

Wissenschaftliche Hausarbeit im Rahmen der ersten Staatsprüfung
für das Lehramt an Haupt- und Realschulen
im Fach Physik,
eingereicht der Hessischen Lehrkräfteakademie
-Prüfungsstelle Frankfurt am Main-

Thema:

**Konzeption eines Projektes am außerschulischen Lernort
zum Wasserkraftwerk**

Verfasser:

Lorenz Buchner

Gutachter:

Prof. Dr. Thomas Wilhelm

Danksagung

Ich möchte mich zunächst bei Herrn Prof. Dr. Wilhelm bedanken, der als Betreuer der wissenschaftlichen Hausarbeit trotz der Coronapandemie stets erreichbar war. Dabei möchte ich auch für zahlreiche Anregungen, sowie für die Beantwortung meiner Fragen und die Hilfe beim Überwinden meiner Unsicherheiten danken.

Ich danke auch Julia Behle, die für mich als Vermittlerin zwischen der Goethe-Universität und Provadis schnell die richtigen Kontakte am Edersee vermitteln konnte.

Ein besonderer Dank gilt auch Matthias Lange, der seine private Zeit opferte um mir als völlig Fremdem eine mehrstündige telefonische Führung durch das Infozentrum des Kraftwerks Waldeck zu geben und damit mein Interesse für die beiden Pumpspeicherkraftwerke geweckt hat.

Ein ebenso großes Dankeschön möchte ich Herrn Kalden aussprechen. Er unterstützte die Durchführung des Modells vom Test der Bauteile bis zum Resultat und brachte diverse didaktische Anregungen und technische Entwicklungsideen mit ein.

Bei Thomas Lenhart möchte ich mich für die unentgeltliche Überlassung einer Lötstation und Elektrozubehör bedanken.

Jasmin Pabst und Leonie Müller haben diese Arbeit korrekturgelesen. Auch dafür gilt mein herzlichster Dank.

Ein weiterer Dank gilt meiner Lebenspartnerin Kathrin Sonnabend, die mich zweimal zum Edersee begleitet hat und bei Teilversuchen assistierte.

Inhalt

1	Einleitung und Hintergrund	1
1.1	Relevanz der Thematik	1
1.2	Zielsetzung und Aufbau	2
1.3	Methodik	3
2	Der Standort Edersee	4
3	Technische Daten zu den Pumpspeicherkraftwerken	6
3.1	Daten zu Waldeck II	7
3.2	Daten zu Waldeck I	8
4	Physikalische Grundlagen zum Pumpspeicherkraftwerk	9
4.1	Energieformen	9
4.1.1	Mechanische Energie	10
4.1.2	Elektrische Energie	10
4.1.3	Innere Energie	11
4.1.4	Strahlungsenergie	11
4.1.5	Scheinbarer Energieverlust im PSW und Wirkungsgrad	11
4.2	Hydrostatischer Druck	13
4.3	Poiseuille'sche Gleichung	14
4.4	Gleichspannungsquellen und Gleichstromkreise	15
4.4.1	Widerstände und das Ohm'sche Gesetz	15
4.4.2	Kirchhoff'sche Gesetze	15
4.4.3	Helmholtz'sches Superpositionsprinzip	16
4.5	Generatoren	16
4.6	Transformatoren	18
5	Didaktische Grundlagen	20
5.1	Außerschulische Lernorte	20
5.1.1	Informelles Lernen	21
5.1.2	Lernziele am außerschulischen Lernort	22
5.2	Modelle und Experimente	23
5.3	Berufsorientierung in Schule und Freizeit	25

6 Modell zum Pumpspeicherkraftwerk.....	27
6.1 Material für das Modell	27
6.1.1 Wahl des Generators.....	27
6.1.2 Wahl der Pumpe	28
6.1.3 Spannungsquellen für die Pumpe	28
6.1.4 Sonstige Bauteile	29
6.2 Testung der technischen Bauteile	30
6.3 Stromabnehmer im Modell	33
6.4 Verbesserungen nach dem ersten Modelltestlauf	33
6.5 Das Modell zum PSW	34
7 Planung einer Einheit am außerschulischen Lernort	38
7.1 BOOM-Camp als Lernort.....	38
7.2 Fachliche Lernziele und Lernvoraussetzungen.....	38
7.3 Ablauf des Projekts.....	40
7.3.1 Ausflug zum Kraftwerk Waldeck.....	41
7.3.2 Modellaufbau im Camp	45
7.3.3 Experimentieren am Modell	50
7.3.4 Lötworkshop und Stresstest des Modells.....	55
8 Anregungen	58
8.1 Einbindungsmöglichkeiten im Lehrplan und im Physikunterricht	58
8.2 Anwendung weiterer Spannungsquellen	58
8.3 Weiterentwicklung des Modells	59
9 Fazit	60
9.1 Das PSW als Lernobjekt.....	60
9.2 Außerschulische Lernorte und Lerninhalte.....	60
9.3 Zum Modell	61
9.4 Zum Projekt	61
Anhang.....	63
Literaturverzeichnis	78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der Edersee mit Sperrmauer.....	4
Abbildung 2: Affolderner See flussabwärts von Hemfurth	5
Abbildung 3: Querschnitt durch die Kraftwerke Waldeck	6
Abbildung 4: Modell der Kaverne von Waldeck II	7
Abbildung 5: Energieformen im Überblick	9
Abbildung 6: Überschlägige Wirkungsgrade und Verluste einer Pumpspeichieranlage	12
Abbildung 7: Schematischer Aufbau eines Drehstromgenerators	17
Abbildung 8: Das deutsche Stromnetz.....	18
Abbildung 9:Generator von Yosoo.....	27
Abbildung 10: Wasserpumpe von HSeaMall	28
Abbildung 11: Stromerzeugung durch Solarenergie und PSW in Abhängigkeit zur Tageszeit und im Vergleich zum Stromverbrauch in Deutschland vom 13.04.- 16.04.2021	29
Abbildung 12: Wasserpumpe erzeugt eine Fontäne.	30
Abbildung 13: Generator bringt LED zum Leuchten.	31
Abbildung 14: Aufbau des Modellprototyps aus Sicht des Speicherbeckens im Treppenhaus des Instituts für Didaktik der Physik (IDP) Frankfurt.....	31
Abbildung 15:Solarmodule von enjoysolar	34
Abbildung 16: Radtour vom Camp (A) zur Peterskopfbahn (E) (blauer Weg).....	41
Abbildung 17: Mann als Größenvergleich zum Durchmesser des Druckrohrs von Waldeck I.....	44
Abbildung 18: Satellitenaufnahme des Camps der Sportjugend Hessen mit Standorten für das Modell.....	45
Abbildung 19: Schlauchnetz mit Pumpe und Generator.....	48
Abbildung 20: Modell im Einsatz bei einer Gesamthöhe von etwa 3 m	49
Abbildung 21: Schaltkreis nach Schaltplan aus Anhang 4	50
Abbildung 22: Versuchsaufbau von Versuch 2	52
Abbildung 24: Stromverbrauch und durch PSW generierter Strom vom 14.06.- 16.06. in Deutschland	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung des informellen Lernens	21
Tabelle 2: Lernziele des informellen Lernens im Überblick	23
Tabelle 3: Übersicht zum Material und dessen Funktion im Modell und Vergleich zum echten PSW.....	35

Abkürzungsverzeichnis

DM = Deutsche Mark

IDP = Institut der Didaktik der Physik

LED = Leuchtdiode

PSW = Pumpspeicherkraftwerk

Symbole und Einheiten

Aufgrund dessen, dass in dieser Ausarbeitung sowohl der Bereich der Mechanik als auch elektrische Maschinen abgehandelt werden, konnte eine Mehrfachnennung einzelner Symbole nicht immer vermieden werden.

Symbol	Beschreibung	Einheit
A	Fläche	m^2
B	Flussdichte	T=Tesla
E	Energie	J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$)
F	Kraft	N=Newton
g	Gravitationsbeschleunigung	m/s^2
H	Höhe	m
I	Stromstärke	A
m	Masse	kg
P	Leistung	W
p	Druck	Pa (100 kPa=1 bar)
Q	elektrische Ladung	C=As
Q	Volumenstrom	m^3/s
R	Widerstand	Ω
r	Radius	m
t	Zeit	s
U	Spannung	V
V	Volumen	m^3
v	Geschwindigkeit	m/s
η	Wirkungsgrad	
ρ	Dichte	kg/m^3
Φ	Magnetischer Fluss	Wb=Weber

1 Einleitung und Hintergrund

1.1 Relevanz der Thematik

Der Bedarf an elektrischer Energie steigt seit Jahren weltweit. Seit 1980 hat sich der Jahresverbrauch von etwa 7.300 TWh auf mehr als 22.000 TWh verdreifacht.¹ Gleichzeitig lässt sich dieser Bedarf nur bedingt durch die wachsende Weltbevölkerung erklären, welche sich in der gleichen Zeit nicht ganz verdoppelt hat.² Dabei setzen Stromlieferanten in Deutschland mehr und mehr auf erneuerbare Energien, deren Anteil hierzulande im Jahr 2020 bereits 45,4% betrug.³

Für ein großes Interesse an „sauberem“ Strom sorgte vermutlich unter anderem die „Fridays for Future“ Bewegung, welche deutlich machte, dass auch, oder eher im Besonderen, Jugendliche und junge Erwachsene auf umweltfreundlichere Lebensweisen Wert legen. Dennoch sind auch regenerative Kraftwerke nicht frei von Kritik. Windräder sorgen häufig für Unmut in den Gemeinden, in denen sie errichtet werden, da sie das Landschaftsbild verändern. Die Effizienz der Solaranlagen wird hinterfragt und in beiden Fällen hängt die bereitstellbare Energie vom Wetter ab: Solaranlagen liefern in den dunklen Stunden, in denen besonders viele Menschen in Innenräumen sind, keinen Strom. Windräder sind vom Wind abhängig.

Schon ohne diese regenerativen Kraftwerke sorgt ein wechselndes Verhalten der Verbraucher für Schwankungen im Energiebedarf. Doch auch Kraftwerke, die mit fossilen Brennstoffen arbeiten oder Atomkraftwerke können nicht kurzfristig ein- und abgeschaltet, beziehungsweise hoch- oder runtergefahren werden. Es benötigt also Energiespeicher, welche bei Überlast des Stromnetzwerks Energie einspeichern und bei Bedarf schnell bereitstellen, um diesen zu decken.

Pumpspeicher bilden hier eine von vielen Technologien zur Speicherung elektrischer Energie. Sie werden vor allem eingesetzt, um Schwankungen im Regelleistungsmarkt auszugleichen. Dabei sind sie kostengünstig und setzen mit einem Zyklusnutzungsgrad von bis zu 80 % einen Großteil der zum Speichern benötigten Energie wieder um.⁴ Am nordhessischen Edersee finden sich sowohl

¹ Vgl. Breitkopf 2020.

² Vgl. Rudnicka 2019.

³ Vgl. BMWi 2021.

⁴ Vgl. Mauch et al. 2009.

Laufwasserkraftwerke zur Stromerzeugung als auch die Pumpspeicherkraftwerke (PSW) Waldeck I und Waldeck II.

1.2 Zielsetzung und Aufbau

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es anhand der PSW Waldeck I und Waldeck II eine Leereinheit zu Wasserkraftwerken, vorwiegend in Bezug auf PSW und deren Rolle im deutschen Stromnetz zu konzipieren und vorzustellen. Zu diesem Zweck soll ein Modell entwickelt werden, welches Lernenden die Funktionsweise von Wasserkraftwerken anschaulich vermittelt. Die Kostengrenze für dieses Modell soll auf etwa 100 Euro Materialkosten gesetzt werden, um Interessierten einen preiswerten Nachbau zu ermöglichen. Durch Experimente an diesem Modell sollen weiterhin sowohl die Effizienz entsprechender Kraftwerke als auch die Anwendungsmöglichkeiten verdeutlicht werden. Dabei sollen Lernende zudem einige theoretische physikalische Grundlagen qualitativ erkennen können und praktische Einblicke in die Elektronik erhalten. Um das Verhältnis zwischen Modell und Realität zu verdeutlichen, ist eine außerschulische Lernumgebung vorgesehen. Hierfür werden die Rahmenbedingungen des BOOM-Camps, welches unter anderem im Erlebniscamp der Sportjugend Hessen an der Eder stattfindet, als passend betrachtet. Jugendlichen und jungen Erwachsenen soll hier die Möglichkeit gegeben werden Einblicke in Handwerksberufe und Technik zu bekommen, weshalb eine Integration der konzipierten Lehr- und Lerneinheit in diesem Kontext schlüssig scheint.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in neun Kapitel. In Kapitel 2 wird zunächst der Standort Edersee, an welchem die PSW Waldeck I und Waldeck II liegen vorgestellt, um anschließend in Kapitel 3 nähere Informationen zu den technischen Daten der beiden PSW aufzuführen. Kapitel 4 betrachtet die relevanten physikalischen Grundlagen in Bezug auf PSW im Allgemeinen, um einen theoretischen Rahmen für die Entwicklung des Modells und relevante Komponenten zu schaffen. Diese physikalischen Grundlagen werden in Kapitel 5 um die entscheidenden Begrifflichkeiten und Konzepte der Didaktik ergänzt. Kapitel 6 erläutert das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Modell. Schwerpunkte liegen dabei auf der Entwicklung des Gesamtsystems, den technischen Spezifikationen und Auswahlkriterien in Bezug auf die Komponenten des Modells sowie auf den durchgeführten Testungen zum Nachweis der Funktionsfähigkeit. In Kapitel 7 wird darauf aufbauend dargestellt, wie das Modell in einem

außerschulischen Kontext eingebunden werden kann, um in Kapitel 8 fortführende didaktische Überlegungen und Weiterentwicklungen für den Schulbetrieb zu erläutern. Die Arbeit schließt mit einem Fazit in Kapitel 9.

1.3 Methodik

Um einen ersten Eindruck von Wasserkraftanlagen zu erhalten, war ein Ausflug an den Edersee, mit seinen zahlreichen Wasserkraftwerken, darunter das leistungsstärkste Hessens, der Beginn dieser Ausarbeitung. Die Wahl des Kraftwerkstyps fiel aus in 1.1 erläuterten Gründen auf PSW. Um die technisch-physikalische Funktions- und Wirkungsweise von PSW bewerten zu können, wurde eine umfangreiche Literatur- und Onlinerecherche zu den physikalischen Grundlagen in Bezug auf PSW und Wasserkraft(-werke) im Allgemeinen, aber auch speziell zu den PSW Waldeck I und Waldeck II durchgeführt. Gleiches gilt für die relevanten didaktischen Begrifflichkeiten und Konzepte, wobei sowohl der Rahmen des innerschulischen Physikunterrichts und die curricularen Vorgaben des Hessischen Kultusministeriums berücksichtigt werden, vor allem aber das außerschulische Lernen im Vordergrund stehen soll. Diese theoretischen Grundlagen bilden die wissenschaftliche Basis der vorliegenden Arbeit und der Konzeption der Lerneinheit sowie des Modells.

2 Der Standort Edersee



Abbildung 1: Der Edersee mit Sperrmauer⁵

Der Edersee liegt im nordhessischen Landkreis Waldeck-Frankenberg. Eine etwa 400 m lange und 48 m hohe Sperrmauer (siehe Abbildung 1) staut seit 1914 den Edersee. Mit einem Stauvolumen von 199,3 Millionen m³ Wasser ist er der drittgrößte Stausee Deutschlands. Insgesamt liegen um den Standort der Stau-mauer Hemfurth vier wasserbetriebene Kraftwerke: Das Speicherkraftwerk Hemfurth und das Laufwasserkraftwerk Affoldern mit einer maximalen Leistung von 20 MW, beziehungsweise 2,7 MW, sowie die beiden PSW Waldeck I und Waldeck II mit einer maximalen Leistung von 140 MW und 480 MW. Alle Kraftwerke sind voneinander zu Fuß zu erreichen. Von den PSW aus, welche wie die Talsperre in Hemfurth liegen, fährt zudem eine Standseilbahn (während der Pandemie außer Betrieb) auf den Peterskopf, auf dessen Plateau die beiden Stauseen der Kraftwerke liegen. Dort kann das gut ausgebaute Netz an Wanderwegen durch den Nationalpark Kellerwald Edersee erreicht werden, welcher sich in westlicher Richtung an der Eder entlang bis Herzhausen erstreckt. Bis hier finden sich am Edersee und der Eder entlang kleinere Ortschaften mit diversen Tourismusangeboten, sowohl am als auch im Wasser. Hinter der Edertalsperre mündet die Eder in den nahegelegenen Affolderner See, welcher als Unterbecken für die PSW und gleichzeitig als Speicherbecken für das Laufkraftwerk

⁵ Edersee Marketing GmbH 2021a.

Affolderner See dient. Dazu wurde der See 1972 erweitert. Ein schmaler bewachsener Damm zeigt heute die Grenze zwischen dem alten und dem neuen Staubecken (siehe Abbildung 2, links des Damms alter Teil, rechts des Damms die Seeerweiterung).



Abbildung 2: Affolderner See flussabwärts von Hemfurth⁶

⁶ Höhne 2013.

3 Technische Daten zu den Pumpspeicherkraftwerken



Abbildung 3: Querschnitt durch die Kraftwerke Waldeck⁷

PSW dienen häufig der Stromveredelung. Damit ist gemeint, dass Unregelmäßigkeiten im Stromnetz abgefangen werden, indem bei Überproduktion von Strom die elektrische in kinetische Energie, oder bei Unterproduktion kinetische in elektrische Energie umgewandelt wird. Dazu wird Wasser in ein höhergelegenes Staubecken gepumpt oder von diesem über einen Generator in ein Auffangbecken abgelassen. Das PSW Waldeck liefert bei Spitzenlast eine Leistung von insgesamt 620 MW.⁸

Um ein zuverlässiges Stromnetz zu etablieren, muss der generierte Strom stets mit dem genutzten Strom übereinstimmen. Andernfalls können Spannungsabfälle und Frequenzschwankungen zu Störungen sowie Stromausfällen führen. PSW können in kurzer Zeit eine gewisse Leistung zur Verfügung stellen und bieten damit eine Möglichkeit bei Belastungsspitzen des Stromnetzes für Ausgleich zu sorgen. Zudem benötigen sie keinen Anlaufstrom und können auch bei einem Netzzusammenbruch starten.⁹

In diesem Kapitel werden die Metadaten der wichtigsten Kraftwerksbestandteile, die für den beschriebenen Vorgang nötig sind, vorgestellt. Waldeck I ist von weitem sichtbar, während Waldeck II mit Ausnahme des Oberbeckens im Berg liegt (Abbildung 3). Die PSW sind Teil des deutschen Kraftwerksparks der Uniper SE.¹⁰

⁷ Greinke o.J.

⁸ Vgl. Uniper SE 2021.

⁹ Vgl. Grimm und Zoch 2010.

¹⁰ Vgl. Uniper SE 2020.

3.1 Daten zu Waldeck II

Das PSW Waldeck II wurde am 7. November 1975 eingeweiht. Zwei Maschinen sorgen im Innern des Peterskopfs in einem Kavernenkraftwerk für eine maximale Leistung von 480 MW. Damit ist Waldeck II eines der größten PSW in Deutschland und eine der größten Energiequellen in einem Nationalpark weltweit. Die Kaverne des Kraftwerks ist 106 m lang, 55 m hoch und 33m breit und kostete 350 Millionen DM. Ihre Sohle, die unterste Ebene der Kaverne, liegt 80 m unter dem Wasserspiegel des Affolderner Sees. Sie kann über eine 850 m lange Zufahrtsstraße vom Kraftwerk Waldeck II erreicht werden, welche in den Berg hineinführt. Jede Maschine enthält eine Francisturbine mit einer Nennleistung von 80 m³ Wasser pro Sekunde. Diese besitzt einen Durchmesser von 3,10 m und dreht sich bei Betrieb bis zu 375-mal pro Minute. Das Gewicht des Lauf-rads beträgt 23 t. Sie betreibt eine Drehstrom-Synchronmaschine mit einem Durchmesser von 5,20 m (vgl. Abbildung 4, mittig im Bild).



Abbildung 4: Modell der Kaverne von Waldeck II¹¹

¹¹ Dünkel 2009.

Eine einzelne Maschine bringt eine Leistung von 240 MW zustande.

Die Pumpe der Maschine ist eine einstufige, einflutige Radialpumpe (vgl. Abbildung 4, unteres Drittel). Mit einer Drehzahl von 375 U/min befördert sie 70 m³ Wasser pro Sekunde den Berg hinauf, wobei sie einen Druck von 50 bar erzeugen kann. Insgesamt vier Kugelschieber regulieren den Zufluss zu den Turbinen und den Pumpen (vgl. Abbildung 4, hinter den roten Schaltern). Eine 520 m lange Saugrohrleitung aus Stahlbeton mit einem Durchmesser von 7,5 m verbindet die Kaverne mit dem Unterbecken des PSW, dem Affolderner See. Bei einer Höhe von 217,50 m über dem Meeresspiegel trifft die Leitung auf das Wasserschloss. Dieses 53 m hohe Gewölbe hat einen Durchmesser von etwa 23 m und damit einen 413 m² großen Wasserspiegel. Es fängt Druckstöße beim Betriebswechsel von Turbinen im Pumpbetrieb ab. Vom Kraftwerk aus führt die Druckrohrleitung in das 360 m höher gelegene Oberbecken. Sie ist 750 m lang und besitzt einen Durchmesser von 5,75 m. Ihre Wandung besteht aus Stahl mit einer Stärke von 5 cm. Auf dem Gipfelbereich des Ermerod endet die Druckrohrleitung in das Oberbecken. Dieses ist bis zu 30 m tief, 1,2 km lang und fasst damit ein Gesamtvolumen von 4,8 Millionen m³ Wasser. Für den Bau dieses Beckens wurden ca. 90.000 Bäume gefällt und 3,2 Millionen m³ Erdreich bewegt.¹²

3.2 Daten zu Waldeck I

Das Kraftwerk Waldeck I ersetzt seit 2009 Teile des alten PSW Bringhausen, welches 1933 als erstes PSW am Edersee seinen Betrieb aufnahm. Anders als bei Waldeck II wird die Francisturbine sowohl als Laufrad als auch als Pumpe verwendet. Da die Pumpe einen Anlaufdruck von 5 bar benötigt, liegt die Maschine 50 m unter dem Affolderner See. Beim Pumpen strömen bis zu 24 m³ Wasser, beim Turbinenbetrieb bis zu 28 m³ Wasser pro Sekunde durch die Francisturbine. Zwei Rohre von je 900 m Länge füllen das kleinere der beiden Oberbecken, welches 730.000 m³ Wasser fasst. Die Rohre liegen sichtbar über der Oberfläche des Berges. Ihr Durchmesser beträgt im Durchschnitt zwischen 2,50 m und 2,70 m. Sie überwinden eine Fallhöhe von 300 m, was beim Turbinenbetrieb für einen Druck von etwa 30 bar an der Turbine führt. Die Maschinen des Kraftwerks erzeugen dabei jeweils bis zu 70 MW Leistung.¹³

¹² Vgl. Anhang 1; Dünkel 2009; Wagner et al. 2015; Uniper SE 2019.

¹³ Vgl. Anhang 1; Dünkel 2009; Wagner et al. 2015; Uniper SE 2021.

4 Physikalische Grundlagen zum Pumpspeicherkraftwerk

Die ersten Maschinen die Wasserkraft nutzbar gemacht haben sind Wasserräder. Sie nutzen die Lageenergie des Wassers, um Bewegungsenergie zu erzeugen, indem Wasser aus einer relativen höheren Lage auf ein Schaufelrad trifft und dieses antreibt.¹⁴ Diese Bewegungsenergie wurde zuerst noch direkt genutzt, etwa zum Mahlen, Sägen oder Hämmern. Erst später wurden Möglichkeiten entwickelt, diese aus einer Rotationsbewegung resultierende Bewegungsenergie, in elektrische Energie umzuwandeln. Im Folgenden sollen die relevanten physikalischen Grundlagen dieser Vorgänge erläutert werden.

4.1 Energieformen

Energie tritt in unterschiedlichen Formen auf. Sie lässt sich grob in mechanische Energie, innere Energie, Strahlungsenergie und elektrische Energie unterscheiden (vgl. Abbildung 5).

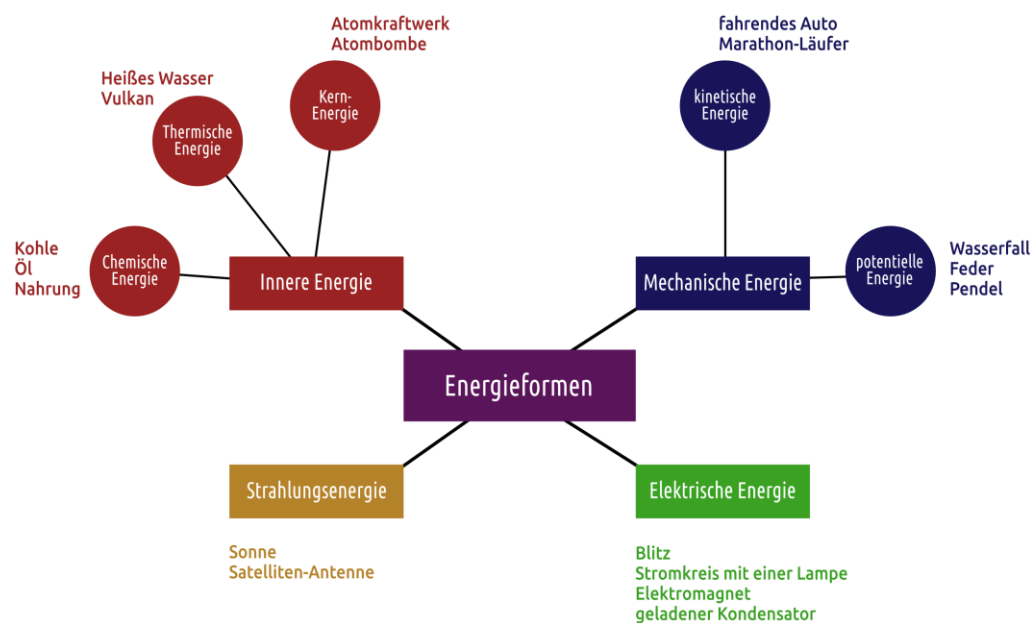


Abbildung 5: Energieformen im Überblick¹⁵

Energie ist nach dem Energieerhaltungssatz eine Erhaltungsgröße und wird in der SI-Einheit Joule J angegeben. Sie wird also weder aus dem Nichts erzeugt und auch nicht verbraucht, sondern ist in ihren Formen wandelbar. In PSW soll elektrische Energie in Form von potenzieller Energie E_{pot} gespeichert und bei

¹⁴ Vgl. Giesecke und Mosonyi 2009, S. 9.

¹⁵ Joachim Herz Stiftung 2021.

Bedarf wieder zu elektrischer Energie E_{El} werden. Dazu wird sie zwischenzeitlich auch in kinetische Energie E_{kin} umgewandelt.

4.1.1 Mechanische Energie

Wie eingangs erwähnt kann mechanische Energie in kinetische und in potenzielle Energie unterschieden werden. Kinetische Energie wird auch als Bewegungsenergie bezeichnet und macht sich als solche durch Bewegung erfahrbar. Sie beschreibt die Arbeit, die benötigt wird, um einen Gegenstand mit der Masse m auf eine Geschwindigkeit v zu beschleunigen und entspricht: ¹⁶

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Im PSW wird das Wasser zum einen durch die elektrisch angetriebene Pumpe, zum anderen durch die Erdbeschleunigung beschleunigt.

Eine weitere mechanische Energieform ist die potenzielle Energie. Sie ist abhängig von der Lage eines Körpers in einem Gravitationsfeld. Sie wird deshalb auch als Lageenergie bezeichnet. Auf der Erde ist ein Körper mit der Masse m im Erdgravitationsfeld der Fallbeschleunigung g ausgesetzt und liegt auf der Höhe h über der Erdoberfläche. Die Fallbeschleunigung ist zwar ebenfalls von der Höhe abhängig, kann jedoch, da diese im Verhältnis zum Erdradius in Bezug auf das Zentrum des Gravitationsfeldes steht näherungsweise als Konstante betrachtet werden. Für die potenzielle Energie gilt dann:¹⁷

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h$$

4.1.2 Elektrische Energie

Elektrische Energie E_{El} bezeichnet die Arbeit W_{El} , welche durch die Energie verrichtet werden kann oder die Energie, welche in einem elektrischen Feld gespeichert ist. Daher gilt: $E_{El} = W_{El}$. Bei elektrischer Arbeit werden Ladungen auf einem Leiter, dem eine Spannung U anliegt, verschoben. Für die Anzahl der Ladungen Q pro Zeit t wird die elektrische Stromstärke I beschrieben als:

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

¹⁶ Nach Höfling 2017, S. 10.

¹⁷ Nach Höfling 2017, S. 10.

Für die elektrische Arbeit gilt dann:¹⁸

$$W_{El} = U \cdot I \cdot t = P_{El} \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t$$

Elektrische Arbeit wird im PSW zum Betreiben der Pumpe verrichtet und in kinetische Energie umgewandelt.

4.1.3 Innere Energie

Innere Energie tritt als chemische, thermische und Kernenergie auf. Träger chemischer Energie sind beispielsweise fossile Brennstoffe, Nahrung und Batterien. Sie wird durch Reaktionen ihrer Trägerstoffe in andere Energieformen umgewandelt. Batterien wandeln beispielsweise chemische in elektrische Energie um, indem räumlich getrennt Oxidations- und Reduktionsreaktionen ablaufen, wodurch Elektronen und damit Ladungen freigegeben werden und so für eine elektrische Spannung zwischen den Reaktionsorten sorgen.

Thermische Energie oder auch Wärmeenergie beschreibt die ungeordnete Lage- und Bewegungsenergie von Molekülen. Eine höhere Temperatur und Masse bedingt eine größere thermische Energie.¹⁹ Sie entsteht in technischen Systemen häufig als ungewollte Folge von Reibungen und anderen Widerständen und geht als Abwärme dem System verloren.

4.1.4 Strahlungsenergie

Strahlungsenergie ist eine „durch elektromagnetische Strahlung übertragene Energie“.²⁰ Die Strahlungsenergie der Sonne wärmt beispielsweise die Erde. Im Vakuum ist die Wärmestrahlung aufgrund fehlender Wärmeleiter der einzige Transportmechanismus für Wärme.²¹ Photovoltaikanlagen können die Strahlungsenergie der Sonne in Wärmeenergie und diese wiederum in elektrische Energie umwandeln.

4.1.5 Scheinbarer Energieverlust im PSW und Wirkungsgrad

Energieformen lassen sich wie eingangs beschrieben ineinander umwandeln. Bei idealisierter Umwandlung wird die investierte Energie innerhalb eines Systems vollständig in Nutzenergie umgewandelt. Entsprechend des Energieerhaltungssatzes müsste also gelten, dass $E_{inv} = E_{nutz}$. In einem PSW wird elektrische

¹⁸ Nach Höfling 2017, S. 28.

¹⁹ Vgl. Schabbach und Wesselak 2012, S. 26-28.

²⁰ Hering et al. 2017, S. 293.

²¹ Hering et al. 2017, S. 425.

Energie zunächst an einem Transformator umgespannt und anschließend mit einem Motor in Rotationsenergie, also kinetische Energie, umgewandelt. Der Motor betreibt eine Pumpe, die das Wasser durch eine Rohrleitung auf eine höhere Lage transportiert. Hierdurch wird die kinetische Energie in potenzielle Energie umgewandelt. Bei Bedarf wird das Wasser wieder durch ein Rohr abgelassen. Die Lageenergie des Wassers wird zu kinetischer Energie. Beim Auftreffen des Wassers wird wieder eine Turbine in Gang gesetzt, welche mittels eines Generators die kinetische in elektrische Energie umwandelt. Anschließend wird die elektrische Energie wieder umgespannt. Nach dem Energieerhaltungssatz müsste die zugeführte Energie auch wieder entnehmbar sein. Tatsächlich beträgt die entnommene elektrische Arbeit am PSW Waldeck II aber nur 80 % der zugeführten elektrischen Arbeit. Dafür verantwortlich sind die in 4.6.3 erwähnten Reibungskräfte in Rohren, Achslagern der Rotoren und elektrische Widerstände sowie in 4.5 erwähnte Probleme bei Transformatoren. Die fehlenden 20 % der elektrischen Energie sind also nicht verloren, sondern größtenteils als thermische Energie dem System entwichen. Die tatsächlich zurückgewonnene elektrische Arbeit wird als Wirkungsgrad η in Prozent angegeben. Abbildung 6 zeigt die Wirkungsgrade eines PSW nach Durchlauf einzelner technischer Komponenten. Dabei wird deutlich, dass vor allem bei der Pumpe und der Turbine vergleichsweise starke Abfälle im Wirkungsgrad stattfinden.

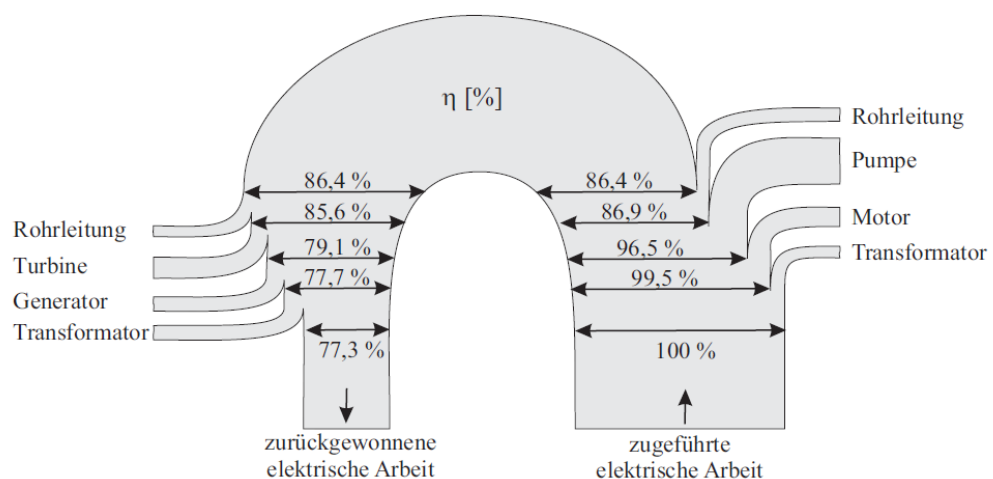


Abbildung 6: Überschlägige Wirkungsgrade und Verluste einer Pumpspeichieranlage²²

²² Giesecke und Mosonyi 2009, S. 686.

4.2 Hydrostatischer Druck

Der hydrostatische Druck ist der Druck, den ein Körper durch die Gewichtskraft einer Flüssigkeitssäule über ihm erfährt, also die Gewichtskraft F_G der Flüssigkeit pro Fläche A des Körpers.²³ Dieser Druck p lässt sich definieren als:

$$p = \frac{F_G}{A}$$

Die Gewichtskraft errechnet sich auf der Erde durch $F_G = m \cdot g$, wobei g gleich der Erdbeschleunigung $9,80 \text{ m/s}^2$.²⁴ Daraus folgt, dass:

$$p = \frac{m \cdot g}{A}$$

Die Masse m eines Stoffs ist definiert als Produkt aus Volumen V und der Dichte des Stoffs ρ . Es gilt demnach:

$$p = \frac{V \cdot \rho \cdot g}{A}$$

Das Volumen einer Säule berechnet sich, wie jedes Prisma, als Produkt aus der Grundfläche A und der Höhe des Prismas h . So gilt für den Schweredruck:

$$p = \frac{A \cdot h \cdot \rho \cdot g}{A} = h \cdot \rho \cdot g$$

Folglich ist der Schweredruck nicht vom Volumen der Flüssigkeit über dem Körper abhängig, sondern lediglich von der Höhe. Entsprechend ist das Gesamtgewicht der Flüssigkeit nicht relevant für den Schweredruck. Für die Umsetzung eines PSW bedeutet dies, dass die enorme Fallhöhe des Wassers weniger Durchströmvolumen haben muss, um den gleichen Energiegewinn zu erzielen wie Kraftwerke mit niedrigeren Wasserständen.

Auch der Luftdruck nimmt Einfluss auf den Wasserdruck. Er drückt mit ungefähr 1000 hPa auf die Wassersäule, was einem Druck von 1 bar entspricht. Wasser besitzt bei 0 °C näherungsweise eine Dichte von $\rho = 1$. Ein Kubikmeter Wasser wiegt daher etwa 1000 kg.²⁵ Bei einer Wassersäule mit einer Höhe von 360 m lässt sich der Druck auf die Grundfläche der Säule mit $p = 360 \text{ m} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,80 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 3528000 \text{ Pa} = 35,28 \text{ bar}$ berechnen. Die Bauweise von

²³ Vgl. Giesecke und Mosonyi 2009, S. 452.

²⁴ Vgl. Giesecke und Mosonyi 2009, S. 115.

²⁵ Vgl. Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungstechnik o.J., S. IV-1.

PSW hat zur Folge, dass hier der Luftdruck nicht nur von oben, sondern auch von unten auf die Wassersäule, beziehungsweise auf das Auffangbecken wirkt. Da die Unterschiede in Bezug auf den Einfluss des Luftdrucks im Vergleich von Ober- zu Unterbecken marginal sind, ist er jedoch zu vernachlässigen.

4.3 Poiseuille'sche Gleichung

Der Volumenstrom Q einer inkompressiblen Flüssigkeit – wie zum Beispiel Wasser – in einem Rohr mit einer Länge L und einem konstanten Innenradius r lässt sich durch die Poiseuille'sche Gleichung beschreiben. Mithilfe der Gleichung lässt sich berechnen, wie viel Volumen eines Fluids in einer bestimmten Zeit fließt. Dabei wird vereinfachend angenommen, die Strömung im Rohr sei laminar, also frei von Turbulenzen. Der Volumenstrom ist neben Länge und Radius des Rohrs von der Viskosität η der Flüssigkeit und dem Druckunterschied Δp am Anfang (p_1) und am Ende (p_2) des Rohrs abhängig. Die Viskosität eines Stoffs ist abhängig von seiner Temperatur und beschreibt, wie dünn- oder zähflüssig ein Stoff ist. Die Viskosität von Wasser mit einer Temperatur von 20 °C beträgt näherungsweise $\eta = 1$.²⁶

Die Formel für den Volumenstrom Q lautet:²⁷

$$Q = \frac{\pi r^4 (p_1 - p_2)}{8\eta L} = \frac{\pi r^4 (\Delta p)}{8\eta L}$$

Aus dem Volumenstrom lässt sich auch die Geschwindigkeit ermitteln mit der ein Fluid fließt. Da mit Q der Volumendurchfluss durch einen bestimmten Querschnitt angegeben wird, folgt:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Für eine Wassersäule in einem Rohr gilt $V = A \cdot s$, wobei s die Länge der Säule ist und A der Querschnitt des Rohrs, beziehungsweise die Grundfläche der Säule. Dann folgt, dass:

$$Q = \frac{A \cdot s}{t} = A \cdot v \Leftrightarrow v = \frac{Q}{A}$$

²⁶ Vgl. Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungstechnik o.J., S. IV-1.

²⁷ Giancoli und Eibl 2015, S. 437 ff.

für Rohre mit gleichbleibender Querschnittsfläche. Bei PSW handelt es sich um Hochdruckkraftwerke, also Kraftwerke mit einer Wasserfallhöhe von 50 m und mehr.²⁸ Durch die große Fallhöhe wird im Verhältnis ein geringerer Durchfluss für den gleichen Energiegewinn benötigt.

4.4 Gleichspannungsquellen und Gleichstromkreise

PSW sind stets Teil eines Stromkreises, variieren aber in ihrer Funktion. Das PSW ist während des Pumpvorgangs selbst als Verbraucher im Stromnetzwerk zu betrachten. Den Strom zum Pumpen liefern fremde Spannungsquellen. Erst beim Abpumpen wechselt das PSW vom Verbraucher zum Erzeuger elektrischer Energie. Sowohl als Verbraucher als auch als Erzeuger kann man das Kraftwerk modellhaft als parallel ins Stromnetzwerk angeschlossen betrachten, ohne dabei Umspannungen und Frequenzrichter mit einzubeziehen. Nach diesem Prinzip wird in folgenden Kapiteln auch im Modell des PSW gearbeitet.

4.4.1 Widerstände und das Ohm'sche Gesetz

Widerstände verringern den Ladungsfluss, der entsteht, wenn ein Spannungspotenzial an einem Leiter anliegt. Dabei beträgt der elektrische Widerstand R genau dann $1\ \Omega$, wenn bei einer angelegten Spannung von $1\ V$ die Stromstärke $1\ A$ beträgt.²⁹ Nach dem Ohm'schen Gesetz steigt bei gleichbleibender Temperatur in einem metallischen Leiter die Stromstärke I proportional zur Spannung U . Es gilt:³⁰

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

4.4.2 Kirchhoff'sche Gesetze

In Schaltkreisen gelten die Kirchhoff'schen Gesetze. Ein Schaltkreis besteht aus Knoten und Maschen. Knoten sind Punkte, an denen mehrere Stromflüsse kreuzen. Das erste Kirchhoff'sche Gesetz (auch Knotenregel genannt) besagt, dass die Summe aller Ströme in einem solchen Knoten gleich null ist, wobei die zuströmenden Ströme positiv und die abfließenden Ströme negativ verrechnet werden.³¹

²⁸Vgl. Giesecke und Mosonyi 2009, S. 111.

²⁹Nach Hering et al. 2017, S. 323.

³⁰Höfling 2017, S. 26.

³¹Nach Hering et al. 2017, S. 327.

$$\sum I_{ges} = 0$$

Als Masche wird ein geschlossener Umlauf innerhalb des Stromkreises bezeichnet. Das zweite Kirchhoff'sche Gesetz (auch Maschenregel genannt) besagt, dass die Summe der Spannungen eines Stromkreises null ergibt, wobei abfallende Spannungen negativ verrechnet werden und die anliegende Spannung positiv:³²

$$\sum U_{ges} = 0$$

Werden Spannungsquellen in Reihe geschaltet, so entspricht die Gesamtspannung demnach der Summe der Teilspannungen, daher gilt für n Spannungsquellen:

$$U_{ges} = \sum U_n \Leftrightarrow 0 = \sum U_n - U_{ges}$$

Der Strom, der durch die einzelnen Teilspannungen fließt, bleibt gleich. So kann die Spannung in einem Stromkreis erhöht werden, ohne die Stromstärke zu beeinflussen.

4.4.3 Helmholtz'sches Superpositionsprinzip

Das Helmholtz'sche Superpositionsprinzip besagt, dass die Stromstärke eines Stromkreises aus der Summe der fließenden Teilströme besteht. Um diese Teilströme zu berechnen, werden aus einem Stromkreis mit mehreren Spannungsquellen die Teilströme für jede Spannungsquelle so berechnet, als seien die anderen Spannungsquellen kurzgeschlossen (ihr Widerstand bleibt erhalten). Es gilt für die Gesamtstromstärke in einem Schaltkreis mit n Spannungsquellen:³³

$$I_{ges} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

4.5 Generatoren

Generatoren wandeln Bewegungsenergie in elektrische Energie um und bilden damit das genaue Gegenteil zu elektrischen Motoren.³⁴ Moderne Generatoren greifen dabei in der Regel auf das Faraday'sche Gesetz zurück. Demnach wird einer Leiterschleife mit Fläche A eine Spannung induziert, wenn sie sich durch

³² Nach Hering et al. 2017, S. 328.

³³ Nach Hering et al. 2017, S. 332.

³⁴ Vgl. Giancoli und Eibl 2015, S. 990.

ein Magnetfeld mit der magnetischen Flussdichte B bewegt. Dabei ist die Änderung des magnetischen Flusses $\Delta\Phi$. Eine Spule mit N Windungen kann dabei als N Schleifen betrachtet werden. Es gilt:³⁵

$$U_{ind} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -N \left(A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} + B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t} \right)$$

Einfache Generatoren bestehen meistens aus einer Spule, welche angetrieben von einem mechanischen Einfluss, beispielsweise einer Kurbel, in einem Magnetfeld rotiert wird. Da es lediglich auf eine relative Bewegung zwischen Spule und Magnetfeld ankommt gibt es auch Generatoren, bei denen sich der Magnet in einer Spule dreht. In einem Drehstromgenerator dreht sich ein Elektromagnet an einem Rotor in einem runden Gehäuse (Stator), in welchem drei um 120° versetzte Spulenpakete angebracht sind.

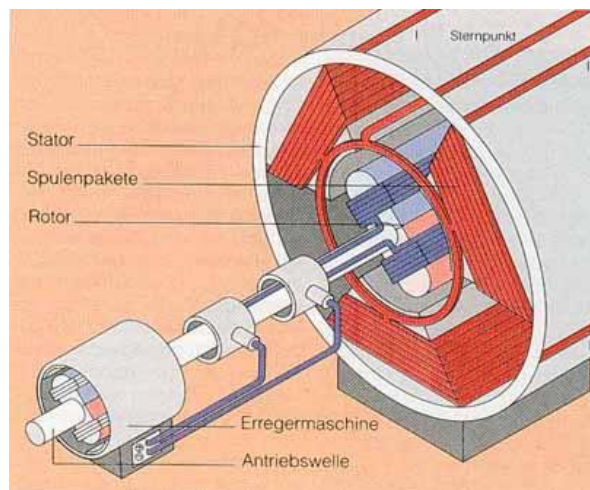


Abbildung 7: Schematischer Aufbau eines Drehstromgenerators³⁶

So erfährt jedes Spulenpaket bei einer Umdrehung die maximale Magnetfeldänderung, die jedoch zeitlich versetzt wirkt. Es werden drei zueinander phasenverschobene Spannungen erzeugt. Dieser dreiphasige Strom wird als Drehstrom bezeichnet. Die Stromversorgung im deutschen Niederspannungsnetz erfolgt ebenfalls als Drehstrom mit 230 V Netzspannung. Die Synchronmaschinen der PSW sind hochspezialisierte Drehstromgeneratoren. Als solche werden sie häufig in Kraftwerken eingesetzt.³⁷ Ihren Namen Synchronmaschine verdanken sie ihrer

³⁵ Nach Höfling 2017, S. 37.

³⁶ Leuschner o.J.

³⁷ Vgl. Spring 2009, S. 327.

Eigenschaft, dass Rotordrehzahl und Drehfelddrehzahl stets übereinstimmen, also synchron sind.³⁸

4.6 Transformatoren

Der Transformator ist ein elektrisches Bauteil, welches verwendet wird, um Spannungen zu ändern. Entsprechend findet man sie in Umspannungswerken. Bei den PSW Waldeck ist ein solches Umspannungswerk notwendig, um die Spannungen, welche die Kraftwerke generieren, an die Netzspannung zu transformieren. Dabei werden für das Übertragungsnetz 220 oder 380 kV Spannung verwendet (vgl. Abbildung 8). Die 15,75 kV des PSW Waldeck II müssen also erhöht werden, bevor sie in dieses Netz eingespeist werden können.

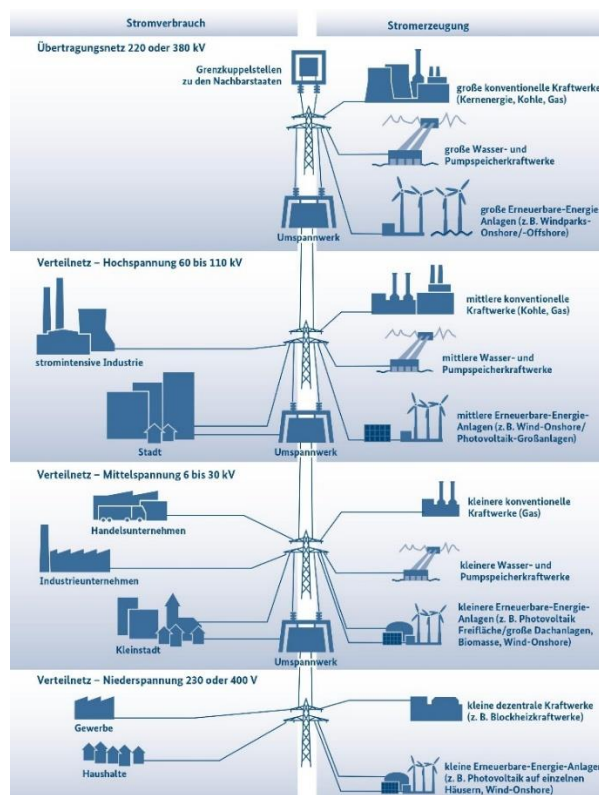


Abbildung 8: Das deutsche Stromnetz³⁹

An einer Spule, der Primärspule, wird eine Wechselspannung U_P angelegt, wodurch ein sich änderndes Magnetfeld um die Spule aufgebaut wird. Die Spule wird so zu einem Elektromagneten mit wechselndem Magnetfeld. Eine zweite

³⁸ Vgl. Spring 2009, S. 332.

³⁹ BMWi 2012.

Spule, die Sekundärspule, wird in dieses Magnetfeld gebracht. Durch das wechselnde Magnetfeld wird dieser eine Spannung U_I induziert. Bei verlustfreier Arbeit gilt:⁴⁰

$$U_P \cdot I_P \cdot \cos \varphi_P = U_S \cdot I_S \cdot \cos \varphi_S$$

wobei φ gleich der Phasenverschiebung zwischen Spannung und Stromstärke. Im idealisierten Fall soll $\varphi_P = \varphi_S$ sein, also die Magnetfeldänderung an der Primärspule unmittelbar auf die Sekundärspule wirken. Es gilt dann mit Verwendung des Induktionsgesetzes:

$$U_P = -N \frac{\Delta \Phi_P}{\Delta t}, U_S = -N \frac{\Delta \Phi_S}{\Delta t} \text{ mit } \frac{\Delta \Phi_P}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi_S}{\Delta t} \Rightarrow \frac{U_P}{U_S} = \frac{N_P}{N_S}$$

Die Umspannung verhält sich also proportional zu dem Verhältnis der Windungszahlen der Primär- und der Sekundärspule.

In der Realität geht ein Teil der elektrischen Leistung verloren. Wicklungen erzeugen Widerstände, Wirbelströme erzeugen Wärmeleistung und treten als solche aus dem Stromkreislauf aus und nicht der gesamte magnetische Fluss durchdringt die Sekundärspule. Mit Kernen aus ferromagnetischen Materialien kann der Wirkungsgrad erhöht werden.

⁴⁰ Höfling 2017, S. 42.

5 Didaktische Grundlagen

5.1 Außerschulische Lernorte

Die Schule ist sicherlich eine der ersten Institutionen, die mit Bildung und Lernen in Verbindung gebracht werden, denn Schule ist der Ort, an dem, zeitlich und räumlich abgetrennt, der gesellschaftliche Auftrag zur Allgemeinbildung erfüllt werden soll.⁴¹ Gleichzeitig soll das vermittelte Wissen dazu dienen, Anschluss außerhalb dieser Institution und auch außerhalb anderer lernorientierter Institutionen zu finden. Modellierungs- und Anwendungsaufgaben können innerhalb der schulischen Grenzen einen Ausblick schaffen, brechen aber nicht aus dem Handlungsfeld Schule aus.

Doch sowohl historisch durchgängig als auch aktuell werden im theoretischen sowie im praxisorientierten Diskurs in der Schulpädagogik Forderung nach „Lebensnähe“ und einem Bezug zur Lebens- bzw. Alltagswelt laut. Zur Realisierung dieser Forderung können außerschulische Lernorte entscheidend beitragen, weshalb sie eine lange Tradition in der Didaktik haben. Forschungsergebnisse aus den Bereichen der Bildungstheorie, Allgemeindidaktik sowie der Lern- und Sozialisationstheorie belegen die Bedeutung des außerschulischen Lernens. Daher ist das außerschulische Lernen – obwohl bislang keine schulpädagogisch fundierte, umfassende Didaktik außerschulischer Lernorte vorliegt – essenzieller Bestandteil vieler reformpädagogischer Konzepte. Lernen findet hier auch außerhalb des Schulgebäudes, aber dennoch im Rahmen des schulischen Bildungs- und Erziehungsauftrages statt.⁴²

Die Forderung nach der Einbeziehung der Lebensrealität in den Unterricht lässt sich lerntheoretisch begründen, zum Beispiel in der Forderung nach authentischen Sinn- und Motivationszusammenhängen für das Lernen und nach Interessensförderung.⁴³ Diese Forderungen begründen, weshalb der Einsatz außerschulischer Lehr- und Lernmethoden insbesondere für den Bereich der Naturwissenschaften, genauer für die Physik, relevant ist: Studien zeigen, dass das Interesse an Physik, vor allem im Laufe der Sekundarstufe I, kontinuierlich abnimmt.⁴⁴ Die sukzessive schwindende Motivation, gepaart mit den nur durchschnittlichen

⁴¹ Vgl. Baar und Schönknecht 2018, S. 11.

⁴² Vgl. Baar und Schönknecht 2018, S. 9.

⁴³ Vgl. Baar und Schönknecht 2018, S. 9.

⁴⁴ Vgl. Hoffmann et al. 1998; Guderian 2006, S. 52.

Ergebnissen deutscher Schülerinnen und Schüler in internationalen Vergleichsstudien, resultiert in vielfältigen Initiativen für den Einsatz außerschulischer Lernmethoden. Sie haben, sowie das im Rahmen der vorliegenden Arbeit konzipierte Modell, das Ziel, dem schwindenden Interesse an Physik entgegenzutreten und so neben der Schule einen Beitrag zur naturwissenschaftlichen Grundbildung der Schülerinnen und Schüler zu leisten.⁴⁵

5.1.1 Informelles Lernen

Wellington beschreibt die Lernformen des informellen Lernens und des formellen Lernens.⁴⁶ Das informelle Lernen zeichnet sich dabei vor allem durch außerschulische Aktivitäten aus, in denen etwas gelernt wird.⁴⁷ Dabei treten vier verschiedene Arten des informellen Lernens auf.⁴⁸ Zum einen besteht die Möglichkeit sich bewusst für einen Lernort zu entscheiden, um dort etwas dem Lernort Spezifisches zu erfahren – zum Beispiel beim Besuch eines Museums. Es entsteht eine bewusste Begegnung mit einer beabsichtigten Quelle. Eine andere Möglichkeit ist das unbeabsichtigte Lernen mit einer beabsichtigten Quelle. Als Beispiel kann ein Unterhaltungsfilm auf historischen Tatsachen beruhen. Eine bewusste Begegnung mit unbeabsichtigter Quelle entsteht beim Fußballspiel, wenn der Ball in bestimmten Winkeln geschossen wird, um seine Flugbahn zu beeinflussen. Eine unbeabsichtigte Lernerfahrung mit unbeabsichtigter Quelle entsteht, wenn man sich versehentlich mit einem Messer schneidet. Diese vier Arten des Lernens lassen sich als Vierfeldertafel darstellen, um das informelle Lernen einordnen zu können (Tabelle 1).

Unbewusste Begegnung mit unbeabsichtigten Quellen	Bewusste Begegnung mit beabsichtigten Quellen
Unbewusste Begegnung mit beabsichtigten Quellen	Bewusste Begegnung mit unbeabsichtigten Quellen

Tabelle 1: Einteilung des informellen Lernens⁴⁹

⁴⁵ Vgl. Guderian 2006, S. ii.

⁴⁶ Vgl. Wellington 1990.

⁴⁷ Vgl. Guderian 2006, S. 7.

⁴⁸ Nach Lucas 1983.

⁴⁹ Guderian 2006, S. 8 nach Lucas 1983.

„Dem informellen Lernen steht das formelle Lernen in der Schule gegenüber.“⁵⁰ Entsprechend hoch ist der Anteil des informellen Lernens an außerschulischen Lernorten gegenüber dem innerschulischen Lernen, wobei sowohl die Art der Lernquelle, als auch die Lernart an beiden Lernorten schwimmen können. Deutlich wird dies am Beispiel eines Ausflugs innerhalb eines Ferienlagers. Das Ferienlager selbst ist als Lernort (ob bewusst oder unbewusst) frei gewählt. Dennoch werden häufig verpflichtende Programmpunkte gesetzt. Projektarbeit in Schulen kann auf der anderen Seite informelles Lernen fördern.

5.1.2 Lernziele am außerschulischen Lernort

Das freie Lernen an einem außerschulischen Lernort unterscheidet sich stark von dem in der Schule. Es ist eben wegen der Freiheit, die Lerninhalte wählen zu können, unstrukturiert. Zudem können didaktische Konzepte wie die Sicherungen des Lerninhalts oder der strukturelle Aufbau von Grundwissen nicht angenommen werden, sofern sie überhaupt vorhanden sind. Wellington beschreibt, wie Eltern, welche ihre Kinder in einem Science Center beobachten, der Meinung sind, diese seien am Spielen und können deshalb nichts lernen.⁵¹ Auch Griffin beschreibt, wie Lernende sich beim Umsehen oder Beobachten selbst nicht als Lernende wahrnehmen, weil sie nicht mit Stift und Papier arbeiten.⁵²

Er wird deutlich, dass Lernerfahrungen eher dann als solche reflektiert werden, wenn sie dem formellen Lernen an Schulen gleichen. Außerschulische Lernorte bieten andere Lernerfahrungen und setzen somit andere Lernziele voraus. Diese lassen sich in kognitive, affektive und psychomotorische Lernziele unterteilen (vgl. Tabelle 2). Das kognitive Wissen entspricht im Wesentlichen den klassischen Lernzielen der Schulbildung. Die Lernenden sollen einen Sachverhalt verstehen und diesen erkennen, erklären und begründen können. Entsprechend erinnern Herangehensweisen, um diese Ziele zu überprüfen, oft an schulischen Unterricht. Angeleitete Experimente können dazu beitragen, einen Sachverhalt genauer zu verstehen und zielen dabei auf den Wissenserwerb von Fachwissen. Im Umkehrschluss lassen sich kognitive Lernziele auch relativ einfach über formelle Wissensabfragen überprüfen.⁵³

⁵⁰ Guderian 2006, S. 9.

⁵¹ Vgl. Wellington 1990, S. 249.

⁵² Vgl. Griffin, S. 124.

⁵³ Guderian 2006, S. 11–12.

kognitiv	affektiv	psychomotorisch
Wissen, dass Wissen, wie Wissen, warum Verstehen	Interesse, Enthusiasmus, Einstellung Motivation, Beteiligung Lerneifer Bewusstsein und Offenheit	manipulative Fähigkeiten Geschicklichkeit Hand-Auge-Koordination

Tabelle 2: Lernziele des informellen Lernens im Überblick⁵⁴

Das Erreichen affektiver Lernziele lässt sich vergleichsweise weniger konkret planen. Es ist klar, dass innerhalb einer Lerneinheit mit mehreren Teilnehmenden unterschiedliche Faktoren motivierend wirken können und abhängig vom Vorwissen der Individuen variiert auch ihr Interesse und die Offenheit für Themen. Dabei kommt dem außerschulischen Lernort hoffentlich zugute, dass Situationen, in denen Lernende sich selbst als solche nicht beschreiben, dazu führen könnten, Self-Handicapping zu reduzieren. Dieser Begriff meint, dass Lernende ihre Bereitschaft sich mit einer Thematik zu beschäftigen, reduzieren, wenn sie mit einem ähnlichen Thema bereits negative Erfahrungen verbinden. In einer Situation, in der diese Thematik aus einer anderen Perspektive behandelt wird, könnte diese Bereitschaft größer sein.⁵⁵ Dennoch scheint das Erreichen der Lernziele auch an Eigenverantwortlichkeit und Selbstbestimmung gebunden zu sein.⁵⁶

Psychomotorische Lernziele lassen sich nur durch Handlungen erreichen. Dazu können an außerschulischen Lernorten Workshops durchgeführt werden. Alternativ verbessern Lernende ihre Fähigkeiten durch selbstständiges Beschäftigen mit Modellen und Experimenten.

5.2 Modelle und Experimente

Erkenntnisse in der Wissenschaft aggregieren sich in Theorien und Modellen. Sowohl Theorien als auch Modelle haben zum Ziel, beobachtete Phänomene zu beschreiben und zu erklären sowie Vorhersagen über das beobachtete Verhalten zu formulieren. Theoretische Überlegungen oder neue Modellierungen werden

⁵⁴ Guderian 2006, S. 12; Wellington 1990.

⁵⁵ Spinath et al. 2018, S. 53–63.

⁵⁶ Vgl. Guderian 2006, S. 13.

dabei mithilfe von Experimenten überprüft bzw. angestoßen.⁵⁷ In den Naturwissenschaften werden Modelle als Werkzeuge eingesetzt, um spezifische Aussagen über ein bestimmtes natürliches oder technisches Phänomen treffen zu können.⁵⁸ Modelle in der Physik sind ideelle (gedankliche) oder – wie im Falle des vorliegenden Modells – materielle (gegenständliche) Objekte, die als Ersatzobjekt für ein Original genutzt werden. Es handelt sich um eine Vereinfachung des Originals und damit der Wirklichkeit. Beispiele für Modelle sind das Modell Feldlinienbild, Atommodelle, das Teilchenmodell oder Modelle von technischen Geräten.⁵⁹ Entsprechend wird ein Modell als geeignet betrachtet, um die Wirkungsweise von PSW zu untersuchen.

Modelle sind seit vielen Jahren Gegenstand naturwissenschaftsdidaktischer Forschung.⁶⁰ Im schulischen Kontext wird die Beschäftigung mit Modellen mit dem Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung verbunden,⁶¹ welcher seit einigen Jahren explizit Gegenstand des Physikunterrichts an deutschen Schulen ist.⁶²

In Form von Modellen werden im Rahmen des Physikunterrichts naturwissenschaftliche und technische Phänomene und Theorien veranschaulicht sowie überprüft und Experimente an ihnen durchgeführt, um das Lehren und Lernen der Inhalte zu unterstützen.⁶³ Experimente werden dabei als wiederholbares, objektives, das heißt vom Durchführenden unabhängiges Verfahren zur Erkenntnisgewinnung verstanden. Unter festgelegten und kontrollierbaren Rahmenbedingungen werden Beobachtungen und Messungen an physikalischen Prozessen und Objekten durchgeführt. Dabei werden die Variablen systematisch verändert und Daten gesammelt. Experimente verlangen umfassende Planung, eine genaue Kontrolle relevanter Variablen, eine präzise Datenaufnahme, die Analyse der Messwerte sowie ihre physikalische Interpretation vor einem theoretischen Hintergrund. Experimente und Modelle können eine Behandlung der Physik aus didaktischer Sicht auf verschiedenen Verständnisebenen unterstützen.⁶⁴

⁵⁷ Vgl. Bailer-Jones 2002; Winkelmann 2019, S. 227.

⁵⁸ Vgl. Wagner 2017, S. 25.

⁵⁹ Vgl. Duden Lernattack GmbH 2021.

⁶⁰ Vgl. Winkelmann 2019, S. 228.

⁶¹ Vgl. Allchin 2011; Irzik und Nola 2011; Winkelmann 2019, S. 227.

⁶² Vgl. Hessisches Kultusministerium 2021b.

⁶³ Vgl. Wiesner et al. 2018, S. 106.

⁶⁴ Vgl. Girwidz 2020, 164 f.

1. sie zeigen auf der phänomenologischen Ebene, „was geschehen kann“,
2. sie zeigen auf dem Weg zu einem tieferen Verständnis Gesetzmäßigkeiten auf und können Zusammenhänge quantitativ erfassen und
3. sie helfen, physikalische Theorien zu prüfen und gegebenenfalls zu verifizieren.

An dem in dieser Ausarbeitung entworfenen Modell sollen Lernende sogenannte Simulationsexperimente durchführen. Dabei werden wesentliche Teile eines physikalischen-technischen Systems im Rahmen eines Modells nachgebildet. Die in den folgenden Kapiteln dargestellten Gestaltungselemente des Modells (Größe, Vereinfachungen, ...) machen dabei die relevanten physikalischen Prinzipien leichter erfassbar im Vergleich zu den komplexen, realen Systemen eines PSW.⁶⁵ Dabei sollen auch die informellen Lernziele Berücksichtigung finden.

5.3 Berufsorientierung in Schule und Freizeit

Die Erwartungen an Schulen, eine gleichermaßen systematische und kompetenzorientierte, praxisbezogene Berufsorientierung durchzuführen, haben in den letzten Jahren erheblich zugenommen.⁶⁶ Der Arbeitsmarkt verändert sich kontinuierlich und es entstehen neue Berufsfelder, Studiengänge und Abschlüsse. Fehlentscheidungen in Bezug auf die Berufswahl können bei jungen Menschen zu Unzufriedenheit, Frustration und zum Abbruch der Ausbildung oder des Studiums führen. Daher ist es wichtig Schülerinnen und Schüler während der Schulzeit bei ihrer Orientierung zu unterstützen und sie möglichst umfassend auf den Übergang in eine berufliche Ausbildung oder ein Studium vorzubereiten.⁶⁷ Die Schülerinnen und Schüler müssen am Ende der schulischen Laufbahn in der Lage sein, eine ihren Kompetenzen entsprechende fundierte Entscheidung bezüglich ihrer Berufs- oder Studienwahl zu treffen und die dann an sie gestellten Anforderungen bewältigen. Damit die notwendigen fachlichen und überfachlichen Kompetenzen erworben werden können, muss die Schule spätestens mit dem Eintritt in die Sekundarstufe I über beruflichen Möglichkeiten informieren.⁶⁸ Es existiert aktuell eine große Vielfalt von Initiativen, Schülerinnen und Schüler gezielt an die Arbeitswelt heranzuführen und auf die Anforderungen der

⁶⁵ Vgl. Girwidz 2020, S. 272.

⁶⁶ Vgl. Bundesagentur für Arbeit o.J., S. 2.

⁶⁷ Vgl. Hammer et al. 2019; Hessisches Kultusministerium 2021a.

⁶⁸ Vgl. Hessisches Kultusministerium 2021a.

Berufsausbildung und Erwerbsarbeit vorzubereiten. Eine frühzeitige Berufsorientierung liegt dabei nicht zuletzt auch im Interesse von Politik und Unternehmen, um frühzeitig einem drohenden Fachkräftemangel, vor allem in handwerklich-technischen Berufen, vorzubeugen.⁶⁹ Möglichkeiten der praxisnahen Berufsorientierung stellen praxisbezogene Projektarbeiten und Workshops oder erlebnispädagogische Angebote, zum Beispiel in Form von Lern-Camps, an außerschulischen Lernorten dar.⁷⁰ Bei diesen Formen der Berufsorientierung bietet das Lernen durch praktische Erfahrungen große Chancen für die Entwicklung von Kompetenz und persönlicher Identität. Der erlebbare Arbeitsprozess stellt konkrete Anforderungen an junge Menschen, die es zu bewältigen gilt. Dazu gehören beispielsweise Erfahrungen mit Arbeitsgegenständen, mit Arbeitsorganisation oder sozialen Prozessen.⁷¹ Ein Beispiel für eine praxisnahe Form der Berufsorientierung ist das Boom-Camp – einer Initiative von Provadis, CSCP und der Sportjugend Hessen, welche durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und den Europäischen Sozialfonds gefördert wird – in dessen Rahmen jungen Menschen Einblicke in die Welt der handwerklichen und technischen Berufe erhalten (siehe Kapitel 7.1).⁷²

⁶⁹ Vgl. Lippegaus-Grünau et al. 2010, S. 7.

⁷⁰ Vgl. Hessisches Kultusministerium 2021a; Lippegaus-Grünau et al. 2010, S. 115.

⁷¹ Vgl. Lippegaus-Grünau et al. 2010, S. 20.

⁷² Vgl. Provadis Partner für Bildung und Beratung GmbH 2020b.

6 Modell zum Pumpspeicherkraftwerk

Das primäre Ziel bei der Entwicklung des Modells ist die Generierung eines ausreichend starken Stroms, sodass seine Visualisierung möglich ist. Gleichzeitig soll das Modell eine gewisse räumliche Größe nicht überschreiten. Zudem sollen Jugendliche mit dem Modell arbeiten, weshalb Spannungen von mehr als 25 V vermieden werden sollten.⁷³ Grundsätzlich benötigt das Modell ein Speicherbecken, ein Fallrohr, einen Generator und eine Pumpe. Zur Visualisierung des generierten Stroms sollen LEDs aufleuchten. Da das Generieren einer Spannung die technisch anspruchsvollste Komponente darstellt, bietet es sich an, das restliche Modell um dieses Bauteil herum zu entwickeln. Im Folgenden werden die Wahl der einzelnen Komponenten und die Testungen dieser – im Hinblick auf ihre Funktionalität im Modell sowie im didaktischen Sinne – dargestellt.

6.1 Material für das Modell

6.1.1 Wahl des Generators



Abbildung 9: Generator von Yosoo⁷⁴

Eine gewisse Höhe ist für das Modell eines Hochdruckkraftwerks unumgänglich. Zunächst wurde eine Zielhöhe von nicht mehr als 5 m festgelegt. Daraus resultiert, dass das Wasser 5 m über dem Generator steht und für einen ungefähren hydraulischen Druck $p = 5 \cdot 0,1\text{bar} = 0,5\text{bar} = 0,05\text{MPa}$ sorgt. Der für das Modell gewählten Wasserturbine von Yosoo reichen laut Hersteller 0,05 MPa aus, um Strom zu erzeugen. Laut Angaben generiert sie einen Gleichstrom mit maximal 12 V bei einer Leistung von bis zu 10 W (siehe Abb.).⁷⁵ Dieser recht kleine Strom gewährleistet ein sicheres Arbeiten mit jungen Lernenden.

⁷³ Benzler et al. 2019.

⁷⁴ Eigene Abbildung (Aufgenommen am 26.04.2021).

⁷⁵ Vgl. Yosoo 2021.

Abhängig von der Leistung des Generators bei minimalem Startdruck, können einige LEDs betrieben werden, um die Spannung zu visualisieren.

6.1.2 Wahl der Pumpe

Anders als bei den PSW Waldeck I und II soll das Modell nicht mit der Turbine pumpen können, sondern eine Pumpe verwenden die ausschließlich pumpt. Da das Modell im Verhältnis sehr klein gehalten ist, bietet es sich an, Bauteile mit hoher Spezialisierung zu verwenden. Dies ermöglicht die Minimierung der Energieabgänge aus dem System, welche, im Verhältnis und mit nicht speziell auf Pumpspeicherkraftwerke optimierten Bauteilen, sehr groß ausfallen können. Eine Herausforderung bei der Wahl der Pumpe besteht in der Bewältigung der festgelegten Förderhöhe von 5 m unter Einsatz möglichst geringer Leistung.



Abbildung 10: Wasserpumpe von HSeaMall⁷⁶

Die Mini-Tauchpumpe von HSeaMall (Abbildung 10) läuft laut Hersteller bei einer Gleichspannung von 12 V mit 920 mA (entspricht etwa 11 W) und fördert auf eine Höhe von $5 \text{ m} \pm 10 \%$.⁷⁷ Damit erfüllt sie laut Angaben nicht nur die nötige Voraussetzung in Bezug auf die Förderhöhe, sondern benötigt auch einen genügend kleinen Strom, um mit Akkus, kostengünstigen Solarpanelen und anderen kleinen Spannungsquellen betrieben zu werden.

6.1.3 Spannungsquellen für die Pumpe

Für den Betrieb der Pumpe, sollen verschiedene Spannungsquellen getestet werden. Eine leicht verfügbare Spannungsquelle sind Akkus und Batterien. Drei in

⁷⁶ Eigene Abbildung (Aufgenommen am 26.04.2021).

⁷⁷ Vgl. HSeaMall 2021.

Reihe geschaltete Blockbatterien mit 4,5 V Spannung oder eine 12 V Batterie sollen das Modell an jedem Ort betreiben können. Eine andere Stromquelle soll ein Solarpanel sein. Dieses liefert laut Herstellerangabe bis zu 10 W Leistung bei einer Spannung von 12 V.⁷⁸ Die Wahl für Solarmodule begründet sich aus dem Zusammenspiel von PSW mit Solarstrom. Abbildung 11 zeigt deutlich, dass PSW vor allem in den frühen Morgen- und den Abendstunden zur Stromerzeugung genutzt werden, also immer dann, wenn die Stromerzeugung durch Solarenergie noch nicht ausreicht.

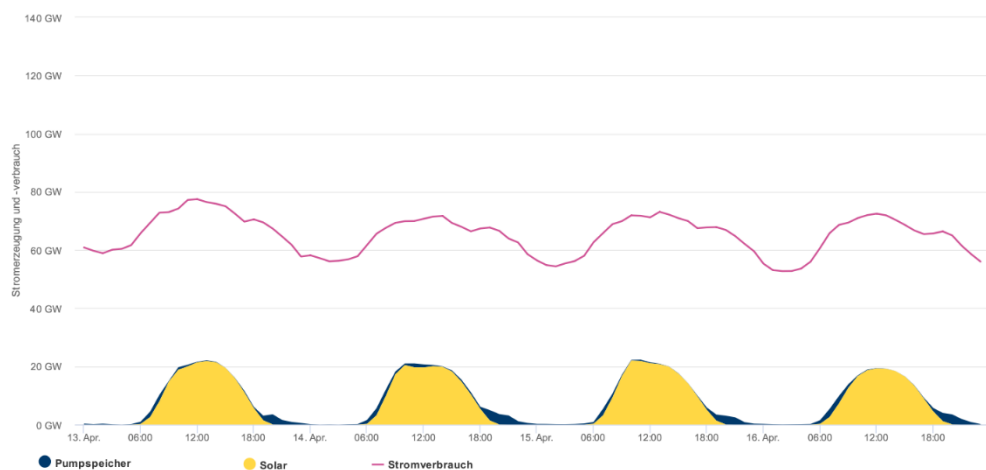


Abbildung 11: Stromerzeugung durch Solarenergie und PSW in Abhängigkeit zur Tageszeit und im Vergleich zum Stromverbrauch in Deutschland vom 13.04.-16.04.2021⁷⁹

6.1.4 Sonstige Bauteile

Jedes PSW benötigt ein Speicherbecken. Dieses wird im vorliegenden Modell durch einen Aufbewahrungsbehälter aus Kunststoff simuliert. Die Maße betragen etwa 30 cm in der Höhe, 30 cm in der Breite und 50 cm in der Tiefe. Damit hat das Behältnis ein Volumen von 45 l. Ein baugleicher Behälter soll als Auffangbecken dienen. Sowohl an die Pumpe als auch an den Generator können handelsübliche Gartenschläuche mit einem Durchmesser von 13 cm angeschlossen werden (entspricht 1/2 Zoll). Hierfür werden jeweils zwei Hahnverbinder (Innendurchmesser 10 mm) und zwei Schlauchverbinder benötigt.

Um die Pumpe sowie den Generator flexibel nutzen und anschließen zu können, sind Stromkabel nötig. Sowohl Generator als auch Pumpe weisen bereits rote

⁷⁸ Vgl. enjoysolar 2021.

⁷⁹ Nach Agora Energiewende 2021.

und schwarze Kabel für die Kennzeichnung der Stromflussrichtung auf. Mit dieser Kennzeichnung wird aus Gründen der Praktikabilität weitergearbeitet.

6.2 Testung der technischen Bauteile

Generator und Pumpe werden zunächst modellunabhängig einzeln getestet, um anschließend weitergehende Bauteiltests innerhalb des Modells durchführen zu können.

Die Pumpe wird in einem Waschbecken platziert und mit Wasser überdeckt. Anschließend wird sie an drei in Reihe geschaltete 4,5 V-Batterien angeschlossen. Sie startet sofort mit dem Pumpvorgang und erzeugt eine kleine Fontäne im Waschbecken (Abbildung 12).



Abbildung 12: Wasserpumpe erzeugt eine Fontäne.⁸⁰

Auch der Generator wird in einem Waschbecken getestet. Er wird an einen Schlauch am Ende des Wasserhahns gehalten. An die Kabel wird eine weiße LED angeschlossen. Der Wasserhahn wird aufgedreht. Die LED beginnt hell zu leuchten, während das Wasser durch die Turbine strömt (Abbildung 13).

⁸⁰ Eigene Abbildung (Aufgenommen am 26.04.2021).



Abbildung 13: Generator bringt LED zum Leuchten.⁸¹

Anschließend sollen beide Komponenten im Modell getestet werden. Zu diesem Zweck wird das Auffangbecken am unteren Ende einer Treppe und das Speicherbecken (hier anderer Behälter mit ähnlichem Volumen) am oberen Ende der Treppe platziert. Der Höhenunterschied der beiden Becken beträgt 4 m. Ein kurzes Schlauchstück (etwa 20 cm Länge) wird an den Ausgang des Generators angeschlossen und in das Auffangbecken platziert. Am anderen Ende wird ein Schlauch mit etwa 12 m Länge angeschlossen und Treppe aufwärts in das Speicherbecken gelegt. Ein Stopfen am oberen Ende des Schlauchs verhindert zunächst den Wasserdurchfluss (Abbildung 14).



Abbildung 14: Aufbau des Modellprototyps aus Sicht des Speicherbeckens im Treppenhaus des Instituts für Didaktik der Physik (IDP) Frankfurt.⁸²

⁸¹ Eigene Abbildung (Aufgenommen am 10.05.2021).

⁸² Eigene Abbildung (Aufgenommen am 16.05.2021).

Das Speicherbecken wird mit Hilfe einer Gießkanne gefüllt. Zunächst wird der Kurzschlussstrom des Generators ermittelt. Mithilfe eines an den Generator angeschlossenen Messgeräts wird zunächst der Kurzschlussstrom des Generators gemessen. Es lässt sich unter genannten Voraussetzungen eine Spannung von 12 V bei einer Stromstärke von 40 mA messen. Es ergibt sich eine Kurzschlussleistung von 0,48 W. In einem nächsten Schritt wird das Messgerät durch eine weiße LED ausgetauscht und der Versuch wiederholt. Die weiße LED leuchtet hell. Der Versuch wird ein weiteres Mal mit einer 6 V-Glühlampe mit einer Leistungsaufnahme von 0,6 W durchgeführt. Die Glühbirne leuchtet nicht auf. Folglich bietet es sich an bei der weiteren Entwicklung des Modells ausschließlich auf LEDs zu setzen und zu testen, wie viele LEDs betrieben werden können. Der Generator wird gegen die Pumpe ausgetauscht, welche an eine verstellbare Spannungsquelle mit Messgerät für Stromstärke angeschlossen wird. Das Wasser befindet sich zum Großteil im Auffangbehälter. Um ein Leerlaufen der Pumpe zu vermeiden, wird sie vorm Anschließen getunkt, unter Wasser angeschlossen und der Ansaugschlauch mit einem Stopfen verschlossen, bevor die Pumpe wieder aus dem Wasser genommen wird. Die Spannungsquelle wird auf 12 V eingestellt und gestartet. Zeitgleich wird der Stopfen gezogen. Die Leistung der Pumpe reicht aus, um das Wasser über die 4 m Höhenunterschied in das Speicherbecken zu pumpen. Dafür wird eine Stromstärke von 1,3 A also eine Leistung von 14,4 W benötigt. Es ist davon auszugehen, dass das Solarpanel mit 10 W Leistung nicht ausreichend sein kann, um die Pumpe zu betreiben. Tatsächlich springt die Pumpe beim Versuch sie bei wolkenlosem Himmel mit dem 12 V 10 W Solarmodul zu betreiben nicht an und gibt lediglich ein leises Pfeifen von sich. Die Leistung des Solarmoduls muss also gesteigert werden.

Der Einsatz eines Kurbelgenerators zum Betreiben der Pumpe soll die Leistung dieser physisch spürbar machen. Dafür wird er anstelle der Spannungsquelle eingesetzt und der Pumpversuch wird wiederholt. Die Kurbel erfährt keinen nennenswerten Widerstand und so muss versucht werden möglichst schnell an der Kurbel zu drehen, um die nötige Leistung zu erzeugen. Zwei Probleme machen sich bemerkbar: Zum einen reicht die Kurbelgeschwindigkeit eines erwachsenen Mannes nicht aus, um die Pumpe anzutreiben. Zum anderen ist die Geschwindigkeit nur für einen sehr kurzen Zeitraum aufrecht zu erhalten. Für einen Modellversuch, welcher anschließend mit Jugendlichen durchgeführt werden soll,

muss demnach entweder eine Kurbel mit sehr viel höherer Übersetzung eingesetzt, oder dieser Teil des Versuchs als nicht durchführbar akzeptiert werden. Bei der Handkurbel des IDP handelt es sich bereits um eine sehr gute Kurbel mit starker Übersetzung, weshalb die Entwicklung einer geeigneten Kurbel im Rahmen dieser Arbeit nicht sinnvoll scheint. Stattdessen sollen Alternativen identifiziert werden, welche eine ähnliche didaktische Wirkung erzielen.

6.3 Stromabnehmer im Modell

Verbraucher des generierten Stroms sollen im vorliegenden Modell durch LEDs dargestellt werden, da der eingesetzte Generator LEDs betreiben kann. Dazu werden weiße LEDs mit einer Nennspannung von 3,2 V bei einer Stromstärke von 20 mA verwendet. LEDs haben selbst nahezu keinen Widerstand. Um diese sicher zu betreiben, soll ein Vorwiderstand mit verbaut werden. Der Vorwiderstand R berechnet sich durch $R_{vor} = \frac{U_{gen} - U_{LED}}{I_{LED}} = 440 \, \Omega$. Alternativ können auch zwei oder drei LEDs in Reihe geschaltet werden, um weniger Widerstände für mehr LEDs verwenden zu müssen (vier sind theoretisch nicht möglich da über ihnen eine Spannung von über 12 V abfällt). Bei zwei LEDs errechnet sich ein Vorwiderstand von 280 Ω . So kann mit jeweils einem 330 Ω Widerstand für je zwei LEDs gearbeitet werden.

6.4 Verbesserungen nach dem ersten Modelltestlauf

Da der Aufbau anlehnd an Waldeck II Pumpe und Turbine voneinander trennt und das Unterbrechen des Wasserflusses mit Hilfe von Stopfen aufwendig und langsam ist, wird ein Verteiler mit Sperren in den Wasserlauf integriert. So können außerdem die Pumpe und die Turbine gleichzeitig angeschlossen sein, was ein Umstecken der Bauteile umgeht und zudem der Bauweise des PSW Waldeck II nahekommt.

In einem zweiten Test mit Solarmodulen wird ein Solarmodul mit 12 V 20 W bei freiem Himmel angeschlossen. Wieder reicht der generierte Strom nicht aus, um die Pumpe zu starten. Daher wird ein baugleiches Solarpanel parallel zum ersten angeschlossen (Abbildung 15). Die Pumpe läuft nun auch mit Solarenergie. Dabei sei angemerkt, dass die Pumpe beim Testlauf im IDP die Förderhöhe von 4 m bei einer Spannung von 12 V und einer Stromstärke von 1 A überwand. Im Test mit den Solarmodulen erreichten diese eine Spannung von etwa 13 V

bei einer Stromstärke von etwa 0,17 A und die Pumpe damit eine Förderhöhe von etwa 2 m.

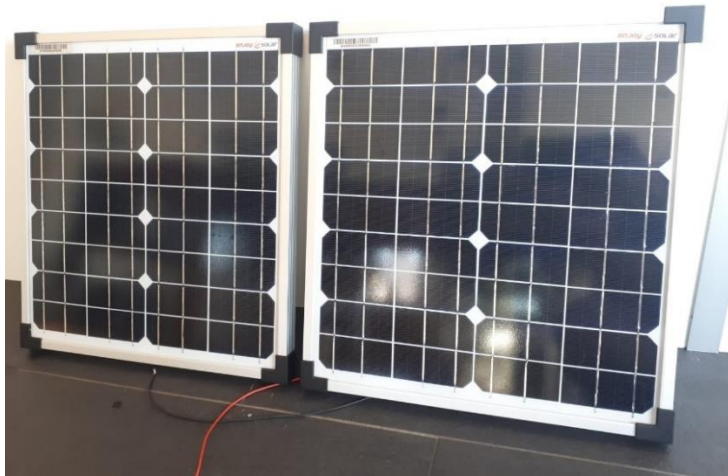


Abbildung 15: Solarmodule von enjoysolar⁸³

6.5 Das Modell zum PSW

Das fertige Modell des PSW soll hier zunächst ohne externe Spannungsquelle und Stromabnehmer beschrieben werden. Ein 20 cm langes Stück Schlauch, welches am Turbinenausgang mit einem Schlauchverbinder angebracht ist, dient der leichteren Führung des Wassers und mündet in einen Kunststoffbehälter. Ein 50 cm langes Stück Schlauch dient als Zulauf vom gleichen Behälter zur Pumpe. Ein je 1 m langes Schlauchstück führt von dem Ausgang der Pumpe und dem Eingang des Generators zu einem 2-Wege-Ventil. Mit diesem kann das Modell zwischen Pump- und Generatorbetrieb geschaltet werden. Dazu muss stets ein Ventil geöffnet und das jeweils andere Ventil geschlossen sein. Der Strom zum Pumpbetrieb muss dabei manuell geschaltet werden. Dazu wurde ein Schalter vor der Pumpe angebracht. Es empfiehlt sich die Pumpe erst dann zu starten, wenn das Wasser aus dem Druckrohr vollständig zurückgeflossen ist, damit die Pumpe nicht gegen den Wasserdruck anlaufen muss. Vom Ventil führt ein 12 m langer Schlauch in einen weiteren Kunststoffbehälter. Im Sinne der Nachhaltigkeit können ausrangierte Gartenschläuche verwendet werden, sofern sie dicht sind. Die Schläuche werden nicht fest mit den Kunststoffbehältern verbunden, um diese anderweitig verwenden zu können. Zur Inbetriebnahme muss der Behälter am Ende des längsten Schlauchs eine Höhendifferenz von mindestens 1 m zum Generator haben, damit dieser praktisch nutzbaren Strom generiert.

⁸³ Eigene Abbildung (Aufgenommen am 19.05.2021).

Tabelle 3 gibt einen Überblick über das verwendete Material und zeigt welches Element welches Teil im echten PSW darstellt.

Material	Funktion	Im echten PSW
2 Kunststoff-behälter	Wasserspeicher und -fang	Ober- und Unterbecken
20 cm Schlauch	Leitung von Turbine ins Unterbecken	Rohr von Turbine ins Unterbecken
Generator	Stromerzeugung	Francisturbine mit Synchronmaschine
50 cm Schlauch	Zulauf zur Pumpe	Ansaugrohr
Pumpe	Wasser pumpen	Pumpe
2x1m Schlauch	Zulauf zum 2-Wege-Ventil	Rohrsystem vor den oberseitigen Kugelschiebern
2-Wege-Ventil	Sperren und Zusammenführung zum Druckschlauch	Oberseitige Kugelschieber und Zulauf zum Druckrohr
12m Schlauch	Druckschlauch und Verbindung zum oberen Wasserspeicher	Druckrohr
Schlauch	Dichte Verbindung zwischen Schlauch und technischen Elementen	-

Tabelle 3: Übersicht zum Material und dessen Funktion im Modell und Vergleich zum echten PSW

Um das Modell sinnvoll zu nutzen, ist mindestens eine Spannungsquelle erforderlich, sowie ein Verbraucher. Da PSW häufig für ihren Beitrag zur besseren Nutzbarkeit von nachhaltig generiertem Strom beworben werden, bietet sich die Verwendung von Solarmodulen als Spannungsquelle an.⁸⁴ Dabei muss jedoch beachtet werden, dass selbst für die Verwendung der zwei parallel geschalteten Solarmodule, die in 6.4 beschrieben wurden, das Wetter entscheidend für die Funktionalität ist. Es kann daher notwendig sein, die Pumpe mit Akkus zu betreiben, was didaktisch aufgefangen werden sollte. Alternativ könnten auch weitere Solarpanels zugeschaltet werden.

⁸⁴ Vgl. Uniper SE 2021.

Diese überschreiten allerdings die Kosten für diese Arbeit. Auch ein Spannungsregler kann sich positiv auf den Wirkungsgrad der Pumpe auswirken. Dieser transformiert eventuell auftretende Spannungen $>12\text{ V}$ auf die benötigte Spannungszahl, bei positiver Auswirkung auf die Nutzleistung.

Als Abnehmer bietet sich die in 6.3 berechnete Serienschaltung aus $330\ \Omega$ Widerstand und den beiden weißen LEDs an. Diese kann erweiternd so oft parallelgeschaltet werden, bis der Stromfluss nicht mehr ausreichend stark ist.

Ein Versuchsaufbau zeigt, wie der Generator an seine Grenze gebracht wird. Eine LED wird am Generator angeschlossen. Ein Schlauchstück von etwa 2 m Länge wird mit dem Generatoreingang und einer Gießkanne verbunden. Die Gießkanne wird langsam angehoben. Die Höhe der Gießkanne wird mit einem Zollstock überwacht. Bei etwa 1 m Höhe leuchtet die LED ohne starkes Flimmern. Bei etwa 70 cm Höhe leuchtet die LED nicht mehr. Zwischen diesen Höhen erkennt man deutlich die Frequenz des generierten Stroms durch das Flimmern der LED.

In einem zweiten Versuch wird statt der LED eine Schaltung aus drei parallelgeschalteten Serienschaltungen aus je einem $330\ \Omega$ Widerstand und zwei weißen LEDs an den Generator angeschlossen. Die Gießkanne wird erneut angehoben. Die LEDs leuchten bei einer Höhe von etwa 1,50 m hell und ohne Flimmern. Bei einer Höhe von 1 m leuchten die LED nur noch sehr schwach und stark flimmernd.

Diese Versuche lassen mehrere Schlüsse auf die praktische Anwendung des Generators zu:

1. Der Generator läuft in der Praxis schon mit weniger als 0,5 bar Druck an.
2. Die generierte Leistung im niedrigen Druckbereich steigt nicht linear. Der Wirkungsgrad der Pumpe steigt also bei zunehmendem Druck.
3. Der Versuch zeigt außerdem, was bei einer Überlast im Stromnetz geschieht, die Frequenz fällt ab. Dies ist nur möglich, weil der Generator einen kommutierten Drehstrom und nicht wie beispielsweise eine Batterie glatten Gleichstrom generiert.

Statt der in 6.3 beschriebenen Schaltung lassen sich auch andere Schaltkreise mit ausreichend kleiner Nennleistung bei einer Nennspannung $\leq 12\text{ V}$ und dem richtigen Widerstand betreiben. Eine weitere Limitierung tritt durch die maximale Betriebsdauer aufgrund des Maximums der gespeicherten Menge Wasser auf.

7 Planung einer Einheit am außerschulischen Lernort

Das geplante Modell soll in einer Lerneinheit am außerschulischen Lernort Edersee eingesetzt werden. Dabei sollen nicht ausschließlich physikalische Kompetenzen vermittelt werden. Im Rahmen des BOOM-Camp wird die Lerneinheit mit berufsorientierten Tätigkeiten sowie Freizeitangeboten vermischt.

7.1 BOOM-Camp als Lernort

Das BOOM-Camp ist ein Feriencamp für Jugendliche und junge Erwachsene. Es wird für die Altersgruppe 17-24 Jahre, sowie für die Altersgruppe 14-17 Jahre in den Sommer- und Herbstferien angeboten und dauert sechs Tage mit fünf Übernachtungen. Sowohl die Teilnahme am Camp als auch die Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln sind aufgrund von Fördermitteln kostenfrei für alle Teilnehmenden und ermöglichen somit auch Interessierten aus sozial schwächeren Verhältnissen die Teilnahme. Auch Menschen mit Beeinträchtigungen können nach Rücksprache, unter welchen Bedingungen die Teilnahme möglich ist, angemeldet werden. Nicht anmelden können sich Interessenten mit Wohnort in Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen sowie im Kreis Lüneburg.⁸⁵ Als einer der Standorte findet das Camp am Edersee im Sport-, Natur- und Erlebniscamp der Sportjugend Hessen in Ufernähe der Eder statt. Das Camp erprobt mit den Teilnehmenden verschiedene Handwerksberufe, mit der Zielsetzung nachhaltige Projekte umzusetzen. Dabei sollen die Teilnehmenden ihre eigenen Fähigkeiten in diesen Bereichen entdecken und selbst kreativ werden.⁸⁶ Sie sollen also handwerkliche Fähigkeiten erlernen oder verbessern. Dabei geht es sowohl um die Umsetzung als auch um die Planung nachhaltiger Projekte mit handwerklichen Erfordernissen. Aufgrund der technikorientierten Lernumgebung des Camps sowie des dort geförderten Nachhaltigkeitsbewusstseins eignet es sich als Umfeld für die Durchführung einer Einheit rund um das Thema PSW.

7.2 Fachliche Lernziele und Lernvoraussetzungen

Die Lerneinheit soll für ein Camp mit der Altersgruppe 14-17 Jahre ausgelegt sein. Dies entspricht in der Regel Schülerinnen und Schülern der Jahrgangsstufen 7 bis 11, beachtet man frühe Einschulungen oder die Wiederholung von Jahrgängen. Es ist anzunehmen, dass die Teilnehmenden grundsätzlich freiwillig am

⁸⁵ Vgl. Provadis Partner für Bildung und Beratung GmbH 2020a.

⁸⁶ Vgl. Provadis Partner für Bildung und Beratung GmbH 2020b.

Camp teilnehmen und daher auch ein Grundinteresse für Technik und Umweltschutz mitbringen. Da die Interessenten aus elf verschiedenen Bundesländern stammen können und alle Schulformen möglich sind, ist mit einem sehr heterogenen Vorwissen zu rechnen. Dennoch finden sich die Inhaltsfelder „Energie in Umwelt und Technik“, „Elektrizität im Alltag“ und „Zukunftssichere Energieversorgung“ in allen Kerncurricula der Sekundarstufe I in Hessen, wenn auch in unterschiedlichen Jahrgängen und unterschiedlicher Tiefe.⁸⁷ Somit kann angenommen werden, dass die Teilnehmenden eine Vorstellung des Begriffs Energie und von nachhaltiger Energieerzeugung haben, dieser jedoch stark variieren kann. Energie wird von Jugendlichen aufgrund ihrer Alltagserfahrung häufig mit elektrischem Strom assoziiert.⁸⁸ Dies ist wenig verwunderlich, bedenkt man, dass heute viel über Energiewende gesprochen wird und damit stets gemeint ist, dass eine Umstellung von der Nutzung fossiler Energieträger hin zu beispielsweise E-Mobilität stattfinden soll. Auch elektrische Speichermedien spielen zunehmend eine Rolle im Alltag, sowohl in Smartphones und Haushaltsgeräten als auch in Fortbewegungsmitteln und Spielzeug. Dabei geben eben diese Geräte Hinweise auf die Vielfältigkeit von Energie. Spielzeugautos bewegen sich, Lampen leuchten, Handys senden Signale und erzeugen Töne, der Herd wärmt das Essen. Eine Idee zu Energie kann also sein, dass diese benötigt wird, um etwas zu bewirken und Energie ist speicherbar. Dabei gehen Schülerinnen und Schüler von Energie als etwas „Quasi-Stofflichem“ aus.⁸⁹ Diese Annahme ist grundsätzlich vertretbar, solange Energie und Energieträger unterschieden werden, also beispielsweise ein Treibstoff wie Benzin als Energieträger und nicht als Energie selbst verstanden wird. In dieser Einheit soll zudem klar werden, dass Energie in verschiedenen Formen auftreten kann. Diese Formen der Energie lassen sich ändern. Lässt sich dieser Prozess durchaus nachvollziehen, wenn zum Beispiel die chemische Energie eines Treibstoffs in Wärmeenergie und diese wiederum in Bewegungsenergie umgewandelt wird, so findet sich dennoch die Vorstellung, dass Energie bei solchen Prozessen verbraucht wird, also verschwindet. Diese Vorstellung widerspricht klar dem Energieerhaltungssatz. Ihr Ursprung liegt vermutlich in dem Umstand, dass im Alltag häufig von Energieverbrauch

⁸⁷ Vgl. Hessisches Kultusministerium 2021b.

⁸⁸ Vgl. Behle und Wilhelm 2017.

⁸⁹ Vgl. Schecker und Duit 2018, S. 164 ff.

gesprochen wird, genauso wie von Energieerzeugung, sogar in den Kerncurricula.⁹⁰ Dies legt die Vorstellung nahe, dass Energie aus dem „Nichts“ erschaffen werden kann und nach Verbrauch wieder ins „Nichts“ übergeht. Bei PSW, wie auch bei anderen technischen Einrichtungen wird häufig ein Wirkungsgrad aufgeführt, welcher das Verhältnis zwischen der zugeführten Energie und der genutzten Energie beschreibt. Auch hier entsteht der Eindruck Energie ginge verloren. Im Modell wird Energie häufig umgewandelt und es entstehen einige Punkte, an denen Energie „verloren“ zu gehen scheint. Es bietet sich daher an, verschieden Ursachen für den scheinbaren Energieverlust aufzudecken und auf die verschiedenen Energieformen aufmerksam zu machen. So kann die Vorstellung, dass Energie nicht verloren geht, sondern teilweise „außerplanmäßig“ aus dem System entweicht, vermittelt werden. Optionaler Weise finden sich dabei Verbesserungsmöglichkeiten, um den Wirkungsgrad des Modells zu erhöhen. Um zu diesen Schlüssen zu kommen, sollen die Teilnehmenden das Modell unter Anleitung selbst in Betrieb nehmen und damit angeleitete Experimente durchführen.

7.3 Ablauf des Projekts

Im Folgenden wird beschrieben, wie das Projekt zum PSW am Edersee umgesetzt werden kann. Dazu werden verschiedene Aktivitäten geplant und beschrieben. Das Projekt wird in mehreren Stufen durchgeführt, also nicht in einer einzigen unterbrechungsfreien Lerneinheit. Es soll über zwei Tage hinweg immer wieder in den Freizeitalltag der Teilnehmenden integriert werden. So soll sichergestellt werden, dass die Lernenden ihre Zeit, die sie in das Projekt investieren wollen, teilweise frei wählen können. Dazu sind einige Teile der Projektarbeit zeitlich offener gestaltet als andere. Die Motivation sich mit dem Thema genauer zu beschäftigen, soll dadurch den interessierteren Teilnehmenden gewährleistet und den weniger Interessierten eine erhöhte Teilnahme an anderen Aktivitäten im Camp ermöglicht werden. Dabei ist davon auszugehen, dass nicht alle beschriebenen Fragestellungen und Anregungen mit allen Jugendlichen besprochen werden können. Dies soll im Rahmen eines Feriencamps aber auch nicht Ziel sein. Es soll allen gestattet sein, eigene Erfahrungen und Wahrnehmungen des Themas zu erhalten. Das Projekt soll daher ein Anreiz sein sich mit PSW zu beschäftigen und stellt Mittel zur Teilerschließung des Themas zur Verfügung.

⁹⁰ Vgl. Hessisches Kultusministerium 2021b.

7.3.1 Ausflug zum Kraftwerk Waldeck

Eine Besichtigung des Kraftwerks Waldeck soll als Einführung in das Thema Wasserkraft und PSW durchgeführt werden und das Interesse zum Thema wecken. Dabei soll das informelle Lernen im Vordergrund stehen. Vielleicht ist zu diesem Zeitpunkt schon einigen Teilnehmenden aufgefallen, dass der Wasserstand der Eder nahe dem Camp stark schwanken kann. Der Ausflug liefert Erklärungen für dieses Phänomen und kann die Dimensionen dieser Schwankung besser aufzeigen.

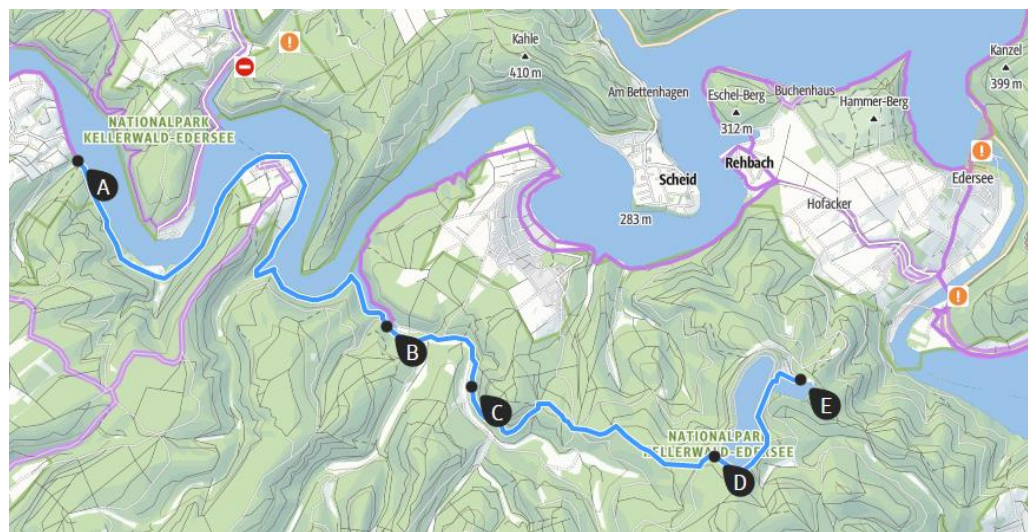


Abbildung 16: Radtour vom Camp (A) zur Peterskopfbahn (E) (blauer Weg)⁹¹

Zur Sicherung einiger Lernziele findet ein Entdeckungswettbewerb als Rahmenprogramm um den Ausflug statt. Dazu werden Kleingruppen von etwa fünf Personen pro Gruppe eingeteilt, welche einen Beobachtungsbogen⁹², einen Zollstock, eine Stoppuhr und Schreibutensilien erhalten. Die Teilnehmenden sollen zur Beobachtung Messungen und Rechnungen durchführen, Informationen auf Hinweistafeln beschaffen oder Fragen an Fachkundige stellen. Die Fragen des Beobachtungsbogens sind bewusst nicht chronologisch zum Tourplan geordnet. Dadurch soll die Aufmerksamkeit bei der Beobachtung der Umgebung aufrecht gehalten werden. Zur Lösung der Fragen sind sowohl mathematische, physikalische, psychomotorische als auch soziale Kompetenzen gefragt. Insgesamt soll

⁹¹ Abbildung nach Edersee Marketing GmbH 2021b.

⁹² Siehe Anlage 2

der Beobachtungsfokus der Jugendlichen mit Hilfe des Fragebogens auf technische Elemente zum Thema Wasserkraft gerichtet und damit der „Novelty Space“ reduziert werden.⁹³

Um zu verhindern, dass die Bearbeitung der Bögen zu sehr ins formelle Lernen übergeht, soll deutlich gemacht werden, dass Hilfe seitens der betreuenden Personen stets erlaubt ist, auch um fachspezifische Defizite (zum Beispiel Wissen über Formeln und deren Anwendung) auszugleichen. Zudem können die Teilnehmenden auch eigene Beobachtungen festhalten und diskutieren. Der Ausflug kann trotz der Gruppeneinteilung auch als Großgruppe stattfinden, sofern nicht genug Betreuungspersonal zur Verfügung steht, um der Aufsichtspflicht gerecht zu werden. Um das Kraftwerk zu erreichen ist eine Radtour angesetzt, die vom Camp zu den Oberbecken der PSW führen soll.

Abbildung 16 zeigt die Radtour auf der Landkarte. Die Tour führt vom Camp (A) ostwärts die Straße an der Eder entlang. Um autobefahrene Straßen zu meiden, führt die Strecke nach etwa 3 km auf einen Schotterweg in den Naturpark Kellerwald (B). Sie umfährt den Daudenberg mit einem leichten Anstieg (C), bis sie auf den 270 m höher gelegenen Rundweg um das größere der beiden Speicherbecken trifft (D). Von dort gelangt man auf einem flachen Weg zwischen den beiden Speicherbecken zur Bergstation der Peterskopfbahn (E). Die Radtour ist einfach etwa 13,2 km lang und verläuft gegen Ende überwiegend bergauf auf eine Höhendifferenz von +320 m zwischen Start und Ziel. Damit ist die gleiche Strecke als Rückweg wesentlich einfacher zu bewältigen. Die gesamte Radstrecke liegt mit etwa 26,4 km im Rahmen dessen was Jugendlichen über 10 Jahren zugemutet werden kann.⁹⁴

Direkt neben der Bergstation gibt es gute Rastmöglichkeiten sowohl im Freien als auch in einer Wanderstation.⁹⁵ Die Peterskopfbahn, deren Kabine Platz für vierundfünfzig Fahrgäste hat, fährt von dort zum 200 m tiefer gelegenen Kraftwerk.⁹⁶ Dort wird eine Führung im Infozentrum gebucht und mit allen Teilnehmenden durchgeführt. Diese vermittelt vor Ort und an anschaulichem Bildmaterial und Modellen umfangreiches Wissen über die Entstehungsgeschichte der

⁹³ Vgl. Guderian 2006, S. 21.

⁹⁴ Vgl. RADschlag 2021.

⁹⁵ Für nähere Informationen zu Öffnungszeiten siehe <https://www.waldboelker.de/>.

⁹⁶ Vgl. Stracke 2021.

Edertalsperre und der PSW und wie mit Wasserkraft elektrische Energie erzeugt werden kann.⁹⁷ Damit klärt sich die Frage nach dem schwankenden Wasserstand der Eder am Camp und ein erster Eindruck über die entscheidenden Faktoren für den Bau eines Wasserkraftwerks wird vermittelt.

Im Anschluss reicht ein etwa dreißigminütiger Spaziergang, um zur Edertalsperre zu gelangen. An der an Hemfurth grenzenden Seite der Staumauer gibt es einige Sitzgelegenheiten und Verpflegungsmöglichkeiten für eine Rast, sowie diverse Infotafeln. Die Staumauer ist begehbar und autofrei, so dass sich kleine Gruppen darauf bewegen können. So kann die Länge der Mauer vermessen, alternativ stehen aber auch Infotafeln zur Verfügung, denen Antworten zu Rückfragen entnommen werden können. Dabei können die Lernenden ihre psychomotorischen Fähigkeiten verbessern und/oder ihre Kompetenz zur Informationsbeschaffung. Da der Wasserstand mit den vorhandenen Instrumenten nicht messbar ist, sollen hier zur Ermittlung die Informationen rund um die Edertalsperre entdeckt werden. Neben Informationen zur Staumauer und der Landschaft ist dort auch eine elektronische Wasserstandsanzeige zu finden.

Der Rückweg führt wieder über das Infozentrum und mit der Peterskopfbahn hinauf zu den Fahrrädern. Da die Bahn an den Druckrohren des Kraftwerks Waldeck I entlangfährt, lädt die Bergfahrt zu Größenvergleichen ein, um eine Vorstellung der Dimension der Wassermassen, die durch die Rohre fließen zu erhalten. Fragestellungen wie „Wie viele Personen haben im Querschnitt des Rohrs Platz?“ „Wie schnell würde eine Person im Rohr hoch- oder hinunter „gepumpt“ werden?“ „Wie lässt sich diese Zeitspanne mit der Geschwindigkeit der Bahn vergleichen?“ helfen beim Bearbeiten der Herausforderungen und schaffen Größenvergleichsvorstellungen. An der Bergstation lassen sich einige dieser Fragestellung entspringenden Thesen testen. Ein Querschnitt des Rohres steht dort als Skulptur (Abbildung 17). Als vorgegebene Problemstellung soll die Frage, wie viele handelsübliche Gartenschläuche benötigt werden, um die gleiche Menge Wasser durchzulassen eingebracht werden. Diese Fragestellung soll einen Größenvergleich zwischen Realität und Modell fördern (auch wenn dieses den Teil-

⁹⁷ Das Infozentrum war während der Ausarbeitung der wissenschaftlichen Hausarbeit aufgrund der Pandemielage geschlossen. Die Informationen über die Ausstellung im Infozentrum stammen von Matthias Lange, welcher auch die Führung vor Ort durchführt und der Website des Edersees (<https://www.edersee.com/de/erleben/ausflugstipps/infozentrum-100-jahre-edersee>).

nehmenden noch nicht vorgestellt wurde), und möglicherweise auch einen Vergleich des PSW Waldeck I mit seinem größeren Nachbarn Waldeck II nahelegen. Der Durchmesser kann vor Ort gemessen werden, sofern keine Information aus dem Infozentrum präsent ist. Mit der Kreisflächenformel $\pi \cdot r^2$ kann die Querschnittsfläche ermittelt werden. Mit dem Produkt aus Fläche und der Länge des Rohrsegments kann das Volumen errechnet werden, welches in einen solchen Rohrabschnitt passt. Alternativ können aber auch begründete Schätzungen vorgenommen werden und so die Lösung für eine weitere Frage des Fragebogens erfolgen.



Abbildung 17: Mann als Größenvergleich zum Durchmesser des Druckrohrs von Waldeck I⁹⁸

Der Rückweg wird wieder mit den Fahrrädern bewältigt. Dabei ist ein letzter Blick auf die beiden Oberbecken möglich. Um Größenverhältnisse dieser Becken zu ermitteln, bietet es sich an lokale Schwimmbäder, welche von Teilnehmern besucht werden und deren Beckenvolumen zu ermitteln⁹⁹. Es stellt sich der Vergleich, wie häufig die Wassermenge eines Beckens oder aller Becken eines Schwimmbades in das Speicherbecken passt. Dabei ist individuell vorzugehen, da die Teilnehmenden aus unterschiedlichen Regionen stammen können. Hinter

⁹⁸ Eigene Abbildung (Aufgenommen im November 2020)

⁹⁹ Leider geben viele Schwimmbäder ihre Wasserbecken nur mit Flächengrößen an, sodass eine Schätzrechnung angestellt werden muss. Alternativ kann aber auch die Wasseroberfläche verglichen werden oder nur einzelne Becken mit bekannter Wassertiefe.

den beiden Speicherbecken (Abbildung 16, von D in Richtung A) geht der Heimweg zum Camp überwiegend bergab. Im Camp werden die Fragebögen reflektiert. Dazu werden diese mit den einzelnen Gruppen besprochen und hinsichtlich der Arbeitsweise ausgewertet. Eine Bewertung soll nur in diesem Rahmen stattfinden. Dabei werden die Ergebnisse nur bedingt auf Korrektheit geprüft, sondern vielmehr die Herangehensweise zusammen mit den Lernenden reflektiert. So sollen diese die Fähigkeit erlangen, ihre Ergebnisse selbst einschätzen zu können.

In den Gruppengesprächen lässt sich auch ein Stimmungsbild einfangen, ob die Teilnehmenden bisher am Thema interessiert oder desinteressiert sind. So lassen sich für einzelne Gruppen Prognosen aufstellen, wie weit Interesse an einer Vertiefung des Themas vorhanden ist.

7.3.2 Modellaufbau im Camp

Der Modellaufbau soll am folgenden Tag stattfinden, sofern die Planung des Camps keinen Raum für eine flexible und wetterabhängige Verschiebung zulässt. Im Idealfall sollte die Sonne von Wolken unbedeckt am Himmel stehen.

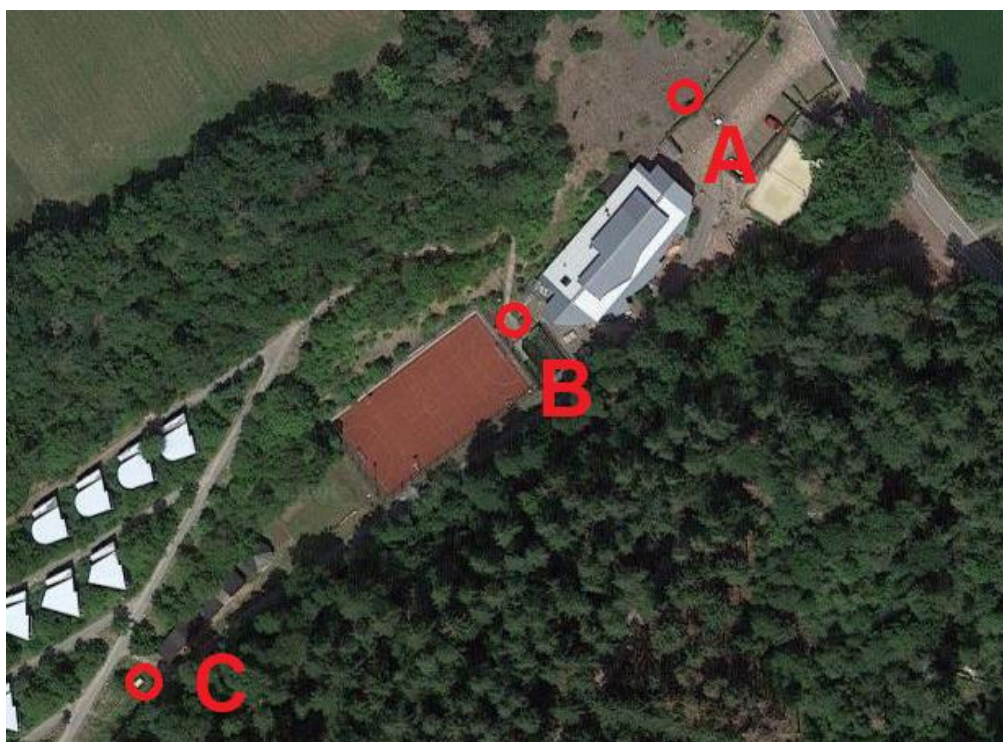


Abbildung 18: Satellitenaufnahme des Camps der Sportjugend Hessen mit Standorten für das Modell¹⁰⁰

¹⁰⁰ Google 2021.

Das Modell wird auf dem Gelände des Camp Edersee der Sportjugend Hessen installiert. Eine Besichtigung des Geländes zeigte drei mögliche Standorte auf (Abbildung 18).

Standort A befindet sich direkt am Parkplatz des Camps. Hier geht ein gleichmäßig steiles Gefälle hinauf, welches genutzt werden könnte, um eine Höhendifferenz zwischen den Wasserbecken zu schaffen. Zudem ist der Hügel recht wenig bewachsen und bietet damit gute Bedingungen für die Solarmodule. Weiterhin liegt der Parkplatz direkt vor dem Haupteingang des Hauptgebäudes, vor dem einige Sitzgelegenheiten von Pavillons überdacht stehen. Diese sorgen für schattige Rückzugsorte beim Experimentieren in der Sonne. Wasser kann mit Schläuchen vom Haus aus zum Standort geleitet werden.

Standort B liegt zwischen dem eingezäunten Sportfeld und dem Haupthaus. Zwischen dem Standort und dem Weg liegt ein kleiner Schwimmteich. Dieser kann als Auffangbecken und vorhandene Wasserquelle genutzt werden. Dahinter geht es einen steilen Hang hinauf, welcher für die Höhendifferenz zum Speicherbecken genutzt werden kann. Leider ist der Standort durch die Nähe zum Haus und der hohen Umzäunung des Sportfelds der schattigste der drei möglichen Orte zum Aufbau.

Standort C liegt unterhalb der Schlafbungalows. Auch hier bietet ein Hang Möglichkeiten für den Aufbau des Modells. Durch die Zufahrtsstraße zu den Schlafunterkünften ist hier das Speicherbecken leichter erreichbar und kann zum Beispiel an der oberen Straße leicht eben platziert werden. Aufgrund der zentralen Lage ist ein ruhiges Arbeiten eventuell schwierig.

Standort A sticht aus mehreren Gründen hervor. Zum einen bietet der Hang hier den größten Platz und das größte Potenzial für Höhenunterschiede. Zudem kann hier Wasser über den Hausanschluss nicht nur einfach nachgeholt, sondern auch leicht in große Höhe befördert werden und ist am Hang sicherer und schneller als ein Wassertransport mit Gießkannen oder ähnlichem. Die Pumpe stellt im Modell die Höhenbegrenzung des geschlossenen Modells dar, auch weil ihre Pumpleistung bei Photovoltaikbetrieb wetterabhängig ist. Die externe Wasserquelle ermöglicht daher weiterführende Experimente mit Wasserdruck. Ein weiterer Grund für den Standort A sind die Sitzmöglichkeiten, zu denen leicht Strom verlegt werden kann. Dabei ist genug Abstand zum Modell möglich, sodass die

Wasserleitung in ausreichend großer Entfernung zum Strom gelegt werden kann. So kann dort der Lötworkshop (siehe dazu Kapitel 7.3.4) stattfinden. Zuletzt liegt der Standort A am Rande des Camps, sodass hier keine Ablenkungen vom Sportfeld, dem Schwimmteich oder spielenden Jugendlichen ausgeht. Ein daraus resultierender niedriger Lärmpegel kann erwartet werden. Es besteht eine hohe Chance hier eine gute Lernatmosphäre schaffen zu können. Zur Vorbereitung können Höhenmarkierungen am Hang vorgenommen werden. Diverse kostenlose Apps machen die meisten Smartphones zu ausreichend genauen Höhenmessern.

Die Teilnehmenden sollen in Gruppen von maximal acht Personen selbst das Modell aufbauen und angeleitet experimentieren. Dabei sind für die Arbeit am Modell etwa 30 Minuten vorgesehen. Die Gruppengröße scheint sinnvoll, um möglichst wenige Gruppen zu benötigen, aber dennoch alle Gruppenmitglieder am Experimentieren und Aufbauen zu beteiligen. Dazu wird sämtliches in Tabelle 3¹⁰¹ beschriebenes Material, Gießkannen und der am Haus angeschlossenen Schlauch mit Schlauchspritze zur Verfügung gestellt. Zurückgehalten werden die Spannungsquellen und die Verbraucher. Die Lernenden sollen zunächst einen Plan entwerfen, welches Bauteil welche Aufgabe übernimmt.

Es ist anzunehmen, dass die Behälter schnell als Speicher- und Auffangbecken erkannt werden, sowie die Schläuche als Rohrsystem. Schwierigkeiten können beim Unterscheiden der Pumpe und des Generators entstehen. Um diese technischen Elemente zu schonen, soll von einem Praxistest abgesehen werden, zumal beide Bauteile als jeweils anderes genutzt werden könnten. Auf diesen Sachverhalt kann seitens der betreuenden Person bei Unterscheidungsproblemen eingegangen werden. Es ist nicht davon auszugehen, dass die beiden Geräte mit großer Sicherheit seitens der Teilnehmenden unterschieden werden können. Dies kann nur durch Vorwissen geschehen und ist zu hinterfragen. An dieser Stelle kann auch darauf eingegangen werden, wie Lernende die Funktionsweise der Geräte beschreiben und ob sie von einer Energieumwandlung sprechen. Die Begriffe elektrische Energie, kinetische Energie und potenzielle Energie können in diesem Kontext eingeführt werden. Ziel soll hier sein, dass die Umwandlung zwischen diesen Energieformen zum Aufbau beschrieben werden kann. Aufgrund des Besuchs des PSW am Vortag ist anzunehmen, dass die Teilnehmenden die

¹⁰¹ Siehe Kapitel 6.5

Pumpe und den Generator richtigerweise am Unterbecken vermuten. Eine letzte Hürde kann das 2-Wege-Ventil darstellen. Es muss so angeschlossen werden, dass die Sperren je zum Generator und zur Pumpe führen. Das System der Schlauchverbinder kann bei Bedarf erklärt werden, ist jedoch recht intuitiv. Als Aufbauhilfe kann eine unbeschriftete Schemazeichnung helfen¹⁰². Diese soll allerdings nur im Notfall benutzt werden und eigentlich der Kontrolle dienen. Das korrekt angeschlossene Schlauchsystem ist in Abbildung 19 ohne die Behälter abgebildet



Abbildung 19: Schlauchnetz mit Pumpe und Generator

Eine für die Teilnehmenden nicht geklärte Frage ist, wie hoch die Pumpe das Wasser überhaupt fördern kann. Die Höhe des Versuchsaufbau ist allerdings durch die Länge der Schläuche und die örtlichen Begebenheiten limitiert. Es ist zu erwarten, dass einige Aufbauten direkt einen großen Höhenunterschied vorsehen und einige nicht. Auch ein Aufbau des Modells im flachen Gelände ist denkbar. Eine genaue Justierung des Höhenunterschieds ist an dieser Stelle noch

¹⁰² Siehe Anhang 3

nicht erforderlich und Konsequenzen des Aufbaus machen sich gegebenenfalls erst beim Experimentieren bemerkbar.

Ist der Aufbau geplant und durchgeführt gleichen die Teilnehmenden ihr Ergebnis noch einmal mit dem Schema ab. Sollte am Pumpeneingang und am Generatorende kein Schlauch angeschlossen sein, wird das nachgeholt. Es besteht keine technische Notwendigkeit dafür, erleichtert aber die Handhabung und ermöglicht die Stromkabel weiter entfernt von offenem Wasser zu platzieren (hier geht es mehr um eine Kurzschlussgefahr als um eine Gefahr für die Experimentierenden, da die Ströme ungefährlich sind). Wenn ausreichend Wasser (Füllstand mindestens 20 cm, damit die Pumpe gut eintauchen kann) in einem der Behälter ist und auch die betreuende Person keinen Mangel feststellen kann, geht es mit der Durchführung einiger Versuche weiter. Der gesamte Aufbau in Pumpbetrieb mit Solaranlage ist in Abbildung 20 abgebildet.



Abbildung 20: Modell im Einsatz bei einer Gesamthöhe von etwa 3 m¹⁰³

¹⁰³ Eigene Abbildung (Aufgenommen am 19.06.2021)

7.3.3 Experimentieren am Modell

Im Folgenden werden Versuche am Modell beschrieben. Die Erklärungen, die hierbei anfallen, sollen in der Einheit mit den Lernenden diskutiert werden. Es wird dabei bewusst auf Messfehler verzichtet, da die Versuche im freien und unebenen Gelände stattfinden und qualitativ bewertet werden. Wichtiger als genaue Messungen sind die Relationen, was nur möglich ist, wenn diese auch mit ungenauen Messungen deutlich erkennbar sind. Die Herausforderung besteht also darin, Gesetzmäßigkeiten ohne Formeln und viele Rechnungen wahrnehmbar zu machen. Dazu müssen die Experimentierenden ihr Handeln hinterfragen oder dazu angeleitet werden.

Versuch 1: Inbetriebnahme des PSW mit Solarenergie

Das Wasser befindet sich im Unterbecken. Die Ventile sind an der Pumpe geöffnet und am Generator geschlossen. Je nach Wetterlage wird der Generator an die Solarmodule oder an einen 12 V Akku angeschlossen. Dabei soll der Schalter an der Pumpe ausgeschaltet sein. Ein vorbereiteter Verbraucher mit drei parallelen Serienschaltungen aus $330\ \Omega$ Widerstand und zwei weißen LEDs wird am Generator angeschlossen. Die Parallelschaltungen sind mit Schaltern voneinander getrennt und können so einzeln zugeschaltet werden (vgl. Abbildung 21).¹⁰⁴ In diesem Versuch sollen alle Schaltungen eingeschaltet sein. Die Pumpe wird in das Wasser eingetaucht und anschließend gestartet.

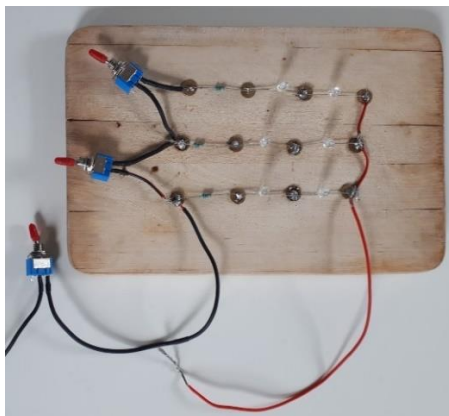


Abbildung 21: Schaltkreis nach Schaltplan aus Anhang 4¹⁰⁵

Es sollte nun Wasser durch die Schläuche in das zweite Behältnis gepumpt werden. Ist dies nicht der Fall muss geprüft werden, ob die Turbine ausreichend

¹⁰⁴ Vgl. Anhang 4: Schaltplan

¹⁰⁵ Eigene Abbildung (Aufgenommen am 19.06.2021)

Leistung zu Verfügung gestellt bekommt, um ihren Betrieb aufzunehmen. Sollte dies der Fall sein, ist die Höhendifferenz der beiden Behälter vermutlich zu groß. Sobald der Großteil des Wassers umgepumpt ist, wird möglichst zeitgleich das Ventil geschlossen und die Pumpe abgeschaltet. So soll verhindert werden, dass das Wasser im Schlauch beim Abschalten der Pumpe zurückläuft, beziehungsweise die Pumpe Wasser in eine geschlossene Leitung presst. Zudem bleibt im Druckschlauch noch Wasser stehen, so dass bei Turbinenbetrieb nur wenig Luft durch diese strömt.

Anschließend wird das Ventil zur Turbine geöffnet. Die Turbine läuft nach wenigen Sekunden an und baut eine Spannung an den LEDs auf. Sie beginnen zu leuchten. Dies geschieht nicht, wenn der Höhenunterschied der Becken nicht mehr als 1,50 m beträgt. Sollte dies im bisherigen Aufbau der Fall sein, ist hier der richtige Zeitpunkt, den Aufbau anzupassen. Dazu sollte das Speicherbecken geleert werden.

Die Teilnehmenden sollen anhand dieses Versuchs primär die Funktionalität des Modells überprüfen. Aus dem Wissen, dass PSW elektrische Energie einspeichern können, soll hier die Frage nach dem „Wie“ aufkommen. Dazu soll auch beschrieben werden, welche Wandlung die elektrische Energie vollzieht. Beim Thema Energie soll es an dieser Stelle jedoch mehr um das „Wissen, dass“ als um das „Warum“ oder das „Wie“ gehen. Dabei ist also nicht wichtig, wie die Pumpe elektrische Energie umwandelt, sondern, dass kinetische Energie generiert wird. Sollte aber diesbezüglich die Neugier einiger Teilnehmenden geweckt werden, so ist ein bedeutendes affektives Lernziel erreicht. Das Interesse kann gefördert werden, indem auf Informationsquellen zu elektrischen Motoren verwiesen wird, soll aber im Projekt nicht tiefer behandelt werden.

Im Generatorbetrieb fällt eventuell auf, dass das Wasser aus dem Speicherbecken im Modell zunächst auch nach oben fließt, da der Schlauch nicht wie das Rohr in einem echten PSW am Beckenboden angeschlossen wird, sondern über den Rand einhängt. Diese Besonderheit kann zur Einleitung des zweiten Versuchs genutzt werden. Eventuell ist einigen Teilnehmenden die Gesetzmäßigkeit, dass Wasser in verbundenen Gefäßen immer gleichhoch steht, bekannt. Der Ursache für dieses Phänomen soll im folgenden Versuch nachgegangen werden.

Versuch 2: Wasserdruck am unteren Ende einer Wassersäule

Das Oberbecken wird gefüllt. Das zweite (geleerte) Becken wird auf gleicher Höhe neben dem ersten Becken platziert. Ein etwa 1 m langer Schlauch wird mit einem Ende in das gefüllte Becken getaucht und mit dem anderen Ende in das leere Becken gelegt und somit tiefer als der Wasserspiegel des ersten Beckens platziert (siehe Abbildung 22). Die Beobachtung scheint dem bekannten Gesetz zu widersprechen: Es passiert nichts. Auf Wunsch kann der Versuch so auch mit größerem Höhenunterschied der Becken durchgeführt werden. Das Resultat ändert sich nicht.



Abbildung 22: Versuchsaufbau von Versuch 2¹⁰⁶

Die Vorstellung, ein Schlauch allein sei eine Verbindung, hat ihren Ursprung möglicherweise in der Alltagserfahrung, dass ein Gartenschlauch leer an einen Wasserhahn angeschlossen werden kann und sobald der Wasserhahn aufgedreht wird auch der Schlauch Wasser zur Verfügung stellt. Dabei wird außer Acht gelassen, dass am Hausanschluss das Wasser mit einem Druck von 3-4 bar anliegt.

Tatsächlich fehlt dem Wasser eine Druckdifferenz, wenn ein luftgefüllter Schlauch hineingehalten wird, um in den Schlauch gedrückt zu werden. Im Schlauch herrscht der gleiche Druck wie in der ihn umgebenden Luft. Die notwendige Druckdifferenz kann auf zwei Arten erzeugt werden. Muss nur eine geringe Höhe überwunden werden, kann man das Wasser mit dem Mund ansaugen. Dabei erzeugt man einen Unterdruck am Schlauchende, also eine Druckdifferenz. Sobald der Schlauch mit Wasser gefüllt ist, läuft das Wasser von allein,

¹⁰⁶ Eigene Abbildung (Aufgenommen am 02.06.2021)

denn die beiden Gefäße sind nun durch eine Wassersäule im Schlauch verbunden.

Um deutlich zeigen zu können, warum nun das Wasser von allein fließt und nicht weiter angesaugt werden muss, wird ein Zusatzversuch durchgeführt. Dazu wird einer der Behälter auf einer Höhe von mindestens 5 m auf dem Hang platziert und dort mit der Schlauchspritze gefüllt (das ist zeitsparender als die Pumpe). Der lange Schlauch wird mit einem Ende in das Becken gehalten. Das andere Ende wird am Hang auf ein etwa 1 m tieferes Niveau gehalten. Der Schlauch wird durch Ansaugen oder mit Hilfe der Schlauchspritze mit Wasser gefüllt. Das Wasser läuft nun von allein aus dem Becken in den Schlauch und hinaus. Das auslaufende Schlauchende soll nun näher an den Wasserspiegel des Beckens gebracht werden. Sobald es diesen erreicht, stoppt der Wasserfluss. An diesem Punkt wirkt auf die Wassersäulen zu Seiten des höchsten Punkts im Schlauch die gleiche Summe an Kräften. Relevant ist hierbei nur das Wasser über dem Wasserspiegel des Beckens.

Versuch 3: Schweredruck von Wasser

Bei gleichem Versuchsaufbau wie im Zusatzversuch soll nun mit dem Daumen versucht werden das Wasser am Austreten aus dem Schlauch zu hindern. Man muss dazu mit diesem auf die Schlauchöffnung drücken. Geht man nun einen weiteren Höhenmeter den Hang hinunter nimmt der Druck des Wassers und damit die Kraft, mit der es auf den Finger drückt, zu. Dieser Schritt wird so oft wiederholt, bis das Wasser ausbricht oder die Höhendifferenz etwa 5 m beträgt. Mit zunehmendem Höhenunterschied muss fester auf das Schlauchende gedrückt werden. Diesen Versuch sollte jedes Gruppenmitglied einmal durchführen. Eine andere Möglichkeit den zunehmenden Wasserdruck zu zeigen, ist das Schlauchende beim Herabsteigen offen zu lassen und die Fontäne am Schlauchende zu beobachten. Diese wird zunehmend größer. Leider fördert dieses Experiment die Schülervorstellung, Druck sei gleichzusetzen mit dem Kraftbegriff, eben weil der Druck wie eine Kraft auf den Finger wirkt.¹⁰⁷ In dieser Einheit ist allerdings, weder der zeitliche Rahmen gegeben noch eine sinnvolle Einbindung weiterer Experimente zum Druckbegriff möglich. Die Erfahrung, dass die Kraft,

¹⁰⁷ Schecker et al. 2018, S. 55–56.

die Wasserdruck auf eine Fläche am Boden einer Wassersäule auswirkt mit zunehmender Höhe der Säule größer wird, ist aber essenziell für das Verständnis eines PSW. Es kann versucht werden, von Kraft, mit der der Wasserdruck auf den Finger wirkt, zu sprechen, um aufzuzeigen, dass es sich bei den beiden Begriffen nicht um das gleiche handelt.

Eine andere Schülervorstellung, welche bei diesem Versuch ebenfalls gefördert werden kann, ist leichter zu korrigieren. Es handelt sich um die Vorstellung, das Gewicht des gesamten Wasservolumens sei entscheidend für den Druck. Um diese Vorstellung zu überprüfen, kann beispielsweise das Füllvolumen, welches einen Schlauch mit der Länge 2 m und 13 mm Durchmesser, also etwa 265 ml, in einen Trichter mit einer Öffnung, welcher der des Schlauchs entspricht, gegeben werden. Der Druck am Trichterende ist deutlich kleiner als am senkrecht gehaltenen Schlauch.

An diesen Versuchen soll qualitativ erfahrbar werden, dass eine Wassersäule in einem Schlauch an ihrem tiefer liegenden Ende einen höheren Druck erfährt als an ihrem oben liegenden Ende. Dies erklärt, woher die Kraft kommt, welche die Turbine antreibt, aber auch gegen welche Kraft die Pumpe drücken muss.

An dieser Stelle sollen die Lernenden versuchen zu beschreiben, in welcher Form die elektrische Energie gespeichert und wie diese zu verorten ist. Anders als bei chemischer Energie, bei der die Energie in der Verbindung zwischen Elementen und damit als etwas den Stoffen Eigenes gesehen wird, kann anhand der Versuche die potenzielle Energie gut beschrieben werden. Es scheint trivial, dass eine Batterie auf einem Hügel nicht plötzlich mehr elektrische Energie liefert. Das Energiepotenzial des Wassers ist beim Fördern hingegen offensichtlich gestiegen. Das Potenzial wird vom Becken gehalten. Das Becken drückt also gegen das Wasser. Der Wasserschlauch stellt einen Ausweg für das Wasser dar, in dem das Energiepotenzial als Bewegungsenergie wirken kann.

Versuch 4: Wirkungsgrad

In einem weiteren Versuch soll gezeigt werden, dass die Nutzleistung nicht der investierten Leistung entspricht. Dazu werden ein Messbecher, eine Gießkanne und eine Stoppuhr zum übrigen Material hinzugenommen. Die Pumpe wird diesmal mit der Batterie betrieben. Die Pumpe wird in ein mit Wasser gefülltes Be-

cken gestellt. An ihrem Ausgang wird ein Schlauch angeschlossen und 2 m höher in einen Messbecher gehalten. Es wird nun beim Einschalten der Pumpe eine Stoppuhr gestartet, solange, bis der Messbecher einen bestimmten Füllstand anzeigt (eigene Messung: Pumpe benötigt etwa dreizehn Sekunden für einen Liter). Anschließend wird die geförderte Menge in eine Gießkanne umgefüllt und diese wasserdicht an den Schlauch angebracht. Der Schlauch wird wiederum an den Generator und dieser an den LED-Aufbau angeschlossen. Die Gießkanne wird so gestürzt, dass das Wasser aus 2 m Höhe in den Schlauch fließt. Die Stoppuhr wird erneut gestartet, diesmal sobald die LEDs zu leuchten beginnen und gestoppt sobald sie wieder aufhören (eigene Messung: ein Liter Wasser generiert etwa neun Sekunden lang ausreichend Strom). Die LEDs können anschließend auch an die Batterie angeschlossen werden, um zu testen, ob der Strom zum Betreiben der LEDs ausreicht. Eine geringere Höhe der Gießkanne tut es nachweislich nicht. Die generierte Leistung ist also geringer als die investierte.

Der Versuch gibt Anlass zur Diskussion, wo und in welcher Form die investierte Energie aus dem System entweicht. Einige Möglichkeiten hierfür sind schlechte Fördereigenschaften der Pumpe, Rohrreibung, Verformung des Rohrs, Verdunstung des Wassers, undichte Stellen und viele mehr.

Es ist bewusst kein Volumen, mit dem gearbeitet werden soll, festgelegt. Die Lernenden sollen hier selbst überlegen, wie sie genauere Ergebnisse bekommen. Dabei soll auffallen, dass ein größeres Volumen zu weniger Messfehlern führen kann. Waren diese bisher aus genannten Gründen unberücksichtigt, sollen sie hier kritisch hinterfragt werden. So soll mit diesem letzten Planversuch ein Einblick in formelleres wissenschaftliches Arbeiten und dessen Vor- und Nachteile gewährt werden. Ziel soll sein, einige Teilnehmende auch für die Theorie hinter dem Experiment zu begeistern, also von der phänomenologischen Ebene hin zu einer quantitativen Beschreibung der Sachverhalte zu führen. Vertiefend kann dazu die tatsächliche elektrische Leistung beim Pumpen und beim Betreiben der LEDs mit einem Multimeter gemessen und in Relation mit der Zeit gesetzt werden. Der Übergang ins formelle Lernen soll aber auch denjenigen, welche davon abgeschreckt werden, helfen, einen Sinn in einer solchen Arbeitsweise zu sehen.

7.3.4 Lötworkshop und Stresstest des Modells

Für den Modellbau wurden zum einen Schläuche, aber auch Kabel verbunden, elektrische Bauteile verlötet und zum Teil mit Schrumpfschlauch wasserdicht

gemacht. Um beim Modellaufbau schnell ins Experimentieren zu kommen, wurde dieser Teil vorbereitet und nicht von den Teilnehmenden bearbeitet. Dies soll in einem Workshop nachgeholt werden. Ziel ist es, eine eigene Platine mit LEDs und mindestens einem Schalter zu löten. Als Platine sollen Sperrholzplatten mit unbeschichteten Reißzwecken als Lötstellen versehen werden. Dabei können die Teilnehmenden sowohl die Platine als auch die Schaltung im Rahmen der vorgegebenen Schaltpläne kreativ gestalten. Mit Hilfe von ausliegenden Tabellen können LEDs verschiedener Farben parallel zueinander verschaltet werden.¹⁰⁸ Sie werden von den anwesenden Betreuungspersonen eingewiesen. Die Lernenden sollen hier praktische Einblicke in die Elektrotechnik bekommen. Es ist zu vermuten, dass die Teilnehmenden unterschiedlich lange mit ihrer Arbeit verbringen wollen und auch, dass unterschiedlich viele LEDs verbaut werden. Dabei ist davon auszugehen, dass manche schon mit dem LötKolben vertraut sind und andere zum ersten Mal einen solchen benutzen. Die Arbeitszeit soll deshalb möglichst offen gestaltet werden, sodass mehr als eine Gruppe am Workshop teilnehmen kann. Zudem können sich die Gruppen hier auch auflösen.

Lernziel dieses Workshops sind zum einen Geschicklichkeit und Wissen über Technik und deren Grundlagen, vor allem soll aber eine Berufsorientierung ermöglicht werden. Dabei ist das Interesse an der hier vollbrachten Arbeit ebenso ein Lernerfolg wie das Desinteresse. Ähnlich wie bei Schulpraktika sollen die Teilnehmenden also sich selbst reflektieren und erkennen, mit welchen Aspekten sie im späteren Beruf zurechtkommen, aber eben auch was sie auf keinen Fall tun möchten.

Die Werkstücke werden einzeln an einem 12 V Akku getestet. Sind sie fertig, werden sie entsprechend ihrer Anzahl an verbauten LEDs sortiert und in der Nähe des Modells gelagert.

Als Abschluss soll ein Stresstest den Generator an seine Grenze bringen. Dazu werden alle Werkstücke parallel zueinander geschaltet, wobei alle Schalter aus sein sollen. Das Modell des PSW wird mit maximaler Höhe des Speicherbeckens aufgebaut und befüllt (nicht notwendigerweise mit Pumpbetrieb) und an das Netzwerk angeschlossen. Das Ventil ist dabei geschlossen.

¹⁰⁸ Anhang 5

Das Ventil wird geöffnet und es werden nach und nach Werkstücke zugeschaltet. Sobald die LEDs nicht mehr hell leuchten wird der Test beendet. Für ein schöneres Bild und auch um eine reale Anwendung des PSW zu simulieren, kann dieser Stresstest in der Dämmerung durchgeführt werden. Zu dieser Zeit stellen Solaranlagen ihren Betrieb weitestgehend ein und Menschen schalten zu Hause das Licht ein. Das Experiment biete Anlass über Uhrzeiten zu diskutieren, zu denen der Einsatz der PSW als Stromerzeuger sinnvoll sein kann. Abbildung 23 zeigt den Stromverbrauch in Deutschland tageszeitabhängig an drei Wochentagen (Montag bis Mittwoch). Es lässt sich erkennen, dass PSW vor allem morgens um 8:00 Uhr und abends um 20:00 Uhr zur Stromproduktion eingesetzt werden. Die Spitzenlasten entstehen allerdings eher in der Mittagszeit. Diese Daten können mit Teilnehmenden unter der Fragestellung, weshalb bei der mittäglichen Verbrauchsspitze die PSW in der Regel keinen Strom erzeugen, diskutiert werden. Bei der Lösung dieser Fragestellung (mittags wird viel Solarstrom erzeugt) kann noch einmal der Beitrag von PSW zur Nutzbarmachung von regenerativen Energien offengelegt werden.

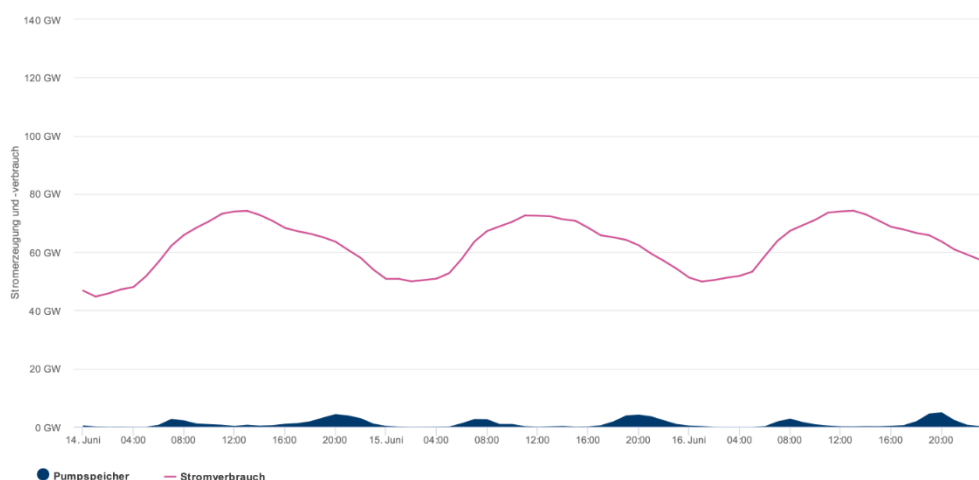


Abbildung 23: Stromverbrauch und durch PSW generierter Strom vom 14.06.- 16.06. in Deutschland¹⁰⁹

¹⁰⁹ Nach Agora Energiewende 2021.

8 Anregungen

8.1 Einbindungsmöglichkeiten im Lehrplan und im Physikunterricht

Die Projektarbeit liefert wie in 7.2 bereits erwähnt Möglichkeiten Forderungen aus dem Kerncurriculum für Physik nachzukommen. Im Besonderen greift es das Thema Energie in Umwelt und Technik auf. Vor der 10. Klasse sollen beispielsweise an hessischen Realschulen Schwerpunkte auf „Energietransport“ und „Energiestrom in die Umgebung als Entwertung von Energie“ gelegt werden.¹¹⁰ Im Rahmen des Physikunterrichts kann hier auch der Energiebegriff deutlicher vom Begriff Kraft getrennt werden. So können die Wandlungsprozesse der Energieformen klarer am Modell dargestellt werden.

Kraftwerke können immer als Grundlage für eine Behandlung des Haushaltsstroms sein. Transformation von Strom zur technischen Übertragung wird als Bezug zum Kompetenzbereich der Erkenntnisgewinnung in Klasse 10 aufgeführt. Dazu zählt auch der inhaltliche Schwerpunkt der Energiespeicherung und der Umwandlung von Energieformen.¹¹¹ Es scheint jedoch sinnvoll standortabhängig über die Wahl des Kraftwerks zu entscheiden, um dem Aufruf nach Alltagsnähe gerecht zu werden. Schülerinnen und Schüler an der hessischen Bergstraße könne beispielsweise von weitem das Atomkraftwerk Biblis sehen. PSW sind in weitem Umkreis weder zu sehen noch in angemessener Zeit zu erreichen.

8.2 Anwendung weiterer Spannungsquellen

Nicht nur Solarmodule, auch Windräder stellen eine nicht planbare Energiequelle dar. Es ist also denkbar, das PSW mit Windenergie zu betreiben, wozu allerdings ein passender Generator recherchiert oder entwickelt werden muss. Die Wechselbeziehung von Windkraftwerken und PSW lässt sich jedoch nicht ganz so eindeutig offenlegen wie in 6.1.3 mit Solarenergie geschehen und ist daher didaktisch anders aufzubereiten.

Ein Betrieb der Pumpe mit einer Handkurbel oder einer Art Indoorbike könnte der betreibenden Person vermitteln, welche Arbeit in die Pumpe investiert wird und einen Vergleich zu der Arbeit, welche beim Generatorbetrieb tatsächlich nutzbar gemacht wird, liefern.

¹¹⁰ Hessisches Kultusministerium 2021b.

¹¹¹ Vgl. Hessisches Kultusministerium 2021b.

8.3 Weiterentwicklung des Modells

Neben der in 8.2 genannten Spannungsquellen ist auch eine Weiterentwicklung des Modells selbst nicht ausgeschlossen. So wurden im Modell Gartenschläuche verwendet, mit dem Hintergedanken, diese seien ohnehin vorhanden und müssen nicht neu angeschafft werden. Jene Schläuche könnten gegebenenfalls durch transparente Schläuche ersetzt werden, sodass der Wasserfluss im Modell beobachtet werden kann. Vor allem in Versuch 2 kann dieser Einblick deutlich machen, wie die Grenze, an der das Wasser ohne Außeneinwirkung (der Umgebungsluftdruck ausgenommen) fließt, zustande kommt. Auch ein anderes Material oder ein anderer Durchmesser der Schläuche oder auch Rohre kommen in Frage.

Zur Steigerung der Förderhöhe können mehrere Pumpen das Wasser stufenweise fördern. Eventuell können dadurch interessantere Verbraucher zum Laufen gebracht werden. Weitere Entwicklungsideen und Upgrades wurden bereits in 6.5 angesprochen.

9 Fazit

Ziel der vorliegenden Arbeit war es anhand der PSW Waldeck I und Waldeck II eine Lehreinheit zu Wasserkraftwerken, vorwiegend in Bezug auf PSW und deren Rolle im deutschen Stromnetz, zu konzipieren und vorzustellen. Zu diesem Zweck wurde ein Modell entwickelt, welches Lernenden die Funktionsweise von Wasserkraftwerken anschaulich vermittelt. Durch die Ausarbeitung einer Lehr- und Lerneinheit im außerschulischen Kontext wurde ein Leitfaden für eine mögliche Implementierung und praktische Anwendung des Modells geschaffen.

9.1 Das PSW als Lernobjekt

PSW überzeugen durch ihren hohen Wirkungsgrad und den relativ geringen Investitionskosten pro kW. In Deutschland sind die geeigneten Standorte jedoch weitestgehend erschöpft. Dabei geht es weniger um den erheblichen Eingriff in die Natur, also um die geologische Lage.¹¹² Sie sind durch den Einzugsradius daher nur bedingt Alltagsgegenstand für Schülerinnen und Schüler.

PSW bieten ein umfangreiches Spektrum an technischen Bauteilen, deren Funktionsweise eigene Projekte füllen können. Eine didaktische Reduktion ist daher besonders im Hinblick auf heterogene Lerngruppen schwierig. Dabei scheint es unvermeidbar bestimmte Schülervorstellungen nicht zu verbessern oder falsch zu festigen. Dabei ist der Grat zwischen Nutzen, in diesem Fall vor allem dem Erreichen affektiver und psychomotorischer Lernziele und Kosten, hier ungenau definierte Begriffe, die fehlerhafte Vorstellungen festigen, schwer abzuwägen.

Schlussendlich sind PSW vor allem deshalb interessant, weil sie eine Antwort auf die Frage liefern, wie regenerative Energien zeitunabhängig nutzbar gemacht werden.

9.2 Außerschulische Lernorte und Lerninhalte

Außerschulische Lernorte wecken häufig die Hoffnung eine Abwechslung zum Schulalltag zu bieten. Dabei scheint es vorrangig weniger um den Standort als um die Art und Weise des Lernens zu gehen. Die Forderung nach Alltagsbezügen und Anwendbarkeit der Lerninhalte steht scheinbar dem institutionalisierten

¹¹² Vgl. Mauch et al. 2009.

Lernen mit starren Kerncurricula der Schule gegenüber. Dabei stellt sich vor allem die Frage, inwieweit kognitive Lernziele erreicht werden oder erreicht werden sollen.

Die Vorteile von formellem Lernen zeigen sich, wenn komplexe Sachverhalte ein umfangreiches Vorwissen voraussetzen, um tiefer durchdrungen zu werden. Inwieweit außerschulische Lernorte Ergänzung oder Basis zum Erwerb der Grundlagen sein können, ist vermutlich individuell verschieden, ebenso wie das Interesse an ihnen verschieden stark sein kann. Als freiwillig und bewusst gewählter Lernort fördern sie aber in jedem Fall das Bewusstsein über eigene Interessen.

9.3 Zum Modell

Das Modell bietet eine Vielzahl an physikalischen Inhalten. Dabei kann zunächst eine grobe Unterteilung in mechanische und elektrische Komponenten gemacht werden. Diese sind im PSW allerdings so verbunden, dass ein tieferes Verständnis der Zusammenarbeit der Komponenten eigentlich nur durch eine Beschäftigung mit den einzelnen Bestandteilen zustande kommen kann. Das Modell liefert ohne fachliches Vorwissen primär ein „Wissen, dass“, als das es für ein tiefes Verständnis der genauen technischen Funktionsweise dient.

Der Wirkungsgrad des Modells ist vergleichsweise niedrig, was allerdings deutliche Ergebnisse ohne genaue Messungen in Bezug auf eben diesen liefert.

Von Pumpe bis Generator kann das Modell als Analogie zu den elektrischen Stromkreisen verwendet werden. Die Pumpe ist hier analog zur Spannungsquelle, die Schläuche analog zu Kabeln und der Generator bleibt ein Wandler, jedoch anderer Energieformen. Ist der Begriff der potenziellen Energie gut vermittelt lässt sich diese analog zur Spannung als elektrischem Potenzial beschreiben. Der Volumendurchfluss des Wassers bildet eine Analogie zur Stromstärke.

9.4 Zum Projekt

Das Erreichen der für das Projekt angesetzten Ziele hängt von vielen Faktoren ab, nicht zuletzt, weil auch die Lernziele nicht linear formuliert werden können. Ein Ferienlager sollte im Gegensatz zur Schule Freiwilligkeit voraussetzen, wobei dies nicht zwangsläufig für die Angebotenen Programmpunkte gilt. Das Projekt bietet den Teilnehmenden die Möglichkeit sich mit Energie und deren Umwandlung auseinander zu setzen. Dabei kann qualitatives Wissen, sowohl über

PSW und deren Bedeutung im Versorgungsnetz, so wie über die Umwandlung von Energieformen erworben werden. Dabei schafft die räumliche Nähe zwischen Modell und den PSW Waldeck I und II auch ein Gefühl von Größenverhältnissen. Die Jugendlichen haben außerdem die Möglichkeit sich an elektrotechnischem Arbeiten zu versuchen und erhalten somit Einblicke in dieses Berufsfeld. Der zeitliche Rahmen für die Durchführung sowie die zu erwartend heterogene Lerngruppe lässt schwer beurteilen, wie effizient Begriffsbildungen und Fachwissen in der Praxis vermittelt werden können. Im Rahmen eines Ferienprogramms lässt sich aber eine motivierte Zielgruppe erhoffen und das im Rahmen der Arbeit entwickelte Modell im Rahmenprojekt haben das Potenzial die gewünschten Lerninhalte praxisbezogen und anschaulich zu vermitteln.

Anhang

Anhang 1: Technische Daten der PSW Waldeck I und II

(Manuskript zur Verfügung gestellt von Herrn Matthias Lange, Infozentrum Waldeck, nicht zur weiteren Veröffentlichung im Internet freigegeben)

-

Anhang 2:

Edersee-Challenge

Gruppe: _____

1. Wie lang ist die Edertalsperre?
2. Welche Menge Wasser passt in das Rohrstück, das an der Bergstation der Peterskopfbahn ausgestellt ist?
3. Wie viel Wasser passt in das Speicherbecken von Waldeck I?
4. Wie hoch war der Wasserstand des Edersees an der Talsperre während des Besuchs?
5. Wie viel Strom erzeugen die beiden Pumpspeicherkraftwerke Waldeck I und Waldeck II?

	Leistung der Kraftwerke
Waldeck I	
Waldeck II	

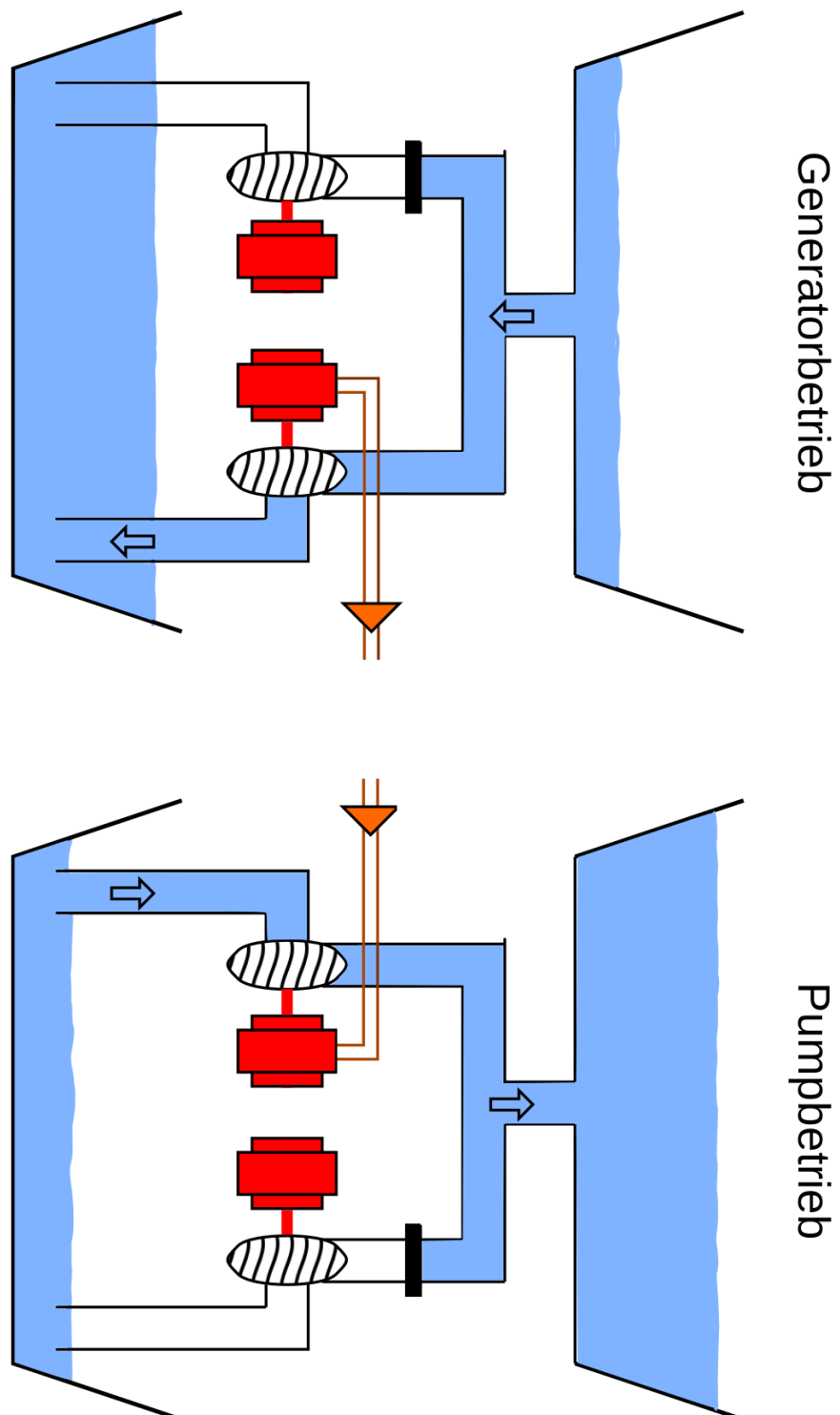
6. Wie lange benötigt die Standseilbahn, um bergauf und bergunter zu fahren?

Talfahrt	Benötigte Zeit

[illegible]

Anhang 3:

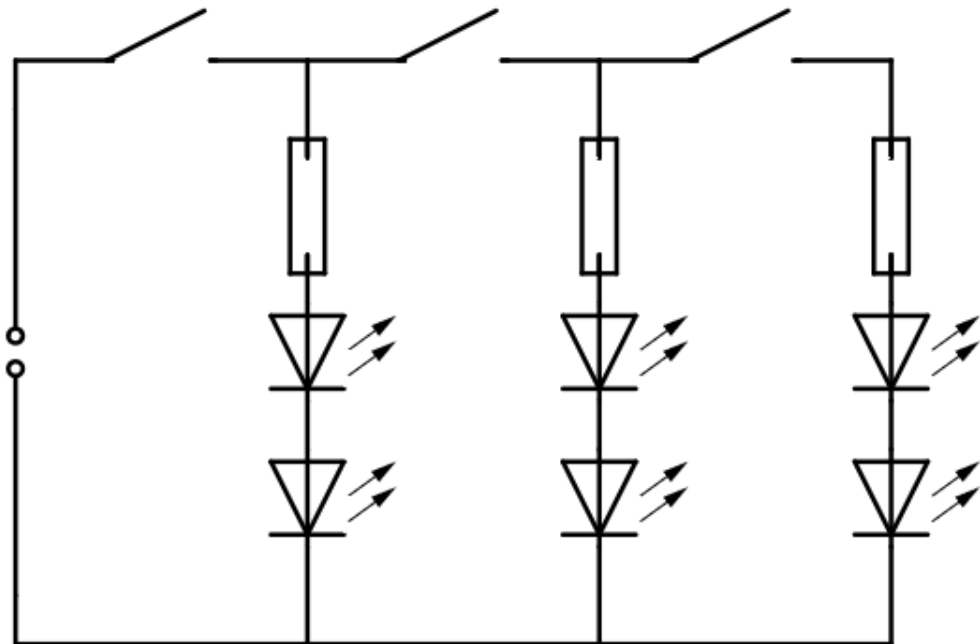
Schematische Darstellung eines PSW



Nach: (wdwd 2014)

Anhang 4:

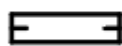
Schaltplan und Legende



= Spannungsquelle



= Schalter



= Widerstand



= Leuchtdiode

Eigene Abbildung erstellt unter Verwendung von (rabe 2021)

Anhang 5:

Liste für Schaltungen mit verschiedenen LEDs und ihren Vorwiderständen an einer Spannung von 12V

Eine LED mit Vorwiderstand

Farbe	Betriebsspannung*	Vorwiderstand
blau	3,3V	442 Ω
rot	2,3V	510 Ω
grün	2,1V	510 Ω
gelb	2,1V	510 Ω
weiß	3,5V	442 Ω

Zwei gleichfarbige LED in Reihe mit Vorwiderstand

Farbe	Betriebsspannung*	Vorwiderstand
blau	3,3V	280 Ω
rot	2,3V	390 Ω
grün	2,1V	412 Ω
gelb	2,1V	412 Ω
weiß	3,5V	267 Ω

*Betriebsspannung und entsprechend benötigter Vorwiderstand kann je nach Bauart abweichen

Literaturverzeichnis

- Agora Energiewende (Hg.) (2021): Agorameter. Stromerzeugung und Stromverbrauch. Online verfügbar unter https://www.agora-energiewende.de/service/agorameter/chart/power_generation/14.06.2021/15.06.2021/, zuletzt geprüft am 25.06.2021.
- Allchin, D. (2011): Evaluating knowledge of the nature of (whole) science. In: *Science Education* 95 (3), S. 518–542.
- Baar, R.; Schönknecht, G. (2018): Außerschulische Lernorte. Didaktische und methodische Grundlagen. 1. Aufl. Weinheim, Basel: Beltz (Bildungswissen Lehramt, Band 30).
- Bailer-Jones, D. M. (2002): Scientists' Thoughts on Scientific Models. In: *Perspectives on Science* 10 (3), S. 257–301.
- Behle, J.; Wilhelm, T. (2017): Aktuelle Schülerrahmenkonzepte zur Energie. In: *Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik*, S. 99–107. Online verfügbar unter <https://publications.rwth-aachen.de/record/719787/files/719787.pdf>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.
- Benzler, H. J.; Frenzel, E.; Hohenberger, L.; Kellner, Robert (2019): Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht. Empfehlung der Kultusministerkonferenz. Hg. v. Kultusministerkonferenz. Online verfügbar unter https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/1994/1994_09_09-Sicherheit-im-Unterricht.pdf, zuletzt aktualisiert am 14.06.2019, zuletzt geprüft am 25.06.2021.
- BMWi (Hg.) (2012): Das deutsche Stromnetz. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/abbildung-das-deutsche-stromnetz.html>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.
- BMWi (Hg.) (2021): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2020-excel.html>, zuletzt aktualisiert am 28.02.2021, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Breitkopf, A. (2020): Weltweiter Stromverbrauch in den Jahren 1980 bis 2017. Hg. v. Statista. U.S. Energy Information Administration. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/239764/umfrage/weltweiter-stromverbrauch/>, zuletzt aktualisiert am 05.11.2020, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Bundesagentur für Arbeit (Hg.) (o.J.): Gelungene Berufsorientierung an Schulen der Sekundarstufe I. Checkliste der Bundesagentur für Arbeit und der Bundesarbeitsgemeinschaft SCHULEWIRTSCHAFT. Online verfügbar unter https://www.arbeitsagentur.de/datei/Checkliste_ba015053.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Duden Lernattack GmbH (Hg.) (2021): Schülerlexikon. Stichwort: Modelle. Online verfügbar unter <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/modelle>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Dünkel, W. (2009): Exkursionen in die Pumpspeicherkraftwerke Waldeck I und II in den Jahren 2006 und 2009. Hg. v. VDE Bezirksverein Kassel e.V. Online verfügbar unter <https://www.vde-kassel.de/de/veranstaltungen/berichte-bis-2011/berichte-2009/2009-08-26>, zuletzt aktualisiert am 28.12.2016, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Edersee Marketing GmbH (Hg.) (2021a): Gruppenreisen mit Erlebnisfaktor. Online verfügbar unter <https://www.edersee.com/de/service/gruppenangebote>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Edersee Marketing GmbH (Hg.) (2021b): Tourenplaner Edersee. Online verfügbar unter <https://touren.edersee.com/de/tourenplaner/>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

enjoysolar (Hg.) (2021): enjoysolar® Mono 20W Solarpanel - Solarmodul Solarzelle Photovoltaik, Monokristallin 20 W, 12 V. Online verfügbar unter https://www.amazon.de/enjoysolar-Monokristallin-Solarmodul-Solarpanel-Wohnmobil/dp/B07FYJTBQR?pd_rd_w=idj0l&pf_rd_p=e78ffdc6-f1b9-4ed7-95f6-01f88bf38b24&pf_rd_r=1MSXQSTZ1D35B4GX7AXM&pd_rd_r=9907a36f-e2df-4481-ac1f-2a487124016f&pd_rd_wg=r9wm5&pd_rd_i=B07FYJTBQR&psc=1&ref_=pd_bap_d_rp_2_i, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

- Giancoli, D. C.; Eibl, O. (2015): Physik. Lehr- und Übungsbuch. 3., aktualisierte Aufl., 5. Dr. München: Pearson (Pearson Studium, 4023).
- Giesecke, J.; Mosonyi, E. (2009): Wasserkraftanlagen. Planung, Bau und Betrieb. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Girwidz, R. (2020): Experimente im Physikunterricht. In: E. Kircher, R. Girwidz und H. E. Fischer (Hg.): Physikdidaktik. Grundlagen. 4. Aufl. Berlin: Springer Spektrum, S. 263–291.
- Google (2021): Sportjugend Hessen | Sport-, Natur- und Erlebniscamp. North Dakota. Online verfügbar unter <https://www.google.com/maps/place/Sportjugend+Hessen+%7C+Sport-,+Natur-+und+Erlebniscamp/@51.1818534,8.9255686,347m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x47bb778ce43531cd:0x87efc70c3b39a63c!8m2!3d51.1817575!4d8.9269442>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.
- Greinke, L. (o.J.): Die Wasserkraftwerke der E.ON Wasserkraft GmbH am Edersee. Online verfügbar unter <http://www.lothar-greinke.de/pumpspei.html>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.
- Griffin, J.: Learning to learn in informal science settings. In: Research in Science Education, 1994., Bd. 24, S. 121–128. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF02356336.pdf>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.
- Grimm, N.; Zoch, I. (2010): Pumpspeicherwerke und ihr Beitrag zum Ausbau erneuerbarer Energien. Zentrale Ergebnisse des energiewirtschaftlichen Gutachtens zum Neubauvorhaben Pumpspeicherwerk Atdorf. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH. Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9107_Fachbroschuere_Pumpspeicherwerke.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2021.
- Guderian, P. (2006): Wirksamkeitsanalyse außerschulischer Lernorte. Der Einfluss mehrmaliger Besuche eines Schülerlabors auf die Entwicklung des Interesses an Physik. Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin. Online verfügbar unter <https://edoc.hu-berlin.de/bitstream/handle/18452/16262/guderian.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Hammer, K.; Ripper, J.; Schenk, T. (2019): Leitfaden Berufsorientierung. Praxishandbuch zur qualitätszentrierten Berufs- und Studienorientierung an Schulen. 9., aktualisierte Aufl. Gütersloh: Verlag Bertelsmann Stiftung.

Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M. (2017): Taschenbuch der Mathematik und Physik. 6. Aufl.: Springer Berlin Heidelberg.

Hessisches Kultusministerium (Hg.) (2021a): Berufliche Orientierung. Online verfügbar unter <https://kultusministerium.hessen.de/foerderangebote/berufliche-orientierung>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Hessisches Kultusministerium (Hg.) (2021b): Kerncurricula Sekundarstufe I. Physik. Online verfügbar unter <https://kultusministerium.hessen.de/schulsystem/bildungsstandards-kerncurricula-und-lehrplaene/kerncurricula/sekundarstufe-i/physik>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Hoffmann, L.; Häußler, P.; Lehrke, M. (1998): Die IPN-Interessenstudie Physik. Kiel: IPN.

Höfling, O. (2017): Formeln und Einheiten. Sekundarstufe II. 20. Aufl. Seelze: Aulis Verlag.

Höhne, C. (2013): Großes Petri-Unheil in der Fischwüste. Naturpark Kellerwald-Edersee will Affolderner See ökologisch aufwerten. Hg. v. Verlag Die-richts GmbH & Co KG. Online verfügbar unter <https://www.hna.de/lokales/frankenberg/grosses-petri-unheil-fischwueste-5397102.html>, zuletzt aktualisiert am 31.01.2013, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

HSeaMall (Hg.) (2021): HSEAMALL Brushless Tauch Mini Wasserpumpe DC 12 V Amphibienpumpe 800L / H 5 Mt. Online verfügbar unter https://www.amazon.de/HSEAMALL-Brushless-Wasserpumpe-Amphibienpumpe-Gartenteich/dp/B07L89V1N6?pd_rd_w=idj0l&pf_rd_p=e78ffdc6-f1b9-4ed7-95f6-01f88bf38b24&pf_rd_r=1MSXQSTZ1D35B4GX7AXM&pd_rd_r=9907a36f-e2df-4481-ac1f-2a487124016f&pd_rd_wg=r9wm5&pd_rd_i=B07L89V1N6&psc=1&ref_=pd_bap_d_rp_4_i, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Irzik, G.; Nola, R. (2011): A family resemblance approach to the nature of science for science education. In: *Science & Education* (20), S. 591–607.

Joachim Herz Stiftung (Hg.) (2021): Energieformen. Online verfügbar unter <https://www.leifiphysik.de/mechanik/arbeit-energie-und-leistung/grundwissen/energieformen>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungstechnik (Hg.) (o.J.): Stoffwerte - Flüssigkeiten. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Online verfügbar unter https://www.lss.ovgu.de/lss_media/Downloads/Lehre/Stro%CC%88mungsmechanik/Arbeitsheft/IV.pdf.

Leuschner, U. (o.J.): Energie-Wissen. Das Herzstück in allen Kraftwerken: Ein rotierender Magnet in einer Spule. Online verfügbar unter <https://www.udo-leuschner.de/basiswissen/SB123-01.htm>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Lippegaus-Grünau, P.; Mahl, F.; Stolz, I. (2010): Berufsorientierung. Programme und Projekte von Bund und Ländern, Kommunen und Stiftungen im Überblick. Hg. v. Deutsches Jugendinstitut e.V. Online verfügbar unter https://www.dji.de/fileadmin/user_upload/bibs/9_11904_Berufsorientierung_Programme_und_Projekte_Mahl.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Lucas, A. M. (1983): Scientific Literacy and Informal Learning. In: *Studies in Science Education* 10, S. 1–36. Online verfügbar unter <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/03057268308559903>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Mauch, W.; Mezger, T.; Staudacher, T. (2009): Anforderungen an elektrische Energiespeicher. Stationärer und mobiler Einsatz. Hg. v. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. Online verfügbar unter https://www.ffe.de/download/Veroeffentlichungen/2009_VDIFulda_paper_mauch_mezger_staudacher.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Provadis Partner für Bildung und Beratung GmbH (Hg.) (2020a): Teilnahmehinweise zu den BOOM-Feriencamps. Online verfügbar unter <https://www.nachhaltige-berufsorientierung.de/menue/feriencamps/teilnahme-hinweise.html>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Provadis Partner für Bildung und Beratung GmbH (Hg.) (2020b): Was ist BOOM? Online verfügbar unter <https://www.nachhaltige-berufsorientierung.de/menue/boom/was-ist-boom.html>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

rabe (2021): Schaltplan erstellen. Hg. v. Geogebra. Online verfügbar unter <https://www.geogebra.org/m/FeuwyUjj>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

RADschlag (2021): Tourenlänge: Tipps und Faustregeln. Hg. v. ACE Auto Club Europa e.V., Institut für Natursport und Ökologie der Deutschen Sporthochschule Köln und Verkehrsclub Deutschland e. V. (VCD). Online verfügbar unter <http://www.radschlag-info.de/2781.html>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Rudnicka, J. (2019): Entwicklung der Weltbevölkerungszahl von Christi Geburt bis 2020. Hg. v. Statista. UN DESA. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1694/umfrage/entwicklung-der-weltbevoelkerungszahl/>, zuletzt aktualisiert am 18.06.2021, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Schabbach, T.; Wesselak, V. (2012): Energie - Die Zukunft wird erneuerbar: Springer Berlin Heidelberg (Technik im Fokus).

Schecker, H.; Duit, R. (2018): Schülervorstellungen zu Energie und Wärmekraftmaschinen. In: H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf und R. Duit (Hg.): Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 163–183.

Schecker, H.; Wilhelm, T.; Hopf, M.; Duit, R. (Hg.) (2018): Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Spinath, B.; Dickhäuser, O.; Schöne, C. (Hg.) (2018): Psychologie der Motivation und Emotion. Grundlagen und Anwendung in ausgewählten Lern- und Arbeitskontexten. Göttingen: Hogrefe Verlag GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <https://elibrary-hogrefe-com.proxy.ub.uni-frankfurt.de/content/pdf/10.1026/02876-000.pdf>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Spring, E. (2009): Elektrische Maschinen. Eine Einführung. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).

Stracke, S. (2021): Standseilbahn zum Peterskopf. Technische Daten. Online verfügbar unter <http://standseilbahn-zum-peterskopf.de/Die-Bahn/>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Uniper SE (Hg.) (2019): Überholung eines Maschinensatzes im Pumpspeicherkraftwerk Waldeck 2. Online verfügbar unter <https://anlagenservice.uniper.energy/referenzen/2019/ueberholung-maschinensatz-pumpspeicher-kraftwerk-waldeck-2>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Uniper SE (Hg.) (2020): Stromerzeugung - Länder. Online verfügbar unter <https://www.uniper.energy/de/stromerzeugung/laender>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Uniper SE (Hg.) (2021): Waldeck. Wertvoller Spitzenlaststrom aus Wasserkraft. Online verfügbar unter <https://www.uniper.energy/de/waldeck>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Wagner, A.; Mengler, A.; Schaefer-Brandt, V.; Bloß, M.; Kunde, S. (2015): Das Pumpspeicherkraftwerk Waldeck II. Exkursionsbericht. Hg. v. Technische Universität Darmstadt. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Online verfügbar unter https://www.wasserbau.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_wasserbau/daten_pdf/exkursionen/startseite_2/PSW_Waldeck_II.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Wagner, S. (2017): Erklärungen physikalischer Phänomene mit Modellen. Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät.

wdwd (2014): Prinzip Pumpspeicherkraftwerk. Prinzipanordnung von Pumpe, elektrischer Maschine und Turbine als Ternärer Maschinensatz in einem Pumpspeicherkraftwerk. Online verfügbar unter https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prinzip_Pumpspeicherkraftwerk.svg#globalusage, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Wellington, J. (1990): Formal and informal learning in science. The role of the interactive centres. In: *Physics Education* (25), S. 247–252. Online verfügbar unter <https://iopscience-iop-org.proxy.ub.uni-frankfurt.de/article/10.1088/0031-9120/25/5/307/pdf>, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Wiesner, H.; Schecker, H.; Hopf, M. (2018): Physikdidaktik. Kompakt. 4. Aufl. Seelze: Aulis Verlag.

Winkelmann, J. (2019): Idealisierungen und Modelle im Physikunterricht. In: *Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik*, S. 227–231.

Yosoo (Hg.) (2021): Yosoo DC Wasser Turbine Generator 12V DC 10W Mikro-Hydro. Online verfügbar unter https://www.amazon.de/Yosoo-Turbine-Generator-Mikro-Hydro-Aufladen/dp/B00ZCBN-NOC?pd_rd_w=5WXWm&pf_rd_p=e78ffdc6-f1b9-4ed7-95f6-01f88bf38b24&pf_rd_r=V4HR3FMYHM9BSTFF65J4&pd_rd_r=4a49fc9a-

b93e-40cb-a754-b952aac5910d&pd_rd_wg=oxcnf&pd_rd_i=B00ZCBN-
NOC&psc=1&ref_=pd_bap_d_rp_7_i, zuletzt geprüft am 25.06.2021.