

Energiekiste

---

# Erneuerbare Energien

**MIT LÖSUNGEN**



## Impressum

### Energiekiste – Erneuerbare Energien

#### Herausgeber:

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft,  
Landesentwicklung und Energie

Prinzregentenstraße 28  
80538 München

Tel.: 089 2162-0

Fax: 089 2162-2760

E-Mail: [info@stmwi.bayern.de](mailto:info@stmwi.bayern.de)

Internet: [www.stmwi.bayern.de](http://www.stmwi.bayern.de)

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg

Tel.: 0821 9071-0

E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)

Internet: [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)

**Konzept und Text:** LfU, verändert nach Vorlage von leXsolar GmbH

**Bearbeitung:** LfU, Ökoenergie-Institut Bayern

**Layout:** LfU: Waltraud Brandner, Sophia Pospiech, Sabine Schmidbauer

**Fotos:** LfU, Waltraud Brandner

**Grafiken:** leXsolar GmbH, zum Teil verändert

**Stand:** Januar 2023

Die Materialien und Ausleihmöglichkeiten finden Sie im  
Energie-Atlas Bayern:

[www.energieatlas.bayern.de/thema\\_energie/bildung.html](http://www.energieatlas.bayern.de/thema_energie/bildung.html)

## Inhalt

<b>Einführung</b> .....	3
Information für Lehrerinnen und Lehrer .....	5
Benötigte Geräte – Kurzübersicht .....	7
Handhabung der Einzelteile .....	9
Erneuerbare Energien .....	19
Basics Gleichstrom .....	20
<b>Thema 1 – Elektrische Verbraucher</b> .....	21
Experiment 1: Elektrische Schaltkreise aufbauen .....	22
<b>Thema 2 – Optische Täuschungen</b> .....	24
Experiment 2.1: Der Grundaufbau für Farbscheibenexperimente .....	26
Experiment 2.2: Farbeigenschaften .....	27
Experiment 2.3: Die additive Farbmischung .....	28
Experiment 2.4: Optische Täuschungen mit der Benham-Scheibe .....	29
Experiment 2.5: Optische Täuschungen mit der Relief-Scheibe .....	30
<b>Thema 3 – Sonnenenergie</b> .....	31
3.1: Die Solarzellenleistung .....	32
Experiment 3.1: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der beleuchteten Fläche .....	33
3.2: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts .....	36
Experiment 3.2.1: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts (qualitativ) ...	38
Experiment 3.2.2: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts (quantitativ) .	40
3.3: Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung: Kennwerte einer Solarzelle .....	42
Experiment 3.3: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Beleuchtungsstärke .....	42
3.4: Die I-U-Kennlinie einer Solarzelle .....	44
Experiment 3.4.1: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Last .....	45
Experiment 3.4.2: Die I-U-Kennlinie und der Füllfaktor einer Solarzelle .....	47
Experiment 3.4.3: Die I-U-Kennlinie einer Solarzelle in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke .....	50
<b>Thema 4 – Windenergie</b> .....	55
4.1: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine .....	56
Experiment 4.1.1: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (qualitativ) .....	58
Experiment 4.1.2: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (quantitativ) .....	59
4.2: Anlaufgeschwindigkeit einer Windenergieanlage .....	61
Experiment 4.2: Anlaufgeschwindigkeit einer Windenergieanlage .....	62
4.3: Änderung der Generatorspannung durch Zuschalten von Verbrauchern .....	65
Experiment 4.3: Änderung der Generatorspannung durch Zuschalten von Verbrauchern .....	67
4.4: Änderung der Generatorspannung .....	68
Experiment 4.4: Änderung der Generatorspannung durch Zuschalten unterschiedlicher Verbraucher .....	70
4.5.1: Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (qualitativ) .....	73
Experiment 4.5.1: Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (qualitativ) .....	75
4.5.2: Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (quantitativ) .....	76
Experiment 4.5.2: Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (quantitativ) .....	78

## Inhalt

4.6: Kennlinie einer Windenergieanlage .....	80
Experiment 4.6: Kennlinie einer Windenergieanlage mit Gleichstromgenerator .....	82
4.7.1: Einfluss der Windrichtung (qualitativ) .....	85
Experiment 4.7.1: Einfluss der Windrichtung (qualitativ) .....	86
4.7.2: Einfluss der Windrichtung (quantitativ) .....	88
Experiment 4.7.2: Einfluss der Windrichtung (quantitativ) .....	89
4.8.1: Der Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (qualitativ) .....	91
Experiment 4.8.1: Der Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (qualitativ) .....	93
4.8.2: Der Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (quantitativ) .....	94
Experiment 4.8.2: Der Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (quantitativ) .....	95
4.9.1: Einfluss der Flügelform (qualitativ) .....	98
Experiment 4.9.1: Einfluss der Flügelform (qualitativ) .....	99
4.9.2: Einfluss der Flügelform (quantitativ) .....	100
Experiment 4.9.2: Einfluss der Flügelform (quantitativ) .....	101
<b>Thema 5 – Wasserkraft</b> .....	103
5.1: Wasser als Energiequelle .....	104
Experiment 5.1.1: Wasser als Energiequelle (qualitativ) .....	105
Experiment 5.1.2: Wasser als Energiequelle (quantitativ) .....	106
5.2: Abhängigkeit von der Fallhöhe .....	107
Experiment 5.2.1: Abhängigkeit von der Fallhöhe (qualitativ) .....	108
Experiment 5.2.2: Abhängigkeit von der Fallhöhe (quantitativ) .....	109
<b>Thema 6 – Brennstoffzelle und Elektrolyseur</b> .....	111
Experiment 6.1: Was macht ein Elektrolyseur? .....	112
Experiment 6.2: Was macht eine Brennstoffzelle? .....	115
Experiment 6.3: Die Kennlinie eines Elektrolyseurs .....	117
Experiment 6.4: Die Kennlinie einer Brennstoffzelle .....	119



Informationen für Lehrkräfte



Aufgaben



Lösungen

**Hinweis:** Die Lösungen sind nur beispielhaft und können je nach Messbedingungen variieren.

## Einführung

### Konzeption und Ziel

Die **Energiekiste „Erneuerbare Energien“** ist Teil der „**Energiekisten**“ des Bayerischen Landesamtes für Umwelt. Sie enthält einen Klassensatz (6 gleiche Kisten) mit Experimenten zum Thema erneuerbare Energien.

Ziel dieser Kiste ist es, den Schülerinnen und Schülern (SuS) die Grundlagen der Stromerzeugung durch die erneuerbaren Energien Sonne, Wind und Wasser nahe zu bringen. Die SuS können zum Beispiel die Spannung und Stromstärke einer Solarzelle messen und daraus die Leistung berechnen und Kennlinien erstellen. Darüber hinaus sind Versuche mit einer reversiblen Brennstoffzelle enthalten.

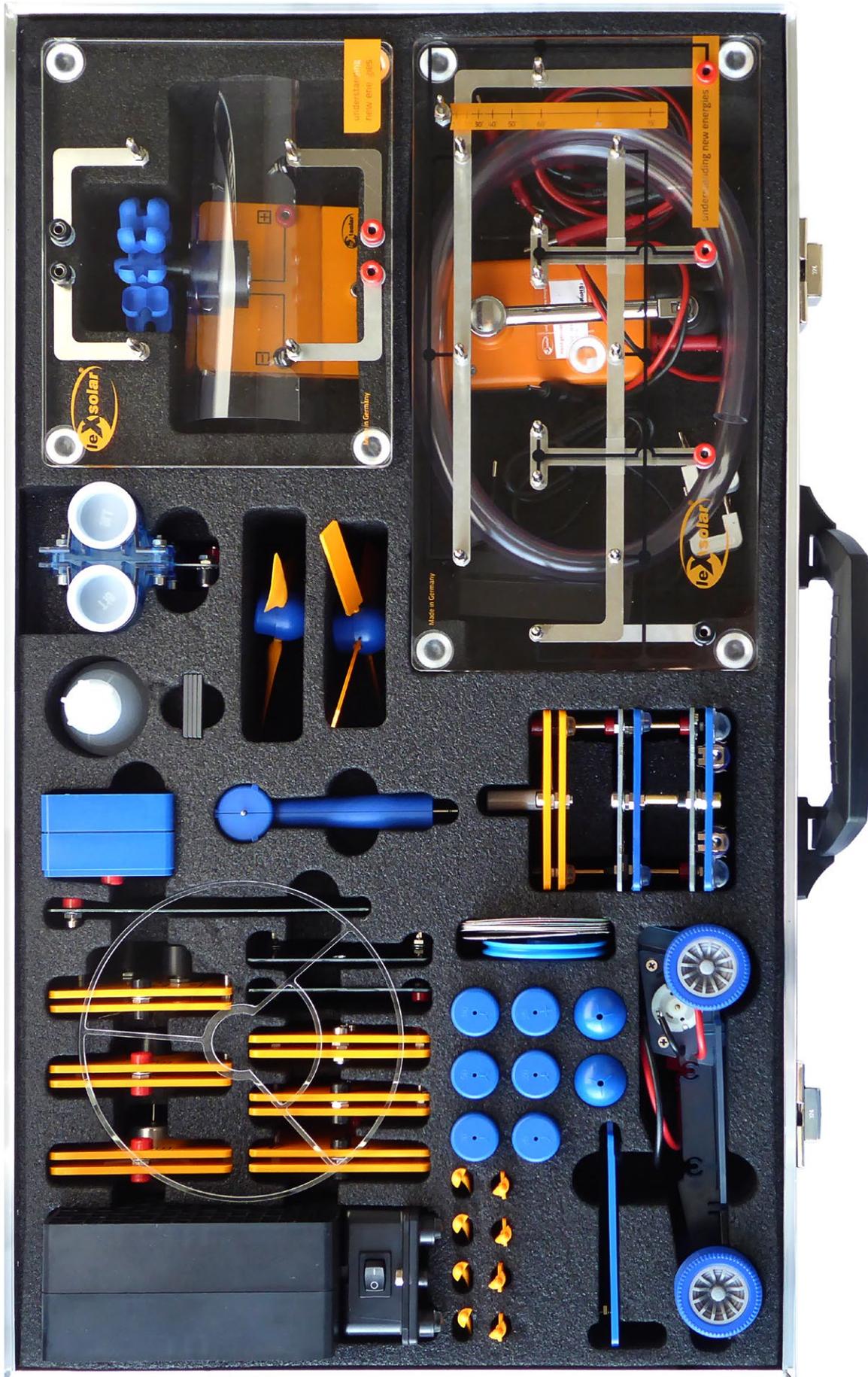
Vorteile für die Lehrkräfte:

- Geringer Vorbereitungsaufwand
- Gute Lehrplanintegration
- Abwechslungsreiches und aktives Lernkonzept
- Gut ausgearbeitete Arbeitsmaterialien
- Übersichtlicher Inhalt
- Robuste Materialien und gute Verpackung
- Einfaches Ausleihsystem inkl. Versand

Die Aufgaben sind für die Sekundarstufe I und eventuell II konzipiert.

Alle Energiekisten sind über den Link „[www.energieatlas.bayern.de/thema\\_energie/bildung.html](http://www.energieatlas.bayern.de/thema_energie/bildung.html)“ ausleihbar.





## Information für Lehrerinnen und Lehrer

### Lehrplanbezüge

Die Materialien eignen sich für den regulären Lehrplan sowie für schulart- und fächerübergreifende Bildungs- und Erziehungsziele der „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ und der „Ökonomischen Verbraucherbildung“. Außerdem können sie für außerschulische Projekttag genutzt werden.

Die Einteilung in die Schulformen dient der Orientierung; eine Verwendung in nicht aufgeführten Schulformen, Fächern oder bei anderen Altersstufen obliegt der Beurteilung durch die Pädagogen.

Tabelle 1 – Bezüge zu den Lehrplänen an Mittelschule, Realschule und Gymnasium

Zielgruppe	Mittelschule	Realschule	Gymnasium
Sekundarstufe 1 bzw. Klassenstufen 7. bis 10. Klasse bzw. Altersstufen 12 bis 16 Jahre	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Geschichte/Sozialkunde/ Erdkunde</li> <li>→ Religion/Ethik</li> <li>→ Naturwissenschaften (Physik/Chemie/ Biologie)</li> <li>→ Arbeit/Wirtschaft/ Technik</li> <li>→ Werken/Textiles Gestal- ten</li> <li>→ Informatik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Geschichte/Sozialkun- de/Erdkunde</li> <li>→ Religion/Ethik</li> <li>→ Mathematik, Naturwis- senschaften (Physik/ Chemie/Biologie), IT</li> <li>→ Werken</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Geschichte/Sozialkunde/ Geografie</li> <li>→ Religion/Ethik</li> <li>→ Naturwissenschaften (Physik/Chemie/Biologie)</li> </ul>





## Übersichtspläne

Übersicht über die Energiekiste Erneuerbare Energien

Dauer	→ 1 bis mehrere Schulstunden – je nach Anzahl der Aufgaben – geeignet für Stationenlernen
Voraussetzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Gruppeneinteilung</li> <li>→ Einteilung in Stationen</li> <li>→ Grundlegende Experimentiererfahrung (NuT)</li> <li>→ Möglichkeiten zum Aufbau der Experimente, Stromanschluss und z. T. Wasser-Anschluss</li> <li>→ z. T. Zugang der SuS zum Energie-Atlas Bayern im Internet. Alternativ können die benötigten Internetseiten als PDF-Datei heruntergeladen und ausgedruckt werden</li> </ul>
Inhalt	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ SuS messen unterschiedliche Parameter zur Beurteilung von erneuerbaren Energien</li> <li>→ SuS erkennen die kritische Einflüsse auf erneuerbare Energien</li> </ul>
Ziele	→ SuS kennen die Potenziale und Einschränkungen erneuerbarer Energien
Hinweise	→ Der Energie-Atlas Bayern ist ein Internetportal zur Energiewende in Bayern und steht nicht offline zur Verfügung. Einzelne Seiten können jedoch als Pdf-Datei heruntergeladen werden
Weiterführende Literatur/Links	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Energie-Atlas Bayern: <a href="https://www.energieatlas.bayern.de/">https://www.energieatlas.bayern.de/</a></li> <li>→ Leihausstellung Energiewende: <a href="https://www.energieatlas.bayern.de/kommunen/werkzeugkasten/ausstellungen.html">https://www.energieatlas.bayern.de/kommunen/werkzeugkasten/ausstellungen.html</a></li> <li>→ TFZ – Energiepflanzen hautnah erleben: <a href="https://www.tfz.bayern.de/landschaftte-nergie/110855/index.php">https://www.tfz.bayern.de/landschaftte-nergie/110855/index.php</a></li> <li>→ Umwelt im Unterricht: <a href="https://www.umwelt-im-unterricht.de/medien/dateien/umweltfreundlich-energie-erzeugen-lehrerheft-sek-archiv/">https://www.umwelt-im-unterricht.de/medien/dateien/umweltfreundlich-energie-erzeugen-lehrerheft-sek-archiv/</a></li> <li>→ Planet Schule:   <a href="https://www.planet-schule.de/sf/php/sendungen.php?sendung=6554">https://www.planet-schule.de/sf/php/sendungen.php?sendung=6554</a>  <a href="https://www.planet-schule.de/sf/multimedia-simulationen-detail.php?projekt=solardach">https://www.planet-schule.de/sf/multimedia-simulationen-detail.php?projekt=solardach</a></li> <li>→ Landesbildungsserver Baden-Württemberg:   <a href="https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/mathematisch-naturwissenschaftliche-faecher/physik/unterrichtsmaterialien/e_lehre_2/lenz">https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/mathematisch-naturwissenschaftliche-faecher/physik/unterrichtsmaterialien/e_lehre_2/lenz</a></li> </ul>

## Benötigte Geräte - Kurzübersicht



Grundeinheit klein



Grundeinheit groß



Winderzeuger



Windrotoren



Windturbine mit Fingerschutz



Windturbinenmodul mit Modulplatte



Solar modul 0,5 V / 840 mA



Solar modul 1,5 V / 280 mA



Solar modul 2,5 V / 420 mA



Abdeckung für Solarzelle



Beleuchtungsmodul



Powermodul (o. Abb. Netzteil)



## Benötigte Geräte - Kurzübersicht



AV-Modul (U/I)



LED-Modul



Potentiometermodul



Glühlampenmodul



Kondensatormodul



Hupenmodul



Motormodul



Farbscheibenset



reversible PEM-Brennstoffzelle



Elektro-Modellfahrzeug mit Akku-Adapter



Wasserradmodul



Handgeneratormodul

## Handhabung der Einzelteile

In der folgenden Auflistung werden alle in einem Koffer enthaltenen Teile aufgeführt. Zu jeder Komponente finden Sie die Artikelnummer, eine Abbildung, i. a. das Piktogramm in den Versuchsaufbauten sowie Hinweise zur Bedienung. Mit Hilfe der Artikelnummer können Sie jedes Einzelteil identifizieren. Alle Versuche laufen mit Gleichstrom und bei Spannungen von maximal 12 Volt. Das Powermodul wird mit Netzstecker geliefert und dient als Trafo.



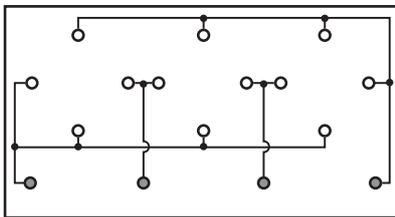
### Grundereinheit klein 1602-01

Die kleine Grundereinheit ist eine Steckplatine welche bis zu zwei Module aufnehmen kann. Der Strom fließt über die an der Unterseite angebrachten Leitungen. Um die Module auf der Grundereinheit mit anderen zu verbinden, befinden sich an zwei gegenüberliegenden Seiten insgesamt vier Anschlüsse. Für die Verbindung von Modulen auf der Grundereinheit stehen zwei Kurzschlussstecker zur Verfügung.



### Grundereinheit groß 1100-19

Die große Grundereinheit ist eine Steckplatine auf der bis zu drei Module in Reihe oder parallel zueinander geschaltet werden können. Der Strom fließt über die an der Unterseite angebrachten Leitungen. Um die Module auf der Grundereinheit mit anderen zu verbinden, befinden sich am unteren Ende vier Anschlüsse.



Die Schaltpläne zum Aufstecken der Module zeigen die Verbindungen für eine Reihen- oder Parallelschaltung. Zum Wechsel zwischen Reihen- und Parallelschaltung müssen die Module um 90° gedreht aufgesteckt werden.

An der Seite oben rechts befindet sich ein Schattenstab mit Gradskala, der die Neigung bzw. Ausrichtung der Grundfläche zu einer Lichtquelle erkennen lässt.

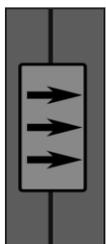


### Winderzeuger 1400-19

Der Winderzeuger dient zur kontrollierten Erzeugung von Wind für Experimente mit der Windturbine. Dafür wird er mit dem Powermodul als Spannungsquelle verbunden. Es muss der jeweils farbgleiche Anschluss verbunden werden (Schwarz-Schwarz, Rot-Rot). Der Betrieb des Winderzeugers ist nur mit dem mitgelieferten Powermodul oder einer stabilisierten Gleichspannung von maximal 12 Volt zulässig.

Zur Inbetriebnahme befindet sich am Gehäuse ein An-/Aus-Schalter auf der gegenüberliegenden Seite der Steckkontakte.

Die Windrichtung ist durch Pfeile auf der Oberseite des Gerätes markiert.



Der Winderzeuger darf keinen starken Erschütterungen ausgesetzt sein, da die Rotorblätter im Inneren brechen könnten.

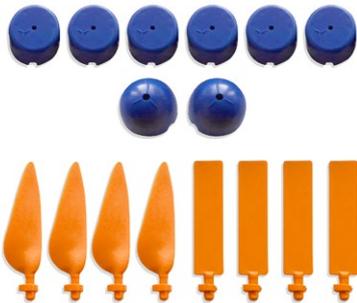
Technische Daten:

→ Maximale Spannung: 12 V Gleichstrom (DC – stabilisiert)

→ Windgeschwindigkeit: 0 – 7 m/s



## Handhabung der Einzelteile



### Windrotoren 1400-12

Aus den Bestandteilen können Rotoren mit 2, 3 oder 4 Rotorblättern mit flachem Profil oder optimiertem Profil zusammengesetzt werden. Der 4-fach Nabeneinsatz ist mit einem Anstellwinkel von 25° vorhanden, der 3-fach Einsatz in den Anstellwinkeln 20°, 25°, 30°, 50° und 90°.

Zum Einsetzen der Rotorblätter sollte folgendermaßen vorgegangen werden:



1. Zuerst wird eine Nabe mit dem gewünschten Anstellwinkel und der Flügelzahl ausgewählt (die Naben sind auf der Rückseite entsprechend beschriftet).
2. Danach werden die Rotorblätter eingesetzt. Beim Einsetzen ist darauf zu achten, dass diese mit der abgerundeten Seite nach oben in den Einsatz gelegt werden.
3. Nach dem Einsetzen der Flügel wird die Nabenkappe aufgesetzt und leicht festgedrückt.



### Handhabung Fingerschutz

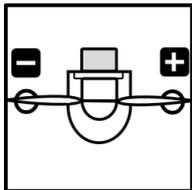
An der Windturbine befinden sich, wie im Foto zu sehen, drei kleine Nasen zum Befestigen des Fingerschutzgitters

1. Das Fingerschutzgitter wird auf den Kopf des Windgenerators aufgesteckt und an den unteren beiden Nasen leicht festgedrückt.
2. Anschließend wird der Windrotor auf die Welle der Windturbine gesteckt.
3. Der Rotor sollte, wegen der Reibung, nicht bis ganz an die Turbine gedrückt werden.



**Hinweis:** Das Fingerschutzgitter bietet Schutz vor einer seitlichen Kollision, zum Beispiel beim Drehen der Windturbine. Von vorn darf nicht in den Windrotor gegriffen werden, da Verletzungsgefahr besteht! Auch die Rotorblätter könnten beschädigt werden.

## Handhabung der Einzelteile

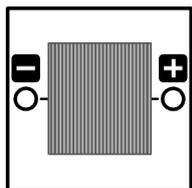
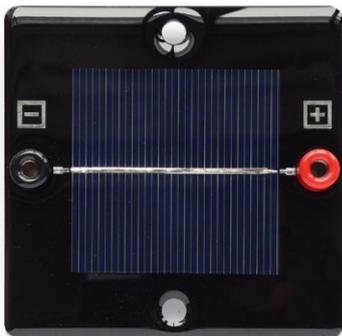


### Windturbinenmodul 1400-22

Um eine kleine Windenergieanlage zu erhalten, muss die blaue Windturbinen auf die Modulplatte gesteckt werden. Auf der Generatorwelle wird dann ein Windrotor befestigt. Der Rotor sollte dabei das Gehäuse der Turbine nicht berühren, da er sich durch die Reibung deutlich schwerer dreht.

Der Generator in der Windturbinen erzeugt eine Gleichspannung, deren Polung auf der Modulplatte erkennbar ist. Auf die Modulplatte ist eine Winkelskala aufgedruckt. Damit kann die Windturbinen in einem bestimmten Winkel in den Wind gedreht werden.

**Hinweis:** Wenn sich der Rotor dreht besteht Verletzungsgefahr. Daher immer mit dem Fingerschutz arbeiten.

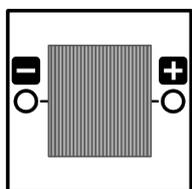


### Solarmodul 1100-02, 0,5 Volt / 840 mA

Auf der Rückseite des Solarmoduls befindet sich die Angabe zur Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke.

Technische Daten:

- Material: polykristallines Silizium
- Leerlaufspannung: 0,5 V
- Kurzschlussstromstärke: 840 mA
- Spitzenleistung: 0,42 W<sub>p</sub>



### Solarmodul 1100-07, 1,5 Volt / 280 mA

Dieses Solarmodul ist eine Reihenschaltung aus 3 Solarzellen. Auf der Rückseite befindet sich die Angabe zur Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke.

Technische Daten:

- Material: polykristallines Silizium
- Leerlaufspannung: 1,5 V
- Kurzschlussstromstärke: 280 mA
- Spitzenleistung: 0,42 W<sub>p</sub>



## Handhabung der Einzelteile

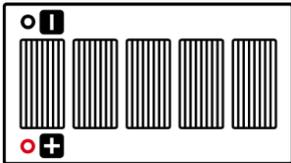


### Solar modul 1100-31, 2,5 Volt / 420 mA

Dieses Solar modul ist eine Reihenschaltung aus 5 Solarzellen. Auf der Rückseite befindet sich die Angabe zur Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke.

Technische Daten:

- Material: polykristallines Silizium
- Leerlaufspannung: 2,5 Volt
- Kurzschlussstromstärke: 420 mA
- Spitzenleistung: 1,05 W<sub>p</sub>



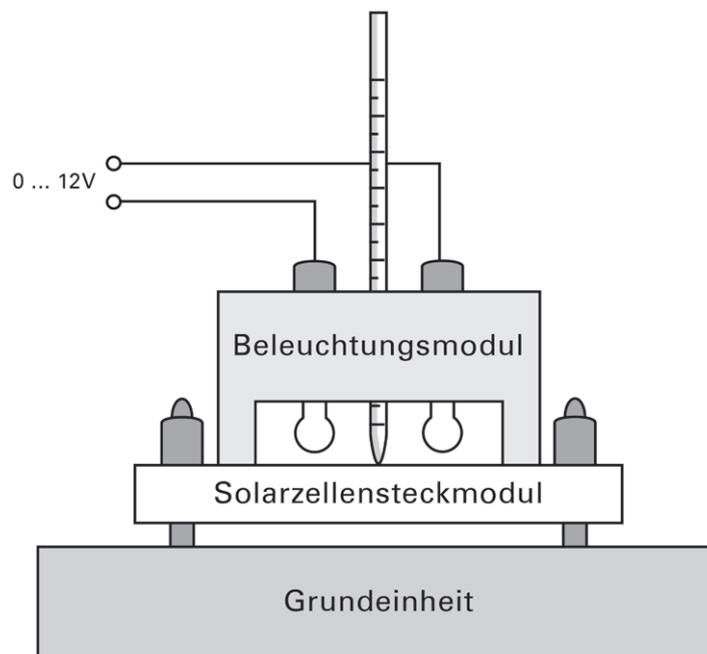
### Abdeckungen für Solarzelle 1100-29

Die 4 Abdeckungen können jeweils ein Viertel der kleinen Solarzellen abdecken.

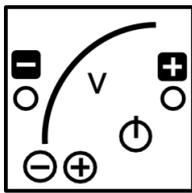


### Beleuchtungsmodul 1100-20

Das Beleuchtungsmodul wird mit dem Powermodul betrieben. Im Inneren befinden sich 4 kleine Glühlampen, die durch das Herein- oder Herausdrehen zur Beleuchtung beitragen. In den Experimenten wird es direkt auf die Solarzelle gestellt. Zwischen den beiden Anschlüssen befindet sich eine Öffnung für ein Laborthermometer (nicht im Lieferumfang enthalten) mit dem die Temperatur unter dem Modul bestimmt werden kann. Wegen der Erwärmung durch die Glühlampen sollte das Beleuchtungsmodul nicht zu lange auf der Solarzelle stehen, da dies die Ergebnisse verfälscht.



## Handhabung der Einzelteile



### Powermodul 9100-05 mit Netzteil L3-03-222

Das Powermodul dient der Stromversorgung für einige Module, z. B. dem Windgenerator. Zum Betrieb muss es mit dem Netzteil und einer 230 V-Steckdose verbunden werden. Die Eingangsbuchse dafür liegt oben rechts.

Die Spannung sollte bereits vor dem eigentlichen Einschalten eingestellt werden, damit in den Versuchen keine Module beschädigt werden. Das gilt insbesondere für die Brennstoffzelle und für das Kondensatormodul, die bei Überspannung leicht kaputt gehen. Mit der „+“- und „-“-Taste kann in halben Schritten zwischen 0,5 und 12 Volt gewählt werden. Die Einstellung wird als LED-Punkt neben der Zahl angezeigt (schwaches Leuchten neben der 2 entspricht dabei z. B. dem Halbton-Wert, 1,5 V).

Mit dem Einschalt-Button  wird dann die Spannung an die Ausgangsbuchsen angelegt. Die Spannung liegt an, solange der Einschalt-Button rot leuchtet. Bei Kurzschluss oder Strömen über 2 Ampère schaltet das Powermodul ab. Trotz dieses Schutzes sollte eine Fehlbedingung vermieden werden.

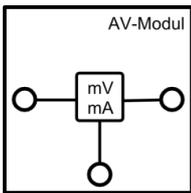
In einigen Versuchen simuliert das Powermodul ein Kraftwerk oder eine Trafostation, z. B. beim Elektrolyseur der reversiblen Brennstoffzelle.

Technische Daten:

- Ausgangsspannung: 0 - 12 V
- Ausgangsleistung: max. 24 W
- Regelbar in 0,5 V Schritten per Touch-Button
- Überstromerkennung > 2 A, dann Abschaltung
- Eingangsspannung: 110 bis 230 V, 50 bis 60 Hz (über beiliegendes Steckernetzteil)



## Handhabung der Einzelteile



### AV-Modul 9100-03 mit 2 AA-Batterien

Das AV-Modul ist ein kombiniertes Spannungs- und Strommessgerät. Es besitzt drei orange Tasten (eckig und rund), deren Funktionen jeweils im Display angezeigt werden. Durch das Drücken einer beliebigen Taste wird das Modul eingeschaltet. Im ausgeschalteten Zustand ist im Display nur das Hersteller-Logo zu sehen.

Mit der Taste rechts oben kann zwischen den drei Modi Spannungsmessung, Stromstärkemessung und kombinierte Spannungs- und Stromstärkemessung gewechselt werden. Der Messmodus und der Anschluss der Kabel an das Modul werden durch die Schaltsymbole im Display angezeigt. Im Modus der Spannungsmessung ist zu beachten, dass kein Strom zur rechten Buchse fließt. Im kombinierten Modus kann die Spannung sowohl über die rechte als auch die linke Buchse gemessen werden. Der Einfluss des Innenwiderstands der Stromstärkemessung wird intern kompensiert. Der Messwert ist vorzeichenbehaftet. Liegt der positive Pol an einer der roten und der negative Pol an der schwarzen Buchse an, ergibt die Spannungsmessung ein positives Ergebnis. Fließt der Strom von der linken zur rechten Buchse ist die angezeigte Stromstärke positiv.

Nach 30 Minuten ohne Tastendruck oder nach 10 Minuten ohne Messwertveränderung schaltet sich das Modul automatisch aus. Das AV-Modul kann Spannungen bis 12 V und Stromstärken bis 2 A messen. Falls eine dieser Größen überschritten wird, unterbricht das Modul den Stromfluss und es erscheint „overvoltage“ bzw. „overcurrent“ im Display. Diese Fehlermeldung kann durch Betätigen der entsprechenden Taste bestätigt werden. Befinden sich die Messwerte wieder im zulässigen Bereich, misst das Modul weiter.

Wenn das Display nichts anzeigt oder im Betrieb „Bat“ angezeigt wird, müssen die Batterien auf der Rückseite ausgetauscht werden: 2 x AA Batterien oder Akkus 1,2 bis 1,5 V; beim Einlegen der Batterien dürfen die Berührungsfelder nicht berührt werden; Polung beim Einsetzen der Batterien gemäß Markierung am Boden des Batteriefachs beachten!

Technische Daten:

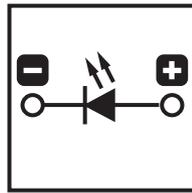
Spannungsmessung:

- Messbereich: 0...12 Volt
- Genauigkeit: 1 mV
- Automatische Abschaltung bei Überspannung > 12 Volt (Wiedereinschalten durch Touch-Button)

Strommessung:

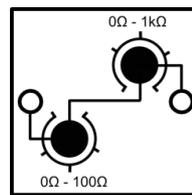
- Messbereich: 0...2 A
- Genauigkeit: 0,1 mA (0...199 mA) und 1 mA (200 mA...1 A)
- Automatiksicherung > 2 A (Wiedereinschalten durch Touchbutton)
- Innenwiderstand < 0,5 Ohm (0...200 mA);  
< 0,2 Ohm (200 mA...2 A)

## Handhabung der Einzelteile



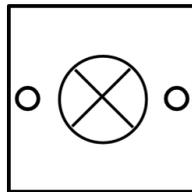
### LED-Modul 1400-08

Im Inneren des LED-Moduls befindet sich eine rote LED mit einer Wellenlängenemission von 697 nm. Um die Diode zum Leuchten zu bringen muss eine Spannung von mindestens 1,7 Volt angelegt werden.



### Potentiometermodul 1100-23

Das Potentiometermodul besteht aus einem 0-100 Ohm-Drehwiderstand und einem 0-1000 Ohm-Drehwiderstand. Beide sind in Reihe geschaltet, sodass Widerstände zwischen 0 Ohm bis 1100 Ohm gesetzt werden können. Die Messgenauigkeit beim Einstellen eines Widerstandes liegt bei 0,5 Ohm beim kleineren Drehwiderstand und bei 5 Ohm beim größeren.

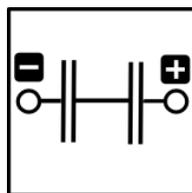


### Glühlampenmodul 1100-26

Das Glühlampenmodul dient bei einigen Versuchen als Verbraucher.

Technische Daten:

- Mikroglühlampe  $P_{typ} = 200 \text{ mW}$  (bei 3,5 Volt)
- Absicherung über Spannungsbegrenzung (6 Volt)



### Kondensatormodul 1600-02

Das Kondensatormodul besteht aus zwei in Reihe geschalteten Kondensatoren. Die maximale Ladespannung beträgt 5,4 V. Zum Aufladen darf jedoch keine höhere Spannung als 5 V angelegt werden, da Kondensatoren mit der Zeit an Spannungsfestigkeit verlieren und kaputt gehen können, wenn sie zu hoch geladen werden. Zum Entladen kann der Kondensator kurzgeschlossen werden, da Sicherungen im Modul einen zu hohen Stromfluss verhindern.

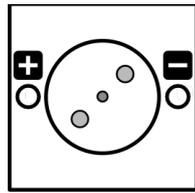
Zum schnellen Aufladen kann der Kondensator direkt an eine Spannungsquelle (z. B. Powermodul) angeschlossen werden. Die eingestellte Spannung kann bei 0,5 V beginnen und alle 10 s um 0,5 V erhöht werden. In der Endspannung sollte der Kondensator circa 30 s lang aufgeladen werden.

Technische Daten:

- Kapazität: 5 F
- Ladespannung: 5,4 Volt



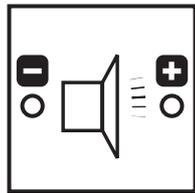
## Handhabung der Einzelteile



### Motormodul 1100-27 mit Farbscheibenset 1 1100-28

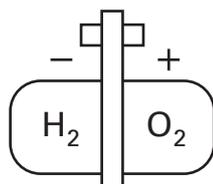
Das Motormodul dient als Verbraucher. Es beinhaltet einen Gleichstrommotor, der sich in beide Richtungen drehen kann. Um anzulaufen benötigt er eine Mindestspannung von 0,35 Volt.

Über die blaue Plastikscheibe, können auf dem Motormodul Farbscheiben befestigt werden. Die Farbkombinationen sind: Rot-Grün-Blau, Rot-Blau, Rot-Grün, Grün-Blau, Farbtone, Relief, Stroboskopscheibe.



### Hupenmodul 1100-25

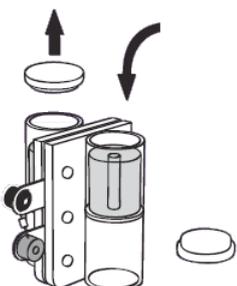
**Hinweis:** Das Hupenmodul erzeugt ab einer Spannung von 0,7 Volt einen Dauerton. Polung beachten!



### Reversible Brennstoffzelle L2-06-067 mit destilliertem Wasser (100ml) 1800-15

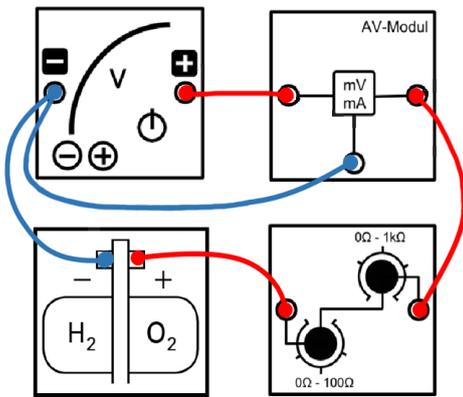
Die reversible Brennstoffzelle besteht aus einem Elektrolyseur und einer Brennstoffzelle. Zum Befüllen vor der Elektrolyse muss folgendermaßen vorgegangen werden:

1. Drehe die Zelle so um, dass die Seite mit den Röhren oben liegt (siehe Zeichnung oben). Stelle sie auf (Papier)tücher, die Wasser aufsaugen können.
2. Fülle beide Zylinder so lange mit destilliertem Wasser, bis ein wenig davon durch das Röhren abläuft. (Hinweis: kein normales Wasser nehmen)
3. Verschließe die beiden Zylinder mit den Plastikdeckeln, es sollen höchstens noch kleine Luftblasen zu sehen sein. Drehe das ganze Teil um. Die wassergefüllte Seite muss jetzt unten liegen.



**Achtung:** Zum Aufladen der Brennstoffzelle dürfen **nie mehr als 2,5 Volt Spannung** angeschlossen sein. Das Powermodul liefert jedoch bis zu 12 Volt und muss daher richtig eingestellt sein. Andernfalls kann es passieren, dass mehr als 200 Milliampère (mA) Strom hindurchfließt, was die **Brennstoffzelle schnell funktionsunfähig** machen kann. Schaltplan: siehe nächste Seite

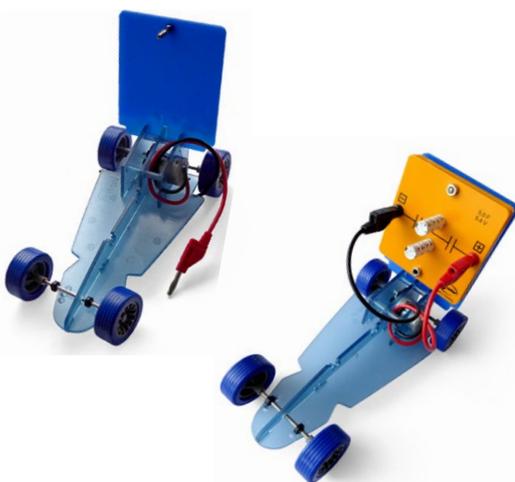
## Handhabung der Einzelteile



### Herstellung von Wasserstoff mit der reversiblen Brennstoffzelle – **Achtung: unbedingt Anleitung beachten**

Das Laden der Brennstoffzelle, also die Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse, muss über das Potentiometer und das AV-Messmodul geregelt werden. **Nur das Powermodul zu benutzen reicht nicht. Auch die Handkurbel darf nicht verwendet werden.**

1. Schließe nun alle Kabel, wie abgebildet an. Achtung: Strom noch nicht anschalten. Zum Aufladen der Brennstoffzelle dürfen nicht mehr als 200 mA fließen, da sie sonst kaputtgehen kann. Das erreicht man mit der gezeigten Schaltung und Kontrolle am AV-Messgerät (AV-Modul).
2. Stelle das Powermodul auf 2,5 Volt ein, lasse es aber noch ausgeschaltet. Stelle das Potentiometer (Poti) zuerst auf Maximum (1100 Ohm = 1,1 kΩ).
3. Schalte dann das Powermodul ein und lies die Werte für Spannung (V) und Stromstärke (A) am AV-Modul (im AV-Modus) ab. Regle am Potentiometer zuerst am kΩ-Knopf, dann am anderen Knopf vorsichtig nach unten bis ca. 2 V Ladestrom und 200 mA erreicht sind. Am Anfang sieht man nur geringe Änderungen bei der Stromstärke aber ab ca. 25 Ohm geht es sehr schnell. Die Gasbildung sollte nun sichtbar werden. Im Behälter H<sub>2</sub> entsteht doppelt so viel Gas wie im Behälter O<sub>2</sub>.
4. Achte darauf, das Powermodul rechtzeitig abzuschalten und die Kabel zu lösen, sonst verschwindet dein Wasserstoff wieder. Die Zelle darf auch nicht „trockenlaufen“.
5. Jetzt kann die Zelle im Brennstoffzellmodus Verbraucher, z. B. das Auto mit Strom versorgen.



### Elektro-Modellfahrzeug mit Akku-Adapter 1801-02

Das Elektro-Modellfahrzeug kann mit der reversible Brennstoffzelle oder dem Kondensatormodul betrieben werden. Die reversible Brennstoffzelle kann direkt auf das Fahrzeug gesteckt werden. Das Kondensatormodul kann mit der blauen Adapterplatte (siehe Foto) am Fahrzeug befestigt werden.

Das Fahrzeug bewegt sich, sobald die beiden Kontakte an den Versorger angeschlossen werden.

Werden die Räder während des Betriebs festgehalten, kommt es zum Kurzschluss und der Energiespeicher entlädt sich.

info





### Wasserradmodul 1900-01

Das Wasserradmodul ist mit einer Pelton-Turbine und einem Getriebegenerator ausgestattet. Der Wasserstrahl wird mit Hilfe des Wasserschlauchs auf die Turbinenschaufeln gelenkt. Der transparente Spritzschutz schirmt den Generator vor Feuchtigkeit ab.

Da dieses Modul im Testlauf einen recht großen Anlaufwiderstand hatte, empfiehlt sich ein weiterer Spritzschutz, besonders für alle elektrischen Teile in der Umgebung.



### Handgeneratormodul 1602-02 und Zubehör

Der Handgenerator liefert schnell hohe Spannungen. Daher darf er für empfindliche Module nicht eingesetzt werden. Dazu gehören die Brennstoffzelle und der Kondensator. Er eignet sich gut für das Windrad, die Beleuchtungsmodule, die Hupe oder das Motormodul.

## Erneuerbare Energien

Ganz klar: Strom kommt aus der Steckdose – und was passiert vorher?

Für euch ist es bestimmt selbstverständlich, dass erneuerbare Energien die beste Option für die Zukunft sind. Etwa die Hälfte der Bruttostromerzeugung in Bayern stammt schon aus erneuerbaren Energien!

Mit den Experimenten dieser Energiekiste könnt ihr ausprobieren, wie Solarzellen, Windenergieanlagen und Brennstoffzellen wirklich funktionieren.

Was euch das bringt? Ihr könnt mitreden und selber fachsimpeln, wie wir in Zukunft Strom erzeugen wollen. Denn: Technik macht Spaß, wenn man ein bisschen etwas davon versteht. Und wer weiß, vielleicht investiert ihr ja mal in eine neue Bürgerenergieanlage, arbeitet in diesem Bereich oder fährt eines Tages ein supereffizientes Brennstoffzellen-Auto?



## Basics Gleichstrom



Strom fließt, wenn Ladungsträger sich bewegen. Ladungsträger sind geladene Teilchen, z. B. Elektronen (e-), Protonen (H+), Ionen (geladene Atome wie Chlorid (Cl-) bzw. geladene Moleküle wie das Hydroxid-Ion (OH-)).

Die Bewegung der Ladungsträger wird durch eine Potenzialdifferenz (= Spannung in der Einheit Volt) oder durch Magnetfelder induziert. Strom fließt dann im geschlossenen Stromkreis von einem zum anderen der beiden Pole. Die Pole sind in der Elektrik und Elektronik meist Anschlussstellen für Bauteile wie elektrische Verbraucher (Glühlampe, Motor etc.), Leiterkabel, Batterie usw. Ist der Stromkreis geöffnet oder liegt ein (nahezu) unendlich hoher Widerstand zwischen den Polen, wie es durch Ausschalten über einen Schalter der Fall ist, fließt kein Strom.

Die Benennung der Pole ist historisch bedingt und in den Naturwissenschaften (Physik, Chemie, Biologie) genau andersherum als in der Technik. Technisch fließt Strom vom Pluspol zum Minuspol entlang des Potenzialgefälles. Das spielt bei Gleichstrom v. a. dann eine Rolle, wenn Dioden angeschlossen werden oder eine Drehrichtung, z. B. eines Gleichstrom-Motors wichtig ist.

Der Zusammenhang zwischen Spannung (U in Volt V), Stromstärke (I in Ampère A) und Widerstand (R in Ohm  $\Omega$ ) definiert sich so:

$$U = R \cdot I$$

Der Zusammenhang zur Leistung (P in Watt W) lautet:

$$P = U \cdot I$$

Zum Beispiel erzeugt eine beleuchtete Solarzelle Strom, der mit einem Messgerät erfasst werden kann. Daraus ergibt sich die (momentane) Leistung der Solarzelle (siehe Experiment 3.1). Steigt oder sinkt die Beleuchtungsstärke, verändert sich die Leistung bis auf Null oder bis zur Maximalleistung der Zelle (=Nennleistung in Watt<sub>peak</sub> W<sub>p</sub>).

## Thema 1 - Elektrische Verbraucher

Etwa drei Viertel des Stroms zuhause verbrauchen Haushaltsgeräte, Kommunikation und Unterhaltung sowie die Beleuchtung. Den eigenen Stromverbrauch zu kennen und zu wissen wie man z. B. den Verbrauch eines Kühlschranks messen kann, ist Voraussetzung für sinnvolles Energiesparen.

Denn es gilt: jede Kilowattstunde, die wir nicht verbrauchen, muss gar nicht erst hergestellt werden. Das ist der beste Klima- und Umweltschutz und nützt auch dem eigenen Geldbeutel.



## Experiment 1: Elektrische Schaltkreise aufbauen

### Aufgabe

Lerne unterschiedliche Verbraucher *kennen* und *baue* elektrische Schaltkreise *auf*.

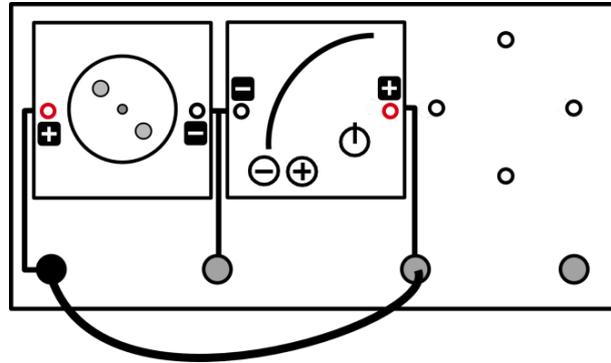
Als Verbraucher werden im Allgemeinen Geräte bezeichnet, die elektrische Energie in andere Energieformen umwandeln.

Beispiele: Bei Hupe und Motor Umwandlung von elektrischer Energie in Bewegungsenergie, bei einer Lampe in Licht und Wärme oder bei einer Herdplatte in Wärme.

### Durchführung

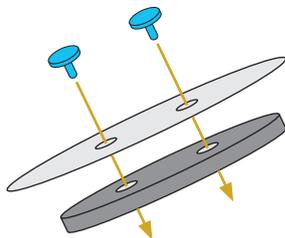
1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* die Schaltung wie oben abgebildet zuerst mit dem Motormodul *auf* und *stelle* auf dem Powermodul 1 Volt *ein* (noch ohne anzuschalten). *Achte* auf die richtige Polung (+ und -) der Anschlüsse. *Schalte* das Powermodul *ein*. *Notiere* deine Beobachtungen.
3. *Erhöhe* nun die Spannung wie in der Tabelle auf der nächsten Seite angegeben.
4. *Wiederhole* das Experiment mit der Hupe, der Glühlampe und dem LED-Modul. *Trage* alle Beobachtungen in die Tabelle *ein*. *Achte* dabei nicht nur auf das, was du siehst und hörst, sondern *berühre* auch LED und Glühlampe nach einiger Zeit. Was bemerkst du?

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Motormodul mit beliebiger Farbscheibe
- Powermodul mit Netzteil
- Glühlampenmodul
- LED-Modul
- Hupenmodul (Polung beachten)
- 3 Kabel



Wenn nötig, kannst du zum Lösen der Pins von der Rotationsscheibe einen Stecker zu Hilfe nehmen. *Drücke* den Stecker dazu vorsichtig von unten gegen die Pins.

## Experiment 1: Elektrische Schaltkreise aufbauen

Tabelle Beobachtungen

1 V	dreht sich langsam	langanhaltendes hohes Hupen	leuchtet nicht	glimmt leicht
2 V	dreht sich schneller	langanhaltendes lauterer hohes Hupen	leuchtet leicht	glimmt heller
4 V	dreht sich schneller	immer lauterer Hupen	leuchtet hell	leuchtet
6 V	dreht sich sehr schnell und brummt	hohes, sehr lautes Hupen	leuchtet hell	leuchtet hell, wird warm

**Auswertung:** Fülle den Lückentext aus!

Hupe, Motor, LED und Glühlampe sind Verbraucher. Sie wandeln elektrische Energie, die das Powermodul liefert, in andere Energieformen um: Hupe und Motor wandeln die elektrische Energie in kinetische oder Bewegungs- energie um. Geräusche, die wir wahrnehmen, sind auch Bewegungen, nämlich Schwingungen der Luft. LED und Glühlampe wandeln die elektrische Energie in Lichtenergie um, die Glühlampe zusätzlich noch in thermische Energie/Wärmeenergie. Die Verbraucher „verbrauchen“ also nicht die elektrische Energie, sondern wandeln sie in andere Energieformen um.





## Thema 2 - Optische Täuschungen



### Übersicht/Lernziele



- Die SuS beschreiben verschiedene optische Täuschungen.
- Die SuS erkennen, dass sich Farben nur in den drei Eigenschaften (Farbton, Helligkeit und Sättigung) unterscheiden. Die SuS beschreiben die optische Täuschung mit verschiedenen Kombinationen der drei Grundfarben und entdecken die additive Farbmischung.
- Die SuS beschreiben die optische Täuschung mit der Benham-Scheibe.
- Die SuS beschreiben die optische Täuschung mit der Relief-Scheibe.

## Thema 2 - Optische Täuschungen

Eine hohe Umgebungshelligkeit sorgt über das PV-Modul für eine schnelle Drehung des Motors und somit bei den meisten Experimenten für eine deutliche optische Täuschung. Scheint keine Sonne und ist keine ausreichende Zimmerbeleuchtung gegeben, kann man den Motor mit dem Powermodul (0,5-1,0 Volt) und dem Potentiometer (Reihenschaltung) drehen lassen.

Das Phänomen der Benham-Scheiben (Experiment 2.4) ist bis heute nicht eindeutig erklärbar.

Die Räumlichkeit entsteht nicht nur durch binokulares Sehen (mit zwei Augen), sondern auch durch die monokular wirkende, sogenannte Bewegungsparalaxe. Der Effekt der Bewegungsparalaxe kann beispielsweise bei Zug- oder Autobahnfahrten be-

obachtet werden. Weit entfernte Objekte bewegen sich scheinbar langsamer als Bäume neben der Fahrstrecke. In Experiment 2.5 wird dieser Effekt über die Konstruktion der Scheibe gezeigt. Durch die unterschiedlichen Relativbewegungen der einzelnen Kreise der Scheibe entsteht ein räumlicher Eindruck.



## Experiment 2.1: Der Grundaufbau für Farbscheibenexperimente

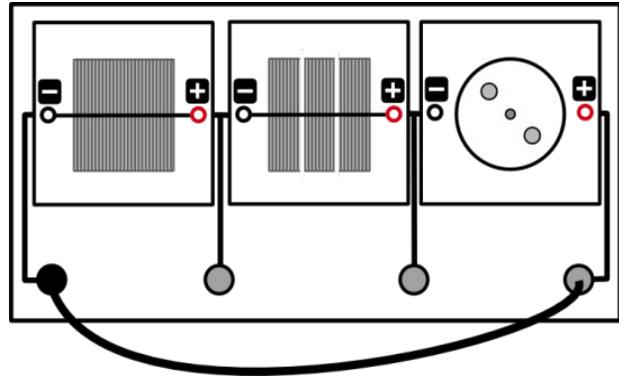
### Aufgabe

Vorbereitung für Experiment 2.2

### Durchführung

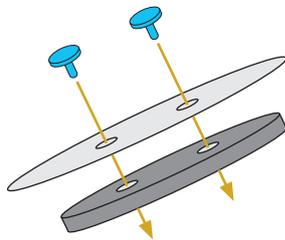
1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* den Versuch, wie abgebildet, *auf*.
3. *Stecke* anschließend die Rotationsscheibe auf den Motor. Gehalten wird die Pappscheibe durch zwei farbige Kunststoffpins.-

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß
- Solarmodul 0,5 V
- Solarmodul 1,5 V
- Motormodul
- abgebildete Farbscheibe rot-weiß
- 1 Kabel



Wenn nötig, kannst du zum Lösen der Pins von der Rotationsscheibe einen Stecker zu Hilfe nehmen. *Drücke* den Stecker dazu vorsichtig von unten gegen die Pins.

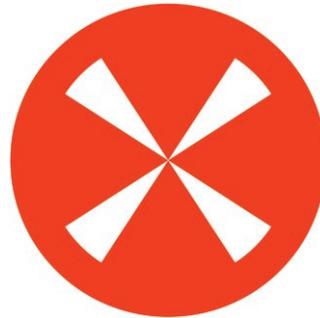
## Experiment 2.2: Farbeigenschaften

### Benötigte Geräte

- Versuchsaufbau aus Experiment 2.1
- Farbscheibe rot-weiß

### Durchführung

1. *Halte* den Versuchsaufbau ins Licht, so dass sich die Scheibe dreht. *Halte* deine Hand so über die Scheibe, dass eine Hälfte davon im Schatten liegt. Die Ergebnisse helfen dir, Farbsysteme besser zu verstehen.
2. *Beobachte*:



Farbton: Welche Farbe zeigt die drehende Scheibe? Magenta

Helligkeit: Auf der abgeschatteten Seite wirkt die Farbe

- heller als auf der beleuchteten Seite
- genauso wie auf der beleuchteten Seite
- dunkler als auf der beleuchteten Seite

Sättigung: In der Mitte der Scheibe ist der Farbeindruck

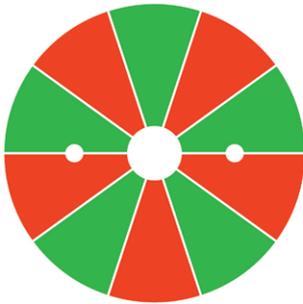
- blasser als am Rand
- genauso wie am Rand
- kräftiger als am Rand



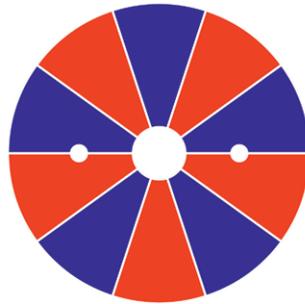
## Experiment 2.3: Die additive Farbmischung

### Benötigte Geräte

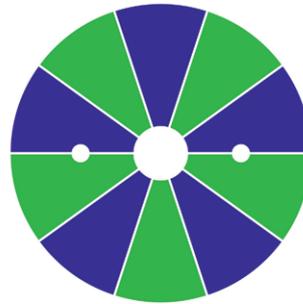
- Versuchsaufbau aus Experiment 2.1
- Farbscheiben



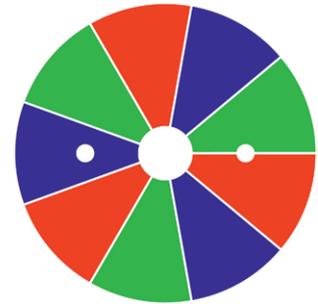
grün-rot



rot-blau



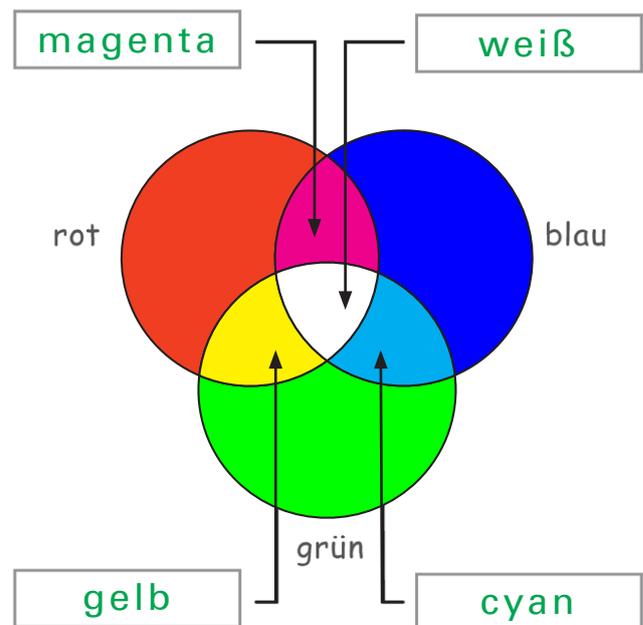
grün-blau



grün-rot-blau

### Durchführung

1. Wenn die Scheibe still steht, haben die Kreisstücke der verschiedenen Scheiben unterschiedliche Farben.
2. Lasse die Farbscheibe schnell drehen, damit sich die Farben optisch vermischen. Male in der Zeichnung rechts die einzelnen Bereiche aus.
3. Fange mit den reinen Farben rot, grün und blau an.
4. Male danach mit Hilfe deiner Beobachtungen an den Farbscheiben die vier Mischbereiche aus. Beschrifte die markierten Bereiche.
5. Wechsle zur nächsten Farbscheibe.



## Experiment 2.4: Optische Täuschungen mit der Benham-Scheibe

### Benötigte Geräte

- Versuchsaufbau aus Experiment 2.1
- Farbscheibe schwarz-weiß

### Durchführung

1. *Notiere* deine Beobachtungen.
2. *Tausche* dich mit deinen Mitschülerinnen und Mitschülern darüber *aus*, was sie sehen.

**Hinweis:** Nicht alle Menschen können den Effekt gleich gut sehen.

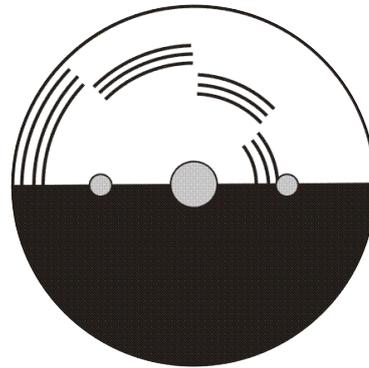
### Lösung

**Obwohl die Pappscheibe schwarzweiß ist, erscheinen bei der Drehung farbige Ringe.**

---

---

---



## Experiment 2.5: Optische Täuschungen mit der Relief-Scheibe

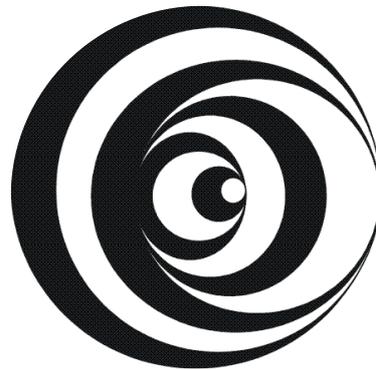


### Benötigte Geräte

- Versuchsaufbau aus Experiment 2.1
- Farbscheibe schwarz-weiß
- evtl. Potentiometermodul

### Durchführung

1. Baue den Versuch auf wie bei Experiment 2.1 beschrieben.
2. Was siehst du, wenn sich die Scheibe langsam dreht? Falls du nichts siehst, weil sich die Scheibe zu schnell dreht, *verschatte* die Solarzellen ein wenig oder *schalte* das Potentiometermodul in Reihe und erhöhe den Widerstand.



### Lösung

Bei langsamer Drehung scheint die Scheibe eine räumliche Tiefe zu besitzen. Dabei können verschiedene Objekte wahrgenommen werden, entweder ein nach innen zeigender „Vulkankrater“ oder ein sich nach außen windender „Wurm“.

## Thema 3 - Sonnenenergie

Die Sonne ist das Zentralgestirn unseres Sonnensystems und Ursprung allen Lebens. Ihre Entfernung zur Erde beträgt rund 150 Millionen Kilometer – das entspricht ungefähr 300.000-mal der Strecke München-Berlin. Trotz dieser riesigen Entfernung erreicht unvorstellbar viel Energie die Erde, denn die Sonne liefert hiervon in einer halben Stunde mehr, als alle Menschen zusammen in einem Jahr verbrauchen. Bayern zählt zu den von der Sonne verwöhnten Gebieten Deutschlands und verfügt über sehr günstige Voraussetzungen zur Nutzung von Sonnenenergie (Solarenergie).

Photovoltaik nutzt die Solarenergie zur Erzeugung von elektrischem Strom. Eine Photovoltaikanlage (PV-Anlage) kann das Sonnenlicht in Gleichstrom verwandeln und ihn direkt für geeignete Geräte verwenden oder in Batterien speichern. Der Gleichstrom kann aber auch – über einen sogenannten Wechselrichter – in Wechselstrom umgewandelt und z. B. ins Stromnetz eingespeist werden.

Nähere Informationen gibt es im Energie-Atlas Bayern:

[www.energieatlas.bayern.de/thema\\_sonne.html](http://www.energieatlas.bayern.de/thema_sonne.html)

Die folgenden Versuche arbeiten ausschließlich mit Gleichstrom.



## 3.1: Die Solarzellenleistung

### Anmerkung

Bei diesem Experiment wird die Leistung einer Solarzelle aus der Kurzschlussstromstärke und der Leerlaufspannung berechnet. Diese Leistung entspricht nicht wirklich der Maximalleistung der Solarzelle. Sie wird jedoch verwendet, da die

Ermittlung der Maximalleistung ohne technische Hilfsmittel zu aufwändig ist. Im Rahmen dieses Experiments führt der Vergleich dieser fiktiven Leistungen zum gleichen Ergebnis, wie der Vergleich der Maximalleistungen.

## Experiment 3.1: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der beleuchteten Fläche

### Aufgabe

Lerne die Eigenschaften von Solarzellen *kennen* und *bestimme* die Leistung einer Solarzelle.

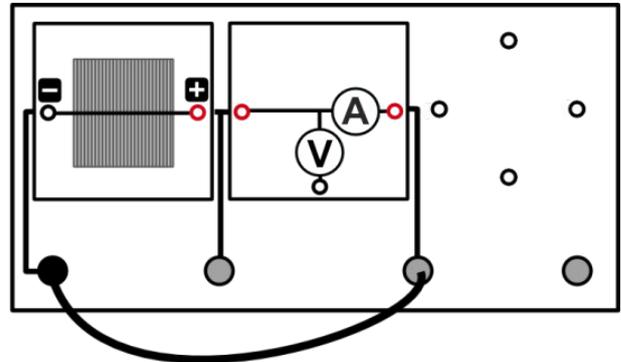
### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Solarzelle 0,5 V
- AV-Modul
- Solarzellenabdeckungen (4 schwarze Kunststoffplättchen)
- 1 Kabel

### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Handhabung der Geräte.
2. *Baue* den Versuch, wie abgebildet, aber noch ohne das Kabel, *auf*.
3. *Erfasse* alle folgenden Messwerte in der Tabelle unten.
4. *Miss* zuerst die Leerlaufspannung  $U_L$  der Solarzelle ohne Abdeckung. *Nutze* dazu das AV-Modul im Spannungsmodus.
5. *Miss* anschließend die Kurzschlussstromstärke  $I_K$ . *Stecke* dazu das abgebildete Kabel auf der Grundeinheit ein und *verwende* das AV-Modul im Stromstärke-Modus.
6. *Wiederhole* beide Messungen mit der Solarzelle, wenn sie zu 1/4, zu 1/2, zu 3/4 und vollständig mit den Abdeckplättchen zugedeckt ist. (Das Licht sollte während der Versuche gleich stark bleiben. (Nutze ggf. eine Lampe oder das Beleuchtungsmodul statt der Sonne.)
7. *Berechne* aus den Messwerten jeweils die Leistung  $P$  und *trage* deine Werte wieder in die Tabelle *ein*.
8. *Stelle* die Ergebnisse in den Diagrammen *dar*. (x-Achse: Abdeckungsgrad (0, 1/4, 1/2, 1); y-Achse:  $P$ ,  $I$  sowie  $U$ )
9. *Beschreibe* den Zusammenhang zwischen Spannung und beleuchteter Fläche, Stromstärke und Fläche sowie Leistung und Fläche.
10. *Erkläre* das Verhalten der Leerlaufspannung bei gleichbleibendem Lichteinfall. Wie verhält sich die Kurzschlussstromstärke in Abhängigkeit vom Grad der Abdeckung und warum?

### Versuchsaufbau



### Messwerte

	Solarzelle abgedeckt zu				
	ohne Abdeckung	1/4	1/2	3/4	ganz abgedeckt
$U_L$ [mV]	500	480	460	420	80
$I_K$ [mA]	16,1	11,6	7,6	3,2	0,0
$P = U_L \cdot I_K$ [mW]	8,1	5,6	3,5	1,3	0,0



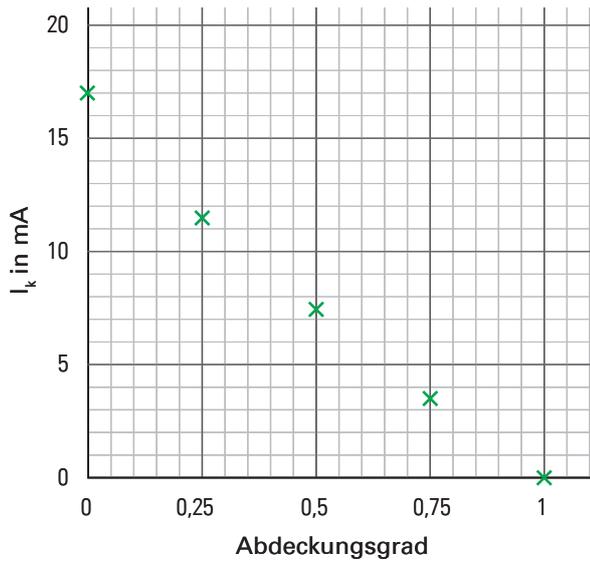
## Experiment 3.1: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der beleuchteten Fläche



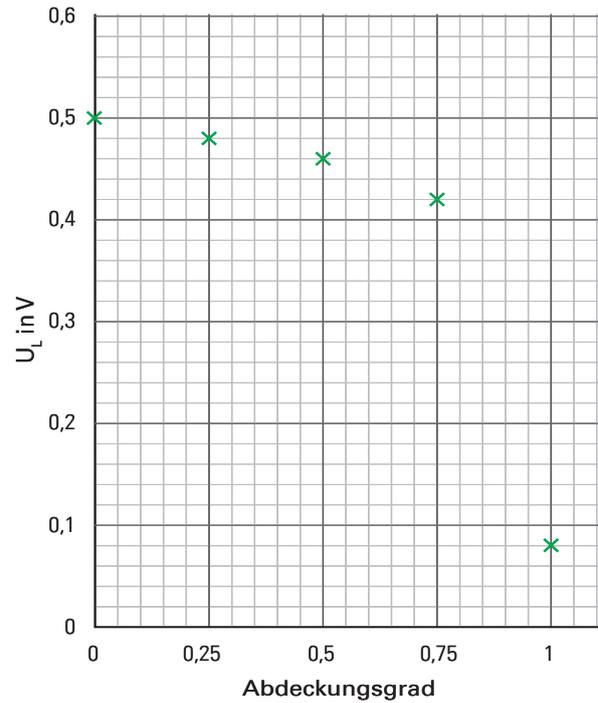
### Diagramme



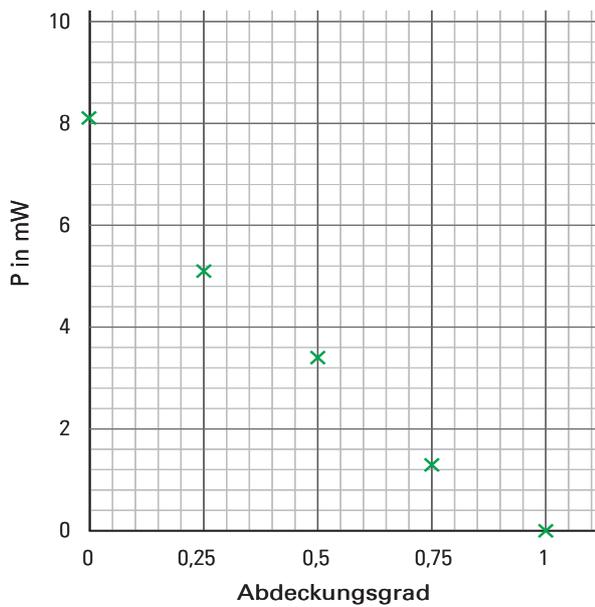
Stromstärke



Leerlaufspannung



Leistung



## Experiment 3.1: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der beleuchteten Fläche

### Auswertung

**Aufgabe 9:** Beschreibe kurz den Zusammenhang zwischen

... Spannung und Fläche: sinkt leicht, aber nahezu konstant

... Stromstärke und Fläche: ist direkt proportional

... Leistung und Fläche: ist direkt proportional

### Lösung

**Aufgabe 10:**

Trifft Licht auf die Solarzelle, werden Elektronen im Material freigesetzt und wandern aufgrund des elektrischen Feldes in der Verarmungszone in das n-Gebiet. Dabei ergibt sich eine bestimmte Konzentration von Elektronen in diesem Gebiet. Dieser Vorgang und die Konzentration sind nahezu unabhängig von der Intensität des Lichts. Daher bleibt die Spannung in etwa konstant oder sinkt nur leicht. Durch die Abdeckung eines Teils der Solarzellenfläche wird der gleiche Anteil Elektronen weniger aus dem Solarzellenmaterial herausgelöst. Dadurch ist die Stromstärke proportional zur Fläche bzw. zum Abdeckungsgrad. Trifft gar kein Licht mehr auf das Halbleitermaterial, werden auch keine Elektronen freigesetzt.



## 3.2: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts

### Übersicht/Lernziel

#### Qualitativer Versuch

- Die SuS beschreiben das Verhalten des Motormoduls, wenn die Solarzelle gekippt wird.
- Die SuS ziehen Schlussfolgerungen über die Leistung und den Betrieb realer Solarzellen.

#### Quantitativer Versuch

- Die SuS messen die Kurzschlussstromstärke und Leerlaufspannung einer Solarzelle in Abhängigkeit vom Einfallswinkel.
- Die SuS berechnen aus den Messgrößen eine fiktive Leistung.
- Die SuS tragen ihre Messwerte in ein  $\cos(\alpha)$ -Stromstärke/Leistung-Diagramm.
- Die SuS erkennen anhand der Diagramme, dass die Stromstärke /Leistung proportional zum Cosinus des Einfallswinkels ist.
- Die SuS erklären den linearen Zusammenhang anhand geometrischer Überlegungen und der Proportionalität zwischen Fläche und Stromstärke/ Leistung.

### Benötigtes Vorwissen

- Versuche unter Pkt. 3 – Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Fläche.
- Die SuS wissen, dass eine schnellere Motordrehung eine größere Leistung der Solarzelle anzeigt.
- Die SuS wissen, dass die PV-Fläche proportional zur Stromstärke/Leistung ist.
- Die SuS wissen, dass die effektiv beschienene PV-Fläche gleich dem Produkt aus Cosinus des Einfallswinkels und der Gesamtfläche ist.

## 3.2: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts

### Anmerkung

Der quantitative Versuchsteil kann nicht im vollen Sonnenlicht durchgeführt werden, da die hohe Intensität und die starken Reflexionen nur eine schwache Cosinusabhängigkeit zeigen.

Für die Versuchsteile mit dem Schattenstab sollte eine Lichtquelle mit geringer Streuung benutzt werden, um den Schatten deutlich sehen zu können.

Bei der Besprechung der Ergebnisse kann man erwähnen, dass große Solaranlagen manchmal mit einer Mechanik ausgestattet sind, die die Solarzellen der Sonne nachführen.

Durch Nachführung wird die Energiebilanz eines PV-Moduls erheblich verbessert. Allein durch tägliche Nachführung kann circa 20 % mehr Energie erzeugt werden. Der Energieaufwand für die nötigen Motoren beträgt nur circa 0,2 % der gesamten erzeugten Energie des Systems.



## Experiment 3.2.1: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts (qualitativ)

### Aufgabe

Untersuche das Verhalten des Motors in Abhängigkeit vom Einstrahlwinkel.

**Hinweis:** Nutze ggf. eine künstliche Lichtquelle, wenn die Sonneneinstrahlung nicht ausreicht.

### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß
- Solarmodul 1,5 V
- Motormodul mit beliebiger Farbscheibe
- 1 Kabel

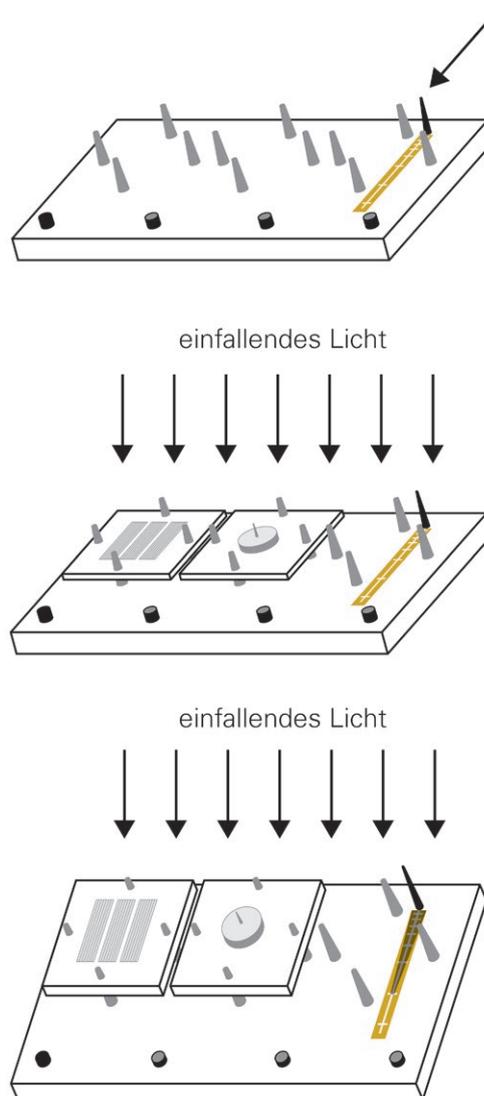
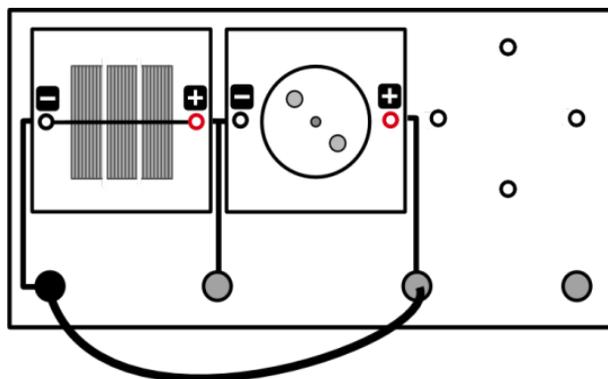
### Durchführung

Bei diesem Versuch kommt der Schattenstab zum Einsatz. Dieser befindet sich oben rechts auf der Grundeinheit (siehe Pfeil in der obersten Skizze). Mit ihm kann die Neigung der Grundeinheit zur Lichtquelle gemessen werden. Dazu muss die Grundeinheit zunächst so gedreht werden, dass der Schatten, den der Stab wirft, auf die Winkelskala fällt. Den aktuellen Neigungswinkel kann man dann am Ende des Schattens ablesen.

1. *Informiere* dich zuerst über die Handhabung der Geräte. *Mache* dich mit der Funktion des Schattenstabs *vertraut*.
2. *Baue* aus Solarmodul und Motormodul, wie abgebildet, eine Reihenschaltung *auf*. *Halte* die Grundeinheit mit der Vorderseite zur Lichtquelle. Dabei soll der Schattenstab zuerst mal keinen Schatten werfen – das Licht soll also senkrecht auf die Solarzelle fallen (oberste Skizze). *Kippe* dann die Grundeinheit so, dass sie nicht mehr direkt in Richtung der Lichtquelle zeigt. Jetzt wird vom Schattenstab ein Schatten geworfen (unterste Skizze).

**Hinweis:** In den Skizzen rechts sind die Verbindungskabel und die Drehscheibe auf dem Motormodul nicht eingezeichnet.

### Versuchsaufbau



## Experiment 3.2.1: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts (qualitativ)

---

### Beobachtung

1. *Beschreibe* die Abhängigkeit zwischen Einfallswinkel des Lichts und Drehgeschwindigkeit des Motors.

### Auswertung

2. *Ziehe* Schlussfolgerungen über die Leistung der Solarzelle und für den Betrieb realer Solaranlagen.

### Antworten

#### Aufgabe 1:

**Je schräger das Licht auf die Solarzellen fällt, desto langsamer dreht sich der Motor.**

---

#### Aufgabe 2:

**Solarzellen haben ihre größte Leistung bei einem senkrechten Einfallswinkel zum Sonnenstand. Sie sollten also immer möglichst direkt zur Sonne ausgerichtet werden. Geringe Abweichungen verursachen jedoch noch keine großen Leistungseinbrüche.**

---

---

---

---





## Experiment 3.2.2: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts (quantitativ)



### Aufgabe

Nimm die Kurzschlussstromstärke und die Leerlaufspannung des Solarmoduls in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Lichtes auf.



**Hinweis:** Es wird eine Cosinus-Berechnung durchgeführt.

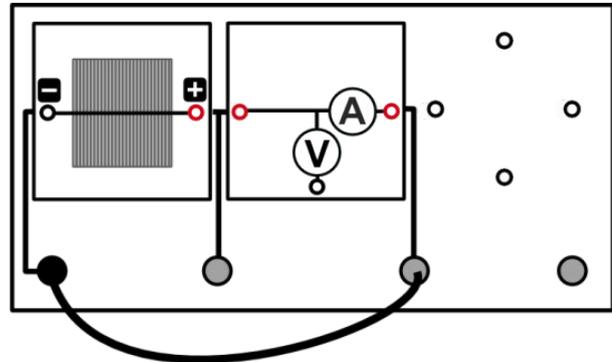
### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß
- Solarmodul, 0,5 V
- AV-Modul
- 1 Kabel

### Durchführung

1. Informiere dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. Baue die Schaltung wie abgebildet, aber noch ohne das Kabel, auf.
3. Trage die folgenden gemessenen Werte jeweils in die Tabelle unten ein.
4. Halte dafür die Grundeinheit mit dem Solarmodul in Richtung Sonne (oder einer anderen geeigneten Lichtquelle). Finde eine Position, die einen scharf umrissenen Schatten des Schattenstabes entstehen lässt.
5. Richte die Grundeinheit so zu der Lichtquelle aus, dass der Einfallswinkel ( $\alpha$ ) zwischen Grundplatte und einfallendem Licht möglichst genau 0 Grad beträgt, der Schattenstab also keinen Schatten wirft.
6. Miss so an der Solarzelle zunächst die Leer-

### Versuchsaufbau



laufspannung  $U_L$ . Nutze dazu das AV-Modul im Spannungsmodus.

7. Stecke jetzt das Kabel, wie abgebildet, auf der Grundeinheit ein und verwende das AV-Modul im Stromstärke-Modus. Miss die Kurzschlussstromstärke  $I_K$ .
8. Verändere den Winkel  $\alpha$  jeweils nach den Werten der Tabelle und wiederhole deine Messungen. Achte darauf, dass sich der Abstand zwischen Lichtquelle und Grundeinheit nicht ändert.
9. Berechne den Cosinus der Einfallswinkel und die (fiktive) Leistung aus Kurzschlussstromstärke und Leerlaufspannung.
10. Zeichne die Werte in das  $P(\cos \alpha)$ - und ein  $I_K(\cos \alpha)$ -Diagramm ein.
11. Beschreibe die Abhängigkeit der Stromstärke bzw. der Leistung vom Einfallswinkel.
12. Erkläre diese Abhängigkeit geometrisch unter der Voraussetzung dass  $I \sim A$ , dass also der Strom proportional mit der Fläche anwächst.

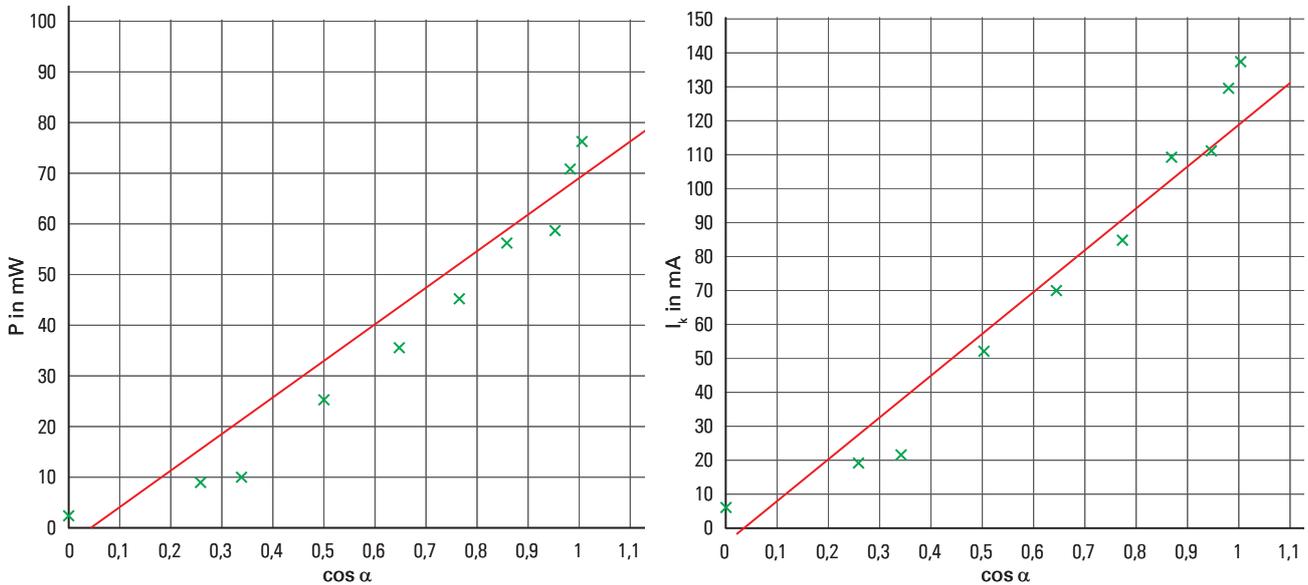
### Messergebnisse

$\alpha$	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	75°	90°
$\cos \alpha$	1	0,98	0,94	0,87	0,77	0,64	0,5	0,34	0,26	0
$U_L$ [V]	0,545	0,540	0,535	0,532	0,524	0,516	0,507	0,475	0,473	0,435
$I_K$ [mA]	138	130	112	110	85	71	52	21	20	7,1
zu berechnende Werte										
$P$ [mW] = $U_L \cdot I_K$	75,2	70,2	59,9	58,5	44,5	36,6	26,4	10,0	9,5	3,1

**Hinweis:** Die Messwerte können, je nach Beleuchtung, variieren.

## Experiment 3.2.2: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts (quantitativ)

### Diagramme



### Lösungen

#### Aufgabe 11:

Es besteht ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Stromstärke beziehungsweise der Leistung und dem Cosinus des Einfallswinkels.

#### Aufgabe 12:

Die von der Lichtquelle beschienene Fläche entspricht

$$A_{\text{beschienen}} = \cos \alpha \cdot A_{\text{gesamt}}$$

Da  $I \sim A$  ist, gilt damit auch, dass  $I_{\text{beschienen}} = \cos \alpha \cdot I_{\text{gesamt}}$ .

Da der Gesamtstrom eine Konstante ist, gilt somit auch, dass  $I \sim \cos \alpha$  ist.

### 3.3: Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung: Kennwerte einer Solarzelle

#### Anmerkung

Bei diesem Experiment wird eine Leistung aus der Kurzschlussstromstärke und der Leerlaufspannung berechnet. Diese Leistung ist eine fiktive Leistung und entspricht nicht der Maximalleistung der Solarzelle. Sie wird jedoch verwendet, da die Ermittlung der Maximalleistung ohne technische Hilfsmittel aufwendig ist. Im Rahmen dieses Experiments führt der Vergleich der fiktiven Leistungen zum gleichen Ergebnis wie der Vergleich der Maximalleistungen.

Die Beleuchtungsstärke darf dabei nicht über die Spannung an den Lampen geändert werden, da sich hierdurch das Spektrum ändert und es zu Messfehlern kommen kann.

Das Beleuchtungsmodul sollte außerdem nicht zu lange auf der Solarzelle stehen, da ein Temperaturanstieg der Solarzelle die Messwerte verfälscht.

Die (Leerlauf)spannung wird parallel gemessen. Das ist auf der Grundeinheit dann der Fall, wenn ohne das Kabel gemessen wird.

„Stromstärke wird Kurzschlussstromstärke“ bedeutet, dass außer dem Kabel kein Verbraucher geschaltet ist.

## Experiment 3.3: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Beleuchtungsstärke

### Aufgabe

Bestimme die Leistung einer Solarzelle bei unterschiedlich starker Beleuchtung.

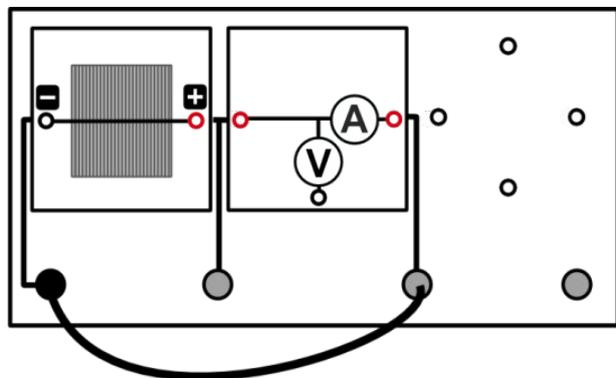
### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Beleuchtungsmodul
- Solarzelle 0,5 V
- AV-Modul
- Powermodul mit Netzteil
- 3 Kabel

### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* die Schaltung wie abgebildet, aber noch ohne das Kabel *auf*.
3. *Schalte* das Beleuchtungsmodul über das Powermodul bei einer Spannung von 9 Volt mit einer der vier Lampen *ein*. **Hinweis:** Die anderen drei Lämpchen müssen durch vorsichtiges Herausdrehen ausgeschaltet werden.
4. *Miss* an der Solarzelle zunächst die Leerlaufspannung  $U_L$ . *Nutze* dazu das AV-Modul im Spannungsmodus. *Trage* die gemessenen Werte jeweils in die Tabelle *ein*.
5. *Stecke* jetzt das Kabel ein und *verwende* das

### Versuchsaufbau



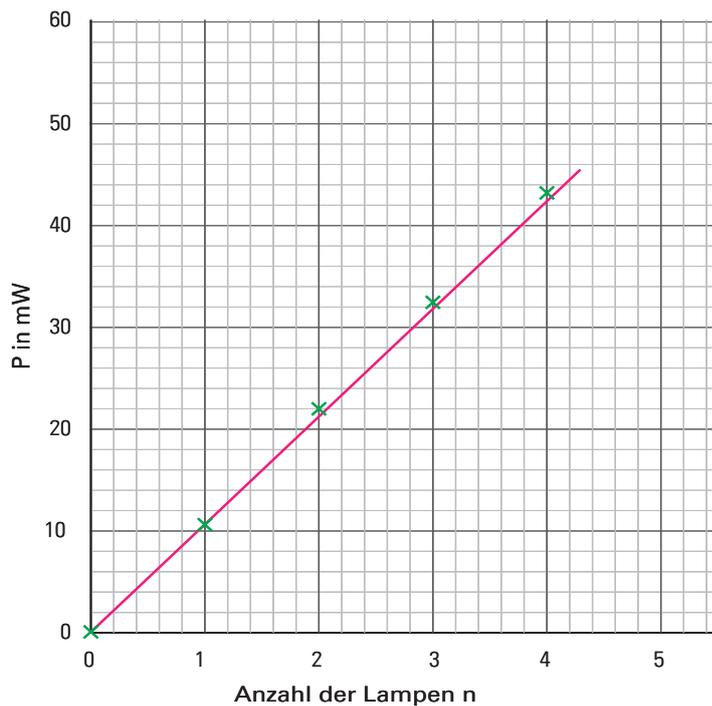
6. *Wiederhole* die Messungen mit 2, 3 und 4 Lämpchen (durch Eindrehen).
7. *Errechne* die Leistung des Solarmoduls für jede Lampenzahl (Beleuchtungsstärke) und *trage* deine Werte in die Tabelle *ein*.
8. *Zeichne* das  $n$ - $P$ -Diagramm ( $n$  = Anzahl der Lämpchen).

## Experiment 3.3: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Beleuchtungsstärke

### Messergebnisse

	Beleuchtung mit				
	0 Lampen	1 Lampe	2 Lampen	3 Lampen	4 Lampen
$U_L$ [V]	0,05	0,49	0,52	0,53	0,53
$I_K$ [mA]	0	20,9	42,3	61,7	81,7
$P=U_L \cdot I_K$ [mW]	0	10,2	22,0	32,7	43,3

### Diagramm



### Auswertung

Benenne nun den Zusammenhang zwischen Modulleistung und Beleuchtungsstärke:

Je höher die Beleuchtungsstärke, desto größer ist die Leistung. Der Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Leistung ist direkt proportional.

## 3.4: Die I-U-Kennlinie einer Solarzelle

### Übersicht/Lernziele

Die Solarzellenleistung in Abhängigkeit von der Last:

- Die SuS messen die Spannung und Stromstärke für 2 verschiedene Verbraucher.
- Die SuS berechnen die Leistung der Solarzelle und die Widerstände der Verbraucher.
- Die SuS vergleichen die Leistung in Abhängigkeit vom Verbraucher.
- Die SuS erkennen, dass ohne weitere Messungen kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Leistung und Widerstand benannt werden kann.

Die I-U-Kennlinie einer Solarzelle:

- Die SuS messen Spannung und Stromstärke der Solarzelle bei verschiedenen Widerständen.
- Die SuS berechnen die Leistung für verschiedenen Messwerte.
- Die SuS zeichnen ihre Messwerte in das I-U- und U-P-Diagramm.
- Die SuS beschreiben die I-U- und U-P-Kennlinie.
- Die SuS schließen aus den Messwerten, dass die Leistung der Solarzelle vom angeschlossenen Widerstand abhängt und einen maximalen Wert besitzt (Maximum Power Point (MPP)).
- Die SuS berechnen den Füllfaktor der Solarzelle.

Die I-U-Kennlinie einer Solarzelle in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke:

- Die SuS messen Spannung und Stromstärke der Solarzelle bei verschiedenen Widerständen und Beleuchtungen.
- Die SuS berechnen die Leistung für verschiedenen Messwerte.
- Die SuS zeichnen ihre Messwerte in das I-U und U-P-Diagramm.
- Die SuS vergleichen die I-U- und U-P-Kennlinien untereinander und erkennen, dass die I-U-Kennlinie entlang der y-Achse verschoben wird.
- Die SuS beschreiben, dass der Maximum Power Point (MPP) sich nahezu parallel zur y-Achse verschiebt.
- Die SuS erklären, dass sich die I-U-Kennlinie entlang der y-Achse verschiebt, da eine geringe Beleuchtung weniger Elektronen-Loch-Paarbildung bedeutet.

### Benötigtes Vorwissen

- Die SuS wissen, dass der Füllfaktor ein Maß für die Effizienz der Solarzelle ist.
- Die SuS kennen die Funktionsweise einer PV-Zelle (Elektronen-Loch-Paarbildung).
- Die SuS können den Wirkungsgrad bestimmen.

### Hinweise

- Die Beleuchtungsstärke darf nicht durch das Verändern der Spannung am Beleuchtungsmodul geändert werden, da sich hierdurch auch das Spektrum ändert. Dieses hat ebenfalls einen Einfluss auf die Leistung der Solarzelle.
- Anstelle des Potentiometers kann der Kondensator verwendet werden. Bei einer Beleuchtungsspannung von 5 Volt wird der Kondensator durch das Solarmodul so geladen, dass er alle Widerstände kontinuierlich annimmt und die SuS genügend Zeit haben die Messwerte aufzunehmen. Bei der Verwendung des Kondensators ist darauf zu achten, dass der Minuspol (Pluspol) des Kondensators am Minuspol (Pluspol) der Solarzelle anliegt und dass der Kondensator entladen ist. Da den SuS eventuell nicht bewusst ist, dass der Kondensator verschiedene Widerstände annimmt, sollten die SuS neben der Leistung des Solarmoduls auch den Widerstand des Kondensators berechnen.
- In der Auswertung der I-U-Kennlinie bietet es sich an, darauf einzugehen, dass Solarkraftanlagen mit MPP-Trackern ausgestattet sind. Sie sorgen dafür, dass sie immer am MPP arbeitet. Der berechnete Wirkungsgrad entspricht etwa der Hälfte des realen Wertes für polykristallines Silizium (14 %–20 %). Dies liegt daran, dass der Wirkungsgrad bei geringerer Beleuchtung sinkt und er normalerweise bei einer Bestrahlung von 1000 W/m<sup>2</sup> bestimmt wird.

## Experiment 3.4.1: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Last

### Aufgabe

Bestimme die Leistung eines Solarmoduls bei unterschiedlichen Verbrauchern.

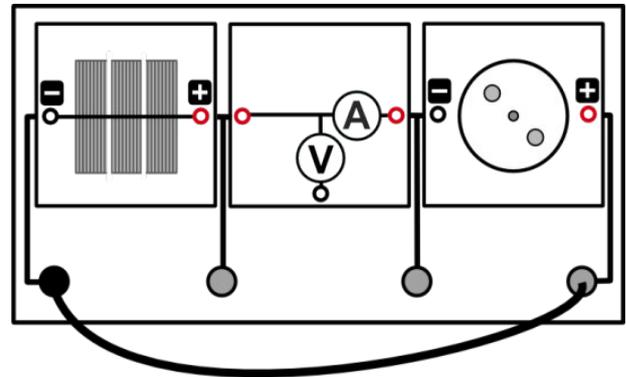
### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß
- Solarmodul 1,5 Volt
- AV-Modul
- Hupenmodul
- Motormodul (mit beliebiger Scheibe)
- Beleuchtungsmodul
- Powermodul mit Netzteil
- 3 Kabel

### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* die Schaltung wie abgebildet, *auf*.
3. *Verbinde* das Powermodul mit dem Beleuchtungsmodul und stelle eine Spannung von 9 Volt ein. *Schließe* das Powermodul *an* das Beleuchtungsmodul an und *sorge dafür*, dass alle Birnchen brennen. *Stelle* das Beleuchtungsmodul auf das Solarmodul. (*Nutze* die Sonne statt des Beleuchtungsmoduls, wenn sie für alle Versuchsteile gleich stark scheint, also keine Wolken davor ziehen und der Einstrahlwinkel gleich bleibt.)
4. *Miss* sowohl die Stromstärke  $I$  als auch die Spannung  $U$ . *Verwende* dazu das AV-Modul im Stromstärke-Spannungsmodus. *Trage* die gemessenen Werte in die Tabelle *ein*.
5. *Entferne* das Motormodul und *stecke* stattdessen das Hupenmodul auf. *Wiederhole* die Messung.
6. *Berechne* jeweils die Leistung  $P$  der Solarzelle und den Widerstand  $R$  des Verbrauchers und *trage* die Ergebnisse in die Tabelle *ein*.
7. *Vergleiche* die Leistung der Solarzelle bei den verschiedenen Verbrauchern. *Ziehe* Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen Widerstand und Leistung.

### Versuchsaufbau



### Messergebnisse

	Motormodul	Hupe
$U$ [V]	1,6	2
$I$ [mA]	6,9	0,5
$P=U \cdot I$ [mW]	11,0	1,0
$R=U/I$ [ $\Omega$ ]	235	4000





## Experiment 3.4.1: Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Last

---



### Lösung



#### Aufgabe 7:

Die Leistung ist trotz annähernd gleicher Beleuchtungsstärke bei den beiden Verbrauchern unterschiedlich. Die Leistung ist bei niedriger Last (=hohem Widerstand) geringer.

Ein Zusammenhang zwischen Leistung und Widerstand ist also erkennbar. Diese Erkenntnis könnte durch weitere Versuche mit anderen Verbrauchern abgesichert werden.

---

---

---

## Experiment 3.4.2: Die I-U-Kennlinie und der Füllfaktor einer Solarzelle

### Aufgabe

Nimm die I-U-Kennlinie der Solarzelle auf.

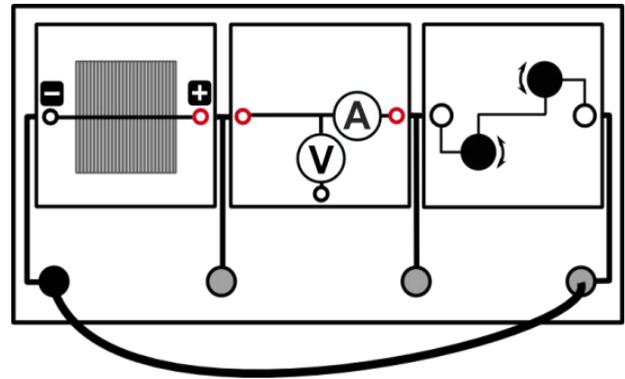
### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß
- Solarzelle 0,5 Volt
- AV-Modul
- Potentiometermodul (Poti)
- Beleuchtungsmodul
- Powermodul mit Netzteil
- 3 Kabel

### Aufgaben

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* den Versuch, wie abgebildet, *auf*.
3. *Erfasse* alle folgenden Messwerte in einer Tabelle.
4. *Schließe* das Beleuchtungsmodul an das Powermodul *an* und *stelle* 5 Volt *ein*. *Achte* darauf, dass alle vier Glühlampen leuchten. *Stelle* den höchsten Widerstand am Poti *ein* ( $1 \text{ k}\Omega + 100 \Omega \geq 1100 \Omega$ ). *Stelle* das Beleuchtungsmodul auf die Solarzelle.
5. *Verwende* das AV-Modul zum Messen im Stromstärke-Spannungsmodus. *Miss* damit für verschiedene Spannungen jeweils die Stromstärke. *Drehe* zur Spannungsänderung den Widerstand am Poti (nicht am Powermodul) vorsichtig herunter: zunächst den  $1 \text{ k}\Omega$ -Widerstand, danach den  $100 \Omega$ -Widerstand.
6. *Miss* ohne Poti ebenfalls die Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke der Solarzelle.
7. *Zeichne* das I-U-Diagramm der Solarzelle *ein* (Skala links).
8. *Berechne* zu jedem Messpunkt die jeweilige Leistung der Solarzelle und *trage* deine Werte in die Tabelle *ein*. *Zeichne* in dasselbe Diagramm die U-P-Kennlinie (Skala rechts).
9. *Beschreibe* die entstehenden Kurven.
10. *Zeichne* in das Diagramm die I-U-Kennlinie eines  $10 \Omega$ - und  $100 \Omega$ -Widerstands, indem du für  $10 \Omega$  eine gerade Linie mit den Messpunkten A (0/0) und B (0,2/20) und für  $100 \Omega$  eine Linie durch C (0/0) und D (0,5/5) ziehst. *Erläutere* die Bedeutung der Schnittpunkte der Solarmodul-Kennlinie mit den jeweiligen Widerstandskennlinien.
11. *Ziehe* Schlussfolgerungen bezüglich der Leistung einer Solarzelle.
12. Der Füllfaktor (FF) ist der Quotient aus dem Produkt der Spannung und Stromstärke bei maximaler Leistung und dem Produkt der Leerlaufspannung und der Kurzschlussstromstärke. *Berechne* den Füllfaktor.
13. *Berechne* näherungsweise den Wirkungsgrad der Solarzelle, wenn diese am MPP arbeitet.

### Versuchsaufbau



### Messergebnisse

U [V]	0,47	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,11	0
I [mA]	0	4,6	9,8	11,4	12,2	12,5	12,6	12,7	12,8	12,8
$P=U \cdot I$ [mW]	0	2,1	3,9	4	3,7	3,1	2,5	1,9	1,4	0

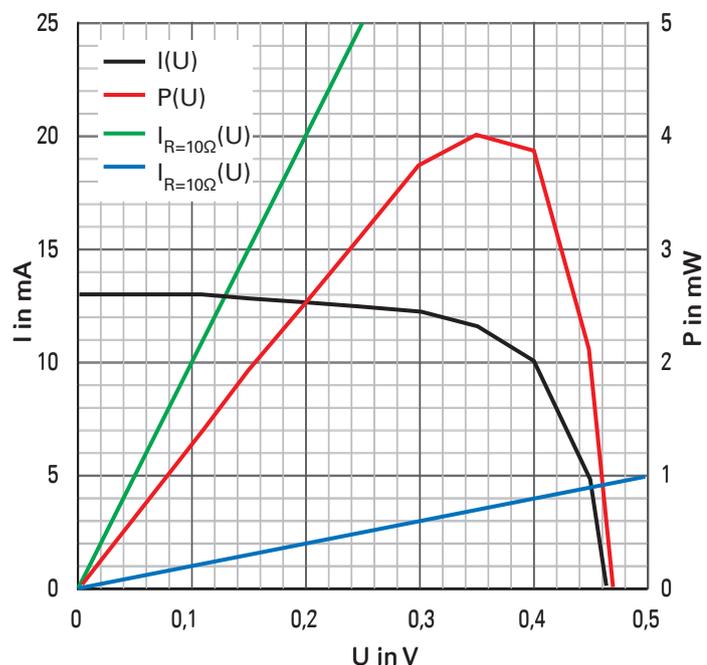
**Hinweis:** Die Messwerte können je nach Beleuchtung variieren.



## Experiment 3.4.2: Die I-U-Kennlinie und der Füllfaktor einer Solarzelle



Diagramm



Lösungen

Aufgabe 9:

Die I-U-Kennlinie zeigt, dass die Stromstärke mit zunehmender Spannung sinkt. Die maximale Spannung und Stromstärke betragen 0,49 V beziehungsweise 12,5 mA. Die Leistung besitzt bei einer Spannung von 0,35 V und einer Stromstärke von 10,9 mA ihr Maximum von 3,8 mW ( $P_{MPP}$ ). Mit zunehmendem Abstand zu dieser Spannung sinkt die Leistung bis auf 0.

Aufgabe 10:

Der Schnittpunkt der beiden Graphen gibt die Spannung und die Stromstärke wieder, die das Solarmodul an den Widerstand abgibt.

Aufgabe 11:

Die Leistung einer Solarzelle ist nicht nur von der Bestrahlungsstärke abhängig, sondern auch von dem angeschlossenen Widerstand. Der Widerstand für die Maximalleistung beträgt in diesem Fall 30,7  $\Omega$ .

## Experiment 3.4.2: Die I-U-Kennlinie und der Füllfaktor einer Solarzelle

### Aufgabe 12:

Berechnung des Füllfaktors

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{Leer} \cdot I_{Kurz}}$$

$$FF = \frac{0,35 \text{ V} \cdot 10,9 \text{ mA}}{0,49 \text{ V} \cdot 12,5 \text{ mA}}$$

$$FF = 0,63 = 63\%$$

### Aufgabe 13:

Berechnung des Wirkungsgrades

$$P_{in} = \frac{P_{in,1000} \cdot I_{K,exp}}{I_{K,1000}} \cdot A_{Solarzelle}$$

$$P_{in} = \frac{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 12,5 \text{ mA}}{840 \text{ mA}} \cdot 0,0036 \text{ m}^2$$

$$P_{in} = 0,0536 \text{ W} = 53,6 \text{ mW}$$

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{in}}$$

$$\eta = \frac{3,8 \text{ mW}}{53,6 \text{ mW}}$$

$$\eta = 7,1 \%$$



## Experiment 3.4.3: Die I-U-Kennlinie einer Solarzelle in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke

### Aufgabe

Nimm die I-U-Kennlinie der Solarzelle bei verschiedenen Beleuchtungsstärken auf.

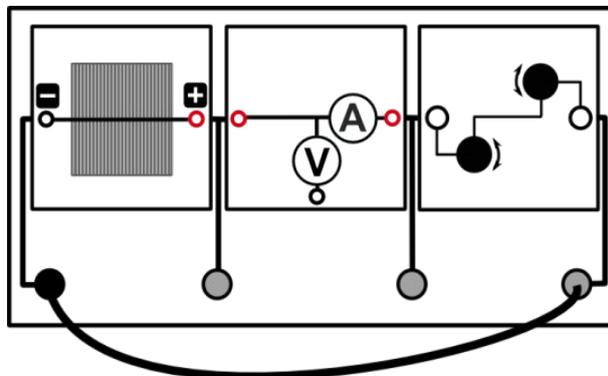
### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß
- Solarzelle 0,5 Volt
- AV-Modul
- Potentiometermodul (Poti)
- Beleuchtungsmodul
- Powermodul mit Netzteil
- 3 Kabel

### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* den Versuch, wie abgebildet, *auf*. *Verwende* das AV-Modul zum Messen im Stromstärke-Spannungsmodus.
3. *Schließe* das Beleuchtungsmodul *an* das Powermodul an und stelle 5 Volt ein. *Achte* darauf, dass zu Anfang nur 1 Glühlampe leuchtet. (Dazu *schraubst* du die anderen eine Umdrehung heraus, dann leuchten sie nicht mehr).
4. *Stelle* den höchsten Widerstand am Potentiometer *ein* ( $1 \text{ k}\Omega + 100 \Omega \geq 1100 \Omega$ ).
5. *Stelle* das Beleuchtungsmodul auf die Solarzelle.
6. *Stelle* mit dem Poti die Spannungen aus der Tabelle *ein* und *lese* die Spannung und die Stromstärke der Solarzelle am AV-Modul *ab*.
7. *Wiederhole* die Messung für 2, 3 und 4 Lampen.
8. *Berechne* jeweils die Leistung zu den verschiedenen Messpunkten.
9. *Zeichne* das I-U-Diagramm der Solarzelle für alle 4 Beleuchtungsvarianten.
10. *Berechne* zu jedem Messpunkt die jeweilige Leistung der Solarzelle und *trage* deine Werte in die Tabelle *ein*. *Zeichne* in das Diagramm die U-P-Kennlinie für alle 4 Beleuchtungsvarianten.
11. *Vergleiche* die I-U-Kennlinien untereinander und erkläre die unterschiedlichen Kurven.
12. *Vergleiche* die Lage des Punktes maximaler Leistung (Maximum Power Point - MPP) im U-P-Diagramm.

### Versuchsaufbau



## Experiment 3.4.3: Die I-U-Kennlinie einer Solarzelle in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke

### Messergebnisse

Mit einer Glühlampe:										
$U$ [V]	—	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0
$I$ [mA]	—	0,4	2,2	2,8	3,1	3,2	3,3	3,3	3,4	3,4
$P=U \cdot I$ [mW]	—	0,16	0,66	0,84	0,78	0,64	0,5	0,33	0,17	0
Mit zwei Glühlampen:										
$U$ [V]	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,02
$I$ [mA]	0,4	4	5,5	6,1	6,4	6,5	6,7	6,8	6,8	6,8
$P=U \cdot I$ [mW]	0,18	1,6	1,93	1,83	1,6	1,3	1	0,7	0,3	0,14
Mit drei Glühlampen:										
$U$ [V]	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,02
$I$ [mA]	2,8	6,7	7,8	8,5	8,9	9,1	9,2	9,2	9,2	9,2
$P=U \cdot I$ [mW]	1,3	2,7	2,7	2,5	2,2	1,8	1,4	0,9	0,5	0,2
Mit vier Glühlampen:										
$U$ [V]	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,03
$I$ [mA]	5,2	10,2	11,7	12,4	12,7	12,9	13,0	13,0	13,0	13,0
$P=U \cdot I$ [mW]	0,1	4,1	4,1	3,7	3,2	2,6	2	1,3	0,7	0,4

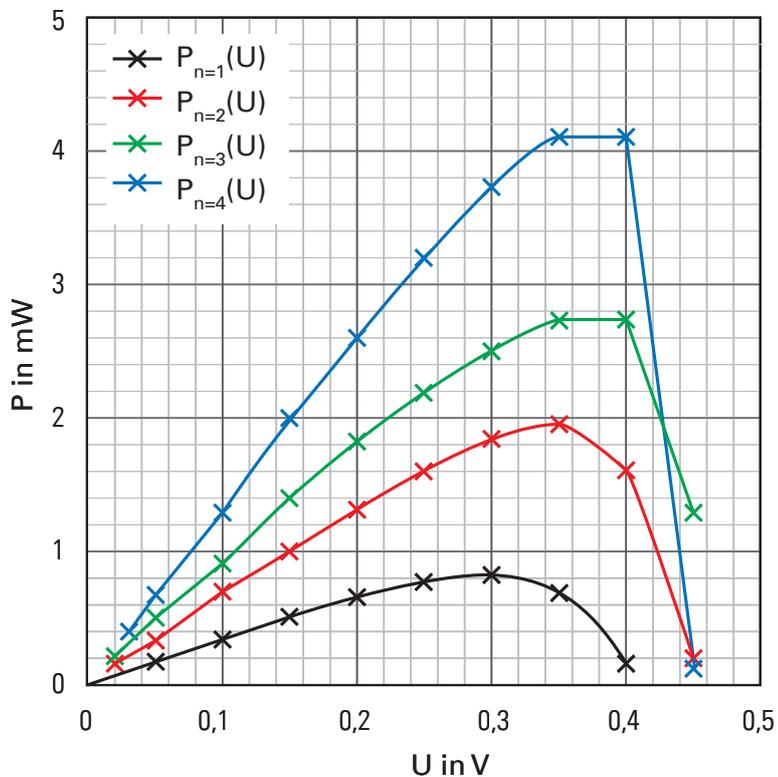
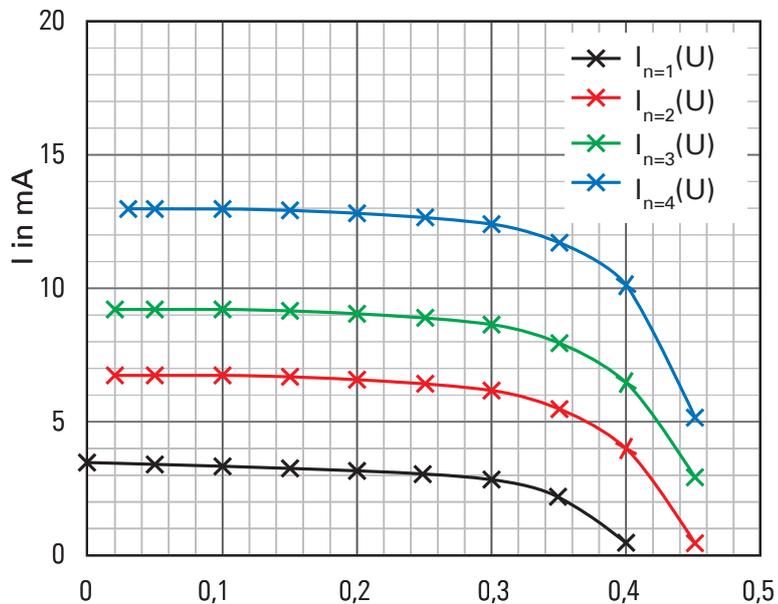
**Hinweis:** Die Messwerte können je nach Beleuchtung variieren.



## Experiment 3.4.3: Die I-U-Kennlinie einer Solarzelle in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke



### Diagramme



## Experiment 3.4.3: Die I-U-Kennlinie einer Solarzelle in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke

---

### Lösungen

#### Aufgabe 11:

Die I-U-Kennlinien werden mit steigender Beleuchtungsstärke entlang der Ordinate nach oben verschoben. Die Kurzschlussstromstärke steigt mit der Beleuchtungsstärke deutlich, während sich die Leerlaufspannung kaum vergrößert.

Die Verschiebung entlang der y-Achse (zu geringeren Strömen) ist dadurch zu erklären, dass weniger Elektronen-Loch-Paare durch ankommende Photonen gebildet werden. Es stehen somit weniger Ladungsträger zur Verfügung.

#### Aufgabe 12:

Der MPP verschiebt sich bei steigender Beleuchtungsstärke hauptsächlich entlang der Ordinate zu größeren Leistungen. Die Spannung am MPP verändert sich kaum.

---

---





## Thema 4 - Windenergie

Seit Jahrhunderten nutzen wir den Wind: Früher war er unmittelbar für das Wirtschaftsleben wichtig und trieb Windmühlen und Handelsschiffe an. Im 20. Jahrhundert nutzen wir ihn dann vor allem in der Freizeit, z. B. zum Segeln, Surfen und Fliegen. Jetzt besinnen wir uns wieder darauf, die Kraft des Windes für unsere Lebensgrundlagen einzusetzen: bei der Stromerzeugung mit Windrädern (Windenergieanlagen - WEAs).

Eine WEA erzeugt innerhalb von weniger als einem Jahr so viel Energie, wie zur Produktion der Anlage benötigt wird (inkl. Transport und Errichtung). Das nennt man energetische Amortisation. Ab dann arbeitet sie klimaneutral.

Der Rotor – das ist die Nabe mit den daran befestigten Rotorblättern – wird bei modernen Anlagen durch das Auftriebsprinzip in Bewegung versetzt. Das heißt, der Wind erzeugt - ähnlich wie bei einem Flugzeug - einen Auftrieb (hier als Vortrieb), wenn er an den Rotorblättern vorbeiströmt. Damit

setzt er den Rotor in Gang. Diese Bewegungsenergie des Rotors wird – manchmal mit, manchmal ohne Getriebe – an den Generator übertragen, der die Bewegungsenergie dann in elektrische Energie umwandelt.

Getriebe, Generator sowie Regel-, Steuerungs- und Überwachungstechnik sind i. A. in der Maschinengondel untergebracht. Die Maschinengondel ist drehbar auf dem Turm gelagert, sodass der Rotor in den Wind gedreht werden kann und die Windenergie optimal ausgenutzt wird. Auch die einzelnen Rotorblätter sind beweglich. Wenn weniger Strom gebraucht wird, können sie aus dem Wind gedreht werden, der Rotor steht dann still. Das ist wichtig um die Spannung im Stromnetz konstant zu halten (Versorgungsqualität).

Nähere Informationen zu Windenergie gibt es im Energie-Atlas Bayern:

[www.energieatlas.bayern.de/thema\\_wind.html](http://www.energieatlas.bayern.de/thema_wind.html)



## 4.1: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine

### Übersicht/Lernziele

- Messen von Veränderung der Windgeschwindigkeit durch Spannungsvariation am Winderzeugermodul
- Erkennen des Zusammenhangs von Windgeschwindigkeit und Spannung des Windgenerators
- Festigen der Kenntnisse zur Arbeit mit Messgeräten (4.1.2 Spannungsmessung)
- Der phänomenologische Versuch ist für SuS der fünften und sechsten Klasse geeignet, ggf. als Einstiegsexperiment in die Windenergie
- Der Experiment 4.1.2 (Spannungsmessung) ist gut für die **7. und 8. Klasse** geeignet, um den Umgang mit Messgeräten zu festigen

### Benötigtes Vorwissen

- Die SuS wissen,
- dass eine höhere Netzspannung am Winderzeuger höhere Windgeschwindigkeiten erzeugt
  - dass eine heller leuchtende Glühlampe für eine höhere Spannung am Windgenerator steht

## 4.1: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine

### Anmerkungen

- Wenn beim Aufbau des Versuchs der Mehrflügler zu nah an das Windturbinenmodul gedrückt wird, reiben die Plastikteile aufeinander, was den Versuch verfälscht. Etwa 2 mm Abstand einstellen.
- Beim Messen der Spannung sollte darauf geachtet werden, dass die Messwerte erst dann abgelesen werden, wenn sich der Wert nicht mehr ändert.





## Experiment 4.1.1: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (qualitativ)



### Aufgabe

Untersuche die Helligkeit einer Glühlampe, die durch einen Windgenerator betrieben wird.

Bei diesem Experiment kannst du feststellen, wie sich der vom Windgenerator erzeugte Strom ändert, wenn die Windgeschwindigkeit verändert wird. Die Variation der Windgeschwindigkeit erfolgt durch Änderung der Spannung am Winderzeugermodul. Möglicherweise brauchst du mehrere Versuche, um dein Messergebnis sichern zu können.

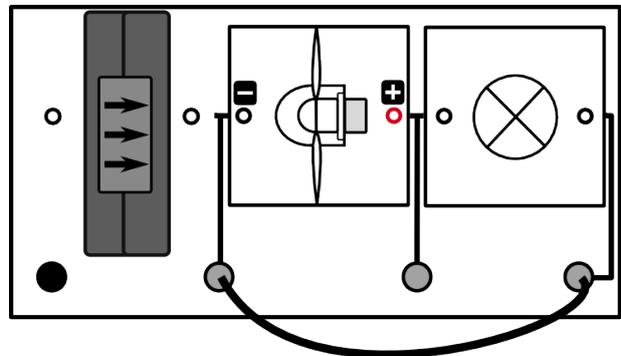


**Hinweis:** Beachte die Verletzungsgefahr! Berühre den laufenden Rotor nicht. Benutze den Fingerschutz für das Windturbinenmodul.

### Durchführung

1. Informiere dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. Baue den Versuch auf, wie abgebildet.
3. Beginne mit 12 Volt. Verändere dann mithilfe des Powermoduls die Spannung am Winderzeugermodul wie in der Tabelle angegeben.
4. Beobachte, wie sich die Helligkeit der Glühlampe dabei verändert und trage deine Beobachtungen in die Tabelle ein.

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Winderzeugermodul
- Powermodul mit Netzteil
- Windturbinenmodul mit 3-Flügler 30°, Flügel: optimiertes Profil
- Glühlampenmodul
- 3 Kabel

### Tabelle

Spannung am Winderzeugermodul U [V]	Rotor	Die Glühlampe leuchtet...		
	dreht sich	hell	schwach	gar nicht
12	X	X		
10	X		X	
8	X		X	
6	X			X
4				X

### Auswertung

Vervollständige nun den angegebenen Text:

Bei größerer Spannung am Winderzeuger ist die Windgeschwindigkeit größer.

Je größer die Windgeschwindigkeit ist, desto heller leuchtet auch die Glühlampe.

## Experiment 4.1.2: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (quantitativ)

### Aufgabe

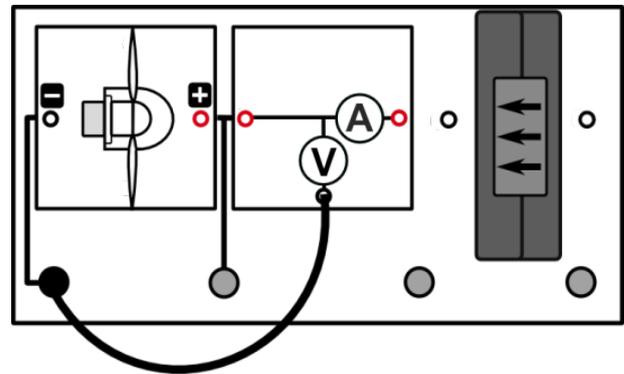
Untersuche die Spannung am Generator, wenn die Windgeschwindigkeit des Winderzeugers verändert wird.

**Hinweis:** Beachte die Verletzungsgefahr! Berühre den laufenden Rotor *nicht*. Benutze den Fingerschutz für das Windturbinenmodul.

### Durchführung

1. Informiere dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. Baue den Versuch, wie abgebildet, auf.
3. [Nimm das Windturbinenmodul noch einmal ab.
4. Verändere jetzt die Windgeschwindigkeit durch Variation der Spannung des Powermoduls  $U_{\text{Pow}}$  (Werte, siehe Tabelle).
5. Miss mit dem Anemometer jeweils die Windgeschwindigkeit  $v$  an der Position, die vorher die Nabe des Windturbinenmoduls innehatte. Setze dann das Windturbinenmodul wieder ein.]
6. Verwende das AV-Modul im Spannungsmodus. Miss die Spannung an der Windturbine  $U_{\text{gen}}$  jeweils für verschiedene [Windgeschwindigkeiten] Powermodulspannungen  $U_{\text{Pow}}$  und trage deine Werte in die Tabelle ein.
7. Übertrage die Tabellenwerte in das vorgegebene Diagramm.

### Versuchsaufbau



8. Beschreibe den Zusammenhang zwischen der Windgeschwindigkeit und der Spannung  $U_{\text{gen}}$  an der Windturbine.

### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Winderzeugermodul
- Powermodul mit Netzteil
- Windturbinenmodul mit 3-Flügler 30°, Flügel: optimiertes Profil
- AV-Modul
- 3 Kabel
- Anemometer (nicht in der Energiekiste enthalten, ggf. Versuchsteil innerhalb der Klammern [ ] weglassen)

### Messergebnisse

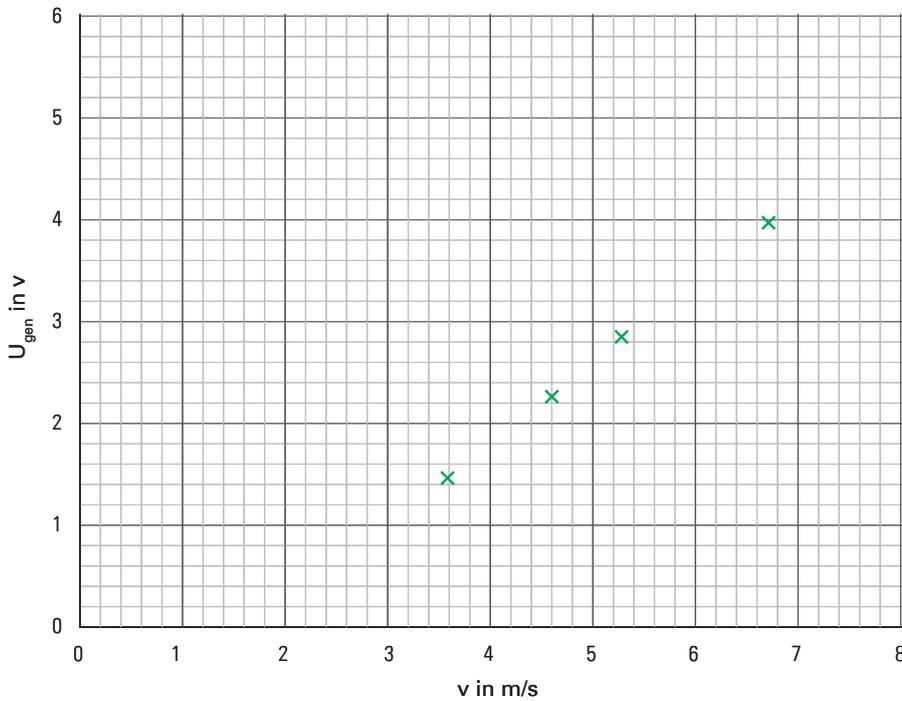
$U_{\text{Pow}}$ [V]	12	9	7,5	6	5
$v$ [m/s]	6,7	5,3	4,6	3,6	2,9
$U_{\text{gen}}$ [V]	3,9	2,8	2,2	1,4	0



### Experiment 4.1.2: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (quantitativ)



#### Diagramm



#### Beobachtungen

##### Aufgabe 8:

Bei größerer Windgeschwindigkeit (= größere Netzspannung am Winderzeugermodul) wird auch eine größere Spannung an der Windturbine erzeugt. (Ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Windgeschwindigkeit kann vermutet werden.) Je geringer die Spannung am Netzteil ist, desto geringer ist die Generatorspannung. Das bedeutet, je geringer die Windgeschwindigkeit, desto geringer ist die Generatorspannung.

## 4.2: Anlaufgeschwindigkeit einer Windenergieanlage

### Übersicht/Lernziele

Die SuS beobachten In diesem Experiment bei welcher Windgeschwindigkeit die Windenergieanlage startet. Die Windgeschwindigkeit wird über die Spannungsversorgung des Windgeneratormoduls erreicht. Die Beobachtungen werden in eine Tabelle eingetragen und die Anlaufwindgeschwindigkeit wird ermittelt. Mit Hilfe der Auswertung sollen die Ergebnisse mit den Messwerten realer Windenergieanlagen (im Internet recherchieren) verglichen werden. Die SuS sollen mithilfe der Abbildung aus dem Kartenteil des Energie-Atlas Bayern (<https://geoportal.bayern.de/energieatlas-karten>) Aussagen über die Standortwahl von Windenergieanlagen in Bayern treffen.

### Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Das Experiment eignet sich besonders für die **Klassenstufen 8 und 9** oder für den Einsatz in einem Projekt zur Windenergie in beliebigen Klassenstufen. Es beleuchtet die Starteigenschaften einer Windenergieanlage. Der Einsatz des Experimentes in Themengebieten wie z. B. „Energieversorgung“ ist zu empfehlen, da Einsatzbereiche und Standortvoraussetzungen von Windenergieanlagen in der Auswertung diskutiert werden können.



## Experiment 4.2: Anlaufgeschwindigkeit einer Windenergieanlage

### Aufgabe

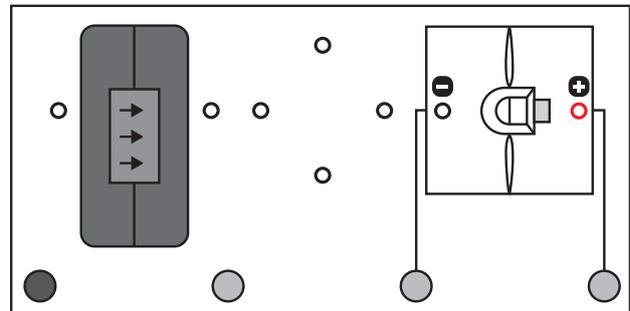
Untersuche, wie groß die Windgeschwindigkeit sein muss, damit die Windenergieanlage starten kann.

**Hinweis:** Beachte die Verletzungsgefahr! Berühre den laufenden Rotor *nicht*. Benutze den Fingerschutz für das Windturbinenmodul.

### Durchführung

1. Informiere dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. Baue den Versuch *auf*, wie abgebildet.
3. Stelle verschiedene Spannungen  $U$  am Powermodul ein und *beobachte* die Windenergieanlage. *Notiere* die niedrigste Spannung des Powermoduls, bei der die Windenergieanlage anfängt zu rotieren. *Notiere* die größte Powermodul-Spannung bei der die Windenergieanlage noch nicht startet.
4. *Ermittle* den Windgeschwindigkeitsbereich, in dem die Startgeschwindigkeit der Windenergieanlage liegt und *notiere* ihn. *Entnimm* dazu den Wert für die Windgeschwindigkeit dem abgebildeten Diagramm. Du erhältst den Bereich für die Startgeschwindigkeit der Windenergieanlage. Dieser gilt allerdings nur für die gewählten Rotoreigenschaften. Die Spannung  $U$  gibt

### Versuchsaufbau



die Spannung am Powermodul an. Die x-Achse zeigt die Spannung am Powermodul;  $d$  ist der Rotordurchmesser unserer Versuchsanlage.

### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Winderzeugermodul
- Powermodul mit Netzteil
- Windturbinenmodul mit 3-Flügler 30°, Flügel: optimiertes Profil
- 2 Kabel

**Erklärung:** Die Trägheit der Masse, die Reibung und das magnetische Feld im Generator verhindern bei zu geringer Windgeschwindigkeit das Anlaufen der Windenergieanlage.

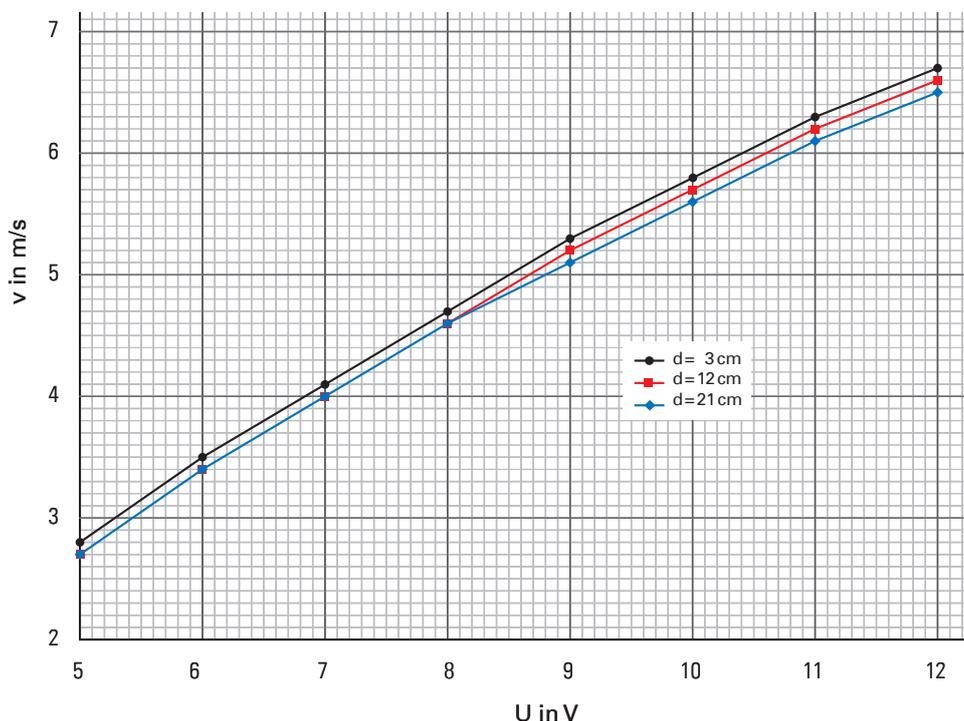


Abb.: Windgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Spannungen des Powermoduls

## Experiment 4.2: Anlaufgeschwindigkeit einer Windenergieanlage

### Messergebnisse

Größte Powermodul-Spannung bei der die Windenergieanlage noch nicht startet:  $U_g = 6\text{ V}$

Kleinste Powermodul-Spannung bei der die Windenergieanlage startet:  $U_k = 5,5\text{ V}$

Die Anlaufwindgeschwindigkeit liegt im Bereich:  $v_a \in [3,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} ; 3,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}]$

### Auswertung

1. Ziehe aus deinen Erkenntnissen Schlussfolgerungen für den Betrieb realer Windenergieanlagen.
2. Informiere dich, z. B. im Internet über die Startgeschwindigkeiten realer Windenergieanlagen und vergleiche diese mit deinen ermittelten Werten. Erkläre die Unterschiede.
3. In der unten angegebenen Karte sind durchschnittliche Windgeschwindigkeiten in Bayern in 140 m Höhe dargestellt. Begründe anhand dieser Darstellung, wo in Bayern Windenergieanlagen möglicherweise gebaut werden können. Was sind das für Regionen? Wovon hängt die Entscheidung für eine Anlage noch ab? Besuche die unter „Quelle“ angegebene Webseite. Schau dort nach, wie die Verhältnisse bei dir zuhause sind. Suche dazu im Suchfeld über der Karte nach deinem Heimatort.

**Hinweis:** Für eine realistische Voraussage der Windverhältnisse vor Ort ist immer eine Standortmessung nötig, da Windgeschwindigkeiten regional stark abweichen können. Die Windgeschwindigkeit nimmt meist mit der Höhe zu und schwankt sowohl jahreszeitlich als auch im Tagesverlauf.

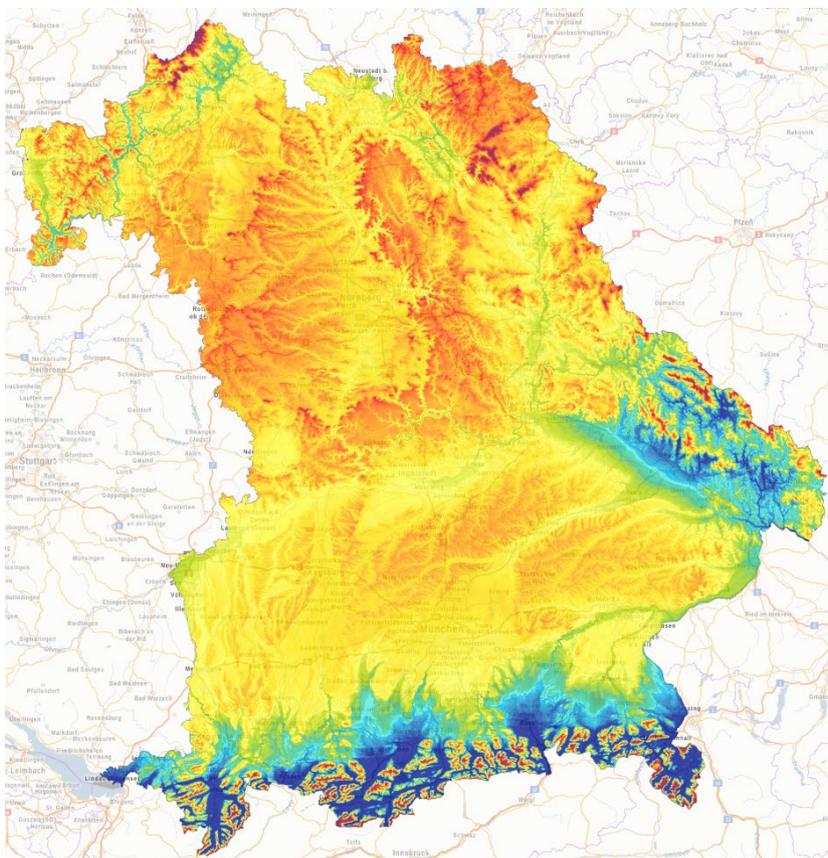
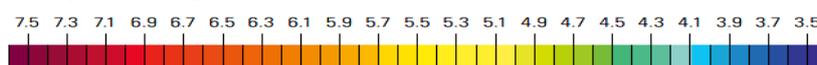


Abb.: Mittlere Windgeschwindigkeiten in 140 Metern Höhe über Grund als Mittelwert von 2001 bis 2020 in einer Auflösung von 10 x 10 m (Datenquellen und -aufbereitung, siehe Energie-Atlas Bayern)

Quelle: Energie-Atlas Bayern – Karten-teil – Windenergie – Potenzial – Mittlere Windgeschwindigkeit in 140 m Höhe

Windgeschwindigkeit in m/s



## Experiment 4.2: Anlaufgeschwindigkeit einer Windenergieanlage

### Lösungen

#### Aufgabe 1:

Eine Windenergieanlage beginnt sich erst ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit zu drehen. Der Betrieb von Windenergieanlagen lohnt sich, wenn an einem Standort ausreichend und anhaltend Wind weht.

#### Aufgabe 2:

Reale Anlagen starten, je nach Modell, bei Windgeschwindigkeiten von ca. 2-3 m/s. Die Stromproduktion beginnt oft jedoch erst ab einer noch höheren Windgeschwindigkeit. Das im Versuch benutzte Modell startet bei ca. 4,5-5 m/s. Seine Startgeschwindigkeit ist um einiges höher als bei einer realen Anlage.

Die Gründe dafür können sein:

- Die Rotorblätter haben nicht die optimale Form.
- Die Reibung im Inneren des Motors oder der Plastikteile ist zu groß.
- Die Strömung des vom Winderzeugermodul erzeugten Windes ist zu stark verwirbelt (nicht laminar).
- Die Masseverteilung ist ungünstig: Die Rotoren sind zu leicht im Verhältnis zum Motor und seiner inneren Reibung

#### Aufgabe 3:

Im Allgemeinen sind die Windverhältnisse in höhergelegenen Regionen oder in sehr weiten Flächen besser. Infos zu Windhöffigkeit in der Broschüre „Bayerischer Windatlas“. Ob eine (genehmigungsfähige) Windenergieanlage nicht nur läuft, sondern auch wirtschaftlich betrieben werden kann, hängt u. a. auch davon ab, wie oft und wie lange der Wind weht, wie hoch gebaut werden darf, wie gut die Anbindung an das Stromnetz ist, wie gut die Finanzierung ist oder wie gut der Strom selbst genutzt werden kann, also wieviel Geld der erzeugte Strom wert ist.

## 4.3: Änderung der Generatorspannung durch Zuschalten von Verbrauchern

### Übersicht/Lernziele

Bei diesem Experiment untersuchen die SuS, wie sich die Spannung am Generator ändert, wenn ein Verbraucher angeschlossen wird. Dazu werden die Spannungswerte im Leerlauf und bei angeschlossenem Verbraucher bestimmt und anschließend deren Differenz berechnet. Die SuS erklären diese Erscheinung anhand ihrer Kenntnisse über induktive Vorgänge.

### Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Das Experiment eignet sich besonders für die **Klassenstufen 8 und 9** im Themenbereich **elektromagnetische Induktion**. Die SuS sollen ihre vorhandenen **Kenntnisse zur Elektrizitätslehre** für die Begründung der Beobachtungen anwenden. Außerdem festigen die SuS ihre Fähigkeiten im **Umgang mit Messgeräten**.



## 4.3: Änderung der Generatorspannung durch Zuschalten von Verbrauchern

### Anmerkung

Wird ein Generator ohne Belastung, d. h. ohne angeschlossenen Verbraucher (also im Leerlauf) betrieben, so liefert er die sogenannte Leerlaufspannung. Der anliegende elektrische Widerstand am Generator kann als unendlich groß betrachtet werden. Es fließt dabei (nahezu) kein Strom. Wird ein Widerstand (ein Verbraucher wie z. B. das Motormodul) an den Generator angeschlossen, nimmt der Gesamtwiderstand am Generator ab. Es fließt Strom durch Widerstand und Generator. Dieser Stromfluss führt zur Selbstinduktion in den Spulen des Generators.

Nach den Lenz'schen Regeln ist die dadurch induzierte Spannung der Ursache ihrer Entstehung entgegen gerichtet und verringert die Generatorspannung. Der Generator wird also durch den abnehmenden Widerstand abgebremst. Es ergibt sich eine Spannungsdifferenz zwischen der Leerlauf- und der Belastungssituation mit einem Verbraucher.

## Experiment 4.3: Änderung der Generatorspannung durch Zuschalten eines Verbrauchers

### Aufgabe

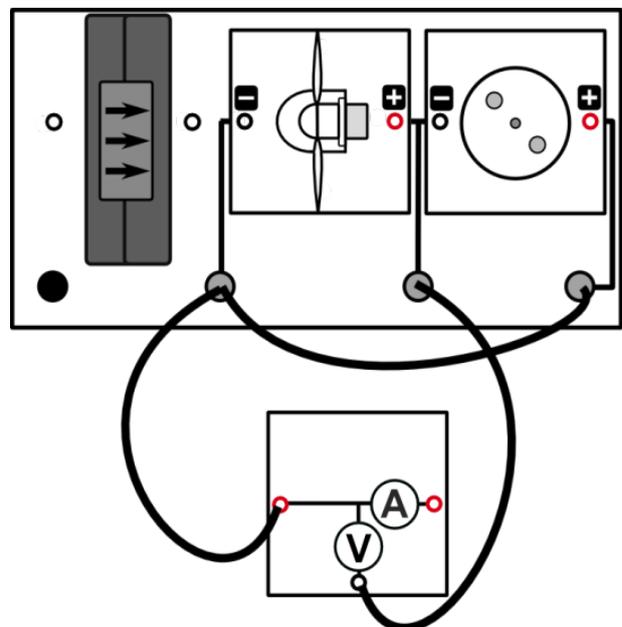
*Untersuche*, wie sich die erzeugte Generatorspannung ändert, wenn an den Generator ein Verbraucher (Widerstand) angeschlossen wird.

### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Winderzeugermodul mit Powermodul
- Windturbinenmodul mit 3-Flügler 30°, Flügel: optimiertes Profil
- Motormodul mit beliebiger Farbscheibe
- AV-Modul
- 5 Kabel

**Hinweise:** Statt des Motormoduls kann das Hupen- bzw. Glühlampenmodul als Verbraucher angeschlossen werden., s. a. Versuch 4.4.  
**Beachte** die Verletzungsgefahr: *Berühre* nicht den laufenden Rotor. *Benutze* den Fingerschutz für das Windturbinenmodul.

### Versuchsaufbau



## Experiment 4.3: Änderung der Generatorspannung durch Zuschalten von Verbrauchern

### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* den Versuch erst ohne Widerstandsmodule (Motor-, Hupen- bzw. Glühlampen-Modul) *auf*.
3. *Stelle* am Powermodul eine Spannung von 12 Volt *ein* und *starte* das Winderzeugermodul. *Miss* die Generatorspannung ohne Verbraucher im Leerlauf ( $U_{\text{Leerlauf}}$ ). *Verwende* dafür das AV-Modul im Spannungsmodus.
4. *Stoppe* den Windgenerator und *stecke* das Motormodul wie abgebildet an den vorgesehenen Steckplatz. *Starte* den Winderzeuger wieder. *Notiere* deine Beobachtungen. *Miss* anschließend die Spannung  $U_{\text{Last}}$ .
5. *Notiere* deine Beobachtungen.

### Beobachtungen

Anhand der Geräusche kann man vermuten, dass der Rotor sich langsamer dreht, wenn ein Verbraucher wie das Motormodul angeschlossen ist.

### Messergebnisse

$$U_{\text{Leerlauf}} = \underline{7,41 \text{ V}} \quad U_{\text{Last}} = \underline{5,75 \text{ V}}$$

### Auswertung

1. *Berechne* die Differenz zwischen der Leerlaufspannung und der Spannung unter Last durch Anschluss des Motors.
2. *Erkläre*, warum sich die Spannung einer Spannungsquelle (hier der Windgenerator) ändert, wenn an diese ein Verbraucher angeschlossen wird.

### Lösungen

**Aufgabe 1:**  $\Delta U = U_{\text{Leerlauf}} - U_{\text{Last}} = \underline{7,41 \text{ V} - 5,75 \text{ V} = 1,66 \text{ V}}$

#### Aufgabe 2:

Im Leerlauf ist der Widerstand, der an den Generator angeschlossen wird, unendlich groß. Wenn ein Verbraucher an eine Spannungsquelle (interner Widerstand) angeschlossen wird, entsteht ein geschlossener Stromkreis und es fließt Strom. Die Spannung am Generator verringert sich, da dieser durch den fließenden Strom abgebremst wird. (Ursache: Selbstinduktion durch den Stromfluss die ihrer Ursache, der Drehbewegung, entgegenwirkt). Hierdurch verringern sich die Drehgeschwindigkeit und damit die erzeugte Spannung an der Windturbine.



## 4.4: Änderung der Generatorspannung



### Übersicht/Lernziele

Bei diesem Experiment wird die Veränderung der Generatorspannung bei Anschließen unterschiedlicher Verbraucher untersucht. Dabei wird jeweils die Spannung gemessen. Auch die Leerlaufspannung wird bestimmt. In der Auswertung berechnen und vergleichen die SuS die Spannungsdifferenzen. Aus den Ergebnissen soll eine Erklärung für die Unterschiede zwischen den Verbrauchern gefunden werden.



### Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Das Experiment eignet sich für die **Klassenstufen 8 und 9** im Themenbereich „Elektromagnetische Induktion“ als experimentelle **Aufgabe mit erhöhtem Schwierigkeitsgrad**. Die SuS sollen ihre Kenntnisse der elektromagnetischen Induktion und des elektrischen Widerstandes zur Begründung der Beobachtungen anwenden. Es wird insbesondere das **Verhalten von Widerständen im Gleichstromkreis** untersucht.

## 4.4: Änderung der Generatorspannung

### Anmerkung

Im Leerlauf liefert ein Generator maximale Spannung und der angeschlossene Widerstand ist nahezu unendlich groß. Es fließt kein Strom durch den Generator. Wird einer der vier Verbraucher angeschlossen, so wird der Widerstand verringert und es fließt ein Strom durch Verbraucher und Generator. Aufgrund des fließenden Stromes kommt es durch Selbstinduktion in den Spulen des Generators zu einem Abbremsen und damit zur Verringerung der Generatorspannung. Je größer der angeschlossene Widerstand, desto kleiner ist die Spannungsdifferenz und auch der fließende Strom.

Der Generator wird bei größerem Lastwiderstand weniger stark abgebremst als bei geringem Lastwiderstand.

Dabei ist zu beachten, dass der Widerstand der Bauelemente nicht konstant ist. Bei der Glühlampe ist er beim ersten Einstecken geringer und vergrößert sich, wenn die Glühlampe warm wird. Die SuS sollten auf solche Fehlerquellen hingewiesen werden.



## Experiment 4.4: Änderung der Generatorspannung durch Zuschalten unterschiedlicher Verbraucher

### Aufgabe

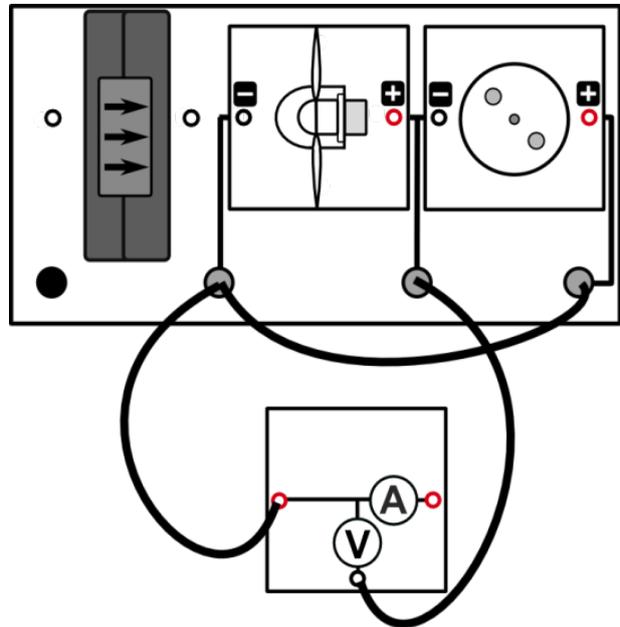
*Untersuche*, wie sich die Spannung ändert, wenn an den Generator unterschiedliche Verbraucher angeschlossen werden.

**Hinweis:** Beachte die Verletzungsgefahr: *Berühre* nicht den laufenden Rotor. *Benutze* den Fingerschutz für das Windturbinenmodul.

### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte. *Baue* den Versuchsaufbau vorerst ohne Verbrauchermodul *auf*.
2. *Stelle* am Powermodul eine Spannung von 12 Volt *ein* und starte das Winderzeugermodul.
3. *Miss* die Spannung am Generator, wenn kein Modul angeschlossen ist ( $U_{\text{Leerlauf}}$ ). *Verwende* dafür das AV-Modul im Spannungsmodus.
4. *Schalte* das Powermodul jetzt vorübergehend wieder *aus*. *Platziere* das Hupenmodul auf der Grundeinheit. *Schalte* das Powermodul wieder *ein*. *Notiere* deine Beobachtungen und die jeweilige Spannung, die am Generator erzeugt wird. *Benutze* im Anschluss die anderen Module auf die gleiche Weise. *Achte* beim Hupenmodul und beim LED-Modul auf die richtige Polung zwischen Windgenerator und Gerät (Plus an Plus, Minus an Minus).

### Versuchsaufbau



**Hinweis:** Beim Aufstecken des Hupenmoduls und des LED-Moduls muss auf die richtige Polung geachtet werden.

### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Winderzeugermodul
- Powermodul mit Netzteil
- Windturbinenmodul mit 3-Flügler 30°, Flügel: optimiertes Profil
- Hupenmodul
- LED-Modul
- Motormodul (mit beliebiger Farbscheibe)
- Glühlampenmodul
- AV-Modul
- 3-5 Kabel

## Experiment 4.4: Änderung der Generatorspannung durch Zuschalten unterschiedlicher Verbraucher

### Beobachtungen

Anhand der Geräusche kann man vermuten, dass sich der Windgenerator langsamer dreht, wenn ein Verbraucher angeschlossen wird. Die unterschiedlichen Module verringern die Generatorspannung unterschiedlich stark.

### Messergebnisse

$$\begin{array}{ll}
 U_{\text{Leerlauf}} = \underline{7,41 \text{ Volt}} & U_{\text{Motor}} = \underline{5,75 \text{ Volt}} \\
 U_{\text{Hupe}} = \underline{7,1 \text{ Volt}} & U_{\text{Glühlampe}} = \underline{5,5 \text{ Volt}} \\
 U_{\text{LED}} = \underline{6,3 \text{ Volt}} &
 \end{array}$$

### Auswertung

1. Berechne die Spannungsdifferenz für die einzelnen Geräte
2. Benenne die Bauteile, die zur größten bzw. kleinsten Änderung der Spannung am Generator führen.
3. Erkläre das beobachtete Verhalten der Spannungen.
4. Ziehe aus den Messergebnissen Schlussfolgerungen für die Widerstände der einzelnen Geräte. Vergleiche sie untereinander (>, <, =).

### Lösungen

#### Aufgabe 1:

$\Delta U_{\text{Hupe}} = 0,31 \text{ V}$	$\Delta U_{\text{LED}} = 1,11 \text{ V}$	$\Delta U_{\text{Motor}} = 1,66 \text{ V}$	$\Delta U_{\text{Glühlampe}} = 1,91 \text{ V}$
---	--	--	--

Aufgabe 2: Kleinste Änderung: Hupenmodul Größte Änderung: Glühlampenmodul

## Experiment 4.4: Änderung der Generatorspannung durch Zuschalten unterschiedlicher Verbraucher

---

Aufgabe 3:

Durch Anschluss eines Verbrauchers wird der Stromkreis am Generator geschlossen. Der Widerstand wird verringert (denn im Leerlauf ist der Widerstand nahezu unendlich groß). Im geschlossenen Stromkreis fließt ein Strom, der den Generator durch Selbstinduktion abbremst. Damit verringert sich die erzeugte Spannung.

---

Aufgabe 4:

Je kleiner der Widerstand eines Bauteiles ist, desto größer ist der Strom, der durch dieses fließt. Durch den größeren Stromfluss ist die entstehende Spannungsdifferenz am größten. Die LED hat also den kleinsten Widerstand, die Hupe den größten.

---

$$R_{\text{Leerlauf}} > R_{\text{Hupe}} > R_{\text{Motor}} > R_{\text{Glühlampe}} > R_{\text{LED}}$$

---

## 4.5.1: Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (qualitativ)

### Übersicht/Lernziele

Bei diesem Experiment werden Rotoren mit zwei, drei und vier Rotorblättern verglichen. Es wird die Helligkeit einer Glühlampe untersucht, die jeweils an den Rotor angeschlossen ist. Zum Austausch der Rotoren steckt man die jeweilige Anzahl an Rotorblättern auf die Nabe. Die SuS tragen ihre Beobachtungen in die Tabelle ein und formulieren anschließend eine Beschreibung der Ergebnisse. Als Zusatzaufgabe wird die Nutzung von Dreiblattrotoren für Windenergieanlagen diskutiert. Die SuS sollen eine mögliche Erklärung für den häufigen Einsatz dieser Art von Rotoren finden.

### Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 5 bis 7** des Anfangsunterrichtes in Physik oder naturwissenschaftlichen Grundlagenfächern. Es werden die verschiedenen Rotorarten anschaulich miteinander verglichen und die Ergebnisse auf die aktuelle Nutzung von Windenergieanlagen übertragen. Durch den einfachen Aufbau ist das Experiment zum Üben des selbstständigen Experimentierens zu empfehlen. Die Zusatzaufgabe leistet einen Beitrag zur Übung des fachsprachlichen Argumentierens mithilfe erster physikalischer Kenntnisse.



## 4.5.1: Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (qualitativ)

### Anmerkung

Der Zweiblattrotor lässt die Glühlampe gar nicht aufleuchten. Drei- und Vierblattrotor bewirken eine starke Helligkeit der Glühlampe. Das liegt der stärkeren Auftriebskraft bei einem Rotor mit größerer Flügelanzahl, denn die Auftriebskraft wirkt an jedem einzelnen Rotorblatt und verstärkt die Drehbewegung. Die Kräfte addieren sich, je mehr Rotorblätter am Windgenerator befestigt sind. Dieser Zusammenhang gilt allerdings nicht für beliebig viele Rotorblätter, da bei zunehmender Anzahl auch der Luftwiderstand größer wird, der die Drehbewegung wieder abbremst.

Für zwei, drei und vier Rotorblätter ist dieser Zusammenhang noch gegeben.

Außerdem verteilen sich die Kräfte, die bei der Drehbewegung auf die Rotorblätter wirken, besser, wenn drei Rotorblätter beteiligt sind. Beim Vierblattrotor treten beim Vorbeidrehen jedes Rotorblatts am Turm durch Verwirbelungen Kräfte an diesem und auch an dem gegenüberliegenden Flügel auf. Bei Dreiblattrotoren wird diese Kraft auf die beiden anderen Flügel verteilt. Dadurch ist der Materialverschleiß geringer.

## Experiment 4.5.1: Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (qualitativ)

### Aufgabe

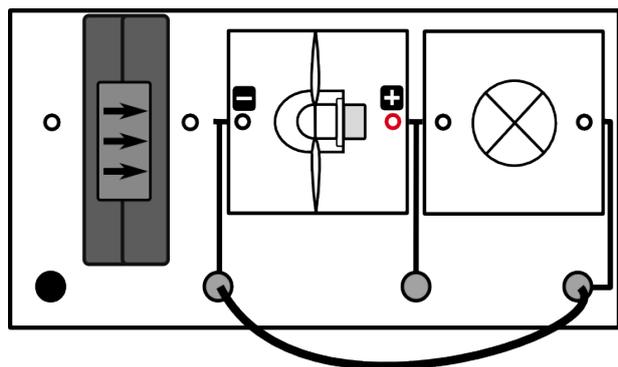
*Untersuche* die Helligkeit des Glühlampenmoduls, wenn dieses durch einen Windgenerator mit zwei, drei oder vier Rotorblättern betrieben wird.

**Hinweis:** Beachte die Verletzungsgefahr: *Berühre* nicht den laufenden Rotor. *Benutze* den Fingerschutz für das Windturbinenmodul.

### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Winderzeugermodul
- Powermodul mit Netzteil
- Windturbinenmodul mit 2, 3 und 4 Rotorblättern, 25°, Flügel: optimiertes Profil
- Glühlampenmodul
- 3 Kabel

### Versuchsaufbau



## Experiment 4.5.1: Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (qualitativ)



### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* den Versuch, wie abgebildet, *auf*. *Verwende* für den 2-Blatt-Rotor die 4-Blatt-Nabe.
3. *Setze* den 2-Blatt-Rotor an den Windgenerator und *schalte* das Winderzeugermodul mit einer Powermodulspannung von 7,5 Volt *ein*. *Beobachte* die Glühlampe. *Notiere* deine Beobachtungen und *setze* dazu in die jeweiligen Felder der Tabelle ein Kreuz. Wenn 7,5 Volt nicht reichen *steigere* bis auf 12 Volt.
4. *Wechsle* nun die Rotorflügel und *stecke* nacheinander den Drei- und den Vierblattrotor an den Windgenerator und *beobachte* jedes Mal die Glühlampe. Verwende die 3-Blatt-Nabe für den 3-Blatt-Rotor.

### Messergebnisse

	Die Glühlampe leuchtet ...		
	hell	schwach	gar nicht
2 Blätter			X
3 Blätter		X	
4 Blätter	X		

### Auswertung

1. *Beschreibe*, wie sich die Helligkeit der Glühlampe verändert, wenn sie mit unterschiedlichen Rotoren betrieben wird.
2. In Deutschland kommen für Windenergieanlagen hauptsächlich Dreiblattrotoren zum Einsatz. *Versuche* eine mögliche Erklärung zu finden.

### Lösungen

#### Aufgabe 1:

**Je mehr Rotorblätter an der Windenergieanlage befestigt sind, desto heller leuchtet die Glühlampe. Aber: Bei zwei Rotorblättern leuchtet die Glühlampe kaum oder nur sehr schwach.**

#### Aufgabe 2:

**Der technische Unterschied zwischen Drei- und Vierblattrotoren ist nicht besonders groß. Die Dreiblattrotoren benötigen allerdings weniger Material (nur 3, statt 4 Flügel), das ist kostengünstiger. Deshalb werden in Deutschland hauptsächlich Dreiblattrotoren verwendet.**



## 4.5.2: Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (quantitativ)



### Übersicht/Lernziele

Bei diesem Experiment werden Rotoren mit zwei, drei und vier Rotorblättern verglichen, indem die erzeugte Leistung am Generator untersucht wird. Zum Austausch der Rotoren wird die jeweilige Anzahl an Rotorblättern auf die Nabe gesteckt. Zu Beginn werden für eine gegebene Netzspannung die Spannung und Stromstärke am Motormodul bestimmt. Anschließend wird die Untersuchung für verschiedene Spannungen am Winderzeugermodul wiederholt. In der Auswertung berechnen die SuS die erreichte Leistung an jedem Messpunkt und tragen die Daten in die Diagramme ein. Zum Schluss werden die Ergebnisse ausgewertet und beschrieben, mit welcher Zahl von Rotorflügeln sich die höchsten Leistungen erzielen lassen.



### Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 7 bis 9**. Auch die Nutzung in einem **Projekt zur Windenergie** oder zu regenerativen Energien ist zu empfehlen. Es werden die verschiedenen Rotorarten anschaulich miteinander verglichen und die Ergebnisse auf die aktuelle Nutzung von Windenergieanlagen übertragen. Die SuS festigen ihre Kenntnisse im **Umgang mit Messgeräten** und in der **Interpretation von Diagrammen**. Sie übertragen ihre Erkenntnisse aus dem Experiment auf Sachverhalte an realen Windenergieanlagen und üben sich dabei im **Umgang mit der Fachsprache** des Physikunterrichtes.

## 4.5.2: Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (quantitativ)

### Anmerkung

Der Zweiblattrotor erzeugt die geringste Leistung am Generator. Drei- und Vierblattrotor erreichen nahezu gleich große Leistungswerte, wobei der Dreiblattrotor vor allem bei höheren Windgeschwindigkeiten geringfügig besser ist. Grund dafür ist einerseits die verstärkte Auftriebskraft bei einem Rotor mit größerer Flügelzahl und andererseits ein günstiger Widerstand für den Generator beim Betrieb mit drei Rotorblättern. An jedem einzelnen Rotorblatt wirkt die Auftriebskraft, welche die Drehbewegung des Rotors verstärkt. Die Kräfte addieren sich, je mehr Rotorblätter vorhanden sind. Der Zusammenhang gilt aber nicht für beliebig viele Rotorblätter, da mit zunehmender

Anzahl auch der Luftwiderstand größer und die erzeugte Drehbewegung abgebremst wird. Für zwei, drei und vier Rotorblätter ist der Zusammenhang allerdings noch gegeben.

Am Zweiblattrotor wirkt also die geringste Auftriebskraft, er bewirkt somit auch die langsamste Drehung und erzeugt die geringste Leistung. Der Dreiblattrotor erzeugt eine größere Leistung. Am Dreiblattrotor wird eine gleichgroße oder geringfügig größere Spannung erzeugt als bei einem Vierblattrotor, was vor allem aus der Windgeschwindigkeit am Rotor folgt und der günstigeren Lage auf der I-U-Kennlinie.





## Experiment 4.5.2: Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (quantitativ)



### Aufgabe

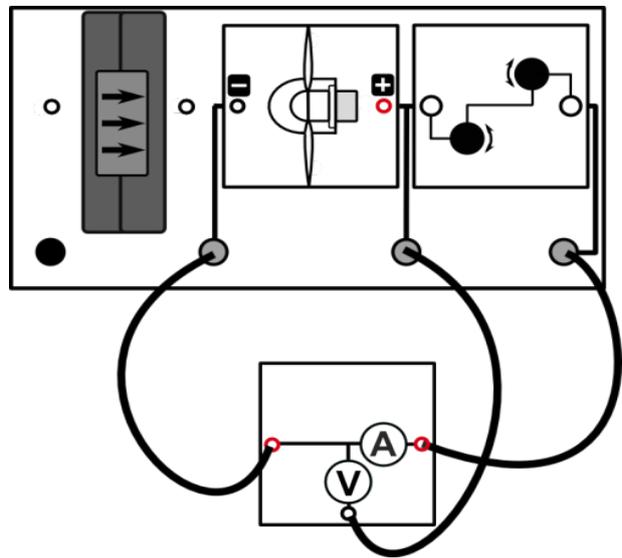
Untersuche die Leistung des Windgenerators bei unterschiedlicher Anzahl von Rotorblättern.

**Hinweise:** Beachte die Verletzungsgefahr: Berühre nicht den laufenden Rotor. Benutze den Fingerschutz für das Windturbinenmodul.

Die Rotoren brauchen unterschiedlich viel Zeit, bis sie eine konstante Umdrehungsgeschwindigkeit erreichen und damit eine konstante Spannung erzeugen. Die Messwerte sollten erst notiert werden, wenn sie sich nicht mehr ändern.

Messwerte (Volt oder Milliampère) können hier negativ sein. Das hängt mit der Verschaltung zusammen. Verwende den Betrag des Wertes.

### Versuchsaufbau



### Durchführung

1. Informiere dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. Baue den Versuch, wie abgebildet, auf.
3. Stelle das Potentiometer auf einen Widerstand von 100 Ohm ein.
4. Stecke den Zweiblattrotor auf den Windgenerator und schalte das Winderzeugermodul bei einer Powermodulspannung von 12 Volt ein.
5. Miss die erzeugte Spannung und Stromstärke an der Windturbine. Verwende dafür das AV-Modul im Stromstärke-Spannungsmodus.
6. Verändere die Spannung am Powermodul, wie in der Tabelle angegeben, und wiederhole die Messung für die anderen Spannungswerte.
7. Wiederhole die Messungen für den Drei- und Vierblattrotor.
8. Trage deine Werte in die Tabelle ein und berechne jeweils die Leistung der Windenergieanlage.

### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Winderzeugermodul
- Powermodul mit Netzteil
- Windturbinenmodul mit 2, 3 und 4 Rotorblättern 25°, Flügel: optimiertes Profil,
- Potentiometermodul (Poti)
- AV-Modul
- 5 Kabel

### Messergebnisse

Zweiblattrotor					
U [V]	5	6	7,5	9	12
v [m/s]	2,9	3,6	4,6	5,3	6,7
U [V]	0,0	0,1	0,2	2,9	3,8
I [mA]	0	5	12	27	36
P [mW]	0	1	2	78	137

Dreiblattrotor					
U [V]	5	6	7,5	9	12
v [m/s]	2,9	3,6	4,6	5,3	6,7
U [V]	1,2	1,8	2,6	3,3	4,3
I [mA]	14	19	26	32	48
P [mW]	17	34	68	106	206

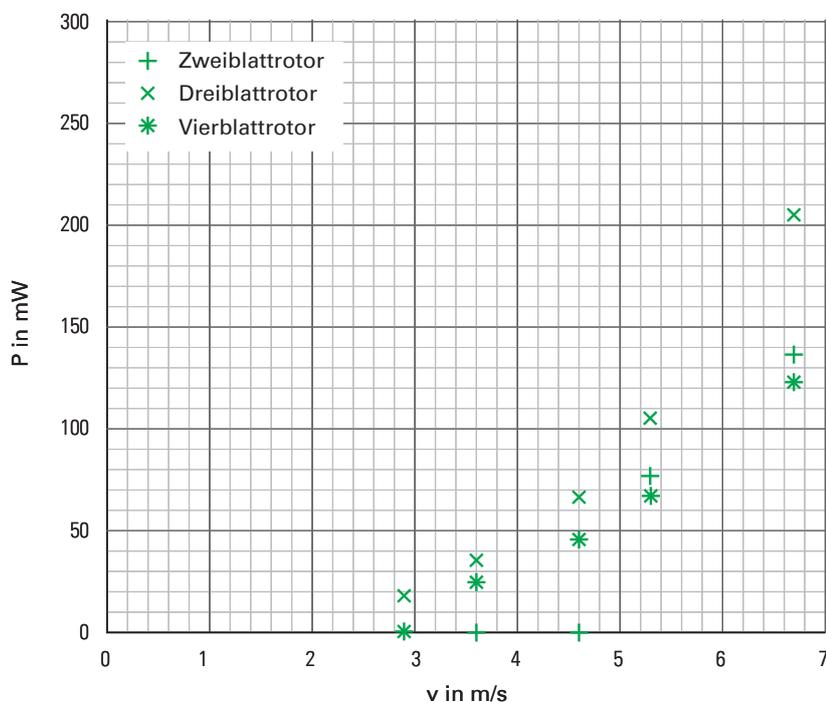
## Experiment 4.5.2: Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (quantitativ)

Vierblattrotor					
U [V]	5	6	7,5	9	12
v [m/s]	2,9	3,6	4,6	5,3	6,7
U [V]	1,0	1,5	2,1	2,6	3,5
I [mA]	2	16	21	26	35
P [mW]	2	24	44	68	123

### Auswertung

1. *Trage* deine Messwerte in das entsprechende Diagramm ein.
2. *Beschreibe* die Messpunkte. Mit welcher Anzahl an Rotorblättern kann die größte Leistung erzeugt werden, welche erzeugt die geringste?
3. *Begründe* deine Messergebnisse.

### Diagramm



### Lösungen

#### Aufgabe 2:

Die größte Leistung wurde (hier) mit dem Dreiblattrotor erzeugt. Mit dem Zweiflügler lassen sich nur geringere Leistungen erzielen.

#### Aufgabe 3:

Der Dreiblattrotor ist am effektivsten, da er mehr kinetische Energie des Windes aufnehmen kann als der Zweiblattrotor und bei seiner Drehung weniger bremsende Verwirbelungen erzeugt als der Vierblattrotor.



## 4.6: Kennlinie einer Windenergieanlage



### Übersicht/Lernziele

Bei diesem Experiment bestimmen die SuS die Strom-Spannungskennlinie der Windenergieanlage mit Gleichstromgenerator. Mithilfe eines Potentiometers wird der an die Windenergieanlage angeschlossene Widerstand verändert, die jeweiligen Messwerte für Spannung und Stromstärke werden bestimmt und in ein Diagramm eingetragen. Aus den ermittelten Werten wird die Leistung bestimmt und diese in Abhängigkeit von Spannung und angeschlossenem Widerstand in das Diagramm eingetragen. Mithilfe ihrer Erkenntnisse sollen die SuS, die I-U-Kennlinie erklären und Konsequenzen für den Betrieb realer Windenergieanlagen formulieren. Weiterhin sollen Einflüsse auf die Leistung einer Windenergieanlage von den SuS diskutiert werden.

### Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 8 bis 9**. Für den Einsatz eignet sich ein Themenbereich, der die **Kennlinien verschiedener Bauelemente** vergleicht und untersucht. Auch die Nutzung in einem **Projekt zur Windenergie** oder zu regenerativen Energien ist zu empfehlen. Es werden Zusammenhänge zwischen Windenergienutzung und Aufbau der Windenergieanlage thematisiert. Die SuS verbessern ihre **Fertigkeiten im Umgang mit Messgeräten** und führen ein vollständiges Protokoll.

Aufgrund der **komplexen Zusammenhänge** zwischen Strom, Spannung, Leistung und Widerstand ist auch ein Einsatz des Experimentes in der **Sekundarstufe II** denkbar.

## 4.6: Kennlinie einer Windenergieanlage

### Anmerkung

Die Stromstärke-Spannungskennlinie (I-U-Kennlinie) zeigt, bei welchem Spannungswert die größte Stromstärke (Maximum) erreicht wird oder wie groß die Stromstärke bei einer bestimmten Spannung ist.

Mit dem größten Widerstand fließt der geringste Strom, es wird dabei aber die größte Spannung erzeugt. Verringert man den Widerstand, steigt die Stromstärke.

Aufgrund der Selbstinduktion innerhalb des Generators steigt die induzierte Spannung, die aufgrund der Lenz'schen Regel der durch die Rotation verursachten Spannung entgegenwirkt. Infolgedessen verringert sich die Gesamtspannung. Da die induzierte Spannung proportional zur Stromstärke ist, hat die I-U-Kennlinie die Form einer Geraden ( $U_{\text{ges}} = U_{\text{Leerlauf}} - U_{\text{ind}}$ ).

Aus der Darstellung von Leistung ( $P = U \cdot I$ ) in Abhängigkeit der Spannung ( $U$ ) kann ein Leistungsmaximum bei einer bestimmten erzeugten Spannung festgestellt werden. Dieses Maximum wird durch Einstellen des Potentiometers (= regelbarer Widerstand) auf einen bestimmten Wert erreicht. Aus dem Diagramm mit dargestellter Leistung in Abhängigkeit des Widerstandes  $R$  ( $R = U/I$ ) lässt sich ein sogenannter Widerstandswert für den Generator bestimmen, bei dem die Leistung der Anlage (hier Windenergieanlage) maximal ist.

Für reale Windenergieanlagen mit Gleichstromgenerator kann aus diesen Erkenntnissen geschlossen werden, dass für den Betrieb mit maximaler Leistung ein bestimmter fester Widerstand angeschlossen werden muss. Dieser entspricht dabei gerade dem inneren Widerstand des Spulenkörpers im Generator.



## Experiment 4.6: Kennlinie einer Windenergieanlage mit Gleichstromgenerator

### Aufgabe

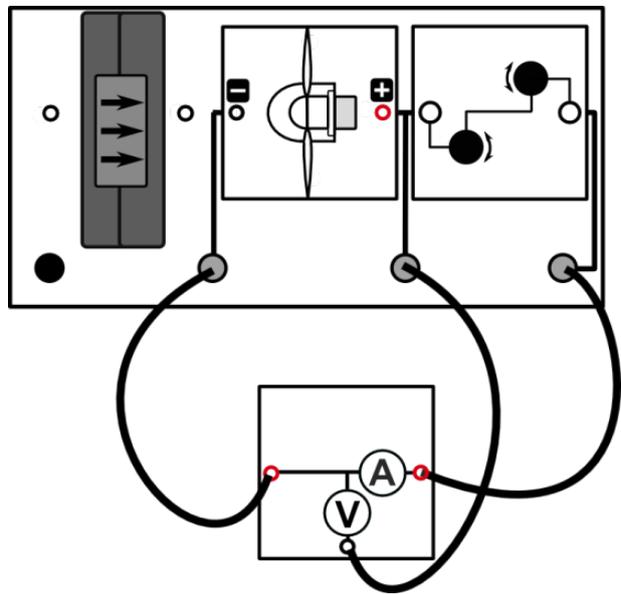
Nimm die Strom-Spannungskennlinie des Windrotors auf. Bestimme außerdem den Lastwiderstand, bei dem die maximale Leistung erreicht wird.

**Hinweise:** Beachte die Verletzungsgefahr: Berühre nicht den laufenden Rotor. Benutze den Fingerschutz für das Windturbinenmodul. Messwerte (Volt oder Milliampère) können hier negativ sein. Das hängt mit der Verschaltung zusammen. Verwende den Betrag des Wertes.

### Durchführung

1. Informiere dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. Baue den Versuch, wie abgebildet, auf. Verwende das AV-Modul im Strom-Spannungsmodus.
3. Stelle mithilfe des Potentiometermoduls (Poti) verschiedene Spannungswerte ein und miss die jeweilige Stromstärke. Dazu wird zunächst das 1-Kilo-Ohm-Potentiometer und dann langsam das 100-Kilo-Ohm-Potentiometer bis zum Maximum gedreht.
4. Verringere die Spannung in Schritten von je ca. 0,2 Volt und trage deine Messwerte in die Tabelle ein. Warte nach jeder neuen Einstellung des Potentiometers bis Spannung und Stromstärke konstant sind. Miss außerdem Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke ohne das Potentiometer.

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Winderzeugermodul
- Powermodul mit Netzteil
- Windturbinenmodul mit 3-Flügler 30°, Rotorblätter: optimiertes Profil
- Potentiometermodul (Poti)
- AV-Modul
- 5 Kabel

## Experiment 4.6: Kennlinie einer Windenergieanlage mit Gleichstromgenerator

### Messergebnisse

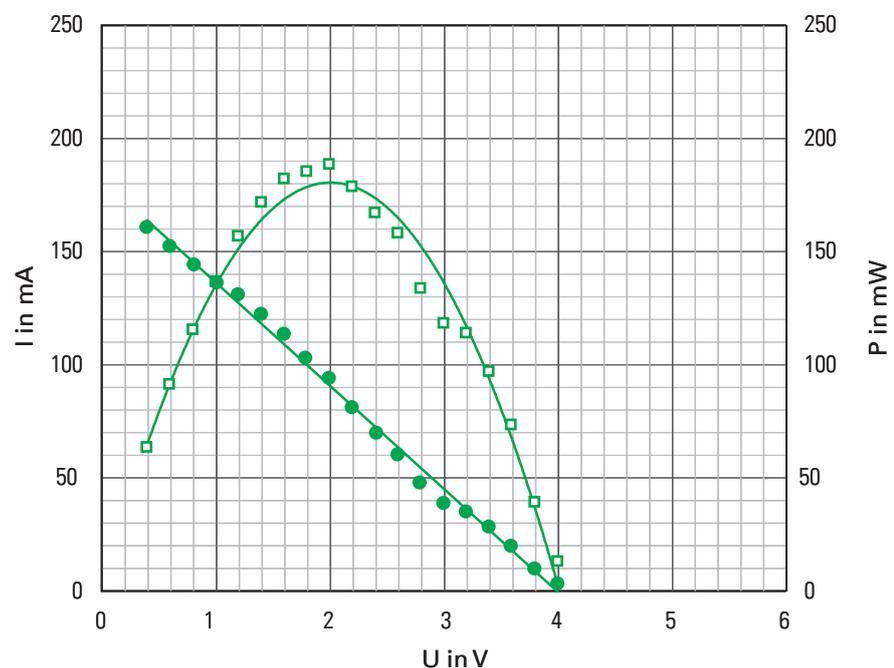
U [V]	4,0	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2
I [mA]	3,4	10,5	20,5	28,7	35,7	39,6	48,0	61,0	69,8	81,3
R [ $\Omega$ ]	1176,5	361,9	175,6	118,5	89,6	75,8	58,3	42,6	34,4	27,1
P [mW]	13,6	39,9	73,8	97,6	114,2	118,8	134,4	158,6	167,5	178,9

U [V]	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,6	0,4
I [mA]	94,5	103,2	114,2	123,0	130,9	137,0	144,9	153,1	160,5
R [ $\Omega$ ]	21,2	17,4	14,0	11,4	9,2	7,3	5,5	3,9	2,5
P [mW]	189,0	185,8	182,7	172,2	157,1	137,0	115,9	91,9	64,2

### Auswertung

1. *Berechne* für jeden Messpunkt jeweils den Widerstand R und die Leistung P der Windturbine. *Trage* deine Werte in die Tabelle *ein*.
2. *Trage* deine Messwertpaare in das entsprechende Diagramm *ein*.
3. *Bestimme* aus dem Diagramm den Spannungs- und Widerstandswertwert, bei dem die Leistung der Windenergieanlage mit Gleichstromgenerator am größten ist.
4. *Erkläre* das Absinken der Generatorspannung beim Verringern des Widerstandes.
5. *Erläutere* die Konsequenzen, welche sich aus diesen Ergebnissen für den Betrieb realer Windenergieanlagen mit Gleichstromgenerator ergeben.
6. Die maximale Leistung einer Windenergieanlage hängt also vom Lastwiderstand am Generator ab. *Nenne* mögliche Effekte oder physikalische Größen, die ebenfalls einen Einfluss auf die Leistung einer Windenergieanlage haben könnten.

### Diagramm



## Experiment 4.6: Kennlinie einer Windenergieanlage mit Gleichstromgenerator

---

### Lösungen

Aufgabe 3:  $U_{max} = \underline{2,0 \text{ V}}$        $R_{max} = \underline{21,2 \Omega}$

### Aufgabe 4:

Aufgrund der Verringerung des Widerstandes steigt die Stromstärke im Stromkreis. Hierdurch steigt die induzierte Spannung innerhalb des Generators, die aufgrund der Lenz'schen Regel der Generatorspannung entgegenwirkt. Dadurch sinkt die Gesamtspannung und die Rotationsgeschwindigkeit des Rotors sinkt.

### Aufgabe 5:

Eine Windenergieanlage mit Gleichstromgenerator erreicht ihre maximale Leistung, wenn der Rotor eine bestimmte Spannung erzeugt. Eine Windenergieanlage erreicht ihre maximale Leistung, wenn sie durch einen bestimmten Widerstand belastet wird.

### Aufgabe 6:

Rotorblattform, Windgeschwindigkeit, Ausrichtung zum Wind, Turmhöhe, Rotorgröße, Anzahl der Rotorblätter

---

## 4.7.1: Einfluss der Windrichtung (qualitativ)

### Übersicht/Lernziele

Es soll die Abhängigkeit der Windrichtung auf die Leistung einer Windenergieanlage untersucht werden, indem die Helligkeit einer durch sie betriebenen Leuchtdiode betrachtet wird. Dazu wird die Leuchtdiode zuerst durch einen frontal ausgerichteten Rotor zum Leuchten gebracht. Durch vorsichtige Drehung des Windgenerators wird die Helligkeit der Leuchtdiode verändert. Die SuS notieren die Beobachtungen und treffen in der Auswertung eine Aussage über die benutzten Windrotoren. Diese folgt direkt aus den Ergebnissen des Experimentes.

### Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 5 und 6** des Anfangsunterrichtes in Physik oder naturwissenschaftlichen Grundlagenfächern. Es ist für das Durchführen **erster Experimente im Unterricht** geeignet, da der Versuchsaufbau sehr übersichtlich ist. Den SuS wird spielerisch die Abhängigkeit der Windenergieanlage von der vorherrschenden Windrichtung nahe gebracht.



## 4.7.1: Einfluss der Windrichtung (qualitativ)



### Anmerkung

Wird die Windenergieanlage nicht senkrecht durch den Wind angeströmt, so verringert sich die Angriffsfläche. Durch die verkleinerte Fläche und die andere Strömungsrichtung verändert sich auch die resultierende Kraftwirkung auf die Anlage.

Mit zunehmendem Drehwinkel verringert sich die Drehbewegung des Flügelrades und damit auch die Leistung der Windenergieanlage.



## Experiment 4.7.1: Einfluss der Windrichtung (qualitativ)

### Aufgabe

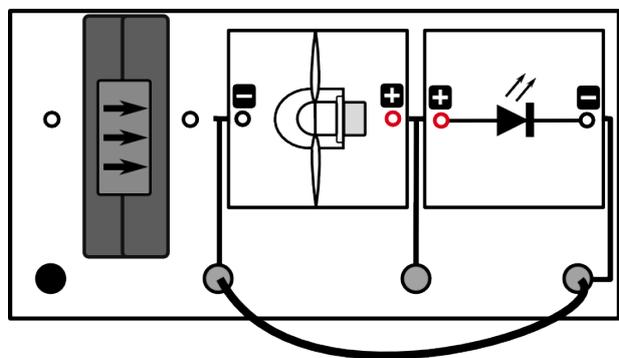
*Untersuche*, wie sich die Helligkeit einer Leuchtdiode ändert, wenn die Richtung des Windes auf den Windgenerator verändert wird.

**Hinweis:** Zum Verdrehen des Rotors muss das Winderzeugermodul abgeschaltet werden. Beachte die Verletzungsgefahr: *Berühre* nicht den laufenden Rotor. *Benutze* den Fingerschutz für das Windturbinenmodul.

### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* den Versuch, wie abgebildet, auf.
3. *Schalte* das Winderzeugermodul mit einer voreingestellten Powermodul-Spannung von 6 Volt ein.
4. *Drehe* den Windgenerator vorsichtig nach rechts und links und beobachte die Leuchtdiode. *Notiere* deine Beobachtungen. *Drehe* nicht weiter als 45°, damit die Rotorblätter nicht gegen das Winderzeugermodul schlagen.

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Winderzeugermodul
- Powermodul mit Netzteil
- Windturbinenmodul mit 3-Flügler 30°  
Flügel: optimiertes Profil
- LED-Modul
- 1-3 Kabel

**Hinweis:** Der Versuch ist auch mit dem Glühlampenmodul durchführbar. In diesem Fall muss die Spannung am Powermodul höher eingestellt sein (9 Volt).

## Experiment 4.7.1: Einfluss der Windrichtung (qualitativ)

### Beobachtungen

Die Leuchtdiode leuchtet weniger hell, wenn der eingestellte Winkel größer wird. Ab einem Winkel von  $40^\circ$  leuchtet die Leuchtdiode nicht mehr.

### Auswertung

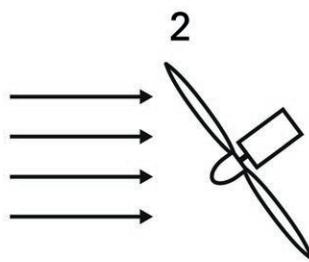
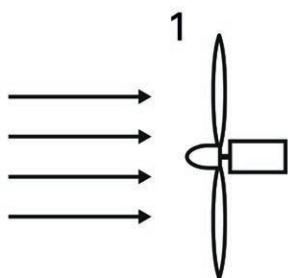
1: In den Abbildungen unten sind Windenergieanlagen mit unterschiedlichen Positionen zum Wind dargestellt. Die Pfeile kennzeichnen die Richtung des Luftstromes (Windrichtung). Welche der Anlagen kann die größte Leistung erzeugen, welche die geringste? *Begründe* mithilfe deiner Beobachtungen, warum die Leistung sinkt.

### Lösung

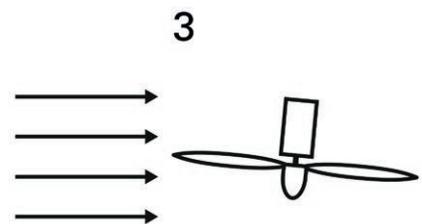
#### Aufgabe 1:

Die Luft strömt bei 2 und 3 nicht mehr auf kürzestem Weg an den Rotorblättern vorbei. Die Angriffsfläche am gesamten Rotor wird immer geringer und die auftriebgebende Form der Rotorblätter wird nicht mehr optimal erreicht.

#### größte Leistung



#### geringste Leistung



## 4.7.2: Einfluss der Windrichtung (quantitativ)



### Übersicht/Lernziele

Es soll die Abhängigkeit der Windrichtung auf die erzeugte Spannung einer Windenergieanlage untersucht werden. Für verschiedene Drehwinkel werden die gemessenen Spannungswerte notiert. Zusätzlich zum Drehwinkel wird noch der Cosinus des Drehwinkels berechnet und die SuS tragen ihre Messwerte in die jeweiligen Diagramme ein. Anschließend soll die Abhängigkeit der Spannung am Windrotor vom Drehwinkel beschrieben werden. Als kreative Aufgabe überlegen sich die SuS, wie eine Windenergieanlage aufgebaut sein muss, um bei jeder beliebigen Windrichtung die maximale Leistung zu erzeugen.

### Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 8 und 9**. Es ist ebenfalls für den Einsatz in einem **Projekt zur Windenergie** oder zu regenerativen Energien zu empfehlen. Die SuS üben ihre Fertigkeiten im **Umgang mit Messgeräten**. Es wird die Abhängigkeit zwischen Leistung und Windrichtung an einer Windenergieanlage untersucht und die SuS entwickeln **eigene Lösungen** zu einem vorgegebenen Problem der Thematik.

## Experiment 4.7.2: Einfluss der Windrichtung (quantitativ)

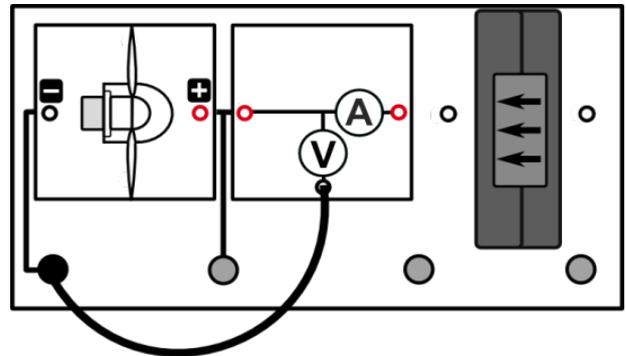
### Aufgabe

Untersuche die Spannung, die ein Windgenerator liefert, wenn sich die Richtung der Luftströmung auf den Rotor ändert.

### Durchführung

1. Informiere dich zuerst über die Bedienung der Geräte. Beachte die Verletzungsgefahr: Berühre nicht den laufenden Rotor. Benutze den Fingerschutz für das Windturbinenmodul.
2. Stelle den Drehwinkel zu Beginn auf  $0^\circ$  ein. Nutze das AV-Modul im Spannungsmodus.
3. Schalte das Powermodul ein und miss die Spannung am Generator. Trage deinen Messwert in die Tabelle ein und schalte das Powermodul wieder ab.
4. Verdrehe nun den Windgenerator vorsichtig um  $10^\circ$ . Wiederhole deine Messungen mit allen Winkeleinstellungen der Tabelle und trage die Messwerte ein.

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Winderzeugermodul
- Powermodul mit Netzteil
- Windturbinenmodul mit 3-Flügler  $30^\circ$ , Flügel: optimiertes Profil
- AV-Modul
- 3 Kabel

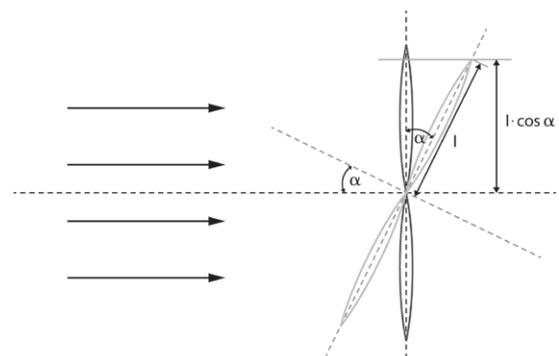
**Hinweis:** Zum Verdrehen des Rotors muss das Winderzeugermodul abgeschaltet werden. Beachte die Verletzungsgefahr: Berühre nicht den laufenden Rotor. Benutze den Fingerschutz für das Windturbinenmodul.

### Messergebnisse

$\alpha$ in $^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
cos $\alpha$ berechnet	1	0,98	0,94	0,87	0,77	0,64	0,5	0,34	0,17	0
U [V]	4,15	4,08	3,92	3,56	3,15	2,38	1,53	0,73	0	0

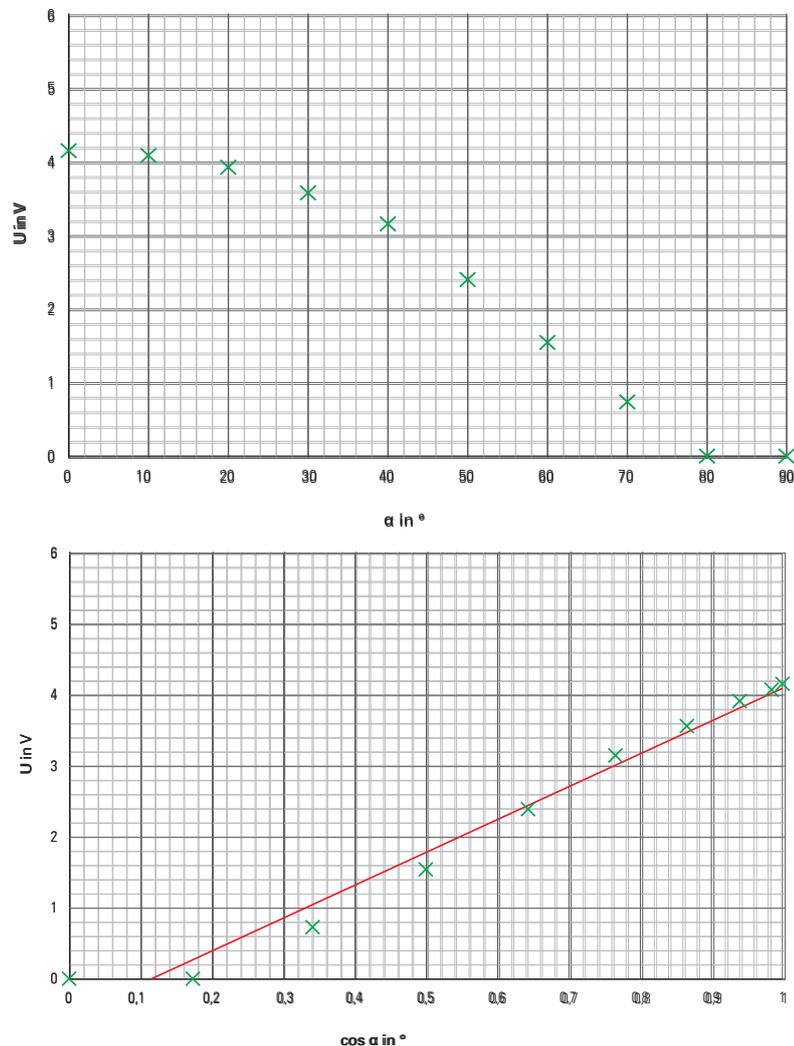
### Auswertung

1. Berechne den Cosinus zu den Winkeln. Trage die Werte dann in die entsprechenden Diagramme ein.
2. Die Größe  $\cos \alpha$  ist ein Maß für die Angriffsfläche des Windes am Windrotor (wie in der Abbildung dargestellt). Beschreibe die Abhängigkeit der Spannung vom Drehwinkel und der Angriffsfläche des Windes am Windrotor, die durch  $\cos \alpha$  dargestellt wird.
3. Die Richtung, aus der strömende Luft auf eine Windenergieanlage trifft, ist für die erzeugte Spannung von Bedeutung. Beschreibe eine Möglichkeit der Veränderung einer Anlage, um immer die maximale Spannung erzeugen zu können.



## Experiment 4.7.2: Einfluss der Windrichtung (quantitativ)

### Diagramme



### Lösungen

#### Aufgabe 2:

Die Spannung nimmt mit zunehmendem Drehwinkel ab.

Der Kurvenverlauf gleicht einer Cosinusfunktion.

Im  $U$ - $\cos \alpha$ -Diagramm ist daher ein annähernd linearer Zusammenhang erkennbar.

#### Aufgabe 3:

Um immer die maximale Spannung zu erzeugen, muss der Rotor der Windenergieanlage bei wechselnder Windrichtung gedreht werden. Der Rotor sollte jeweils so eingestellt werden, dass der Wind senkrecht auf das Flügelrad auftrifft.

## 4.8.1: Der Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (qualitativ)

### Übersicht/Lernziele

Es soll die Abhängigkeit des Anstellwinkels der Rotorblätter auf die Leistung einer Windenergieanlage untersucht werden, indem die Helligkeit einer durch sie betriebenen Glühlampe untersucht wird. Dazu wird zunächst ein Dreiflügel-Rotor mit optimiertem Profil und einem Anstellwinkel von  $20^\circ$  aufgebaut. Im Anschluss wird der Versuch mit den weiteren Anstellwinkeln wiederholt ( $25^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $90^\circ$ ) und die Ergebnisse in eine Tabelle eingetragen. Durch das Ausfüllen eines Lückentextes sollen die SuS die Messergebnisse interpretieren.

### Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich auch schon für den Einsatz in den **Klassenstufen 5 und 6** da der Versuchsaufbau sehr übersichtlich ist.



## 4.8.1: Der Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (qualitativ)



### Anmerkung

Je nach Windgeschwindigkeit ergibt sich ein optimaler Anstellwinkel aus der aerodynamischen Bauform der Flügel. Bei hohen Anstellwinkeln kommt es zum sogenannten Strömungsabriss an den Rotorflügeln, der zu einer starken Verringerung der Leistung am Windgenerator führt.



Die Glühlampe leuchtet am hellsten bei einem Anstellwinkel von  $25^\circ$ . Ab einem Winkel von  $50^\circ$  leuchtet sie gar nicht mehr. Bei  $90^\circ$  Anstellwinkel ist es kaum noch möglich, den Rotor überhaupt zum Drehen zu bringen.

## Experiment 4.8.1: Der Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (qualitativ)

### Aufgabe

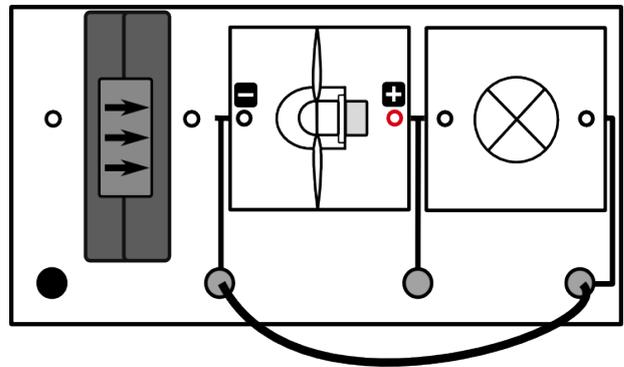
*Untersuche* den Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter gegenüber der Rotorebene auf die Helligkeit einer Glühlampe.

**Hinweis:** Beachte die Verletzungsgefahr: *Berühre* nicht den laufenden Rotor. *Benutze* den Fingerschutz für das Windturbinenmodul.

### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* den Versuch, wie abgebildet, auf.
3. *Baue* einen Rotor mit 3 Flügeln und einem Anstellwinkel der Blätter von  $20^\circ$  zusammen und stecke ihn auf den Windgenerator.
4. *Schalte* das Winderzeugermodul bei einer voreingestellten Powermodul-Spannung von 9 Volt ein und *beobachte* die Helligkeit der Glühlampe. Schiebe den Rotor ggf. an, falls er nicht von allein anläuft. *Trage* anschließend deine Beobachtungen in die Tabelle ein. *Male* dazu die entsprechende Anzahl an Feldern aus.
5. *Wiederhole* die Messung für alle anderen Rotorblattanstellwinkel.
6. *Zusatz:* *Führe* die gleiche Messung mit den Flügeln mit flachem Profil durch.

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Winderzeugermodul
- Powermodul mit Netzteil
- Windturbinenmodul mit 3-Flügler, alle Winkel, Flügel: optimiertes Profil
- Glühlampenmodul
- 3 Kabel

### Auswertung

Anstellwinkel	$20^\circ$	$25^\circ$	$30^\circ$	$50^\circ$	$90^\circ$	Beispiel
Die Glühlampe leuchtet...						hell
						schwach
						gar nicht

Bei größerem Anstellwinkel leuchtet die Glühlampe nicht mehr. Am stärksten leuchtet die Glühlampe bei einem Winkel von  $25^\circ$ .

Zusatz: Mit dem flachen Profil beobachtet man, dass die Glühlampe nicht leuchtet.



## 4.8.2: Der Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (quantitativ)



### Übersicht/Lernziele

Es soll der Einfluss des Anstellwinkels bei unterschiedlich ausgerichteten Rotorblättern auf die erzeugte Spannung am Windgenerator untersucht werden. Dafür werden die Spannungswerte am Windgenerator für verschiedene Anstellwinkel der jeweiligen Rotorflügel gemessen und notiert. In einem Diagramm tragen die SuS im Anschluss die Spannung über dem Anstellwinkel ab. Es soll der Zusammenhang zwischen beiden Größen untersucht und erklärt, beziehungsweise eine Vermutung geäußert werden, wie sich die Spannung für kleinere Anstellwinkel als  $20^\circ$  verhalten wird.



### Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 7 bis 9**. Es ist ebenfalls für den Einsatz in einem **Projekt zur Windenergie** oder zu regenerativen Energien zu empfehlen. Die SuS üben ihre Fertigkeiten im **Umgang mit Messgeräten**. Es wird die Abhängigkeit zwischen Spannung und Anstellwinkel von Rotorblättern an einer Windenergieanlage untersucht und die SuS entwickeln **eigene Lösungen** zu einem vorgegebenen Problem der Thematik.

## 4.8.2: Der Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (quantitativ)

### Anmerkung

Im Experiment wird die größte Spannung bei einem Anstellwinkel von  $25^\circ$  erreicht. Mit größerem Abstand zu diesem Winkel sinkt die Spannung rapide. Bei größeren Winkeln kommt es zum sogenannten Strömungsabriss, wodurch sich der Auftrieb an den Rotorflügel stark verringert. Dieser Effekt wird bei realen Windenergieanlagen genutzt, um Beschädigungen an der Windenergieanlage vorzubeugen, zum Beispiel bei Sturm oder

sehr hohen Windgeschwindigkeiten. Bei kleinen Winkeln ist die Angriffsfläche zu gering. Durch den verringerten Auftrieb ändert sich die Leistungsaufnahme des Rotorblattes, was sich im Versuch in einer kleineren Drehzahl und damit verringerter Spannung zeigt.

## Experiment 4.8.2: Der Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (quantitativ)

### Aufgabe

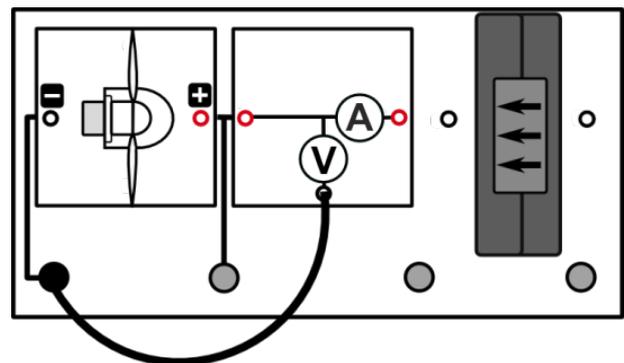
Untersuche den Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter gegenüber der Rotorebene und der Profilform auf die Spannung am Windgeneratormodul.

**Hinweis:** Beachte die Verletzungsgefahr: *Berühre nicht den laufenden Rotor. Benutze den Fingerschutz für das Windturbinenmodul.*

### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* den Versuch, wie abgebildet, *auf*.
3. *Baue* einen Rotor mit 3 Flügeln mit optimiertem Profil und einem Anstellwinkel der Blätter von  $20^\circ$  *auf* und stecke ihn auf den Windgenerator.
4. *Schalte* das Winderzeugermodul bei einer voreingestellten Powermodul-Spannung von 12 Volt *ein* und *miss* die Spannung am Windgenerator. *Verwende* das AV-Modul im Spannungsmodus. *Erfasse* die Messwerte in einer Tabelle.
5. *Wiederhole* die Messung für alle anderen Rotorblattanstellwinkel und für das flache Profil. Beim Messen der Spannung sollte darauf geachtet werden, dass die Messwerte erst dann abgelesen werden, wenn sich der angezeigte Wert nicht mehr ändert.

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Winderzeugermodul
- Powermodul mit Netzteil
- Windturbinenmodul mit 3-Flügler, alle Winkel, Flügel: optimiertes und flaches Profil
- AV-Modul
- 3 Kabel





# Experiment 4.8.2: Der Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (quantitativ)



## Messergebnisse

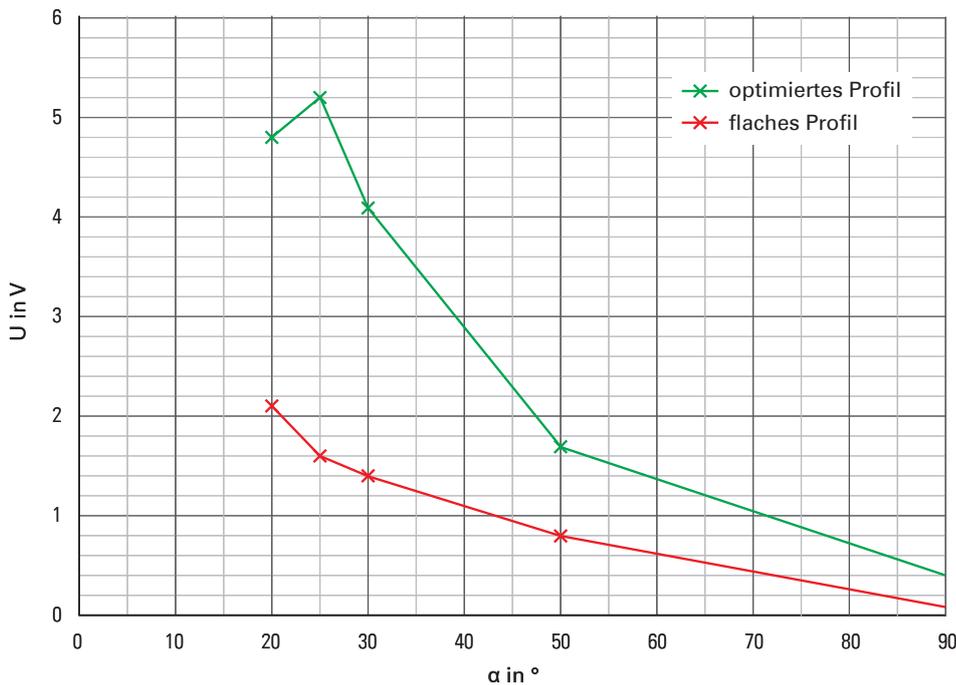


Anstellwinkel	20°	25°	30°	50°	90°
$U_{\text{optimiert}}$ [V]	4,8	5,2	4,1	1,7	0,4
$U_{\text{flach}}$ [V]	2,1	1,6	1,4	0,8	0,1

## Auswertung

1. *Trage* die Spannung  $U$  über dem Anstellwinkel  $\alpha$  ein.
2. *Beschreibe* den Zusammenhang zwischen Spannung und Anstellwinkel der Rotorblätter.
3. *Vermute* und *begründe* welchen Verlauf die Graphen für kleinere Anstellwinkel als 20° annehmen werden.

## Diagramm



## Experiment 4.8.2: Der Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (quantitativ)

---

### Lösungen

#### Aufgabe 2:

Beim optimierten Profil wird die größte Leerlaufspannung bei einem Anstellwinkel von  $25^\circ$  erreicht. Mit zunehmendem Abstand zu diesem Wert, nimmt die Leerlaufspannung bei den gemessenen Anstellwinkeln ab. Beim flachen Profil wird der größte Spannungswert bei  $20^\circ$  erreicht. Je größer der Winkel ist, desto kleiner wird der Spannungswert.

---

#### Aufgabe 3:

Anhand der Kurve kann für das optimierte Profil erwartet werden, dass die Spannung für kleinere Anstellwinkel immer weiter sinkt oder sich einem Sättigungswert nähert. Dies liegt daran, dass der optimierte Flügel auch nach dem Auftriebsprinzip arbeitet. Die Spannungswerte beim flachen Profil werden hingegen bei kleinerem Anstellwinkel steigen, da diese Flügelform durch den Widerstand angetrieben wird und die Widerstandsfläche immer größer wird.

---



## 4.9.1: Einfluss der Flügelform (qualitativ)



### Übersicht/Lernziele

Es soll die Leistung einer Windenergieanlage in Abhängigkeit von der Form der Rotorblätter untersucht werden. Dazu soll die Leuchtdiode zunächst mithilfe eines Rotors mit optimiertem Flügelprofil zum Leuchten gebracht werden. Danach sollen die SuS den gleichen Versuch mit dem flachen Flügelprofil wiederholen. Die SuS sollen Beispiele suchen, bei denen das flache Profil zum Einsatz kommt.



### Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich auch für den Einsatz in den **Klassenstufen 5 und 6** da der Versuchsaufbau sehr übersichtlich ist.

## Experiment 4.9.1: Einfluss der Flügelform (qualitativ)

### Aufgabe

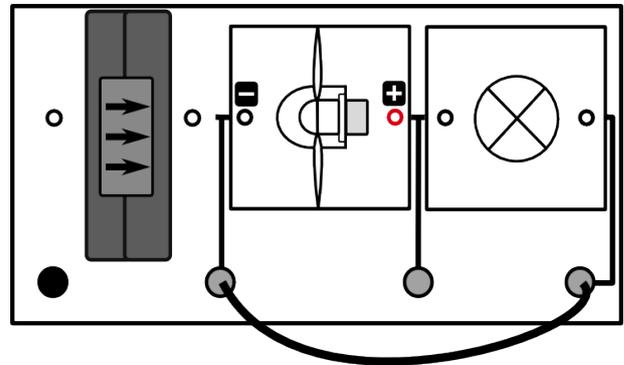
*Untersuche* die Helligkeit einer Leuchtdiode bei unterschiedlicher Form der Rotorblätter.

**Hinweis:** Beachte die Verletzungsgefahr: *Berühre* nicht den laufenden Rotor. *Benutze* den Fingerschutz für das Windturbinenmodul.

### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* den Versuch, wie abgebildet, *auf*.
3. *Stecke* den Dreiblattrotor mit dem optimierten Profil auf den Windgenerator und *schalte* das Winderzeugermodul bei einer voreingestellten Powermodul-Spannung von 12 Volt *ein*. *Beobachte* die Helligkeit der Leuchtdiode.
4. *Wiederhole* deine Messung mit dem Dreiblattrotor mit flachem Profil.
5. *Notiere* deine Beobachtungen

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Winderzeugermodul
- Powermodul mit Netzteil
- Windturbinenmodul mit 3-Flügler, 25°, Flügel: optimiertes Profil und flaches Profil
- LED-Modul oder Glühlampenmodul
- 3 Kabel

**Hinweis:** Beim aerodynamisch optimierten Profil leuchtet die LED heller. Dieses Profil ähnelt vom Aufbau her einem Flugzeugflügel. Durch das Profil können, zusätzlich zum Winddruck, Auftriebseffekte genutzt werden, die zu einer besseren Leistungsentnahme aus dem Wind führen.

### Auswertung

1. *Benenne* die Flügelform, bei der die LED heller leuchtet.
2. *Untersuche* die Flügelform beider Rotorflügel genauer. *Benenne* die Unterschiede.
3. *Benenne* Beispiele, wo das flache Profil zum Einsatz kommt.

### Lösungen

**Aufgabe 1:** Beim optimierten Profil leuchtet die LED heller.

**Aufgabe 2:**

Beim optimierten Profil laufen die Flügel vorn spitz zu und sind am Ansatz breiter (unsymmetrischer Aufbau, ähnlich wie Flugzeugflügel). Sie sind außerdem leicht in sich selbst verdreht.

Die flachen Flügel sind rechteckig und überall gleich dick.

**Aufgabe 3:** Windmühle, Western Mill, persische Windmühle

## 4.9.2: Einfluss der Flügelform (quantitativ)



### Übersicht/Lernziele

Die SuS sollen zunächst einen Aufbau des Rotors mit den optimierten Flügeln verwenden und die Spannung am Windgenerator messen. Im Anschluss wird die Spannung für einen Rotor mit flachem Profil (unter sonst gleichen Bedingungen) aufgenommen. Beide Werte werden verglichen und die SuS sollen aus den Ergebnissen schließen, welchen Einfluss die Flügelform auf die Leistung einer Windenergieanlage hat.

### Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 7 bis 9**. Es ist ebenfalls für den Einsatz in einem **Projekt zur Windenergie** oder zu regenerativen Energien zu empfehlen. Die SuS üben ihre Fertigkeiten im **Umgang mit Messgeräten**. Es wird die Abhängigkeit zwischen Spannung und Flügelform der Rotorflügel einer Windenergieanlage untersucht und die SuS entwickeln **eigene Lösungen** zu einem vorgegebenen Problem der Thematik.

## Experiment 4.9.2: Einfluss der Flügelform (quantitativ)

### Aufgabe

Untersuche die Spannung am Generator bei unterschiedlicher Form der Rotorblätter.

**Hinweis:** Beachte die Verletzungsgefahr: *Berühre* nicht den laufenden Rotor. *Benutze* den Fingerschutz für das Windturbinenmodul.

### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte. *Beachte* die Verletzungsgefahr: *Berühre* nicht den laufenden Rotor. *Benutze* den Fingerschutz für das Windturbinenmodul.
2. *Baue* den Versuch, wie abgebildet, *auf*.
3. *Stecke* den Dreiblattrotor mit dem optimierten Profil auf den Windgenerator und *schalte* das Winderzeugermodul bei einer voreingestellten Powermodul-Spannung von 9 Volt *ein*. *Miss* die am Generator erzeugte Spannung. *Verwende* das AV-Modul im Spannungsmodus.
4. *Wiederhole* deine Messung mit dem Dreiblattrotor mit flachem Profil.

**Hinweis:** Beim optimierten Profil ist die Spannung am Generator deutlich höher. Das optimierte Profil ähnelt vom Aufbau her einem Flugzeugflügel. Durch das aerodynamisch optimierte Profil können Auftriebseffekte genutzt werden, die zu einer besseren Leistungsentnahme des Rotorflügels aus der Luft und damit höheren Spannungswerten führen.

Beim Messen der Spannung sollte darauf geachtet werden, dass die Messwerte erst dann abgelesen werden, wenn sich der angezeigte Wert nicht mehr ändert.

### Messergebnisse

$$U_{\text{opt}} = \underline{3,9 \text{ V}}$$

$$U_{\text{flach}} = \underline{1,4 \text{ V}}$$

### Auswertung

1. *Benenne*, mit welchem Profil höhere Spannungen erzeugt werden können?
2. *Erkläre* den Einfluss der Flügelform auf die erzeugte Leistung einer Windenergieanlage. Was bewirkt die Flügelform?

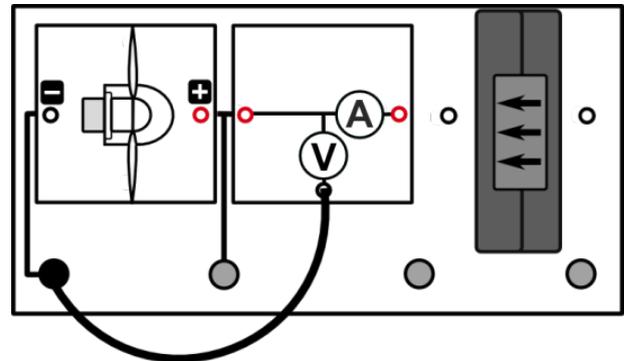
### Lösungen

#### Aufgabe 1: Mit dem optimierten Profil

#### Aufgabe 2:

Mit dem optimierten Profil lassen sich bei gleicher Windgeschwindigkeit deutlich höhere Drehzahlen erreichen. Das wiederum bedingt eine höhere Leistungsentnahme aus der Luft. In realen Windenergieanlagen sollten also die optimierten Flügel zum Einsatz kommen.

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Winderzeugermodul
- Powermodul mit Netzteil
- Windturbinenmodul mit 3-Flügler, 25°, Flügel: optimiertes Profil und flaches Profil
- AV-Modul
- 3 Kabel





## Thema 5 - Wasserkraft

Wasserkraftnutzung hat eine jahrtausendealte Tradition. Schon in der Antike und im Mittelalter wurde die Kraft des Wassers als Antrieb für Maschinen genutzt, z. B. bei Getreidemühlen, Säge- und Hammerwerken. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts setzte die Stromerzeugung durch Wasserkraft mittels Turbinen ein. Bis ungefähr 1925 konnte der Strombedarf in Bayern fast ausschließlich mit Wasserkraft gedeckt werden.

In Bayern sind rund 4.200 Wasserkraftanlagen in Betrieb. Etwa 95 % davon zählen zu den Kleinwasserkraftanlagen mit unter 1 MW Leistung. Diese erzeugen mit rund 1.000 GWh pro Jahr weniger als 9 % des Wasserkraftstroms in Bayern. Den Hauptanteil des bayerischen Wasserkraftstroms liefern große Wasserkraftanlagen.

Die größten Anlagen mit mehr als 10 MW (ca. 1,4 % der Anlagen) erbringen dabei rund zwei Drittel der Jahresarbeit (Strom). Sie liegen überwiegend an den alpinen Donauzuflüssen Iller, Lech (mit Wertach), Isar und Inn sowie an der Donau und am Main.

Es gibt grundsätzlich drei verschiedene Typen von Wasserkraftanlagen:

- Laufwasserkraftwerke
- Speicherkraftwerke
- Pumpspeicherkraftwerke

Nähere Informationen zur Wasserkraft gibt es im Energie-Atlas Bayern:

[www.energieatlas.bayern.de/thema\\_wasser.html](http://www.energieatlas.bayern.de/thema_wasser.html)



## 5.1: Wasser als Energiequelle



### Übersicht/Lernziele

#### Qualitativer Versuch

- Die SuS stellen fest, dass das Wasserradmodul eine Hupe betreiben kann.
- Der Versuch ist als Einstiegsexperiment in den Themenbereich „Wasserkraft“ geeignet.



#### Quantitativer Versuch

- Die SuS messen die Leerlaufspannung und entscheiden nach ihrem bisherigen Kenntnisstand, welche Verbraucher sie mit dem Wasserradmodul bei dieser Fallhöhe betreiben können.
- Der Versuch ist für SuS der **Klassen 7 und 8** geeignet.

## Experiment 5.1.1: Wasser als Energiequelle (qualitativ)

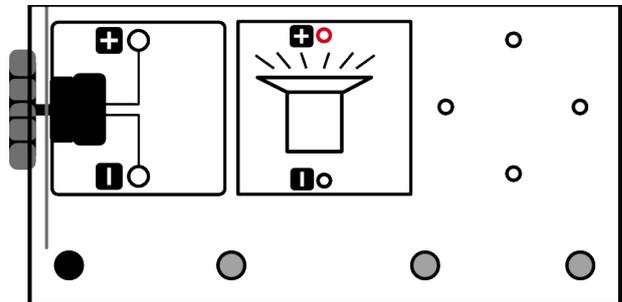
### Aufgabe

Ermittle, ob die Hupe bei dem Wasserkraft-generator als Spannungsquelle hupt!

### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* den Versuch, wie abgebildet, auf. *Achte* dabei auf die Polung der Verbindung.
3. *Stelle* eine mit Wasser gefüllte Schüssel auf einen höher gelegenen Standpunkt, eine andere, leere Schüssel auf einen niedrigeren Standpunkt.
4. *Halte* das Wasserradmodul über die untere Schüssel.
5. *Sauge* das Wasser im Schlauch an oder lege ihn komplett ins Wasser und *halte* den Finger auf ein Ende. Achtung: Das andere Ende des Schlauches *muss* immer im Wasser bleiben.
6. *Richte* den Schlauch so aus, dass das Wasser möglichst nur auf das Wasserrad spritzt und *nimm* dann den Finger vom Schlauchende.
7. Falls die Fallhöhe zu niedrig ist, kann es sein, dass du das Wasserrad „anstupsen“ musst.
8. *Notiere* deine Beobachtungen.

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Wasserradmodul
- Hupenmodul
- 1 Kabel
- 1 Schlauch

Zusätzlich benötigt:

- 2 große Schüsseln oder wasserdichte Kisten
- Wasser
- Tisch/Stuhl/anderer höherer Standort

### Beobachtungen

**Wenn sich das Wasserrad zu drehen beginnt, beginnt auch die Hupe zu hupen.**

### Auswertung

1. Welche Energieumwandlung findet statt?

### Lösung

#### Aufgabe 1:

Das Wasser besitzt zuerst potentielle Energie, die in kinetische Energie umgewandelt wird. Durch die Fallgeschwindigkeit wird eine Kraft auf das Wasserrad ausgeübt, die es zum Drehen bringt. Diese Bewegungsenergie wird im Generator in elektrische Energie umgewandelt, die die Hupe wiederum in Schwingungen (Schall) umwandelt.



## Experiment 5.1.2: Wasser als Energiequelle (quantitativ)

### Aufgabe

Ermittle die Leerlaufspannung des Wasserrads und gib die Fallhöhe an!

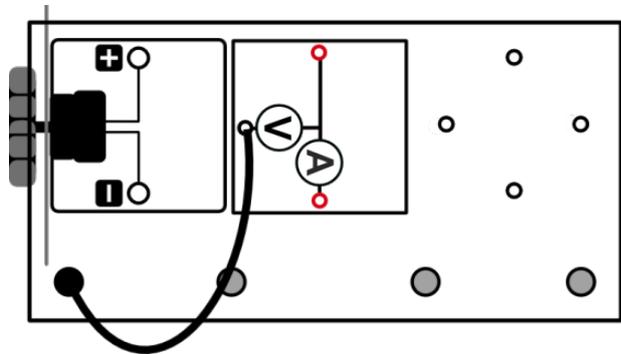
### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* den Versuch, wie abgebildet, *auf*. *Achte* dabei auf die Polung der Verbindung. *Verwende* das AV-Modul im Spannungsmodus.
3. *Stelle* eine mit Wasser gefüllte Schüssel auf einen höher gelegenen Standpunkt, eine andere, leere Schüssel auf einen niedrigeren Standpunkt.
4. *Halte* das Wasserradmodul über die untere Schüssel. *Sauge* das Wasser im Schlauch an oder *lege* ihn komplett ins Wasser und *halte* den Finger auf ein Ende.  
Achtung: Das andere Ende des Schlauches muss immer im Wasser bleiben.
5. *Richte* den Schlauch so *aus*, dass das Wasser möglichst nur auf das Wasserrad spritzt und *nimm* dann den Finger vom Schlauchende. Falls die Fallhöhe zu niedrig ist, kann es sein, dass du das Wasserrad „anstupsen“ musst.
6. *Miss* die Spannung am Generator.

### Auswertung

$U =$  2 V bei einer Höhe von 40 cm

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Wasserradmodul
- AV-Modul
- 1 Kabel
- 1 Schlauch

Zusätzlich benötigt:

- 2 große Schüsseln oder wasserdichte Kisten
- Wasser
- Tisch/Stuhl/anderer höherer Standort
- Lineal/Maßband

## 5.2: Abhängigkeit von der Fallhöhe

### Übersicht/Lernziele

#### Qualitativer Versuch

- Die SuS stellen fest, dass die Fallhöhe mit der Leistung des Wasserrads in Beziehung steht.

#### Quantitativer Versuch

- Der Versuch ist für SuS der **Klassen 7 bis 9** geeignet.
- Die SuS messen die Leerlaufspannung bei verschiedenen Fallhöhen.
- Die SuS üben sich im Umgang mit Messgeräten und Diagrammen.

### Benötigtes Vorwissen

Als Vorversuch empfehlen sich die Experimente aus 5.1 um einen Einstieg in die Thematik zu bekommen.



## Experiment 5.2.1: Abhängigkeit von der Fallhöhe (qualitativ)

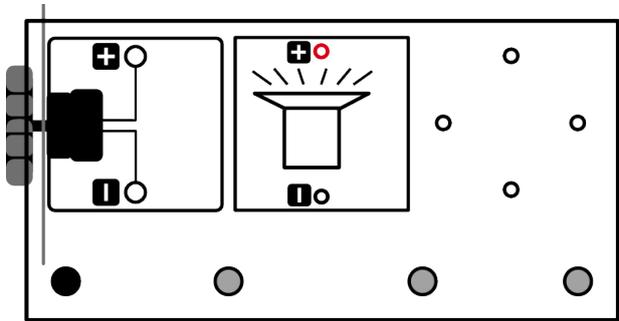
### Aufgabe

*Untersuche*, inwieweit die Fallhöhe die Lautstärke der Hupe beeinträchtigt!

### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* den Versuch, wie abgebildet, *auf*. *Achte* dabei auf die Polung der Verbindung.
3. *Stelle* eine mit Wasser gefüllte Schüssel auf einen höher gelegenen Standpunkt, eine andere, leere Schüssel auf einen niedrigeren Standpunkt.
4. *Halte* das Wasserradmodul über die untere Schüssel.
5. *Sauge* das Wasser im Schlauch *an* oder *lege* ihn komplett ins Wasser und *halte* den Finger auf ein Ende. Achtung: Das andere Ende des Schlauches muss immer im Wasser bleiben.
6. *Richte* den Schlauch so *aus*, dass das Wasser möglichst nur auf das Wasserrad spritzt und *nimm* dann den Finger vom Schlauchende. Falls die Fallhöhe zu niedrig ist, kann es sein, dass du das Wasserrad „anstupsen“ musst.
7. *Wiederhole* den Versuch für verschiedene Fallhöhen (z. B. Stuhl-Boden, Tisch-Stuhl, Tisch-Boden).
8. *Notiere* deine Beobachtungen.

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Wasserradmodul
- Hupenmodul
- 1 Kabel
- 1 Schlauch

Zusätzlich benötigt:

- 2 große Schüsseln oder wasserdichte Kisten
- Wasser
- Tisch/Stuhl/anderer höherer Standort

### Lösung

**Je weiter das Wasser fällt, desto lauter hupt die Hupe.**

---



---

## Experiment 5.2.2: Abhängigkeit von der Fallhöhe (quantitativ)

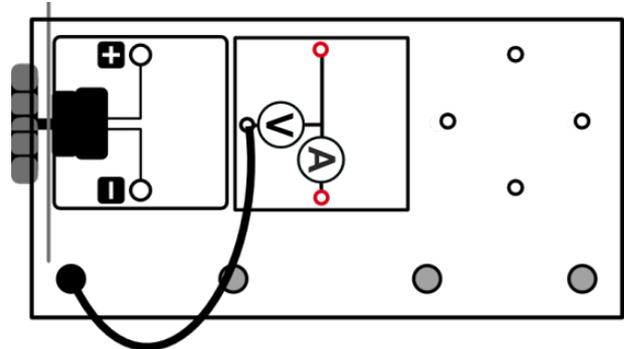
### Aufgabe

*Untersuche* die Abhängigkeit der Leerlaufspannung des Wasserradmoduls von der Fallhöhe des Wassers!

### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* den Versuch, wie abgebildet, *auf*. *Achte* dabei *auf* die Polung der Verbindung. *Verwende* das AV-Modul im Spannungsmodus.
3. *Stelle* eine mit Wasser gefüllte Schüssel auf einen höher gelegenen Standpunkt, eine andere, leere Schüssel auf einen niedrigeren Standpunkt.
4. *Halte* das Wasserradmodul über die untere Schüssel.
5. *Sauge* das Wasser im Schlauch an oder *lege* ihn komplett ins Wasser und *halte* den Finger auf ein Ende. Achtung: Das andere Ende des Schlauches muss immer im Wasser bleiben.
6. *Richte* den Schlauch so aus, dass das Wasser möglichst nur auf das Wasserrad spritzt und *nimm* dann den Finger vom Schlauchende.
7. Falls die Fallhöhe zu niedrig ist, kann es sein, dass du das Wasserrad „anstupsen“ musst.
8. *Miss* die Fallhöhe  $h$  und die Spannung  $U$  am Generatormodul.
9. *Wiederhole* den Versuch für verschiedene Fallhöhen (z.B. Stuhl-Boden, Tisch-Stuhl, Tisch-Boden) und *trage* deine Werte in die Tabelle *ein*.

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Wasserradmodul
- AV-Modul
- 1 Kabel
- 1 Schlauch

Zusätzlich benötigt:

- 2 große Schüsseln oder wasserdichte Kisten
- Wasser
- Tisch/Stuhl/anderer höherer Standort
- Lineal/Maßband

### Messergebnisse

h [cm]	20	22	39	66	82
U [V]	0	0	2	4,5	5





### Experiment 5.2.2: Abhängigkeit von der Fallhöhe (quantitativ)

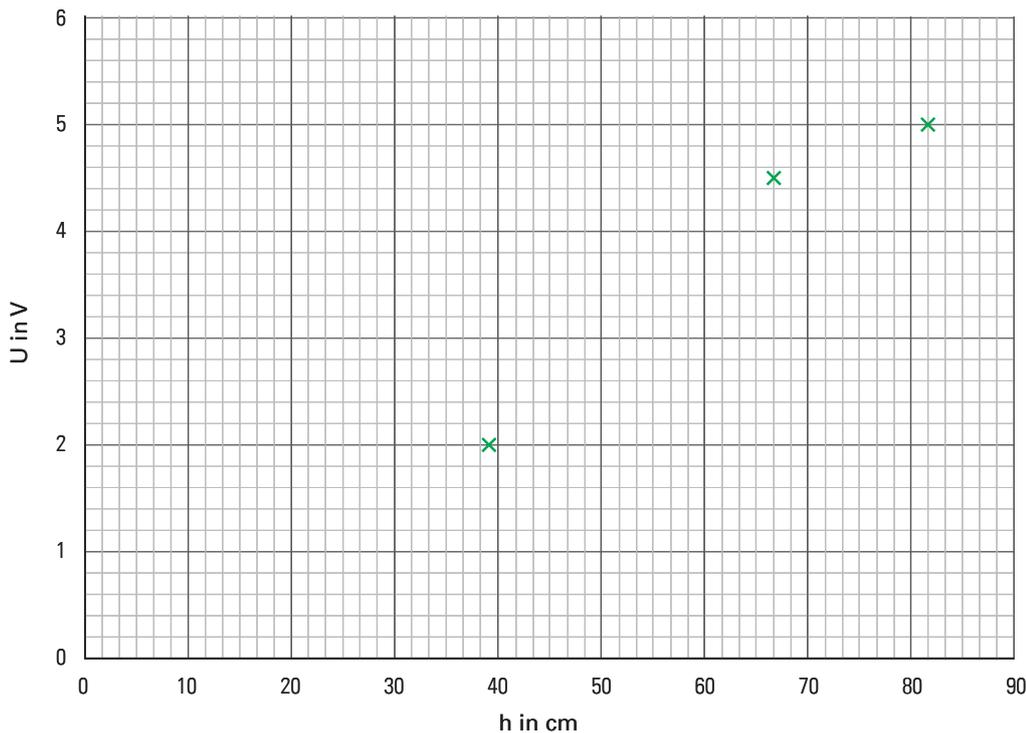


#### Auswertung

1. Trage deine Messwerte in das Diagramm ein.
2. Interpretiere die Ergebnisse deines Versuchs.



#### Diagramm



#### Lösung

##### Aufgabe 2:

Je weiter das Wasser fällt, desto höher ist die Spannung am Generatormodul. Wenn die Fallhöhe zu gering ist, fängt das Wasserrad, aufgrund von Trägheits- und Reibungseffekten, nicht an sich zu drehen. Mit zunehmender Fallhöhe steigt die kinetische Energie des Wassers, wenn es auf das Wasserrad trifft, wodurch es sich schneller dreht und größere Spannungen erzeugen kann. Es besteht jedoch kein linearer Zusammenhang.

---



---



---



---

## Thema 6 - Brennstoffzelle und Elektrolyseur

### Reversible Brennstoffzelle

Ein Elektrolyseur zersetzt mithilfe von Strom Wasser in seine zwei Bestandteile Wasserstoff  $H_2$  und Sauerstoff  $O_2$ . Eine Brennstoffzelle macht daraus wieder Strom.

Je nach Brennstoffzellentyp können auch andere Brennstoffe eingesetzt werden, beispielsweise Ethanol, Methanol oder Erdgas.

Eine reversible Brennstoffzelle vereint beide Prozesse in einem Gerät.

Elektrolyseur:  $H_2O + \text{Energie (Strom/Wärme)} \rightarrow H_2 + O_2$

Brennstoffzelle:  $H_2 + O_2 \rightarrow H_2O + \text{Energie (Strom/Wärme)}$

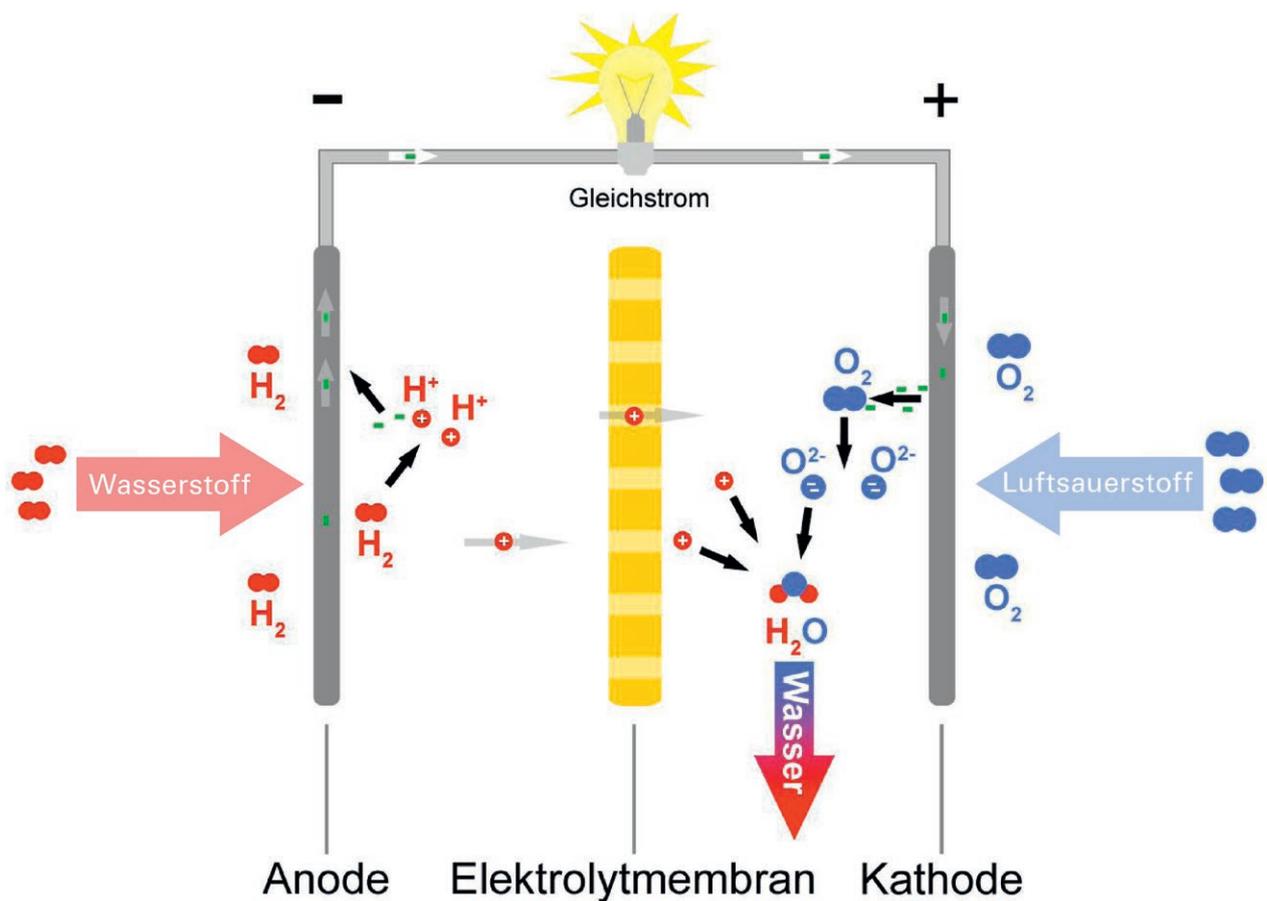


Abb.: Funktionsprinzip Brennstoffzelle (technische Darstellung – verändert)  
 Quelle: Wikipedia, gemeinfrei

Weitere Informationen gibt es beispielsweise bei Planet Wissen:

[www.planet-wissen.de/technik/energie/brennstoffzelle/index.html](http://www.planet-wissen.de/technik/energie/brennstoffzelle/index.html)

Für speziell Interessierte:

[https://www.ich.ovgu.de/ich\\_media/Physikalische+Chemie/Praktikumsanleitungen/Brennstoffzelle.pdf](https://www.ich.ovgu.de/ich_media/Physikalische+Chemie/Praktikumsanleitungen/Brennstoffzelle.pdf)

## Experiment 6.1: Was macht ein Elektrolyseur?

### Aufgabe

Lerne die Funktionsweise eines Elektrolyseurs kennen.

### Vorbemerkungen

Die in der Energiekiste enthaltene Brennstoffzelle ist eine sogenannte reversible Brennstoffzelle d. h. sie kann sowohl als Brennstoffzelle als auch als Elektrolyseur betrieben werden.

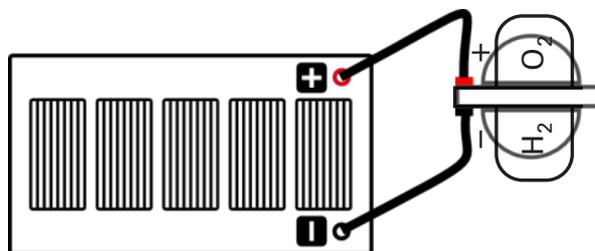
Diesen Versuch führt man am besten im direkten Sonnenlicht aus, da so die erreichbare Stromstärke und damit die Rate der Gasproduktion deutlich höher ist als bei Beleuchtung mit einer Lampe.

Wenn das Sonnenlicht nicht ausreicht kann eine Lampe verwendet werden. Wenn keine Methode der Beleuchtung besteht, kann die Brennstoffzelle nach Anleitung an das Powermodul angeschlossen werden. **Achtung: unbedingt die Anleitung auf der Seite 16 und Seite 17 beachten. sonst geht die Zelle möglicherweise kaputt.**

### Durchführung

1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. *Baue* das Brennstoffzellenmodul *auf*. *Achte* darauf, dass der rote Anschluss der Brennstoffzelle mit dem roten Anschluss des Solarmoduls verbunden ist.
3. *Beleuchte* nun das Solarmodul mit direktem Sonnenlicht oder einer Lampe und *beobachte* das Röhrchen an der oberen Öffnung der „O<sub>2</sub>“-Seite der Brennstoffzelle. *Notiere* deine Beobachtungen.
4. *Beschatte* nun das Solarmodul mit deiner Hand. *Notiere* deine Beobachtungen.

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Solarmodul (2,5 V)
- Brennstoffzelle mit Verschlussstopfen
- 2 Kabel
- destilliertes Wasser

## Experiment 6.1: Was macht ein Elektrolyseur?

### Lösung

Es bewegen sich Gasblasen durch das Röhrchen. Im oberen Behälter sammelt sich Flüssigkeit. Verschattet man das Solarmodul, bilden sich weniger oder keine Gasblasen mehr.

### Auswertung

1. Was kannst du über die Gase in den unteren Behältern aussagen?
2. Was macht die reversible Brennstoffzelle, wenn sie als Elektrolyseur betrieben wird? Welche Energieumwandlung findet statt?
3. *Erkläre* deine Beobachtungen aus den Aufgaben 5 und 6.
4. In der reversiblen Brennstoffzelle, betrieben als Elektrolyseur, wird Wasser (chemisches Zeichen:  $\text{H}_2\text{O}$ ) in die zwei Gase Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) und Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) zersetzt. Kannst du damit deine Beobachtung erklären? Versuche, eine Reaktionsgleichung aufzustellen.
5. Wie könntest du nachweisen, dass in dem mit „ $\text{H}_2$ “ beschrifteten Behälter wirklich Wasserstoff und in dem mit „ $\text{O}_2$ “ beschrifteten Behälter Sauerstoff ist?

### Lösungen

#### Aufgabe 1:

Im Wasserstoffbehälter sammelt sich etwa doppelt so viel Gas wie im Sauerstoffbehälter.

#### Aufgabe 2:

Der Elektrolyseur zersetzt Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff. Elektrische Energie wird in chemische Energie/ Gasproduktion umgewandelt.

#### Aufgabe 3:

Durch den vom Solarmodul erzeugten Strom entstehen im Elektrolyseur Gase. Unterbricht man die Stromzufuhr, z. B. indem man das Solarmodul beschattet, stoppt die Gasproduktion. Offenbar reicht die erzeugte Spannung nicht mehr für die chemische Umwandlung aus.





## Aufgabe 4:



Ein Wassermolekül besteht aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom. Die Gase Wasserstoff und Sauerstoff bestehen jeweils aus zwei Atomen. Um ein Sauerstoffmolekül zu erhalten, müssen zwei Wassermoleküle gespalten werden, wobei vier Wasserstoffatome (oder zwei Wasserstoffmoleküle) frei werden. Eine einfache Bilanzgleichung lautet demnach:

$2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$ . Dem Stoffmengenverhältnis von 2:1 folgt ein Volumenverhältnis von 2:1 ( $pV = nRT$ ).



## Aufgabe 5:

$\text{H}_2$ : Knallgasprobe       $\text{O}_2$ : Glimmspanprobe

## Experiment 6.2: Was macht eine Brennstoffzelle?

### Aufgabe

Lerne die Funktionsweise einer Brennstoffzelle kennen.

Hinweis: **unbedingt die Anleitung auf der Seite 16 und der Seite 17 beachten. sonst geht die Zelle möglicherweise kaputt.**

### Durchführung

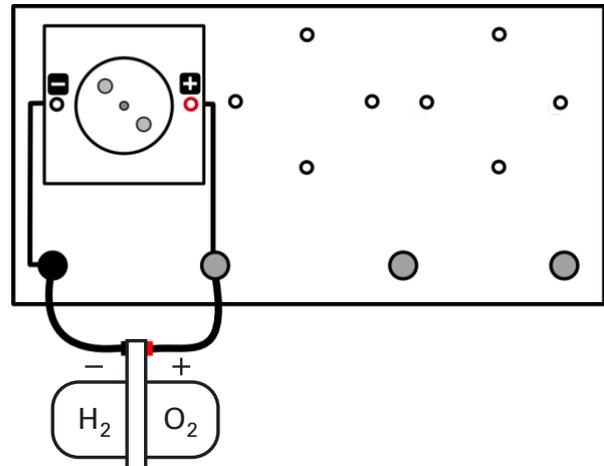
1. *Informiere* dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. Wenn du den Versuch „Was macht ein Elektrolyseur?“ gerade durchgeführt hast, sind die Gasbehälter schon mit Wasserstoff und Sauerstoff gefüllt. Falls nicht, *fülle* die Gasbehälter zunächst *auf*, siehe Experiment 6.1. Auf der „H<sub>2</sub>“-Seite sollte die 10 ml-Markierung erreicht sein.
3. *Stecke* nun als Verbraucher das Motor- oder das LED-Modul auf die Grundeinheit und *schließe* die Brennstoffzelle, wie abgebildet, an. Achte auf die Polung (Rot zu Rot, Schwarz zu Schwarz). „Was passiert mit den Gasen in den Vorratsbehältern? *Notiere* deine Beobachtungen.“

### Beobachtungen

**Der Motor dreht sich bzw. die LED leuchtet.**

**Die Gase in den Vorratsbehältern werden langsam weniger.**

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein (mit 2 Kurzschlusssteckern)
- Brennstoffzellenmodul mit Verschlussstopfen
- Motormodul und/oder
- LED-Modul
- 2 Kabel



## Experiment 6.2: Was macht eine Brennstoffzelle?

### Auswertung

1. Was macht eine Brennstoffzelle? Welche Energieumwandlung findet statt?
2. In Experiment 6.1 „Was macht ein Elektrolyseur?“ hattest du dir schon überlegt, welche Reaktion im Elektrolyseur abläuft (Wasser wird in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten). Wohin „verschwinden“ im Brennstoffzellenbetrieb die Gase, wenn du einen Verbraucher an die Brennstoffzelle anschließt?

### Lösungen

#### Aufgabe 1:

Die Brennstoffzelle verbraucht die zuvor hergestellten Gase und liefert Strom, der für das Antreiben eines Motors oder das Leuchten einer Glühlampe genutzt werden kann. Chemische Energie wird in elektrische Energie umgewandelt und anschließend in mechanische oder Lichtenergie.

#### Aufgabe 2:

Wasserstoff und Sauerstoff werden zu (flüssigem) Wasser verbunden. Die entstandene Menge Wasser hat, im Vergleich zu den beiden Gasen ein viel kleineres Volumen. So entsteht der Eindruck die Gase würden verschwinden.

## Experiment 6.3: Die Kennlinie eines Elektrolyseurs

### Aufgabe

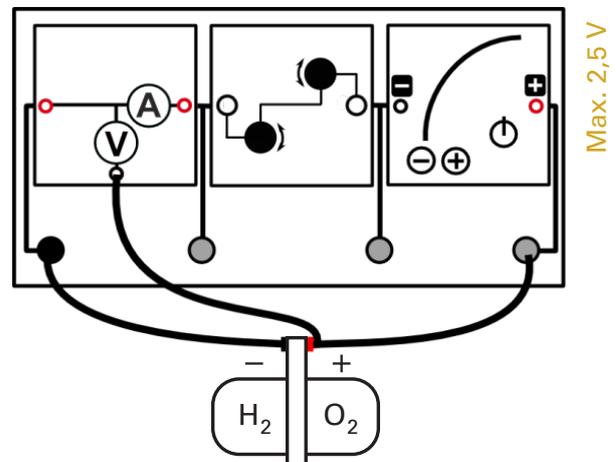
Verwende die reversible Brennstoffzelle als Elektrolyseur und *nimm* die zugehörige Kennlinie auf.

**Hinweis:** Maximal 2,5 Volt am Powermodul einstellen, siehe auch Anleitung Seite 16 und 17

### Durchführung

1. Informiere dich zuerst über die Bedienung der Geräte.
2. Achte beim Versuchsaufbau darauf, dass der Stromkreis vor Beginn der Messung geöffnet ist (z. B. durch Entfernen eines Kabels), damit das Experiment nicht ohne die Aufnahme der Messwerte beginnt. Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben.
3. Befülle die Brennstoffzelle **wie auf Seite 16 erklärt**.
4. Baue den Versuch, wie abgebildet, auf. Achte auf die Polung der Anschlüsse.
5. Stelle zunächst am Poti den maximalen Widerstand *ein* (1100 Ohm) und miss den Strom *I* und die Spannung *U*.
6. Verringere nun in mehreren Schritten den Widerstand am Potentiometer und *miss* jeweils Strom und Spannung. *Trage* die Werte in die Tabelle *ein*.

### Versuchsaufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß
- Brennstoffzellenmodul
- Potentiometermodul (Poti)
- Powermodul mit Netzteil
- AV-Modul
- 5 Kabel

### Messwerte

U [V]	1,49	1,50	1,51	1,52	1,53	1,54	1,55	1,56
I [mA]	13	18	22	33	45	60	76	100

U [V]	1,57	1,58	1,59	1,60	1,61	1,62	1,63	1,64
I [mA]	114	145	173	193	226	263	305	365

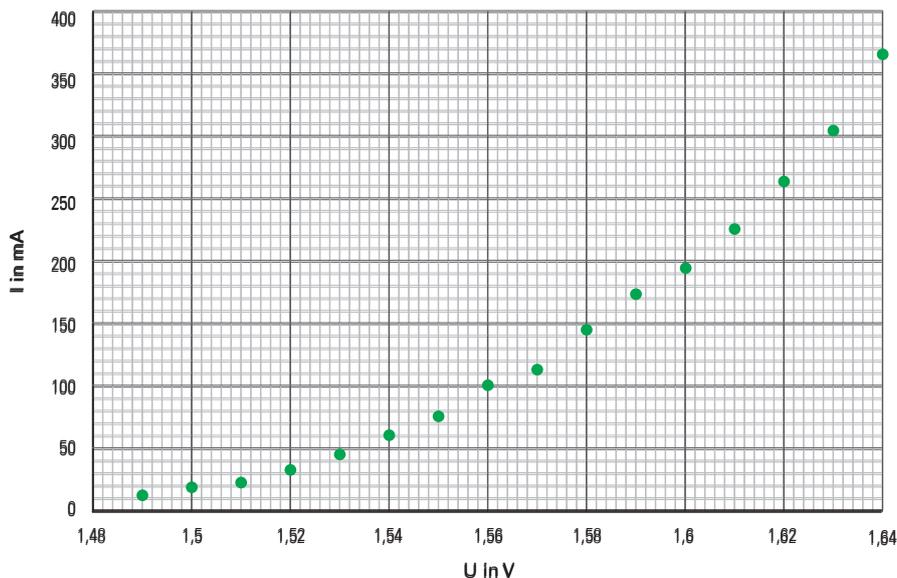


## Experiment 6.3: Die Kennlinie eines Elektrolyseurs

### Auswertung

1. Trage deine Werte in das Diagramm ein.
2. Interpretiere die U-I Kennlinie des Elektrolyseurs.

### Diagramm



### Lösung

#### Aufgabe 2:

Aus der Kennlinie ist zu erkennen, dass erst ab einer bestimmten Spannung Strom fließt, der zur Erzeugung der Gase führt. Die Zellspannung der galvanischen Zelle beträgt 1,23 V. Diese sogenannte Zersetzungsspannung muss mindestens angelegt werden, um Wasser zu zersetzen. Die gemessene Mindestspannung von circa 1,49 V ist jedoch höher. Die Differenz von experimenteller und theoretischer Zersetzungsspannung heißt Überspannung.

Die Überspannung ist abhängig von der Art des Elektrodenmaterials, von der Oberflächenbeschaffenheit der Elektroden, von der Art und Konzentration des Elektrolyten sowie von der Stromdichte (Stromstärke pro Fläche) und der Temperatur. Überspannungen sind gering bei Elektrodenreaktionen die zur Abscheidung von Metallen führen, jedoch besonders groß, wenn Gase ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $Cl_2$ ) abgeschieden werden.

## Experiment 6.4: Die Kennlinie einer Brennstoffzelle

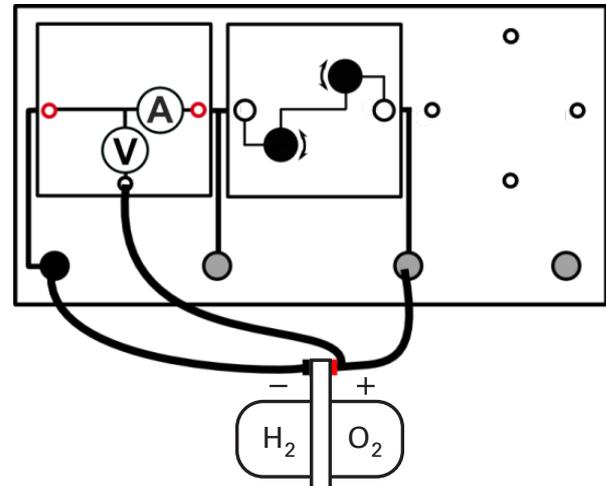
### Aufgabe

Ermittle die I-U-Kennlinie einer Brennstoffzelle.

### Vorbemerkung

Bevor du mit dem Versuch startest, musst du mit der reversiblen Brennstoffzelle circa 10 ml Wasserstoff produzieren. Die Handhabung findest du unter „**Handhabung der Einzelteile**“ ab Seite 16. Die Zelle erzeugt während des Ladens einen kapazitiven Effekt, welcher vor der Messung abgebaut werden muss. Berücksichtige deshalb, dass die reversible Brennstoffzelle vor dem Messvorgang circa 20 Sekunden bei 10 Ohm entladen werden muss. Die für das Experiment notwendige Leerlaufspannung liegt zwischen 0,8 Volt – 0,9 Volt.

### Versuchsaufbau



### Durchführung

1. **Informiere** dich zuerst über die Bedienung der Geräte. **Die Brennstoffzelle kann bei Überspannung kaputt gehen.**
2. **Baue** den Versuch, wie abgebildet, **auf**. **Stecke** das Poti noch nicht auf. Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben.
3. **Miss** zunächst die Leerlaufspannung der Brennstoffzelle  $U_0$  und **trage** deine Messwerte in die Tabelle ein. Noch ist der Widerstand sozusagen unendlich groß.
4. **Stecke** das Potentiometer auf und **stelle** den maximalen Widerstand ein (1100 Ohm). **Miss** anschließend die Spannung  $U$  und den Strom  $I$ .
5. **Verringere** nun in mehreren Schritten den Widerstand am Poti um 10 Ohm und **miss** jeweils den Strom  $I$  und die Spannung  $U$  an der Brennstoffzelle.
6. **Trage** deine Werte in die Tabelle ein. **Verwende** jeweils den Betrag des Messergebnisses, falls dieses negativ ist.

### Benötigte Geräte

- Grundeinheit groß oder Grundeinheit klein mit 2 Kurzschlusssteckern
- Brennstoffzellenmodul
- Potentiometermodul (Poti)
- AV-Modul
- 3 Kabel

### Auswertung

1. **Stelle** deine Messwerte im Diagramm dar.
2. **Beschreibe** den Verlauf der I-U-Kennlinie.
3. **Erläutere**, welcher Bereich der Kennlinie für den Betrieb eines Verbrauchers genutzt werden sollte.
4. **Erkläre**, weshalb die Spannung mit steigender Stromstärke absinkt.

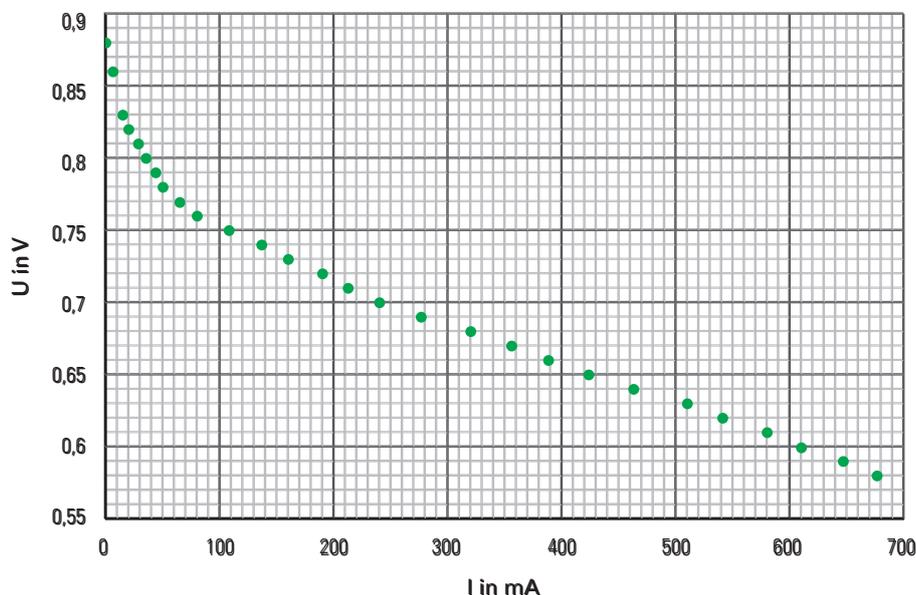
### Messergebnisse

U [V]	0,88	0,86	0,83	0,82	0,81	0,8	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73	0,72
I [mA]	0	7	15	20	28	35	43	50	65	80	107	137	160	189

U [V]	0,71	0,70	0,69	0,68	0,67	0,66	0,65	0,64	0,63	0,62	0,61	0,60	0,59	0,58
I [mA]	213	240	276	321	357	387	422	463	510	540	580	609	645	675

## Experiment 6.4: Die Kennlinie einer Brennstoffzelle

Diagramm



### Lösungen

#### Aufgabe 2+3:

Der erste Teil der I-U-Kennlinie fällt steil ab. Anschließend verläuft die Kennlinie flacher. Der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung kann in diesem Bereich als linear angesehen werden. Die maximal erreichbare Spannung der hier verwendeten PEM-Brennstoffzelle liegt bei etwa 0,9 V.

#### Aufgabe 4:

Der erste Teil der Kennlinie fällt steil ab. Die Spannung sinkt also bei geringen Stromstärken stark ab. Das ist ein charakteristisches Merkmal einer PEM-Brennstoffzelle. Ab etwa 100 mA fällt die Spannung linear und insgesamt flacher ab. Deshalb sollte die Betriebsspannung der Brennstoffzelle in diesem Bereich etwa zwischen 0,75 und 0,6 V liegen.

## Experiment 6.4: Die Kennlinie einer Brennstoffzelle

---

Im Leerlauf fließt kein Strom. Wenn ein Widerstand (Poti) dazu geschaltet wird, beginnt der Elektronenfluss. Dabei werden an der Anode der Brennstoffzelle Wassermoleküle in Protonen und Elektronen gespalten. Es wandern weniger Elektronen durch den Stromkreis als Protonen durch die Membran. So gelangen an die Kathode mehr Protonen als Elektronen pro Zeiteinheit. Dadurch folgt eine Änderung der Elektronenpotentiale. Die Potentialdifferenz sinkt und damit die Gesamtspannung der Zelle.

---

---

---



