Station 5	54
3.4	Durchschnittlich zugeführte elektrische Leistung	56
3.5	Versuche ohne Topfdeckel	56
3.6	Messergebnisse zu der vom Motor umgewandelten elektrischen Energie    .  .  .	58
3.7	Auswertung zum Wirkungsgrad des Elektromotors	58
3.8	Vom Motor erbrachte Leistung	59
3.9	Wärmeleitfähigkeit der im Versuch verwendeten Stoffe	67

# **A**nhang

ANHANG 1. Laborbuch

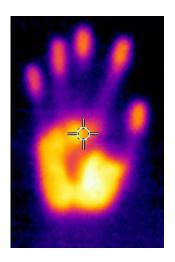
# 1 Laborbuch

Im folgenden Abschnitt ist das ausgefüllte Laborbuch zur Versuchsreihe abgedruckt. Texte in grüner Schrift sind in der Schülerversion des Laborbuchs nicht vorhanden. Außerdem sind die Muster für Diagramme enthalten, die die Schülerinnen und Schüler selber zeichnen sollen.

ANHANG 1. Laborbuch



# Laborbuch ausgefüllt



# Effizienter Umgang mit Energie

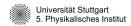
Quellen - Umwandlung - Transport - Speicherung

Versuchsdatum:

Name:







Version: 3. September 2015

ANHANG 1. Laborbuch

Inhaltsverzeichnis

Effizienter Umgang mit Energie

# Inhaltsverzeichnis

1	Einle	eitung	3
2	Hinv	veise zu den Messungen	4
3	Arbo	eitsweise	5
4	Vorl	pereitung auf den Versuchstag	6
5	Sich	erheitshinweise	12
6	Vers	suche	13
	6.1	Station 1: Diskussion	13
	6.2	Station 2: Energieumwandlung	14
	6.3	Station 3: Windenergie	25
	6.4	Station 4: Solarenergie	33
	6.5	Station 5: Effizienz von Haushaltsgeräten	41
	6.6	Station 6: Wirkungsgrad eines Elektromotors	45
	6.7	Station 7: Pumpspeicherkraftwerk	50
	6.0	Station 8: Thermische Energie und Wärmeleitfähigkeit	57

KAPITEL 1. EINLEITUNG

Effizienter Umgang mit Energie

# 1 Einleitung

Nichts geht ohne Energie... sie ist eine physikalische Größe, die uns jeden Tag in vielfältigen Formen begegnet. Aktueller denn je ist auch die Frage, wie wir als Gesellschaft unsere Energieversorgung und unseren Energieverbrauch regeln sollen.

Sinn dieser Versuchsreihe ist es, euch eine Möglichkeit zu geben, sich mit Kernaspekten zum Thema Energie auseinandersetzen zu können. Gleichzeitig gibt Ihnen die Versuchsreihe die Gelegenheit, einen Blick in den praktischen Arbeitsalltag der Physiker an der Universität zu werfen. Die Vorgehensweise während des Versuchstages unterscheidet sich kaum von der Vorgehensweise von Physikerinnen und Physikern im Labor. Dies beinhaltet ebenfalls die Probleme, mit denen Physikerinnen und Physiker bei Versuchen konfrontiert werden können.

# Vorbereitung des Labortages

Für den Versuchstag sind folgende Dinge mitzubringen:

- Laborbuch
- Taschenrechner
- Schreibsachen und Block für Auswertungen
- Falls gewünscht: Essen und Trinken zur Stärkung, da der Labortag ca. 4 Stunden dauern wird
- Gute Laune und Freude am Experimentieren

Bearbeitet vor dem Versuchstag das Kapitel 4 (Vorbereitung auf den Versuchstag).

# Ablauf des Labortages

Der Labortag an der Universität ist grob in zwei Abschnitte unterteilt:

- 1. **Einführung im Seminarraum** durch die Betreuerin bzw. den Betreuer, bei der das Schülerlabor, die Geräte und der Ablauf erklärt werden.
- Selbstständige Durchführung der Versuchsreihe in Gruppen von 3-4 Schülerinnen und Schülern an verschiedenen Stationen anhand des Laborbuches. Die Aufgaben sollen in der Gruppe diskutiert und gelöst werden.

KAPITEL 2. HINWEISE ZU DEN MESSUNGEN

Effizienter Umgang mit Energie

# 2 Hinweise zu den Messungen

Bei allen Experimenten kann es Messungenauigkeiten und äußere Einflüsse geben, die das Ergebnis verfälschen. Daher versucht man, diese Fehler im Experiment möglichst klein zu halten. Bei der Beurteilung der Messergebnisse müssen mögliche Messfehler bedacht werden.

Auch in unseren Versuchen gibt es einige Faktoren, die die Messergebnisse verfälschen können:

#### Äußere Einflüsse:

1. Bei Messungen in der Mechanik ist einer der wichtigsten Einflüsse bei allen Messungen die Reibung.

#### Messungenauigkeiten:

- 1. Messgeräte messen niemals genau. Allerdings ist in unseren Versuchen mit einer meist vernachlässigbaren Abweichung zu rechnen.
- 2. Wie jedes Messgerät kann auch der Mensch nur mit einer bestimmten Genauigkeit messen, denn er hat z. B. eine Reaktionszeit oder liest Messwerte nach seinem Augenmaß ab. Je kleiner die Größen sind, die gemessen werden, umso größer ist dabei die prozentuale Ungenauigkeit.

In unseren Versuchen betrifft dies die Messungen mit der Stoppuhr, wobei die gemessene Zeit mehr oder weniger ungenau ist, da diese von der Reaktionszeit abhängt.

KAPITEL 3. ARBEITSWEISE

Effizienter Umgang mit Energie

# 3 Arbeitsweise

# Experimentieren in der Physik

In der Physik läuft eigentlich jeder Versuch nach derselben Grundstruktur ("Galileisches Prinzip") ab:

- Vorüberlegung zum Experiment:
  - Was will man zeigen/überprüfen/herausfinden?
  - Wie kann man das in einem Versuch realisieren?
  - Wo können Messfehler auftreten und wie kann man sie möglichst gering halten?
- Vor Versuchsbeginn die eigenen Erwartungen in Vorhersagen formulieren
- Durchführung des Experiments
- Überprüfung der eigenen Vorhersage:
  - Sind die Messfehler/Abweichungen vom erwarteten Wert so gering, dass die Vorhersage bestätigt wird?
  - Sind die Messfehler/Abweichungen zu groß, so muss überlegt werden:
    - \* Wurde eine mögliche Quelle für Messfehler übersehen?
    - \* Ist der Einfluss einer anderen physikalischen Größe übersehen worden (z.B. wurden Energieverluste durch Reibung im Energieerhaltungssatz nicht beachtet)?

KAPITEL 4. VORBEREITUNG AUF DEN VERSUCHSTAG Effizienter Umgang mit Energie

# 4 Vorbereitung auf den Versuchstag

Bitte bearbeite die Aufgaben in diesem Teil sorgfältig, damit du gut auf den Versuchstag vorbereitet bist.

# Aufgabe 1

- a) Welche Begriffe fallen dir zum Thema Energie ein? Schreibe sie auf und setze sie in Beziehung zueinander. Du kannst z. B. eine Mindmap erstellen. Hier können die Schülerinnen und Schüler unter anderem die später mit Formeln eingeführten Formeln für Energie, Leistung, Wirkungsgrad, ... verbalisieren.
- b) Energie tritt in verschiedenen Formen auf. Trage die Formeln dafür in das richtige Feld ein und benenne die verwendeten physikalischen Größen.

Energieform	Formel	vorkommende Größen
Mechanische Energie	$F \cdot s$	
Lageenergie	$m \cdot g \cdot h$	
Bewegungsenergie	$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$	
Spannenergie	$\frac{1}{2} \cdot D \cdot s^2$	
Elektrische Energie	$U \cdot I \cdot t$	
Thermische Energie	$c \cdot m \cdot \Delta T$	

- Welche weiteren Energieformen sind dir bekannt?

#### KAPITEL 4. VORBEREITUNG AUF DEN VERSUCHSTAG Effizienter Umgang mit Energie

c) Wie lautet der Energieerhaltungssatz?

In unserem Universum kann man Energie weder erzeugen noch vernichten.

Wenn man in einer Versuchsanordnung keine Energie hinzufügt oder entzieht, dann bleibt die (Gesamt-)Energie konstant.

(Bei vielen mechanischen Experimenten wird aber durch Reibung mechanische Energie in thermische Energie umgewandelt.)

d) Trage die Stichworte, Formeln und Einheiten richtig in die Tabelle ein.

— J (Joule) — 
$$=\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}}$$
 — W (Watt) — = Nm — umgesetzte Energie pro Zeit —  $P=\frac{E}{t}$ 

Begriff	Definition	Formel	Einheit
Energie	je nach Energieform	je nach Energieform	J (Joule) = Nm
Leistung (= Energiestromstärke)	umgesetzte Energie pro Zeit	$P = \frac{E}{t}$	$W  ext{ (Watt)} = \frac{J}{s}$

Für die Energie gibt es weitere Einheiten:

1 kWh	=	3600 kJ
0,000278 kWh	=	1 kJ
1 kcal	=	4,186 kJ
0,239 kcal	=	1 kJ

Vorsilbe	Bedeutung	
k = kilo	x 1.000	
M = Mega	× 1.000.000	
G = Giga	x 1.000.000.000	
T = Tera	x 1.000.000.000.000	

 Angenommen, du benutzt einen Föhn mit einer Leistung von 1000 W. Wie lange musst du den Föhn benutzen, bis er die Energiemenge 1 kWh umgesetzt hat?
 1h

Auch für die Leistung gibt es eine weitere (veraltete) Einheit:

- e) Bei Umwandlung von Energie treten Verluste auf. Ein Maß dafür ist der Wirkungsgrad eines Umwandlungsprozesses.
  - Wie ist der Wirkungsgrad definiert? Fülle mithilfe der Stichworte aus.
    - eingesetzte Energie gewünschte Energie  $\eta$  Wirkungsgrad —

 $\mbox{Wirkungsgrad} = \eta = \frac{\mbox{gewünschte Energie}}{\mbox{eingesetzte Energie}}$ 

#### KAPITEL 4. VORBEREITUNG AUF DEN VERSUCHSTAG Effizienter Umgang mit Energie

 Der Wirkungsgrad kann analog auch für Leistungen definiert werden. Wie lautet dann die Definitionsgleichung?

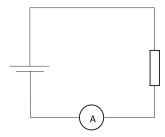
- Je effizienter ein Umwandlungprozess ist, desto höher ist sein Wirkungsgrad.
- Der Wirkungsgrad kann entweder als Dezimalzahl (z. B. 0,5) oder in Prozent (in unserem Beispiel: 50%) angegeben werden. Zum Rechnen verwendet man meistens die Darstellung als Dezimalzahl.
- Wenn mehrere Umwandlungsprozesse (mit den Wirkungsgraden  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,...) hintereinander ablaufen, wie berechnet man dann den Wirkungsgrad des gesamten Prozesses?

 $\eta_{\mathsf{ges}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots$ 

# Aufgabe 2

Hier wiederholst du Grundlagen aus der Elektrizitätslehre, die wir später zum Messen benötigen.

a) Wie wird in einem elektrischen Stromkreis **Stromstärke** gemessen? Zeichne das Multimeter richtig in den Stromkreis ein:



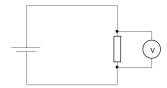
Schaltsymbol für ein Multimeter, mit dem Stromstärke gemessen wird:



b) Wie wird in einem elektrischen Stromkreis die an einem Widerstand abfallende **Spannung** gemessen?

# KAPITEL 4. VORBEREITUNG AUF DEN VERSUCHSTAG Effizienter Umgang mit Energie

Zeichne das Multimeter richtig in den Stromkreis ein:



d: (v

Schaltsymbol für ein Multimeter, mit dem Spannung gemessen wird:

- c) Wie ist der **elektrische Widerstand** definiert?
  - (1) R =
- d) An einem technischen Widerstand R liegt die Potenzialdifferenz (Spannung) U und es existiert die Stromstärke I.

Welche **elektrische Energie** wird hierbei durch den Widerstand in thermische Energie umgewandelt?

Hinweise:

- Löse Gleichung (1) aus Aufgabe 2 c) nach I auf:

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

- Ersetze in der Formel für die elektrische Energie von oben I durch diesen Ausdruck:

$$E_{\mathsf{el}} = \frac{U^2}{R} \cdot t$$

e) Wie kann die **elektrische Leistung** berechnet werden, die einem Energiewandler mit einem elektrischen Widerstand R zugeführt wird, wenn an diesem Widerstand die Spannung U abfällt?

Hinweis: Beginne mit dem Ergebnis aus Aufgabe 2 d).

$$P_{\mathsf{el}} = \frac{U^2}{R}$$

#### KAPITEL 4. VORBEREITUNG AUF DEN VERSUCHSTAG Effizienter Umgang mit Energie

# Zusatzaufgabe I

Ordne die folgenden Energiemengen und Leistungen richtig den Beispielen zu. Notiere auch eigene Beispiele.

— Energie von 1 g Materie $^1$  — Grundumsatz eines Menschen pro Sekunde — Internet weltweit — ein Photon (blaues Licht) — 100 g Schokolade — eine Stunde das Licht brennen lassen — eine Suchanfrage bei Google — Kernkraftwerksblock — Tagesbedarf eines Menschen — AAA-Batterie —

 $-10~\rm{kJ}-2,25~\rm{MJ}-10~\rm{J}-90~\rm{TJ}-1~\rm{kJ}-3,8~zJ-1~\rm{GW}-10~\rm{MJ}-300~\rm{GW}-80~\rm{W}-144~\rm{kJ}-$  Hinweis: 1 zJ = 10  $^{-21}~\rm{J}$ 

Beispiele für Energie		
Energie eines Photons	3,8 zJ	
(blaues Licht)		
Energie, um	10 J	
1 kg 1 m hochzuheben		
Google-Suchanfrage	1 kJ	
Energie in	10 kJ	
einer AAA-Batterie		
Energie für 1h Licht	144 kJ	
(mit einer 40 W-Birne)		
Energie in 100g Schokolade	2,25 MJ	
Tagesbedarf an Energie	10 MJ	
eines Menschen		
Energie von 1 g Materie	1 TJ	

Beispiele für Leistung		
Grundumsatz Mensch pro Zeit	80 W	
Leistung eines Kernkraftwerkblocks	1 GW	
Internet: Energiebedarf pro Zeit	300 GW	

Quellen: (alle abgerufen am 14.07.2015)

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\_der\_Kernreaktoren\_in\_Deutschland

https://en.wikipedia.org/wiki/Internet

 $\verb|https://de.wikipedia.org/wiki/Grundumsatz||$ 

https://de.wikipedia.org/wiki/Kalorie

https://de.wikipedia.org/wiki/Micro\_(Batterie)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>bei der Umwandlung der Materie in Energie, z. B. bei einer Kernfusion

#### KAPITEL 4. VORBEREITUNG AUF DEN VERSUCHSTAG Effizienter Umgang mit Energie

# Zusatzaufgabe II

- a) Lies bei dir zu Hause am Energiezähler (umgangssprachlich auch "Stromzähler" genannt) den angezeigten Wert (in kWh) zweimal im Abstand von 24 Stunden ab und berechne die vom Energiezähler gemessene Energiemenge.
  - 1. Wert:
  - 2. Wert:

Energiemenge:

- Vergleiche mit den Energien aus Aufgabe 2.
- b) Bestimme mithilfe des Energiezählers deiner Wohnung, welche elektrische Leistung nur von Geräten umgesetzt wird, die ständig im Standby-Betrieb sind oder immer angeschaltet sein müssen wie z. B. der Kühlschrank.

Hinweis: Damit das Ergebnis aussagekräftig ist, muss die Messdauer lang genug sein.

#### Ausführliche Anleitung:

Schalte alle Elektrogeräte zu Hause aus (außer Geräten im Standby-Modus und Geräten, die nicht ausgeschaltet werden sollten wie z.B. dem Kühlschrank). Beobachte den Energiezähler.

Welchen Energieverbrauch misst du, wenn du im Abstand von einigen Stunden (z. B. über Nacht) den angezeigten Wert abliest?

```
\begin{split} E_0 &= 0{,}36 \text{ kWh (beispielhafter Wert)} \\ t &= 9 \text{ h} \\ \text{Welcher Leistung entspricht das?} \\ P_0 &= \frac{0{,}36 \text{ kWh}}{9 \text{ h}} = 0{,}04 \text{ kW} = 40 \text{ W} \end{split}
```

– In Deutschland gibt es etwa 40,3 Mio Privathaushalte. Nimm an, dass jeder Haushalt den gleichen Wert für  $P_0$  misst wie du. Wie viele Kernkraftwerksblöcke müssten laufen, nur um jedem deutschen Haushalt die elektrische Leistung  $P_0$  zur Verfügung zur Verfügung zu stellen?

Annahme: Es wurden 40 W ermittelt.

```
=> für alle 40 Mio Haushalte 1600 Mio W = 1600 MW = 1,6 GW , also \frac{1.6\,\mathrm{GW}}{1\,\mathrm{GW}} = 1.6 Blöcke
```

Zur Info: Die Grundlast in Deutschland beträgt allerdings 45 GW, da ständig laufende Industrieanlagen eingeschlossen.

Quellen: (alle abgerufen am 14.07.2015)

 $https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/StatistischesJahrbuch2012.pdf \\ http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/SELINA_Informationsbrochuere_Standby.pdf \\ http:$ 

KAPITEL 5. SICHERHEITSHINWEISE

Effizienter Umgang mit Energie

# 5 Sicherheitshinweise

Für den Aufbau und die Versuchsdurchführung ist Folgendes zu beachten:

- 1. Ruft vor dem Einschalten von technischen Geräten immer erst einen Betreuer.
- 2. Bei allen verwendeten elektrischen Geräten dürft ihr nicht mehr als die im Laborbuch vorgeschriebene Spannung anlegen, sonst können die Geräte zerstört werden!
- 3. In Station 2 sind im Versuchsaufbau starke Magnete verbaut. Bitte keine empfindlichen Geräte oder magnetisierbare Materialien in die Nähe bringen.
- 4. Berührt in Station 8 den Versuchsaufbau nicht.

Station 1: Diskussion

Effizienter Umgang mit Energie

# 6 Versuche

# 6.1 Station 1: Diskussion

An dieser Station habt ihr die Gelegenheit, grundlegende Fragestellungen zum Thema Energie zu diskutieren.

# Aufgabe 1

- a) Diskutiert: Weshalb ist es physikalisch streng genommen nicht korrekt, von "Energiequellen" und "Energieverbrauchern" zu sprechen?
  - Nein, Energie kann nicht erzeugt oder vernichtet werden. Man kann sie nur von einer Form in eine andere Form umwandeln.
  - Man muss das richtige Gesamtsystem betrachten und auch thermische berücksichtigen, die bei Energieumwandlungsprozessen entsteht. Diese Energie ist zwar für uns Menschen meistens "verloren" weil wir die Energie nicht nutzen, aber physikalisch betrachtet ist diese thermische Energie immer noch im Gesamtsystem enthalten. Es kommt also zur Energieentwertung durch teilweise Umwandlung in thermische Energie bei Energieumwandlungsprozessen.
- b) Warum ist es dennoch richtig, z. B. von "elektrischen Energiequellen" und "elektrischen Energieverbrauchern" zu sprechen?
  - Nennt auch jeweils Beispiele.
  - Eine elektrische Energiequelle wandelt eine andere Energieform (z. B. Rotationsenergie) in elektrische Energie um. Die elektrische Energie entsteht also nicht aus dem "Nichts". Ein elektrischer Energieverbraucher wandelt elektrische Energie in eine andere Energieform um. Die elektrische Energie ist also nicht "verloren", sondern liegt nur in anderer Form (z. B. thermische Energie) vor.
- c) Weshalb widerspricht ein Umwandlungsprozess von einer Energieform in eine andere Energieform, dessen Wirkungsgrad kleiner als 100% ist, nicht dem Energieerhaltungssatz? Es treten in den meisten Fällen "Energieverluste" bei der Umwandlung auf. Die Energie geht dabei aber nicht verloren, sondern wird meistens in thermische Energie umgewandelt. Dadurch ist sie in der Regel nicht mehr nutzbar.

Station 2: Energieumwandlung

Effizienter Umgang mit Energie

# 6.2 Station 2: Energieumwandlung

An dieser Station beschäftigt ihr euch mit verschiedenen **Energieumwandlungsketten**. Darunter versteht man einen Prozess, der aus einer Abfolge mehrerer Energieumwandlungen besteht. Jeder Umwandlungsschritt beginnt dabei mit Energie in derselben Energieform, wie sie nach dem vorherigen Umwandlungsschritt vorliegt.

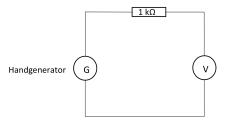
Die Abdeckung vom Handgenerator nie entfernen!

Vorsicht, im Handgenerator sind starke Magnete eingebaut!

Den Handgenerator nie schneller als nötig ankurbeln!

## Aufgabe 1

- a) Überlegt: Was fällt auf, wenn man die Energiemenge am Anfang und am Ende einer beliebigen Energiewandlungskette vergleicht?
  - Bei jeder Umwandlung treten Verluste auf. Das bedeutet, dass ein Teil der Energie z. B. in thermische Energie umgewandelt wird, die man dann oft nicht mehr nutzen kann. Die Energiemenge wird im Lauf der Kette also immer weniger.
- b) An dieser Station arbeitet ihr oft mit dem **Handgenerator** (Das ist die Maschine unter der gläsernen Abdeckung). Wenn man an seiner Kurbel dreht, rotieren Permanentmagnete auf einer Scheibe an einer Spule vorbei. Die Magnete sind so angeordnet, dass abwechselnd ihr Nord- und Südpol nach oben aus der Scheibe zeigen. Jetzt untersucht ihr, was durch die Bewegung der Magnete relativ zur Spule passiert:
  - Schließt die beiden Kabel der Spule des Handgenerators über den  $1 \text{ k}\Omega$ -Vorwiderstand an das Zeigermessinstrument an, indem ihr die folgende Schaltung aufbaut:



Damit wird die Spannung zwischen den beiden Spulendrähten gemessen<sup>2</sup>. Dreht den Handgenerator so langsam, dass sich die Scheibe mit den Magneten gerade so dreht.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Der Widerstand wird zum Schutz des Messinstruments eingebaut, da dieses nur auf niedrige Spannungen ausgelegt ist.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Wegen des eingebauten Vorwiderstands ist der echte Wert der Spannung zwischen den Spulendrähten höher als vom Messinstrument angezeigt. Der genaue Wert der Spannung ist für diesen Versuch unwichtig. Ein Wert von 10 am Messinstrument entspricht einer Spannung von 100 mV; ein Wert von 20 am Messinstrument entspricht einer Spannung von 150 mV.

Station 2: Energieumwandlung

Effizienter Umgang mit Energie

#### Zu schnelles Kurbeln zerstört das Zeigermessinstrument!

Was beobachtet ihr am Zeigermessinstrument?
 Der Zeiger bewegt sich periodisch hin und her, wenn man im selben Tempo kurbelt.
 Der Ausschlag des Zeigers zur linken und zur rechten Seite ist gleich groß.

Wie erklärt ihr euch die Beobachtung? Kennt ihr das zugrunde liegende physikalische

Faraday'sches Induktionsgesetz: Ändert sich das von den Windungen einer Spule umschlossene Magnetfeld, so wird in ihr eine Spannung induziert.

Folgendes wiederholt sich immer wieder, wenn man das Magnetrad dreht: Die magnetische Feldstärke in der Spule vergrößert sich, die magnetische Feldstärke sinkt auf 0, die magnetische Feldstärke steigt in umgekehrter Richtung an und sinkt wieder auf 0.

Dies ist das Grundprinzip, auf dem die **Funktionsweise von Motoren und Generatoren** beruht. Dabei gibt es viele verschiedene Varianten der Anordnungen von Permanentmagneten, Spulen und Elektromagneten.

– Welche Gemeinsamkeiten und welche Unterschiede gibt es zwischen der vom Handgenerator gelieferten Spannung und der **Wechselspannung** ( $U_{\rm max}=230$  V, Frequenz: 50 Hz), die an den Anschlüssen einer Steckdose anliegt? Gemeinsamkeiten: Beides Mal liegt Wechselspannung vor. Unterschiede: Frequenz und maximale Spannung unterscheiden sich. Außerdem ist

Unterschiede: Frequenz und maximale Spannung unterscheiden sich. Außerdem ist das Spannungssignal des Handgenerators ungleichmäßig, wenn man die Art daran zu Kurbeln ändert.

- Wie ändert sich der maximale Wert der Spannung, die ihr am Zeigermessinstrument ablest, wenn ihr ein bisschen schneller kurbelt?
   Die maximale Spannung vergrößert sich.
- Die Spannung, die ihr gemessen habt, kann dazu genutzt werden, einen Strom, fließen zu lassen, z. B. durch eine Lampe.
   Der Handgenerator ist ein Energiewandler. Welche Energieform wandelt der Handgenerator in welche andere Energieform um?
   kinetische Energie → elektrische Energie

Trennt das Zeigermessinstrument wieder vom Handgenerator.

- c) In dieser Aufgabe geht es um den **Motor** und die **blaue LED**<sup>3</sup>. Der Motor ist der gleiche wie an Station 6, doch wird er hier anders herum verwendet, nämlich als **Generator**.
  - Schließt die LED an den Motor an.
  - Dreht an der Scheibe, die an der Achse des Motors befestigt ist, in beiden Richtungen.
     Was beobachtet ihr?

Die LED leuchtet nur bei einer Drehrichtung. Man spürt, dass sich die Scheibe schwerer drehen lässt, wenn man die Drehrichtung wählt, mit der die LED leuchtet. Außerdem

 $<sup>^3</sup>$ Zum Schutz der LED ist diese in Reihe mit einem 150  $\Omega$ -Widerstand geschaltet. Der Widerstand ist schon in das Gehäuse der LED eingebaut.

#### Station 2: Energieumwandlung

Effizienter Umgang mit Energie

kann man beobachten, dass sich die Helligkeit der LED erhöht, wenn man schneller in der richtigen Richtung an der Scheibe dreht.

- Wie erklärt ihr euch die Beobachtung?
   Die LED ist eine Diode, daher leuchtet sie nur, wenn der Strom in der richtigen Richtung fließt. Dreht man in dieser Richtung, muss man sich mehr anstrengen, um den Generator zu drehen, weil ein Verbraucher an den Generator angeschlossen ist. Wenn man in der falschen Richtung dreht, fließt kein Strom im Stromkreis (Aufgrund des Vorwiderstands im Stromkreis schafft man es nicht, so schnell zu kurbeln, dass die Durchbruchspannung erreicht wird und Strom fließt.) und es liegt kein Verbraucher vor. Daher lässt sich der Generator leichter drehen.
- Welche Energieumwandlungen passieren in diesem Versuch?
   Rotationsenergie → elektrische Energie → Lichtenergie

16

Station 2: Energieumwandlung

Effizienter Umgang mit Energie

#### Aufgabe 2

a) Verbindet die **Halogenlampe**, die mit 2 markiert ist, mit dem Handgenerator.

# Halogenlampe auch im kalten Zustand nicht berühren!

- Kurbelt am Handgenerator. Was beobachtet ihr?
   Wenn man schnell genug kurbelt, beginnt die Halogenlampe zu leuchten. Sie leuchtet umso heller, je schneller man kurbelt.
- Die Halogenlampe ist ein Energiewandler. Welche Energieform wandelt sie in welche andere Energieform um?
   elektrische Energie → Lichtenergie
- Was beobachtet ihr, wenn ihr euch beim Kurbeln mehr anstrengt und warum?
   Die Lampe leuchtet heller, weil man dem Handgenerator durch schnelleres Kurbeln mehr Bewegungsenergie zuführt.

Trennt die Halogenlampe vom Handgenerator.

- b) Baut aus den folgenden Geräten eine möglichst lange Energieumwandlungskette:
  - \* Solarzelle 5
  - \* Halogenlampe 1 (Sie ist fest in der schwarzen Kiste eingebaut)
  - \* rote LED (Sie darf nicht direkt an den Handgenerator angeschlossen werden, weil die Spannung bei schnellem Kurbeln zu hoch ist!)
  - \* Handgenerator

Lasst den Aufbau von einem Betreuer überprüfen, bevor ihr am Handgenerator dreht!

Die Kette ist so gedacht wie im Diagramm 6.2.1 auf Seite 18. Wichtig: Die LED muss richtig herum gepolt mit der Solarzelle verbunden werden (+ mit + und - mit -).

- Startet die Energieumwandlungskette. Was beobachtet ihr?
   Die LED beginnt schwach zu leuchten, wenn man stark genug kurbelt.
- Füllt das Energieflussdiagramm auf der folgenden Seite für die Energieumwandlungskette aus.<sup>4</sup> Die Kette könnte z. B. mit der chemischen Energie beginnen, die euer Körper beim Kurbeln umwandelt.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Hinweis: Tragt die Energieformen in die eckigen Kästchen und die Energiewandler in die runden Kästchen ein.

Station 2: Energieumwandlung

Effizienter Umgang mit Energie

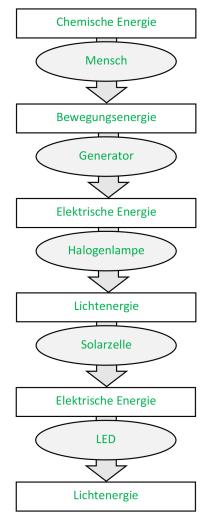


Abbildung 6.2.1

c) Ersetzt die LED in der Energieumwandlungskette durch Halogenlampe 2. Kurbelt am Handgenerator. Weshalb leuchtet Halogenlampe 1 (in der Kiste), Halogenlampe 2 aber nicht?

 $\label{lem:lampe} \begin{tabular}{ll} Halogenlampe & 2 \end{tabular} \begin{tabular}{ll} befindet sich in der Energieumwandlungskette weiter hinten als Halogenlampe & 1 \end{tabular}. Die Energiemenge am Ende der Energieumwandlungskette, wo sich Halogenlampe & 2 \end{tabular} \begin{tabular}{ll} befindet, reicht nicht mehr aus, um diese zum Leuchten zu bringen. \end{tabular}$ 

Baut die Energieumwandlungskette wieder ab.

Station 2: Energieumwandlung

Effizienter Umgang mit Energie

#### Aufgabe 3

In dieser Aufgabe baut ihr später eine Energieumwandlungskette, die ein **Peltier-Element** enthält. Dies ist das kleine weiße quaderförmige Bauteil an dieser Station. Es ist aus zwei Außenplatten aufgebaut, zwischen denen sich ein Halbleiterbauteil befindet. Wenn Strom durch ein Peltier-Element fließt, nimmt die eine Platte eine hohe und die andere eine niedrige Temperatur verglichen mit der Umgebungstemperatur an. Peltier-Elemente werden in diesem Betriebsmodus in vielen verschiedenen technischen Geräten zum Kühlen, Heizen bzw. zum Aufrechterhalten von Temperaturdifferenzen verwendet.

Umgekehrt bewirkt eine <u>Temperaturdifferenz</u> zwischen den beiden Außenplatten eines Peltier-Elements, dass eine Spannung zwischen seinen beiden Anschlüssen besteht. Dann kann es als Quelle elektrischer Energie verwendet werden.

a) Das Peltier-Element ist ein **Energiewandler**. Welche Energieform wandelt es in welche andere Energieform um?

thermische Energie ↔ elektrische Energie

- b) Jetzt experimentiert ihr mit dem Peltier-Element:
  - Schließt den Propellermotor an das Peltier-Element an.
  - Legt das Peltier-Element auf den Tisch und legt den Handballen sanft auf die oben liegende Platte des Peltierelements.

Was beobachtet ihr?

Der Propellermotor dreht sich.

Was passiert, wenn ihr das Peltierelement umdreht und den Versuch erneut durchführt?

Der Propeller bleibt erst stehen und dreht sich dann in die andere Richtung.

Woran könnte das liegen?

Die Richtung des Stroms hat sich umgedreht.

– Weshalb läuft der Propeller noch einen Moment lang weiter, wenn ihr das Peltierelement nicht mehr berührt?

Die obere Platte kühlt sich nicht sofort auf Umgebungstemperatur ab, wenn man sie loslässt.

- c) Baut aus den folgenden Geräten eine möglichst lange Energieumwandlungskette:
  - \* Peltier-Element
  - \* Heizfolie (Sie kann mit den Wäscheklammern befestigt werden.)
  - \* Propellermotor (Er darf nicht direkt an den Handgenerator angeschlossen werden, weil die Spannung bei schnellem Kurbeln zu hoch ist!)
  - \* Handgenerator

Lasst den Aufbau von einem Betreuer überprüfen, bevor ihr am Handgenerator dreht!

Die Kette ist so gedacht wie im Diagramm 6.2.2 auf Seite 20.

- Startet die Energieumwandlungskette. Was beobachtet ihr?

# Station 2: Energieumwandlung

Effizienter Umgang mit Energie

Hinweis: Damit der Propeller sich zu drehen beginnt, müsst ihr ihn eventuell sanft in die richtige Richtung anstoßen.

Der Propellermotor beginnt sich zu drehen, wenn man stark genug kurbelt.

- Füllt das folgende **Energieflussdiagramm** für die Energieumwandlungskette aus:

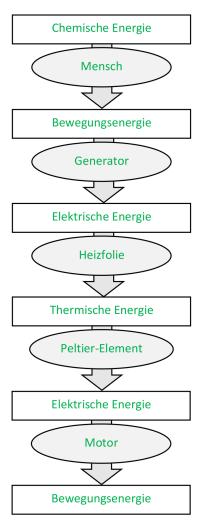


Abbildung 6.2.2

- Baut die Energieumwandlungskette wieder ab.

20

Station 2: Energieumwandlung

Effizienter Umgang mit Energie

# Zusatzaufgabe I

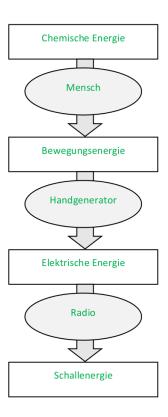
Es ist sogar möglich, ein **Radio** mithilfe des Handgenerators zu betreiben. Schließt dazu den Handgenerator an die graue  $\mathsf{Box}^5$  am Radio an und kurbelt am Handgenerator.

#### Kurbelt nur so schnell, dass das Radio angeht und stabil läuft, nicht schneller!

Sobald ein roter Strich auf dem Display des Radios erscheint, aktiviert ihr den Ton durch Drücken auf  $\fbox{RADIO\ ON/OFF}$ . Mit den mittleren Tasten könnt ihr einen Sender einstellen und mit den Tasten rechts die Lautstärke verändern.

Trennt den Handgenerator nach dem Versuch vom Radio.

Füllt das folgende **Energieflussdiagramm** für diese Energieumwandlungskette aus:



<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Diese sorgt durch Gleichrichtung, Glättung und Spannungsbegrenzung dafür, dass das Radio mit der passenden Spannung von 6 V DC versorgt wird.

Station 2: Energieumwandlung

Effizienter Umgang mit Energie

# Zusatzaufgabe II

Wie könnten die Energieflussdiagramme aus den obigen Aufgaben verbessert werden? Die Pfeildicke müsste nach unten hin abnehmen. Außerdem könnte man noch die "Nebenprodukte" wie z. B. das Entstehen von thermischer Energie bei der Halogenlampe mit eintragen. Eine weitere Möglichkeit wäre noch, den jeweiligen Energieträger einzutragen.

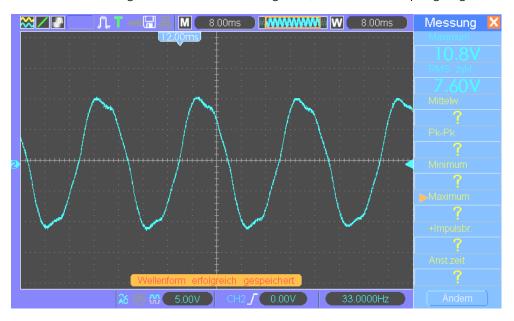
# Zusatzaufgabe III

a) Schaltet das **Oszilloskop** an (Knopf ganz unten links). Es zeigt ein Zeit-Spannungsdiagramm an. Das Gerät sollte bereits richtig eingestellt sein. Falls ihr Fragen habt, ruft einen Betreuer.

Verbindet den 47  $\Omega$ -Widerstand mit dem Handgenerator und schließt parallel dazu das Oszilloskop an.

Hinweis: Das Oszilloskop wird genauso in den Stromkreis eingebaut, wie man ein Multimeter zur Messung von Spannung einbauen würde.

Kurbelt am Handgenerator. Skizziert das Diagramm, das am Oszilloskop angezeigt wird:



Die Dellen im Diagramm sind deshalb sichtbar, weil die Spule nicht ganz symmetrisch vor dem Magnetrad steht.

Kennt ihr eine mathematische Funktion, die ähnlich verläuft? Sinus bzw. Cosinus

 b) Kurbelt erst langsam, dann immer schneller am Handgenerator. Wie verändert sich das t-U-Diagramm, das am Oszilloskop angezeigt wird?
 Amplitude, Durchschnittsspannung und Frequenz vergrößern sich

#### Station 2: Energieumwandlung

Effizienter Umgang mit Energie

Wie erklärt ihr euch eure Beobachtungen?

Die Frequenz steigt, da häufiger Magnete die Spule passieren. Die Amplitude steigt, da sich ein einzelner Wechsel der Polarität des Magnetfeldes, das die Spule aufgrund der sich vorbei drehenden Magnete umgibt, schneller vollzieht.

- c) Berührt vorsichtig den 47  $\Omega$ -Widerstand im Stromkreis, nachdem ihr gekurbelt habt. Was stellt ihr fest? Was ist passiert? Der Widerstand hat eine hohe Temperatur, da der Widerstand elektrische Energie in thermische Energie umgewandelt hat.
- d) Schätzt mithilfe des Kraftmessers und des Oszilloskops den **Wirkungsgrad** des Handgenerators ab, wenn dieser aufgrund von eurem Kurbeln Strom durch den 47  $\Omega$ -Widerstand fließen lässt.

#### Hinweise:

- Benutzt die Schaltung aus Zusatzaufgabe I c).
- Ihr habt folgendes Material zur Verfügung: Oszilloskop, Lineal, Stoppuhr, Kraftmesser
- Der unter "RMS zykl"<sup>6</sup> am Oszilloskop angezeigte Wert der Spannung entspricht etwa der durchschnittlichen betragsmäßigen Spannung ("Effektivwert") im angezeigten Diagramm. Dieser Wert eignet sich zur Berechnung der elektrischen Leistung, die der Widerstand umwandelt.
- Ihr könnt die Anzeige der Frequenz am Oszilloskop (unten links im Bildschirm) dazu nutzen, um sicherzustellen, dass ihr während der Messungen immer mit der selben Frequenz kurbelt.

Schaltet das Oszilloskop aus, wenn ihr fertig seid.

Die Messwerte hängen davon ab, wie schnell man kurbelt. Die hier aufgeführten Messwerte misst man, wenn man so kurbelt, dass am Oszilloskop eine Frequenz von 32 Hz angezeigt wird.

# **Elektrische Leistung:**

$$P_{\rm el} = \frac{(U_{\rm RMS~zykl})^2}{R} = \frac{(9.2~{\rm V})^2}{47~\Omega} = 1.8~{\rm W}$$
 (Zum Vergleich: Der Mikrowellenherd aus Station 5 hat eine Leistung von 700 W.)

Mechanische Leistung:  $P_{\text{mech}} = \frac{F \cdot \Delta s}{\Delta t}$ 

Die zum Kurbeln nötige <u>Kraft</u> wurde abgeschätzt durch Vergleich mit der Kraft, die zum Ziehen mit der Hand am Kraftmesser nötig ist. (Direkt den Kraftmesser an die Kurbel zu hängen funktioniert nur bei niedrigen Frequenzen.)

$$F = 10 \,\mathrm{N}$$

 $<sup>^6</sup>$ "RMS" ist die Abkürzung für "root mean square". Bei einem sinusförmigen Spannungssignal (Wechselspannung) berechnet sich der Effektivwert  $U_{\rm eff}$  durch  $U_{\rm eff}=\frac{1}{\sqrt{2}}\cdot U_{\rm max}$ . Der vom Oszilloskop angezeigte Effektivwert bezieht sich auf die erste vollständige Periode, die im Diagramm sichtbar ist.

#### Station 2: Energieumwandlung

Effizienter Umgang mit Energie

Die Zeit pro Umdrehung wurde durch die Messung der Dauer von 40 Umdrehungen berechnet:

$$\Delta t = 0.48 \,\mathrm{s}$$

Der  $\underline{\text{Weg}}$ , entlang dessen man die Kraft aufbringt, ist der Umfang des Kreises, den der Kurbelgriff beim Kurbeln beschreibt:

$$\Delta s = 2 \cdot \pi \cdot r_{\mathsf{Kurbel}} = 2 \cdot \pi \cdot 0.85 \,\mathrm{m} = 0.53 \,\mathrm{m}$$

Damit ergibt sich für die mechanische Leistung, die man beim Kurbeln aufgewendet hat:

$$P_{\mathsf{mech}} = \frac{F \cdot \Delta s}{\Delta t} = \frac{10 \, \mathrm{N} \cdot 0,53 \, \mathrm{m}}{0,48 \, \mathrm{s}} = 11 \, \mathrm{W}$$

#### Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{P_{\rm el}}{P_{\rm mech}} = \frac{1.8\,{\rm W}}{11\,{\rm W}} = 0.16$$
 , das entspricht 16%.

e) Nehmt an, ihr würdet ein Stück Schokolade essen, das einen Energiegehalt von 250 kcal hat (das entspricht einer halben Tafel). Geht außerdem davon aus, dass euer Körper die so erhaltene Energie vollständig nutzt. Wie lange könntet ihr dann mit der so aufgenommenen Energie in dem Tempo am Handgenerator kurbeln, wie ihr es in Zusatzaufgabe III d) getan habt?

Aus Kapitel 4 wissen wir: 1 kcal = 4,186 kJ. Damit und mit der vorhin berechneten mechanischen Leistung folgt:

$$P = \frac{E}{t} \Leftrightarrow t = \frac{E}{P} = \frac{250 \text{ kcal} \cdot 4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{ckal}}}{11 \text{ W}} = 95136 \text{ s} = 26,4 \text{ h}$$

Station 3: Windenergie

Effizienter Umgang mit Energie

# 6.3 Station 3: Windenergie

Windenergie ist ein wichtiger Baustein in der Energieversorgung aus regenerativen Energiequellen. In dieser Station untersucht ihr experimentell und theoretisch den Zusammenhang von Windgeschwindigkeit und Energie des Windes. Dazu steht euch ein Modell einer Windkraftanlage bestehend aus einem Generator und einem Rotor im Windkanal zur Verfügung.

# Aufgabe 1

#### Öffnet nie die Messkammer des Windkanals!

 a) Die Windkraftanlage ist ein Energiewandler. Welche Energieform wandelt die Windkraftanlage in welche andere Energieform um?
 kinetische Energie → elektrische Energie

#### b) Vorbereitung der Messungen:

- Öffnet die Datei "Windenergie\_Messung.ds", die sich auf dem Desktop des PCs befindet.
- Klickt Fertig im ersten erscheinenden Fenster.
- Klickt auf ► Start zum Start der Messung der Windgeschwindigkeit.
- Schließt den  $\mathbf{68}~\Omega$  Widerstand an die beiden Kabel an, die aus der Messkammer des Windkanals führen.
- Baut das Multimeter so in den Stromkreis ein, dass damit die am Widerstand abfallende Spannung gemessen wird.

Stellt durch Drücken von Select am Multimeter den Messmodus für Gleichstrom ein (oben links muss "DC" angezeigt werden)!

Tipp: Baut die Schaltung zuerst ohne das Multimeter auf. Falls ihr alleine nicht weiterkommt, könnt ihr auf die Hilfekarte "Messung von Spannung mit dem Multimeter" schauen. Falls ihr trotzdem noch Hilfe braucht, nutzt die Hilfekarte "Schaltung Station 3".

- Lasst die Schaltung von einem Betreuer überprüfen.

#### c) Messung:

– Dreht den **schwarzen Drehknopf des Windkanals** im Uhrzeigersinn auf. Je weiter im Uhrzeigersinn ihr dreht, desto geringer ist die Windgeschwindigkeit. Stellt den Drehknopf so ein, dass im Programm *DataStudio* die Windgeschwindigkeit  $5\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$  angezeigt wird.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>Der Widerstand dient als Verbraucher im Stromkreis. An Stelle eines Lämpchens als Verbaucher verwenden wir diesen Widerstand, da er optimal an die Energiequelle angepasst ist.

#### Station 3: Windenergie

Effizienter Umgang mit Energie

$v_{Wind}\left[rac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} ight]$	$R [\Omega]$	<i>U</i> [V]	P [W] erst in Aufgabe 2 ausfüllen!
5	68	2,3	0,078
6	47	2,4	0,123
7	47	3,0	0,192
8	47	3,6	0,276
9	47	4,3	0,393
10	47	4,7	0,470
11	47	5,3	0,598
12	47	5,6	0,667

Tabelle 6.3.1

Bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten dreht sich der Rotor noch nicht bzw. nur mit sehr viel Reibung. Daher ist es nicht sinnvoll, dort zu messen.

<u>Wichtig</u>: Die **Windgeschwindigkeit** im Windkanal **passt sich nicht sofort** an eine Veränderung am schwarzen Drehknopf **an**. Wartet daher vor jeder Messung kurz, bis die Windgeschwindigkeit sich angepasst hat und korrigiert sie vorsichtig, falls nötig. **Beobachtet das Multimeter einen Augenblick**, um einen sinnvollen Messwert zu finden

- Lest die mit dem Multimeter gemessene Spannung ab und tragt den Wert in Tabelle 6.3.1 ein.
- Dreht den schwarzen Regler des Windkanals so lange gegen den Uhrzeigersinn, bis die **Windgeschwindigkeit** wieder bei  $5\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$  liegt.
- d) Schaltet den Windkanal aus (Windgeschwindigkeit auf  $0\,\frac{m}{s}$  einstellen). Tauscht in der Schaltung den 68  $\Omega$  Widerstand gegen den 47  $\Omega$  Widerstand aus<sup>8</sup>. Messt analog zu Aufgabe 1 c) die Spannungen bei höheren Windgeschwindigkeiten. Hinweis: Die Messwerte können durchaus etwas von den hier eingetragenen abweichen, weil die Messung schwierig ist.
- e) Schließt das Programm *DataStudio*. Wenn das Programm fragt, ob die Aktivität gesichert werden soll, klickt auf Nein.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>Die unterschiedlichen Widerstände müssen verwendet werden, weil der Generator nicht bei allen Drehzahlen gleich arbeitet.

	<b>-</b>
Station 3: Windenergie	Effizienter Umgang mit Energie
Baut die Schaltung wieder ab und legt eve	entuell verwendete Hilfekarten zurück.
-	
2	

Station 3: Windenergie

Effizienter Umgang mit Energie

Wechselt zu "Station 3 - Auswertung", damit die nächste Gruppe Messungen vornehmen kann.

# Aufgabe 2

Jetzt wertet ihr die Daten aus Aufgabe 1 aus.

a) Wie lautet die Formel für die elektrische Leistung?

$$P_{\mathsf{el}} = \mathsf{UI}$$

Wie ist der elektrische Widerstand definiert?

(1) 
$$R =$$

Löst Gleichung (1) nach I auf:

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

Ersetzt in der Formel für die elektrische Leistung von oben I durch diesen Ausdruck:

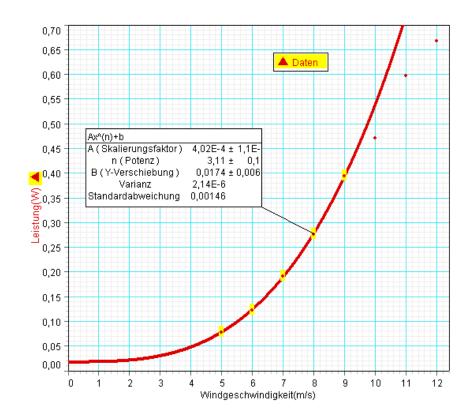
$$P_{\rm el} = \frac{U^2}{R}$$

**Berechnet** für jede Windgeschwindigkeit die **Leistung des Generators** mithilfe der gemessenen Spannung und dem verwendeten Widerstand. Tragt den Wert in Tabelle 6.3.1 ein.

- b) Öffnet die Datei "Windenergie\_Auswertung.ds", die sich auf dem Desktop des PCs befindet
  - Tragt die Wertepaare Windgeschwindigkeit Leistung in die Tabelle im Fenster "Tabelle 1" ein.
  - Jetzt sollten die Messwerte im Fenster "Graph 1" angezeigt werden.

Station 3: Windenergie

# Effizienter Umgang mit Energie



- c) Wir wollen den Verlauf der Messkurve für kleine Windgeschwindigkeiten<sup>9</sup> genauer untersuchen.
  - Welche Abhängigkeit zwischen Windgeschwindigkeit und Leistung des Generators im Bereich bis 9  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  passt am besten? Eher eine wurzelförmige ( $P_{\text{Generator}} \sim \sqrt{v_{\text{Wind}}}$ ), eine lineare ( $P_{\text{Generator}} \sim v_{\text{Wind}}$ ), eine quadratische ( $P_{\text{Generator}} \sim v_{\text{Wind}}^3$ ), eine kubische ( $P_{\text{Generator}} \sim v_{\text{Wind}}^3$ ), ...?

 $<sup>^{9}</sup>$ Ab einer Windgeschwindigkeit von 9  $\frac{m}{s}$  flacht die Kurve ab, da die Windkraftanlage dann nicht mehr in dem für sie optimalen Windgeschwindigkeitsbereich arbeitet. Daher betrachten wir jetzt nur kleinere Windgeschwindigkeiten.

#### Station 3: Windenergie

Effizienter Umgang mit Energie

- Nehmt eine Kurvenanpassung mit DataStudio vor:
  - \* Markiert im Fenster "Graph 1" die Datenpunkte, die zu Windgeschwindigkeiten bis 9  $\frac{m}{s}$  gehören. Sie sollten dadurch gelb umrandet werden.
  - \* Klickt auf die untere Schaltfläche Kurvenanpassung
  - \* Wählt folgende Funktion aus: Ax^n+B Darin sind a, b und n Parameter und x steht für die x-Variable. x ist in unserem Fall die Windgeschwindigkeit. Unser Ziel ist es, einen Wert für n zu erhalten.
  - \* Klickt auf Annehmen .
  - \* Lest den Wert für n ab:

$$n = 3.1 \pm 0.1$$

\* Welche Abhängigkeit zwischen Windgeschwindigkeit und Leistung des Generators liegt also bei eurem Messergebnis vor?

$$P_{\text{Generator}} \sim v_{\text{Wind}}^3$$

d) Skizziert eure Messergebnisse im folgenden Diagramm: siehe oben

Station 3: Windenergie

Effizienter Umgang mit Energie

e) Für den Zusammenhang zwischen der Leistung des Generators und der Windgeschwindigkeit gilt folgende Formel:

 $P_{\mathsf{Generator}} \sim P_{\mathsf{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot \varrho \cdot A \cdot v_{\mathsf{Wind}}^3 \left(\varrho = \mathsf{Luftdichte}, A = \mathsf{Rotorfläche}\right)$ 

Vergleicht mit eurem Messergebnis.

# Zusatzaufgabe I

- a) Vergleicht zwei unterschiedliche Standorte für baugleiche Windkraftanlagen: Am Standort A beträgt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit 2  $\frac{m}{s}$ , am Standort B sind es 4  $\frac{m}{s}$ . Um wie viel Prozent höher ist die durchschnittliche Leistung der Anlage am Standort B gegenüber Standort A?
  - $v_B=2\cdot v_A\Rightarrow P_B=2^3\cdot P_A\Rightarrow$  Die durchschnittliche Leistung am Standort B ist 800% höher als am Standort A.
- b) Der maximal erreichbare Wirkungsgrad einer idealen Windkraftanlage liegt bei 59 %. Was könnte der Grund dafür sein, dass keine höheren Wirkungsgrade möglich sind? Bremst man den Wind zu stark ab, ist der Durchsatz an Luftmoleküle zu gering (die Stromröhre ist "verstopft") und es kann keine Leistung entnommen werden. Die Luft hinter der Turbine kann nicht stillstehen. Rechnerisch ergibt sich als maximaler Wirkungsgrad 59%.
- c) Wie hängt die Leistung einer Windkraftanlage von der effektiven Fläche des Rotors in Windrichtung ab? Nach der oben hergeleiteten Formel besteht ein linearer Zusammenhang. Die Leistung ist also Proportional zur Rotorfläche. In der Realität muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich das Strömungsverhalten der Luft ändert, wenn die Rotorgröße oder geometrie verändert wird.

# Zusatzaufgabe II

Die mit der Windkraftanlage aus dem Wind entnehmbare Energiestromstärke (Leistung) ist proportional zur Leistung des Windes selbst. Daher untersuchen wir jetzt die Abhängigkeit der Leistung des Windes von der Windgeschwindigkeit. Zeigt in einer Herleitung, dass die Leistung des Windes direkt proportional zur Luftdichte, zur Querschnittsfläche des Windrades und zur dritten Potenz der Windgeschwindigkeit ist.

Falls ihr nicht weiterkommt, könnt ihr auf die Hilfekarte "Station 3: 1. Hilfe zu Zusatzaufgabe II" schauen. Wenn ihr danach immer noch Hilfe benötigt, verwendet Hilfekarte "Station 3: 2. Hilfe zu Zusatzaufgabe II.

Station 3: Windenergie

Effizienter Umgang mit Energie

# Inhalt von Hilfekarte Station 6: 2. Hilfe zu Zusatzaufgabe II

Die Energie des Windes liegt in Form von Bewegungsenergie vor. Wie lautet allgemein die Formel für die Bewegungsenergie?

Hinweis: Die Formel habt ihr im Vorbereitungsteil bereits aufgeschrieben.

(1) 
$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Welcher Zusammenhang zwischen Dichte, Volumen und Masse eines Stoffes gilt allgemein?

(2) 
$$\varrho = \frac{m}{V}$$

Stellt die Gleichung nach der Masse um:

(3) 
$$m = \varrho \cdot V$$

Wir betrachten ein Luftvolumen  $V=A\cdot \Delta s$  mit Grundfläche A und Länge  $\Delta s$ , das sich vor einem Windrad mit Querschnittsfläche A befindet. Setzt diese Formel für V in Gleichung (3) ein:

(3') 
$$m = \varrho \cdot A \cdot \Delta s$$

Setzt Gleichung (3') in Gleichung (1) ein:

(Wegen des jetzt in der Gleichung enthaltenen  $\Delta s$  schreiben wir ab hier  $\Delta E$  statt E.)

(1') 
$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot \varrho A \cdot \Delta s \cdot v^2$$

Teilt Gleichung (1') durch  $\Delta t$ :

(1") 
$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{1}{2} \varrho A \Delta s v^2$$

Ersetzt in Gleichung (1")  $\frac{\Delta s}{\Delta t}$  durch v:

(1") 
$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \varrho \cdot A \cdot v^3$$

Legt eventuell verwendete Hilfekarten nach der Bearbeitung der Aufgabe zurück.

Station 4: Solarenergie

Effizienter Umgang mit Energie

# 6.4 Station 4: Solarenergie

Die Nutzung der Energie der Sonne mit Photovoltaik-Anlagen ist ein wichtiger Bestandteil der Energieversorgung aus erneuerbaren Energien. In dieser Station untersucht ihr Solarzellen näher.

#### Versuchsaufbau

 Der Halogenstrahler ist nach oben 75 cm von der Tischplatte entfernt, sein Stativ steht direkt an der Tischkante.

Vorsicht! Den Strahler bitte nicht berühren, er wird sehr heiß!

- Legt Solarzelle 1 auf den auf dem Tisch markierten Platz.
- Für den Aufbau von Schaltungen steht euch ein Steckbrett (schwarzer Kasten) zur Verfügung. Die Anschlüsse, die in einer weiß markierten Reihe liegen, sind elektrisch leitend verbunden.

# Aufgabe 1

In dieser Aufgabe geht es um die Kennlinie einer Solarzelle. Ihr arbeitet dabei mit **Solarzelle**1. Diese wird mit verschiedenen Widerständen verbunden, welche als Verbraucher dienen. Je nach dem, welchen Widerstand man an die Solarzelle anschließt, ändern sich Stromstärke und Spannung und damit auch die elektrische Leistung.

- a) Die Solarzelle ist ein Energiewandler. Welche Energieform wandelt die Solarzelle in welche andere Energieform um?
- b) Verbindet Solarzelle 1 mit dem 100  $\Omega$  -Widerstand.
- c) Baut das Multimeter so in den Stromkreis ein, dass damit die am Widerstand abfallende Spannung gemessen wird.

Stellt durch Drücken von Select am Multimeter den Messmodus für Gleichstrom ein (oben links muss "DC" angezeigt werden)!

Tipp: Baut die Schaltung zuerst ohne das Multimeter auf. Falls ihr alleine nicht weiterkommt, könnt ihr auf die **Hilfekarte "Messung von Spannung mit dem Multimeter"** schauen. Falls ihr trotzdem noch Hilfe braucht, nutzt die **Hilfekarte "Schaltung Station 4"**.

#### Lasst die Schaltung von einem Betreuer überprüfen.

- d) Schaltet den Strahler ein und messt sofort mithilfe des Multimeters die am abfallende Spannung. Schaltet den Strahler anschließend gleich wieder aus<sup>10</sup>.
- e) Wiederholt die **Messung** für die Widerstände mit den Werten 1000  $\Omega$ , 3200  $\Omega$ , 4700  $\Omega$

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup>Der Wirkungsgrad einer Solarzelle ist umso geringer, je höher die Temperatur ist. Weil der angeschaltete Strahler die Solarzelle erwärmt, sollte er daher immer nur kurz für die Messung angeschaltet werden.

Station 4: Solarenergie

Effizienter Umgang mit Energie

und 10000  $\Omega.$  Notiert die Messergebnisse in Tabelle 6.4.1.

Messung	Auswertung	
$R [\Omega]$	U [V]	I [A]
100	0,33	0,0033
1000	3,3	0,0033
3200	10,1	0,0032
4700	13,1	0,0028
8200 (freiwillig)	15,8	0,0019
10000	16,1	0,0016

Tabelle 6.4.1

f) Wie lautet die Definitionsformel für den elektrischen Widerstand?

R =

Stellt die Formel nach I um:

I =

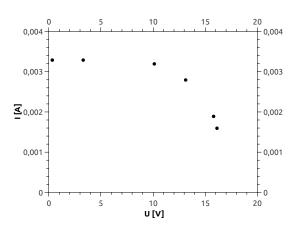
Berechnet für jede Tabellenzeile die Stromstärke.

 $I = \frac{U}{R}$ , siehe Tabelle 6.4.1

g) Zeichnet die Messergebnisse in das folgende  $\mbox{\em U-I-Diagramm}$  ein:

Station 4: Solarenergie

#### Effizienter Umgang mit Energie



h) Wie lautet die Formel für die elektrische Leistung?

 $P_{\mathsf{el}} = UI$ 

i) Woran kann man in einem U-I-Diagramm die zu einem Messwert gehörende elektrische Leistung erkennen?

Die elektrische Leistung zu einem Messwert  $(U_1|I_1)$  entspricht im U-I-Diagramm der Fläche des Rechtecks mit den Eckpunkten (0|0) und  $(U_1|I_1)$ , das zwei Seiten mit den Koordinatenachsen gemeinsam hat.

j) Analysiert das Diagramm: Bei welcher Spannung hat die Solarzelle in diesem Aufbau die höchste elektrische Leistung? Wie hoch ist diese?

Am Maximum Power Point, d.h., wenn die Fläche des oben beschriebenen Rechtecks maximal ist.

Hilfestellung: Falls die Schüler beim Finden des Punktes im Diagramm Schwierigkeiten haben, kann man sie auch die Leistungen anhand der Messwerte berechnen und ein U-P-Diagramm aufstellen lassen. Dann ist der Punkt mit der optimalen Leistung besser zu erkennen.

$$P_1 = U \cdot I = 13,26 \,\mathrm{V} \cdot 0,0028 \,\mathrm{A} = 0,037 \,\mathrm{W}$$

Der Punkt im Diagramm, der zur maximalen Spannung gehört, wird "Maximum Power Point" genannt. Seine Position ändert sich je nach Beleuchtungsstärke.

k) Baut die Schaltung wieder ab und legt eventuell verwendete Hilfekarten zurück.

#### Zusatzaufgabe I

Verbindet Solarzelle 1 (ohne Widerstand im Stromkreis) mit dem Multimeter. Wie verändert

# Effizienter Umgang mit Energie Station 4: Solarenergie sich die am Multimeter gemessene Spannung, wenn ihr in verschiedenen Winkeln zur Tischplatte schräg über ihrem Platz haltet? Die Spannung ist umso höher, je mehr man die Solarzelle senkrecht zum Lichtstrahl hält. Wie erklärt ihr euch die Beobachtung? Die Anzahl der pro Flächeneinheit auftreffenden Photonen ist umso größer, je senkrechter man die Solarzelle in ihren Strahl hält (geometrische Überlegung). 36

# Zusatzaufgabe II

a) Legt die Solarzellen Nr. 2 und 3 zusätzlich auf die auf dem Tisch markierten Plätze. Messt die Leerlaufspannung von der Solarzellen 1 - 3: Schließt nacheinander das Multimeter ohne einen Verbraucher im Stromkreis an die einzelnen Solarzellen an und messt die Spannung bei eingeschaltetem Strahler. Schaltet den Strahler nur kurz für die Messung ein. Schaltet ihn zwischen den Messungen aus.

$$U_{\rm I,1} = 18.0 \, \rm V$$

$$U_{1,2} = 17.6 \, \mathrm{V}$$

$$U_{\rm I.3} = 16.4 \, \rm V$$

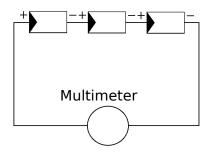
b) Messt den Kurzschlussstrom von der Solarzellen 1 - 3: Schließt nacheinander das Multimeter ohne einen Verbraucher im Stromkreis an die einzelnen Solarzellen an und messt die Stromstärke bei eingeschaltetem Strahler. Wichtig: Schaltet das Multimeter derart und stellt es so ein, dass der Messbereich mA ausgewählt ist (siehe Hilfekarte, falls ihr nicht weiterkommt.). Schaltet den Strahler nur kurz für die Messung ein. Schaltet ihn zwischen den Messungen aus.

$$I_{k,1} = 3.35 \,\mathrm{mA}$$

$$I_{k,2} = 3.32 \,\mathrm{mA}$$

$$I_{k,3} = 2.94 \,\mathrm{mA}$$

- c) Nun untersucht ihr eine Reihenschaltung aus den drei Solarzellen.
  - Verbindet die Solarzellen mithilfe des Steckbretts durch eine Reihenschaltung. Dazu schaltet ihr die Solarzellen hintereinander (Polung beachten!).



- Wie hoch ist die (Leerlauf-) Spannung, die an der allen drei Solarzellen zusammen

# Station 4: Solarenergie

# Effizienter Umgang mit Energie

abfällt? Überlegt zuerst und messt dann mit dem Multimeter!

#### Überlegung:

Reihenschaltung => Summe der einzelnen Spannungen:  $52\,\mathrm{V}$ 

Messung:  $U_R = 52.9 \,\mathrm{V}$ 

 Wie hoch ist die (Kurzschluss-) Stromstärke der Schaltung? Überlegt zuerst und messt dann mit dem Multimeter!

# Überlegung:

 ${\sf Reihenschaltung} => {\sf ungef\"{a}hr} \; {\sf so} \; {\sf groß} \; {\sf wie} \; {\sf die} \; {\sf einzelnen} \; {\sf Stromst\"{a}rken}$ 

Messung:  $I_R = 3.09 \,\mathrm{mA}$ 

- Wie hoch ist die Gesamtleistung der in Reihe geschalteten Solarzellen?

 $P=U\cdot I=0.16\,\mathrm{W}$ 

 Was passiert mit Stromstärke und Spannung, wenn ihr Solarzelle Nummer 3 mit der schwarzen Pappkarte zuhaltet?

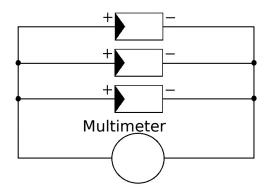
Man misst praktisch keine Gesamtstromstärke ( $I=0.22\,\mathrm{mA}$ ) und  $U_{\mathrm{l,1}}+U_{l,2}$ , Messung:  $34.2\,\mathrm{V}$ , also etwas weniger.

#### Station 4: Solarenergie

Effizienter Umgang mit Energie

d) Jetzt geht es um eine Parallelschaltung der Solarzellen. **Hinweis: Batterien dürfen nie parallel geschaltet werden!** 

 Verbindet die Solarzellen mithilfe des Steckbretts durch eine Parallelschaltung. Dazu verbindet ihr alle Pluspole der Solarzelle miteinander und alle Minuspole.



– Wie hoch ist die (Leerlauf-) Spannung, die an der allen drei Solarzellen zusammen abfällt? Überlegt zuerst und messt dann mit dem Multimeter!

#### Überlegung:

Die Gesamtspannung von mehreren parallel geschalteten Spannungsquellen ist, sofern man den Verlust über den Innenwiderstand außer Acht lässt, gleich der Spannung der einzelnen Spannungsquellen.

Messung:  $U_P = 17.2 \, \mathrm{V}$ 

 Wie hoch ist die (Kurzschluss-) Stromstärke der Schaltung? Überlegt zuerst und messt dann mit dem Multimeter!

Überlegung: Stromstärken addieren sich

Messung:  $I_P = 9.4 \,\mathrm{mA}$ 

 Wie hoch ist die Gesamtleistung der parallel geschalteten Solarzellen? Vergleicht mit dem Ergebnis aus Aufgabenteil c).

 $P=U\cdot I=0.16\,\mathrm{W}.$  Es ist also für die Gesamtleistung egal, ob man Reihenschaltung oder Parallelschaltung wählt.

 Was passiert mit Stromstärke und Spannung, wenn ihr Solarzelle Nummer 3 mit der schwarzen Pappkarte zuhaltet?

Station 4: Solarenergie

Effizienter Umgang mit Energie

Nur noch die Ströme aus den beiden anderen Solarzellen addieren sich -> Messwert  $I=6.55\,\mathrm{mA}$ , ungefähr gleiche Spannung ( $U=16.3\,\mathrm{V}$ )

e) Eine herkömmliche kristalline Solarzelle aus einem Solarmodul, wie ihr sie auf diesem Stationstisch liegen seht, mit einer Größe von etwa 15 cm x 15 cm erzeugt eine elektrische Spannung von etwa 0,5 V und liefert eine Kurzschluss-Stromstärke von etwa 5 A.

Könnt ihr euch erklären, weshalb man in Solarmodulen, die man z. B. auf Hausdächern findet, die einzelnen Solarzellen wie in Abbildung 6.4.1 zusammenschaltet?

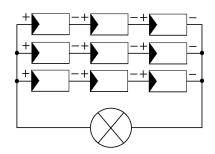


Abbildung 6.4.1: Schaltung in einem Solarmodul

Ein Solarmodul besteht aus vielen, meist in Reihe geschalteten Solarzellen (so wird eine höhere Gesamtspannung des Solarmoduls erreicht). Auch die Solarmodule werden wieder mit anderen Solarmodulen zusammengeschaltet.

Eine Reihenschaltung der einzelnen Solarmodule führt zu einer noch höheren Gesamtspannung. Wenn allerdings eines der Solarmodule z.B. verschattet wird, ist die "Kette" dadurch unterbrochen und es kann kein elektrischer Strom mehr fließen. Die gesamte Photovoltaikanlage fällt aus.

Eine Parallelschaltung der einzelnen Solarmodule führt zu einer höheren Gesamtstromstärke. Wenn bei einer Parallelschaltung einzelne Solarmodule ausfallen, weil sie z.B. verschattet sind, kann durch die anderen Solarmodule immer noch elektrischer Strom fließen. Die abgeschatteten Module wirken als "Verbraucher". Die Gesamtstromstärke wird geringer. Häufig wird eine Kombination aus Reihenschaltung und Parallelschaltung der Solarmodule gewählt.

40

Station 5: Effizienz von Haushaltsgeräten

Effizienter Umgang mit Energie

#### 6.5 Station 5: Effizienz von Haushaltsgeräten

Ein wichtiger Beitrag zur Neugestaltung unserer Energieversorgung ist die Einsparung von Energie. Denn Energie, die nicht verbraucht wird, muss gar nicht erst produziert werden. Effiziente Haushaltsgeräte können zm Energiesparen beitragen.

Der Topf darf nicht in den Mikrowellenherd gestellt werden!

Vorsicht, bei allen Geräten Gefahr von Verbrühung und Verbrennung! Topfhandschuhe und Topfuntersetzer verwenden!

Herdplatten und Wasserkocher nur am Drehknopf bzw. Griff berühren, sie werden heiß! Geräte nach Ende der Messung ausschalten!

#### Aufgabe 1

- a) In diesem Versuch geht es darum, wie viel Energie die vier Geräte Induktionsplatte, Wasser-kocher, Mikrowellenherd und Elektroplatte jeweils zum Erhitzen von 500 ml Leitungswasser auf eine Temperatur von 100 °C benötigen.
  - Was vermutet ihr: Welches Gerät braucht am meisten, welches am wenigsten elektrische Energie dafür?
- b) Macht euch vor der ersten Messung mit dem Messgerät EnergyCheck 3000 vertraut (siehe Karte "Station 5: Bedienung des Energiemessgeräts"). Füllt dazu etwas Leitungswasser in den Wasserkocher und messt mithilfe des Energy Check 3000 die Energie, die dem Wasserkocher zugeführt wird, wenn man ihn 20 Sekunden betreibt.

Leert das heiße Wasser aus und spült den Wasserkocher mit Leitungswasser aus.

- Führt die Messungen für die folgenden beiden Geräte parallel mit den beiden Energiemessgeräten durch:
  - Messt jeweils, wieviel Energie das Gerät braucht, um 500 ml kaltes Leitungswasser zum Sieden zu bringen. Notiert Energie und die Dauer bis zum Sieden in Tabelle Tabelle 6.5.1 auf Seite 42. Anschließend gießt ihr das heiße Wasser weg und spült den Wasserbehälter mit kaltem Leitungswasser aus.
    - \* **Elektroplatte** (auf höchster Stufe, Topf mit geschlossenem Deckel)
    - \* **Mikrowellenherd** (Verwendet für das Wasser das Becherglas und legt einen Stein<sup>11</sup> hinein. Stellt mindestens 6 Minuten bei der Zeitauswahl des Mikrowellenherds ein.)

Aufgaben während der Wartezeit auf die Messergebnisse von Elektroplatte und Mikrowellenherd:

 Messt die Temperatur von frischem Leitungswasser mithilfe des Thermometers, (siehe Karte "Station 5: Bedienung des Thermometers"). Füllt dazu ca. 300 ml neues Leitungswasser in den Messbecher.

 $T_0 = 20 \, ^{\circ}\text{C}$  (Kann je nach Wetter schwanken!)

41

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>Dieser dient zur Verhinderung eines Siedeverzugs.

#### Station 5: Effizienz von Haushaltsgeräten

Effizienter Umgang mit Energie

 Berechnet allgemein: Welche thermische Energie wird dem Leitungswasser durch das Erwärmen auf 100 °C zugeführt? Drückt das Ergebnis auch in kWh aus.

Hinweis: Die Formel für die thermische Energie und die Umrechnung der Einheiten habt ihr bereits im Vorbereitungsteil aufgeschrieben. Für die spezifische Wärmekapazität des Leitungswassers gilt  $c_{\textit{Wasser}} = 4.18 \, \frac{\text{J}}{\text{g·K}}$ .

 $E_{\rm koch}=c\cdot m\cdot (100\,{\rm ^{\circ}C}-T_0)=167\,{\rm kJ}=0.046\,{\rm kWh}$  (Ergebnis variiert je nach Messergebnis für  $T_0!$ )

Unterbrecht die Rechnung, falls die Messungen von Elektroplatte und Mikrowellenherd schon zu Ende sind.

- d) Führt für die folgenden Geräte die Messungen analog zu Aufgabe 1 c) parallel mit den beiden Energiemessgeräten durch.
  - \* Wasserkocher
  - \* Induktionsplatte (auf höchster Stufe, Topf mit geschlossenem Deckel)

# Aufgaben während der Wartezeit auf die Messergebnisse von Wasserkocher und Induktionsplatte:

- Vervollständigt die Rechnung aus Aufgabe 1 c), falls nötig.
- Füllt die Felder in der Spalte "Auswertung" von Tabelle 6.5.1 für Elektroplatte und Mikrowellenherd aus.

Hinweis:  $\eta$  ist das Symbol für den Wirkungsgrad. Überlegt für die Berechnung des Wirkungsgrads: Welches ist die zugeführte Energie? Welches ist die gewünschte Energie?

Messung			Auswertung	
Gerät	zugeführte	Dauer	Dauer	η
	Energie [kWh]	[mm:ss]	[s]	
Elektroplatte	0,179	7:40	460	0,26
Mikrowellenherd	0,102	5:32	332	0,45
Wasserkocher	0,055	1:52	112	0,84
Induktionsplatte	0,064	2:13	133	0,72

Tabelle 6.5.1

#### Station 5: Effizienz von Haushaltsgeräten

Effizienter Umgang mit Energie

e) Füllt die Felder in der Spalte "Auswertung" von Tabelle 6.5.1 für Wasserkocher und Induktionsplatte aus.

f) Welches Gerät hat am wenigsten Energie zum Erhitzen benötigt, welches am meisten?
 am wenigsten: Wasserkocher, am meisten: Elektroplatte
 Wie hängt das mit der Effizienz der Geräte zusammen?
 Da die gewünschte Energie immer gleich groß ist, sind die Geräte, die weniger Energie zum Erhitzen benötigt haben effizienter als die, die mehr Energie benötigt haben.

g) Diskutiert: Wodurch könnten die unterschiedlichen Wirkungsgrade erklärt werden? Die schlechteste Energiebilanz weist die Elektroherdplatte auf. Der Grund für ihr schlechteres Abschneiden ist unter anderem, dass nicht nur der Topf, sondern die Herdplatte bei der Elektroherdplatte selbst mit erhitzt werden muss. Den Wasserkocher macht besonders effizient, dass seine Heizspirale sehr dicht am zu erhitzenden Wasser liegt. Außerdem ist er auf diese Aufgabe optimiert.

#### Zusatzaufgabe I

a) Berechnet jeweils die durchschnittlich zugeführte Leistung. Damit ist die Leistung gemeint, die dem Gerät (z. B. dem Wasserkocher) während des gesamten Erhitzens bis zum Kochen im Durchschnitt zugeführt wurde<sup>12</sup>.

Hinweis: Dafür ist es nützlich, die Zeit in Stunden umzurechnen.

Gerät	zugeführte Energie [kWh] (s.o.)	Dauer [h]	∅ zugeführte Leistung [kW]
Elektroplatte	0,179	0,128	1,4
Mikrowellenherd	0,102	0,092	1,1
Wasserkocher	0,055	0,031	1,8
Induktionsplatte	0,064	0,037	1,7

Tabelle 6.5.2

b) Vergleicht die Zeitspanne, die die Geräte zum Erhitzen des Wassers benötigt haben, mit der durchschnittlich zugeführten Leistung.

Tendenziell benötigen die Geräte, denen im Durchschnitte eine höhere Leistung zugeführt wurde, weniger Zeit, um das Wasser zum Sieden zu bringen. Allerdings trifft dies nicht immer zu. Der Elektroherdplatte wird zwar durchschnittliche mehr Energie zugeführt als

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup>Viele Geräte entnehmen nicht zu jeder Zeit die selbe elektrische Leistung. Das seht ihr z. B., wenn ihr den Mikrowellenherd (mit Inhalt, nicht leer laufen lassen!) auf eine niedrige Stufe einstellt und die momentan zugeführte Leistung mithilfe des Energy Check 3000 beobachtet.

Station 5: Effizienz von Haushaltsgeräten

Effizienter Umgang mit Energie

dem Mikrowellenherd, doch die Elektroherdplatte benötigt mehr Zeit, um das Wasser zum Sieden zu bringen, als der Mikrowellenherd. Dies zeigt erneut, dass die Elektroherdplatte in diesem Versuch im Vergleich zum Mikrowellenherd einen geringeren Wirkungsgrad besitzt.

#### Zusatzaufgabe II

Wiederholt den Versuch für die Induktionsplatte, lasst aber dieses Mal den Deckel vom Kochtopf weg. Was erwartet ihr?

Induktionsplatte : Dauer 2:19 min,  $E=0.067\,\mathrm{kWh},~\eta=0.69$  Elektroplatte : Dauer 8:20 min,  $E=0.195\,\mathrm{kWh},~\eta=0.24$ 

44

Station 6: Wirkungsgrad eines Elektromotors

Effizienter Umgang mit Energie

#### 6.6 Station 6: Wirkungsgrad eines Elektromotors

In dieser Station bestimmt ihr den Wirkungsgrad eines Elektromotors.

Seid vorsichtig beim Experimentieren mit den Gewichtsstücken!

#### Aufgabe 1

a) In diesem Versuch wird der Elektromotor dazu verwendet, ein Gewichtsstück eine bestimmte Strecke hoch zu ziehen. Bestimmt mithilfe der auf dem Stationstisch zur Verfügung stehenden Materialien den Wirkungsgrad des Elektromotors bei diesem Prozess. Notiert das Ergebnis in Tabelle 6.6.1.

Für den Betrieb des Elektromotors stellt ihr am Netzgerät **24 V** ein (nicht mehr!) und dreht den Regler "CURRENT" voll auf.

Für die Messung von Stromstärke und Spannung mit dem **Multimeter** liegen **Hilfekarten** bereit

Falls ihr mit der Aufgabe nicht weiterkommt, könnt ihr auf die Hilfekarte "Station 6: 1. Hilfe zu Aufgabe 1" schauen. Wenn ihr danach immer noch Hilfe benötigt, lest Hilfekarte "Station 6: 2. Hilfe zu Aufgabe 1".

Zeigt vor der Messung euren Versuchsaufbau einem Betreuer.

Fangt das Gewichtsstück auf, nachdem es hochgezogen wurde!

m [kg]	0,5	1,0	1,5
$E_{el} \; [J]$	13,4	23,3	38,5
$E_{pot}\left[J\right]$	4,91	9,81	14,7
η	0,37	0,42	0,38

Tabelle 6.6.1

### Hilfekarte Station 6: 2. Hilfe zu Aufgabe 1

- Hängt das 0,5 kg Gewichtsstück in die Öse des Fadens, der an der Scheibe am Motor befestigt ist. Dreht die Scheibe von Hand so, dass der Faden ganz abgewickelt ist (rote Markierung an der Scheibe zeigt nach unten).
  - Messt die Strecke zwischen der roten Markierung auf dem Faden und der roten Markierung auf der Scheibe.

h = 1.0 m

2. Trennt vorne alle Kabel vom ausgeschalteten Netzgerät. Schaltet das Netzgerät ein

#### Station 6: Wirkungsgrad eines Elektromotors

Effizienter Umgang mit Energie

und dreht den Regler "CURRENT" am Netzgerät voll auf. Stellt den Regler "VOLTA-GE" so ein, dass am **Netzgerät** eine **Spannung** von **24 V** angezeigt werden. Um am Netzgerät zwischen den Anzeigen für Stromstärke und Spannung zu wechseln, müsst ihr den kleinen runden schwarzen Knopf unter dem Display drücken. Schaltet das Netzgerät aus.

Verhindst den Meter mit dem Netersenät. Deut sin N

Verbindet den Motor mit dem Netzgerät. Baut ein **Multimeter** so in den Stromkreis ein, dass damit die **Stromstärke** gemessen werden kann (Falls ihr nicht weiter wisst: siehe **Hilfekarte** "**Station 6: Schaltung"**).

- 3. Zeigt einem Betreuer die Schaltung.
- 4. Teilt die folgenden Messaufgaben untereinander auf:
  - Sobald das Netzgerät eingeschaltet wird, beginnt sich der Motor zu drehen. Schaltet den Motor ein und lasst ihn so lange laufen, bis das obere Ende der roten Markierung auf dem Faden das untere Ende der Scheibe am Motor erreicht hat. Schaltet das Netzgerät rechtzeitig wieder aus.
  - Stoppt die dafür benötigte Zeit.
  - Messt währenddessen die Stromstärke mit dem Multimeter.
  - Achtet darauf, dass sich der Faden richtig aufwickelt.
  - Fangt das Gewichtsstück auf, wenn es oben angekommen ist!

Führt die Messung für das 0,5 kg - Gewichtsstück durch und tragt die Messergebnisse in die folgende Tabelle ein.

m [kg]	0,5	1,0	1,5
U [V]		24	
I [mA]	96	154	214
t [s]	5,8	6,3	7,5

In dieser Tabelle sind alle Gewichtsstücke aufgeführt. In Aufgabe 1 a) aus dem Laborbuch sollen die Schüler aber erst mal nur für ein Gewichtsstück den Wirkungssgrad des Motors bestimmen. Sie können natürlich gerne auch schon mehr machen.

Hakt das Gewichtsstück aus der Schlaufe des Fadens aus und wickelt den Faden ab. Dreht die Scheibe am Motor so, dass die rote Markierung nach unten zeigt.

5. Führt Aufgabe 1 e) für die Gewichtsstücke mit der Masse 1 kg bzw. 1,5 kg durch und tragt die Ergebnisse in die Tabelle ein.

#### **Auswertung**

Im Vorbereitungsteil (Kapitel 4) habt ihr bereits die hier benötigten Formeln aufgeschrieben.

1. Wie lautet die Formel für die elektrische Energie?

46

#### Station 6: Wirkungsgrad eines Elektromotors

Effizienter Umgang mit Energie

$$E_{\mathsf{el}} = UIt$$

2. Wie lautet die Formel für die Lageenergie?

$$E_{pot} = mgh$$

3. Überlegt für die Berechnung des Wirkungsgrads: Welche der folgenden Energien ist im Experiment die eingesetzte Energie, welche die gewünschte Energie?

Die elektrische Energie, die dem Motor zugeführt wird, ist die

\_\_\_\_\_.

Die Lageenergie, die das Gewichtsstück erhält, ist die

- 4. Berechnet für jede Spalte in der folgenden Tabelle die folgenden Größen:
  - vom Motor umgewandelte elektrische Energie
  - Lageenergie, die das Gewichtsstück durch das Hochheben hinzu bekommt
  - Wirkungsgrad des Motors

m [kg]	0,5	1,0	1,5
$E_{el}\left[J\right]$	13,4	23,3	38,5
$E_{pot}\left[J\right]$	4,95	9,91	14,9
η	0,37	0,43	0,39

- Ende der Hilfekarte -

Station 6: Wirkungsgrad eines Elektromotors

Eigenschaften des Motors zurückzuführen sind.

Effizienter Umgang mit Energie

Falls eine Gruppe sehr lange für Aufgabe 1 a) gebraucht hat, können die folgenden Aufgaben entfallen.

- b) Wiederholt das Experiment zweimal, verwendet dafür aber die beiden Gewichtsstücke, die ihr in Aufgabe 1 a) nicht verwendet habt. Notiert in Tabelle 6.6.1 auf Seite 45 die Wirkungsgrade, die ihr bei den unterschiedlichen Experimenten ermittelt habt. Lösungen: siehe oben beim Abdruck der ausgefüllten Hilfekarte
- c) Weshalb unterscheidet sich der Wirkungsgrad des Motors, wenn man verschieden große Massen für den Versuch verwendet?
  Der Motor arbeitet nicht bei jeder Belastung optimal. Nur bei einer bestimmten Belastung hat er den optimalen Wirkungsgrad.
  Ein weiterer Grund könnten natürlich Messungenauigkeiten sein. Um dies auszuschließen, wären Wiederholungen der Messungen nötig. Wenn man mehrfach misst, stellt man fest, dass die Unterschiede im Wirkungsgrad nicht auf Messungenauigkeiten, sondern auf die
- d) Baut die Schaltung, die ihr für euren Versuch benutzt habt, wieder ab und legt eventuell verwendete Hilfekarten zurück.

48

Station 6: Wirkungsgrad eines Elektromotors

Effizienter Umgang mit Energie

#### Zusatzaufgabe I

a) Berechnet jeweils die Leistung, die der Motor erbracht hat und tragt das Ergebnis in Tabelle 6.6.2 ein.

m [kg]	0,5	1,0	1,5
P [W]	0,85	1,56	1,96

Tabelle 6.6.2

- b) Wie erklärt ihr euch, dass sich nicht für jedes Gewichtsstück dieselbe Leistung ergibt?

  Je größer die Masse des hochgezogenen Gewichtsstücks, desto größer die Kraft, die der Motor zum Hochziehen des Gewichtsstücks aufbringen muss. Daher ist auch die Leistung des Motors bei schwereren Gewichtsstücken größer. (Voraussetzung ist natürlich, dass der Motor noch in der Lage ist, das Gewichtsstück überhaupt hochzuziehen.)
- c) Vergleicht eure Ergebnisse für die Leistung des Motors mit den in Aufgabe 1 berechneten Wirkungsgraden des Motors bei verschiedenen Gewichtsstücken.
  Bei Gewichtsstücken mit größerer Masse ist die Motorleistung höher. Allerdings ist der Wirkungssgrad des Motors nicht umso höher, je größer die Masse des Gewichtsstücks ist. Bei unseren Gewichtsstücken ist der Wirkungsgrad beim 1 kg-Gewichtsstück am höchsten.

Station 7: Pumpspeicherkraftwerk

Effizienter Umgang mit Energie

#### 6.7 Station 7: Pumpspeicherkraftwerk

#### Aufgabe 1

Eine Möglichkeit zur Speicherung von elektrischer Energie stellt ein Pumpspeicherkraftwerk dar. Kann man zu einem Zeitpunkt eine Kilowattstunde elektrische Energie an der Strombörse für einen geringen Preis kaufen (weil die Nachfrage im Vergleich zum Angebot gering ist), verwendet man sie, um Wasser aus einem Becken in ein höher gelegenes Becken zu pumpen. Wenn zu einem anderen Zeitpunkt an der Strombörse für eine Kilowattstunde elektrische Energie viel gezahlt wird, lässt man das Wasser aus dem oberen Becken über eine Turbine in das untere Becken laufen und erhält dadurch wieder elektrische Energie, die man verkaufen kann.

Seht euch gemeinsam den Versuchsaufbau an (ohne ein Gerät anzuschalten).

- Welches Gerät ist die Pumpe?
- Welches Gerät ist die Turbine?

Für diese beiden Geräte gibt es in unserem Versuch zwei getrennte Stromkreise.

- In welcher Form liegt beim Pumpspeicherkraftwerk die gespeicherte Energie vor?
- Wie funktioniert der Versuchsaufbau?

#### Aufgabe 2 - Messung

a) Messt die Strecke, um die das Wasser von der Pumpe hochgepumpt wird (Abstand der beiden 51-Markierungen auf den Kisten):

 $h_1 = 1,93 \,\mathrm{m}$ 

b) Jetzt messt ihr, wie viel Energie die Pumpe zum Hochpumpen von 5 I Wasser benötigt. Die Pumpe wird mithilfe des Netzgeräts bedient.

#### Vorbereitung

- Verschließt den Hahn oberhalb der Turbine, sodass kein Wasser durch die Turbine läuft.
- Stellt den Wasserstand in der oberen Kiste auf die 01-Markierung ein (dazu müsst ihr Wasser hochpumpen/ablassen)<sup>13</sup>.
- Schaltet das Netzgerät ein und dreht den Regler "CURRENT" am Netzgerät voll auf. Stellt den Regler "VOLTAGE" so ein, dass am Netzgerät eine Spannung von 24,0 V angezeigt wird.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup>Die Ol-Markierungen an den beiden Kisten befinden sich je ein Stück über dem Kistenboden, weil einerseits die Pumpe keine Luft ansaugen darf und andererseits keine Luft in die Turbine gelangen sollte.

#### Station 7: Pumpspeicherkraftwerk

Effizienter Umgang mit Energie

Hinweis: Um am Netzgerät zwischen den Anzeigen für Stromstärke und Spannung zu wechseln, müsst ihr den kleinen runden schwarzen Knopf unter dem Display drücken.

- Schaltet das Netzgerät wieder aus und schließt die Pumpe an das Netzgerät an.
- Baut das Multimeter so in den Stromkreis von Pumpe und Netzgerät ein, dass damit die Stromstärke gemessen werden kann.

Wichtig: Wählt als Messbereich "A" (nicht mA).

Falls ihr nicht weiterkommt, könnt ihr auf die Hilfekarte "Messung von Stromstärke mit dem Multimeter" schauen. Wenn ihr danach immer noch Hilfe braucht, lest die Hilfekarte "Station 7: Schaltung Pumpe".

- Zeigt die Schaltung einem Betreuer.

#### Messung

 Überlegt euch vor der Durchführung des folgenden Versuchs, wer welche Aufgabe übernimmt:

 $5l\ \mbox{Wasser}$  werden vom unteren in das obere Becken gepumpt.

- \* Messt mit der Stoppuhr die dafür benötigte Zeit.
- \* Schaltet das Netzgerät ein, um Wasser nach oben zu pumpen.
- \* Schaltet das Netzgerät aus, sobald 51 Wasser hochgepumpt wurden.
- \* Beobachtet die Werte der Stromstärke, die das Multimeter anzeigt (bildet anschließend einen sinnvollen Mittelwert).
- Führt die Messung durch.

Hinweis: Die Pumpe sollte keine Luft ansaugen.

```
U_{\sf Pumpe} = 24 \, {
m V} I_{\sf Pumpe} = 0.665 \, {
m A \ (durchschnittlich)} t_{\sf Pumpe} = 82 \, {
m s}
```

c) Messt die Strecke, die das Wasser von der oberen Kiste bis zur Turbine zurücklegt (Abstand zwischen der Mitte der 01- und 51- Markierungen der oberen Kiste und der Turbine):

```
h_2 = 1,65 \,\mathrm{m}
```

#### Station 7: Pumpspeicherkraftwerk

Effizienter Umgang mit Energie

d) Nun messt ihr, wie viel Energie aus dem hochgepumpten Wasser zurückgewonnen werden kann. Dazu lassen wir das Wasser aus der oberen Kiste über die Turbine in die untere Kiste laufen. Die Turbine arbeitet als Generator und kann einen Verbraucher mit elektrischer Energie versorgen. An Stelle eines Lämpchens als Verbaucher verwenden wir einen Widerstand, der optimal an die Energiequelle angepasst ist.

Lest zuerst den ganzen Aufgabenteil durch!

- Vorbereitung:
  - \* Verbindet die Turbine mit dem 3,2  $\Omega$ -Widerstand.
  - \* Jetzt müsst ihr das Multimeter umstecken:
    - · Trennt alle Kabel vom Multimeter.
    - · Baut das Multimeter so in den Stromreis von Turbine und Widerstand ein, dass es die **Spannung** misst, die **am Widerstand** abfällt.

Stellt durch Drücken von Select am Multimeter den Messmodus für Gleichstrom ein (oben links muss "DC" angezeigt werden)!

Falls ihr nicht weiterkommt, schaut auf die Hilfekarte "Messung von Spannung mit dem Multimeter". Wenn ihr anschließend noch Hilfe braucht, lest die Hilfekarte "Station 7: Schaltung Turbine".

- \* Zeigt die Schaltung einem Betreuer.
- \* Schaltet die Pumpe an und lasst das Wasser im oberen Becken ein Stück über die 51-Markierung steigen.
- \* Öffnet *langsam* den Hahn über der Turbine. Stellt den Hahn so ein, dass sich die schwarze Scheibe in der Turbine möglichst schnell dreht. **Der weiße Punkt** auf der schwarzen Scheibein der Turbine muss sich bewegen!
- \* Sobald sich keine Luftblasen mehr im Schlauch vor der Turbine befinden, könnt ihr die Pumpe ausschalten. Lasst weiter Wasser durch die Turbine laufen.
- **Messung:** Die Messung beginnt, sobald der Wasserstand in der oberen Kiste gerade die 5l-Markierung erreicht hat. Teilt die folgenden Aufgaben auf:
  - \* Eine Person beobachtet den Wasserstand in der oberen Kiste und ruft "Start", wenn der Wasserstand in der oberen Kiste gerade die 5l-Markierung erreicht hat. Sie ruft "Stopp", sobald er die 0l-Markierung erreicht hat.
  - \* Dreht den Hahn über der Turbine zu, sobald das Stopp-Signal kommt.
  - \* Startet die Stoppuhr beim Startsignal und stoppt sie beim Stoppsignal.
  - \* Notiert zwischen Start- und Stoppsignal alle 10 Sekunden die vom Multimeter angezeigte Spannung.

Notiert in Tabelle 6.7.1 auf Seite 53 die Messergebnisse.

- Baut die Schaltung wieder ab und legt eventuell verwendete Hilfekarten zurück.

Station 7: Pumpspeicherkraftwerk

Effizienter Umgang mit Energie

Zeitpunkt [m:ss]	U [mV]
0:00	
0:10	
0:20	
0:30	
0:40	
0:50	
1:00	
1:10	
1:20	
1:30	
1:40	
1:50	
2:00	
2:10	
2:20	
2:30	

Tabelle 6.7.1

Station 7: Pumpspeicherkraftwerk

Effizienter Umgang mit Energie

Bitte lasst die nächste Gruppe messen, wenn ihr fertig seid, und erledigt die nächsten beiden Aufgaben an einem freien Tisch!

#### Aufgabe 3 - Auswertung

a) Wie viel Lageenergie haben fünf Litern Wasser im Gravitationsfeld der Erde, wenn sie um die Strecke h<sub>1</sub> hochgepumpt werden?

$$E_1 = 5 \,\mathrm{kg} \cdot 9.81 \,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}} \cdot 1.93 \,\mathrm{m} = 94.6 \,\mathrm{J}$$

b) Wie lautet die Formel für die elektrische Energie?

$$E_{\mathsf{el}} = \mathsf{Ult}$$

Wie viel elektrische Energie hat die Pumpe zum Hochpumpen benötigt?

$$E_2 = 1309 \,\mathrm{J}$$

c) Wie hoch ist der Wirkungsgrad des Hochpumpens?

$$\eta_{Pumpen} = 0.072$$
, das entspricht  $7.2\%$ 

d) Wie groß ist die Lageenergie, die fünf Liter Wasser verlieren, wenn man sie die Strecke  $h_2$  herunterlaufen lässt?

$$E_3 = 5 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 1.65 \text{ m} = 81 \text{ J}$$

- e) Jetzt geht es um die Auswertung der Messergebnisse aus Tabelle 6.7.1 von Seite 53.
  - Wie lange hat es insgesamt gedauert, bis 5 l Wasser herunter gelaufen sind?

$$t_{\mathsf{Turbine}} = 101 \; \mathsf{s}$$

 Ermittelt aus eurem Messergebnis einen sinnvollen Mittelwert für die gemessene Spannung:

$$U_{\mathsf{Turbine}} = 0,163 \; \mathsf{V}$$

– Wie lautet die Formel für die elektrische Energie in Abhängigkeit von Spannung und Widerstand?

Hinweise:

st Löse die Definitionsgleichung für den elektrischen Widerstand R nach I auf:

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

#### Station 7: Pumpspeicherkraftwerk

Effizienter Umgang mit Energie

\* Ersetze in der Formel für die elektrische Energie von oben I durch diesen Ausdruck

$$E = \frac{U^2}{R} \cdot t$$

Wie viel elektrische Energie hat die Turbine insgesamt geliefert?

$$E_4 = \frac{U_{\text{Turbine}}^2 \cdot R}{t_{\text{Turbine}}} = \frac{(0.163 \, \text{V})^2}{3.2 \, \Omega} \cdot 101 \, \text{s} = 0.84 \, \text{J}$$

f) - Wie hoch ist der Wirkungsgrad der Turbine in diesem Aufbau?

```
\eta_{\mathsf{Turbine}} = 0.010, das entspricht 1\%
```

Ein Grund für den geringen Wirkungsgrad der Turbine ist vermutlich, dass die Kopplung des Turbinenrads an die magnetische Scheibe, die mit dem Turbinengenerator verbunden ist, bei hohen Fließgeschwindigkeiten nicht optimal funktioniert.

- Weshalb kann eine Wasserturbine keinen Wirkungsgrad von 100 % erreichen?

Hinweis: Was wäre, wenn das Wasser durch das Turbinenrad vollständig abgebremst werden würde?

(Vergleiche Windrad) Man hätte bei einer Turbine nur dann Wirkungsgrad 100 %, wenn das Wasser nach der Turbine die Geschwindigkeit  $0\frac{m}{s}$  hätte. Das geht aber nicht, denn dann könnte die Schaufel nicht mehr laufen, das das Wasser in der Turbine stehen bleiben würde.

– Wie hoch ist in unserem Versuch der Wirkungsgrad des gesamten Speichervorgangs aus Hochpumpen und Runterlaufen lassen des Wassers?

```
\eta_{\text{gesamt}} = 0.072 \cdot 0.010 = 0.0072, das entspricht knapp 1 %.
```

Reale Pumpspeicherkraftwerke können Wirkungsgrade von bis zu 80~% erreichen. Der Wirkungsgrad in unserem Versuch ist recht niedrig, da die Turbine eher für Demonstrationszwecke gedacht ist.

#### Zusatzaufgabe I

a) Weshalb nimmt die Spannung im Laufe der Messung aus Aufgabe 2 d) (siehe Tabelle 6.7.1) ab?

Die durchschnittliche Lageenergie des Wassers im oberen Becken sinkt immer weiter. Daher sinkt auch die kinetische Energie des Wassers, das bei der Turbine ankommt.

#### Station 7: Pumpspeicherkraftwerk

Effizienter Umgang mit Energie

b) Diskutiert: Was würde mit den Messergebnissen passieren, wenn man die obere Kiste statt auf das Regal auf den Tisch stellen und die Messungen aus Aufgabe 2 wiederholen würde?

Das Wasser im oberen Becken hätte eine geringere Lageenergie. Daher wäre die elektrische Energie, die man von der Turbine bekommt, geringer als beim durchgeführten Versuch.

#### Zusatzaufgabe II

Beschreibt, welche **energetischen Umwandlungsprozesse** in bzw. mit den einzelnen Teilen des Systems geschehen. Tragt dazu die richtigen **Energieformen** in die Lücken ein.

- Die Pumpe wandelt elektrische Energie um in Bewegungsenergie des Wassers.
- Wasser:

Im unteren Becken hat das Wasser im Gravitationsfeld der Erde keine

Lageenergie und es hat keine Bewegungsenergie.

Ein Wassertropfen, der aus dem unteren Becken hochgepumpt wird,

bekommt dadurch Bewegungsenergie, die sich immer mehr in

Lageenergie im Gravitationsfeld der Erde umwandelt.

Im oberen Becken besitzt das Wasser maximale Lageenergie im Gravitationsfeld der Erde

und keine Bewegungsenergie.

Ein Wassertropfen, der aus dem oberen Becken in das untere fließt, verliert dabei

Lageenergie im Gravitationsfeld der Erde und gewinnt

Bewegungsenergie.

 Die Turbine wandelt Bewegungsenergie um in elektrische Energie.

56

Station 8: Thermische Energie und Wärmeleitfähigkeit

Effizienter Umgang mit Energie

#### 6.8 Station 8: Thermische Energie und Wärmeleitfähigkeit

Bei der Umwandlung von Energie gibt es (trotz Energieerhaltung) fast immer Verluste in Form von thermischer Energie, die an die Umgebung abgegeben wird.

Die **Temperatur** eines Körpers ist ein Maß für seine **thermische Energie**. In dieser Stationen werdet ihr mithilfe einer Infrarotkamera Temperaturen messen.

Jedes Objekt mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes (0 Kelvin = -273,15  $^{\circ}$ C) sendet für seine **Oberflächentemperatur** charakteristische **Infrarot-Strahlung** (umgangssprachlich auch "Wärmestrahlung" genannt) aus.  $^{14}$ 

Diesen Zusammenhang nutzt eine **Infrarotkamera** aus: Sie misst die Intensität der von einem Körper ausgesendeten Infrarot-Strahlung in Abhängigkeit von deren Wellenlänge. Daraus ermittelt sie mithilfe mehrerer Parameter räumlich aufgelöst die zur Strahlung gehörende Oberflächentemperatur des betrachteten Körpers. So entsteht das angezeigte Wärmebild.

Vor einer Temperaturmessung mit der Infrarotkamera muss der materialabhängige Parameter **Emissionsgrad** eingestellt werden. Dies ist die Effizienz, mit der ein Gegenstand Infrarot-Strahlung abgibt.

```
arepsilon = rac{	ext{emittierte Strahlung}}{	ext{einfallende Strahlung}}
```

Der Emissionsgrad ist umso höher je geringer die Reflektivität des Materials im Infrarot-Bereich ist

Für den Parameter **reflektierte Temperatur** im Menü der Infrarotkamera wählt man die Umgebungstemperatur. Die Kamera versucht damit, Messfehler durch Reflexion von Infrarotstrahlung anderer Gegenstände am zu untersuchenden Gegenstand zu vermeiden (vgl. Glas). Der Parameter ist aber vor allem bei Materialien mit niedrigem Emissionsgrad wichtig, also bei uns nicht.

Im Menü der Kamera sollte der **Bildmodus** "IR" gewählt werden, weil sonst die Wärmebilder falsch interpretiert werden könnten.

Bitte geht vorsichtig mit der Wärmebildkamera um!

#### Aufgabe 1

#### Bitte den Versuchsaufbau nicht berühren!

Verschiedene Stoffe können thermische Energie unterschiedlich gut transportieren. Das macht man sich in der Technik vielfach zunutze, z. B. bei der Wärmedämmung von Häusern.

Ein Maß für diese Eigenschaft ist die **Wärmeleitfähigkeit**  $\lambda$  ( = "Thermische Leitfhähigkeit"). Sie gibt die thermische Energie (Wärmemenge) an, die in 1 s durch eine 1 m dicke Stoffschicht der Fläche 1 m² fließt, wenn der Temperaturunterschied 1 K ist. Die Einheit ist  $\frac{Ws \cdot m}{m^2 \cdot K \cdot s} = \frac{W}{K \cdot m}$ .

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup>Diese unterscheidet sich durch die Intensitäten der Strahlung bei verschiedenen Wellenlängen. Sie ist für das menschliche Auge nicht sichtbar.

Station 8: Thermische Energie und Wärmeleitfähigkeit

Effizienter Umgang mit Energie

In diesem Versuch untersucht ihr folgende Stoffe:

Stoff	$\lambda \left[ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K} \cdot \mathrm{m}} \right]$
Kupfer	380
Aluminium	200
Messing	90
Edelstahl	21
Glas	0,8
Teflon	0,23

Ihr werdet in diesem Versuch **Stäbe aus diesen Materialien** mit der Infrarotkamera beobachten, die von unten erwärmt werden. Der Versuch wird von der Seite aus betrachtet, auf der die Stäbe schwarz besprüht sind. <sup>15</sup> Der Stab links am Rand besteht aus Kupfer. Die folgenden Stäbe sind aus dem Material, wie es in obiger Tabelle steht.

a) Lasst euch vor dem Versuch von einem Betreuer in den Versuchsaufbau und die Benutzung der Infrarotkamera und der Software einweisen.

Falls der Akku der Kamera zu kurz halten sollte, könnte man hier die Schüler bitten, die Kamera über das USB-Kabel mit dem Laptop zu verbinden.

Stellt den Emissionsgrad in der Kamera auf 0,95 (Standardeinstellung). Stellt den Bildmodus der Kamera auf "IR".

Siehe dazu Karte "Einstellung Infrarotkamera".

b) Schaltet das graue Netzgerät ein (Schalter auf der Rückseite). Dadurch werden die Stäbe von unten geheizt. Beobachtet mit der Wärmebildkamera den Versuch ca. 3 Minuten bis eine deutliche Erwärmung der Stäbe sichtbar ist. Was beobachtet ihr?

Falls der Versuch nicht funktioniert, kann die Aufgabe mithilfe eines alten Bildes fortgesetzt werden. Auf dem Laptop ist es auf dem Desktop unter dem Namen "FLIR0036.jpg" zu finden.

c) Nehmt ein Bild mit der Kamera von den erwärmten Stäben auf. Dafür müsst ihr den Auslöser am Griff der Kamera drücken.

Schaltet das Netzgerät aus.

d) Öffnet am Laptop das Programm *Flir Tools*. Schließt die Kamera per USB-Kabel an den Laptop an (der USB-Anschluss der Kamera befindet sich oben unter der Gummiklappe). Jetzt sollte sich jetzt ein Fenster öffnen, in dem ihr

Bilder aus der Kamera importieren

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup>Dieses dient dazu, dass alle betrachteten Stäbe eine gleichartige Oberfläche haben, die der eines schwarzen Strahlers ähnelt.

Station 8: Thermische Energie und Wärmeleitfähigkeit

Effizienter Umgang mit Energie

wählen könnt. Klickt das Bild mit der höchsten Nummer an und importiert es durch Klicken auf

Ausgewählte Datei(en) importieren

Anschließend klickt ihr doppelt auf das importierte Bild, um es für eine Analyse zu öffnen

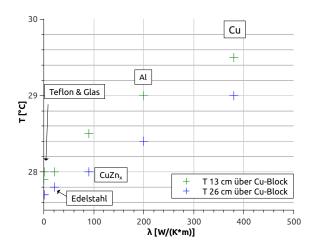
e) Ermittelt mit der Software und dem eben aufgenommenen Bild jeweils die Temperatur der Stäbe auf halber Höhe (= 13 cm über dem Kupferblock) und an der Stabspitze (= 26 cm über dem Kupferbock). Klickt dazu in der Menüleiste links auf das Symbol und anschließend auf den Punkt des Bildes, dessen Temperatur ihr ermitteln wollt.

$\lambda \left[ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K} \cdot \mathrm{m}} \right]$	T [° C] in 13 cm Höhe ∣ in 26 cm Höhe	

f) Erstellt aus den so ermittelten Temperaturen (von Hand) ein  $\lambda$ -T-Diagramm. Markiert die Messpunkte, die zu unterschiedlichen Höhen (13 cm oder 26 cm) gehören mit zwei unterschiedlichen Farben.

Station 8: Thermische Energie und Wärmeleitfähigkeit

Effizienter Umgang mit Energie



Die absoluten Temperaturen können je nach Heizdauer und Umgebungstemperatur etwas abweichen.

- g) Diskutiert den Verlauf des Diagramms. Die thermische Energie (Wärme) fließt entlang des Kupferstabes wesentlich schneller als bei anderen Materialien. Daher liegen die beiden Messpunkte für Kupfer sehr dicht. Die Materialien mit schlechter Wärmeleitfähigkeit haben sich in beiden Höhen kaum erwärmt. Der Diagrammverlauf der Messpunkte, die zur selben Höhe gehören, ist linear.
- h) Löscht euer Bild im Programm und werft die Kamera mithilfe des PCs aus. (USB-Speicher sicher entfernen)

#### Aufgabe 2

In dieser Aufgabe habt ihr Gelegenheit für weitere Experimente mit der Infrarotkamera.

- a) Eine Infrarotkamera kann zur berührungslosen Temperaturmessung verwendet werden. Falls jemand aus eurer Gruppe dazu bereit ist, betrachtet ihn durch die Infrarotkamera. Vorher müsst ihr den Emissionsgrad der Kamera auf 0,98 einstellen. Wie hoch ist die Körpertemperatur auf der Stirn? Wie hoch ist sie im geöffneten Mund? Die Stirn ist kühler als die Mundhöhle.
  - Stellt als Emissionsgrad wieder 0,95 (Standardeinstellung) ein.
- b) Geht zu einem Fenster und betrachtet mit der Kamera das geschlossene Fenster. Was seht ihr?

Welche Eigenschaft von Glas könnt ihr daraus ablesen? Man sieht sein eigenes Spiegelbild statt der Dinge, die sich hinter dem Fenster befinden. Glas wirkt als Spiegel für Infrarotlicht.

Könnt ihr nach diesem Experiment begründen, wie Gewächshäuser funktionieren?

Station 8: Thermische Energie und Wärmeleitfähigkeit

Effizienter Umgang mit Energie

Glas lässt sichtbares Licht durch. Dieses trifft auf den Inhalt des Gewächshauses auf und erwärmt ihn. Die vom Inhalt des Gewächshauses ausgesendete Infrarotstrahlung ("Wärmestrahlung") kann das Gewächshaus wegen der gläsernen Barriere nicht verlassen. Dadurch steigt die Temperatur im Gewächshaus.

 c) Infrarotkameras werden häufig zur Untersuchung von Gebäuden auf schlecht isolierte Stellen verwendet.

Öffnet das Fenster und betrachtet das gegenüberliegende Gebäude. Was seht ihr mit der Infrarotkamera?

d) Mit der Infrarotkamera könnt ihr auf Spurensuche gehen: Legt eure Hand kurz auf den Tisch und entfernt sie wieder. Wie sieht der Tisch mit der Infrarotkamera betrachtet aus?

Wenn ihr Lust habt, könnt ihr versuchen, euch gegenseitig geheime Botschaften mit dem Finger auf den Tisch zu malen und sie mit der Infrarotkamera zu entschlüsseln.

- e) Ein weiteres Anwendungsfeld von Infrarotkameras ist die Untersuchung technischer Geräte. Betrachtet den Laptop mit der Kamera. Wo ist die Temperatur besonders hoch? Besonders hohe Temperaturen haben das Netzgerät im Ladekabel und der Bereich unter der Tastatur an der Seite, wo sich der Lüfter des Laptops befindet (vermutlich ist dort der Prozessor).
- f) Infrarotkameras werden z. B. auch von der Polizei zur Suche von Personen eingesetzt. Probiert das Sichtbarmachen von für das menschliche Auge unsichtbaren Gegenständen selber aus:

Rollt die blaue Plastikfolie aus, die an der Decke hängt. Diese ist für das menschliche Auge undurchsichtig. Einer von euch stellt sich hinter die Plastikfolie. Betrachtet die Folie mit der Wärmebildkamera.

Was seht ihr?

Das Wärmebild der Person hinter der Folie.

Wie erklärt ihr euch die Beobachtung? Die Plastikfolie ist weitgehend durchlässig für Infrarot-Strahlung

Könnt ihr mithilfe des Wärmebildes erraten, wer hinter der Folie steht?

#### Zusatzaufgabe I

Jetzt seid ihr gefragt! Welche weiteren Dinge wollt ihr mit der Infrarotkamera untersuchen? Einige Ideen: Haushaltsgeräte von Station 5 ansehen, die Wasser erhitzen, elektrische Leitungen in der Wand suchen,...

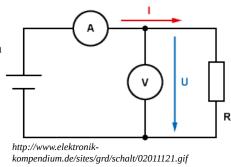
# 2 Hilfezettel und Anleitungen

In diesem Abschnitt sind die Hilfezettel und Anleitungen für die Versuchsreihe verzeichnet. Diese liegen am Versuchstag an den jeweiligen Stationen aus.

Die Hilfekarten zum Multimeter werden an mehreren Stationen eingesetzt.

# Hilfekarte: Messung von Spannung mit dem Multimeter

• Das Multimeter wird **parallel** zum "Verbraucher" in den Stromkreis eingebaut (im Schaltplan ist das Multimeter mit "V" gekennzeichnet).

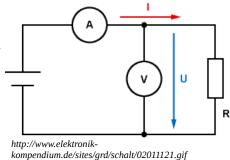


- Die Kabel werden in die Eingänge "COM" (-) und "V" (+) gesteckt.
- Der Drehknopf wird auf "V" gedreht.
- Mit dem gelben Knopf ("Select") wird "DC" (= Gleichstrom) ausgewählt.



# Hilfekarte: Messung von Stromstärke mit dem Multimeter (Messbereich: A)

• Das Multimeter wird **in Reihe** mit dem "Verbraucher" in den Stromkreis eingebaut (im Schaltplan ist das Multimeter mit "A" gekennzeichnet).

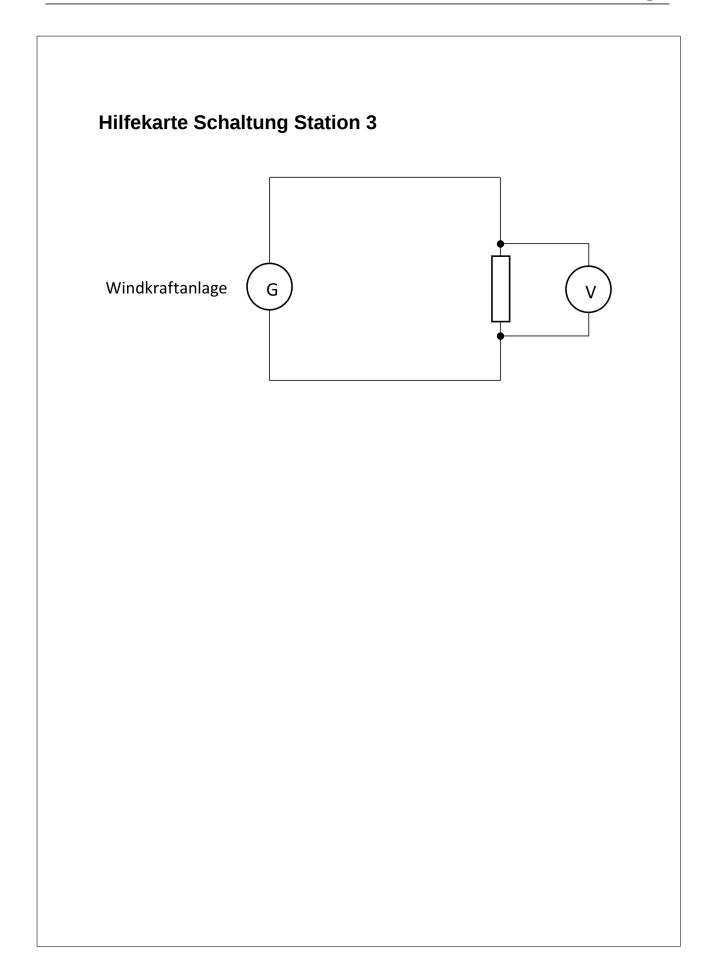


- Die Kabel werden in die Eingänge "COM" (-) und "A" (+) gesteckt.
- Der Drehknopf wird auf "A" gedreht.
- Mit dem gelben Knopf ("Select") wird "DC" (= Gleichstrom) ausgewählt.



# **Station 3: Einstellung Messbereich Multimeter**

- Drehknopf auf "V"
- oben links im Display "DC" (umstellen mit gelber Taste)



# Hilfekarte Station 3: 1. Hilfe zu Zusatzaufgabe I

Ihr benötigt folgende Formeln für die Herleitung:

Bewegungsenergie:

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

Dichte:

$$\varrho = \frac{m}{V}$$

- Wir betrachten ein Luftvolumen  $V=A\cdot \Delta s$  mit Grundfläche A und Länge  $\Delta s$ , das sich vor einem Windrad mit Querschnittsfläche A befindet.
- Leistung:

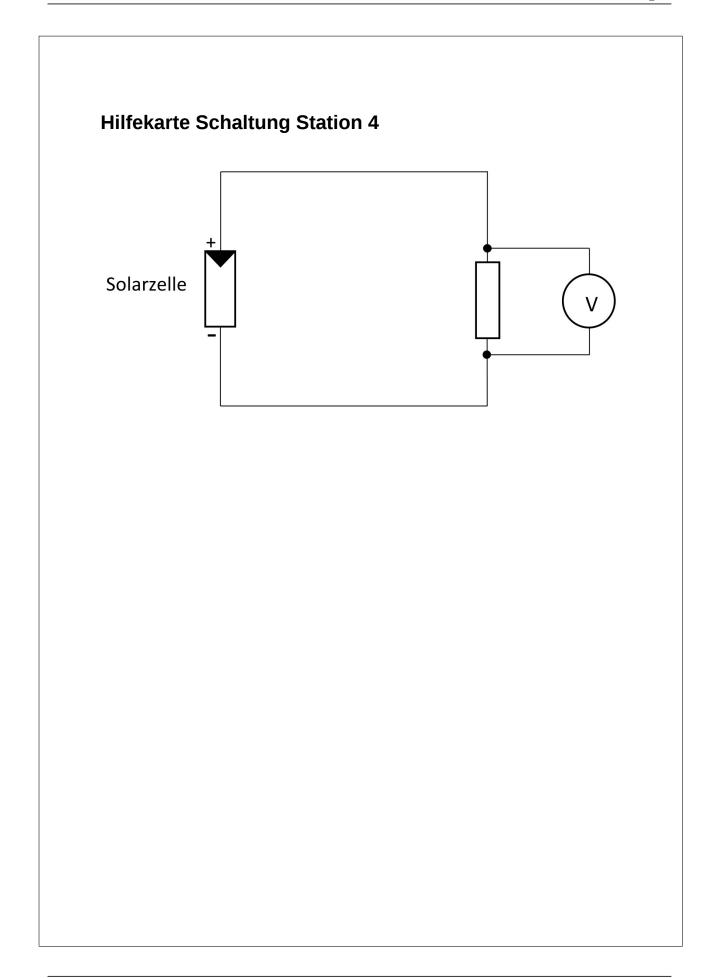
$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

Geschwindigkeit:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

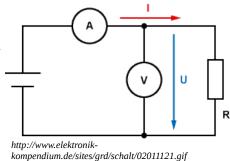
## Hilfekarte Station 3: 2. Hilfe zu Zusatzaufgabe I

- Die Energie des Windes liegt in Form von Bewegungsenergie vor. Wie lautet allgemein die Formel für die Bewegungsenergie?
  - (1) E =
- Welcher Zusammenhang zwischen Dichte, Volumen und Masse eines Stoffes gilt allgemein?
  - (2)  $\varrho =$
- Stellt die Gleichung nach der Masse um:
  - (3) m =
- Wir betrachten ein Luftvolumen  $V=A\cdot\Delta s$  mit Grundfläche A und Länge  $\Delta s$ , das sich vor einem Rotor (der zu einer Windkraftanlage gehört) mit Querschnittsfläche A befindet. Setzt diese Formel für V in Gleichung (3) ein:
  - (3') m =
- Setzt Gleichung (3') in Gleichung (1) ein: (Wegen des jetzt in der Gleichung enthaltenen  $\Delta s$  schreiben wir ab hier  $\Delta E$  statt E.)
  - (1')  $\Delta E =$
- Teilt Gleichung (1') durch  $\Delta t$ :
  - (1")  $\frac{\Delta E}{\Delta t} =$
- Ersetzt in Gleichung (1")  $\frac{\Delta s}{\Delta t}$  durch v:
  - (1")  $\frac{\Delta E}{\Delta t} =$



# Hilfekarte: Messung von Stromstärke mit dem Multimeter (Messbereich: mA)

• Das Multimeter wird **in Reihe** mit dem "Verbraucher" in den Stromkreis eingebaut (im Schaltplan ist das Multimeter mit "A" gekennzeichnet).



- Die Kabel werden in die Eingänge "COM" (-) und "mA" (+) gesteckt.
- Der Drehknopf wird auf "mA" gedreht.
- In dieser Einstellung dürfen keine höheren Stromstärken als 400 mA vermessen werden!
- Mit dem gelben Knopf ("Select") wird "DC" (= Gleichstrom) ausgewählt.



# Station 5: Bedienung des Energiemessgeräts

#### Bedienung des Messgeräts "Energy Check 3000"

Mit diesem Messgerät kann sowohl die momentane Leistung als auch die Energie gemessen werden, die ein angeschlossenes Gerät über einen bestimmten Zeitraum verbraucht.

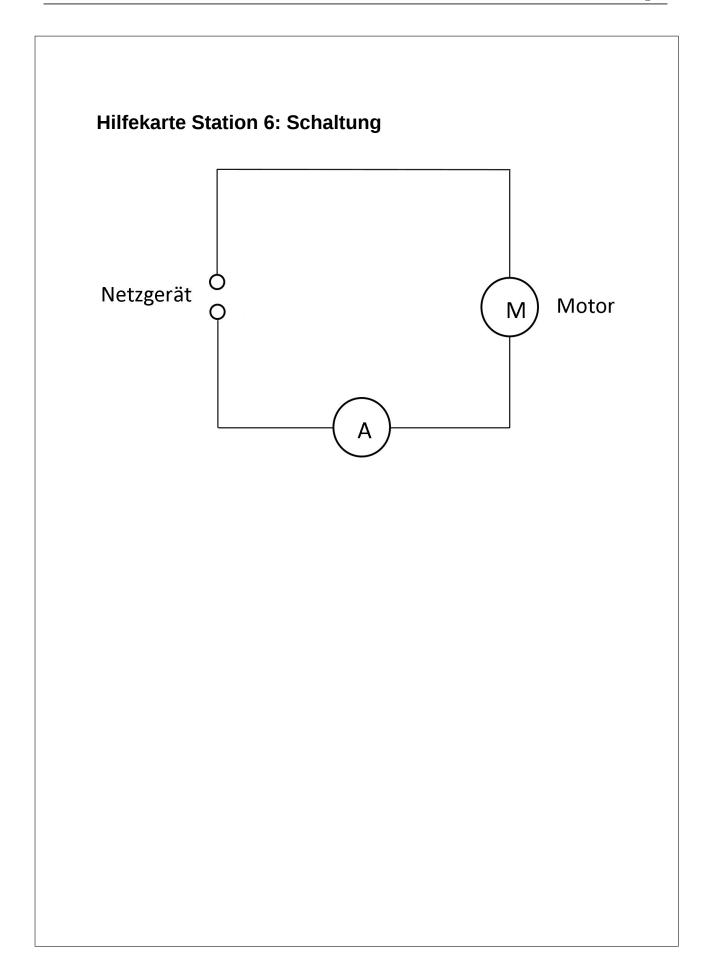
Bedienung zur Messung der in einem Zeitraum verbrauchten Energie (Betriebsart "Speichern" (REC)):

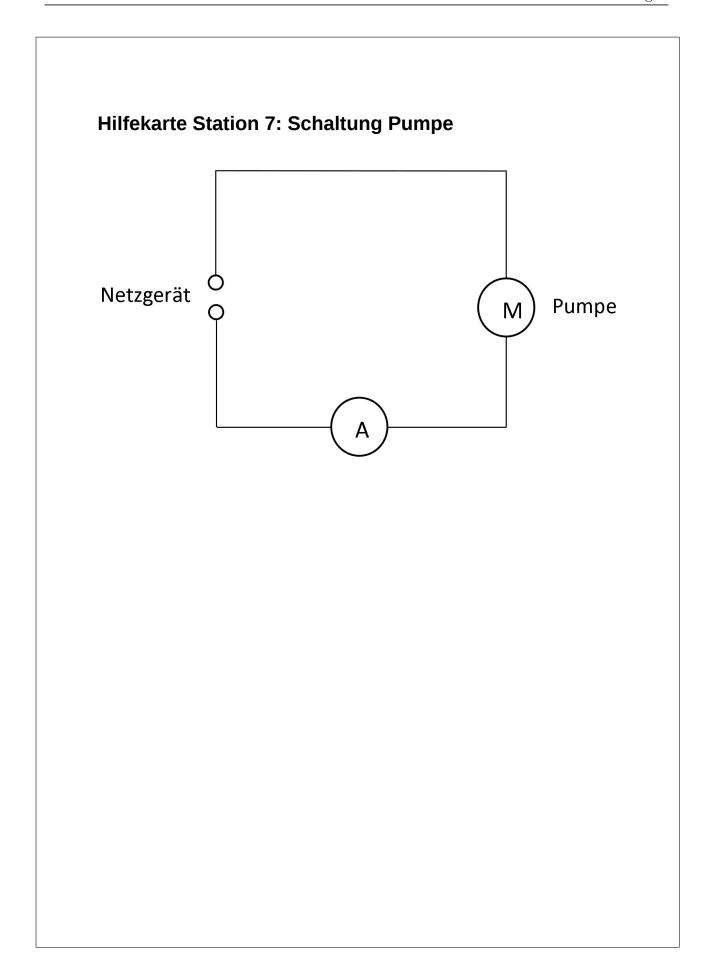
- Messgerät in die Steckerleiste einstecken
- ausgeschaltetes Elektrogerät in das Messgerät stecken
- Taste MODE drücken
- gleichzeitig mit dem Einschalten des Elektrogeräts STA/STP drücken, um die Messung zu starten
- zum Beenden der Messung erneut STA/STP drücken
- nachdem das Messergebnis notiert wurde, das Gerät zurücksetzen:
   Dazu STA/STP und MODE gleichzeitig für länger als 2 Sekunden drücken.

## **Station 5: Bedienung des Thermometers**

#### **Bedienung des Thermometers RS-1327K**

- Achtung: Nicht in den Laserstrahl blicken oder damit auf Personen zielen!
- Zur Temperaturmessung den roten Auslöser an der Rückseite des Thermometergriffs gedrückt halten.
- Die angezeigte Temperatur ist die Temperatur des Punktes, auf den der Laser zielt.
- Für die Messung der Temperatur von Wasser muss oben im Display folgendes stehen:  $\varepsilon = 0.96$





# Hilfekarte Station 7: Schaltung Wasserturbine Wasserturbine G

## **Station 7: Einstellung Messbereich Multimeter**

- 1. Messbereich für Messung an der **Pumpe**:
  - Drehknopf auf "A"
  - oben links im Display "DC" (umstellen mit gelber Taste)
- 2. Messbereich für Messung an der **Turbine**:
  - Drehknopf auf "V"
  - oben links im Display "DC" (umstellen mit gelber Taste)

## 3 Zusatzmaterial zu Station 4

Die folgende Zusatzaufgabe zu Station 4 (Solarenergie) beschäftigt sich mit dem Wirkungsgrad einer Solarzelle. Da sie zu umfangreich ist, wurde sie aus dem regulären Laborbuch gestrichen.

#### Zusatzaufgabe zu Station 4

a) Der Halogenstrahler nimmt eine Leistung von 500 W auf und hat einen Wirkungsgrad von 10 %. In dieser Aufgabe versuchen wir, den Wirkungsgrad der Solarzelle mithilfe der eben ermittelten maximalen Leistung der Solarzelle abzuschätzen. Wir gehen davon aus, dass sich die Solarzelle auf dem Kreisausschnitt zwischen den Punkten B und C befindet.

Vermesst in dieser Aufgabe den Strahler aus der Kiste mit Material für diese Zusatzaufgabe und nicht den, der in den vorherigen Aufgaben verwendet wurde, da dieser heiß ist! Beide Strahler sind baugleich.

Zuerst betrachten wir den Strahler von der Seite.



– Wie groß ist im Mittel der Öffnungswinkel  $\alpha$  des Strahlers, wenn ihr die Reflektorbleche im Inneren des Strahlers betrachtet?

$$\alpha = 90^{\circ}$$

– Schätzt die Länge der Strecke  $\overline{AB}$ . Hinweis: Die Strecke  $\overline{DB}$  ist 75 cm lang.

$$\overline{AB} = 95 \text{ cm}$$

– Welchen Umfang hat der Kreis mit Radius  $\overline{AB}$ ?

$$U = 2\pi \cdot 0.95 \,\mathrm{m} = 6.0 \,\mathrm{m}$$



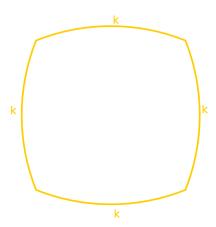
- Berechnet mithilfe von U und  $\alpha$  die Länge des Kreisbogens k:

 Wir gehen davon aus, dass die durch den Strahler bestrahlte Fläche etwa folgenden Flächeninhalt hat:

$$A_1 = k \cdot k = 2,25 \,\mathrm{m}^2$$

 Welche Fläche hat eine unserer Solarzellen?

$$A_2 = 0.075 \,\mathrm{m} \cdot 0.09 \,\mathrm{m} = 0.0068 \,\mathrm{m}^2$$



 Wie hoch ist die auf der bestrahlten Fläche auftreffende Leistung? Berücksichtigt den Wirkungsgrad des Strahlers.

$$P_{\mathsf{Licht}} = 0.1 \cdot 500 \, \mathrm{W} = 50 \, \mathrm{W}$$

– Wie groß ist das Verhältnis von  $A_2$  und  $A_1$ ?

$$\frac{A_2}{A_1} = 0.003$$

- Berechnet damit den Anteil der Lichtleistung, der auf die Solarzelle auftrifft:

$$P_2 = \frac{A_2}{A_1} \cdot P_{\mathsf{Licht}} = 0.15 \, \mathsf{W}$$

– Berechnet mithilfe von  $P_2$  und der in Aufgabe 1 b) ermittelten maximal abgegebenen Leistung  $P_1$  der Solarzelle den Wirkungsgrad der Solarzelle.

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} = \frac{0.036 \,\mathrm{W}}{0.15 \,\mathrm{W}} = 0.24$$

(Vergleiche mit Aufgabe 3 b) :Das ist ziemlich hoch, unsere Annahmen waren also vermutlich etwas zu optimistisch)

- b) Diskutiert: Ist der eben berechnete Wirkungsgrad eher hoch oder eher niedrig? Welche Gründe gibt es für Energieverluste bei der Energieumwandlung in der Solarzelle? Der Wirkungsgrad ist eher niedrig. Allerdings schaffen auch gute Solarzellen unter optimalen Bedingungen maximal Wirkungsgrade bis < 25%. Allerdings ist es sinnvoll, trotzdem die Energie der Sonne zu nutzen, weil man nichts dafür bezahlen muss, dass sie scheint ;).</p>
  - Reflexion an der Oberfläche der Solarzelle

	night alla Dhatanan hahan dia nassanda Wallanlänna (Dhatanan mit au marin asa Fran		
•	nicht alle Photonen haben die passende Wellenlänge (Photonen mit zu geringer Ener-		
	gie können gar nicht genutzt werden, die überschüssige Energie von Photonen mit		
	Energien größer als die Bandlücke kann nur zum Teil genutzt werden.)		
	2.00.0.0. 6.000. all all Dandidolo Raini Hai Zaini Foli Schatzt Worden.)		

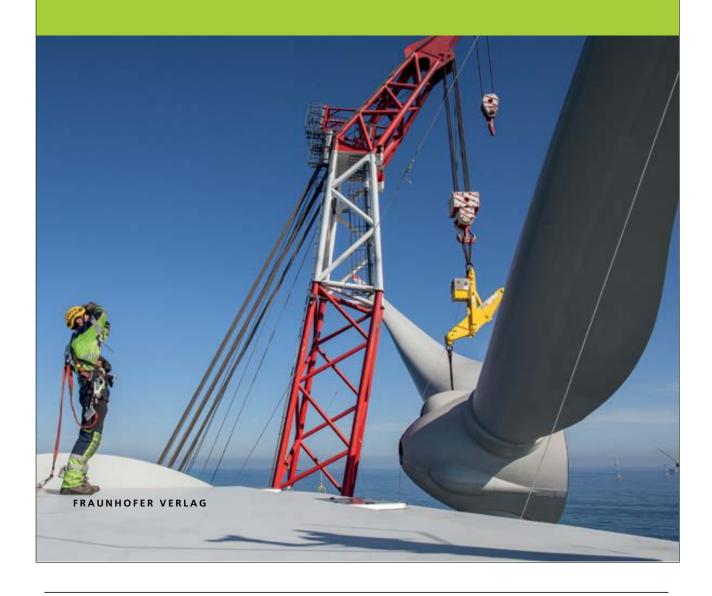
## 4 Internetseiten

In diesem Teil des Anhangs ist jeweils die erste Seite der verwendeten Internetquellen abgedruckt.

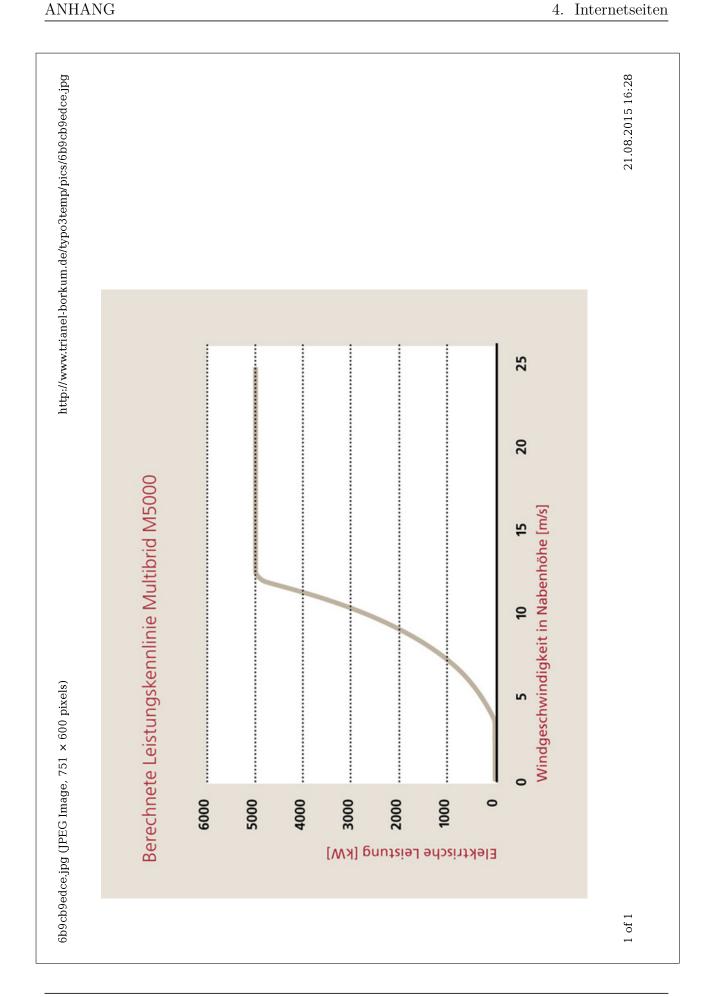


FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WINDENERGIE UND ENERGIESYSTEMTECHNIK IWES

# WINDENERGIE REPORT DEUTSCHLAND 2014



ANHANG



## INSTITUT FÜR ANGEWANDTE PHYSIK Physikalisches Praktikum für Studierende der Ingenieurswissenschaften Universität Hamburg, Jungiusstraße 11

## Peltier-Wärmepumpe

#### 1 Ziel

Kälteleistung, Wärmeleistung und die Leistungsziffer einer Peltier-Wärmepumpe werden unter verschiedenen Betriebsbedingungen bestimmt.

#### 2 Theorie

Lässt man Strom durch einen aus zwei verschiedenen Materialien bestehenden Stromkreis fließen, so wird das eine Material abgekühlt und das andere aufgeheizt. Ursache dafür ist die unterschiedliche Austrittsenergie  $W_{\rm A}$ , die den freien Elektronen in den unterschiedlichen Materialien zugeführt werden muss, damit sie das Material verlassen können.

Bei einem Übergang von einem Material ins andere muss demnach eine Energieschwelle überwunden werden, die Übergangsenergie. Je nach Stromrichtung ist sie positiv oder negativ. In der Abb. 1 bewegen sich Elektronen auf der kalten Seite jeweils durch die Strecke n-Halbleiter $\rightarrow$ Metall $\rightarrow$ p-Halbleiter. Dafür muss die Energie  $\Delta E_1$ - $\Delta E_2$  aufgewendet werden. Auf der warmen Seite wird die gleiche Energiemenge frei. Die Energie wird in Form von Wärme von der kalten zur warmen Seite transportiert. Ändert sich die Stromrichtung, so kehrt sich die Richtung des Wärmetransports um, und kalte und warme Seite werden vertauscht.

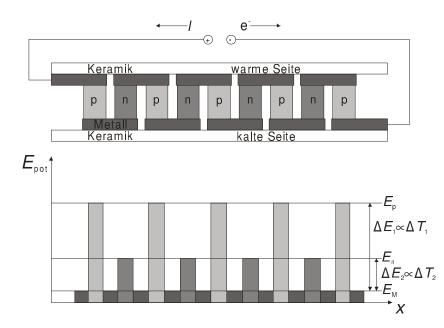
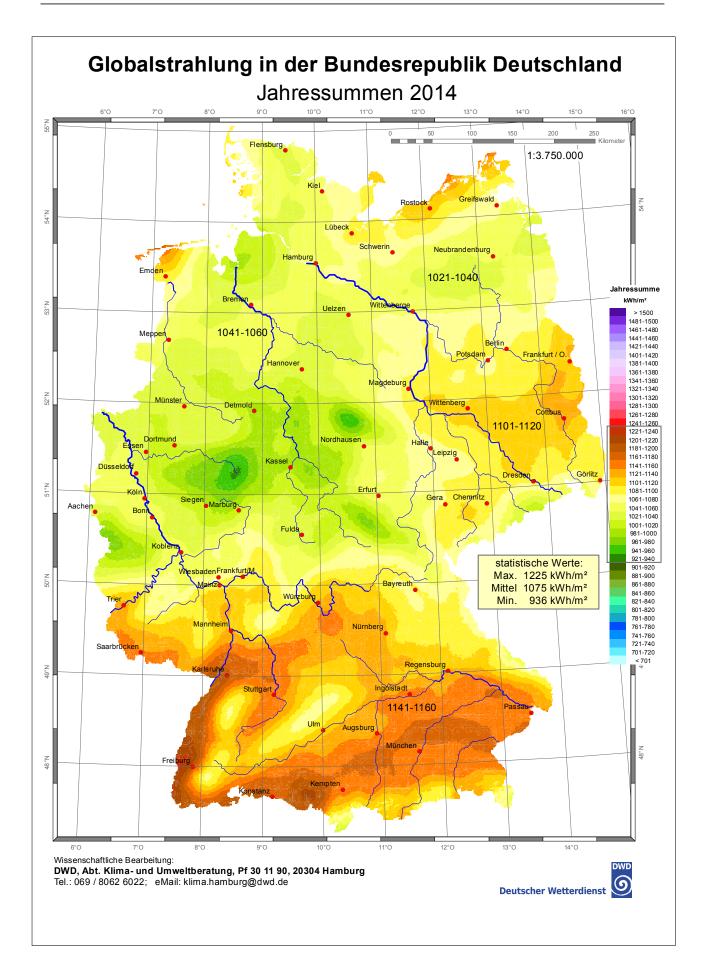
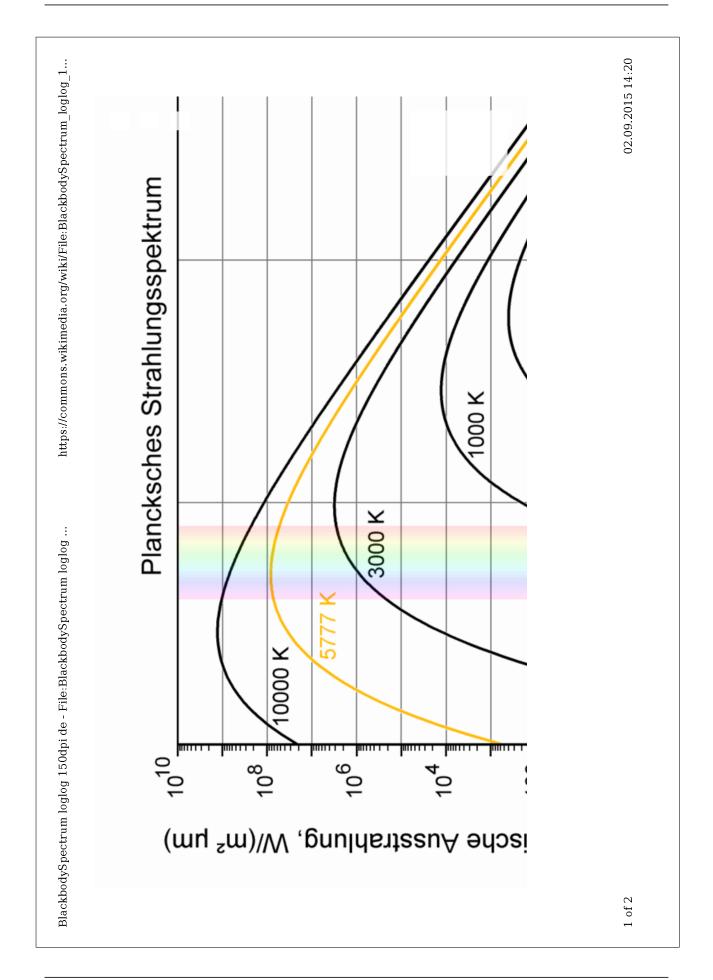


Abb. 1: Ein Peltierelement ist eine serielle Anordnung von Kontakten, die durch einen p-Metall-n- bzw. n-Metall-p-Kontakt mit zwei unterschiedlich dotierten Halbleitern realisiert sind. Dadurch entsteht eine Abfolge von kalten und warmen Metallstrecken, die jeweils die warme und kalte Seite des Peltierelements bilden.

02.07.2010





Effektivwert - Wikipedia

https://de.wikipedia.org/wiki/Effektivwert

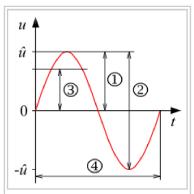
### **Effektivwert**

aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie

Unter dem **Effektivwert** versteht man in der Elektrotechnik den quadratischen Mittelwert einer zeitlich veränderlichen physikalischen Größe. Vorzugsweise wird der Begriff auf Wechselgrößen angewandt, allgemein auf Größen mit stationärem Verlauf. Der Effektivwert gibt denjenigen Wert einer Gleichgröße an, der an einem ohmschen Verbraucher in einer repräsentativen Zeit dieselbe elektrische Energie, also auch im Gleichwert dieselbe elektrische Leistung, umsetzt. Der Effektivwert hängt sowohl vom Scheitelwert als auch von der Kurvenform ab. In der englischen Sprache wird der Effektivwert mit **RMS** (Abkürzung für **R**oot **M**ean **S**quare, Quadratisches Mittel) bezeichnet.

#### Inhaltsverzeichnis

- 1 Allgemeines
- 2 Darstellung der Definition
- 3 Spezielle Signalformen
  - 3.1 Sinusförmige Spannung
  - 3.2 Pulsdauermodulierte Gleichspannung
  - 3.3 Weitere Signalformen
- 4 Messtechnische Erfassung
  - 4.1 Gleichrichtwert und Effektivwert
  - 4.2 Effektivwertbildung mit elektrischem Ausgangssignal
  - 4.3 Mischgrößen
- 5 Literatur
- 6 Einzelnachweise



Eine sinusförmige Wechselspannung.

- 1 = Scheitelwert, Amplitude
- 2 = Spitze-Tal-Wert,
- 3 = Effektivwert,
- 4 = Periodendauer

## **Allgemeines**

Eine häufige Verwendung eines Effektivwertes findet man bei der Wechselspannung, die man aus dem Stromnetz bzw. der Steckdose beziehen kann. Diese sinusförmige Spannung hat in Mitteleuropa den Nennwert von 230 V bei einer Frequenz von 50 Hz. Dieser Nennwert gibt den Effektivwert an, nicht etwa die Amplitude. Die momentane Leistung schwankt zwischen null und dem Doppelten der mittleren Leistung.

Der aufgenommene Strom von Geräten ist abweichend von der Spannung oft nicht sinusförmig, verursacht durch nichtlineare Bauelemente wie Dioden oder

1 of 8 01.09.2015 19:03

## Thermoelectric Module Technical Datasheet

Model: TEC1-12705

Parameter	Performance Value		
Hot Side Temperature(°C)	30		
Δ Tmax (°C):	≥67		
Qmax (W):	≥52		
Imax (A)	4. 6		
Vmax (VDC):	15. 4		
TPY ACR@25° C ambient (ohm):	2.2±0.1		
Width of the module(mm)	40±0.25		
Length of the module(mm)	40±0.25		
Thickness of the module(mm)	4.1±0.1		
Flatness(mm)	≤0.05		
Parallelism	≤0.05		
RTV Sealing	No		
Upright Pressure(kg/cm²)	10.8 (=150psi)		
	TEC1-12705		
Permanent Marking (Hot side)	DD/MM/YY		
Elements Size	$(1.4 \times 1.4 \times 1.6) \pm 0.05$ mm		
Number of Couples	127		
N	Directive 2002/95/EC (RoHS)		
Norms to be fulfilled	2005/618/EC		
	1. Material:20AWG UL1674 105°C PVC insulation		
	2.Length of the red positive wire is $240 \pm 10$ mm		
	3.Length of the black negative wire is 240 ± 10mm		
Wire Standard	<ol> <li>Stripped customer end in 10 ± 1mm,half-strip.</li> </ol>		
	pull insulation 2 ± 1 mm.		
*	<ol><li>Heat shrinking tube at the foot of wire—dimension</li></ol>		
	Φ3×13±1mm.		
Check Level(AQL)	normal 1.5		
Check extent	general II		
Check parameters	dimensions		
INPUT SPOT CHECKS			
Check Level(AQL)	normal 1.5		
Check extent	general II		
Check parameters	resistance		
1	Parallel difference		

Reihen- und Parallelschaltung http://www.solar.lucycity.de/index.php/reihen-und-parallelschaltung Suche nach Schlagwörtern Suchbegriff Los Sonnenstra hlung Solarzellen Schaltungen Photovoltaikanlagen Wirtschaftlichkeit Sitemap Schaltungen Vorteile der Parallel- oder Reihenschaltung von Spannung und Stromstärke Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen Solarmodulen Reihen-und Parallelschaltung · Standortwahl und Ausrichtung Solarzellen sind Gleichspannungsquellen. Das bedeutet, eine Solarzelle erzeugt Gleich- und Wechselstrom Gleichspannung, so wie auch Batterien. Wird eine Solarzelle in einen geschlossenen Stromkreis eingebaut, treibt sie den elektrischen Strom in nur eine Richtung an. Es Genauso wie eine Batterie, besitzt eine Solarzelle immer einen Pluspol und einen Minuspol. Der elektrische Strom fließt in einem geschlossenen Stromkreis vom Minuspol 2:47 Min Dauer: der Solarzelle durch einen Verbraucher (z.B. eine Lampe) Herausgeber: Solarinvert GmbH zum Pluspol der Solarzelle durch die Solarzelle hindurch zurück zum Minuspol der Solarzelle. Schaltzeichen In einem Schaltplan werden für Reihenschaltung von Solarzellen eine Solarzelle (Fotoelement) häufig folgende Symbole Bei der Reihenschaltung von Gleichspannungsquellen werden immer unterschiedliche Pole miteinander verbunden. Möchte man also Solarzellen in Reihe schalten, so verbindet man den Minuspol einer Solarzelle mit dem Pluspol der nächsten Solarzelle. Eine Reihenschaltung führt dazu, dass sich die Spannungen der einzelnen Solarzellen addieren. Die Gesamtspannung wird somit höher. Sind die in Reihe geschalteten Solarzellen gleichartig, so bleibt die Gesamtstromstärke so hoch wie die Stromstärke einer einzelnen Solarzelle. Minus - und Pluspol Der obere Kontakt, der in Parallelschaltung von Solarzellen Richtung Sonne zeigt bildet meist den Minuspol einer Bei der Parallelschaltung von Solarzelle Gleichspannungsquellen werden immer gleiche Der untere Kontakt, der in Pole miteinander verbunden. Möchte man also Richtung Boden zeigt bildet Solarzellen parallel schalten, so verbindet man meist den Pluspol einer alle Minuspole der Solarzellen und alle Pluspole der Solarzellen. Eine Parallelschaltung führt dazu, dass sich die elektrischen Ströme der einzelnen Minuspol Solarzellen addieren. Die Gesamtstromstärke wird somit höher. Sind die in Reihe geschalteten Solarzellen gleichartig, so bleibt die Gesamtspannung so hoch wie die Spannung einer einzelnen Solarzelle. Wozu diese Zusammenschaltungen? Eine Reihenschaltung mehrerer Gleichspannungsquellen führt also zu einer Elektrische Spannung Erhöhung der Gesamtspannung. Das wird z.B. bei Taschenlampen genutzt, in denen sich mehrere Batterien hintereinander in Reihe befinden, um eine höhere Spannung Elektrische Stromstärke zu erreichen. Eine Parallelschaltung mehrerer Gleichspannungsguellen erhöht die Elektrischer Pol Gesamtstromstärke. Spannungsque lle Möchte man einen Verbraucher betreiben, z.B. ein Radio oder eine Lampe, ist es gut wissen, welche Spannung und welche Stromstärke der Verbraucher benötigt, Reihenschaltung von um bestmöglich zu funktionieren. Diese Werte sind in der Regel auf dem Gerät Spannungsguellen aufgedruckt. Man schaltet dann erst einmal so Reihenschaltung von viele Solarzellen in Reihe, bis die benötigte Bauelemente n Spannung erreicht wird. Anschließend schaltet

1 von 2 12.06.2015 14:36

Eine herkömmliche kristalline Solarzelle mit einer Größe von etwa 15 cm x 15 cm,

Parallelschaltung von

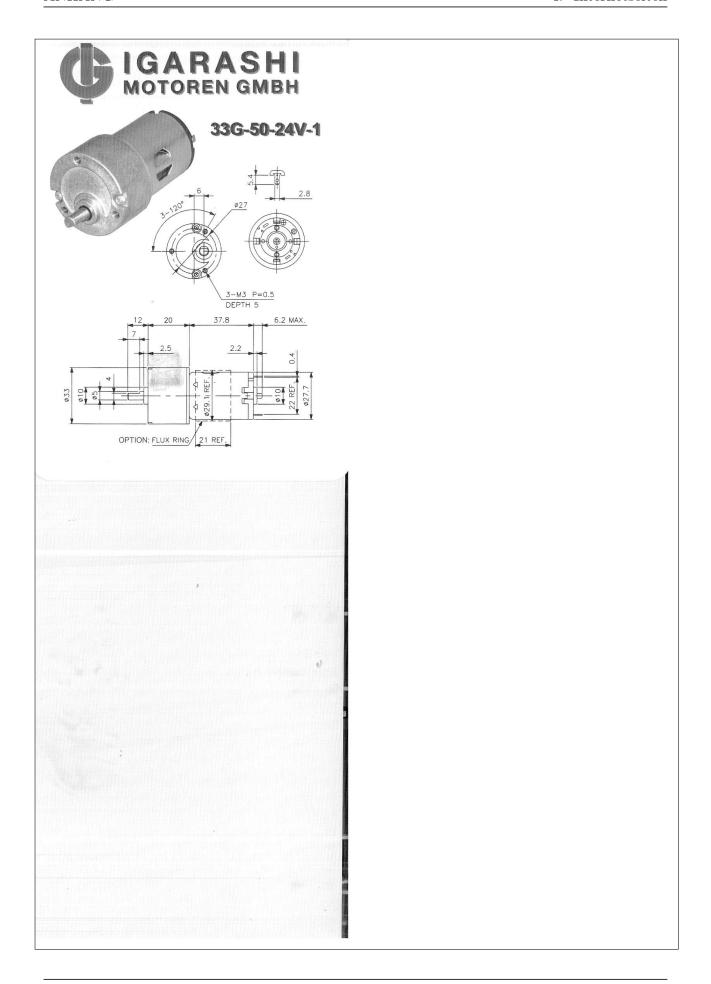
Spannungsquellen

Parallelschaltung von
Bauelementen

man mehrere solcher Reihen parallel, bis die

benötigte Stromstärke erreicht wird.

Ein Beispiel



Pumpspeicherkraftwerk - Wikipedia

https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherkraf...

## **Pumpspeicherkraftwerk**

aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie

Ein **Pumpspeicherkraftwerk** (auch Pumpspeicherwerk (PSW) oder, insbesondere in der Schweiz, Umwälzwerk<sup>[1]</sup> genannt) ist eine besondere Form eines Speicherkraftwerkes und dient der Speicherung von elektrischer Energie durch Hinaufpumpen von Wasser. Dieses Wasser lässt man später wieder bergab fließen und erzeugt dabei mittels Turbinen und Generatoren wieder elektrischen Strom. Die elektrische Energie wird durch Umwandlung in potentielle Energie von Wasser gespeichert und nach Umwandlung dieser potentiellen Energie in elektrische Energie wieder ins Netz gespeist. Aufgrund des Wirkungsgrades von ca. 75 % bis 80 % über einen Pumpzyklus wird die aufgenommene Energie nur zum Teil wieder an das Netz zurückgegeben.

Pumpspeicherkraftwerke stellen gegenwärtig die technisch einzige Möglichkeit dar, großtechnisch elektrische Energie unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu speichern.<sup>[2]</sup>

Pumpspeicherkraftwerke dienen primär dazu, um in nachfrageschwachen Zeiten wie in der Nacht oder an Wochenenden ein Überangebot von elektrischer Leistung im Stromnetz durch den Pumpbetrieb aufnehmen zu können. Zu Zeiten mit hoher Stromnachfrage wird die gespeicherte Energie zur Deckung der



Staumauer des Kraftwerks Ottenstein mit dem Krafthaus, in welchem zwei Pumpen mit je 9 MW Leistung und vier Turbinen mit je 12 MW Leistung untergebracht sind



Das Koepchenwerk in Herdecke

Spitzenlast an das Stromnetz abgegeben. Sie ermöglichen in Kombination mit anderen Kraftwerken, die weniger oder gar nicht regelbar sind, eine in Summe gleichmäßigere Auslastung.

#### Inhaltsverzeichnis

- 1 Funktion
- 2 Wirkungsgrad
- 3 Entwicklungsgeschichte
- 4 Energiewirtschaftliche Bedeutung

1 of 14 01.09.2015 19:08

Wärmeleitfähigkeit von Metallen

 $http://www.schweizer-fn.de/stoff/wleit\_metall/wl...$ 

#### Wärmeleitfähigkeit - Metalle

	Wärmeleitfähigkeit λ (W/(m*K))	Spez. Gewicht ρ (kg/m³)
Aluminium (*	200	
Aluminium Legierung (*	160	2800
Blei (*	35	11300
Bronze	58	8700
Edelstahl Monel 505	20	
Edelstahl V2A	21	
Gold	311	
Graphit	140	
Grauguss	48	7500
Kupfer (*	380	8900
Magnesium	170	
Messing	81105	8400
Messing MS60	113	
Neusilber	29	
Nickel	85	
Platin	80	
Silber	418	
Stahl	46,5	7800
Stahl 0,2%C (*	50	7800
Stahl 0,6%C	46	7800
Stahl 8% Cr	21	
Stahl legiert (*	15	
Stahlguss	52	
Titan	16	
Weißmetall	3570	
Wolfram	167	
Zink	110	7200
Zinn	65	

(\* Werte DIN V 4108-4

1 of 1 27.08.2015 16:26

Wärmeleitfähigkeit von Gestein, Holz und Glas

http://www.schweizer-fn.de/stoff/wleit\_sonstiges...

Wärmeleitfähigkeit - Erdreich - Gestein - Holz - Glas -Bodenbelag - Verschmutzung - Sonstiges

Erdreich	Wärmeleit- fähigkeit λ (W/(m*K))	Spez. Gewicht ρ (kg/m³)
Bimskies	0,19	1000
Bitumen (*	0,17	1100
Erdreich 10% Feuchte	0,502,00	10002000
Erdreich 20% Feuchte	0,752,70	10002000
Erdreich lehmig, tonig	1,002,60	15002000
Erdreich Mittelwert	2,00	
Erdreich nasser Lehm	3,00	
Erdreich sandig locker	0,801,80	13002000
Erdreich trocken	0,150,60	10002000
Erdreich trockener Sand	0,30	
Erdreich bindiger Boden (*	1,40	
Granit	3,50	2800
Kies	0,70	1800
Kies naturfeucht (*	2,10	
Kies Bimskies	0,19	1000
Kies- oder Splitbeton	2,10	2400
Kieselgursteine 100800°C	0,0860,190	300
Kieselgursteine 100800°C	0,1100,220	500
Kiesschüttung trocken	0,70	1800
Lehm feucht - Referenzboden (**	1,45	1800
Lehm gesättigt - Referenzboden (**	2,90	1800
Lehm Massivlehm (*	0,95	1800
Lehm Massivlehm (*	1,20	2000
Lehm Strohlehm (*	0,60	1400
Lehm Strohlehm (*	0,80	1600
Lehm Leichtlehm (*	0,30	800
Lehm Leichtlehm (*	0,40	1000
Lehm Leichtlehm (*	0,50	1200
Quarz	1,10	
Sand trocken - Referenzboden (**	0,7	1500

1 of 5 27.08.2015 16:25

