

A5 Eigenschaften von Solarzellen – Spannung, Strom und Leistung

Werden die Teilerperimente zur Erforschung der elektrischen Eigenschaften der Solarzellen in der vorgeschlagenen Reihenfolge gemacht, werden sie zu einer Lerneinheit, die sich in der Elektrizitätslehre sehr gut zur experimentellen Verifikation des zuvor gelernten Basiswissens einsetzen lässt. Das aktuelle Thema Solarstrom trägt dabei sicher zur Motivation der Schülerinnen und Schüler bei. Aber auch die Themen Erneuerbare Energien und Energiewende können mit diesen Experimenten hervorragend thematisiert werden. Hier muss aber auf entsprechende Vorkenntnisse der Schülerinnen und Schüler geachtet werden.

1 Zentrale Fragestellung

Solarzellen finden Anwendung in vielen kleineren elektronischen Geräten und Spielzeugen genauso wie auf Hausdächern und in großtechnischen Anlagen zur Stromerzeugung. Die Fragestellung, die die Experimente leitet, ist, was ist bei der Verschaltung von Solarzellen zu beachten? Wie verhalten sich Spannung, Stromstärke und Leistung bei verschiedenen Kombinationen und bei verschiedenen Beleuchtungsverhältnissen? Und nicht zuletzt, wie kann man das messen? Die Experimente vermitteln auf diese Weise Grundkenntnisse, die für das Basteln mit Solarzellen ebenso von Bedeutung sind wie für die großtechnische Nutzung.

2 Einordnung des Experiments in den Unterrichtszusammenhang

2.1 Fachliche Grundlagen

Für eine Bearbeitung der Experimente sind folgende Vorkenntnisse und Vorerfahrungen notwendig:

- Kenntnisse zur Reihen- und Parallelschaltung von Batterien und Widerständen
- Erfahrungen im Umgang mit einem Multimeter
- Kenntnisse zu den Grundbegriffen der Elektrizitätslehre (Stromstärke, Spannung, Widerstand, Leistung)
- Erfahrungen im Erstellen von Diagrammen
- Kenntnisse zum Begriff des Innenwiderstands

2.2 Lehrplanrelevanz

Experimente zur Solarzelle können der Elektrizitätslehre zugeordnet werden. Bedeutsam sind sie auch im Kontext der Energiethematik, die inzwischen in allen Altersstufen eine Rolle spielt. Für das Teilerperiment 1 sind nur sehr elementare Kenntnisse zu elektrischen Stromkreisen nötig. Die Teilerperimente 2 und 3 sind etwa ab der Altersstufe 12 Jahre geeignet. Die Teilerperimente 4 bis 6 erfordern im Vergleich dazu mehr abstraktes und theoretisches Denken und sind eher für die Altersstufe ab 14 Jahre zu empfehlen.

Themen und Begriffe: Abschattung, Akku, Batterie, Elektrizitätslehre, Energieversorgung, Gleichspannungsquelle, Innenwiderstand, Kurzschlussstrom, Lastwiderstand, Leerlaufspannung, Messkurve, Parallelschaltung, Potentiometer, Reihenschaltung, Schaltspannung (der Diode), Solarmotor, Solarzelle, Spannungsabfall, Stromkreis, U-I-Kennlinie, Umgang mit Messgeräten, Verschaltung von Solarmodulen, Widerstand

2.3 Kompetenzen

2.3.1 Fachspezifische Kompetenzen

Die Schülerinnen und Schüler ...

- beschreiben die Wirkungsweise einer Solarzelle.
- untersuchen die Einflussfaktoren auf die Wirkung einer Solarzelle nach Plan.
- bauen Experimente mit Solarzellen nach Plan auf und führen sie durch.
- erklären die Begriffe Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung.
- beschreiben und vergleichen die Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen in ihrer Wirkung.
- bewerten die Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen hinsichtlich ihrer Bedeutung in der Praxis.
- beschreiben die Bedeutung des Innenwiderstands einer Solarzelle für praktische Anwendungen.

2.3.2 Schwerpunktmäßig anhand des Telexperiments 6

Schülerinnen und Schüler ...

- erläutern die Bedeutung des MPP (Maximum Power Point).
- stellen Messwerte grafisch dar und interpretieren diese.
- planen ein Experiment zur Untersuchung der Veränderung des Innenwiderstands in Abhängigkeit von der Beleuchtung einer Solarzelle.

2.4 Das Experiment im Erklärungszusammenhang

Solarzellen wandeln Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie um. Dies drückt sich dadurch aus, dass an der Solarzelle eine Spannung aufgebaut wird, die bei den hier verwendeten Solarzellen einen Maximalwert von etwa 0,55 Volt (Leerlaufspannung) erreicht. Schließt man die Solarzelle kurz, fließt eine maximale Stromstärke von etwa 0,11 A (Kurzschlussstromstärke).

(Eine Alkalimangan-Mignon-Zelle hat dagegen einen Kurzschlussstrom von kurzzeitig bis zu 80 A!) Anders als Schülerinnen und Schüler es im Umgang mit standardmäßigen Alkalimangan-Mignon-Batterien gewohnt sind, sinkt die Spannung bei den Solarzellen deshalb deutlich ab, wenn man einen Verbraucher (z. B. ein Lämpchen oder einen Solarmotor) in den Stromkreis einbaut. Der Unterschied ist auf den Innenwiderstand der Solarzelle zurückzuführen, der im Vergleich zum Widerstand dieser Verbraucher relativ hoch ist. Fließt Strom, fällt deshalb ein beträchtlicher Teil der Spannung an der Solarzelle ab. Anders als bei geladenen Batterien ist der Innenwiderstand bei Solarzellen zudem nicht konstant, sondern hängt von der Beleuchtungsstärke ab.

Diese Tatsache führt dazu, dass die Verhältnisse bei der Verschaltung von Solarzellen einfach sind, solange man keinen Verbraucher in den Stromkreis einbaut. Die Zusammenhänge werden aber deutlich unübersichtlicher, wenn Verbraucher im Spiel und die Beleuchtungsverhältnisse nicht optimal sind. Um Einblicke in die konkrete Anwendung von Solarzellen in der Praxis zu erhalten, sind die komplexen Zusammenhänge zu berücksichtigen. Geht es vorrangig darum, Solarzellen als elektronische Bauteile zu analysieren und in den Kontext der traditionellen Elektrizitätslehre einzuordnen, sind die eher theoretisch relevanten Untersuchungen an unbelasteten Solarzellen von Bedeutung. Die Telexperimente tragen beiden Bedürfnissen gleichermaßen Rechnung und vermitteln zwischen den verschiedenen Perspektiven.

2.4.1 Telexperiment 1: Erste Erkundungen mit der Solarzelle

Das Experiment liefert eine erste Basis für die weiteren Experimente. Den Schülerinnen und Schülern soll dabei eine mögliche Scheu im Umgang mit den Experimentiermaterialien genommen werden. Aus diesem Grund wurde als spielerische und explorative Komponente die Erkundung der Wirkung von unterschiedlich transparenten Materialien zur Abdeckung der Solarzellen eingebaut. Auch andere Einflüsse können untersucht werden. Als Indikator dient hier der Solarmotor, der zwar keine hohe Genauigkeit der Ergebnisse zulässt, aber den spielerischen Charakter des Experiments unterstützt.

Wichtiger Hinweis: Bei Verwendung einer Lampe als Lichtquelle ist darauf zu achten, dass der Abstand dieser Lichtquelle zur Solarzelle mithilfe des Lineals konstant gehalten wird. Im ersten Teil geht es zusätzlich darum zu erkennen, dass eine Solarzelle, wie eine Batterie, eine Gleichspannungsquelle ist, deren Polung man leicht bestimmen kann.

Zum Weiterforschen: In Ergänzung zu Telexperiment 1 wäre die quantitative Messung von Stromstärke und Spannung bei unterschiedlichen Einfallswinkeln des Lichts interessant. Dies ist allerdings mit den vergleichsweise kleinen Solarzellen nur schwer zu realisieren. Hierzu empfiehlt es sich, Vorrichtungen zu bauen, die die Lagerung der Solarzelle in definierten Winkeln erleichtern.

Technikbezug: Für die Frage, ob die Installation von Solarzellen auf dem Hausdach zu empfehlen ist, spielt die Ausrichtung eines Hausdachs zur Sonne eine entscheidende Rolle. Ein Schmutzfilm auf Solarzellen beeinträchtigt ihre Wirkung. Solarzellen müssen deshalb gereinigt werden.

2.4.2 Telexperiment 2: Kurzschlussstromstärke und Leerlaufspannung bei unterschiedlichem Abstand zur Lampe

Kern dieses Telexperiments ist die Untersuchung, wie sich Stromstärke und Spannung mit dem Abstand zur Lampe verändern. Dieser Versuch führt damit in eine quantitative Beschreibung von Solarzellen und in die Begriffe Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke ein. Das grundsätzliche Messprinzip wird im Telexperiment 4 wieder verwendet. Die Messkurven machen deutlich, dass die Stromstärke wesentlich sensibler von der Beleuchtung abhängt als die Spannung. Die Abbildungen 1 und 2 dienen zur Orientierung hinsichtlich der erwartbaren Messergebnisse und der Genauigkeit. Sie geben außerdem einen Einblick, in welchen Entfernungen zur Lampe sinnvolle Messungen durchführbar sind (siehe Abb. 1 und Abb. 2).

Transfer

Der unterschiedliche Abstand zur Lampe ist gleichbedeutend mit unterschiedlich intensiver Bestrahlung. Das Ergebnis lässt sich auf den ersten Versuch übertragen. Bei Abschattung des Lichtes sinkt vor allem die Stromstärke drastisch ab. Die Lehrkraft sollte auf die Gesetzmäßigkeit „Abfall der Beleuchtungsstärke mit dem Quadrat der Entfernung“ hinweisen (siehe Abb. 1).

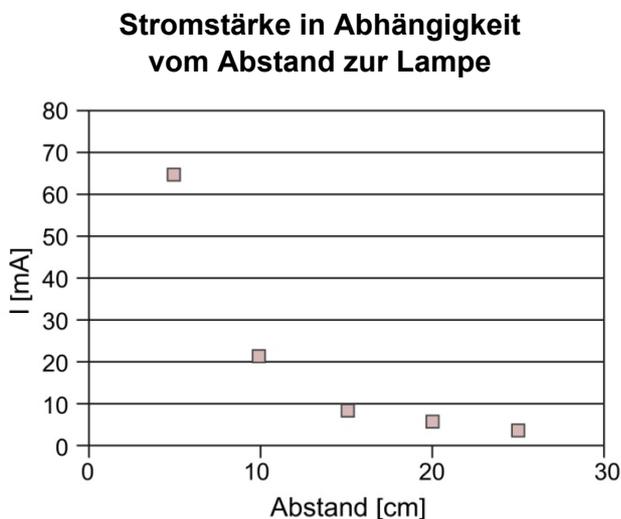


Abb. 1: Bereits in einem Abstand von 10 cm ist die Stromstärke drastisch abgefallen.

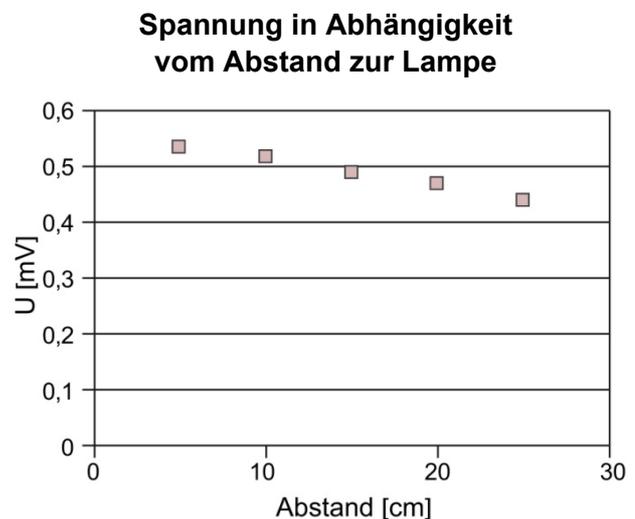


Abb. 2: Die Spannung klingt mit dem Abstand zur Lampe nur mäßig ab. Der Verlauf der Kurve ist näherungsweise linear.

2.4.3 Telexperiment 3: Was passiert, wenn man Solarzellen in Reihe oder parallel schaltet?

Dieses Experiment geht der Frage nach, wie Solarzellen zu verschalten sind, um die Leistung eines angeschlossenen Gerätes (hier am Beispiel des Solarmotors) zu verbessern. Das Ergebnis des Experiments ist entscheidend davon abhängig, in welcher Entfernung zur Lampe es durchgeführt wird. Während in relativer Nähe zur Lampe die Parallelschaltung die deutlich höhere Drehzahl des Motors liefert, ist in größerer Entfernung die Reihenschaltung günstiger. Bei der hier vorgeschlagenen Variante messen die Schülerinnen und Schüler in relativer Nähe zur Lampe. Die Solarzelle arbeitet dann nahe an ihrem optimalen Leistungsbereich. Dies entspricht etwa den Gegebenheiten unter Sonneneinstrahlung. Das Experiment zeigt, dass unter diesen Bedingungen und bei diesem Solarmotor als Verbraucher die Parallelschaltung wesentlich günstiger ist als die Reihenschaltung. Denn mit abnehmender Beleuchtungsstärke sinkt der Solarstrom und der Innenwiderstand der Solarzelle steigt an. (Beim Experiment mit einer hellen Schreibtischlampe sinkt die Beleuchtungsstärke mit dem Quadrat der Entfernung zur Lichtquelle).

Dies steht im Widerspruch zu typischen Erfahrungen mit der Verschaltung von Batterien. Erst wenn man die Solarzelle als Spannungsquelle mit einem Innenwiderstand modelliert, wird die Beobachtung verständlich: Bei einer Reihenschaltung verdoppelt sich der Innenwiderstand, während er sich bei einer Parallelschaltung halbiert. Der Innenwiderstand einer Solarzelle ist jedoch größer als 20Ω (siehe Telexperiment 6) und liegt damit in der Größenordnung des halben Motorwiderstands. Im Vergleich dazu haben z. B. Alkalimangan-Mignon-Batterien einen sehr geringen Innenwiderstand in der Größenordnung von $0,1 \Omega$, der sich im Vergleich zum Lastwiderstand der üblichen Verbraucher wie z. B. Spielzeuge oder Musikgeräte kaum bemerkbar macht. Die Reihenschaltung von zwei (nicht überlasteten) Batterien hat deshalb doppelte Spannung und doppelte Leistung zur Folge.

Technikbezug: Die Parallelschaltung von Solarzellen sorgt für die Bereitstellung einer ausreichenden Stromstärke. Bei der technischen Verschaltung von Solarzellen wird diese Möglichkeit genutzt. Die Reihenschaltung bietet im Vergleich dazu die Möglichkeit, eine für bestimmte Zwecke nötige Mindestspannung bereitzustellen (z. B. das Laden einer Akkuzelle benötigt ca. 2 Volt). Die Parallelschaltung bietet darüber hinaus die Möglichkeit, die Abschattung von einzelnen Zellen innerhalb der Module zu kompensieren (siehe Telexperiment 5). Bei der technischen Verschaltung von Solarzellen zu Solarmodulen werden innerhalb der Module beide Schaltungsarten genutzt. Werden Solarspielzeuge mit mehreren Solarzellen versorgt, bietet sich je nach Motor die Parallelschaltung oder die Kombination von Parallel- und Reihenschaltung an.

2.4.4 Telexperiment 4: Stromstärke und Spannung bei der Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen

Dieses Experiment untersucht die Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen unter den idealisierten Bedingungen eines fehlenden Verbrauchers. Unter diesen Bedingungen sind die Verhältnisse relativ einfach. Die Reihenschaltung liefert eine Verdopplung der Leerlaufspannung, während sich bei einer Parallelschaltung die Kurzschlussstromstärke verdoppelt. Es liegt nahe, das Produkt aus Kurzschlussstromstärke und Leerlaufspannung als Leistung zu interpretieren. Da es sich jedoch bei Kurzschluss und Leerlauf um Messungen unter grundsätzlich unterschiedlichen Bedingungen handelt, können die Werte nicht zu einer Leistung verrechnet werden. Zur Leistung der Solarzelle kann das Telexperiment 6 Aufschluss geben.

Transfer

Bei der Verschaltung von Solarzellen zu größeren Solarmodulen können durch unterschiedliche Kombination von Reihen- und Parallelschaltung verschiedene Stromstärken und Spannungen bereitgestellt werden. So bestünde z. B. ein Gesamtmodul mit 24 Volt und 100 Watt aus ca. 1008 elementaren $0,5 \text{ V}/200 \text{ mA}$ -Zellen.

2.4.5 Telexperiment 5: Wie verhalten sich Solarzellen in Reihen- oder Parallelschaltung bei Abschattung?

Dieses Experiment geht der Frage nach, wie sich eine teilweise Abschattung der Solarzellen auf die Stromstärke und Spannung der verschiedenen Schaltungen von zwei Solarzellen auswirkt. Dabei wird die Abschattung realisiert, indem entweder beide Zellen zur Hälfte abgedeckt werden oder eine der beiden Zellen vollständig abgedeckt wird. Die Tabelle zeigt Beispielwerte:

	Parallelschaltung		Reihenschaltung	
	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]
nicht abgedeckt	0,52	38	1,03	19
beide halb abgedeckt	0,49	23	0,97	12,5
eine vollständig abgedeckt	0,49	23	0,93	3,8

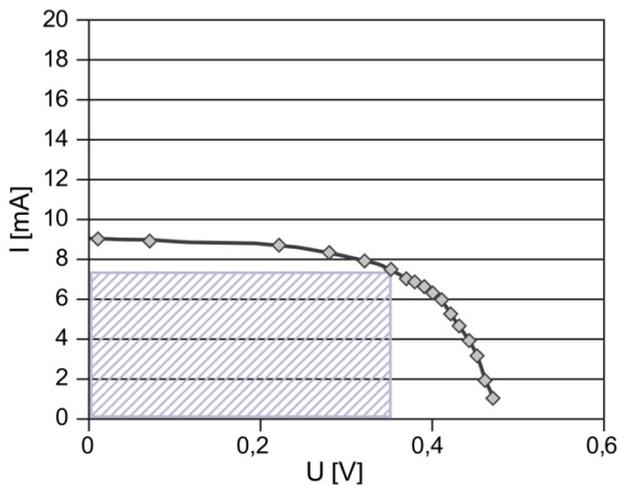
Technikbezug: Für den Aufbau von Solarmodulen werden Solarzellen in Reihe geschaltet und die Reihen wiederum parallel. Damit kann die unterschiedliche Abschattung und der Ausfall einzelner Zellen kompensiert werden.

Die Lehrkraft sollte allerdings darauf hinweisen, dass in großen Solarmodulen die Reihenschaltung bei Abschattung oder Ausfall von Zellen auch Gefahren birgt. Wird nämlich eine einzelne Zelle in einer größeren Reihe abgeschattet, produziert sie keinen Strom, sondern stellt einen Widerstand dar, an dem die gesamte Spannung der Reihe abfällt. Dies kann zum Durchschmoren der Zelle führen. Einzelne Zellen werden deshalb i. d. R. durch Bypassdioden überbrückt. Diese ganz normale Schaltodiode wird parallel zur Zelle verschaltet und zwar so, dass sie im Belichtungsfall (wegen Unterschreiten ihrer Schaltspannung) inaktiv ist. Im Abschattungsfall oder bei defekter Zelle schaltet sie durch und der von den anderen Zellen der Reihe gelieferte Strom kann dann über die Diode fließen.

2.4.6 Telexperiment 6: Optimierung der Leistung von Solarzellen

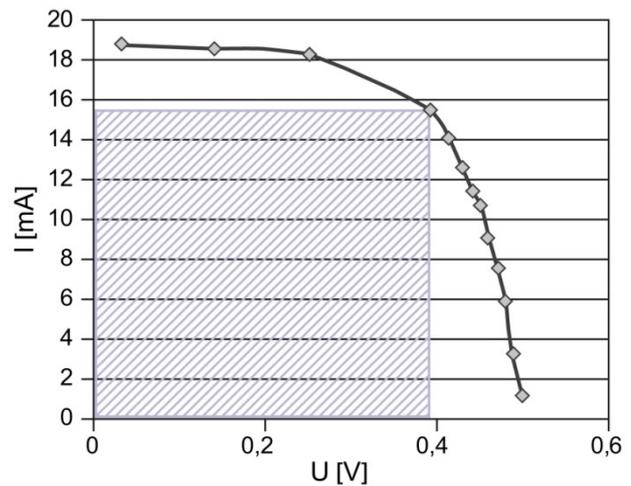
Mit diesem Telexperiment wird der Begriff des MPP (Maximum Power Point) eingeführt und illustriert. Damit ist der Punkt in der U-I-Kennlinie bezeichnet, bei dem die Leistung der Solarzelle maximal ist. Die U-I-Kennlinie und der MPP charakterisieren die Leistungsmerkmale einer Solarzelle (siehe Datenblatt einer typischen Solarzelle unter „Ergänzende Informationen zum Experiment“). Zur Aufnahme der U-I-Kennlinie werden im Experiment Stromstärke und Spannung an einem veränderbaren Widerstand gemessen. Das Maximum der Leistung wird zur Vereinfachung aus den Messwerten (und nicht aus der Messkurve) bestimmt.

Mit dem Modell einer Solarzelle als Spannungsquelle mit Innenwiderstand lässt sich zeigen, dass die Leistung am Verbraucher maximal wird, wenn der Widerstand des Verbrauchers dem Innenwiderstand der Solarzelle gleicht. (In leistungsstarken Lerngruppen lässt sich dies ggf. durch eine Simulationssoftware nachweisen.) Setzt man dies als gegeben an, kann über den MPP auch der Innenwiderstand der Solarzelle bestimmt werden. Abb. und Abb. geben einen Eindruck von den erwartbaren Messwerten.

U-I-Kennlinie (15 cm Abstand)

Maximale Leistung $P = 2,6$ mW
 Innenwiderstand $R = 47 \Omega$

Abb. 3: U-I-Kennlinie bei einer Messung im Abstand von 15 cm zur Lampe. Das schraffierte Quadrat symbolisiert die Leistung.

U-I-Kennlinie (10 cm Abstand)

Maximale Leistung $P = 6,0$ mW
 Innenwiderstand $R = 25 \Omega$

Abb. 4: U-I-Kennlinie bei einer Messung im Abstand von 10 cm zur Lampe. Der Unterschied im Kurvenverlauf ist deutlich sichtbar. Der Innenwiderstand ist im Vergleich zu Abb. 3 verringert.

Als Erweiterung zu Teilerperiment 6 kann der MPP zusätzlich für die Reihen- und Parallelschaltung bestimmt werden. Dabei lässt sich eine ungefähre Verdopplung der maximalen Leistung bei Verwendung von zwei Solarzellen feststellen, unabhängig von der Schaltung (für 15 cm Abstand zur Lampe von 2,6 mW auf 4,8 mW, für 10 cm Abstand zur Lampe von 6 mW auf 10,5 mW).

Transfer

In großtechnischen Anlagen wird der Widerstand der Abnehmerseite elektronisch entsprechend den Beleuchtungsverhältnissen nachgeregelt, um die Leistung der Solarzellen zu optimieren.

2.5 Durchführungsvarianten

Alle Teilerperimente können bis auf Teilerperiment 2 auch im Sonnenlicht durchgeführt werden. Dabei müssen die Beleuchtungsverhältnisse allerdings konstant gut sein. Die dargestellten Teilerperimente bauen sachlogisch aufeinander auf. Es können aber problemlos auch Teilerperimente ausgelassen werden. Eine Vertauschung der Reihenfolge in der Durchführung von Teilerperiment 3 und 4 ist möglich.

Die Anzahl der Schülerinnen und Schüler pro Gruppe sollte nicht zu groß sein (maximal drei pro Gruppe), da sonst nicht alle Gruppenmitglieder aktiv experimentieren können.

3 Ergänzende Informationen zum Experiment

Zur Vorbereitung bzw. zur Vertiefung dieses Experiments finden Sie ergänzende Medien auf dem Medienportal der Siemens Stiftung: <https://medienportal.siemens-stiftung.org>

Zudem widmet sich das Medienpaket „Solarthermie und Photovoltaik – Energien mit Zukunft“ ausführlich den fachlichen Grundlagen und technischen Anwendungen des Experiments.

Im „Leitfaden Naturwissenschaften, Technik und Werte“ finden Sie zu diesem Experiment eine passende Impulsfrage und Dilemmageschichte zur Herstellung des Wertebezugs.

4 Hinweise zur Durchführung der Teilerperimente

4.1 Räumlichkeiten

Die Experimente können unter Verwendung mehrerer Schreibtischlampen in jedem Klassenraum von den Schülerinnen und Schülern durchgeführt werden. Einfallendes Sonnenlicht beeinflusst die Messungen ggf. wesentlich. Mit Ausnahme von Teilerperiment 2 sind die Messungen auch im Sonnenlicht durchführbar.

4.2 Zeitbedarf

Die folgenden Zeitangaben sind ungefähre Richtwerte. Die Zeit für die Auswertung und die Beantwortung der Fragen schließt auch eine kurze Besprechung mit der Lehrkraft ein.

	Vorbereitung und Durchführung	Auswertung, Fragen
Teilerperiment 1	15 min	15 min
Teilerperiment 2	20 min	20 min
Teilerperiment 3	15 min	20 min
Teilerperiment 4	20 min	20 min
Teilerperiment 5	20 min	30 min
Teilerperiment 6	30 min	20 min

4.3 Sicherheitsaspekte

Die Versuche dürfen nur bei Anwesenheit und unter Aufsicht der Lehrkraft durchgeführt werden. Die Schülerinnen und Schüler sind darauf hinzuweisen, dass die bereitgestellten Materialien nur entsprechend den jeweiligen Anweisungen eingesetzt werden dürfen.

4.4 Benötigte Materialien

Die richtige Verkabelung und die richtige Benutzung von Multimeter und Motor sollten je nach Kenntnisstand der Schülerinnen und Schüler von der Lehrkraft vorab erklärt, ggf. demonstriert werden. Für **eine** Schülergruppe werden folgende Materialien benötigt:

Material	Anzahl
Materialien unterschiedlicher Transparenz (z. B. Overheadfolie, Transparentpapier)	nach Belieben
Pappe zum Fixieren der Solarzellen	1
Digitalmultimeter	2
Gummiband (zum Fixieren der Solarzellen)	2
Lineal (30 cm)	1
Messkabel-Set Banane/Kroko, je rot und schwarz	2
Papier, schwarz, DIN A4	1
Potentiometer, 470 Ohm	1
Propeller (für Solarmotor groß)	1
Schere	1
Helle Schreibtischlampe	1
Solarmotor groß, Eisenanker, 0,4 V/25 mA	1
Solarzelle, 0,5 V/150 mA	2
Verbindungskabel Kroko/Kroko	6



Abb. 5: Materialien für eine Schülergruppe, beispielhafte Abbildung.

4.5 Aufräumen, Entsorgen, Recyceln

Fast alle verwendeten Geräte und Materialien sind wiederverwendbar. Daher sollten sie nach Beendigung des jeweiligen Experiments ordentlich aufgeräumt werden. So stellen Sie sicher, dass Sie bzw. Ihre Kolleginnen und Kollegen beim nächsten Einsatz alles schnell wiederfinden.

Geräte, die beim Experimentieren verschmutzt wurden, wie z. B. Becher, Schalen, Löffel, Reagenzgläser, sollten vor dem Zurücklegen erst gereinigt werden. Sinnvollerweise lässt man dies die Schülerinnen und Schüler gleich nach Beendigung des Experiments erledigen.

Stellen Sie zudem sicher, dass die Geräte wieder für den nächsten Einsatz betriebsbereit sind.

Beispielsweise sind benutzte Akkus gleich aufzuladen (Auch bei längerer Nichtbenutzung ist das Aufladen der Akkus sinnvoll.).

Materialien, die nicht wiederverwendbar sind, wie z. B. gebrauchte pH-Messstäbchen oder Filterpapier, sollten fachgerecht entsorgt werden.

Die Entsorgung der in diesem Experiment anfallenden Abfälle kann über den normalen Hausmüll bzw. den Ausguss erfolgen.