



Photovoltaik

WAS IST DAS UND WIE FUNKTIONIERT ES?

KIM SÖREN DIESEL



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Sozialfonds



Kursskript

Inhalt

1. Einleitung	1
1.1 Einleitung Photovoltaik	1
1.2 Wichtige Begriffe	2
2. Theoretische Grundlagen	3
2.1 Sachanalyse	3
2.2 Didaktische Einordnung.....	6
3. Ablauf des Workshops.....	9
3.1 Eingangsphase	9
3.2 Erarbeitungsphase	9
3.3 Abschlussphase	10
4. Versuche/Versuchsteil.....	11
4.1 VOLTA'sche Säule	11
4.2 Vermessung einer Solarzelle	13
4.3 Reihen- und Parallelschaltung mehrerer Solarzellen	14
4.4 Verschattung einer Solarzelle	15
4.5 Einfluss der Lichtintensität und des Eintrittswinkels	17
4.6 Farbstoffsolarzelle – die GRÄTZEL-Zelle	19
5. Ausblick	22
Literaturverzeichnis	23
Abbildungsverzeichnis.....	24

Kursskript

1. Einleitung¹

Durch endliche Ressourcen an fossilen Brennstoffen, gewinnen erneuerbare Energien wie Wasserkraft, Wind- und Solarenergie immer mehr an Bedeutung. Auch der voranschreitende Klimawandel macht die Verwendung von umweltfreundlicheren Energieträgern zunehmen wichtig, sodass Kohle- und Kernkraftwerke auf lange Sicht im Betrieb eingestellt werden sollen.

Unter den erneuerbaren Energien ist besonders die Solartechnik sehr lukrativ, da der Energieträger nahezu unbegrenzt verfügbar ist, den Tag-Nacht-Rhythmus mal ausgenommen. IN der Solartechnik wird Sonnenstrahlung die in die Erdatmosphäre eindringt zur Energiegewinnung eingesetzt. Dabei werden zwei grundlegende Prinzipien unterschieden.

1.1 Einleitung Photovoltaik

Jährlich erreicht eine Solarstrahlung, die zur Erzeugung von 1,5 Zeta-Watt-Stunden (ZWh) reichen würden, die Erdhülle. Davon erreichen lediglich 53 % die Erdoberfläche, die wiederum zu etwa 35 % aus Landmasse besteht. Extraterrestrisch entspricht das auf einer horizontalen Empfängerfläche etwa 1,3 kW/m², terrestrisch wird etwa 1 kW/m² erreicht. Die genaue Leistung ist abhängig vom Standort und den Umgebungsbedingungen, so wird in sonnenreichen Regionen eine höhere Leistung erreicht, als in eher schattigen Regionen.

Die Solarthermie nutzt die einfallende, kurzwellige Solarstrahlung zur Erwärmung eines Absorbers. Der erwärmte Absorber wird gekühlt und die Wärme mittels Kühlflüssigkeit an einen Nutzer überführt.

Die Erforschung von photovoltaischen Effekten reichen von Becquerel im Jahr 1839, über Hertz und Hallwachs (1887/88) bis in die 1930er Jahre, in denen erste theoretische Analysen zur Nutzung dieser Effekte zur Energiegewinnung durchgeführt wurden. Um 1950 wurden erstmalig Solarzellen, extraterrestrisch zur Versorgung von Satelliten eingesetzt. Über die 1970er Jahre wurde weiter an Solarzellen, für eine terrestrische Nutzung, geforscht und 1983 erste Installationen vom Fraunhofer ISE parallel zum Netzbetrieb vorgenommen. 2013 umfassten die Photovoltaik-Anlagen bereits 6 % der Stromproduktion.

Photovoltaik-Anlagen nutzen eindringende Strahlung zur Stromerzeugung. Unter den Photovoltaik-Anlagen sind verschiedene Modelle im Einsatz. Da ein Großteil der kommerziell genutzten Anlagen auf dem Halbleiter Silicium basieren, wird die Funktionsweise exemplarisch daran erläutert.

¹ (Zahoransky, 2019)

Kursskript

1.2 Wichtige Begriffe

Die Bezeichnung Photovoltaik lässt sich über die Wortbestandteile erklären. Es handelt sich dabei um das griechische Wort „photo“ für Licht und dem Nachnamen Alessandro Voltas, einem italienischen Pionier der Elektrotechnik.

Die Solarstrahlung wird als Globalstrahlung bezeichnet und kann in zweierleiweise auftreten. Die direkte Solarstrahlung trifft ungestreut und somit gerichtet auf Objekte auf. Die Diffuse Strahlung ungerichtet und somit gestreute Solarstrahlung.

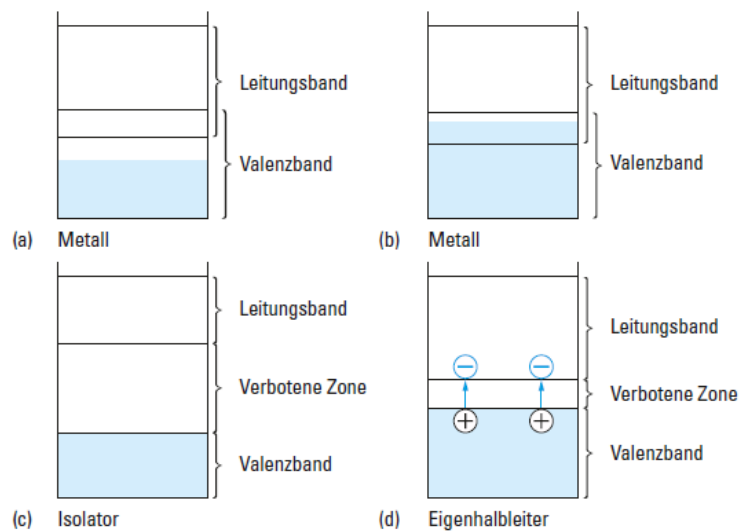


Abbildung 1: Bändermodell: Leiter, Nicht-Leiter, Halbleiter²

Alle Stoffe lassen sich Grundlegend nach leitend, nicht-leitend oder aber als halb-leiter klassifizieren. Bei den sogenannten Leitern handelt es sich um Stoffe, die in ihrer natürlich vorliegenden Form leitend sind, Nicht-Leiter können das nicht und werden daher auch als Isolatoren bezeichnet. Als Halbleiter werden Stoffe bezeichnet, die durch eine äußerliche energetische Anregung in einen leitfähigen Zustand bringen lassen.

² (Riedel & Janiak, 2022)

Kursskript

2. Theoretische Grundlagen

Zur Einschätzung in welcher Altersklasse dieser Kurs durchführbar ist, werden zunächst die fachlichen Grundlagen dargelegt und im anschließenden Abschnitt mit den Kerncurricula abgeglichen. Daraus ergibt sich eine Übersicht, in welcher Klassen- bzw. Altersstufe die notwendigen Grundkenntnisse erlernt werden und eine erfolgreiche Teilnahme möglich wird.

2.1 Sachanalyse

Die Energiegewinnung in Form von elektrischem Strom lässt sich in verschiedene Abschnitte untergliedern. Die zum Verständnis notwendigen Kenntnisse sind nicht auf eine Wissenschaft zu begrenzen, sodass zum besseren Verständnis der Funktionsweise einer Photovoltaik-Anlage in mehrere Teilabschnitte untergliedert wird. Daraus ergeben sich zum einen der Aufbau einer Solarzelle, zum anderen die ablaufenden Prozesse bei Sonneneinstrahlung. Dem folgend ist die Zusammenschaltung von mehreren Modulen sowie eine Betrachtung der Effizienz von Photovoltaik-Anlagen.

2.1.1 Halbleiter und die Dotierung³

Ob ein Stoff über die Eigenschaft des Leitens verfügt oder nicht, lässt sich mit dem Bändermodell erklären. Bei Metallen (Abbildung 1 a, b) sowie allen Leitern, überlappt das Valenzband mit dem nächsthöheren Band, dem Leitungsband. Wird eine Spannung angelegt, ist eine Elektronenbewegung möglich. Bei Isolatoren (Abbildung 1 c) überlappt das Valenzband nicht. Das Leitungsband wird durch eine breite verbotene Zone vom Valenzband getrennt, dadurch können keine Elektronen in das Leitungsband übertreten. Halbleiter verfügen über eine schmale verbotene Zone. Dadurch können Elektronen durch Anregung in das Leitungsband befördern. Dies führt allerdings zu Defektelektronen im Valenzband.

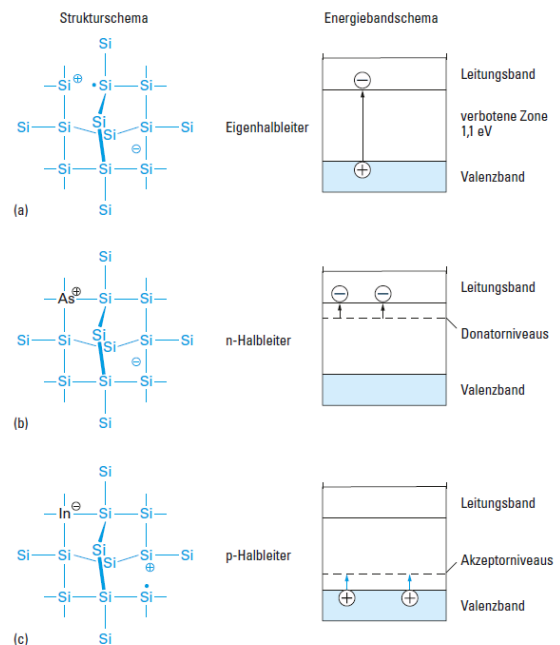


Abbildung 2: n- und p-Dotierung eines Silicium-Gitters

Durch dotieren des Halbleiters (Silicium), wird der Übergang der Valenzelektronen begünstigt. Fremdatome aus der benachbarten Hauptgruppe (15. Gruppe), die ein Valenzelektron mehr besitzen, lassen sich leichter anregen und vereinfachen dadurch den Übergang in das Leitungsband, sie setzen die Schwelle niedriger und werden daher Donatoratome genannt (Abbildung 2 b). Es handelt sich dabei um eine n-Dotierung. Atome aus der benachbarten

³ (Riedel & Janiak, 2022)

Kursskript

Hauptgruppe mit einem Valenzelektron weniger (13. Gruppe) besitzen ein breiteres Valenzband und heben schmälern damit die verbotene Zone (Abbildung 2 c), sie werden als Akzeptoratome bezeichnet. Hierbei handelt es sich um eine p-Dotierung.

Die Konzentration an eingesetzten Störstellen ist äußerst gering, was eine hohe Reinheit für das verwendete Silicium erfordert.

2.1.2 Aufbau einer Photovoltaik-Anlage⁴

Für Photovoltaik-Anlagen werden n-p-dotierte Halbleiter eingesetzt. Die n-dotierte Schicht ist dabei der Sonnenstrahlung zugewandt. Diese Schicht ist sehr dünn, sodass die Sonnenstrahlen direkt auf die Grenzschicht treffen. Die abgewandte, p-dotierte Schicht bleibt dadurch nahezu unberührt.

Wie in Abbildung 3 zu erkennen, ist der positive Pol die n-dotierte Schicht und der negative Pol die p-dotierte Schicht. Die beiden Schichten werden durch ein elektrisches Feld getrennt. Das elektrische Feld verhindert einen direkten Elektronenübergang von der n- in die p-dotierte Schicht.

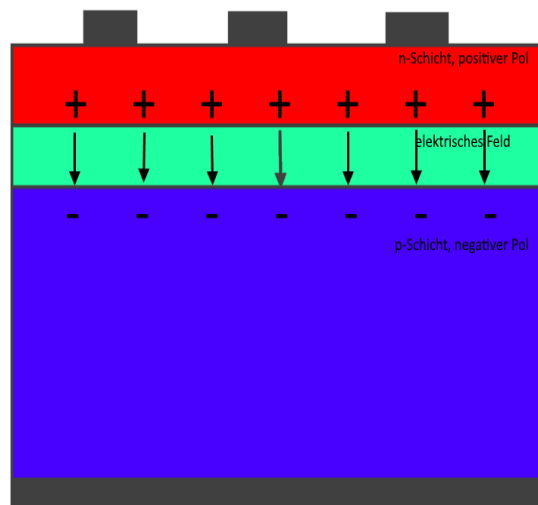


Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Solarzelle

2.1.3 Funktionsweise einer Photovoltaik-Anlage

Wird die n-dotierte Schicht von Sonnenstrahlen getroffen, wird Photonenenergie aufgenommen und Elektronen aus ihren Bindungen herausgelöst. Die dann freien Elektronen erreichen das Leitungsband, der positive Pol wird ausgebildet. Die durch die Elektronenwanderung entstandenen Löcher, auch Defektelektronen genannt, werden aus der p-dotierten Schicht aufgefüllt und es bildet sich ein negativer Pol. Die so entstandenen Pole werden über einen äußeren Leiter verbunden und es fließt ein elektrischer Gleichstrom.

⁴ (Böttcher, 2012)

Kursskript

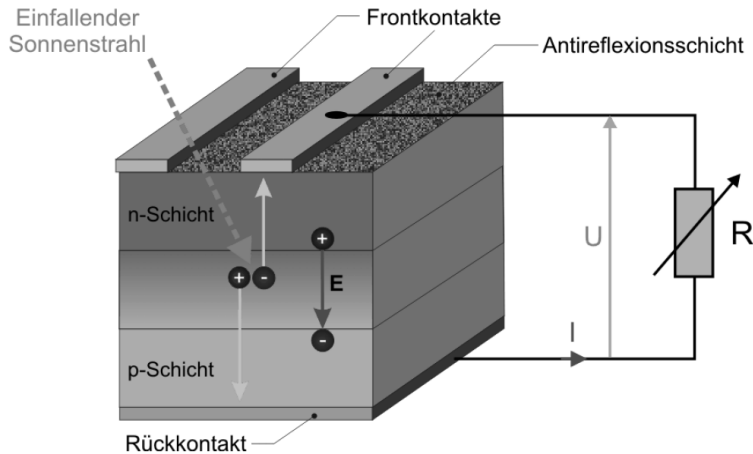


Abbildung 4: Schematischer Aufbau einer Photovoltaik-Anlage

Eine Solarzelle hat Kantenlängen von etwa 15 cm und erzeugt pro Zelle etwas weniger als einem Volt. Daher werden die Zellen in Modulen zusammengeschaltet, ein Modul besteht dann entweder aus 36 oder 72 Zellen.

Photovoltaik-Anlagen erzeugen grundsätzlich Gleichstrom, sodass dieser zunächst in Wechselstrom umgewandelt werden muss, ehe er in das europäische Verbundnetz eingespeist werden kann. Dafür sind Wechselstromspannungen von 230 Volt und eine Frequenz von 50 Hertz erforderlich (Böttcher, 2012). Dazu werden Wechselrichter eingesetzt. Modulwechselrichter können bis Leistungen von 1,4 kWp (Kilowatt-Peak: Maximalleistung einer Photovoltaik-Anlage) eingesetzt werden. Die Ausgangsseite ist parallelgeschaltet, sodass die Einzelleistungen der in Serie geschalteten Photovoltaik-Modulen keine Verluste durch unterschiedliche Strahlungsintensitäten verursachen können. Verbreiteter sind Strangwechselrichter. Dabei werden mehrere in reihe geschaltete Photovoltaik-Module mit dem Strangwechselrichter verbunden. Dazu kommt es aber bei unterschiedlichen Strahlungsintensitäten zu Verlusten. Ebenso müssen hohe Gleichspannungen übertragen werden. Die großen Zentralwechselrichter sind zwar sehr kostengünstig und effizient, aber bei einer Störung fällt der gesamte Anlagenteil aus. Alle Umwandlungen sind Verlust behaftet, sodass zwischen 3 und 7 % der nutzbaren Energie verloren gehen. Im Teillastbetrieb sind die Verluste höher, als im Volllastbetrieb.

2.1.4 Wirkungsgrade von Photovoltaik-Anlagen⁵

Der allgemeine Wirkungsgrad von Solarmodulen liegt aktuell bei Werten um die 20 %, und damit deutlich niedriger als in allen anderen Kraftwerken. Allerdings ist der Rohstoff kostenlos. Als Wirkungsgrad wird das Verhältnis der Nutzenergie zur zugeführten Energie in Prozent verstanden. Es werden also in diesem Fall nur 20 % der zugeführten Energie nutzbar.

⁵ (Müller, 2014)

Kursskript

Über die letzten Jahre wurde der Wirkungsgrad durch neuere Technologien und effizienterem Einsatz der Rohstoffe ein stetiges Wachstum von 0,3 – 0,5 % erreicht. Dieses Wachstum wird aber über die nächsten Jahre nicht anhalten, da das Optimierungspotential relativ ausgereizt ist.

Der Wirkungsgrad variiert bei den einzelnen Modellen sehr. Die höchsten Wirkungsgrade weisen die Zellen auf Basis von monokristallinem Silicium auf. Da die Produktion recht aufwendig und höherpreisig ist werden sie seltener eingesetzt. Daher decken sie nur etwa 5-8 % aller betriebenen Photovoltaik-Anlagen ab.

Einen etwas geringeren Wirkungsgrad (etwa 18 %) weisen polykristalline Silicium-Module auf. Das Blockgussverfahren ist etwas preiswerter als das CZOCHRALSKI-Verfahren der monokristallinen Modelle. Mit diesen Modulen sind etwa 90 % aller Solarparks ausgestattet.

Die Dünnschichtmodelle weisen niedrigere Wirkungsgrade auf (etwa 16 % bei Cadmiumtellurid), sind aber auch deutlich kompakter. Sie sind daher besonders für Hauswände oder Dächer geeignet, was sie besonders für den privaten Einsatz lukrativ macht, aber weniger gut für Solarparks geeignet ist.

Ein weiteres Modell der Dünnschichtmodulen sind Module mit Galliumarsenid, die einen Wirkungsgrad von 28 % erreichen. Diese sind aber aufgrund der geringen Verfügbarkeit der Rohstoffe ungeeignet und kommen daher nur zu Forschungszwecken zum Einsatz.

Im Einsatz erreichen alle Module nicht den genannten Wirkungsgrad, da es durch äußere Einflüsse zu Verlusten kommt. Diese Verluste werden als Performance Ratio zusammengefasst. Bei aktuellen Modulen werden auf das Jahr betrachtet Werte von 80 – 90 % der genannten Wirkungsgrade erreicht.

Durch Optimierungen ist die PR die letzten Jahre ebenfalls angestiegen. In den 1990er Jahren lag diese noch bei nur 70 %. Weitere Optimierungsmaßnahmen versprechen einen Anstieg auf maximal 92 %, danach wird keine nennenswerte Verbesserung mehr möglich sein, da die fehlenden 8 % durch Umweltfaktoren wie Verschattungen zustande kommen.

2.2 Didaktische Einordnung

Die Durchführung für die vorliegende Kursplanung findet an einem außerschulischen Lernort statt. Daher wird der Kurs nicht in eine bestimmte Klassenstufe einsortiert. Der Bezug zu den Kerncurricula dient der Einordnung, welches Vorwissen erforderlich ist. Aus den Curricula ist ersichtlich, in welcher Klassenstufe und somit auch in welcher Altersklasse benötigtes Vorwissen vermittelt wird. Daraus ergibt sich das Mindestalter für die Teilnehmenden des Kurses.

Kursskript

2.2.1 Chemie/Physik⁶

Aus den später beschriebenen Versuchen ist ersichtlich welche Themen den Teilnehmenden nicht fremd sein sollten. Werden die einzelnen Versuche betrachtet spielen neben den Grundkenntnissen für Stromkreise und Schaltungen, Elektro- sowie Redox-Chemie eine größere Rolle. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf den Bereich der Stromkreise, da ein Großteil der Versuche ohne diese Kenntnisse nicht durchgeführt werden können.

Zur Einschätzung wird sich auf das Kerncurriculum Natur für die integrierte Gesamtschule, Jahrgänge 5-10 herangezogen. Der Vorteil dieses Curriculums liegt in der Überschneidung der Teilbereiche Chemie, Physik und Biologie, sodass thematisch genau geschaut werden kann, welcher Themenbereich behandelt wird und nicht nach Fächern unterschieden werden muss.

Das Basiskonzept Stoff-Teilchen-Beziehung führt in den niedrigen Jahrgängen bereits Atome ein und vertieft den Atomaufbau und erweitert das Fachwissen um die Kenntnis von Ionen durch Elektronenübertragung. In den Jahrgängen 9 und 10 werden die Einordnung von Elementen in das Periodensystem anhand des Aufbaus von Atomen behandelt. Das Basiskonzept Struktur-Eigenschafts-Beziehung führt Begriffe wie Leiter und Nichtleiter aber den Jahrgängen 7 und 8 ein. In den Jahrgängen 9 und 10 wird das Periodensystem zur Herleitung von Bindungsarten und der Zusammenhalt von Ionen in Salzen durch etwaige Ladungen behandelt. Das Basiskonzept chemische Reaktion wird erst in den mittleren Jahrgängen behandelt und führt die chemische Reaktion ein. Dabei steht zunächst die Stoffumwandlung im Fokus. Die in der Redox-Chemie zugrunde liegenden Elektronenübertragungen werden erst in den Jahrgängen 9 und 10 eingeführt. Im Rahmenthema technische Geräte erleichtern unseren Alltag werden einfache Stromkreise, sowie die Wirkungen des elektrischen Stroms behandelt. Aus dem Basiskonzept System, Teilkonzept Kreisläufe und Ströme geht hervor, dass in den Jahrgängen 7 und 8 Fachwissen über Stromstärke, Spannung und deren Beziehung oder Zusammenhängen, sowie das Beschreiben von Ladungsträgern und Stromkreise erworben wird. Elektrochemie ist im verwendeten Kerncurriculum nicht vorgesehen

Neben der bereits genannten Themenfeldern aus dem Fach Natur, wird in den unteren Jahrgängen auch das Thema Sonne behandelt. Im Rahmenthema „*Die Sonne bestimmt den Rhythmus des Lebens*“ (Beime, et al., 2012) wird die Sonne und die Nutzung von Sonnenenergie behandelt. Ein Themenkomplex der Unterrichtseinheit beschäftigt sich mit der Nutzung des Sonnenlichts. Dabei stehen sowohl regenerative Energiequellen wie Photovoltaik, als auch die Auswirkung von Licht und Schatten eine Rolle. Damit werden erste Grundlagen bereits in den Jahrgängen 5 und 6 erworben. Diese werden in den Jahrgängen 9 und 10 wieder aufgegriffen und im Basiskonzept Wechselwirkung fortgeführt. Behandelt werden Themen wie die Beeinflussung von Halbleitern und die damit verbundene Anwendung in Photovoltaik-Anlagen.

⁶ (Beime, et al., 2012)

Kursskript

2.2.2 Technik⁷

Photovoltaik-Anlagen haben neben den chemischen oder physikalischen einen großen technischen Aspekt. Zur Festlegung einer geeigneten Altersklasse der Teilnehmenden, werden die für die Versuche notwendigen Grundkenntnisse anhand des Kerncurriculums für den Technikunterricht in Niedersachsen betrachtet.

Der Handlungsbereich 2: Energie und Technik beinhaltet die Themenfelder Energiewandlungssysteme, Antriebssysteme sowie Bauen und Wohnen. Für die Versuche notwendig sind Grundkenntnisse über die Prinzipien der Energiewandlung sowie den Wirkungsgrad aus dem Themenfeld Energiewandlungssysteme. Handlungsbereich 3: Information und Kommunikation bearbeitet die Themenfelder elektrische Stromkreise, Steuern und Regeln sowie Daten verarbeiten und computerautomatisierte technische Prozesse. Für den Workshop relevante Grundkenntnisse findet sich in dem Themenfeld elektrische Stromkreise. Als Fachwissen vermittelt werden sowohl die Kenntnisse zum Zusammenwirken von verschiedenen Bauteilen, als auch Stromkreise und Schaltungen. Dabei wird auch das Messen von verschiedenen Kenngrößen des elektrischen Stroms behandelt.

Leider finden sich im Curriculum zum Fach Technik keine Hinweise darauf, in welchen Altersklassen die einzelnen Handlungsbereiche, beziehungsweise die einzelnen Themenfelder behandelt werden. Nur für den Jahrgang 6 werden die Themen aus dem Handlungsbereich 1 empfohlen, da diese als Grundlage für die anderen Handlungsbereiche darstellen. Allgemein wird Technik erst ab dem 7. Schuljahrgang als Schulfach berücksichtigt, sodass die notwendigen Grundkenntnisse der technischen Aspekte frühestens ab diesem Zeitpunkt angenommen werden können.

2.2.3 Quintessenz

Werden die Bezüge zu den Kerncurricula zusammengeführt, ist durch das Curriculum für Technik keine eindeutige Zuordnung einer geeigneten Altersklasse möglich, da der Technikunterricht nicht klar genug strukturiert ist. Daher wird für die Bestimmung der Altersklasse ausschließlich das Curriculum für Natur berücksichtigt. Das erscheint unproblematisch, da auch in diese, Curriculum alle notwendigen Kenntnisse zu finden sind.

Werden die Grundkenntnisse nach ihrer Notwendigkeit sortiert, sind die Kenntnisse über Stromkreise und Schaltungen, sowie das Messen von den Kenngrößen Stromstärke und Spannung am schwerwiegendsten, sodass eine Altersklasse von 14-16 Jahren empfohlen wird.

Nach einer geeigneten Einführung in das Thema und dem Vorführen der notwendigen Arbeitsschritte, kann nach Betrachtung der Themen des Curriculums auch eine Teilnahme ab 12 Jahren durchaus möglich sein.

⁷ (Diddens, et al., 2012)

Kursskript

3. Ablauf des Workshops⁸

Der Workshop wurde für Teilnehmende ab 12 Jahren konzipiert. Damit eine erfolgreiche Teilnahme stattfinden kann, ist es notwendig alle Teilnehmenden auf annähernd einen Kenntnisstand zu bringen. Daher empfiehlt es sich zu Beginn des Kurses eine Wiederholung beziehungsweise eine Auffrischung der erforderlichen Kenntnisse durchzuführen. Sind soweit alle Grundkenntnisse bei den Teilnehmenden gegeben, kann mit der Durchführung der Versuche begonnen werden. Wichtig ist dabei eine ausreichende Dokumentation für die anschließende Diskussionsrunde. In der Abschlussphase werden die erworbenen Erkenntnisse festgehalten und eine Evaluation des Workshops vorgenommen.

3.1 Eingangsphase

In der Eingangsphase werden die Vorkenntnisse der Teilnehmenden überprüft. Besonders Kenntnisse über die Begriffe Stromstärke, Spannung, sowie Halbleiter und Elektronenübergang sollten geklärt werden. Wichtig sind die Kenntnisse über Stromkreise und Schaltungen wie Reihen- und Parallelschaltung. Hier kann zur Überprüfung ein kleiner Vorversuch eingestreut werden. Graphit ist bei einer entsprechenden Schichtdicke in der Lage Strom zu leiten, sodass mit einem 9 V-Block und einer LED als Hilfsmittel ein funktionierender Stromkreis aufgezeichnet werden kann. Dafür wird auf die fertige Zeichnung der Leiter, also den Bleistiftstrichen, sowohl die Batterie als auch am anderen Ende die LED aufgelegt. Ein funktionierender Stromkreis führt zum Leuchten der LED.

Sind die physikalisch-chemischen Grundkenntnisse geklärt wird das Thema Photovoltaik eingeführt und der Aufbau einer Solarzelle erläutert. Als Einstieg eignen sich visuelle Anregungen erneuerbarer Energien, die mit jedem weiteren Schaustück die Gewinnung von elektrischer Energie durch Sonnenlicht in den Fokus rücken und mit einer Photovoltaik-Anlage enden. Anschließend wird kurz auf die Wirkweise und die Wirkungsgrade eingegangen.

3.2 Erarbeitungsphase

Für die Erarbeitungsphase wird empfohlen die Anordnung der Versuche aus diesem Skript zu übernehmen. Die Versuche sind so geplant, da sie zunehmend und aufbauend das Thema Photovoltaik und Aufbau einer Photovoltaik-Anlage beleuchten. Sinnvoll ist eine Erarbeitung in kleinen Gruppen, etwa 2-3 Teilnehmende, sodass bei jedem Versuch ein ausreichender Kontakt zu den Inhalten möglich ist.

Bevor mit den Teilnehmenden in die Praxisphase übergegangen wird, sollten die Regeln für ein sicheres Experimentieren behandelt werden:

- Lange Haare zusammenbinden

⁸ (Freericks, Brinkmann, & Wulf, 2017)

Kursskript

- Taschen, Rucksäcke und Jacken an den Raum Rand oder dafür vorgesehene Orte unterbringen
- Nur nach einer Einführung für entsprechende Geräte auch damit arbeiten
- Nicht essen und nicht trinken
- Behutsamer Umgang mit den Materialien
- Materialien nur für den dafür vorgesehenen Zweck einsetzen
- Notwendige PSA und Sicherheitseinrichtungen verwenden

Mit dem Versuch zur VOLTA'schen Säule wird die Elektronenübertragung eingeführt. Dies hat zum einen den Hintergrund, das Volta einer der Pioniere der heutigen Solartechnologie ist. Zum anderen spielen sowohl die Elektronenübertragung als auch die Verwendung des Multimeters in den weiteren Versuchen eine große Rolle.

Die Versuche mit den Solarzellen zeigen verschiedene Aspekte der Solartechnologie auf. Begonnen wird mit einer einfachen Zelle um die Module kennenzulernen und den Aufbau einer Solarzelle zu verdeutlichen. Die kommenden Versuche zeigen warum in einem Solarmodul immer eine Reihe von Zellen verschaltet werden und warum eine Kombination aus Reihen- und Parallelschaltung notwendig ist. Als nächstes werden die Einflüsse von Lichtverhältnissen und Lichtintensitäten behandelt. Dies hat Auswirkungen auf die Wahl des Standorts und auch den praktischen Wirkungsgrad einer Photovoltaik-Anlage.

Der letzte Versuch zeigt die Vielfalt von Solarmodulen auf und steht stellvertretend für Solarmodule die nicht auf Silicium basieren. Die GRÄTZEL-Zelle sollte nur mit Teilnehmenden die handwerkliches Geschick aufweisen durchgeführt werden. Er benötigt viel Fingerspitzengefühl und Geduld.

Sind alle Versuche durchgeführt werden sie ausführlich besprochen und essentielle Erkenntnisse festgehalten. Dabei sollte darauf geachtet werden, den Beitrag zu den Ergebnissen seitens der Kursleitung möglichst gering zu halten, um einen Austausch der Teilnehmenden zu fördern.

3.3 Abschlussphase

Ist die Erarbeitungsphase abgeschlossen werden aktuelle Erkenntnisse und Entwicklungen der Forschung vorgestellt. Ebenso sollten Vergleiche mit anderen Erzeugungsarten der elektrischen Energie durchgeführt werden. Wichtig sind dabei Begriffe wie Amortisationszeit und Erntefaktoren, sowie Auswirkungen auf die Umwelt und den Klimawandel.

Auch ein Gespräch mit den Teilnehmenden über die Vor- und Nachteile von Photovoltaik-Anlagen sollte geführt werden, da die Technologie eine wichtige Rolle in der Zukunft übernehmen wird, es aber durchaus einiges zu beachten gilt.

Kursskript

4. Versuche/Versuchsteil

4.1 VOLTA'sche Säule⁹

1. Nummer der Versuchsvorschrift
Versuchsnummer_01

2. Material

Alu-Folie	Filterpapier	Klemme	Kabel
Multimeter	Kupferbleche	Zinkblech	

Natriumchlorid



3. Durchführung

Für den Aufbau der VOLTA'schen Säule werden mehrere Stücke Alu-Folie und Kupferbleche oder 5 - Cent Stücke benötigt. Diese werden gestapelt. Begonnen wird mit einem Stück Kupferblech, darauf wird ein gleichgroßes Stück der Aluminiumfolie gelegt. Wird diese Anordnung mit etwas Salzwasser betropft kann bereits eine niedrige Spannung gemessen werden, es handelt sich dabei um ein galvanisches Element.

Werden mehrere dieser Einzelelemente miteinander verbunden, wird zwischen die einzelnen Elemente ein mit Salzwasser befeuchtetes Stück Filterpapier gelegt.

Sind mehrere Zellen miteinander verbunden, wird die daraus resultierende Spannung gemessen. Dazu wird das Multimeter auf die Messung von Gleichspannung im 2-V-Bereich eingestellt. Anschließend wird das außenliegende Stück Aluminium-Folie mit dem Pluspol und das außenliegende Kupferblech mit dem Minuspol des Multimeters. Die

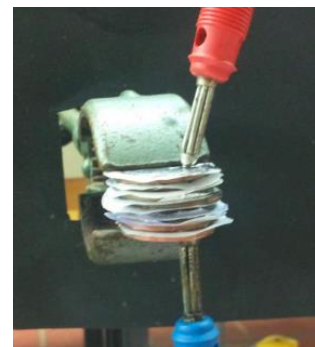


Abbildung 5 Aufbau der VOLTA'schen Säule

⁹ (Bechmann & Bald, 2020)

Kursskript

erzeugte Spannung wird abgelesen. Wird diese Anordnung mit etwas Salzwasser betropft kann bereits eine niedrige Spannung gemessen werden, es handelt sich dabei um ein galvanisches Element.

4. Beobachtung

Je mehr Zellen miteinander verbunden werden, desto höher ist die gemessene Spannung.

Erzeugte Spannung: Einzelzelle: _____ 5 Zellen: _____ 10 Zellen: _____

5. Was steckt dahinter?

Werden Metalle miteinander verbunden, so findet ein Elektronenaustausch statt. Das unedlere Metall gibt Elektronen an das edlere Metall ab. Ob ein Metall edel oder unedel ist, liegt am elektrochemischen Redoxpotential ist in der elektrochemischen Spannungsreihe festgehalten. Dabei wird das elektrische Potential einer (Metall-)Halbzelle unter Standardbedingungen mit einer Wasserstoffhalbzelle verschaltet und die entstehende Spannung gemessen. Unedle Metalle weisen ein negatives Potential auf, edle Metalle ein Positives.

In der vorliegenden galvanischen Zelle laufen folgende Teil-Reaktionen ab:



Bei Aluminium handelt es sich um ein unedles Metall, bei Kupfer um ein edles Metall.

6. Noch ein paar nützliche Tipps

Dieser Versuch kann auch mit anderen Metallen ausprobiert werden und dadurch eine eigene elektrochemische Spannungsreihe aufgestellt werden.

7. Info

In der ursprünglichen VOLTA'schen Säule wurde Zink statt Aluminium verwendet. Darauf wird in diesem Versuch verzichtet, um die umweltschädlichen Eigenschaften von Zink zu umgehen.

Kursskript

4.2 Vermessung einer Solarzelle

1. Nummer der Versuchsvorschrift

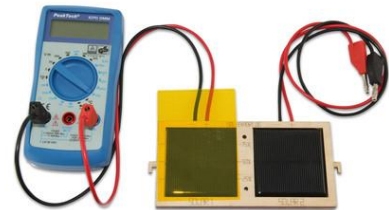
Versuchsnummer_02.1

2. Material

Solarmodul	Multimeter	Kabel	Halogenlampe/ Sonnenlicht

3. Durchführung

Gemessen werden sollen sowohl die Stromstärke als auch die Spannung einer Solarzelle. Dazu wird das Solarmodul mit dem Multimeter verbunden und der entsprechende Messbereich (2-V-Gleichspannung, 2 Ampere) wird ausgewählt. Die gemessenen Werte werden notiert.



4. Beobachtung

Wird die Solarzelle mit energiereichem Licht wie aus einer Halogenlampe oder im Idealfall mit Sonnenlicht bestrahlt, lassen sich eine Stromstärke von etwa 800 mA und eine Spannung von 0,6 Volt erzielt.

Abbildung 6 Photovoltaik Experimentierset von Sol-Expert

Stromstärke: _____

Spannung: _____

5. Was steckt dahinter?

Wird eine Solarzelle durch Lichteinstrahlung angeregt, werden aus der n-dotierten Schicht Elektronen frei und hinterlassen Elektronenlöcher. Diese werden durch Elektronen aus der p-dotierten Schicht gefüllt. Dadurch entstehen ein positiver und ein negativer Pol. Werden diese elektrisch leitend miteinander verbunden, in diesem Fall durch das Multimeter, entsteht ein Stromfluss.

6. Noch ein paar nützliche Tipps

Spannung und Stromstärke können Verschaltung von mehreren Modulen erhöht werden.

7. Info

Im technischen Einsatz sind verschiedene Modelle einer Solarzelle. Diese variieren im Aufbau und in der Zusammensetzung der Stromerzeugenden Komponente. Unterschieden werden dabei Solarzellen auf Silicium-Basis und verschiedene Dünnschichtmodelle mit verschiedenen Salzgrundlagen.

Kursskript

4.3 Reihen- und Parallelschaltung mehrerer Solarzellen

1. Nummer der Versuchsvorschrift

Versuchsnummer_02.2

2. Material

Solarmodule	Multimeter	Kabel	Halogenlampe/ Sonnenlicht

3. Durchführung

Analog zur Vermessung eines einzelnen Solarmoduls werden nun mehrere Module miteinander verbunden. Dazu werden nacheinander zwei Solarmodule zuerst in Reihe geschaltet, also hintereinander, und anschließend parallelgeschaltet, also nebeneinander. Jeweils werden die erzeugte Stromstärke und die Spannung gemessen und verglichen.

4. Beobachtung

Werden mehrere Module hintereinander geschaltet ist bei gleichbleibender Stromstärke eine höhere Spannung zu messen. Werden die Module nebeneinander geschaltet steigt die Stromstärke und die Spannung bleibt gleich.

5. Was steckt dahinter?

Durch die Verkettung von Modulen können sowohl die Stromstärke als auch die Spannung erhöht werden.

6. Noch ein paar nützliche Tipps

Neben der Anzahl haben auch das verwendete Material sowie die Größe des Moduls eine Auswirkung auf Stromstärke und Spannung.

7. Info

Das Verketteten der Module macht Photovoltaikanlagen erst wirtschaftlich. Ein weiterer notwendiger Schritt ist die Umwandlung des entstehenden Gleichstroms in Wechselstrom. Das öffentliche Stromnetz arbeitet mit Wechselstrom, da sich dieser leichter transportieren lässt.

Kursskript

4.4 Verschattung einer Solarzelle

1. Nummer der Versuchsvorschrift

Versuchsnummer_03.1

2. Material

Solarmodul	Multimeter	Kabel	Halogenlampe/ Sonnenlicht
Pappe			

3. Durchführung

Für die Versuchsdurchführung wird das Solarmodul erneut mit dem Multimeter verbunden. Anschließend werden nacheinander zunächst 25 %, 50 %, 75 % und zuletzt 100 % des Solarmoduls verdeckt, sodass kein Licht auf das Solarmodul trifft.

Die ermittelten Werte an Stromstärke und Spannung werden notiert und verglichen.

4. Beobachtung

Die Effizienz eines Solarmoduls ist abhängig von dem einstrahlenden Licht. Wird ein Teil des Moduls verdeckt, produziert die Solarzelle weniger Strom.

VERDECKT	STROMSTÄRKE A	SPANNUNG V
100 %		
75 %		
50 %		
25 %		
0 %		

5. Was steckt dahinter?

Photovoltaikanlagen erzeugen Strom durch Sonneneinstrahlung und der daraus resultierenden Anregung der n-dotierten Schicht. Fällt nun ein Schatten auf die Solarzelle oder wird das Einstrahlen des Lichts durch Wolken verhindert, fällt der Wirkungsgrad und es wird weniger Energie umgewandelt.

Kursskript

6. Noch ein paar nützliche Tipps

Neben der bestrahlten Fläche kann auch die Farbe des Lichts Einfluss auf die Stromerzeugung haben. Licht mit verschiedenen Wellenlängen, weist unterschiedlich viel Energiepotential auf. Je kürzer die Wellenlänge, desto energiereicher das Licht.

7. Info

Gegen die Verschattung von Solarmodulen hilft das Auswählen geeigneter Standorte sowie eine entsprechende Pflege der Photovoltaikanlage, sowohl der Oberfläche als auch des umliegenden Areals.

Kursskript

4.5 Einfluss der Lichtintensität und des Eintrittswinkels

1. Nummer der Versuchsvorschrift

Versuchsnummer_03.2

2. Material

Solarmodul	Multimeter	Kabel	Halogenlampe/ Sonnenlicht

3. Durchführung

Für die Durchführung wird das Solarmodul mit dem Multimeter verbunden. Ist soweit alles aufgebaut, wird das Solarmodul aus verschiedenen Winkeln mit Licht bestrahlt und die erzeugte Stromstärke sowie Spannung notiert.

In einem zweiten Versuchsabschnitt wird die Intensität des Lichts variiert und somit ein Tag-Nacht-Zyklus improvisiert. Auch hier werden die Stromstärke und die Spannung notiert.

4. Beobachtung

Je nach Einfallswinkel und Lichtintensität ändern sich Stromstärke und Spannung. Je direkter und mit steigender Intensität das Licht einstrahlt, desto höher sind Stromstärke und Spannung.

WINKEL / INTENSITÄT	STROMSTÄRKE A	SPANNUNG V
30 °		
60 °		
90 °		
100 %		
75 %		
50 %		
25 %		
0 %		

Kursskript

5. Was steckt dahinter?

Je direkter das Licht einstrahlt, desto energiereicher ist es. Je mehr Energie in Form von Licht eintrifft, desto stärker wird die n-dotierte Schicht angeregt, daher kann mehr Energie erzeugt werden. Ähnlich erhält es sich mit der Lichtintensität.

6. Noch ein paar nützliche Tipps

Der Effekt des energiereicheren Lichts zu überprüfen, kann mit zusätzlichen Lichtquellen aus dem Ultraviolett und Infrarot-Licht experimentiert werden.

7. Info

Der Effekt des Einfallswinkels zeigt sich beim Vergleich von Photovoltaik-Anlagen auf der ganzen Welt. Je näher eine Photovoltaik-Anlage am Äquator liegt, desto höher ist die Leistung, da am Äquator die Lichteinstrahlung am direktesten ist.

Kursskript

4.6 Farbstoffsolarzelle – die GRÄTZEL-Zelle¹⁰

1. Nummer der Versuchsvorschrift

Versuchsnummer_04

2. Material

TCO-beschichtete Glasplatten	Graphit	Waage	Mörser
Porzellanschale	Spatel	Bunsenbrenner	Tiegelzange
Petrischale	Föhn	Pipetten	Kabel
Krokodilklemmen	Multimeter	Tesafilm	Hibiskusblüten-Tee

Essigsäure

Gefahr

H:226-290-314

P:210-280-301+330+331-

305+351+338-308-310

Iod-Kaliumiodid-Lösung

Achtung

H:373

P:260-314

Titandioxid
Gesättigte Natriumchlorid-Lösung


3. Durchführung

In der Porzellanschale werden 5 g Titandioxid fein verrieben. Unter Hilfe von etwas Wasser und Essigsäure wird eine leicht zerfließende Paste gefertigt die hauchdünn auf eine der beiden TCO-beschichteten Glasplatten (transparent conducting oxide) aufgetragen wird. Zur Trocknung und Fixierung der Titandioxid-Schicht auf dem Glas wird die Glasplatte kurz über dem Bunsenbrenner erwärmt. Die abgekühlte Glasplatte wird in frisch aufgebrühten Hibiskusblüten-Tee getaucht, sodass

¹⁰ (ub.de Fachwissen, 2022)

Kursskript

sich der Farbstoff des Tees in der Titandioxidschicht niederschlägt. Die präparierte Glasplatte wird nun an der Luft getrocknet. Die zweite Glasplatte wird mit einer Graphitschicht versehen. Dazu wird mit einem weichen Bleistift mehrfach über die Oberfläche gerieben, bis eine Schicht klar zuerkennen ist. Bei beiden Platten ist darauf zu achten, dass ein unbehandeltes Randstück frei bleibt.

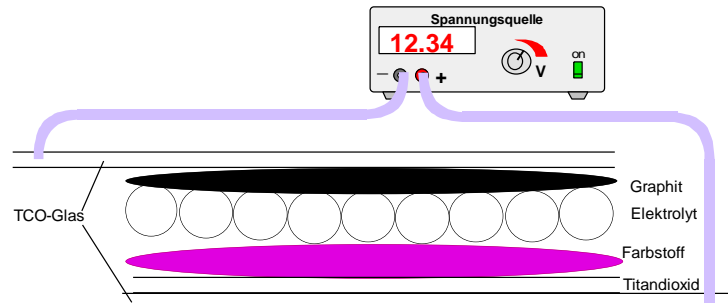


Abbildung 7 Aufbau einer GRÄTZEL-Zelle

Sind beide Glasplatten präpariert wird die Titandioxid-Schicht auf die Graphit-Schicht gelegt. Die beiden Glasplatten werden mit Tesafilm aneinander fixiert. Nun wird die erstellte GRÄTZEL-Zelle mit den Kabeln an das Multimeter angeschlossen. Nach dem beträufeln der Grenzschicht mit einem der Elektrolyten und dem Beleuchten werden Stromstärke und Spannung gemessen.

4. Beobachtung

Wird die GRÄTZEL-Zelle mit Elektrolyten versehen und beleuchtet lassen sich Stromstärke und Spannung messen. Mit steigender Ionen-Konzentration lässt sich eine Steigerung der gemessenen Werte erkennen.

ELEKTROLYT	STROMSTÄRKE A	SPANNUNG V
ESSIGSÄURE		
IOD-KALIUMIODID-LÖSUNG		
GESÄTTIGTE NATRIUMCHLORID-LÖSUNG		

5. Was steckt dahinter?

Die GRÄTZEL-Zelle funktioniert in ihren Abläufen wie ein Silicium-Solarmodul. Die Titandioxid-Schicht in Kombination mit dem Farbstoff übernehmen dabei die Reaktionen der n-dotierten Schicht und bilden damit den Pluspol der Solarzelle. Das Graphit agiert als Minuspol und stellt weitere Elektronen zu Verfügung, es übt also die Aufgaben der p-dotierten Schicht aus.

6. Noch ein paar nützliche Tipps

Dieser Versuch kann mit unterschiedlichen Schichtdicken, unterschiedlich großen Flächen oder auch mit mehreren Zellen in Reihen- oder Parallelschaltung sowie unterschiedlichen Lichtverhältnissen ausprobiert werden. Es werden sich ähnliche Effekte wie in den vorangegangenen Versuchen zeigen.

Kursskript

7. Info

Bei der GRÄTZEL-Zelle handelt es sich um eine sogenannte Farbstoff-Solarzelle. Der Farbstoff wird als Ersatzstoff für Silicium verwendet. Neben den Farbstoff-Solarzellen wird an organischen Solarzellen gearbeitet.

Kursskript

5. Ausblick

Durch eine stetige Weiterentwicklung und Optimierungen vorhandener Systeme, werden Photovoltaik-Anlagen deutlich effizienter und somit auch lukrativer. Auch wenn in absehbarer Zeit ein Ausschöpfen der Performance Ratio erreicht wird, sind die Möglichkeiten einer Weiterentwicklung gegeben. Erforscht wird dabei vor allem der Bereich der Dünnschicht-Photovoltaik-Anlagen mit unterschiedlichsten Elementen.

Ein Ausbau der Flächen wird auf lange Sicht die Kraftwerke mit fossilen Brennstoffen ersetzen können, zumal durch die Entwicklungen der letzten Jahre die gleiche Fläche eines Solarkraftwerks den doppelten Ertrag generiert, und somit der Erntefaktor deutlich ansteigt.

Auch die Handhabbarkeit der erzeugten Energie und somit die Verfügbarkeit einer Grundversorgung durch Solarstrom wird vorangetrieben. Gearbeitet wird an verschiedenen Modellen der Energiespeicherung. Diese würden für sich alleinstehende Solarkraftwerke zur Stromerzeugung ermöglichen.

Besonders interessant ist die Rolle, die Solarenergie als Lieferant für elektrische Energie zu gesprochen wird. Der Ausbau wird über die nächsten Jahre rasant ansteigen, nicht zuletzt wegen der jüngst auftretenden Probleme im Osten von Europa und der damit deutlich gewordenen Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen aus anderen Ländern.

Der große Vorteil, den Solarenergie hierbei mit sich bringt, ist die omnipräsente Verfügbarkeit, sowie die geringen Wartungskosten, sowie die Umweltverträglichkeit.

Kursskript

Literaturverzeichnis

- Bechmann, W., & Bald, I. (2020). *Einstieg in die physikalische Chemie für Naturwissenschaftler* (7. Ausg.). Berlin: Springer-Verlag.
- Beime, C., Dr. Hoppe, P., Hummes, K.-P., Vöpel, K.-H., Voss, C., & Dr. Zemmann, W. (2012). *Kerncurriculum für die integrierte Gesamtschule Schuljahrgänge 5-10 - Naturwissenschaften*. Hannover: Niedersächsisches Kultusministerium.
- Böttcher, J. (2012). *Solarvorhaben: Wirtschaftliche, technische und rechtliche Aspekte*. München: Oldenbourg.
- Diddens, P., Fugel, B., Gerber, S., Klaphake, H.-G., Labohm, J., Müller, M., . . . Thon, K.-P. (2012). *Kerncurriculum für die Oberschule - Technik*. Hannover: Niedersächsisches Kultusministerium.
- Dr. Wirth, H. (2022). *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. Freiburg: Fraunhofer ISE.
- Freericks, R., Brinkmann, D., & Wulf, D. (2017). *Didaktische Modelle für außerschulische Lernorte*. Bremen: Institut für Freizeitwissenschaft und Kulturarbeit e.V. an der Hochschule Bremen.
- Karpa, D., Lübbecke, G., & Adam, B. (2015). Außerschulische Lernorte - Theoretische Grundlagen und praktische Beispiele. *Schulpädagogik heute*, 11.
- Kliche, F., & Draeger, I. (2009). *Schulpaket Solarsupport - Materialien für Schule und Bildungseinrichtungen zum Thema Photovoltaik*. Berlin: Unabhängiges Institut für Umweltfragen.
- ME Berufe Info. (2020). Von Unterrichtsthema Photovoltaik: <https://www.me-vermitteln.de/unterrichtsmaterialien/unterrichtseinheiten/technik-und-informatik/unterrichtsthema-photovoltaik> abgerufen
- Müller, W. (2014). *Die Energiewende und der Energetische Faktor*. Von <https://eike-klima-energie.eu/2014/12/12/die-energiewende-und-der-energetische-erntefaktor/> abgerufen
- Riedel, E., & Janiak, C. (2022). *Anorganische Chemie* (10. Ausg.). Berlin/Boston: Walter der Gruyter.
- ub.de Fachwissen, G. (2022). *Photovoltaik.org*. Von Solarportal: <https://www.photovoltaik.org/wissen/graetzelzelle> abgerufen
- Zahoransky, R. (2019). *Energietechnik: Systeme zur konventionellen und erneuerbaren Energieumwandlung* (8. Ausg.). Wiesbaden: Springer.

Kursskript

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bändermodell: Leiter, Nicht-Leiter, Halbleiter	2
Abbildung 2: n- und p-Dotierung eines Silicium-Gitters	3
Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Solarzelle	4
Abbildung 4: Schematischer Aufbau einer Photovoltaik-Anlage	5
Abbildung 5 Aufbau der VOLTA'schen Säule	11
Abbildung 6 Photovoltaik Experimentierset von Sol-Expert	13
Abbildung 7 Aufbau einer GRÄTZEL-Zelle	20