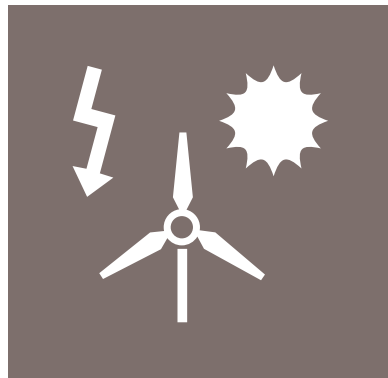
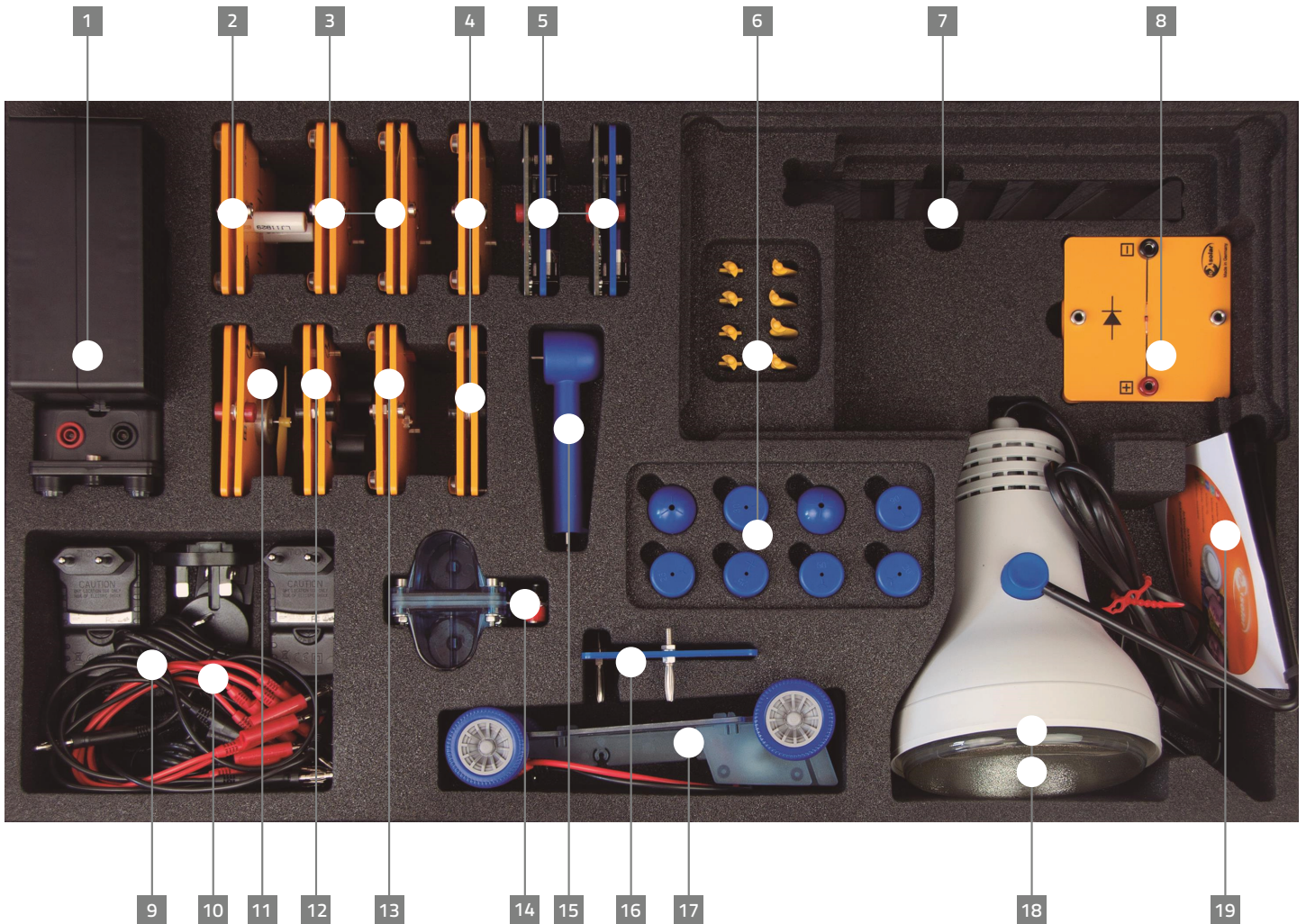


# leXsolar-SmartGrid Ready-to-go



Lehrerheft

Layout diagram leXsolar-SmartGrid Ready-to-go  
 Item-No.1605  
 Bestückungsplan leXsolar-SmartGrid Ready-to-go  
 Art.-Nr.1605

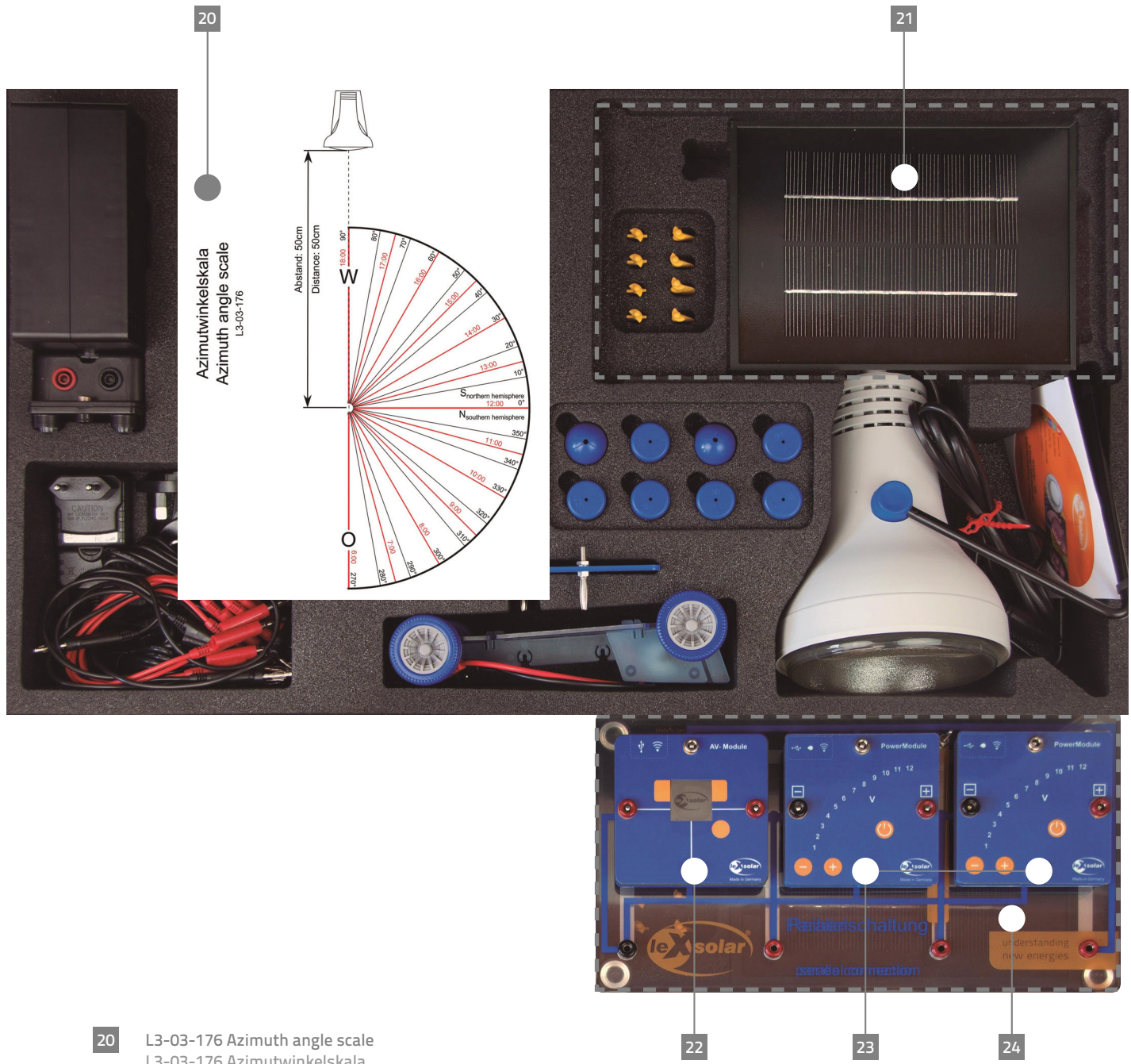


- |  |  |  |
|--|--|--|
| <p><b>1</b> 1400-19 leXsolar-Wind machine<br/>1400-19 leXsolar-Winderzeuger</p> <p><b>2</b> 1600-02 Capacitor module 5.0F/5.4V<br/>1600-02 Kondensatormodul 5.0F/5.4V</p> <p><b>3</b> 2x1100-26 Light bulb module<br/>2x1100-26 Glühlampenmodul</p> <p><b>4</b> 2x1600-01 Power grid module<br/>2x1600-01 Stromnetzmodul</p> | <p><b>5</b> 2x9100-04 SmartMeter<br/>2x9100-04 SmartMeter</p> <p><b>6</b> 1400-12 leXsolar-Wind rotor set<br/>(8 blades, 6 hubs, 2 capes)<br/>1400-12 leXsolar-Windrotoren<br/>(8 Flügel, 6 Naben, 2 Kapen)</p> <p><b>7</b> 1118-17 Base for solar panel<br/>1118-17 Standfuß Solarmodul</p> <p><b>8</b> 1100-21 Diode module<br/>1100-21 Diodenmodul</p> <p><b>9</b> 3xL2-06-014 Test leads black 50 cm<br/>3xL2-06-015 Test leads red 50 cm<br/>3xL2-06-014 Messleitung schw. 50 cm<br/>3xL2-06-015 Messleitung rot 50 cm</p> <p><b>10</b> 4xL2-06-012 Test leads black 25 cm<br/>7xL2-06-013 Test leads red 25 cm<br/>4xL2-06-012 Messleitung schw. 25 cm<br/>7xL2-06-013 Messleitung rot 25 cm</p> <p><b>11</b> 1100-27 Motor module<br/>1100-27 Motor module<br/>L2-02-017 Yellow propeller<br/>L2-02-017 Luftschraube (Propeller) gelb</p> | <p><b>12</b> 1100-23 Potentiometer module<br/>1100-23 Potentiometermodul</p> <p><b>13</b> 1400-22 Wind turbine module with <b>15</b><br/>1400-22 Windturbinenmodul mit <b>15</b></p> <p><b>14</b> L2-06-067 Reversible Fuel cell Pro<br/>L2-06-067 Reversible Brennstoffzelle Pro</p> <p><b>15</b> Wind turbine with <b>13</b><br/>Windturbine mit <b>13</b></p> <p><b>16</b> Battery adapter for <b>17</b><br/>Akku-Adapter für <b>17</b></p> <p><b>17</b> 1801-02 Electric model car with <b>16</b><br/>1801-02 Elektro-Modellfahrzeug mit <b>16</b></p> <p><b>18</b> L2-04-116 Illuminant 120W<br/>L2-04-116 Leuchtmittel 120W</p> <p><b>18</b> L2-04-080 Lamp housing<br/>L2-04-080 Lampengehäuse</p> <p><b>19</b> L3-03-016 leXsolar-CD<br/>L3-03-016 leXsolar-CD</p> |
|--|--|--|

Version number  
 Versionsnummer

L3-03-169\_04.03.2015

Layout diagram leXsolar-SmartGrid Ready-to-go  
 Item-No.1605  
 Bestückungsplan leXsolar-SmartGrid Ready-to-go  
 Art.-Nr.1605



- 20 L3-03-176 Azimuth angle scale  
L3-03-176 Azimutwinkelskala
- 21 1100-53 Solar panel 5.22 V, 380 mA  
1100-53 Solarmodul 5.22 V, 380 mA
- 22 9100-03 AV-Module  
9100-03 AV-Modul
- 23 2x9100-05 PowerModule  
2x9100-05 PowerModul
- 24 1100-19 leXsolar-Base unit  
1100-19 leXsolar-Grundeinheit groß

# leXsolar - SmartGrid Ready-to-go

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kapitel 1: Grundlagen und Theoretische Einführung</b> .....	<b>3</b>
1.1 Die Geschichte der Energiewende .....	3
1.2 Die Beweggründe für den Einsatz eines Smart Grids .....	4
1.2.1 Die unsichere Energieerzeugung von Erneuerbare Energiequellen .....	5
1.2.2 Die Entstehung von Netzüberlastungen durch eine dezentrale und bidirektionale Netzversorgung .....	6
1.2.3 Die Lösungsansätze .....	9
1.3 Die Zusammensetzung einzelner Lösungsansätze zu einem Smart Grid .....	14
1.3.1 Die Anpassung von Last und Erzeugung durch den Aufbau virtueller Kraftwerke .....	14
1.3.2 Die Anpassung von Last und Erzeugung durch die Einbindung privater Haushalte .....	14
1.3.3 Die Steuerung der Netzbelastung im Höchst- und Hochspannungsnetz durch intelligentes Engpassmanagement .....	15
1.3.4 Die Steuerung der Spannung und der Netzbelastung im Mittel- und Niederspannungsnetz durch intelligente Ortsnetzstationen .....	16
1.4 Einbindungsmöglichkeiten der Fachinhalte in den Unterricht .....	17
<b>Kapitel 2: Bezeichnung und Handhabung der Experimentiergeräte</b> .....	<b>20</b>
<b>Kapitel 3: Musterlösungen der Experimente</b> .....	<b>34</b>
<b>1. Grundlagenversuche zur Photovoltaik</b> .....	<b>35</b>
1.1 U-I-Kennlinie des Solarmoduls .....	37
1.2 Die I-U Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke .....	38
1.3 Die I-U Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Temperatur .....	41
<b>2. Grundlagenversuche zur Windkraft</b> .....	<b>46</b>
2.1 Abhängigkeit der Leistung von der Form der Flügel und dem Anstellwinkel .....	47
2.2 Abhängigkeit der Leistung von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren .....	50
2.3 Abhängigkeit der Leistung von der Windrichtung .....	53
<b>3. Grundlagenversuche zu Energiespeichersystemen</b> .....	<b>56</b>
3.1 U-I-Kennlinie eines Elektrolyseurs .....	57
3.2 Verhalten der Spannung und Stromstärke während des Ladevorgangs eines Elektrolyseurs .....	60
3.3 I-U-Kennlinie einer Brennstoffzelle .....	63
3.4 Verhalten der Spannung und Stromstärke während des Entladevorgangs einer Brennstoffzelle .....	66
3.5 t-U- und t-I-Kennlinie eines Kondensators beim Aufladen .....	70
3.6 t-U- und t-I-Kennlinie eines Kondensators beim Entladen .....	73
3.7 Betrieb des Elektroautos mit dem Kondensator und der Brennstoffzelle .....	77
<b>4.1 Die Leistungsschwankungen einer Photovoltaikanlage</b> .....	<b>79</b>
4.2 Die Leistungsschwankungen einer Windkraftanlage .....	85
4.3 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk .....	92
4.4 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk und eine Photovoltaikanlage .....	97
4.5 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk, eine Photovoltaikanlage und einen Energiespeicher (Kondensator) .....	104
4.6 Spannungsverhalten in einem herkömmlichen Strahlennetz .....	109
4.7 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage .....	114
4.8 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage in Abhängigkeit vom Verbrauch .....	120
4.9 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage in Abhängigkeit von der Länge des Leiters .....	122
4.10 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und einer intelligenten Ortsnetzstation .....	125
4.11 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und Energiespeicher (reversible Brennstoffzelle/ E-Mobility) .....	131
4.12 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und Lastmanagement .....	135
4.13 Leiterseilmonitoring .....	138
4.14 Szenarienversuch: Smart Grid .....	142
<b>Kapitel 4: Literaturverzeichnis</b> .....	<b>146</b>



# Kapitel 1: Grundlagen und Theoretische Einführung

## 1.1 Die Geschichte der Energiewende

Am 1. Januar 1991 kam es mit der Verabschiedung des Stromeinspeisegesetzes zu einem denkwürdigen Ereignis im deutschen Bundestag. Durch das Gesetz wurden die Elektrizitätsnetzbetreiber dazu verpflichtet, den in ihrem Gebiet erzeugten Strom aus erneuerbaren Energien abzunehmen und den Besitzern der regenerativen Energiequellen einen Mindestpreis für ihren Strom zu bezahlen.<sup>1</sup> Damit wurde die erste gesetzliche Grundlage zur Energiewende verabschiedet und der Beginn eines rasanten Aufstiegs der Erneuerbaren Energien eingeläutet.

Die Ursachen für die Einführung des Gesetzes waren die zunehmende Bedeutung des Umwelt- und Klimaschutzes in den 1970ern und 80ern und der Wunsch nach einer höheren Versorgungssicherheit in der Bevölkerung. Infolge des Auftretens und der zunehmenden Vergrößerung des Ozonlochs, des Beginns des Waldsterbens, der Erderwärmung durch die Kohlenstoffdioxidemission und der Nuklearkatastrophe von Tschernobyl kam es in den 1980ern immer wieder zu intensiven Umweltschutzdebatten in der Öffentlichkeit. Zeitgleich machten die Ölkrise von 1973 und 1979/80 der Wirtschaft und der Politik bewusst, welche Folgen ihre Abhängigkeit vom Erdöl für die Energieversorgung hatte. So kam es insbesondere in diesen Jahren vermehrt zu Betriebsausfällen, die letztlich zu Kurzarbeit, Arbeitslosigkeit und Insolvenz von Unternehmen führten.

Des Weiteren wurde der Gesellschaft zunehmend bewusst, dass die fossilen Ressourcen nur begrenzt vorhanden sind. Aus heutiger Sicht reichen die bekannten Uranvorkommen bei gleichbleibendem Verbrauch noch für weitere 42 bis 45 Jahre, Erdöllagerstätten für 43 bis 62 Jahre, Erdgasvorkommen für 64 bis 66 Jahre und Kohleflöße für 170 bis 207 Jahre. Da der Verbrauch in den kommenden Jahren steigen wird, werden die prognostizierten Angaben höchstwahrscheinlich noch nach unten korrigiert werden.<sup>2</sup> So sah sich die Politik durch eine breite Unterstützung aus der Bevölkerung und der Wirtschaft zu Investitionen in den Umweltschutz und zur Förderung regenerativer Energiequellen veranlasst.

Mit der Einführung des Gesetzes kam es zu einem unerwarteten Aufschwung der Windenergie in Deutschland. Bis dahin waren die einzigen nennenswerten alternativen Energiequellen Wasserkraftanlagen mit einem Anteil am Bruttostromverbrauch von 3,1% (17.426GWh) und Biogasanlagen mit 0,3% (1435GWh). Der Anteil am Bruttostromverbrauch stieg bis zum Jahr 2000 für Wasserkraftanlagen auf 3,7% (21.732GWh), für Biogasanlagen auf 0,8% (4.731GWh) und für Windkraftanlagen von 0,01% (71GWh) auf 1,6% (9.513GWh). Andere alternative Energiequellen blieben zunächst bedeutungslos.<sup>3</sup>

Am 1. April 2000 erweiterte das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) die bisherigen gesetzlichen Bestimmungen. So wurden die Vergütungssätze differenzierter gestaltet und Unterschiede zwischen den Arten der Energiequellen, Größen der Anlagen und Windstandort festgelegt. Diese Vergütung wurde auf eine Laufzeit von 20 Jahren festgelegt, um die Planungssicherheit für Anlagenbetreiber zu erhöhen. Des Weiteren wurden weitere Technologien, wie Geothermieanlagen und Grubengasanlagen mit in die Gesetzeslage einbezogen. Zur Förderung der Weiterentwicklung erneuerbarer Energien wurde eine jährliche Degression der Vergütungssätze eingeführt, die zwischen 1% und 5% liegen sollte. Die Finanzierung dieser Vergütung erfolgt über eine Umlage auf die Stromrechnung aller Verbraucher.

Das Gesetz führte zu einem neuen Schub für den Ausbau etablierter erneuerbarer Energietechniken und zur vermehrten Nutzung neuer Technologien, wie Photovoltaikanlagen und Offshore-Windparks. Die jährliche Energiegewinnung von Wind-, Wasser- und Biogasanlagen stieg bis 2013 auf 52.430GWh, 21.220GWh bzw. 47.900GWh an. Die jährlich erzeugte Energie von Photovoltaikanlagen stieg bis 2013 um einen Faktor 500 von 60GWh auf 30.000GWh und steht damit inzwischen auf Platz 3 der wichtigsten alternativen Energielieferanten. Die Inbetriebnahme von Offshore-Windparks begann erst ab 2009 und erreichte bis 2013 970GWh.<sup>4</sup>

---

<sup>1</sup><http://archiv.jura.uni-saarland.de/BGBl/TEIL1/1990/19902633.1.HTML>

<sup>2</sup> Buchholz: 2014, Seite 1

<sup>3</sup>[http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/agee-stat-grafiken-und-tabellen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-im-jahr-2013-deutsch.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/agee-stat-grafiken-und-tabellen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-im-jahr-2013-deutsch.pdf?__blob=publicationFile&v=2)

<sup>4</sup>[http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/agee-stat-grafiken-und-tabellen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-im-jahr-2013-deutsch.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/agee-stat-grafiken-und-tabellen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-im-jahr-2013-deutsch.pdf?__blob=publicationFile&v=2)

Beeinflusst wurden diese Entwicklungen durch Gesetzesanpassungen in den Jahren 2004, 2009 und 2012, die auf die aktuellen Fehlentwicklungen reagierten und die Effektivität des Gesetzes steigern, sowie die Kosten für die Energieverbraucher senken sollten. Beeinflusst wurden die Gesetzesänderungen einerseits durch Kosteneinsparungen im Ausbau, die im Vergleich zu den ursprünglichen Annahmen zu einem wesentlich schnelleren Wachstum der Kapazitäten und damit auch der Umlage führten. Andererseits ließ auch der gesellschaftliche Druck für mehr Weitsicht in der Energiepolitik nicht nach, weil die Endlichkeit von fossilen Brennstoffen im Laufe der Jahre immer mehr ins Bewusstsein rückte. Vor allem der endgültige Atomausstieg nach der Fukushima-Katastrophe beeinflusste die Politik sehr stark. Wichtige Änderungen am EEG waren:

2004:

- Reduzierung der Förderung von Windkraftanlagen
- Umsetzung von EU-Richtlinien zur Förderung von Strom aus Erneuerbaren Energien im Elektrizitätsbinnenmarkt
- Bessere juristische Stellung von Anlagenbetreibern gegenüber den Netzbetreibern<sup>5</sup>

2009

- das Ziel eines Anteil von 35% der Erneuerbaren am Energiemix bis 2020 wird ausgegeben
- Erlaubnis für Netzbetreiber in die Leistung der Anlagen einzugreifen, um Netzstörungen zu verhindern
- Definierung des Begriffs Anlage, um einen weiteren Missbrauch der Einspeisevergütung durch die Aufteilung einer großen Anlage in viele kleine Anlagen zu verhindern
- Kürzung der Vergütung für Photovoltaikanlagen<sup>6</sup>

2012

- Vereinzelt Erhöhung der Degressionssätze (Windkraftanlagen an Land: von 1% auf 1,5%, Offshore-Anlagen, von 5% auf 7%)

Von 1991 bis heute hat das EEG mit seinem Vorläufer die Entwicklung Erneuerbarer Energiequellen sehr stark gefördert. Die Internationale Energieagentur bezeichnete das EEG „als sehr wirksames Instrument zur Verbreiterung der erneuerbaren Energien und insbesondere der Stromerzeugung durch Biomasse, Windenergie und Photovoltaik.“<sup>7</sup> Von 1990 stieg der Anteil am Bruttostromverbrauch von 3,4% auf 25,4% im Jahr 2013 an. In absoluten Zahlen bedeutet dies eine Steigerung von 18.900 GWh im Jahr 1990 auf 152.560 GWh im Jahr 2013. Der aktuelle Rekord der regenerativen Energieeinspeisung wurde am 11. Mai 2014 aufgestellt. An diesem Tag kam es zu einer Leistung von 43,54GW, womit 74% des Gesamtbedarfs gedeckt wurden.

In Zukunft soll sich dieser Anteil noch weiter erhöhen. Bis zum Jahr 2025 soll er zwischen 40% und 45% liegen und bis 2035 Werte von 60% erreichen.<sup>8</sup>

Nichtsdestotrotz ist das EEG auch umstritten, weil es einen sehr starken Eingriff in den Markt darstellt, der zu Wettbewerbsverzerrungen führte. Kritisiert wird insbesondere, dass das EEG eine Wirtschaftsförderung der chinesischen Photovoltaik-Industrie auf Kosten deutscher Stromverbraucher sei, da heute ein Großteil der in Deutschland installierten Photovoltaikmodule aus chinesischer Produktion stammt.

## 1.2 Die Beweggründe für den Einsatz eines Smart Grids

Um die Energiewende zu schaffen, ist allerdings mehr notwendig, als die Leistung fossiler Kraftwerke nach und nach durch Erneuerbare zu ersetzen. Mit dem zunehmenden Anteil von Windkraft-, Wasserkraft-, Biogas-, und Solaranlagen werden zwei Probleme in der Umsetzung deutlicher, ohne deren Lösung die Energiewende nicht gelingen kann. Zum einen ist dies die volatile Energieerzeugung von alternativen Energiequellen und zum anderen die Entstehung von Netzüberlastungen durch die dezentrale Einspeisung und das Auftreten von bidirektionalen Versorgungssituationen in ländlichen Gebieten. In beiden Fällen müssen neue „smarte“ Komponenten

<sup>5</sup> [https://www.clearingstelle-eeg.de/files/private/active/0/eeg04\\_061107.pdf](https://www.clearingstelle-eeg.de/files/private/active/0/eeg04_061107.pdf)

<sup>6</sup> [https://www.clearingstelle-eeg.de/files/EEG\\_2009\\_juris\\_Stand\\_110721.pdf](https://www.clearingstelle-eeg.de/files/EEG_2009_juris_Stand_110721.pdf)

<sup>7</sup> <http://www.iea.org/media/executivesummaries/GermanyExecSumDEUTSCH.pdf>

<sup>8</sup> [http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Energieversorgung/ErneuerbareEnergie-n-Zeitalter/\\_node.html](http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Energieversorgung/ErneuerbareEnergie-n-Zeitalter/_node.html)

in das Netz integriert werden, wie Speichermedien und intelligente Ortsnetzstationen. Sie können allerdings nur auf der Basis von Informationen über Netzzustände sinnvoll arbeiten, die heute in dem Umfang noch nicht vorhanden sind. Die Einfügung neuer Komponenten, die Aufnahme, Weiterleitung und Auswertung von Daten, sowie das durch Computer automatisierte Treffen und Ausführen von Entscheidungen, sind die grundlegenden Eigenschaften eines Smart Grids.

Die Herausforderungen an die Netzbetreiber bei steigendem Anteil erneuerbarer Energien soll in den folgenden Unterabschnitten erläutert werden.

### 1.2.1 Die unsichere Energieerzeugung von Erneuerbare Energiequellen

Im Laufe eines jeden Tages wird zu verschiedenen Zeiten eine bestimmte Menge an elektrischer Energie benötigt. In der Nacht, wenn die meisten Menschen schlafen, wird weniger Energie gebraucht als am Abend, wenn das Licht brennt und Fernseher laufen. Im Sommer ist der Energieverbrauch geringer als im Winter, da es später dunkel wird und Lampen kürzer eingeschaltet werden. Auch von Wochentag zu Wochentag ändert sich der Energiebedarf, da die Bevölkerung am Samstag später aufsteht und abends länger wach ist als am Werktag. Allgemein kann festgehalten werden, dass nachts und nachmittags verbrauchsarme und zum Mittag und am Abend laststarke Zeiten vorherrschen (Vgl. Abb. 1). Da das Netz keine Energie speichern kann, müssen die Kraftwerksbetreiber zu jedem Zeitpunkt genau so viel Energie erzeugen, wie gerade verbraucht wird. Im Laufe der Jahre haben die Energieerzeuger sehr genaue Lastprofile für jeden Tag in einzelnen Versorgungsregionen erstellt und aktualisieren diese jährlich. Auf dieser Basis können sie die benötigte Energie unter der Berücksichtigung des Wetters für einen Tageszeitpunkt sehr gut voraussagen. Anhand der Voraussage und unter Berücksichtigung des Strommarktes erstellen die Netzbetreiber eines Tagesfahrplan für die Kraftwerke, der vorschreibt zu welchem Zeitpunkt welche Kraftwerke eine bestimmte Leistung einspeisen und hierzu rechtzeitig hoch- oder heruntergefahren werden. Dadurch sparen sie auf der einen Seite Ressourcen, schonen ihre Kraftwerke und arbeiten letztlich am wirtschaftlichsten und garantieren andererseits eine grundlegende Versorgungssicherheit.

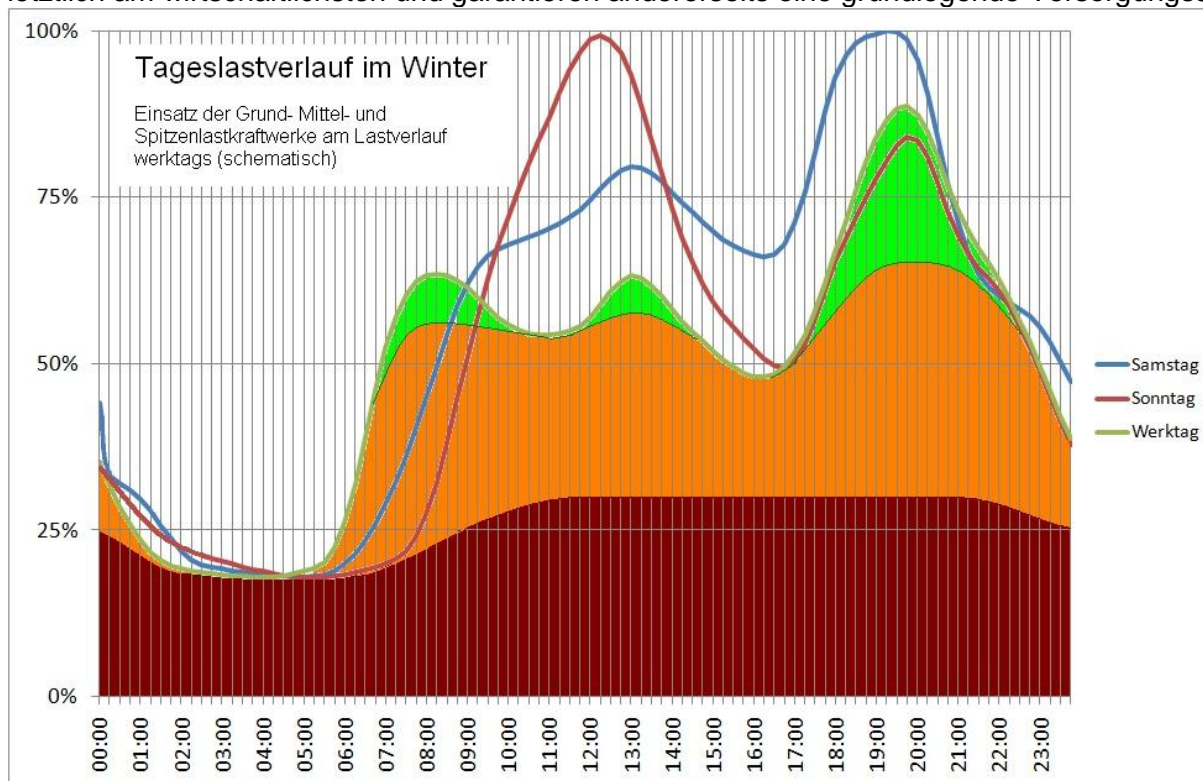


Abbildung 1: Relatives Lastprofil für einen Werktag, Samstag und Sonntag<sup>9</sup>

Nichtsdestotrotz schwanken die Echtzeitwerte durch Wetterbedingungen, bauliche Veränderungen, Ansiedlung von Unternehmen, Ab- und Zuwanderung von Bewohnern, technischen Neuerungen und vieles Weiteres um die vorausgesagten Werte. Insofern herrscht im Stromnetz immer im geringen Maße eine Über- oder Unterversorgung.

<sup>9</sup>[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lastprofil\\_VDEW\\_Winter\\_mit\\_Kraftwerkseinsatz\\_schematisch.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lastprofil_VDEW_Winter_mit_Kraftwerkseinsatz_schematisch.jpg)



Um den aktuellen Zustand festzustellen, überwachen die Netzbetreiber die Spannung und die Frequenz in verschiedenen Netzabschnitten. Im Falle einer Überversorgung ist beispielsweise die Niederspannung höher als 230V und die Frequenz größer als 50Hz. Bei einer Unterversorgung liegen die Werte entsprechend darunter. Die Ursache hierfür liegt in der konstanten Energieabgabe beziehungsweise konstanten Leistungsabgabe der Kraftwerke. Ein einfaches Stromnetz wäre beispielsweise eine konstante Leistungsquelle (Kraftwerk), an die zwei Glühlampen (zwei Wohnungen) parallel hinzugeschaltet werden. Durch die parallele Schaltung können die Verbraucher unabhängig voneinander aus der Leistungsquelle Strom abnehmen. Nehmen wir den Fall an, dass beide Glühlampen leuchten und die Leistungsquelle die dafür vorgesehene Leistung abgibt.

$$P_{\text{Leistungsquelle}} = I_{\text{ges}} \cdot U_{\text{ges}} = (I_{\text{Glühlampe 1}} + I_{\text{Glühlampe 2}}) \cdot U_{\text{ges}}$$

Im Realfall beträgt die gesamte Spannung 230V. Wird nun eine Glühlampe abgeschaltet muss die gesamte Leistung der Leistungsquelle in der zweiten Glühlampe verbraucht werden. Dazu erhöht sich die Spannung an der Glühlampe soweit, bis ihr Produkt mit der sich ebenfalls erhöhenden Stromstärke der Leistungsabgabe entspricht. Um die Spannung wieder auf 230V zu verringern, muss die Leistung heruntergefahren werden. Im Fall einer Unterversorgung erfolgt auf analoge Art und Weise mit dem Hinzuschalten eines Verbrauchers eine Verringerung der Spannung.

Gesetzlich ist eine Spannungsschwankung von 10% um die Nennspannung erlaubt. Um schnellstmöglich weitere Energie in das Netz einzuspeisen oder Energie aus dem Netz zu entnehmen, betreiben die Netzbetreiber Handel am Strommarkt und unterhalten sogenannte Schattenkraftwerke. Schattenkraftwerke laufen oftmals ungenutzt nebenbei, können ihre Leistung innerhalb weniger als einer Stunde schnell ändern oder schnell vom Netz getrennt beziehungsweise hinzu geschaltet werden.

Im Zuge der Energiewende bedeutet der zunehmende Anteil an Erneuerbaren Energiequellen, dass neben der Ungewissheit über den zukünftigen Verbrauch auch eine Ungewissheit über die zukünftige Energieeinspeisung hinzukommt. Schließlich erzeugen Wind- und Solarkraftanlagen nur dann Energie, wenn der Wind weht oder die Sonne scheint. Reale Einspeisedaten haben gezeigt, dass die Gesamtleistung beider Technologien zeitweise nahezu 0% betragen kann. Eine Auslastung von mehr als 50% der Gesamtleistung wird nur an 5% bis 10% der Tage im Jahr erreicht. Eine gute Prognostizierbarkeit der Leistung ist nur bedingt für zukunftsnahe Tage möglich. Beispielsweise kam es bei einem Übertragungsnetzbetreiber trotz der Verwendung von Werten aus drei Prognoseverfahren zu Abweichungen von 40% der Windkraftleistung am Folgetag. Solche Abweichung treten mehrmals im Jahr auf.<sup>10</sup>

Die Sonneneinstrahlung ist durch den beständigen Tag-Nacht-Rhythmus zuverlässiger als Windstärkeverhältnisse, die keinem Rhythmus gehorchen. Daher kann davon ausgegangen werden, dass PV-Anlagen jeden Tag Leistung produzieren, wohingegen Windkraftanlagen bei langanhaltenden schwachen Windverhältnissen keine Energie einspeisen werden. Trotzdem können durch Wolken und andere Beschattungen kurzfristige Leistungseinbrüche auftreten. Windkraftanlagen haben hingegen den Vorteil, dass sie auch nachts Leistung einspeisen können.

Da bis zum Jahr 2030 die Photovoltaik- und Windkraftleistung von 54 auf 120GW steigen soll, wird der Anteil der unkontrollierbaren Leistungserzeugung immer größer. Eine zuverlässige Deckung von Erzeugung und Verbrauch wird damit immer schwieriger und kann ab einem bestimmten Anteil der volatilen Erzeuger nicht mehr garantiert werden. In einem Netz völlig ohne fossile Kraftwerkskapazitäten könnte diese mit heutiger Technik nicht kompensiert werden.

### 1.2.2 Die Entstehung von Netzüberlastungen durch eine dezentrale und bidirektionale Netzversorgung

Mit dem Beginn der Stromversorgung am Ende des 19. Jahrhunderts entstanden einzelne Kraftwerke, die über kleine Stromnetze wenige Häuserblöcke versorgten. Aufgrund ihrer geringen Leistungsfähigkeit und den im Vergleich zu heute großen Verlusten entlang der Leitungen, wurden sie direkt zwischen oder innerhalb der Wohnhäuser installiert. Weiter vom Kraftwerk entfernte Anwohner konnten so zunächst nicht versorgt werden. Mit der Zeit wurden die Kraftwerke allerdings immer leistungsfähiger, die Stromnetze verlustärmer und die Verbraucher benötigten immer weniger Energie durch den steigenden Einsatz effizienterer Geräte. Das Resultat war ein größeres Angebot an elektrischer Energie und der weitere Ausbau der Stromnetze. Zusätzlich wurden nun weitere Kraftwerke in ein Stromnetz integriert und schlussendlich die Netze zu einem Gesamtnetz verbunden. Dadurch konnte neben der höheren Energiemenge auch eine größere Versorgungssicherheit

<sup>10</sup> Buchholz: 2014, Seite 59 und 110

garantiert werden. Falls eines der Kraftwerke durch einen Störfall keine Energie mehr einspeisen konnte, kompensierten die Netzbetreiber die fehlende Energie durch die anderen Kraftwerke. Die Art der Stromversorgung blieb dabei immer unidirektional, das heißt der Strom floss vom Kraftwerk über mehrere Spannungsebenen zum Verbraucher.

Dieser Art der Stromversorgung ändert sich mit dem Aufbau einer alternativen Energieversorgung. Zum einen entstehen die Kraftwerke nicht mehr zwangsläufig in der Nähe der Verbraucherzentren. Windkraftanlagen werden vorrangig im Norden, wo die stärksten Winde herrschen aufgebaut. In Deutschland liegen die größten Verbraucherzentren jedoch im Westen und im Süden. Die Folge ist, dass die elektrische Energie durch Leitungen transportiert wird, die für diese Energiemengen nicht ausgelegt sind. Hierdurch kann es zu einem stärkeren Verschleiß oder Zerstörung der Leitungen kommen (Siehe Abbildung 2).

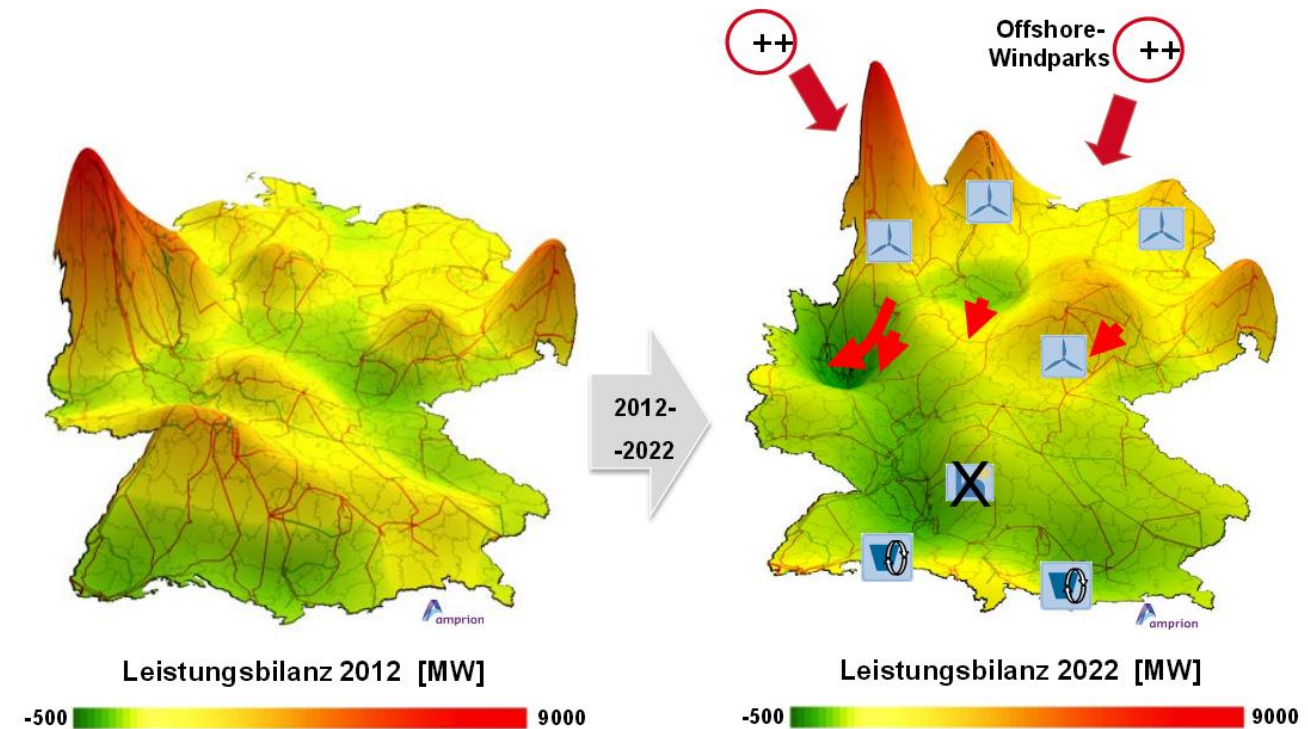


Abbildung 2: Verhältnis zwischen Erzeugung und Verbrauch 2012 und 2022 (rot Erzeugungsüberschuss; grün Verbrauchsüberschuss)<sup>11</sup>

Des Weiteren werden durch den vorrangigen Ausbau im privaten Bereich immer mehr Photovoltaik- und Windkraftanlagen an das Mittel- und Niederspannungsnetz angeschlossen. Der Strom fließt nicht mehr nur vom Großkraftwerk zum Verbraucher, sondern der Verbraucher wird nun selbst unter Umständen zum Erzeuger und versorgt seine Umgebung mit elektrischer Energie. Tritt dieser Umstand auf, kann es zu überhöhten Spannungen im Niederspannungsnetz kommen, wie folgendes Beispiel zeigt.

In einem herkömmlichen Strahlennetz liegen die Verbraucher entlang eines Leitungsstrangs (Abb. 2a). Am Beginn des Leitungsstrangs befindet sich ein Transformator, der die Spannung aus der Mittelspannungsebene auf das Niveau der Niederspannungsebene senkt. Im herkömmlichen Stromnetz nimmt die Spannung an den Haushalten immer weiter ab, je größer der Abstand zum Transformator ist. Ursache hierfür ist der Widerstand des Stromkabels. Je länger das Kabel ist, desto größer ist der Widerstand und desto größer ist der Spannungsabfall bei konstanter Stromstärke. Durch ein geeignetes Windungsverhältnis am Transformator wird die Spannung so voreingestellt, dass sie an allen Haushalten innerhalb des erlaubten Spannungsbereichs ( $230V \pm 23V$ ) liegt (Abb. 3b). Ohne diese Spannungsverstellung würden weit von der Netzstation entfernte Haushalte eine zu geringe Spannung erhalten (vgl. Abb. 3b).

<sup>11</sup>[http://www.uni-muenster.de/Jura.tkr/oer/wp-content/uploads/2012/07/Vortrag5\\_Kaendler-Netzentwicklungsplan20121.pdf](http://www.uni-muenster.de/Jura.tkr/oer/wp-content/uploads/2012/07/Vortrag5_Kaendler-Netzentwicklungsplan20121.pdf) Folie 6

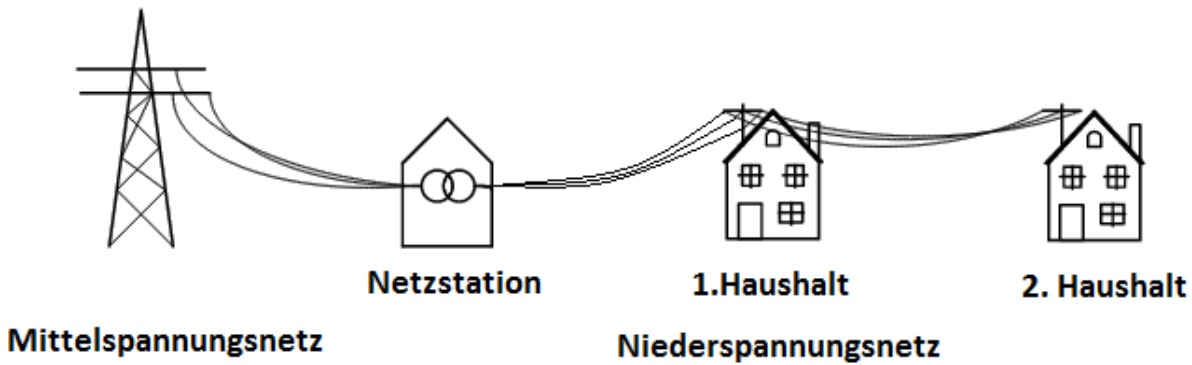


Abbildung 3a: Herkömmliches Strahlennetz<sup>12</sup>

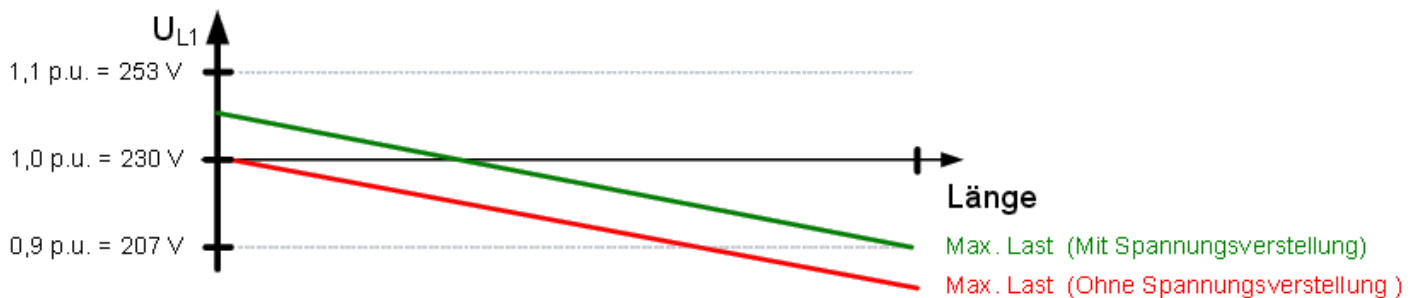


Abbildung 3b: Spannungsverlauf in einem herkömmlichen Strahlennetz<sup>13</sup>

Wird nun eine Photovoltaikanlage installiert, kann es bei großer Sonneneinstrahlung und geringem Verbrauch statt zu einer Verringerung der Spannung zu einer Zunahme kommen. Betrachten wir hierzu den Extremfall, dass sich die PV-Anlage am hintersten Haushalt des Stranges befindet und innerhalb des Strahlennetzes keine Energie verbraucht wird. (Abb. 4) In diesem Fall muss die gesamte Energie von der Photovoltaikanlage an die Mittelspannungsebene abgegeben werden. Am Transformator herrscht durch das konstante Windungsverhältnis eine Spannung die höher als 230V ist. Um dieses Spannungsniveau zu erreichen legt die Photovoltaikanlage eine höhere Spannung an, da es durch den Leitungswiderstand zu Spannungsabfällen kommt (Abb. 5). Je größer die Leistung der Solaranlage ist, je weniger Photovoltaikenergie auf dem Weg zum Transformator durch die Haushalte verbraucht wird und je länger das Kabel ist, desto größer ist dieser Spannungsunterschied.

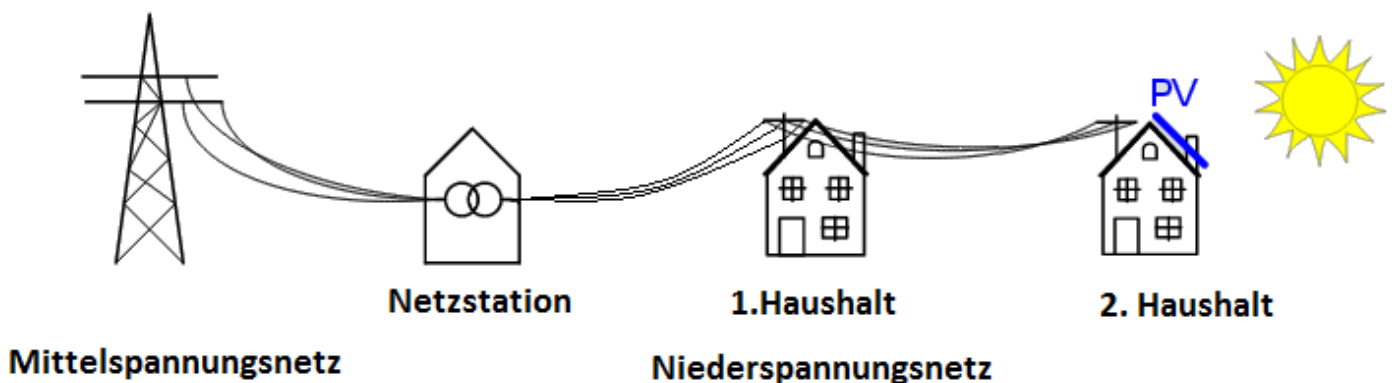


Abbildung 4: Strahlennetz an deren Ende sich eine Photovoltaikanlage befindet<sup>14</sup>

<sup>12</sup> [http://www.pvlegal.eu/fileadmin/PVL\\_docs/upload/2\\_Engel\\_SMA\\_22.09.10.pdf](http://www.pvlegal.eu/fileadmin/PVL_docs/upload/2_Engel_SMA_22.09.10.pdf), Folie 9

<sup>13</sup> [http://www.pvlegal.eu/fileadmin/PVL\\_docs/upload/2\\_Engel\\_SMA\\_22.09.10.pdf](http://www.pvlegal.eu/fileadmin/PVL_docs/upload/2_Engel_SMA_22.09.10.pdf), Folie 9

<sup>14</sup> [http://www.pvlegal.eu/fileadmin/PVL\\_docs/upload/2\\_Engel\\_SMA\\_22.09.10.pdf](http://www.pvlegal.eu/fileadmin/PVL_docs/upload/2_Engel_SMA_22.09.10.pdf), Folie 10

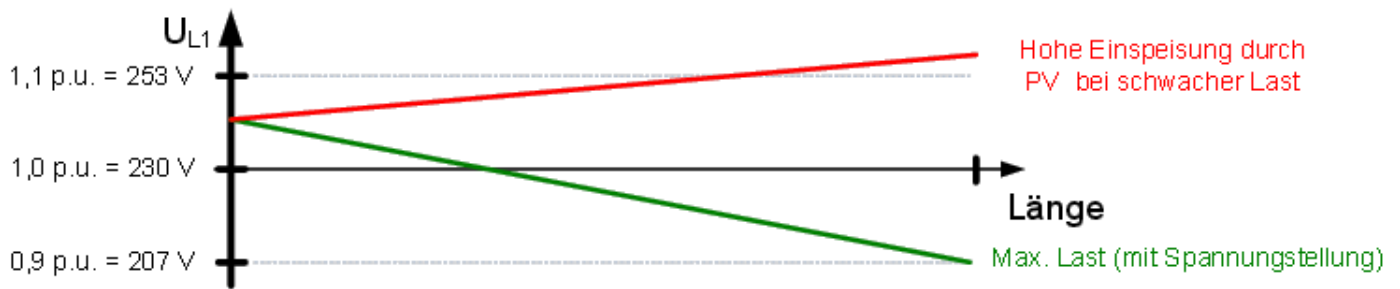


Abbildung 5: Spannungsverlauf in einem Strahlennetz an deren Ende sich eine PV-Anlage befindet <sup>15</sup>

Die Folge sind zu hohe Ströme in den Leitungen, Überspannungen an den Haushalten und Belastungen für das Leitermaterial und Transformatoren. Besonders traten die Probleme in ländlichen Regionen auf, wo leistungsstarke PV-Anlagen gebaut werden und große Abstände zu den Transformatoren vorherrschen können. In städtischen Gebieten taucht dieses Problem nicht auf.

Neben Überspannungen und Überlastungen in einem Niederspannungsstrang, kann es auch zu Überlastungen im Mittelspannungsnetz kommen, wie folgendes Beispiel eines offenen Mittelspannungsstranges zeigt. In einem offenen Mittelspannungsleitungsstrang befindet sich an jedem Ende jeweils ein Umspannwerk. Sie sind die Verbindung zum Hochspannungsnetz. Entlang des Strangs befinden sich Transformatorstationen zum Niederspannungsnetz. In dem Beispiel wird angenommen, dass die Höchststromstärkegrenzwerte für beiden Umspannwerke 630A betragen. <sup>16</sup>

Die extremsten Fälle für die Belastung sind eine starke Einspeisung aus dem Hochspannungsnetz aufgrund von hoher Last und geringer Erzeugung im Niederspannungsnetz und eine geringe Last und hohe Erzeugung im Niederspannungsnetz. Der erste Fall entspricht dem einzigen Extremfall eines herkömmlichen Stromnetzes mit unidirektionalen Flüssen. Zur Einhaltung der Stromstärkegrenze von 630A an beiden Umspannwerken ist eine Netzstation mit einer Trennstelle ausgestattet. <sup>17</sup>

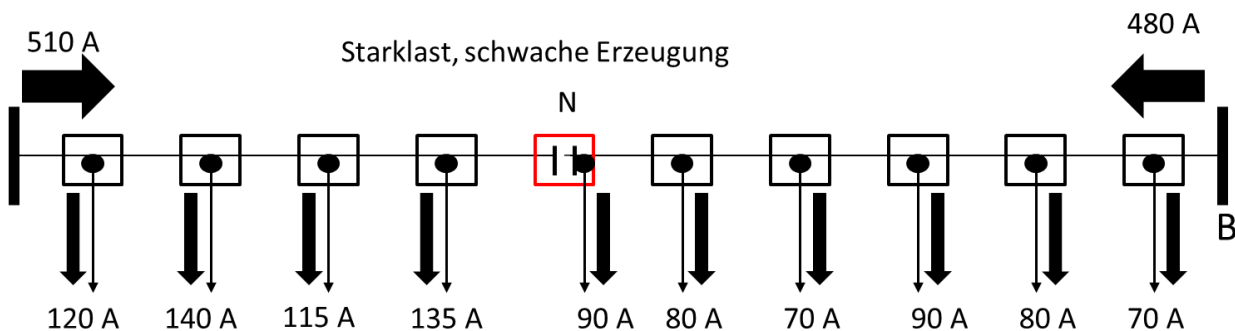


Abbildung 6: Stromstärkewerte in einem Mittelspannungsstrang mit Niederspannungsstationen und Umspannwerken bei starker Last und schwacher dezentraler Erzeugung <sup>18</sup>

Durch die Installation von dezentralen Erzeugern, verändert sich die Stromstärkebelastung innerhalb des Netzes. Verbleibt die Trennstelle an dieser Position, kommt es beim Eintreten des zweiten Extremfalls zu Überlastung im rechten Umspannwerk.

<sup>15</sup> [http://www.pvlegal.eu/fileadmin/PVL\\_docs/upload/2\\_Engel\\_SMA\\_22.09.10.pdf](http://www.pvlegal.eu/fileadmin/PVL_docs/upload/2_Engel_SMA_22.09.10.pdf), Folie 10

<sup>16</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 232

<sup>17</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 232

<sup>18</sup> Buchholz 2014, Seite 232

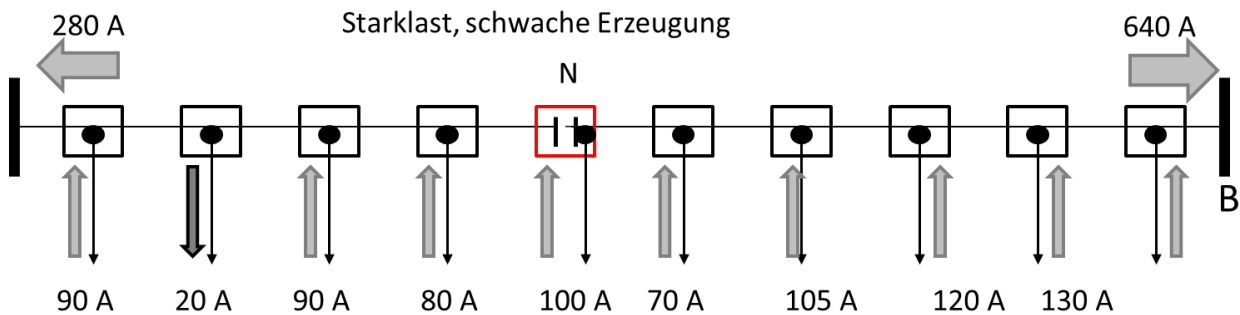


Abbildung 7: Überlastung von Umspannwerk B bei schwacher Last und starker Erzeugung im Niederspannungsnetz<sup>19</sup>

### 1.2.3 Die Lösungsansätze

Für diese beiden hauptsächlichen Probleme werden mehrere Lösungsansätze verfolgt und umgesetzt. Kurzfristig erfolgt ein Ausbau der Schattenkraftwerke. Sie werden dauerhaft in Bereitschaft gehalten, um Spannungsspitzen abzufangen. Dieser Weg steht jedoch im Gegensatz zu den Zielen der Energiewende, da dies meist Gas- oder Kohlekraftwerke sind, die den Emissionsausstoß erhöhen. Außerdem ist die Bereithaltung ein zusätzlicher Kostenfaktor, der regenerativen Strom indirekt verteuert.

Eine zweite Alternative ist der Handel mit elektrischer Energie auf dem Strommarkt. Im Fall einer Unterversorgung kann Energie aus Nachbarländern gekauft oder bei Überversorgung exportiert werden. Der Handel mit Strom wird immer eine Alternative für wirtschaftlicheres Arbeiten sein. Allerdings können dadurch nur verhältnismäßig geringe Energiemengen bereitgestellt werden. Sollte die Energieerzeugung überwiegend mit Erneuerbaren Energien erfolgen und eine schwache Energieerzeugung vorherrschen, werden die Energieimporte aus den angrenzenden Ländern keine vollständige Energieversorgung garantieren können.

#### 1.2.3.1 Das Leiterseilmonitoring zur Minimierung des Netzausbaus

Um die Netzbelastungen im Höchstspannungsnetz zu verringern und den Strom von den Erzeugungsin die Verbraucherzentren zu befördern, werden Maßnahmen zum Netzausbau ergriffen. Diese Maßnahmen sehen neben vielen kleinen Ausbaumöglichkeiten unter anderem vor, dass vier Höchstspannungsgleichstromleitungen und viele weiteren kleine Wechselspannungsleitungen vom Norden in den Süden führen.<sup>20</sup>

<sup>19</sup> Buchholz 2014, Seite 232

<sup>20</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 112

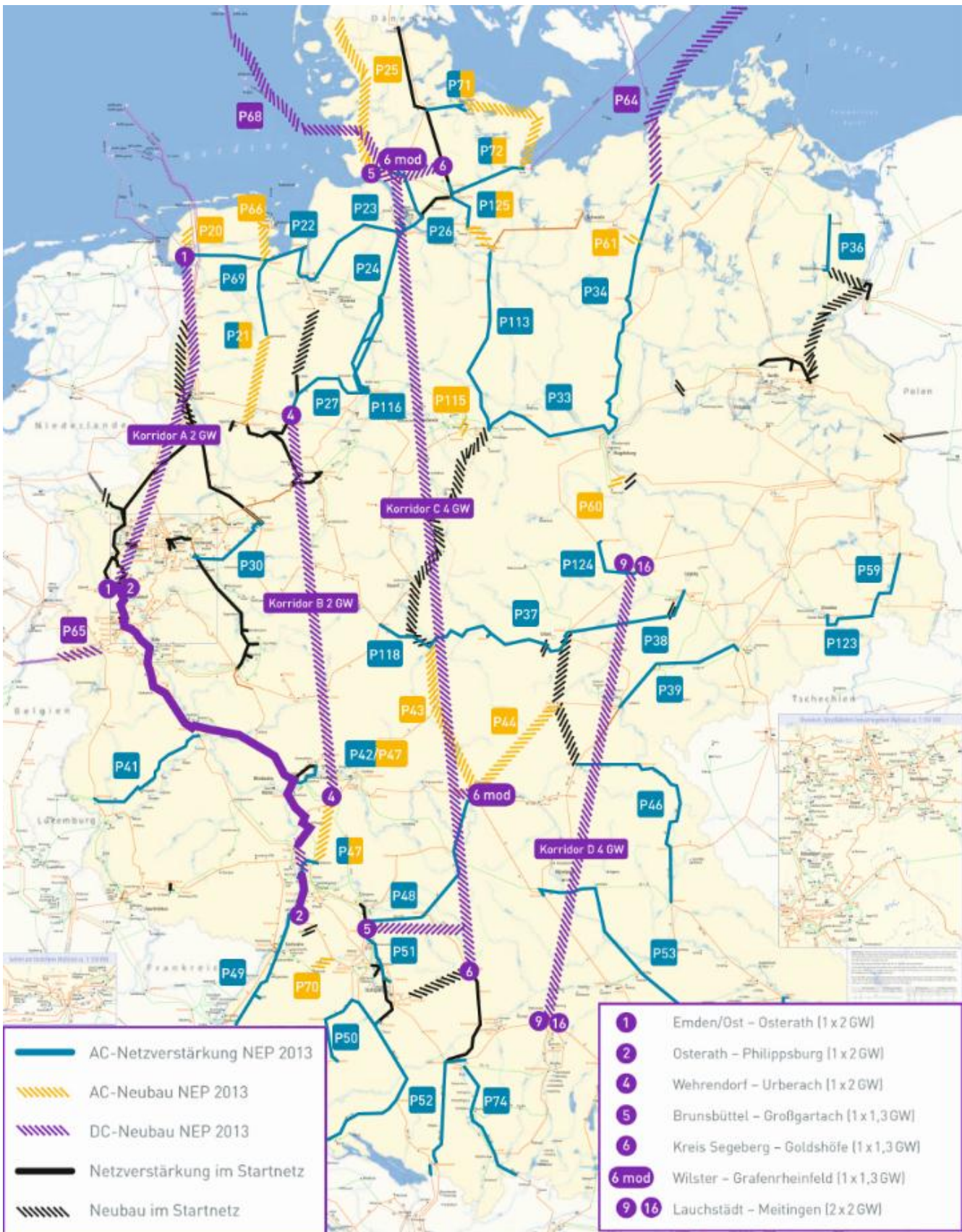


Abbildung 8: Geplante Wechsel- und Gleichstromtrassen<sup>21</sup>

Bei der Umsetzung des Netzausbaus kommt es jedoch zu einigen Schwierigkeiten. Zum einen gibt es regionalen Widerstand aus der Bevölkerung, die keine Stromtrassen in ihrer Nähe haben möchten. Diese politischen Diskussionen führen zu Verzögerungen in der Energiewende. Zum Zweiten sinkt die

<sup>21</sup> [http://www.netzentwicklungsplan.de/\\_NEP\\_file\\_transfer/NEP\\_2013\\_2\\_Entwurf\\_Teil\\_1\\_Kap\\_1\\_bis\\_9.pdf](http://www.netzentwicklungsplan.de/_NEP_file_transfer/NEP_2013_2_Entwurf_Teil_1_Kap_1_bis_9.pdf)

Auslastung der Leiterseile weiter. Heutzutage geht man davon aus, dass die Stromleitungen zu 40%-60% ausgelastet sind.<sup>22</sup> Durch den Ausbau und die damit verbundenen Instandhaltungskosten werden die Strompreise weiter steigen.

Zusätzlich bietet die Überwachung der bisherigen Leiterseile eine Möglichkeit die Auslastung bestehender Leitungen zu vergrößern und damit den Ausbau zu minimieren. Für Freileitungen wird die maximale Belastung durch das Material der Leitung, sowie deren Querschnitt und Länge bestimmt. Da der Widerstand temperaturabhängig ist, hängt die maximale Belastung außerdem vom Wetter ab. Für die Auslegung von Freileitungen wurden folgende Extremwetterbedingungen definiert: Lufttemperatur von 35°C, Windgeschwindigkeit von  $0,6 \frac{m}{s}$  in Längsrichtung und eine Sonneneinstrahlung von  $900 \frac{W}{m^2}$  vor. Aus diesen Werten wird bestimmt, welche Ströme maximal durch die Leitung fließen dürfen, ohne dass thermische Grenzwerte überschritten werden. Da diese Wetterbedingungen nur sehr selten im Jahr vorherrschen, die Leistungsgrenzwerte jedoch zu jeder Zeit eingehalten werden, ist die Auslastung oftmals geringer als sie unter den aktuellen Wetterbedingungen sein könnte. Durch eine permanente Überwachung der Wetterbedingungen am Leiterseil, könnte die Leitung daher besser ausgelastet werden.<sup>23</sup>

### 1.2.3.2 Intelligente Ortsnetzstationen

Um die Netze in Niederspannungsnetz zu entlasten, werden in Zukunft intelligente Transformatoren eingesetzt. Die herkömmlichen Transformatoren im Niederspannungsnetz besitzen ein festes Windungsverhältnis, das nur im spannungslosen Zustand verändert werden kann. Sie wurden so eingestellt, dass sowohl unter Stark- als auch unter Schwachlastnutzung die Spannungen an den Haushalten eingehalten werden. Durch den Einsatz von Photovoltaikanlagen werden diese Anforderungen neu definiert, sodass das Spannungsband sowohl im Schwachlastzustand bei maximaler PV-Erzeugung eingehalten werden muss als auch im Starklastzustand bei minimaler Erzeugung. Hierbei kann es vorkommen, dass die Transformatoren mit starrem Windungsverhältnis die Spannungsgrenzwerte nicht mehr erfüllen können.

Intelligente Ortsnetzstationen sind hingegen in der Lage ihr Windungsverhältnis auch im Spannungsbetrieb verändern zu können. So erzeugen sie eine geringe Spannung am Transformator, wenn die Last schwach und die Erzeugung stark ist und eine höhere Spannung im umgekehrten Fall.<sup>24</sup>

Neben dem ferngesteuerten Verändern des Windungsverhältnisses, können die Ortsnetzstationen ebenfalls über einen fernbedienbaren Schalter verfügen, der die Station mit einem angelegten Leiterstrang verbindet oder trennt. So können Ortsnetzstationen in einem Mittelspannungsleiterstrang die Topologie des Strangs durch eine Verlagerung der Trennstelle verändern

### 1.2.3.3 Das Lastmanagement

Eine weitere Möglichkeit, um die Netze in allen Spannungsbereichen zu entlasten und die Diskrepanz zwischen volatiler Energieerzeugung und –verbrauch zu verringern, bieten die zwei Konzepte Demand-Side-Management und Demand-Side-Response.

Das Demand-Side-Management beinhaltet das aktive Schalten von „fremden“ Lasten durch den zuständigen Netzbetreiber. Auf vertraglicher Grundlage sollen sie in die Lage versetzt werden, Lasten anderer Eigentümer je nach Erzeugung hinzu- oder abzuschalten, um so die transportierte Leistung selbstständig zu bestimmen. Ein großes Potential wird in der Wärmeregulierung von öffentlichen Einrichtungen, Verwaltungsgebäuden, Schwimmbäder, Restaurants, Einkaufszentren oder Lebensmittellagern gesehen. Die Wärmeregulierung hat den Vorteil, dass sich bei guter Isolierung die thermischen Zustände kaum verändern und die Komponenten über längere Zeit ungenutzt bleiben könnten. Insofern könnten Klimaanlage, Wärmepumpen, Nachtspeicheröfen und Kühlhäuser in lastschwachen Zeiten verstärkt betrieben werden um dann zu laststarken Zeiten über längere Zeiten ausgeschaltet zu bleiben.<sup>25</sup>

Das Demand-Side-Response-Konzept bedeutet, dass der Verbraucher selbst bestimmen kann, ob er sein Verhalten verändern möchte. Der Anreiz wird hierbei durch finanzielle Angebote geschaffen. Durch dieses Konzept sollen hauptsächlich private Haushalte angesprochen werden. In

<sup>22</sup> KIT Smart Grid

<sup>23</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 220

<sup>24</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 228ff

<sup>25</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 249ff

Industrielländern liegt der durchschnittliche Anteil der elektrischen Energie für Haushalte bei 25%. Im Gegensatz zu Industrie (40%-50%) sowie Handel, Gewerbe und öffentlichen Einrichtungen (20%-30%) ist dieser Zweig zwar nicht der verbrauchsstärkste, allerdings der mit den größten Fluktuationen. Zeitweise kann der häusliche Anteil bis zu 50% betragen. Haushalte bieten damit ein großes Potential, um die Last der Erzeugung anzupassen. Theoretisch wird davon ausgegangen, dass 2020 eine häusliche Last von 25GW in Deutschland flexibel verschoben werden kann. Zu der wichtigsten verschiebbaren Last gehören Kühlschränke, Waschmaschinen, Geschirrspüler, Boiler, Klimaanlage und Wärmepumpen. Praktisch werden vermutlich nur 10% dieses Wertes erreicht, da das Konzept einen deutlichen Einschnitt in den Komfort beinhaltet.<sup>26</sup>

#### **1.2.3.4 Der Ausbau von Speichermedien**

Die wichtigsten physischen Komponenten zur Problemlösung sind Speichermedien. Zur Entlastung von Leitungen und zur Bereitstellung von Energiemengen zu beliebigen Zeiten wird an der Entwicklung und dem Ausbau von Speichermöglichkeiten stark geforscht. Die Speichermedien sollen zur Netzstabilisierung überschüssig produzierte Energie aufnehmen und bei Bedarf wieder abgeben. Dabei müssen die Speicher unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Zur Speicherung elektrischer Energie aus Photovoltaikanlagen werden oftmals Speicher genutzt, die verhältnismäßig geringe Mengen an Energie speichern müssen. Die Ursache hierfür liegt in der täglich zuverlässig entstehenden glockenkurven-ähnlichen Leistungskurve der PV-Anlage. Im Vergleich mit dem durchschnittlichen Lastverhalten erkennt man, dass PV-Anlagen vormittags Energieüberschuss produzieren und nachmittags zu wenig Leistung erbringen. Ein geeigneter Speicher muss dementsprechend die Energie nur kurzzeitig speichern.

Für die Speicherung von elektrischer Energie aus Windkraftanlagen benötigt man hingegen Energiespeicher mit größeren Kapazitäten. Da die Windstärke keinem offensichtlichen Rhythmus unterliegt, kann es vorkommen, dass die leistungsstarken Offshore-Windparks über mehrere Tage viel Energie produzieren. Diese Energie muss dann durch hochkapazitive Speicher aufgenommen werden.

Je nach Anforderungsbereich werden die verschiedenen Speichertechnologien nach ihrer Speicherkapazität, Möglichkeit der Positionierung (zentral oder dezentral) und Leistung charakterisiert. Im Fokus der Forschung und Entwicklung stehen heutzutage Pumpspeicher, Batterien, Druckluftspeicher, Power-to-Heat und Power-to-Gas-Technologien. Im Fall der Batterien wird in diesem Kapitel noch die Elektromobilität ergänzt, die in Zukunft eine nicht zu ignorierende Speichermöglichkeit darstellt.

---

<sup>26</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 265



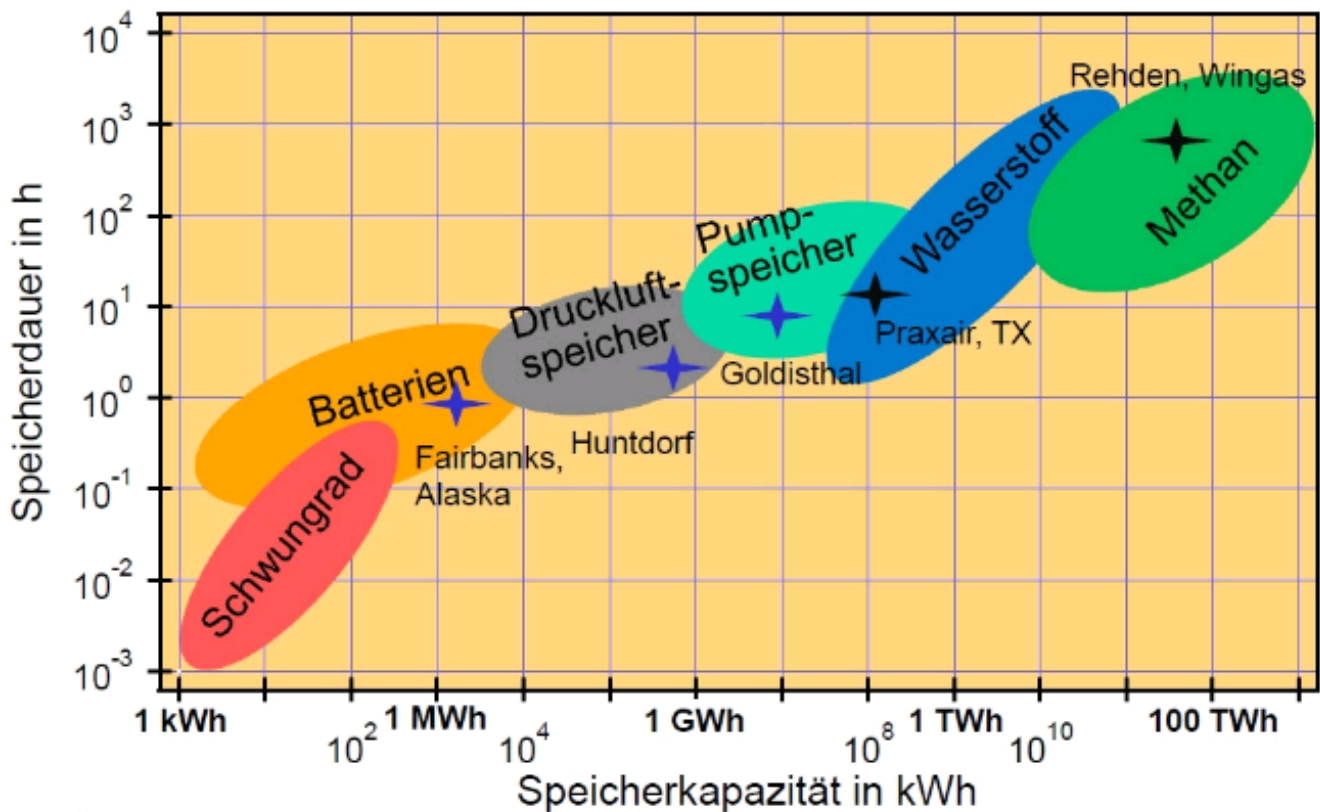


Abbildung 9: Speicherkapazität und Speicherdauer verschiedene Speichermedien<sup>27</sup>

**Pumpspeicherkraftwerke** gehören zu den am besten etablierten Großspeichermedien. Gegenüber den anderen Speichermedien besitzen sie den Vorteil, dass ihre Funktionalität im Stromnetz bereits nachgewiesen ist. Sie haben in der Vergangenheit gezeigt, dass sie wirtschaftlich arbeiten können, indem sie bei günstigen Strompreisen Wasser in den Speichersee pumpen und bei hohen Preisen Energie einspeisen. Sie sind in der Lage, schnell auf Veränderungen zu reagieren, können große Mengen an Energie aufnehmen und hohe Leistungen über längere Zeit abgeben. Gleichzeitig liegt ihre Lebensdauer bei mehreren Jahrzehnten.<sup>28</sup> 99% der aktuell weltweit installierten elektrischen Speicher sind Pumpspeicherwerke. Dies entspricht 140GW. Bis 2020 soll diese Zahl auf 214GW ansteigen. Neben den vielen Vorteilen dieser Technologie ist ihr größter Nachteil, dass die Errichtung an geografische Gegebenheiten gekoppelt ist. Die Möglichkeiten des Ausbaus sind damit begrenzt.<sup>29</sup>

**Druckluftspeicherkraftwerke (DSK)** haben bisher keine breite kommerzielle Anwendung. Bisher existieren hauptsächlich Versuchsanlagen. Bei der Energieaufnahme drückt ein Kompressor ein Gasgemisch in eine Kaverne. Zur Energieabgabe wird das Gas wieder entspannt, wobei es an einem Generator vorbeiströmt, der elektrische Energie in das Netz einspeist. Um die Luft kostengünstig zu speichern, wird die Luft in den bisherigen Testanlagen in unterirdischen Kavernen gespeichert. Diese können beispielsweise stillgelegte Salzsteinlagerstätten sein. Diese haben den Vorteil, dass sie ein großes Volumen besitzen, so dass nur eine geringe Druckdifferenz zur Speicherung einer großen Energiemenge gebraucht wird.<sup>30</sup>

Die Kraftwerke haben zwei grundlegende Probleme bei der Nutzung der Druckluft. Zum einen nimmt der Druck innerhalb der Kaverne beim Entspannen immer weiter ab, je weniger Luft sich im Speicher befindet. Hieraus resultiert eine stetig sinkende Leistung der Turbine. Dieses Problem kann gelöst werden, indem die Kaverne mit einem oberirdischen Wasserreservoir verbunden wird. Wird die Kaverne mit Luft gefüllt, drückt sie das Wasser in das Reservoir. Entspannt sich die Luft wieder, so fließt das Wasser wieder in die Kaverne und hält den Druck annähernd konstant.<sup>31</sup>

<sup>27</sup> [http://www.e-energy.de/documents/BDEW-Roadmap\\_Smart\\_Grids.pdf](http://www.e-energy.de/documents/BDEW-Roadmap_Smart_Grids.pdf)

<sup>28</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 41

<sup>29</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 43

<sup>30</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 43

<sup>31</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 44

Das zweite Problem liegt in der Wärmeabgabe der Luft beim Verdichten und der Wärmeaufnahme beim Entspannen. Während des Entspannens können die Turbinen durch das Abkühlen der Luft vereisen und funktionsuntüchtig werden. Für dieses Problem werden bisher 2 Lösungsmöglichkeiten untersucht. 2016 soll in Staßfurt (Sachsen-Anhalt) das erste adiabatische Demonstrationskraftwerk entstehen. Es ist zusätzlich mit einem Hochtemperaturspeicher ausgerüstet, das die beim komprimieren entstehende Wärme in Form von bis zu 600°C heißer Luft speichert. Entspannt sich das Gas wieder, gibt der Speicher die Wärme an die expandierende Luft wieder ab. Das Kraftwerk soll Leistungen von 90MW erreichen und 360MWh Energie speichern können. Eine zweite Lösung wurde 1978 in dem ersten Druckluftspeicherkraftwerk in Huntorf (Niedersachsen) eingesetzt. Dieses Kraftwerk ist eine Kombination aus DSK und Gaskraftwerk. Bei der Verdichtung wird der Luft zusätzlich brennbares Gas beigemischt. Wird die Kaverne entleert, wird das Gasgemisch in Brand gesetzt. Die Turbine wird dann durch die Verbrennung und das entspannende Gas angetrieben.<sup>32</sup>

**Batterien** wandeln zur Speicherung elektrische Energie in chemische Energie um und betreiben den umgekehrten Prozess zur Energieabgabe. Heutzutage gibt es eine Vielzahl von Akkumulatoren, wobei die wichtigsten für Stromnetzanwendungen Blei-, Nickel-Cadmium-, Lithium-Ionen-, Natrium-Schwefel-, Natrium-Nickelchlorid (ZEBRA), Redox-Flow- und Zink-Brom-Akkus sind. Die wesentlichsten Eigenschaften für ihre Wirtschaftlichkeit sind die Energiedichte, der Wirkungsgrad, die Lebenszeit, die maximale Anzahl der Ladezyklen, die Selbstentladung und wie weit sie entladen werden dürfen, ohne Schaden zu nehmen (Entladungstiefe).<sup>33</sup>

Die bisher meist genutzten Batterien im Stromnetz waren Blei-Akkus. Sie haben den Vorteil, große Ströme abgeben zu können, d.h. sie besitzen eine hohe Leistungsdichte im Verhältnis zur Masse. Ihre Nachteile sind jedoch eine hohe Umweltbelastung und die geringe Lebensdauer und Zyklenzahl.<sup>34</sup>

Für die Zukunft scheinen Natrium-Schwefel-, Redox-Flow- und Li-Ionen von den genannten Technologien am geeignetsten zu sein. Natrium-Schwefel-Batterien haben einen Wirkungsgrad von 89-92% und hohe Lebensdauern. Dabei erreichen sie Temperaturen von 300-350°C. Die ersten Anwendungen sind bereits in den USA und Japan in Benutzung. Sie erreichen Leistungen von bis zu 165MW und werden für Windparks genutzt oder sollen im Störfall die Energieversorgung kurzzeitig übernehmen. Redox-Flow-Batterien haben die Besonderheit, dass sich der Elektrolyt in einem separaten Behälter und nicht zwischen den Elektroden befindet. Hierdurch kann die Batterie schnell aufgeladen werden, indem die Behälter ausgetauscht werden. Sie kann vollständig entladen werden, ohne Schaden zu nehmen und Speicherkapazität und Leistung sind im Gegensatz zu allen anderen Batterien vollständig entkoppelt. Li-Ion-Batterien sind die am weitesten verbreiteten Batterien. Sie werden in einer Vielzahl von elektrischen Geräten verwendet. Allerdings besitzen sie auch ein hohes Gefahrenpotential, da ihr Elektrolyt leicht brennbar ist und unter Druck steht.<sup>35</sup>

Bisher haben sie als stationäre Verwendung im Vergleich zu anderen Speichermöglichkeiten Nachteile in der Wirtschaftlichkeit. Jedoch werden hier in Zukunft technische Weiterentwicklungen erwartet, die die Wirtschaftlichkeit verbessern.<sup>36</sup>

Beim **Power-to-Gas**-Speicherprinzip werden Wasserstoff und Sauerstoff unter Zufuhr von elektrischer Energie und Wasser hergestellt. Dieser Prozess wird Elektrolyse genannt. Der produzierte Wasserstoff kann dann in Tanks separat gespeichert und beispielsweise an Tankstellen an brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge weitergegeben werden oder in stationären Brennstoffzellen zur Wärme- oder Stromerzeugung genutzt werden.<sup>37</sup>

Eine weitere Möglichkeit ist die Weiterverwendung zur sogenannten Methanisierung. In diesem Prozess werden Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid zu Methan und Wasser umgewandelt. Das Methan kann dann in das Gasnetz eingespeist werden und so direkt zum Verbraucher gelangen. Hierdurch wird die Nutzung von fossilem und importiertem Erdgas verringert.<sup>38</sup>

Da die Energiebilanz durch Verluste bei der Kompression und der Methanisierung schlechter ausfällt ist als bei anderen Speichermedien, wird diese Technologie nur vereinzelt angewendet. Zwei Inselgebiete in Norwegen und Kanada nutzen die Speicherung von Wasserstoff im Rahmen eines

---

<sup>32</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 44

<sup>33</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 45

<sup>34</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 46

<sup>35</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 46f

<sup>36</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 48

<sup>37</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 49

<sup>38</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 49

Projekts. In Deutschland gibt es seit 2009 verschiedene Projekte mit einer Methanisierungsanlage in Stuttgart und im Hunsrück. In der Uckermark gibt es seit 2012 eine 500-kW-Elektrolyseanlage in Verbindung mit 2 Windkraftwerken.<sup>39</sup>

Die **Elektromobilität** bietet eine weitere Speichermöglichkeit für die Zukunft. Zwar besitzt ein einzelnes Fahrzeug eine geringe Speicherkapazität, jedoch strebt die Bundesregierung bis 2030 sechs Millionen Elektrofahrzeuge in Deutschland an. In privater Hand sind sie eine dezentrale Speichermöglichkeit für den eigenen Haushalt. Sie können als zusätzliche Last im Niederspannungsnetz fungieren und so bei hoher ortsnahe Erzeugung Leistung abnehmen und Spannungsbandüberschreitung und Überlastungen verhindern. Gleichzeitig können sie jedoch durch ihre große Anzahl Überlastungen hervorrufen, wenn sie zugeschaltet werden und bereits eine hohe Auslastung vorherrscht. Um dies zu verhindern, werden zurzeit Modelle zum sicheren Aufladen konzipiert und erprobt. Hier bildet sich heraus, dass sich die Nutzer von Ladestationen in drei Gruppen aufteilen: Eine Gruppe, die das Auto schnell aufgeladen haben möchte, eine zweite Gruppe, bei der das Auto zu einem bestimmten Zeitpunkt aufgeladen sein soll und eine dritte Gruppe, bei der das Fahrzeug aufgeladen ist und deren Energie zurückgespeist werden kann, wenn es zu einem bestimmten Zeitpunkt geladen ist.<sup>40</sup>

### 1.3 Die Zusammensetzung einzelner Lösungsansätze zu einem Smart Grid

Um die aufgeführten Lösungsansätze erfolgreich in das Stromnetz einzufügen oder umzusetzen, müssen eine Vielzahl von Abläufen durchgeführt werden, die das aktuelle Netz nicht ausführen kann. Die einzelnen Elemente liegen dabei in unterschiedlichen Teilbereichen des Smart Grids, wie dem virtuellen Kraftwerk, der Einbindung privater Haushalte über Smart Metering, dem intelligenten Engpassmanagement und Automatisierung in der Niederspannungsebene.

#### 1.3.1 Die Anpassung von Last und Erzeugung durch den Aufbau virtueller Kraftwerke

Ein virtuelles Kraftwerk ist der regionale Zusammenschluss von zuverlässigen und volatilen Kraftwerken, Speichermedien und regelbaren Lasten im Rahmen des Demand-Side-Managements. Die grundsätzliche Aufgabe der Betreiber eines virtuellen Kraftwerks ist, mit Hilfe einer Leitstelle für eine gesicherte Versorgung innerhalb des zuständigen Bereichs zu sorgen und gleichzeitig wirtschaftlich zu arbeiten.

Hierzu nutzen die Betreiber zuverlässige Prognosen über die Leistung der regenerativen Energiequellen und den Lastgang, sowie über den Markt. Des Weiteren erfassen sie Aufnahmemöglichkeiten der Speicher und das Potential, weitere Lasten zu steuern. Anhand dieser Daten erstellen die Betreiber des virtuellen Kraftwerks Arbeitspläne für die Leistungsflüsse für den kommenden Tag.

In der Umsetzung dieser Pläne werden die Leistungsflüsse dann wie bei der Steuerung mit konventionellen Kraftwerken über Umspannwerke gesteuert. Aufgrund der Abweichungen von Echtzeitdaten über die aktuelle Erzeugung, Last und Marktgegebenheiten gegenüber der Prognose kann es kurzfristig zu Änderungen kommen. Diese sind dann darauf ausgerichtet, eine zuverlässigere Versorgung herzustellen oder eine wirtschaftlichere Arbeitsweise zu ermöglichen.

Das besondere an virtuellen Kraftwerken ist, dass die einzelnen Komponenten nicht zwangsläufig einem einzigen, sondern auch mehreren Besitzern gehören können. Private Betreiber schließen sich jedoch dem virtuellen Kraftwerk an, da es einen besseren Zugang zu wichtigen Wetter-, Preismarkt- und Zustandsdaten hat und über Optimierungswerkzeuge verfügt, um einen größeren Gewinn zu erwirtschaften.<sup>41</sup>

---

<sup>39</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 50

<sup>40</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 270ff

<sup>41</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 247ff

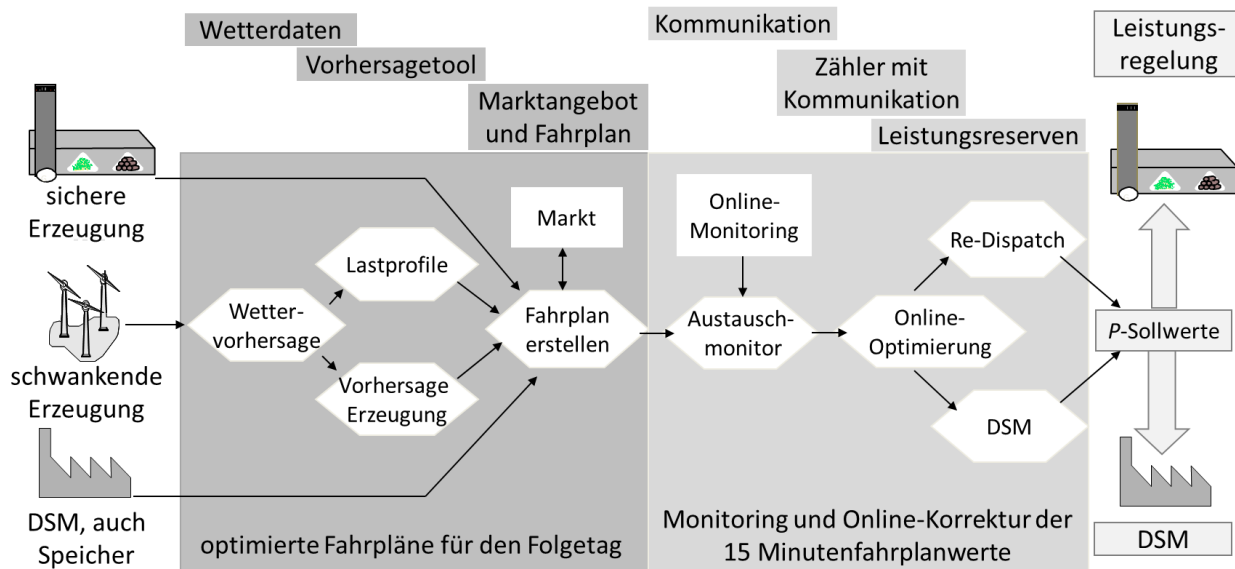


Abbildung 10: Schematischer Aufbau und Funktionsweise eines virtuellen Kraftwerks<sup>42</sup>

### 1.3.2 Die Anpassung von Last und Erzeugung durch die Einbindung privater Haushalte

Um das Demand-Side-Response-Konzept umzusetzen, werden in den nächsten Jahren in den Haushalten intelligente Stromzähler, sogenannte Smart Meter, installiert. Sie sind im Gegensatz zu den üblichen Ferraris-Zählern in der Lage, den Verbrauch in kurzen Zeitintervallen (15min) zu speichern. Diese Daten können für den Haushalt visualisiert werden und der Kunde kann so sein Verbrauchsverhalten ändern. Gleichzeitig können die Smart Meter als Kommunikationsmittel zwischen privaten Haushalten und Energielieferanten dienen. So können die Energielieferanten durch die Smart Meter den aktuellen Verbrauch registrieren und bekommen aktuelle Daten zum Lastverhalten. Andererseits können die Energieerzeuger mithilfe der Daten Einfluss auf das Lastverhalten der privaten Haushalte nehmen, indem sie ihnen dynamische Strompreise anbieten. Diese Tarife können die Bewohner dann ihrerseits ablesen und selbstständig entscheiden, ob sie ihr Lastverhalten ändern. In 10-20 Jahren sollen in vielen Häusern Smart Meter installiert sein. In Kombination mit einem hausinternen Energiemanagementsystem, können bestimmte Geräte so programmiert werden, dass sie nur bei bestimmten Strompreisen aktiv werden. So wird eine Waschmaschine beispielsweise nur dann laufen, wenn der Preis über längere Zeit günstig ist oder ein Kühlschrank „vorkühlen“, wenn der Preis demnächst steigt.<sup>43</sup>

Für die Umsetzung eines Smart Grids sind die Smart Meter ein unverzichtbarer Bestandteil. Die Betreiber von virtuellen Kraftwerken bekommen die notwendigen Lastinformationen und können damit dynamische Tarife erstellen, um so das Verhalten der Kunden indirekt zu steuern. Die intelligenten Ortsnetzstationen erhalten durch sie die notwendigen Spannungswerte, um die Belastung von Stromleitungen gering zu halten.

### 1.3.3 Die Steuerung der Netzbelastung im Höchst- und Hochspannungsnetz durch intelligentes Engpassmanagement

Auf Übertragungsnetzebene besteht bereits seit mehreren Jahren ein intelligentes Netzwerk. Durch den Zusammenschluss der europäischen Stromnetze und den Einfluss der Last aus den unteren Netzebenen war die Integration von Fernüberwachung und Fernsteuerungselementen zur Steuerung der Netzbelastung unumgänglich. So wurden beispielsweise Überwachungsbereiche zwischen benachbarten Übertragungsnetzbetreibern eingerichtet, in denen die Betreiber sich gegenseitig alle Daten über die Transformatoren, Kraftwerke, Leitungen, Leistungsflüsse und Spannungswerte bereitstellen müssen. Auf diese Art konnten die Betreiber frühzeitig Störungen vorhersagen und Gegenmaßnahmen einleiten.

Die Einleitung von Gegenmaßnahmen erfolgt dabei mit Hilfe des intelligenten Engpassmanagements zu dem auch das Leiterseilmonitoring gehört. Neben dem Monitoring arbeitet das System noch auf

<sup>42</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 248

<sup>43</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 260ff

den folgenden drei Ebenen: adaptiver Schutz, Wide Area Monitoring and Protection System, stationäre und dynamische Sicherheitsrechnungen und Leiterseilmonitoring.

Die adaptiven Schutzeinrichtungen arbeiten im hundertstel Sekundenbereich. Diese Schutzeinrichtungen messen den aktuellen vorliegenden Netzzustand und leiten ihn an eine zentrale Stelle und an umliegende Schutzeinrichtungen weiter. Kommt es zu einer plötzlichen Überlastungen entscheiden sie selbstständig, welche Netzbereiche vom Netz getrennt werden sollen und welche nicht. So kommt es beispielsweise nicht zu großflächigen, sondern nur zu selektiven Black Outs.

Das Wide Area Monitoring and Protection System arbeitet ebenfalls automatisch im Sekundenbereich. Es entscheidet bei aufkommenden Störungen automatisch, welche Lasten oder Erzeuger plötzlich verändert werden müssen, um eine Netzstörung zu verhindern und setzt diese Maßnahmen um.

Die stationären und dynamischen Sicherheitsrechnungen werden laufend in den Leitstellen durchgeführt und geben Warnung ab, falls die n-1-Sicherheit nicht mehr erfüllt ist. Des Weiteren gibt das System Handlungsempfehlungen, die eine manuelle Steuerung vereinfachen. Die Zeitdauer von der Kenntnisnahme einer Störung bis zum Bereitstellen von Handmöglichkeiten beträgt maximal 15min.

Das Leiterseilmonitoring ist die vierte Ebene des intelligenten Engpassmanagements und wird manuell durchgeführt. Seine Arbeitszeiten liegen im Stundenbereich.

Letztendlich verringert das intelligente Engpassmanagement den Netzausbau und sorgt für eine bestmögliche Ausnutzung der bestehenden Leitungen.

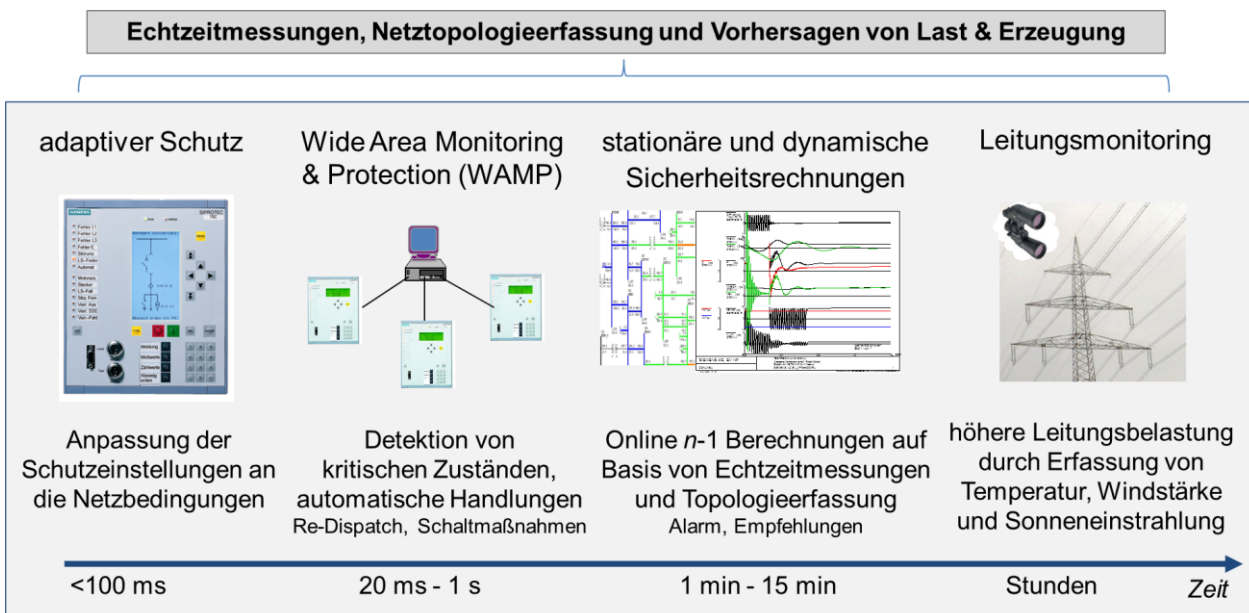


Abbildung 11: Schematischer Aufbau und Funktionsweise des intelligenten Engpassmanagements<sup>44</sup>

### 1.3.4 Die Steuerung der Spannung und der Netzbelastung im Mittel- und Niederspannungsnetz durch intelligente Ortsnetzstationen

Auf der Mittel- und Niederspannungsebene wird es zu einer Umstellung auf eine Fernüberwachung und -steuerung kommen. Hierbei werden die intelligenten Ortsnetzstationen die entscheidende Rolle spielen. Im Niederspannungsnetz werden sie den Netzzustand mit Spannungsmessgeräten am Transformator und an den Haushalten überwachen, da hier die höchsten und niedrigsten Spannungen auftreten. Anhand der erhaltenen Daten verändern sie ihr Windungsverhältnis und leiten die Daten an zuständige Umspannwerk und Leitstellen weiter. Dort werden dann gegebenenfalls entsprechende Veränderungen in der Leistungseinspeisung erfolgen, um die Spannungsgrenzwerte besser einzuhalten.<sup>45</sup> Die analoge Arbeitsweise wird im Mittelspannungsstrang angewandt, nur das hier Stromstärkemesswerte aufgenommen werden. Besteht die Gefahr einer Überlastung kann beispielsweise über die Trennstelle innerhalb der intelligenten Ortsnetztransformatoren die

<sup>44</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 193

<sup>45</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 230

Netztopologie geändert werden. In dem Beispiel mit offenem Mittelspannungsstrang würde die Trennstelle nach rechts verlagert werden, um die Grenzwerte einzuhalten.<sup>46</sup>

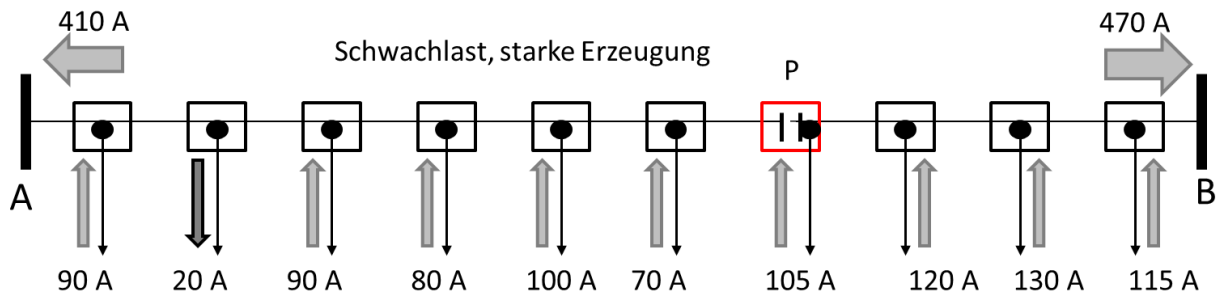


Abbildung 12: Einhaltung der Belastungsgrenzen in den Umspannwerken durch Verschiebung der Trennstelle<sup>47</sup>

Grundsätzlich bedeutet die Umsetzung eines Smart Grids eine stärker automatisierte Steuerung des Stromnetzes und verlangt eine größere Flexibilität auf Seiten der Verbraucher. In Zukunft wird sich die Erzeugung nicht mehr nach dem Verbrauch, sondern der Verbrauch nach der Erzeugung richten müssen. Für die Bevölkerung bedeutet diese Umstellung zunächst geringe Einschränkungen im Komfort, aber Anreize zum umweltbewussteren und energiekostensparenden Leben.

#### 1.4 Einbindungsmöglichkeiten der Fachinhalte in den Unterricht

Neben der Einbindung des Themas Smart Grid in den Physik- und Technikunterricht bieten sich einige Inhalte auch für die Verwendung im Fach Chemie, Geografie und Wirtschaft an. So wird der Aufbau und die Funktionsweise von Brennstoffzellen und Akkumulatoren ebenfalls in der Chemie unterrichtet. Der Aufbau einer regenerativen Energieversorgung bezüglich der Standortfaktoren kann ein Thema des Geografieunterrichts sein. Ebenso sind die Spannung zwischen Ökologie und Ökonomie beim Aufbau einer regenerativen Energieversorgung häufig ein Thema von Fächern, die das Wirtschaftssystem in Deutschland unterrichten. Häufig werden die Themen in der Sekundarstufe II unterrichtet. Es bietet sich somit an, das Thema Smart Grid in einem fächerverbindenden oder fachübergreifenden Unterricht einzubinden.

<sup>46</sup> Vgl. Buchholz 2014, Seite 232

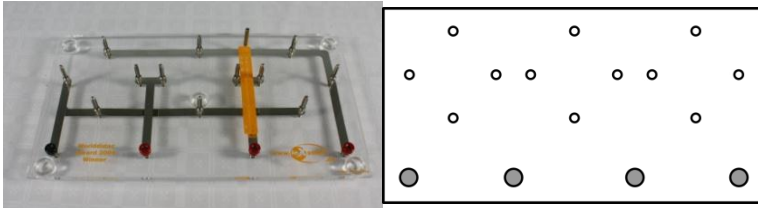
<sup>47</sup> Buchholz 2014, Seite 232

## Kapitel 2: Bezeichnung und Handhabung der Experimentiergeräte

### leXsolar-Smart Grid Ready-to-go

In der folgenden Auflistung werden alle im leXsolar-Smart Grid Ready-to-go Koffer enthaltenen Einzelteile aufgeführt. Zu jeder Komponente finden Sie die Bezeichnung mit Artikelnummer, eine Abbildung, das Piktogramm in den Versuchsaufbauten und Hinweise zur Bedienung. Mit Hilfe der Artikelnummer können Sie jedes Einzelteil separat nachbestellen.

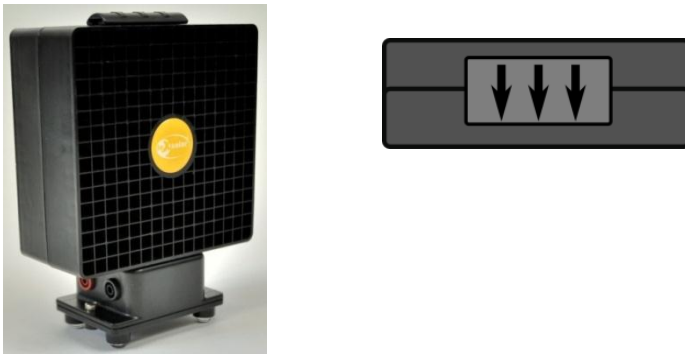
#### Grundeinheit 1100-19



Die Grundeinheit ist eine Steckplatine auf der bis zu 3 Module in Reihe oder parallel zueinander geschaltet werden können. Der Strom fließt über die an der Unterseite angebrachten Leitungen. Um die Komponenten auf der Grundeinheit mit anderen zu verbinden, befinden sich am unteren Ende 4 Anschlüsse.

Die beiden Schaltpläne zum Auflegen auf die Grundeinheit zeigen jeweils die Verbindungen für eine Reihen- oder Parallelschaltung. Zum Wechsel zwischen Reihen- und Parallelschaltung müssen die Module jeweils um 90° gedreht aufgesteckt werden.

#### Winderzeuger 1400-19



Der Winderzeuger dient zur kontrollierten Steuerung des Windes für das Experimentieren mit der Windturbine. Für die Experimente wird der Winderzeuger mit dem PowerModul (Spannungsquelle) verbunden. Hierzu muss der negative (positive) Pol des PowerModuls mit dem schwarzen (roten) Anschluss verbunden werden. Zur Inbetriebnahme befindet sich auf der den Anschlüssen gegenüber liegenden Seite ein separater An/Aus-Schalter. Die Windrichtung ist durch die Pfeile auf der Oberseite des Winderzeugers markiert. Der Betrieb des Winderzeugers ist nur mit dem mitgelieferten PowerModul oder einer stabilisierten Gleichspannung zulässig, andernfalls erlischt die Garantie.

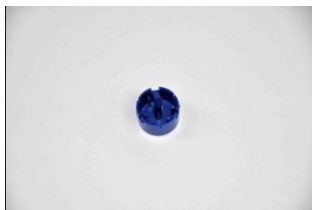
Technische Daten:

- Maximale Spannung: 12V DC (stabilisiert)
- Windgeschwindigkeit: 0 – 7m/s

## Windrotoren 1400-12



Aus den Bestandteilen können Rotoren mit 2, 3 oder 4 Rotorblättern mit einem flachen Profil oder einem optimierten Profil zusammengesetzt werden. Der 4-fach Nabeneinsatz ist in einem Anstellwinkel von  $25^\circ$  und der 3-fach Einsatz in den Anstellwinkeln  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $50^\circ$  und  $90^\circ$  vorhanden. Zum Einsetzen der Rotorblätter sollte folgendermaßen vorgegangen werden:



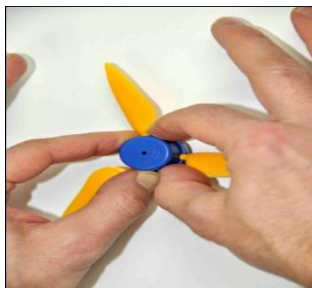
Zuerst wird eine Nabe mit dem gewünschten Anstellwinkel und der Flügelzahl ausgewählt (die Naben sind auf der Rückseite entsprechend beschriftet). Der Zweiflügel- und Vierflügel-Rotor kann mithilfe der Nabe mit 4 Einsätzen aufgebaut werden.



Danach werden die Rotorflügel eingesetzt. Beim Einsetzen der Flügel ist darauf zu achten, dass diese mit der abgerundeten Seite nach oben in den Einsatz gelegt werden.



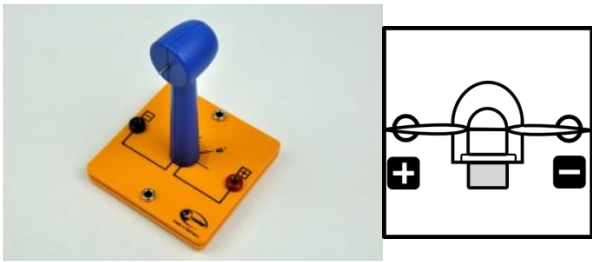
Nach dem Einsetzen der Flügel wird die Nabenkappe aufgesetzt und leicht festgedrückt.



Zum Wechseln der Rotorblätter befindet sich eine kleine Nase am Kopf der Nabe. Wenn die Nabe auf einer festen Unterlage leicht aufgedrückt wird (siehe Foto), löst sich der Kopf und die Flügel können ausgetauscht werden.



## leXsolar-Windturbinenmodul 1400-22

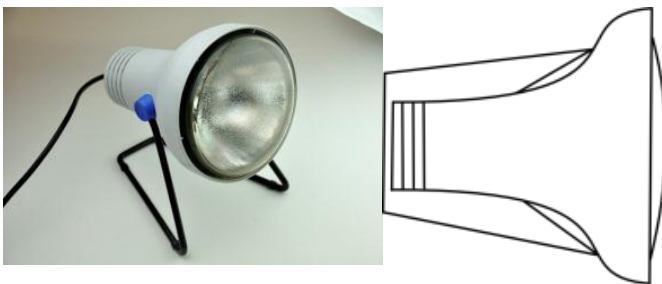


Zunächst muss die blaue Windturbine auf die entsprechende Modulplatte gesteckt werden. Auf die Generatorwelle wird dann ein Windrotor befestigt, um eine kleine Windkraftanlage zu erhalten. Der Rotor sollte dabei nicht das Gehäuse der Turbine berühren, da er sich durch die Reibung deutlich schwerer drehen kann.

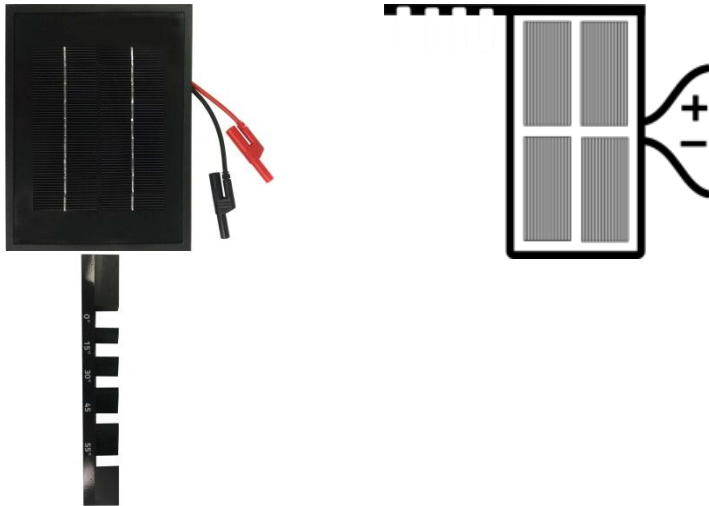
Der Generator erzeugt eine Gleichspannung, deren Polung auf der Modulplatte erkennbar ist. Des Weiteren ist auf die Modulplatte eine Winkelskala aufgedruckt, mit der die Turbine in einem bestimmten Winkel in den Wind gedreht werden kann.

**Während sich der Rotor dreht, besteht Verletzungsgefahr. Der Rotor darf nur angefasst werden, wenn er nicht rotiert!**

## Lampengehäuse (L2-04-080) mit Leuchtmittel 120W (L2-04-116)



### Solarmodul 5,22V, 380mA (1100-04) mit Standfuß (1118-17)



Zwischen den Solarmodulen und der Lampe muss bei allen Experimenten ein Abstand von 50 cm eingehalten werden. Das Solarmodul erwärmt sich durch die Beleuchtung und kann bei Unterschreitung des Abstandes dauerhaften Schaden nehmen. Die Lampe darf nur für die Dauer des Experimentes eingeschaltet sein und darf niemals auf andere Personen gerichtet werden. Aufgrund der Erhitzung muss die Lampe nach dem Ausschalten zunächst abkühlen, bevor sie angefasst und in die Schaumstoffeinlage zurückgelegt werden darf.

Während des Experimentierens sollten keine Gegenstände oder Personen im bzw. in der Nähe des Strahlengangs der Lampe stehen. Hierdurch kann es zu Reflexionen kommen, die die Experimentierergebnisse verfälschen.

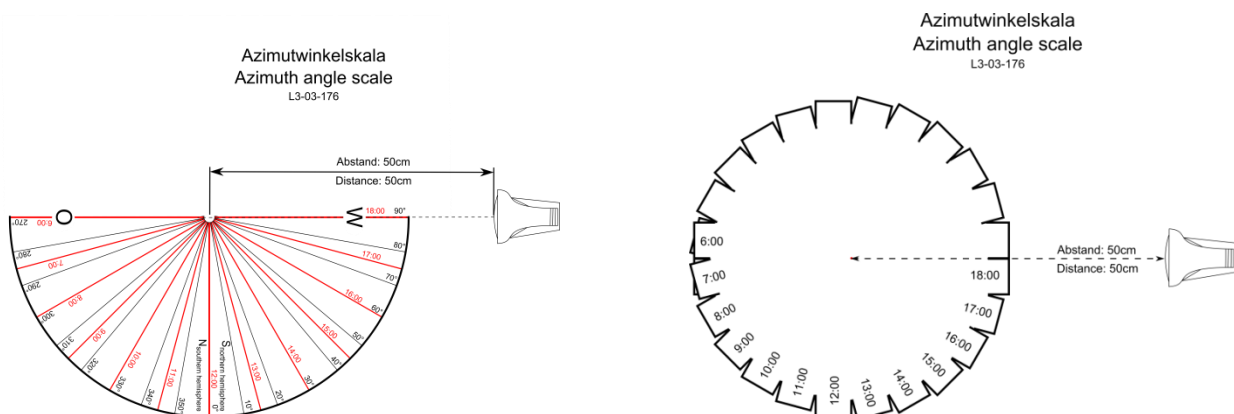
#### Technische Daten:

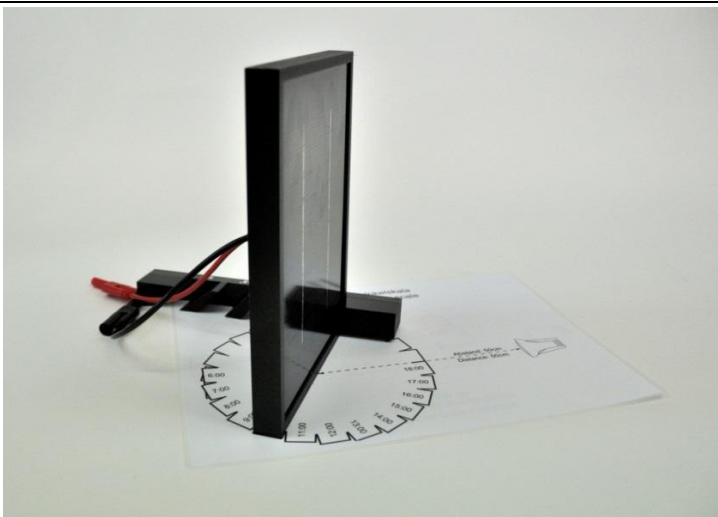
Lampe: 120 W PAR-Lampe

Solarmodul:

- 4,5 V Leerlaufspannung
- 840 mA Kurzschlussstrom
- 3,75 Wp Spitzenleistung

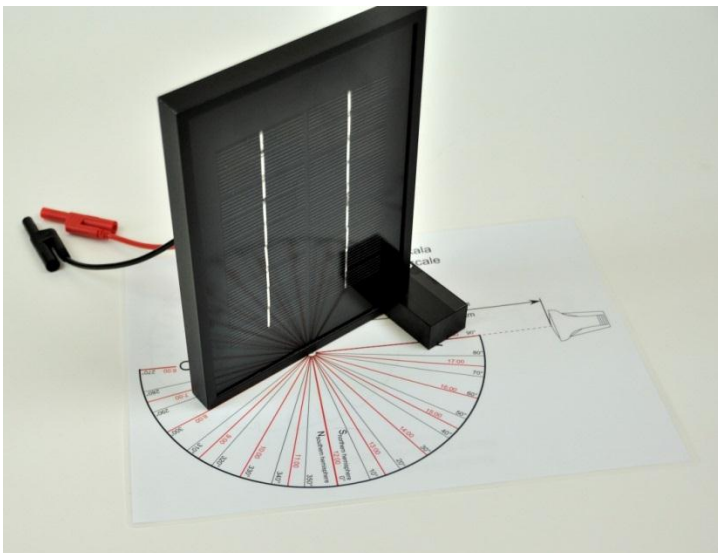
### Azimutwinkelskala L3-03-176





Solarmodul in 10Uhr-Stellung

Mit der Azimutwinkelskala kann der Azimutwinkel zwischen Solarmodul und Lampe eingestellt werden. Auf einer Seite befinden sich in einem Kreis angeordnete Rechtecke, in denen jeweils eine Uhrzeit angegeben ist. Wird das Solarmodul auf ein bestimmtes Rechteck gestellt, ist der Azimutwinkel für die ausgesuchte Uhrzeit eingestellt. In der nebenstehenden Abbildung ist das Solarmodul auf der 10Uhr-Stellung positioniert.

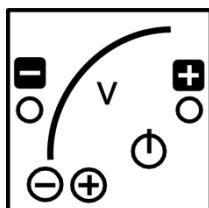


Solarmodul in 8Uhr-Stellung

Die zweite Seite der Azimutwinkelskala dient zur genaueren Einstellung von bestimmten Azimutwinkeln. Der Winkel ist dann eingestellt, wenn sich das Solarmodul mit der vorderen Kante hinter der entsprechenden Linie befindet. In der nebenstehenden Abbildung ist das Solarmodul mit dieser Azimutwinkelskala in der 300°-Stellung. Bei beiden Skalen ist die Einstrahlrichtung der Lampe eingezeichnet, die unbedingt einzuhalten ist. Der Abstand von der Lampe bis zum Mittelpunkt der Skala muss 50 cm betragen. Die Mitte des Solarmoduls muss sich immer am Mittelpunkt der Azimutwinkelskala befinden.

**Hinweis:** Die Azimutwinkelskala gibt **nicht** die Abweichung der Solaranlage von Süden an, sondern den Azimutwinkel der Sonne im **astronomischen Sinn!** In den Experimenten wird die Solaranlage immer als optimal nach Süden ausgerichtet betrachtet. Der hier verwendete Azimutwinkel ist also **nicht** der in der Solartechnik verwendete Fachbegriff, wo 0° eine nach Süden, -90° eine nach Osten und +90° eine nach Westen ausgerichtete Solaranlage beschreibt.

## PowerModul 9100-05

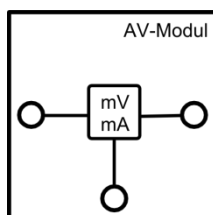


Das PowerModul ist ein kompaktes und intuitiv zu bedienendes Stromversorgungsgerät für Experimente. Zum Betrieb muss zunächst das beiliegende Steckernetzteil in die Steckdose gesteckt und mit der Eingangsbuchse oben rechts am PowerModul verbunden werden. Die Spannung wird mit der „+“- und „-“ - Taste ausgewählt und durch die LEDs angezeigt. Ist die gewünschte Spannung eingestellt, wird mit dem Einschalt-Button die Spannung an die Ausgangsbuchsen angelegt. Die Spannung liegt an, solange der Einschalt-Button rot leuchtet. Bei Kurzschluss oder Strömen  $>2$  A schaltet das PowerModul die Spannung ab. In den Smart Grid Versuchen wird das PowerModul einerseits zur Spannungsversorgung, z.B. des Winderzeugers oder des Elektrolyseurs eingesetzt, andererseits simuliert es ein Kraftwerk oder eine Trafostation.

### Technische Daten:

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

## AV-Modul 9100-03



Das AV-Modul ist ein kombiniertes Spannungs- und Strommessgerät. Es besitzt 3 Tasten, deren Funktionen jeweils im Display angezeigt werden. Durch das Drücken einer beliebigen Taste wird das Modul eingeschaltet. Im ausgeschalteten Zustand ist im Display das leXsolar-Logo zu sehen. Wenn das Display nichts anzeigt oder beim Betrieb „Bat“ angezeigt wird, müssen die Batterien auf der Rückseite ausgetauscht werden (2 x AA Batterien oder Akkus 1,2 bis 1,5V; Die Polarität beim Einsetzen der Batterien gemäß Markierung am Boden des Batteriefachs ist zu beachten! Beim Einlegen der Batterien dürfen die Touchfelder nicht berührt werden).

Mit der Taste rechts oben kann zwischen den 3 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 min ohne Tastendruck oder nach 10 min 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.

#### Technische Daten:

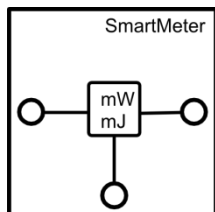
Spannungsmessung:

- Messbereich: 0...12 V
- Genauigkeit: 1 mV
- Automatische Abschaltung bei Überspannung >12 V (Wiedereinschalten durch Touchbutton)

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)

#### **SmartMeter 9100-04**



Das SmartMeter ist ein Leistungsmessgerät und Energiezähler mit Schalterfunktion. In den SmartGrid Versuchen fungiert es als „Stromzähler“.

Das SmartMeter misst immer Stromstärke und Spannung zwischen den Buchsen am Modul, so wie der aufgedruckte Schaltplan es zeigt. Aus den gemessenen Werten werden die Leistung und die durchflossene Energiemenge ab einem bestimmten Zeitpunkt berechnet und beide Werte im Display angezeigt. Der Energiezähler kann jederzeit durch Drücken der „E=0“-Taste auf 0 zurückgesetzt werden.

Mit der „Schaltertaste“ kann jederzeit der Stromfluss unterbrochen werden. Für die Messung gelten die Polaritätsdefinitionen, die durch die Buchsenfarben dargestellt werden (rot ist der Plus- und schwarz der Minuspol). Es werden daher auch negative Leistungen gemessen, die dann zur Reduktion der gezählten Energie führen.

Maximale Stromstärke und Spannungswerte sowie entsprechende Fehlermeldungen und alle Angaben zur Batterieanzeige und zum Batteriewechsel entsprechen denen des AV-Moduls.

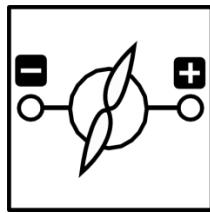
#### Technische Daten:

Strom- und Spannungsmessung entspricht dem AV-Modul

Leistungsmessung 0-12 W

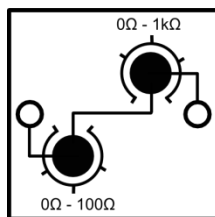
Energiezählung 0-200 mWh

### Motormodul (1100-27) mit gelben Propeller (L2-02-017)



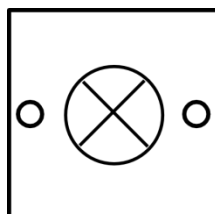
Das Motormodul fungiert als Verbraucher in den SmartGrid-Versuchen.

### Potentiometermodul 1100-23



Das Potentiometermodul besteht aus einem 0-100Ω-Drehwiderstand und einem 0-1kΩ-Drehwiderstand. Beide sind in Reihe geschaltet, sodass das Potentiometermodul Widerstände zwischen 0 Ω bis 1100 Ω annehmen kann. Die Messungenauigkeit beim Einstellen eines Widerstandes liegt bei 5 Ω beim kleineren Drehwiderstand und bei 20 Ω beim Größeren. Durch das Potentiometer dürfen keine Ströme von mehr als 190 mA fließen.

### Glühlampenmodul 1100-26



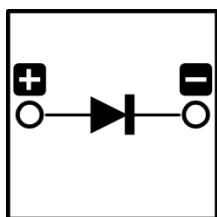
Das Glühlampenmodul fungiert als Verbraucher in den Smart Grid Versuchen.

#### Technische Daten:

Mikroglühlampe  $P_{\text{typ}} = 200\text{mW}$  (bei 3,5V)

Absicherung über Spannungsbegrenzung (6V)

### Diodenmodul 1100-21



Das Diodenmodul dient in den SmartGrid-Versuchen dazu, einen Rückstrom zur Windturbine zu verhindern, wodurch der Generator als Motor fungieren würde.

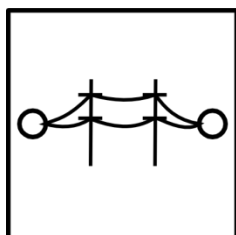
#### Technische Daten:

Schottkydiode

$U_{\text{fluss}} = 0,33 \text{ V}$

Maximaler Strom: 200 mA (500 mA Peak <1 s)

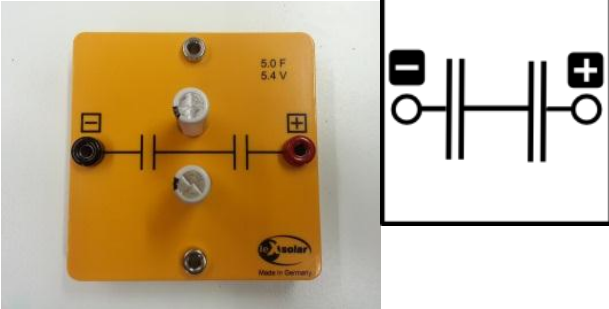
### Stromnetzmodul 1600-01



Das Stromnetzmodul dient zur Simulation einer Stromleitung und besteht aus einer PTC-Sicherung. Die PTC-Sicherung ist ein Widerstand, der bis zu einer Stromstärke von ca. 190 mA einen Widerstand von 3-5  $\Omega$  besitzt und dabei Temperaturen von 50°C erreicht. Bis zu dieser Stromstärke ist der Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand, wie bei einem Metall, annähernd linear. In den Experimenten veranschaulicht es die Leistungsverluste durch Wärme. Es dürfen nicht mehr als 190 mA durch das Modul fließen. Ab dieser Stromstärke kann es nicht mehr als Simulation genutzt werden, da der Widerstand dann stark nicht linear ansteigt und die Stromstärke verringert wird.

Die Erfassung der Temperatur ist nur durch einen Temperatursensor (z.B. NTC) möglich, da die abgegebene Wärme zu gering für Glasthermometer ist.

## Kondensatormodul 1600-02



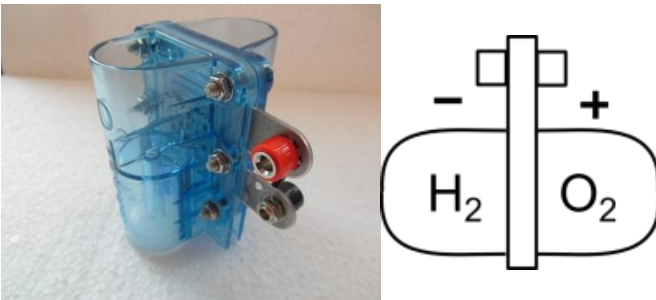
Das Kondensatormodul besteht aus zwei in Reihe geschalteten Kondensatoren. Die maximale Spannung des Kondensatormoduls beträgt 5,4 V. Zum Aufladen sollte keine höhere Spannung als 5 V angelegt werden. Zum Entladen kann der Kondensator kurzgeschlossen werden, da Sicherungen im Modul eine zu hohe Stromstärke verhindern. Zum schnellen Aufladen kann der Kondensator direkt an die Spannungsquelle angeschlossen werden. Anschließend kann die Spannungsquelle bei 0,5 V eingeschaltet und alle 10 s um 0,5 V erhöht werden. In der Endspannung sollte der Kondensator ca. 30 s aufgeladen werden.

### Technische Daten:

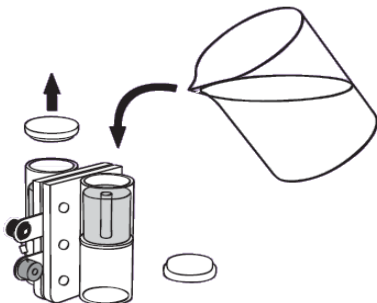
Kapazität: 5 F

Spannung: 5,4 V

## Reversible Brennstoffzelle L2-06-067



Die reversible Brennstoffzelle besteht aus einem Elektrolyseur und einer Brennstoffzelle. Zum Befüllen der reversiblen Brennstoffzelle sollte folgendermaßen vorgegangen werden:

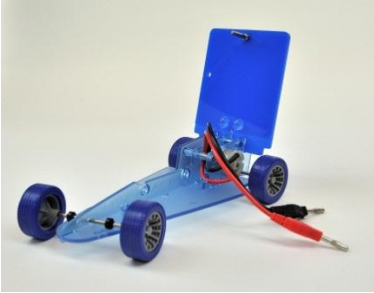


1. Befülle die rev. Brennstoffzelle mit destilliertem Wasser wie in nebenstehender Abbildung gezeigt.
2. Fülle beide Speicherzylinder bis zum oberen Ende des Röhrchens im Inneren des Zylinders mit destilliertem Wasser auf.
3. Klopfe die rev. Brennstoffzelle leicht auf den Tisch.
4. Fülle weiter destilliertes Wasser nach, bis es durch die Röhrchen läuft.
5. Verschließe die Speicherzylinder mit den Stopfen und drehe die Zelle für den Betrieb wieder um. (Stopfen müssen für den Betrieb unten liegen)

Zum Aufladen der reversiblen Brennstoffzelle sollte mit dem PowerModul keine Spannung von mehr als 1,5 V angeschlossen werden. Andernfalls kann es passieren, dass ohne zwischengeschaltete Widerstände eine größere Stromstärke als 1 A hindurchfließt, was sie funktionsunfähig machen kann.



## 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 Adapterplatte an dem 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.

In den nachfolgenden Übersichten finden Sie die für jedes Experiment benötigten Komponenten. Sie sollen ihnen dabei helfen einzuschätzen, welche Experimente Sie mit einem Koffer gleichzeitig durchführen können bzw. welche Geräte Sie eventuell nachbestellen müssen, um bestimmte Experimente durchzuführen.

In den obersten Zeilen kann die Experimentierreihe und die Nummer des jeweiligen Experimentes abgelesen werden. Die Zuordnung der Nummer zu einem Experiment finden Sie immer in der Tabelle darunter. In der linken Spalte einer Übersicht sind die verfügbaren Geräte dargestellt. Die Zahl hinter einem Gerätenamen gibt an, wie oft die Komponente im Koffer vorhanden ist. Fehlt diese Angabe, ist das Gerät nur einmal vorhanden.

In der Tabelle gibt ein Kreuz an, dass das Gerät für den Versuch gebraucht wird. Steht dort anstelle des Kreuzes eine Zahl, gibt sie an, wie viele der Komponenten benötigt werden.

Gerät	PV-Grundlagen			Wind-Grundlagen			Estore-Grundlagen						
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7
Grundeinheit				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Winderzeuger				X	X	X							
Windrotor + Blätter				X	X	X							
Windturbine				X	X	X							
Lampe	X	X	X										
Solarmodul	X	X	X										
Azimutwinkelskala													
PowerModul (2)				1	1	1	1	1			1	1	1
AV-Modul	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
SmartMeter (2)										1		1	
Motormodul													
Potentiometermodul	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Glühlampenmodul (2)													
Diodenmodul													
Stromnetzmodul (2)													
Kondensatormodul											X	X	X
Rev. Brennstoffzelle							X	X	X	X			X
Elektro-Fahrzeug													X

1.1 U-I-Kennlinie eines Solarmoduls	3.1 U-I-Kennlinie eines Elektrolyseurs
1.2 U-I-Kennlinie eines Solarmoduls in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke	3.2 Verhalten der Spannung und Stromstärke eines Elektrolyseurs während des Ladevorgangs
1.3 U-I-Kennlinie eines Solarmoduls in Abhängigkeit von der Temperatur	3.3 I-U-Kennlinie einer Brennstoffzelle
2.1 Abhängigkeit der Leistung einer Windkraftanlage von der Form der Flügel und vom Anstellwinkel	3.4 Verhalten der Spannung und Stromstärke einer Brennstoffzelle während des Entladevorgangs
2.2 Abhängigkeit der Leistung einer Windkraftanlage von der Anzahl der Rotorblätter	3.5 t-U- und t-I-Kennlinie eines Kondensators beim Aufladevorgang
2.3 Abhängigkeit der Leistung einer Windkraftanlage von der Windrichtung	3.6 t-U- und t-I-Kennlinie eines Kondensators beim Entladevorgang
	3.7 Betrieb des Elektroautos mit Kondensators und Brennstoffzelle

Gerät	Smart Grid Experimente													
	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	4.10	4.11	4.12	4.13	4.14
Grundeinheit		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Winderzeuger		X											X	X
Windrotor + Blätter		X											X	X
Windturbine		X											X	X
Lampe	X			X	X		X	X	X	X	X	X		X
Solarmodul	X			X	X		X	X	X	X	X	X		X
Azimutwinkelskala	X			X	X		X							
PowerModul (2)		1	1			1	1	1	1	1	1	1	1	2
AV-Modul	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SmartMeter (2)			1	1	1		2	1	1	1		1		1
Motormodul			X	X	X									X
Potentiometermodul	X	X						X	X		X	X	X	
Glühlampenmodul (2)			2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		2
Diodenmodul														X
Stromnetzmodul (2)						2	2	2	2	2	2	2	1	2
Kondensatormodul					X									X
Rev. Brennstoffzelle											X			
Elektro-Fahrzeug														

4.1	Die Leistungsschwankungen einer Photovoltaikanlage	4.8	Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage in Abhängigkeit vom Verbrauch
4.2	Die Leistungsschwankungen einer Windkraftanlage	4.9	Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage in Abhängigkeit von der Länge des Leiters
4.3	Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk im Laufe eines Tages	4.10	Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und einer intelligenten Ortsnetzstation
4.4	Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk und eine Photovoltaikanlage im Laufe eines Tages	4.11	Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und Energiespeicher
4.5	Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk, eine Photovoltaikanlage und einen Energiespeicher im Laufe eines Tages	4.12	Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und Lastmanagement
4.6	Spannungsverhalten in einem herkömmlichen Strahlennetz	4.13	Leitenseilmonitoring
4.7	Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage	4.14	Szenarierversuch: Smart Grid

## Kapitel 3: Musterlösungen der Experimente

### Vorbemerkungen

Die Angaben zu jedem Experiment sind in die drei Teile Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung gegliedert.

Die Vorbereitungshinweise sind Angaben über die Ziele des Experiments und der anschließenden Auswertung, das Vorwissen für das Experiment und die Auswertung, mögliche Vorversuche, sowie wichtige Experimentier- und Auswertungshinweise für das Experiment. Die Angaben dienen als Hilfestellung ...

- für eine Einordnung des Experiments in eine Sequenz von mehrere Unterrichtsstunden,
- für eine Einordnung des Experiments in eine Unterrichtsphase,
- für die Vorbereitung des Experiments hinsichtlich vorzubereitenden Schülerwissens,
- für eine effektive Durchführung des Experiments, um die besten Experimentierergebnisse zu erhalten,
- zur Vermeidung, Erkennung und Behebung von Fehlern während der Durchführung,
- für die Entscheidung, ob das Experiment als Demonstrationsexperiment oder Schülerexperiment durchgeführt werden kann und
- für mögliche Nachbereitungsthemen der Experimente im Sinne von Smart Grid,

Zur Durchführung des Experiments gehören die Unterkapitel: Aufgabe, Vorbemerkungen, Aufbau und Geräte, Durchführung und die Messwerttabelle. Die Anleitungen sind so konzipiert, dass eine direkte Verwendung durch die Schüler ohne vorgegebene Messwerte möglich ist. Dies bedeutet, dass die Schüler mit dem angenommenen Vorwissen selbstständig in der Lage sind das Experiment durchzuführen, eine adäquate Auswertung vorzunehmen und die physikalischen Prozesse innerhalb des Experiments zu verstehen.

Die Auswertung beinhaltet

- Aufgaben zur Aufbereitung der Experimentierergebnisse
- Aufgaben zur Erklärung der physikalischen Vorgänge innerhalb des Experiments und der Realsituation
- Aufgaben als Anregung für den weiteren Unterrichtsgang

Alle Aufgabentypen enthalten Musterlösungen und sind als Möglichkeiten für die Verwendung zu verstehen. Mit dem genannten Vorwissen sollten die Schüler selbstständig in der Lage sein, alle Aufgaben zu lösen. Nichtsdestotrotz kann es notwendig sein, einige Aufgaben gemeinsam zu lösen oder Zwischenaufgaben zu stellen. Des Weiteren befindet sich bei einigen Aufgaben Quellenhinweise, die auf zusätzliches Material verweisen oder die es den Schülern ermöglicht, die Aufgabe im Rahmen einer Rechercheaufgabe zu lösen.

Die Experimente gliedern sich in Vorversuche und die eigentlichen SmartGrid Versuche. Die Vorversuche dienen dazu, dass die Schüler technische Eigenschaften einzelner Komponenten kennenlernen, um deren Zusammenspiel in den Smart Grid Versuchen zu erklären. Außerdem sind die Vorversuche wichtig, um den Umgang mit den Experimentierkomponenten zu lernen.

Die Smart Grid Versuche sind zum Teil komplex. Daher werden meist 3 bis 4 Schüler für die Durchführung empfohlen, um die jeweiligen Arbeitsschritte ordnungsgemäß erledigen zu können. Die Versuchsaufbauten umfassen sehr viele verschiedene Komponenten, sodass sehr viele Fehlerquellen vorhanden sind. Es ist daher besonders darauf zu achten, dass die Schüler die Anleitungen und Aufbauten sehr gewissenhaft umsetzen. Dies schränkt zwar die Freiheit der Schüler beim Experimentieren, jedoch ist es notwendig um vergleichbare und sinnvolle Ergebnisse zu bekommen.

Versuchsanleitungen ohne eingetragene Musterlösungen finden Sie im separaten Schülerheft auf der leXsolar-CD als pdf- und als word-Datei (docx). Mit dem Kauf des Produkts erwerben Sie das Recht zur freien Verwendung der Anleitungen für ihren Unterricht. Dies umfasst auch die Entnahme einzelner Textpassagen oder Abbildungen aus der word-Datei (unter Angabe der Quelle).



## 1. Grundlagenversuche zur Photovoltaik

### Ziele

#### Experiment 1.1: Die U-I-Kennlinie des Solarmoduls

- Die Schüler messen und zeichnen die U-I-Kennlinie und U-P-Kennlinie des Solarmoduls.
- Die Schüler beschreiben die U-I-Kennlinie und U-P-Kennlinie.
- Die Schüler interpretieren den Schnittpunkt zwischen der U-I-Kennlinie des Solarmoduls und eines Widerstands als Arbeitspunkt.
- Die Schüler erkennen anhand der U-I-Kennlinie, dass die Spannung, Stromstärke und Leistung des Solarmoduls abhängig vom angeschlossenen Widerstand ist.
- Die Schüler berechnen den Innenwiderstand des Solarmoduls am MPP bei Normaltemperatur. Hierdurch wissen die Schüler für einige Smart Grid Experimente, wo man sich auf der U-I-Kennlinie bei bestimmten Widerständen befindet

#### Experiment 1.2: Die U-I-Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke

- Die Schüler messen und zeichnen die U-I- und die U-P-Kennlinie des Solarmoduls.
- Die Schüler vergleichen die Spannung, die Stromstärke und die Leistungsabgabe bei gleichem Widerstand und unterschiedlicher Bestrahlung mit den Messergebnissen aus Experiment 1.1. und entdecken, dass alle Werte kleiner geworden sind.

#### Experiment 1.3: Die U-I-Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Temperatur

- Die Schüler messen und zeichnen die U-I- und die U-P-Kennlinie.
- Die Schüler vergleichen die Spannung, die Stromstärke und die Leistungsabgabe bei einem gleichen Widerstand und höherer Temperatur mit den Messergebnissen aus Experiment 1.1. und entdecken, dass zwar die Maximalleistung geringer geworden ist, aber die Leistung nicht zwangsläufig bei jedem Widerstand sinkt.

### Vorwissen

- Die Schüler wissen, dass eine Solarzelle Sonnenenergie in elektrischen Energie umwandelt.
- Die Schüler wissen, dass die Leistung das Produkt aus Spannung und Stromstärke ist.
- Die Schüler können die U-I-Kennlinie eines Ohm'schen Widerstandes einzeichnen.

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Die 3 Versuche sollten idealerweise mit der selben Versuchsanordnung erfolgen. Eine Rekonstruktion der gleichen Versuchsanordnung ist sehr aufwendig, da bereits geringe Veränderungen des Einstrahlungswinkels der Lampe zu großen Veränderungen der U-I-Kennlinie führen können. Hierbei könnten die Schüler beim Vergleich der Werte zu falsche Schlussfolgerungen gelangen. Empfehlenswert wäre es die 3 Versuche hintereinander durchzuführen.
- In der Auswertung bietet es sich an, auf die Ähnlichkeit zwischen Solarmodul- und Diodekennlinie hinzuweisen, die sich aus dem Vorhandensein eines p/n-Übergang in beiden Bauelementen ergibt.
- Den Schülern sollten darauf hingewiesen werden, dass reale Solaranlagen zusätzlich über einen MPP-Tracker verfügen, der dafür sorgt, dass sie immer ihre maximale Leistung abgeben.
- Der Innenwiderstand des verwendeten leXsolar-Solarmoduls am MPP beträgt je nach Temperatur zwischen  $30\Omega$  und  $40\Omega$ . Für die Smart-Grid Experimente gilt, dass die angeschlossenen Verbraucher einen geringeren Widerstand aufweisen, d.h. der Arbeitspunkt des Solarmoduls i.d.R. links vom MPP (bei geringeren Spannungen) liegt.
- Um die U-I-Kennlinie aufzunehmen, sollten keine festen Spannungen oder Stromstärken vorgegeben werden, da es schwierig ist, diese mit dem Potentiometer einzustellen und der zunehmende Temperaturanstieg die Messwerte verfälscht.



## 1. Grundlagenversuche zur Photovoltaik

- Natürliches Sonnenlicht ist eine weitere Messunsicherheit. Die Beispielmesswerte in diesem Lehrerheft wurden in einem mit Jalousien abgedunkelten Raum aufgenommen.
- Für weitere theoretische Hintergründe und physikalische Grundlagenexperimente zum Thema Photovoltaik nutzen Sie das auf der leXsolar-CD vorhandene Lehrerheft Photovoltaik, welches Sie beispielsweise über das Produkt leXsolar-PV Ready-to-go erreichen.

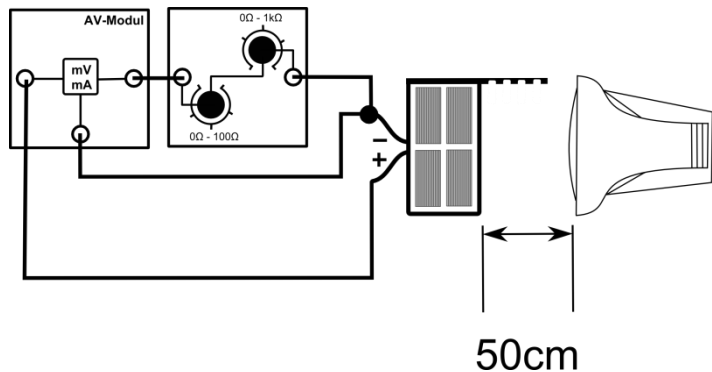


## 1.1 U-I-Kennlinie des Solarmoduls

### Aufgabe

Nimm die U-I-Kennlinie des Solarmoduls auf.

### Aufbau



### Geräte

- Lampe
- Solarmodul
- AV-Modul
- Potentiometer
- Kabel

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Stelle das Potentiometer auf den maximalen Widerstand. Stelle das Solarmodul senkrecht zur Tischplatte und frontal zur Lampe in einem Abstand von 50 cm auf, sodass es vollständig beschienen werden kann. Die Lampe soll parallel zur Tischplatte ausgerichtet werden.
2. Versichere dich, dass alle Komponenten in Reihe geschaltet sind und die Spannung am Solarmodul in einer Parallelschaltung gemessen wird.
3. Schalte die Lampe ein und verändere den Widerstand am Potentiometer. Verringere zunächst den 1kΩ-Drehwiderstand und danach den 100Ω-Widerstand. Miss zu jeder Spannung die Stromstärke. Um sinnvolle Messwerte zu erhalten, solltest du einen Messwert immer dann aufnehmen, wenn sich die Stromstärke um etwa 20mA erhöht oder sich die Spannung um etwa 0,5V gegenüber dem vorherigen Messwert verringert hat. Versuche nicht, bestimmte vorgegebene Werte für Spannung oder Stromstärke einzustellen, da dies die Regelgenauigkeit des Potentiometers nicht zulässt.
4. Berechne die Leistung des Solarmoduls für jeden Messpunkt.

### Messwerte

U in V	5,2	5,1	5	4,9	4,8	4,7	4,6	4,4	4,1	
I in mA	4,3	21	38,7	59,9	81,5	101,5	121,2	140,7	149,7	
P <sup>in</sup> mW	22,4	107,1	193,5	293,5	391,2	477,1	557,5	619,1	613,8	

U in V	3,5	2,9	2,5	2	1,4	1,1	0,4	0		
I in mA	150,1	151,4	152,6	152,9	153,8	154,1	155,7	156,3		
P <sup>in</sup> mW	525,4	439,1	381,5	305,8	215,3	169,5	62,3	0		

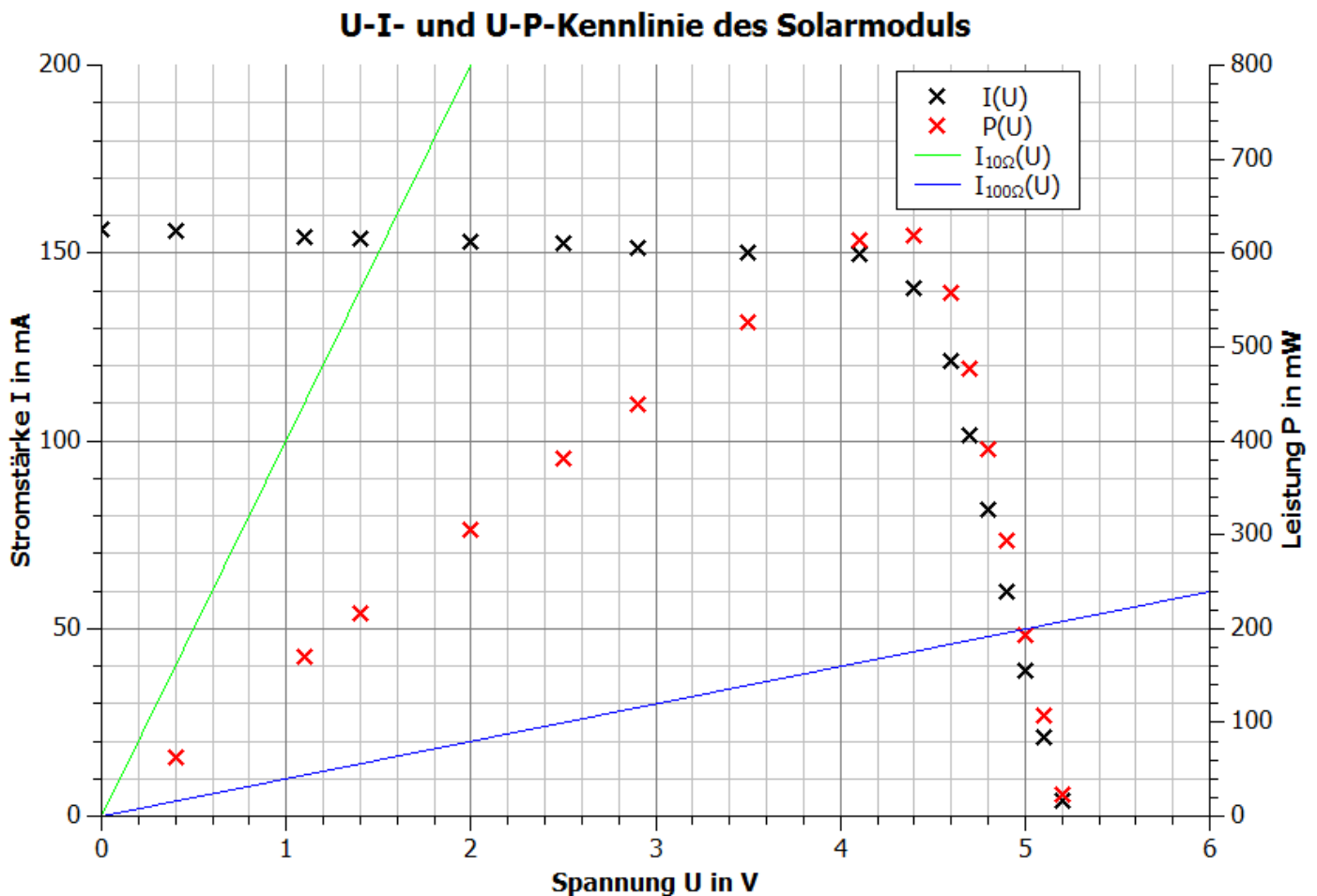




## 1.1 U-I-Kennlinie des Solarmoduls

## Auswertung

1. Trage deine Messwerte in das U-I- und das U-P-Diagramm und zeichne den zugehörigen Graphen.



2. Beschreibe den Verlauf des Graphen.

Zwischen 0V und 4V ist die Stromstärke relativ konstant bei 150mA. Ab ca. 4V sinkt die Stromstärke immer schneller bis sie bei rund 5,2V auf 0mA zurückgeht.

Die Leistung ist ebenfalls von der Spannung abhängig. Die höchste Leistung wird bei einer Spannung von ungefähr 4,4V erreicht und liegt bei 610mW. Die kleinsten Leistungen liegen bei 0V und 5,2V und betragen 0mW. Im Intervall [0V;4,4V] steigt die Leistung linear an und im Intervall [4,4V;5,2V] fällt sie rapide ab.

3. Zeichne in dein Diagramm die U-I-Kennlinie eines 10Ω- und 100Ω-Widerstands. Erläutere die Bedeutung der Schnittpunkte der Solarmodul-Kennlinie mit den jeweiligen Widerstandskennlinien.

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



## 1.1 U-I-Kennlinie des Solarmoduls

4. Bewerte die Spannung und die Leistungsabgabe des Solarmoduls in Hinblick auf das Anschließen eines Verbrauchers.

Je nach Widerstand des Verbrauchers wird eine andere Spannung an ihn angelegt und eine andere Leistung an ihn abgegeben. Das Solarmodul ist damit weder eine Spannungsquelle, die an jeden Verbraucher die gleiche Spannung anlegt, noch eine Leistungsquelle, die an jeden Verbraucher die gleiche Leistung abgibt.

5. Berechne den Widerstand, an dem das Solarmodul die größte Leistung abgibt.

Der MPP besitzt eine Spannung von etwa  $U=4,4\text{V}$  und eine Stromstärke von etwa  $140,7\text{mA}$ . Somit gilt für den Widerstand, an den das Solarmodul die maximale Leistung abgibt:  $R_{MPP} = \frac{U}{I} = \frac{4,4\text{V}}{0,14\text{A}} \approx 31\Omega$ .

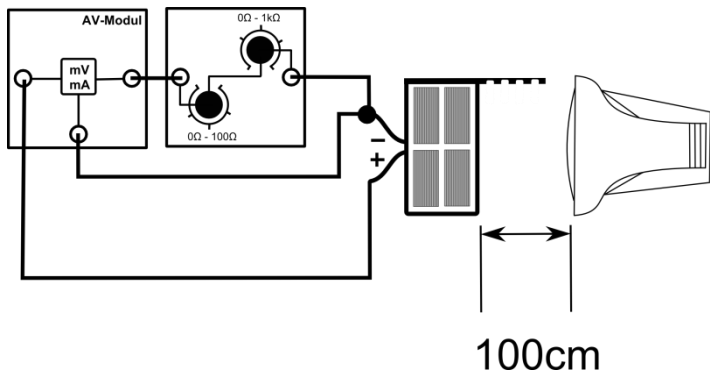


## 1.2 Die I-U Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke

### Aufgabe

Nimm die I-U-Kennlinie unter einer geringen Beleuchtungsstärke als in Experiment 1.1 auf.

### Aufbau



### Geräte

- Lampe
- Azimutwinkelskala
- Solarmodul
- AV-Modul
- Potentiometer
- Kabel

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Stelle das Potentiometer auf den maximalen Widerstand. Stelle das Solarmodul senkrecht zur Tischplatte und frontal zur Lampe in einem Abstand von 100 cm auf, sodass es vollständig beschienen werden kann. Die Lampe soll parallel zur Tischplatte ausgerichtet werden.
2. Versichere dich, dass alle Komponenten in Reihe geschaltet sind und die Spannung am Solarmodul in einer Parallelschaltung gemessen wird.
3. Schalte die Lampe ein und verändere den Widerstand am Potentiometer. Verringere zunächst den 1kΩ-Drehwiderstand und danach den 100Ω-Widerstand. Miss zu jeder Spannung die Stromstärke. Um sinnvolle Messwerte zu erhalten, solltest du einen Messwert immer dann aufnehmen, wenn sich die Stromstärke um etwa 20mA erhöht oder sich die Spannung um etwa 0,5V gegenüber dem vorherigen Messwert verringert hat. Versuche nicht, bestimmte vorgegebene Werte für Spannung oder Stromstärke einzustellen, da dies die Regelgenauigkeit des Potentiometers nicht zulässt.
4. Berechne die Leistung des Solarmoduls für jeden Messpunkt.

### Messwerte

U in V	5	4,9	4,7	4,5	4	3,5		
I in mA	4,4	20,5	41	60	77	82		
P in mW	22	100,5	192,7	270	308	287		

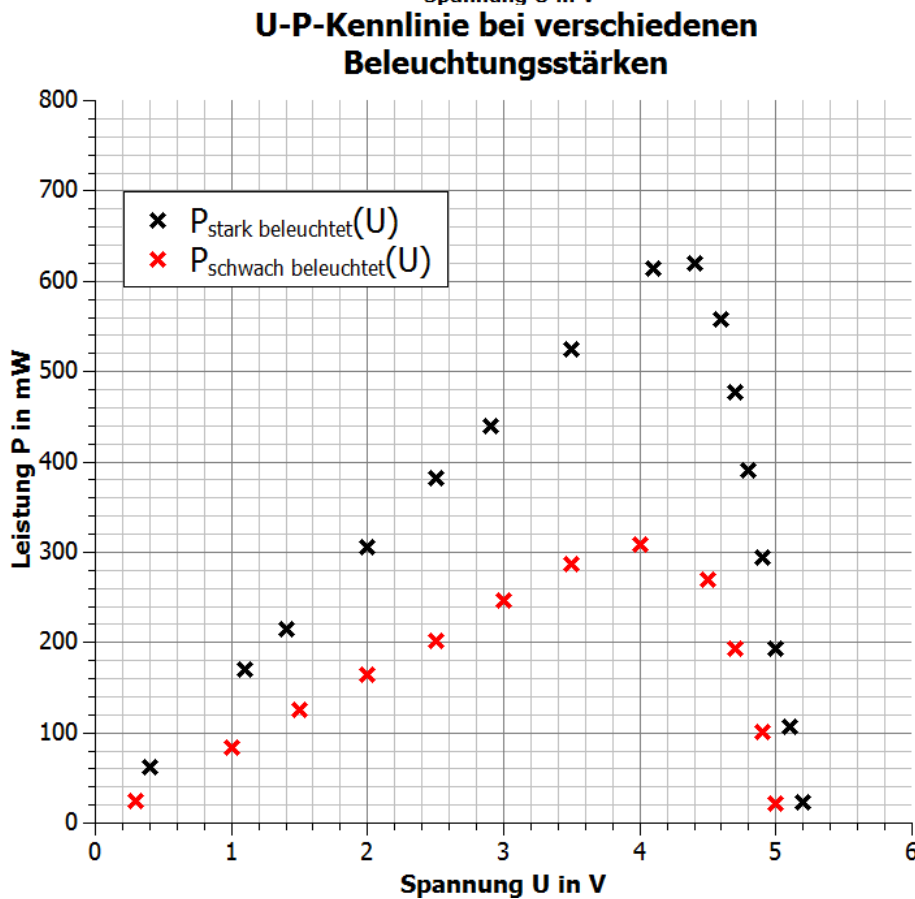
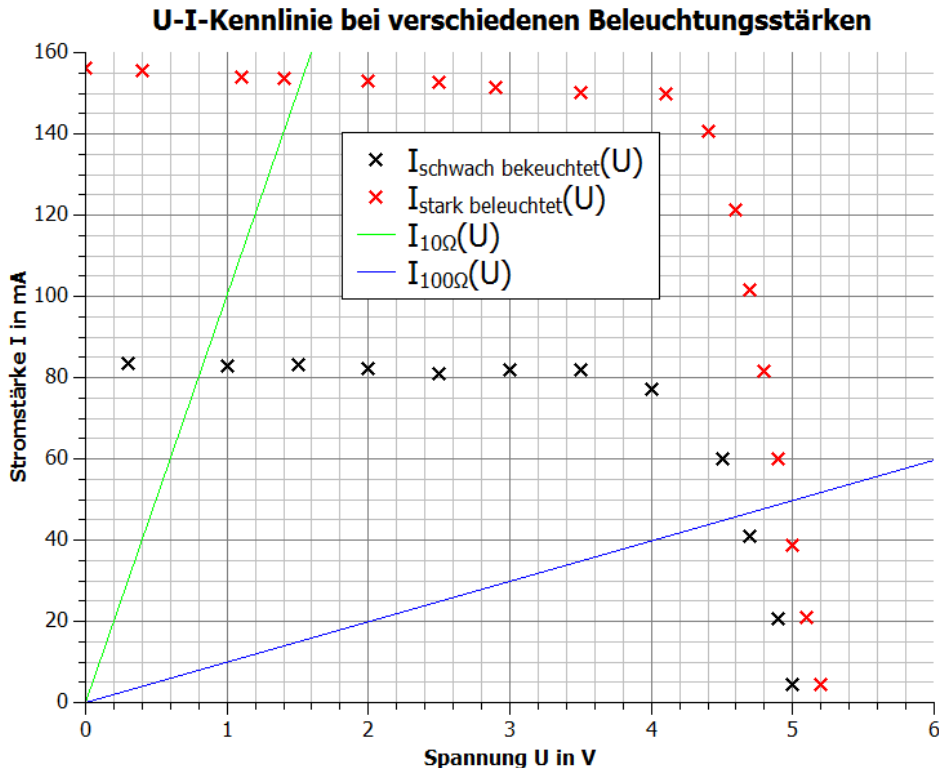
U in V	3	2,5	2	1,5	1	0,3		
I in mA	82	81	82,3	83,3	83	83,5		
P in mW	246	202,5	164,6	125	83	25,1		



## 1.2 Die I-U Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke

### Auswertung

- Trage deine Messwerte in das U-I-Diagramm und U-P-Diagramm ein. Ergänze das Diagramm mit deinen Messwerten aus Experiment 1.1.





## 1.2 Die I-U Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke

2. Vergleiche die U-I- und U-P-Kennlinien bei unterschiedlichen Beleuchtungsstärken.

Der qualitative Verlauf der beiden Kennlinien ist gleich. Die Kennlinie mit geringerer Beleuchtung besitzt eine geringere Leerlaufspannung ( $U=4,8V$ ) als bei einer höheren Beleuchtung. Die Stromstärke ist im gleichen Spannungsintervall annähernd konstant. Der größte Unterschied liegt in der deutlich geringeren Stromstärke bei geringerer Beleuchtung und gleicher Spannung. Der qualitative Verlauf der Leistungskennlinie ist ebenfalls ähnlich. Die Leistungen sind bei gleicher Spannung jedoch um mehr als die Hälfte gesunken. Der MMP befindet sich nach wie vor in der Nähe von  $U=4,2V$ .

3. Zeichne in dein U-I-Diagramm die U-I-Kennlinie eines  $10\Omega$  und eines  $100\Omega$  Widerstandes. Erläutere die Spannung, Stromstärke und Leistung des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke beim gleichen Widerstand.

Für jeden Widerstand gilt, dass mit zunehmender Bestrahlung eine größere Spannung an ihm anliegt und ein größerer Strom durch ihn hindurchfließt. Die Leistung ist damit des Solarmoduls bei einem festen Widerstand ist damit ebenfalls umso größer, je größer die Bestrahlungsstärke ist.

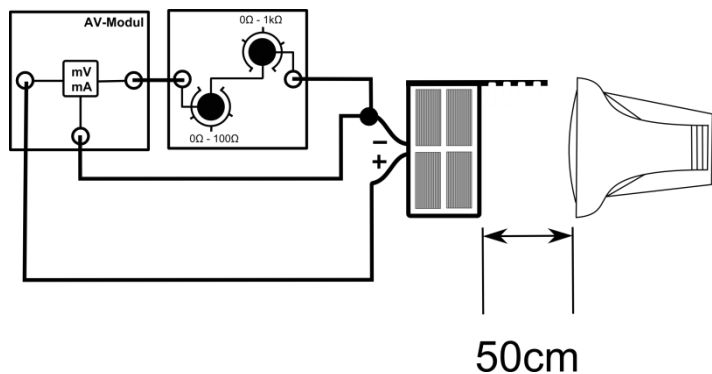


## 1.3 Die I-U Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Temperatur

### Aufgabe

Nimm die I-U-Kennlinie unter einer höheren Temperatur als Experiment 1.1 auf.

### Aufbau



### Geräte

- Lampe
- Solarmodul
- AV-Modul
- Potentiometer
- Kabel

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Stelle das Potentiometer auf den maximalen Widerstand und stelle das Solarmodul frontal zur Lampe in einem Abstand von 50 cm auf. Die Lampe sollte parallel zur Tischplatte ausgerichtet sein. Bescheine die Lampe 10min oder falls dieses Experiment direkt nach Experiment 1.1 durchgeführt wird, weitere 5min. Die Temperatur liegt nun etwa bei 50°C.
2. Versichere dich, dass alle Komponenten in Reihe geschaltet sind und die Spannung am Solarmodul in einer Parallelschaltung gemessen wird.
3. Verändere den Widerstand am Potentiometer um verschiedene Spannungen am Solarmodul zu erzeugen. Verringere zunächst den 1kΩ-Drehwiderstand. Miss zu jeder Spannung die Stromstärke. Nimm die Messwerte entsprechend der Vorgehensweise in Experiment 1.1 auf.
4. Berechne für jede Spannung und Stromstärke die Leistung.

### Messwerte

U in V	4,7	4,6	4,6	4,5	4,4	4,3	4,2		
I in mA	3,9	20,6	39,4	61,3	80,1	101,6	121,6		
P in mW	18,3	94,8	181,2	275,9	352,2	436,9	510,7		

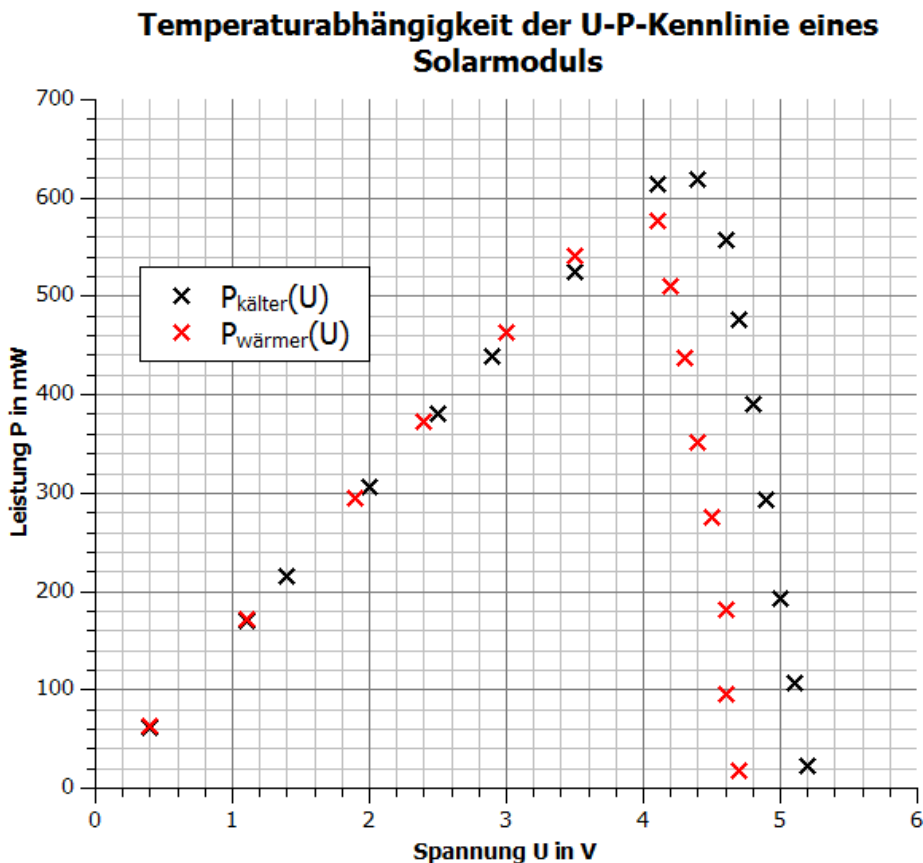
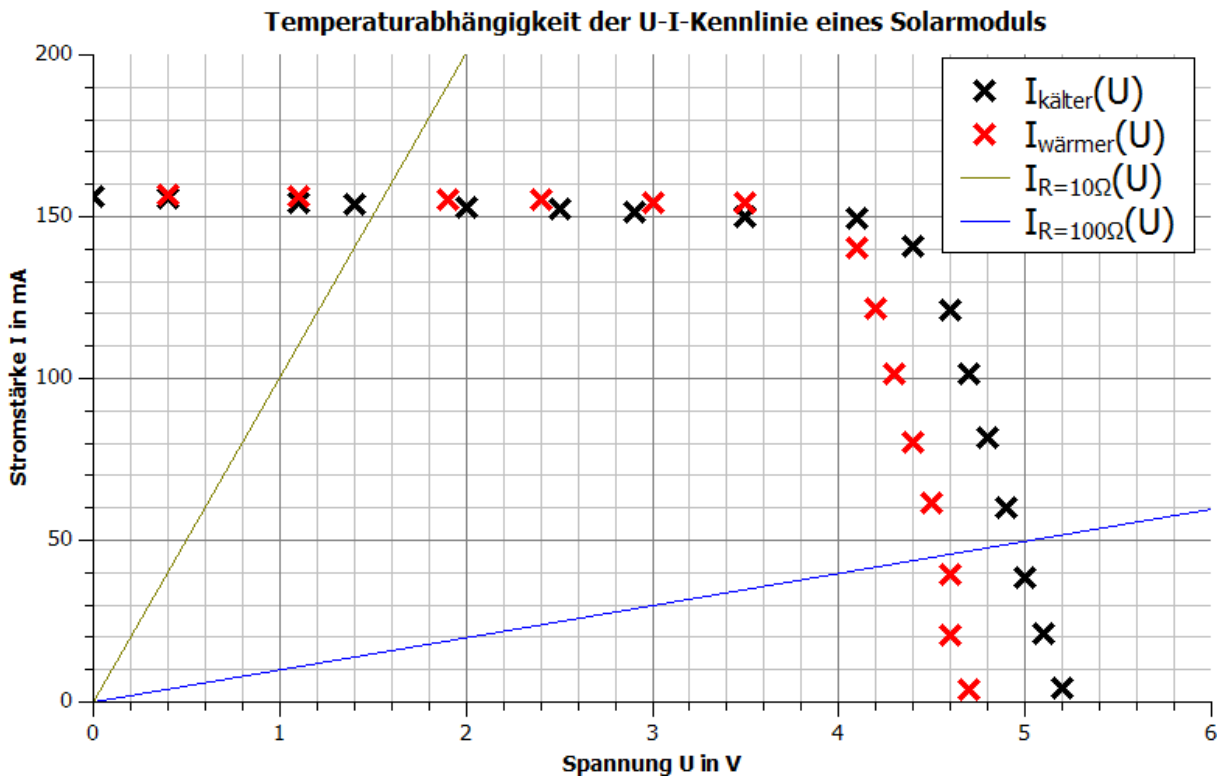
U in V	4,1	3,5	3	2,4	1,9	1,1	0,4		
I in mA	140,5	154,5	154,5	155,5	155,1	156,1	156,5		
P in mW	576,1	540,8	463,5	373,2	294,7	171,7	62,6		



### 1.3 Die I-U Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Temperatur

#### Auswertung

1. Trage deine Messwerte in das U-I- und U-P-Diagramm ein. Ergänze deine Messwerte mit den Ergebnissen aus Experiment 1.1.





## 1.3 Die I-U Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Temperatur

2. Vergleiche die U-I-Kennlinien und die U-P-Graphen bei unterschiedlichen Temperaturen.

Der qualitative Verlauf ist bei beiden U-I-Kennlinien gleich. Die größtmögliche Spannung ist bei zunehmender Temperatur geringer. Die maximal mögliche Stromstärke steigt hingegen leicht, da durch die Erwärmung des Halbleitermaterials mehr Elektronen freigesetzt werden.

Der qualitative Verlauf der beiden Leistungsgraphen ist gleich. Bis zu einer Spannung von etwa 4V ist die Leistung bei höheren Temperaturen leicht größer als bei niedrigeren. Ab dieser Spannung ist das Verhältnis umgekehrt. Bei niedrigen Temperaturen können höhere Spannungen und Leistungen erreicht werden.

3. Zeichne in dein die U-I-Kennlinie eines 10 $\Omega$ - und 100 $\Omega$ -Widerstands. Erläutere den Einfluss der Temperatur auf den MPP und die Leistungsabgabe an einen Widerstand.

Die Leistung am MPP sinkt mit zunehmender Temperatur. Je nach Widerstand kommt es durch die Temperaturerhöhung zu einer Erhöhung oder Verringerung der Leistung. Für den 10 $\Omega$ -Widerstand steigt die Leistung, wohingegen sie für den 100 $\Omega$ -Widerstand sinkt.





## 2. Grundlagenversuche zur Windkraft

### Ziele

Experiment 2.1: Abhängigkeit der Leistung von der Form der Flügel und dem Anstellwinkel

- Die Schüler messen die Spannung und die Stromstärke der Windkraftanlage bei unterschiedlichen Anstellwinkeln und Flügelformen.
- Die Schüler berechnen die zugehörigen Leistungswerte und stellen die Leistung in Abhängigkeit vom Anstellwinkel für die verschiedenen Flügelformen in einem Diagramm dar.
- Die Schüler beschreiben die Leistungsmesswerte und erkennen, dass die Windkraftanlage mit einem optimierten Profil und 25° Anstellwinkel die größte Leistung erreicht.
- Die Schüler erläutern die Ursachen für die Leistungsmesswerte.
- Die Schüler erläutern die Bedeutung des Anstellwinkels für den Betrieb einer Windkraftanlage.

Experiment 2.2: Abhängigkeit der Leistung von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren

- Die Schüler messen die Spannung und die Stromstärke der Windkraftanlage in Abhängigkeit von der Windstärke für verschiedene Anzahlen der Rotorblättern.
- Die Schüler berechnen die Leistung und tragen die Messwerte in Abhängigkeit von der Anzahl der Rotorblätter in ein Windgeschwindigkeits-Leistungs-Diagramm ein.
- Die Schüler beschreiben den Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit, Leistung und Anzahl der Rotorblätter und erkennen, dass die Windkraftanlage mit 3 Flügeln die größten Leistungen erreicht.
- Die Schüler erläutern, weshalb in der Realität Windkraftanlagen mit drei Rotorblättern bevorzugt werden.

Experiment 2.3: Abhängigkeit der Leistung von der Windrichtung

- Die Schüler messen die Spannung und die Stromstärke der Windkraftanlage in Abhängigkeit vom Einfallswinkel der Windrichtung.
- Die Schüler berechnen die Leistung und tragen die Messwerte in ein Einfallswinkel-Leistungs-Diagramm ein.
- Die Schüler erläutern die Notwendigkeit eines Motors zur Nabenausrichtung.
- Die Schüler erläutern die Vor- und Nachteile von Luvläufern.

### Vorwissen

- Die Schüler wissen, dass die Leistung das Produkt aus Spannung und Stromstärke ist
- Die Schüler kennen den grundlegenden Aufbau einer Windkraftanlage .
- Die Schüler wissen, dass sich Motoren zur Veränderung der Ausrichtung des Rotors und der Flügel, sowie eine Bremsvorrichtung in einer Windkraftanlage befinden.
- Die Schüler kennen die Vor- und Nachteile von Luvläufern

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- In der Auswertung aller Experimente sollte zusammenfassend herausgestellt werden, dass die Windkraftanlage mit 3 Rotorblättern, mit einem optimiertem Profil, mit einem Anstellwinkel von 25° und bei frontaler Windausrichtung die leistungsstärkste Windkraftanlage ist. Aus diesem Grund wird diese Konfiguration in den Smart Grid Experimenten verwendet. Für die Realität gilt dieser Umstand nicht, da beispielsweise der Anstellwinkel für eine optimale Leistungserzeugung der Windgeschwindigkeit angepasst wird.
- Experiment 2.1 kann zur Einführung in die Strömungsvorgänge bei verschiedene Anstellwinkeln und Profilen genutzt werden.
- Für weitere theoretische Hintergründe und Experimente zum Thema Windenergie nutzen sie das auf der leXsolar-CD vorhandene Lehrerheft leXsolar-Wind Ready-to-go.



## 2.1 Abhängigkeit der Leistung von der Form der Flügel und dem Anstellwinkel

### Aufgabe

Miss die Spannung und die Stromstärke für verschiedene Anstellwinkel und Rotorblatttypen.

### Vorbemerkung

Falls es zu einer Schwingbewegung des Rotors kommt, sollte er kurzzeitig vom Widerstand getrennt und nach der Stabilisierung wieder angeschlossen werden.

### Aufbau

### Geräte

- Grundeinheit
- Winderzeuger
- Windgenerator
- Optimiertes und flaches Flügelprofil
- 3-Blatt-Rotor mit 20°, 25° 30° 50° und 90°
- AV-Modul
- PowerModul 12V
- Potentiometermodul
- Kabel

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Baue einen Rotor mit 3 Flügeln und einem Anstellwinkel der Blätter von  $\alpha = 20^\circ$  auf und stecke ihn auf den Windgenerator. Stelle das Potentiometer auf  $40\Omega$ .
3. Versichere dich, dass alle Komponenten in Reihe geschaltet sind und die Spannung am Potentiometer in einer Parallelschaltung gemessen wird.
4. Schalte den Winderzeuger mit einer Spannung von 12V ein und miss die Spannung und die Stromstärke am Potentiometermodul. Erfasse die Messwerte in der Tabelle.
5. Wiederhole die Messung für alle anderen angegebenen Rotorblattanstellwinkel und das flache Profil.
6. Berechne aus den Messwerten die Leistung des Windgenerators.



## 2.1 Abhängigkeit der Leistung von der Form der Flügel und dem Anstellwinkel

### Messwerte

optimiertes Profil:

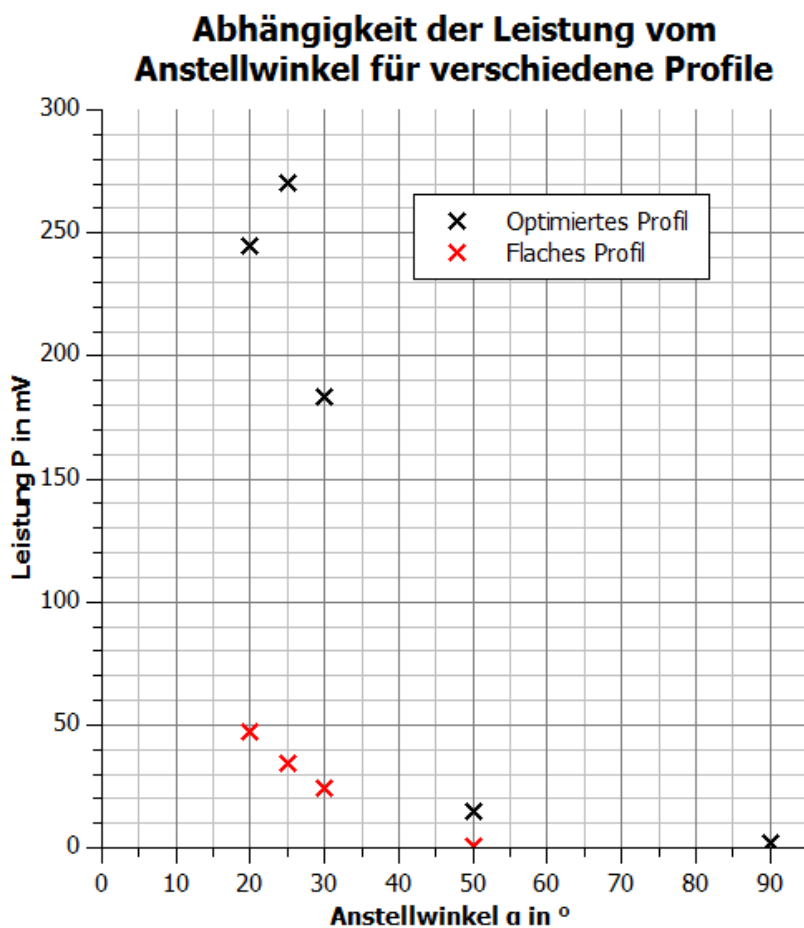
$\alpha / ^\circ$	20	25	30	50	90
U in V	3,1	3,3	2,7	0,8	0,3
I in mA	79	82	68	18,5	7,2
P in mW	244,9	270,6	183,6	14,8	2,2

flaches Profil:

$\alpha / ^\circ$	20	25	30	50	90
U in V	1,4	1,2	1	0,2	0,1
I in mA	33,8	28,8	24,5	5,2	1,5
P in mW	47,3	34,6	24,5	1	0,2

### Auswertung

- Trage die berechnete Leistung in Abhängigkeit vom Anstellwinkel  $\alpha$  jeweils für das optimierte und das flache Profil ab.





## 2.1 Abhängigkeit der Leistung von der Form der Flügel und dem Anstellwinkel

2. Beschreibe den Zusammenhang zwischen Profilform, Anstellwinkel und Leistung der leXsolar-Windkraftanlage.

Für das flache Profil gilt, dass die Leistung mit größerem Anstellwinkel kleiner wird. Für das optimierte Profil gilt, dass die höchste Leistung bei einem Anstellwinkel von  $25^\circ$  erzeugt wird. Je größer die Abweichung von diesem Winkel ist, desto kleiner ist die Leistung. Vergleicht man das optimierte mit dem flachen Profil, erkennt man, dass das optimierte Profil bei gleichem Anstellwinkel größere Leistungen ermöglicht.

3. Erläutere die Ursachen für die Leistungsunterschiede.

Durch die unterschiedlichen Anstellwinkel, wird der Luftstrom hinter dem Flügel beeinflusst. Es treten unterschiedliche Verwirbelungen der Luft auf, die der Bewegung des Flügels entgegenwirken.

Des Weiteren kommt es im Gegensatz zum flachen Profil beim optimierten Profil zu Auftriebskräften, die den Rotor zusätzlich antreiben (Siehe auf der leXsolar-CD im Theorieteil des Lehrerhefts leXsolar-Wind Ready-to-go unter Widerstands- und Auftriebsläufern).

4. Erläutere die Bedeutung des Anstellwinkels für die Verwendung in realen Windkraftanlagen.

Für den Fall, dass man die maximale Leistung erzeugen will, muss ein Anstellwinkel gefunden werden, unter dem sie optimal laufen. Dieser ist von der Windgeschwindigkeit abhängig. Je geringer die Windgeschwindigkeit ist, desto steiler muss der Anstellwinkel sein.

Um die Windkraftanlage bei stürmischem Wetter zu schützen, werden die Rotorblätter aus dem Wind gedreht, um die Feststellbremse zu entlasten.

## 2.2 Abhängigkeit der Leistung von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren

### Aufgabe

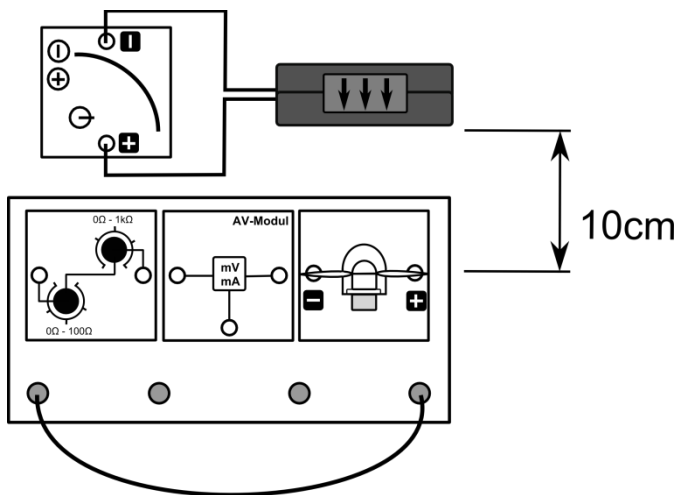
Miss die Spannung und die Stromstärke für 2-, 3- und 4-Blattrotoren.

### Vorbemerkung

Die einzelnen Rotoren brauchen unterschiedlich viel Zeit, bis sie eine konstante Umfangsgeschwindigkeit und damit eine konstante Spannung erzeugen. Ein Messwert sollte erst notiert werden, wenn er sich nicht mehr ändert.

Aufgrund der Windgeschwindigkeit kann es zu Schwingbewegung des Rotors kommen. Um diese zu verhindern, sollte die Windgeschwindigkeit in den Experimenten verringert statt erhöht werden.

### Aufbau



### Geräte

- Grundeinheit
- Winderzeuger
- Windgenerator
- Optimiertes Flügelprofil 25° 2-, 3-, 4-Flügler
- AV-Modul
- PowerModul
- Potentiometer
- Kabel

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Stecke den Zweiblattrotor auf den Windgenerator, stelle einen Abstand von 10 cm zwischen Rotor und Winderzeuger ein. Stelle das Potentiometermodul auf 40Ω.
2. Versichere dich, dass alle Komponenten in Reihe geschaltet sind und die Spannung am Potentiometer in einer Parallelschaltung gemessen wird.
3. Schließe die in der Tabelle vorgegebenen Spannungen an den Winderzeuger an. Beginne mit der höchsten. Miss die vom Windgenerator erzeugte Spannung und Stromstärke am Potentiometermodul für die weiteren Spannungen am Winderzeuger. Trage deine Werte in die Tabelle ein.
4. Wiederhole deine Messung mit dem Dreiblatt- und dem Vierblattrotor.



## 2.2 Abhängigkeit der Leistung von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren

## Messwerte

Zweiblattrotor:

$U_{\text{POW}}$ in V	5	6	7	8	9	10	11	12
v in m/s	3,4	4,3	5,1	5,8	6,4	7	7,5	8
U in V	0	0	0,23	1,9	2,3	2,6	2,8	3,1
I in mA	0	0	5,7	47,4	56,4	65	71	77
P in mW	0	0	1,3	90,1	129,7	169	198,8	238,7

Dreiblattrotor:

$U_{\text{POW}}$ in V	5	6	7	8	9	10	11	12
v in m/s	3,4	4,3	5,1	5,8	6,4	7	7,5	8
U in V	0	0	1,8	2,1	2,5	2,8	3	3,3
I in mA	0	0	43,2	53	61,5	69,5	76,5	82
P in mW	0	0	77,8	111,3	153,8	194,6	229,5	270,6

Vierblattrotor:

$U_{\text{POW}}$ in V	5	6	7	8	9	10	11	12
v in m/s	3,4	4,3	5,1	5,8	6,4	7	7,5	8
U in V	0	1,4	1,8	2,1	2,4	2,7	3	3,2
I in mA	0	33,8	43	52	60	68	73,9	79,2
P in mW	0	47,3	77,4	109,2	144	183,6	221,7	253,4

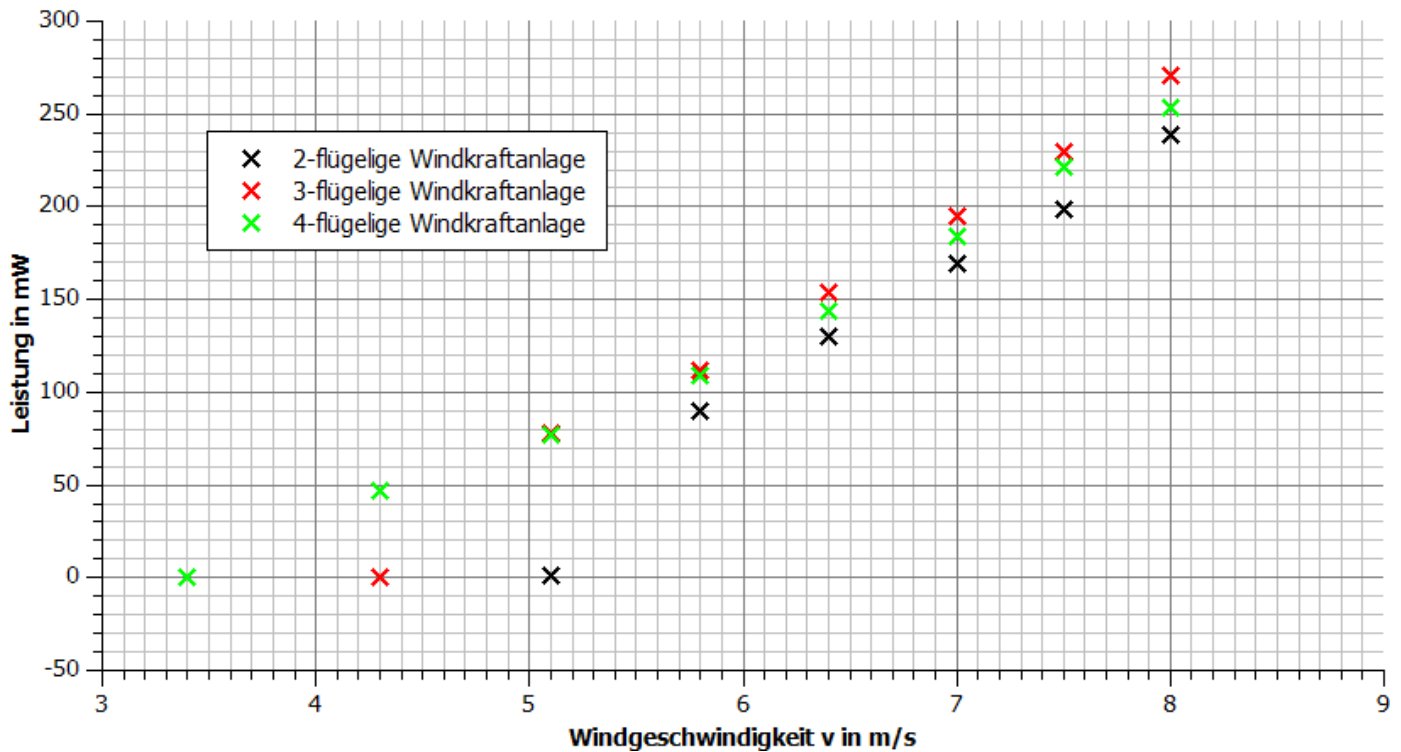


## 2.2 Abhängigkeit der Leistung von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren

### Auswertung

1. Trage deine Messwerte in das Windgeschwindigkeit-Leistung-Diagramm ein.

**Abhängigkeit der Leistung von der Windgeschwindigkeit für 2-, 3- und 4-flügrige Windkraftanlagen**



2. Beschreibe den Zusammenhang zwischen der Anzahl der Flügel, der Windgeschwindigkeit und der Leistung der leXsolar-Windkraftanlage

Je größer die Windgeschwindigkeit ist, desto größer ist die Leistung. Die Windkraftanlage mit 4 Rotoren benötigt eine geringere Windgeschwindigkeit, um mit der Drehbewegung zu starten, als die mit 2 oder 3 Rotoren. Analog gilt dies für die Windkraftanlage mit 3 Rotoren im Vergleich mit 2 Rotoren. Die Windkraftanlage mit 3 Rotoren kann die größten Leistungen erzielen. (Achtung: Dieser Umstand gilt in der Realität nicht. Hier sind Windkraftanlagen mit 4 Rotorblättern leistungsfähiger. Ursache sind die unterschiedlichen Strömungsverhältnisse.)

3. Erläutere, weshalb in der Realität 3-flügelige Windkraftanlagen den beiden anderen Typen bevorzugt werden.

- Einblattrotoren haben den Vorteil, dass sie aufgrund des geringeren Materialaufwands kostengünstiger sind, jedoch benötigen sie ein Gegengewicht, das einen unruhigen Lauf und eine starke Materialbeanspruchung verursacht.<sup>48</sup>
- Dreiblattrotoren laufen optisch ruhiger, passen aus ästhetischer Sicht besser in die Landschaft und haben größere Leistungswerte als Zweiblattrotoren.<sup>49</sup>
- Vierblattrotoren erzeugen nur unwesentlich mehr Energie. Zusätzliche Kosten durch Rotorblätter rentieren sich nicht.<sup>50</sup>

<sup>48</sup> Quaschnig Seite 253

<sup>49</sup> Quaschnig Seite 254

<sup>50</sup> <http://www.wdr.de/tv/kopfball/sendungsbeitraege/2010/1017/windraeder.jsp>

## 2.3 Abhängigkeit der Leistung von der Windrichtung

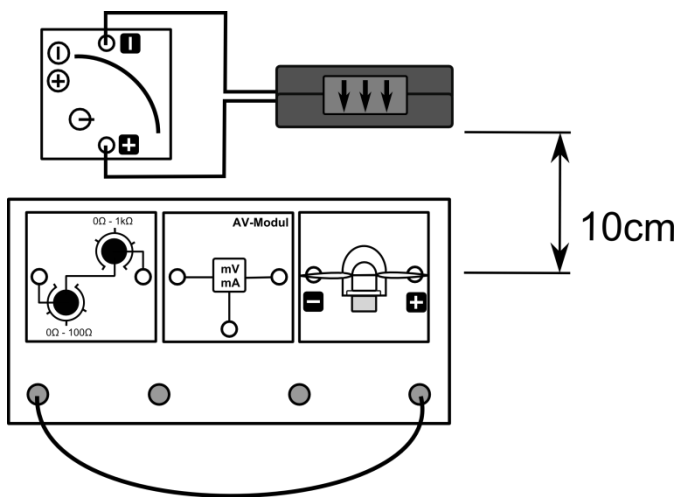
### Aufgabe

Miss die Spannung und die Stromstärke für verschiedene Windrichtungen.

### Vorbemerkung

Die Windkraftanlage darf während der Versuche aufgrund von Verletzungsgefahren nicht angefasst werden.

### Aufbau



### Geräte

- Grundeinheit
- Winderzeuger
- Windgenerator
- Optimiertes Flügelprofil 25° 3-Flügler
- AV-Modul
- PowerModul 12V
- Potentiometer
- Kabel

### Durchführung

1. Stelle die Windkraftanlage im Abstand von 10cm zum Winderzeuger und richte sie zu Beginn mit einem Drehwinkel von  $0^\circ$  zum Winderzeuger aus. Stelle das Potentiometermodul auf  $40\Omega$ .
2. Versichere dich, dass alle Komponenten in Reihe geschaltet sind und die Spannung am Generator in einer Parallelschaltung gemessen wird.
3. Schalte den Winderzeuger über das Stromversorgungsgerät bei einer Spannung von 12V ein und miss die Spannung und die Stromstärke am Generator. Trage deine Messwerte in die Tabelle ein und schalte die Stromversorgung wieder ab.
4. Drehen nun den Windgenerator um  $10^\circ$ . Wiederhole die Messung mit den entsprechenden Winkeleinstellungen und trage sämtliche Messwerte in die Tabelle ein.
5. Berechne die Leistung zu jeder Spannung und Stromstärke.

### Messwerte

$\alpha$ in $^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
U in V	3,3	3,2	3,1	2,7	2,4	1,8	0,9	0,3	0	0
I in mA	82	81	76,5	68	58	45	21,7	7,8	0	0
P in mW	270,6	259,2	237,2	183,6	139,2	81	19,5	2,3	0	0

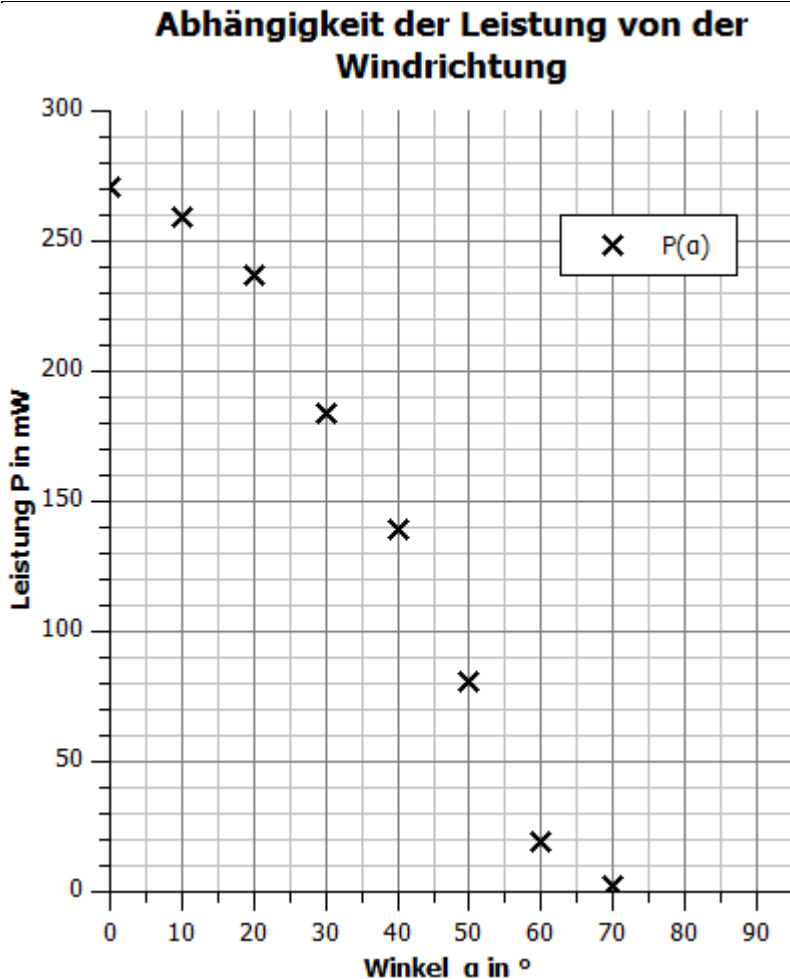




## 2.3 Abhängigkeit der Leistung von der Windrichtung

### Auswertung

1. Trage die Messwerte in das  $\alpha$ -P-Diagramm ein.



2. Beschreibe und erkläre den Zusammenhang zwischen Leistung und Winkel der leXsolar-Windkraftanlage.

Je seitlicher der Wind auf die Rotorblätter trifft, desto geringer ist die Leistung. Der Graph hat einen ähnlichen Verlauf, wie der Kosinus-Graph. Dies liegt daran, dass in erster Näherung die effektiv vom Wind getroffene Fläche vom Kosinus des Winkels abhängt. Ebenso könnte man in einer vektoriellen Betrachtung sagen, dass auf die Gesamtfläche nur der Kosinus des Betrages der Geschwindigkeit auf die Gesamtfläche auftrifft (vgl. Experiment 2.2). Durch die Reibung wird dieser Zusammenhang nur näherungsweise in den Messwerten wiedergegeben.

3. Erläutere Konsequenzen, die in der Realität gezogen wurden, um die Leistung zu maximieren.

Die Gondel von Windkraftanlagen wird durch einen zusätzlichen Motor immer in den Wind gedreht. Hierbei muss allerdings beachtet werden, dass die Kabeführung nicht behindert wird.<sup>51</sup>

<sup>51</sup> <http://www.wind-energie.de/infocenter/technik/funktionsweise/leelaeufer>



## 2.3 Abhängigkeit der Leistung von der Windrichtung

4. Erläutere, ob die Leistung unabhängig davon ist, ob der Wind von vorne oder hinten weht. Informiere dich über weitere Vor- und Nachteile von Luv- (Wind weht von vorne) und Leeläufern (Wind weht von hinten).
- Leeläufer haben eine geringere Leistung bei gleicher Windstärke, weil ein Teil des Windes durch den Turm abgeschattet wird.
  - Bei Leeläufern kommt es durch Verwirbelungen zwischen Rotorblatt und Turm zu mehr Lärmentwicklung und mechanischer Beanpruchung.<sup>52</sup>
  - Leeläufer haben den Vorteil, dass sie sich in den Wind drehen (passive Windnachführung)<sup>53</sup>
  - Leeläufer haben den Vorteil, dass ihre Flügel nicht gegen den Turm gedrückt werden können.<sup>54</sup>

---

<sup>52</sup> Quaschnig Seite 258

<sup>53</sup> <http://www.wind-energie.de/infocenter/technik/funktionsweise/leelaeufer>

<sup>54</sup>

[http://www.energiwelten.de/elexikon/lexikon/seiten/htm/050508\\_Leelaeufer\\_und\\_Luvlaeufer\\_versch\\_Windkraftanlagen.htm](http://www.energiwelten.de/elexikon/lexikon/seiten/htm/050508_Leelaeufer_und_Luvlaeufer_versch_Windkraftanlagen.htm)



## 3.1-3.2 Reversible Brennstoffzelle: Elektrolysebetrieb

## Ziele

## Experiment 3.1: Die U-I-Kennlinie eines Elektrolyseurs

- Die Schüler messen die U-I-Kennlinie des Elektrolyseurs und stellen sie in einem U-I-Diagramm dar.
- Die Schüler erläutern anhand der U-I-Kennlinie, dass die reversible Brennstoffzelle erst ab einer bestimmten Spannung Elektrolyse betreibt und je größer die Spannung ist, desto größer ist die Stromstärke und die erzeugte Menge an Wasserstoff und Sauerstoff.

## Experiment 3.2: Verhalten der Spannung und Stromstärke des Elektrolysevorgangs

- Die Schüler messen die Spannung und die Stromstärke einer reversiblen Brennstoffzelle bei einer konstanten Spannung in Abhängigkeit von der Zeit des Aufladens.
- Die Schüler erkennen anhand der Messwerte, dass die Spannung und die Stromstärke zeitlich konstant sind.
- Die Schüler erläutern anhand der Messwerte, dass sich die reversible Brennstoffzelle bei einer konstanten Spannung, wie ein zeitlich konstanter Widerstand verhält.
- Die Schüler erläutern anhand der Messwerte aus Experiment 3.1, dass die reversible Brennstoffzelle kein Ohmscher Widerstand ist.
- Die Schüler berechnen die maximale Energiemenge der reversiblen Brennstoffzelle.

## Vorwissen

- Die Schüler beherrschen den Umgang mit Wirkungsgraden.
- Die Schüler wissen, dass die Leistung das Produkt aus Spannung und Stromstärke ist.
- Die Schüler wissen, dass das Produkt aus Zeit und konstanter Leistung die Energie ist.
- Den Schülern sollte vor den Versuchen erläutert werden, dass es sich bei der reversiblen Brennstoffzelle um eine Kombination aus einem Elektrolyseur und einer Brennstoffzelle handelt. In der Praxis sind beide Geräte immer getrennt.

## Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Die Füllstandsmarkierung besitzt eine relativ große Ausdehnung und Adhäsionskräfte sorgen dafür, dass das Wasser am Behälterrand höher steht als in der Mitte. Dadurch kann die Messung des Füllstand zu Abweichungen der Ergebnisse führen. In der Musterlösung gilt der Füllstand als erreicht, wenn die höchste und die niedrigste Wasserlinie den gleichen Abstand zur Mitte der Markierung haben.
- Die reversible Brennstoffzelle kann bei der Energieaufnahme unzuverlässig arbeiten, wenn die Membran zu trocken ist.
- Es bietet sich an, den Aufbau und die Funktionsweise eines Elektrolyseurs zu erklären. Für weitere theoretische Hintergründe und Experimente zum Thema Energiespeicher nutzen sie das auf der CD vorhandene Lehrerheft leXsolar-EStore Large.
- In der Vorbereitung auf die Smart Grid-Experimente sollten den Schülern die physikalischen und technischen Eigenschaften der Brennstoffzelle bewusst sein. In den Smart-Grid-Experimenten werden die Energiespeicher in erster Linie wegen ihrer technischen Eigenschaften eingesetzt und nicht, weil sie in der Realität in dieser Form eingesetzt werden.



## 3.1 U-I-Kennlinie eines Elektrolyseurs

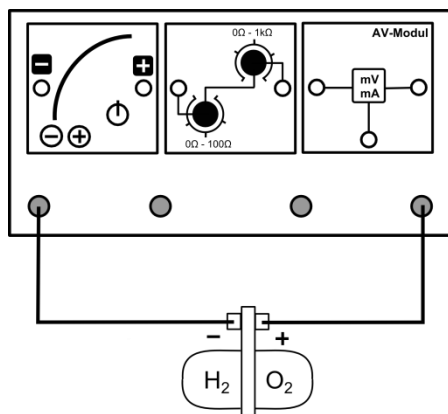
### Aufgabe

Nimm die U-I-Kennlinie des Elektrolyseurs in der reversiblen Brennstoffzelle auf.

### Vorbemerkung

Die reversible Brennstoffzelle besteht aus einem Elektrolyseur und einer Brennstoffzelle. Beim Aufladen wandelt der Elektrolyseur unter Zufuhr von elektrischer Energie Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff um. Die Brennstoffzelle betreibt den umgekehrten Prozess und kann damit eine elektrische Leistung bereitstellen.

### Aufbau



### Geräte

- Grundeinheit
- PowerModul
- AV-Modul
- Reversible Brennstoffzelle
- Potentiometermodul
- Kabel

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Fülle die reversible Brennstoffzelle entsprechend der Anleitung in der Beschreibung der Einzelteile mit destilliertem Wasser.
2. Versichere dich, dass alle Komponenten in Reihe geschaltet sind und die Spannung über der reversiblen Brennstoffzelle in einer Parallelschaltung gemessen wird.
3. Stelle die Spannung am PowerModul auf 0,5V und das Potentiometer auf den niedrigsten Widerstand. Miss die Spannung und die Stromstärke, wenn sich die Werte nicht mehr ändern. Erhöhe die Spannung am PowerModul in 0,5V-Schritten und wiederhole die Messung. Erhöhe die Spannung solange schrittweise, bis der Elektrolyseur erstmals dauerhaft Energie aufnimmt.
4. Behalten die PowerModulspannung bei und erhöhe den Widerstand des Potentiometers auf 100Ω, sodass die Spannung an der reversiblen Brennstoffzelle wieder sinkt. Verringere den Widerstand wieder schrittweise, sodass die Spannung am Elektrolyseur in 0,01V-Schritten steigt. Notiere dir für jeden Schritt die Spannung und die Stromstärke. Beende die Messung, sobald die Stromstärke innerhalb des Potentiometermoduls 150mA erreicht. (Hinweis: Um die Spannung optimal einzustellen, ist es manchmal hilfreich die Spannung um 0,5V am PowerModul zu erhöhen. Beim Wechsel sollte der Widerstand mindestens 20Ω betragen, da sonst zu hohe Stromstärken auftreten können).
5. Berechne aus den Messwerten die aufgenommene Leistung des Elektrolyseurs.



## 3.1 U-I-Kennlinie eines Elektrolyseurs

## Messwerte

U in V	0,6	1	1,42	1,43	1,44	1,45	1,46	1,47			
I in mA	1	2	1,8	2,8	4,4	6,8	9,1	12,8			
P in mW	0,6	2	2,6	4	6,3	9,9	13,3	18,8			

U in V	1,48	1,49	1,5	1,51	1,52	1,53	1,54	1,55			
I in mA	16,8	23,7	31,6	40,3	48,1	56,6	67,1	78,3			
P in mW	24,9	35,3	47,4	60,9	73,1	86,6	103,3	121,4			

U in V	1,56	1,57	1,58	1,59	1,6	1,61					
I in mA	89	100,2	110,7	124,2	136,9	150,5					
P in mW	138,8	157,3	174,9	197,5	219	242,3					



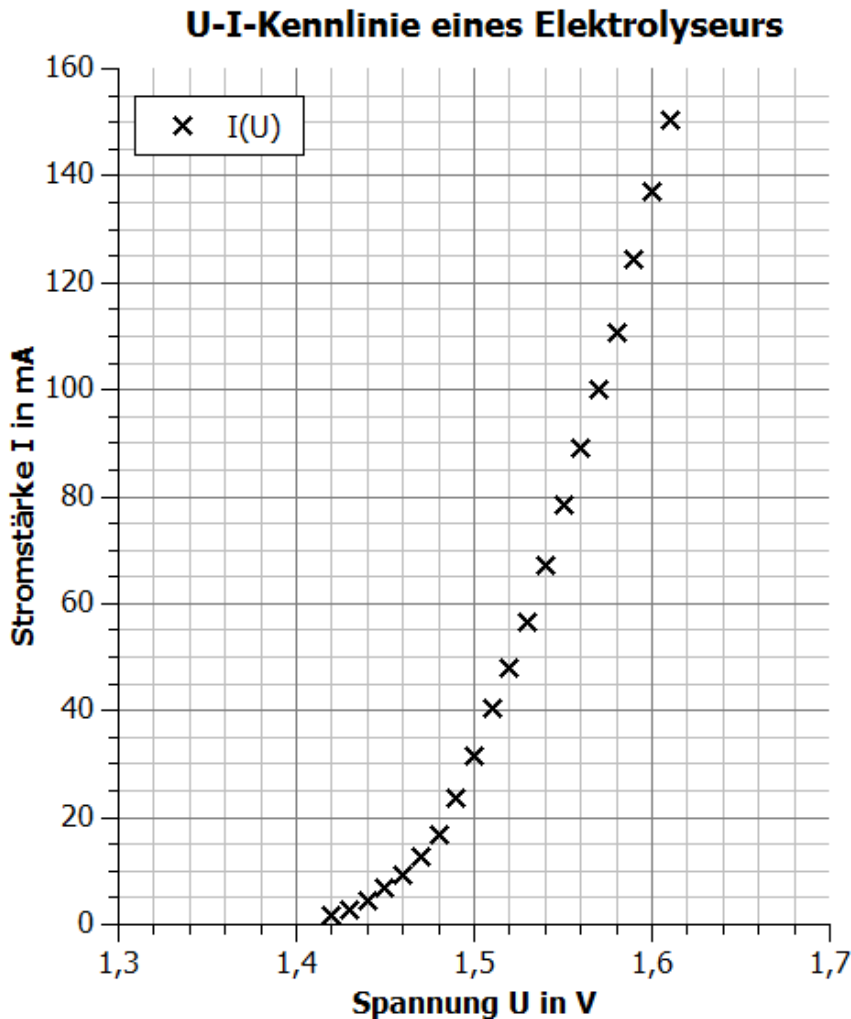
## 3.1 U-I-Kennlinie eines Elektrolyseurs

### Auswertung

1. Benenne Messunsicherheiten während des Experiments.

Es ist schwierig, die genaue Spannung einzustellen. Der Bereich der zugehörigen Stromstärken ist sehr groß. Des Weiteren verändern sich die Werte noch nachträglich.

2. Trage deine Messwerte im Intervall [1,3V ; 1,7V] in das U-I-Diagramm ein.



3. Beschreibe den Zusammenhang zwischen angelegter Spannung und Stromstärke eines Elektrolyseurs.

Bis zu einer Spannung von 1,41V ist die Stromstärke null. Ab dieser Spannung steigt die Stromstärke mit zunehmender Spannung.

4. Interpretiere die Messwerte in Bezug auf die Bedeutung des Aufladeverhaltens. (Hinweis: Der Elektrolyseur stellt bei größeren Leistungen mehr Wasserstoff und Sauerstoff pro Zeiteinheit her).

Für das Aufladeverhalten bedeutet dies, dass der Elektrolyseur erst ab einer bestimmten Spannung das Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff umwandelt. Je größer die angelegte Spannung ist, desto größer ist die Stromstärke und die Leistung, die an den Elektrolyseur abgegeben wird. Damit wird bei größeren Spannungen innerhalb der Brennstoffzelle schneller Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten.



## 3.2 Verhalten der Spannung und Stromstärke während des Ladevorgangs eines Elektrolyseurs

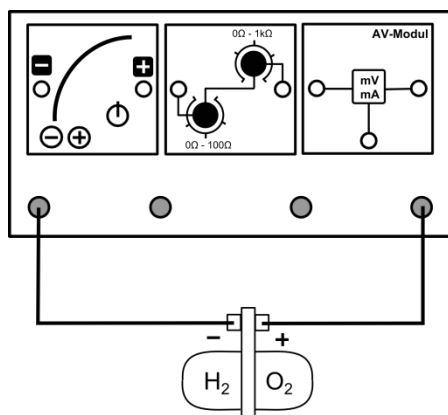
### Aufgabe

Nimm den zeitlichen Verlauf der Spannung und der Stromstärke eines Elektrolyseurs auf.

### Vorbemerkungen

Die Füllwiderstandsanzeige besitzt eine große Ausdehnung, Die Anzeige ist erreicht, wenn der Abstand der oberen und der unteren Wasserlinie zur Mitte der Markierung gleich ist.

### Aufbau



### Geräte

- Grundeinheit
- PowerModul
- AV-Modul
- Reversible Brennstoffzelle
- Potentiometermodul
- Kabel
- Uhr

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Fülle die reversible Brennstoffzelle entsprechend den Anweisungen in der Einzelteilbeschreibung destilliertem Wasser. Stelle das PowerModul auf 2V und das Potentiometer auf den niedrigsten Widerstand.
2. Versichere dich, dass alle Komponenten in Reihe geschaltet sind und die Spannung über der reversiblen Brennstoffzelle in einer Parallelschaltung gemessen wird.
3. Schalte das PowerModul ein. Beobachte die Spannung und die Stromstärke während des gesamten Versuchs. Miss die beiden Größen zu den gegebenen Zeitpunkten bis 5ml Wasserstoff hergestellt wurden. Notiere die Dauer des Versuchs.

### Messwerte

t in s	10	30	60	120	180	240	300	360	420
U in V	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6			
I in mA	167	163	162	161	160	160			

Zeit bis 5ml Wasserstoff hergestellt wurden:  $t=261s$



## 3.2 Verhalten der Spannung und Stromstärke während des Ladevorgangs eines Elektrolyseurs

### Auswertung

1. Beschreibe das Verhalten von Spannung und Stromstärke während des Versuchs.

Die Spannung und die Stromstärke sind nahezu konstant. Die Spannung liegt bei 1,6V und die Stromstärke bei 161mA. Im Laufe des Versuchs nimmt die Spannung geringfügig zu und die Stromstärke leicht ab. Die Ursache dieses Effekts ist das kapazitive Verhalten der beiden Elektroden.

2. Beschreibe das Verhalten des Elektrolyseurs als Widerstand.

In einem einfachen Stromkreis verhält sich der Elektrolyseur wie ein zeitlich konstanter Widerstand, da der Spannungsabfall und die Stromstärke annähernd konstant bleiben. Es ist jedoch kein Ohm'scher Widerstand, da kein linearer Zusammenhang zwischen Strom und Spannung besteht (Siehe U-I-Kennlinie).

3. Bestimme die maximale Energiemenge, die der Elektrolyseur in Form von Wasserstoff speichern kann (der Elektrolyseur hat einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von 80%).

Die durchschnittliche Leistung während des Ladevorgangs liegt bei  $P = U \cdot I \approx 1,6V \cdot 160mA \approx 256mW$ .

Nach 261s wurde damit eine Energie von  $E_{5ml} \approx 66,8Ws$  verbraucht.

Der Wasserstofftank wird schneller gefüllt als der Sauerstofftank, da pro Spaltung 2 Wasserstoffatome und ein Sauerstoffatom entstehen. Wenn er voll ist, kann die reversible Brennstoffzelle keine Energie mehr aufnehmen. Seine Füllmenge liegt bei ca. 14,5ml. Damit entspricht die maximale eingespeiste Energie  $E_{14,5ml} = E_{5ml} \cdot \frac{14,5ml}{5ml} \approx 193,8Ws$

Bei einem Wirkungsgrad von durchschnittlich 80% ist damit die gespeicherte Energiemenge  $E_{ges} = E_{14,5ml} \cdot 0,8 \approx 155Ws$ .





## 3.3-3.4 Reversible Brennstoffzelle: Brennstoffzellenbetrieb

### Ziele

#### Experiment 3.3 I-U-Kennlinie einer Brennstoffzelle

- Die Schüler messen die U-I-Kennlinie und die U-P- Kennlinie einer Brennstoffzelle und stellen sie in einem Diagramm dar.
- Die Schüler erläutern anhand der Diagramme, dass die von der Brennstoffzelle erzeugte Spannung und die Leistungsabgabe vom angeschlossenen Widerstand abhängen.

#### Experiment 3.4 Entladekurve einer Brennstoffzelle

- Die Schüler messen die Spannung und die Stromstärke beim Entladen an einem konstanten Widerstand in Abhängigkeit von der Zeit.
- Die Schüler erläutern anhand der Messwerte, dass sich die reversible Brennstoffzelle wie eine Spannungsquelle verhält, deren Spannung jedoch vom Widerstand abhängt.
- Die Schüler berechnen den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle und der reversiblen Brennstoffzelle.

### Vorwissen

- Die Schüler beherrschen den Umgang mit Wirkungsgraden und mathematische Kenntnisse.
- Die Schüler wissen, dass die Leistung das Produkt aus Spannung und Stromstärke ist.
- Die Schüler wissen, dass das Produkt aus Zeit und Leistung die Energie ist.

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Die Füllstandsmarkierung besitzt eine relativ große Ausdehnung und Adhäsionskräfte sorgen dafür, dass das Wasser am Behälterrand höher steht als in der Mitte. Dadurch kann die Messung des Füllstand zu Abweichungen der Ergebnisse führen. In der Musterlösung gilt der Füllstand als erreicht, wenn die höchste und die niedrigste Wasserlinie den gleichen Abstand zu der Mitte der Markierung haben.
- Die reversible Brennstoffzelle kann bei der Energieabgabe unzuverlässig arbeiten, wenn die Brennstoffzelle zu lange mit Wasser gefüllt war.
- Die Experimente bieten sich an, die prinzipielle Funktionsweise einer Brennstoffzelle zu erklären. Für weitere theoretische Hintergründe und Experimente zum Thema Energiespeicher nutzen sie das auf der CD vorhandene Lehrerheft EStore large.
- In der Vorbereitung auf die Smart Grid-Experimente sollten den Schülern die physikalischen und technischen Eigenschaften der reversiblen Brennstoffzelle bewusst sein. In den Smart-Grid-Experimenten werden die Energiespeicher in erster Linie wegen ihrer technischen Eigenschaften eingesetzt und nicht, weil sie in der Realität in dieser Form eingesetzt werden.



### 3.3 I-U-Kennlinie einer Brennstoffzelle

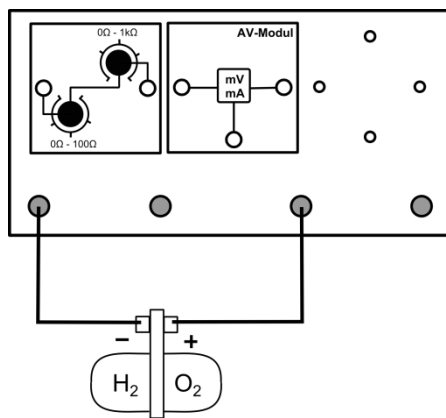
#### Aufgabe

Nimm die I-U-Kennlinie einer Brennstoffzelle auf.

#### Vorbemerkungen

Führe den Versuch zügig durch, damit du mit einer Tankfüllung möglichst viele Messwerte aufnehmen kannst.

#### Aufbau



#### Geräte

- Grundeinheit
- AV-Modul
- Reversible Brennstoffzelle
- Potentiometermodul
- Kabel

#### Durchführung

1. Betreibe die reversible Brennstoffzelle zunächst im Elektrolyseurbetrieb (siehe Versuchsaufbau 3.1 und 3.2) und erzeuge mindestens 5ml Wasserstoff. Baue den Versuch anschließend entsprechend der Versuchsanordnung auf. Stelle das Potentiometermodul auf den maximalen Widerstand.
2. Versichere dich, dass alle Komponenten in Reihe geschaltet sind und die Spannung über der reversiblen Brennstoffzelle in einer Parallelschaltung gemessen wird.
3. Miss für verschiedene Stromstärken die Spannung der Brennstoffzelle. Drehe zunächst den 1kΩ Widerstand am Potentiometer auf 0Ω und danach den 100Ω-Widerstand, um bestimmte Stromstärken einzustellen. Die Schrittweite sollte bei mindestens bei 10mA liegen. Versuche nicht, bestimmte vorgegebene Stromstärkewerte einzustellen, da die Regelgenauigkeit des Potentiometers dies nicht zulässt. Führe die Messung bis zu einer Stromstärke von 150mA durch.
4. Berechne die Leistung der Brennstoffzelle für die einzelnen Messwerte.

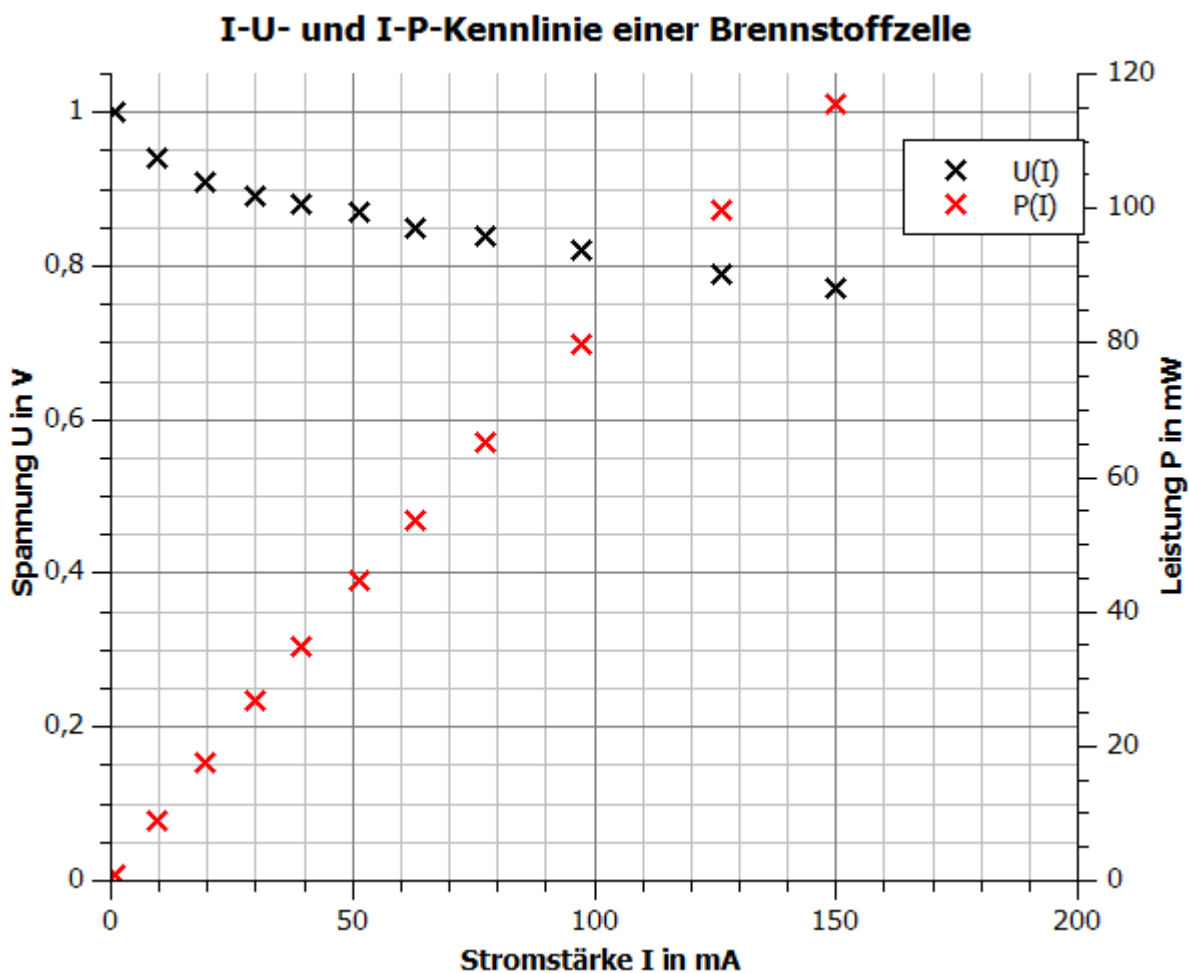
## 3.3 I-U-Kennlinie einer Brennstoffzelle

## Messwerte

I in mA	0,8	9,4	19,5	30	39,4	51,5	63	77,5	97,2	126,5	150	
U in V	1	0,94	0,91	0,89	0,88	0,87	0,85	0,84	0,82	0,79	0,77	
P in mW	0,8	8,8	17,7	26,7	34,7	44,8	53,6	65,1	79,7	99,9	115,5	

## Auswertung

1. Trage deine Messwerte in das I-U- und das I-P-Diagramm ein.



2. Beschreibe den Verlauf der Messpunkte.

Die  $U(I)$ -Messpunkte nehmen bis zu einer Stromstärke von 20mA sehr schnell ab. Ab dieser Stromstärke ist der Zusammenhang zwischen Stromstärke und Spannung bis 150mA annähernd linear. Die Spannung geht mit steigender Stromstärke nur relativ langsam zurück.  
Die Leistung steigt im Intervall  $[0\text{mA}; 150\text{mA}]$  annähernd linear an.



### 3.3 I-U-Kennlinie einer Brennstoffzelle

3. Erläutere Schlussfolgerungen aus den Messwerten für die Nutzung der reversiblen Brennstoffzelle als Energieerzeuger.
  - Es gibt eine maximal mögliche Spannung von ca. 1V.
  - Die Brennstoffzelle legt an verschiedene Verbraucher nicht die gleiche Spannung an, sondern die Spannung hängt vom Verbraucher ab.
  - Die Brennstoffzelle gibt an einen Verbraucher keine konstante Leistung ab, sondern es richtet seine Leistung nach dem Verbraucher.

## 3.4 Verhalten der Spannung und Stromstärke während des Entladevorgangs der Brennstoffzelle

### Aufgabe

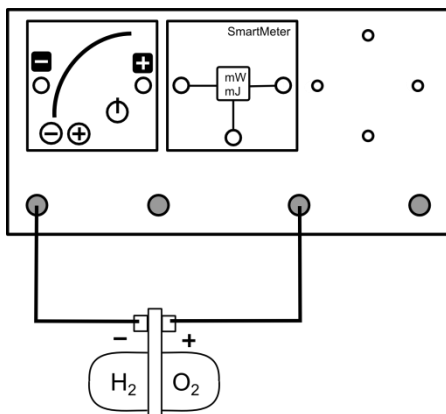
Nimm die t-U und t-I-Kennlinie einer Brennstoffzelle auf.

### Geräte

- Grundeinheit
- PowerModul
- SmartMeter
- AV-Modul
- Reversible Brennstoffzelle
- Potentiometermodul  $20\Omega$
- Kabel

### Aufbau

#### Aufladen



#### Entladen



### Durchführung

1. Baue den Versuch zum Aufladen der reversiblen Brennstoffzelle entsprechend der Versuchsaufbaus auf. Stelle das PowerModul auf 1,5V. Setze die Energieanzeige am SmartMeter auf 0Ws zurück.
2. Versichere dich, dass alle Komponenten in Reihe geschaltet sind und die Spannungsmessung des SmartMeters an der reversiblen Brennstoffzelle in einer Parallelschaltung erfolgt.
3. Schalte das PowerModul ein und erzeuge 5ml Wasserstoff. Öffne den Schalter am SmartMeter und schalte das PowerModul aus. Halte den Messwert der zugeführten Energie fest.
4. Baue den Versuch zum Entladen entsprechend der Versuchsanordnung auf. Drehe das Potentiometer auf einen Widerstand von  $20\Omega$ . Stelle die Energieanzeige auf dem SmartMeter wieder auf null.
5. Schließe den Schalter am SmartMeter, starte die Zeitmessung und miss für 3 Minuten die Stromstärke und die Spannung der Brennstoffzelle zu den gegebenen Zeitpunkten. Halte deine Messwerte in der Tabelle fest.



### 3.4 Verhalten der Spannung und Stromstärke während des Entladevorgangs der Brennstoffzelle

6. Nimm das Potentiometer aus dem Stromkreis, indem du das linke Kabel in den rechten Steckplatz steckst und wartest bis die Brennstoffzelle keine Energie mehr abgibt. Notiere die Gesamtenergie, die von der Brennstoffzelle abgegeben wurde.

#### Messwerte

Die zugeführte Energie beträgt:  $E_{in} = 81,6Ws$

t in s	10	30	60	120	180
I in mA	51,2	40,4	41,5	41,8	42
U in V	1	0,8	0,8	0,8	0,8

Die abgegebene Energie beträgt:  $E_{ab} = 16,5Ws$

#### Auswertung

1. Beschreibe den Verlauf der Messpunkte.

Die Stromstärke und die Spannung verhalten sich während des Experiments annähernd konstant. Die Stromstärke liegt durchschnittlich bei 42mA und die Spannung bei 0,8V. Nur zu Beginn der Messung ist die Spannung aufgrund der Kapazität der Elektroden höher. Sowohl die Stromstärke als auch die Spannung nehmen daher in den ersten 30s ab.

2. Benenne Konsequenzen für den dauerhaften Betrieb von Verbrauchern mit Brennstoffzellen.

Die Spannung der Brennstoffzelle ist konstant und hängt nicht vom Füllstand der Gastanks ab.

3. Berechne den Gesamtwirkungsgrad der reversiblen Brennstoffzelle und den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle allein (der Wirkungsgrad des Elektrolyseurs beträgt 80%).

Der Gesamtwirkungsgrad beträgt  $\eta_{ges} = \frac{E_{ab}}{E_{in}} = \frac{16,5Ws}{81,6Ws} \approx 0,2 = 20\%$

Damit hat die Brennstoffzelle einen Wirkungsgrad von  $\eta_{Brenn} = \frac{\eta_{ges}}{\eta_{Elekt}} \approx \frac{20}{80} \approx 0,25 = 25\%$



## 3.5-3.7 Die t-U- und t-I-Kennlinien eines Kondensators beim Auf- und Entladen

### Ziele

Experiment 3.5: Die t-U- und die t-I-Kennlinie eines Kondensators beim Aufladen

- Die Schüler nehmen die t-U- und t-I-Kennlinien eines Kondensators beim Aufladen auf.
- Die Schüler beschreiben die physikalischen Vorgänge während des Aufladens.
- Die Schüler berechnen den Innenwiderstand des Kondensators in Abhängigkeit von der Zeit und erkennen, dass er sich zeitlich nicht konstant verhält.
- Die Schüler vergleichen das Aufladeverhalten des Kondensator mit dem der reversiblen Brennstoffzelle.

Experiment 3.6: Die t-U- und die t-I-Kennlinie eines Kondensators beim Entladen

- Die Schüler nehmen die t-U- und t-I-Kennlinie eines Kondensators beim Entladen auf.
- Die Schüler beschreiben die physikalischen Vorgänge während des Entladens.
- Die Schüler messen die eingespeiste und abgegebene Energie und berechnen den Wirkungsgrad.
- Die Schüler berechnen die Leistung zu den verschiedenen Zeitpunkten und vergleichen das Spannungs- und Leistungsverhalten mit der reversiblen Brennstoffzelle.
- Der Schüler erklären, dass der Kondensator weder eine zeitlich konstante Spannungsquelle noch Leistungsquelle ist.
- Die Schüler berechnen die volumetrische und gravimetrische Energiedichte des Kondensators und der reversiblen Brennstoffzelle und vergleichen die beiden Speichertechnologien kritisch.
- Die Schüler erläutern, dass die Energiedichte der Brennstoffzelle größer ist als die des Kondensators.

Experiment 3.7: Betrieb des Elektroautos mit dem Kondensator und der Brennstoffzelle

- Die Schüler vergleichen das Verhalten der Kondensator- und Brennstoffzellenspannung in Abhängigkeit von der Zeit durch die Geschwindigkeit des Elektroautos.

### Vorwissen

- Die Schüler kennen die physikalischen Vorgänge innerhalb eines Kondensators.
- Die Schüler beherrschen den Umgang mit Wirkungsgraden und haben mathematische Kenntnisse zu Dichte- und Volumenberechnungen.
- Die Schüler wissen, dass die Leistung das Produkt aus Spannung und Stromstärke ist.
- Die Schüler kennen den Begriff der Energiedichte.
- Die Schüler können die gravimetrische (auch: spezifische) und volumetrische Energiedichte bestimmen.

### Vorversuche

- Experimente 3.1 bis 3.4

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Der Versuch 3.7 ist eine Veranschaulichung des unterschiedlichen Entladeverhaltens von Kondensator und Brennstoffzelle.
- In der Vorbereitung auf die Smart Grid-Experimente sollten den Schülern die physikalischen und technischen Eigenschaften des Kondensators bewusst sein. In den Smart-Grid-Experimenten werden die Energiespeicher in erster Linie wegen ihrer technischen Eigenschaften eingesetzt und nicht, weil sie in der Realität in dieser Form eingesetzt werden.



### 3.5-3.7 Die t-U- und t-I-Kennlinien eines Kondensators beim Auf- und Entladen

- Die Experimente können dazu dienen, Vor- und Nachteile verschiedener Speichertechnologien zu diskutieren.
- Für weitere theoretische Hintergründe und Experimente zum Thema Energiespeicher nutzen sie das auf der CD vorhandene Lehrerheft EStore large.
- Bei der Bewertung der Energiespeicher bietet es sich an die Vorteile eines Kondensators anzusprechen (hohe Leistungsdichte, sehr hohe Zyklenzahl).<sup>55</sup>

---

<sup>55</sup> Vgl. <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/eignung-von-speichertechnologien-zum-erhalt-der-systemsicherheit,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>



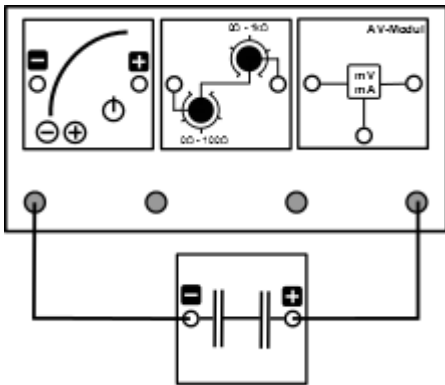


## 3.5 t-U- und t-I-Kennlinie eines Kondensators beim Aufladen

### Aufgabe

Nimm die t-U- und die t-I-Kennlinie eines 5,4V-5F-Doppelschichtkondensators während des Ladevorgangs auf.

### Aufbau



### Geräte

- Grundeinheit
- PowerModul
- AV-Modul
- Potentiometer
- Kondensatormodul
- Uhr
- Kabel

### Durchführung

1. Entlade den Kondensator vor dem Versuch in dem du ihn kurzschließt. Die Spannung im Kondensator sollte weniger als 0,15V betragen.
2. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Stelle das Potentiometer auf einen Widerstand von  $40\Omega$  und das PowerModul auf 5,5V.
3. Versichere dich, dass alle Komponenten in Reihe geschaltet sind und die Spannung über dem Kondensator in einer Parallelschaltung gemessen wird.
4. Schalte das PowerModul ein und beginne mit der Zeitmessung. Miss zu den gegebenen Zeitpunkten die Spannung am Kondensator und die Stromstärke, die in ihn hineinfließt.

### Messwerte

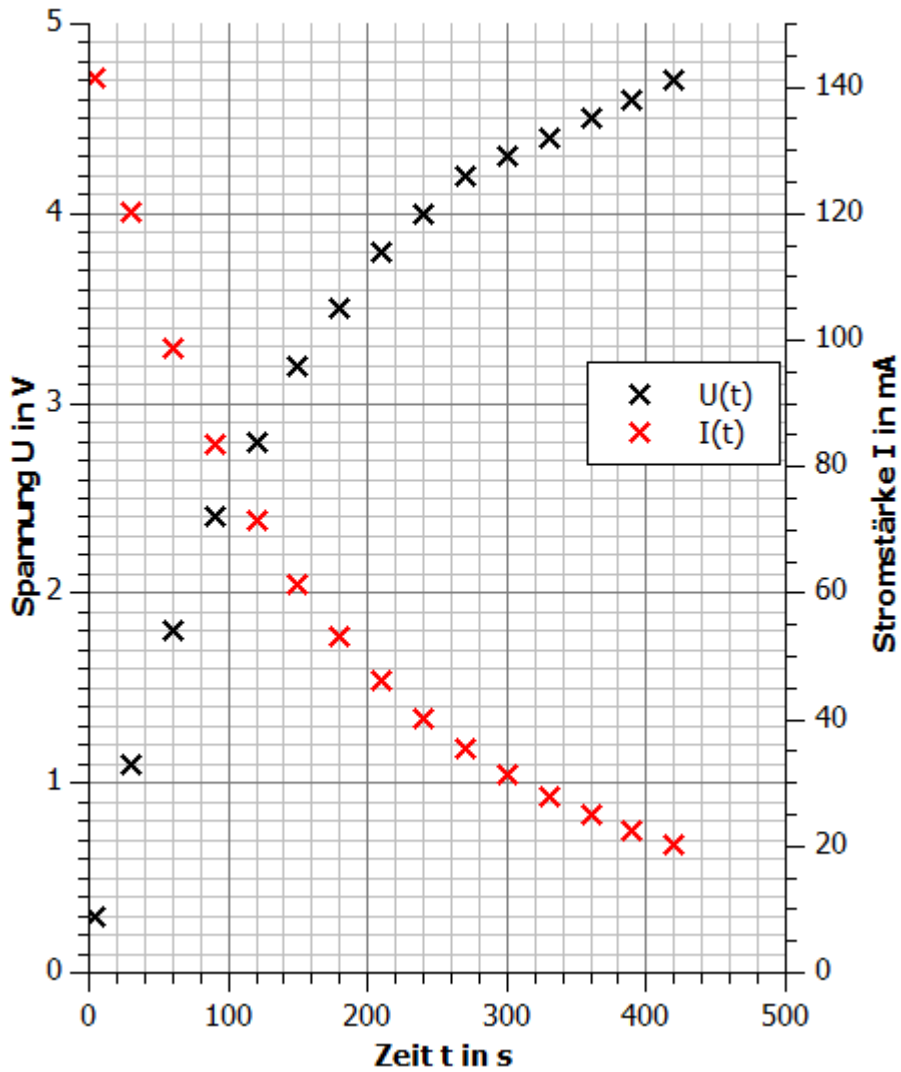
t in s	5	30	60	90	120	150	180	210
U in V	0,3	1,1	1,8	2,4	2,8	3,2	3,5	3,8
I in mA	141,4	120,1	98,7	83,6	71,4	61,5	53,1	46,1
R in $\Omega$	2,3	9,2	18,6	28,5	39,6	52	65,9	81,3

t in s	240	270	300	330	360	390	420
U in V	4	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7
I in mA	40,3	35,6	31,3	27,9	24,9	22,4	20,1
R in $\Omega$	98,3	116,6	137,4	159,1	182,7	207,6	235,8

## 3.5 t-U- und t-I-Kennlinie eines Kondensators beim Aufladen

## Auswertung

1. Trage deine Messwerte in das t-U- und das t-I-Diagramm ein.

**t-U- und t-I-Kennlinie eines Kondensators**



### 3.5 t-U- und t-I-Kennlinie eines Kondensators beim Aufladen

2. Beschreibe den Verlauf des Zeit-Spannungs- und des Zeit-Stromstärke-Graphen. Erkläre diesen Verlauf und begründe, welchen Werten sich die Spannung und die Stromstärke immer weiter annähern.

Mit zunehmender Zeit nimmt die Spannung immer weiter zu, wohingegen die Stromstärke immer mehr abnimmt. Der Verlauf kann als exponentielles Wachstum beziehungsweise Zerfall angesehen werden.

Die Ursache für die Zunahme der Spannung im Kondensator liegt darin, dass mit zunehmender Zeitdauer immer mehr elektrische Ladungsträger in den Kondensator gelangen. Da das elektrische Feld innerhalb des Kondensators dem elektrischen Feld der Spannungsquelle entgegengesetzt ist, nimmt die Anzahl der Ladungen, die pro Zeiteinheit in den Kondensator gelangen immer mehr ab. Dies ist anhand der kleiner werdenden Stromstärke zu erkennen. Durch die geringere Anzahl Ladungen, die in den Kondensator fließen, baut sich auch die Spannung in gleichen Zeitabständen immer langsamer auf.

Letztendlich strebt der Betrag der Spannung innerhalb des Kondensators mit zunehmender Zeitdauer dem Spannungsbetrag der Spannungsquelle (5,5V) entgegen. Dieser Wert wird nicht überschritten, da sonst keine Ladungen aus der Spannungsquelle mehr in den Kondensator fließen würde. Die Stromstärke strebt gegen 0mA, da immer weniger Ladungen in den Kondensator fließen.

3. Berechne den Widerstand des Kondensators zu den verschiedenen Zeitpunkten. Beschreibe anhand der Widerstandswerte das Verhalten eines Kondensators als Verbraucher, wenn er sich ohne Vorwiderstand in einen Stromkreis befindet.

Der Kondensator wirkt in dem Stromkreis wie ein Widerstand, der seinen Widerstand mit zunehmender Zeitdauer immer mehr erhöht. Im Experiment nimmt er Widerstandswerte zwischen  $2\Omega$  und  $235\Omega$  an. Ohne Vorwiderstand nimmt ein Kondensator während des gesamten Ladevorgangs theoretisch alle Widerstandswerte zwischen  $0\Omega$  und einem unendlich großen Widerstand an.

Hinweis: Durch den Vorwiderstand steigt zunächst die Leistung am Kondensator bevor sie sinkt.

4. Vergleiche dieses Verhalten mit dem eines Elektrolyseurs. Nutze hierzu deiner Messwerte aus Experiment 3.2.

Beim Experiment 3.2 waren die Spannung und die Stromstärke am Elektrolyseur konstant. Sie betragen  $U=1,6V$  und  $I=160mA$ . Damit war der Widerstand des Elektrolyseurs zeitlich konstant bei  $R=10\Omega$ . Im Gegensatz zum Kondensator bezieht der Elektrolyseur damit eine zeitlich konstante Leistung, die unabhängig vom Ladezustand ist.



## 3.6 t-U- und t-I-Kennlinie eines Kondensators beim Entladen

### Aufgabe

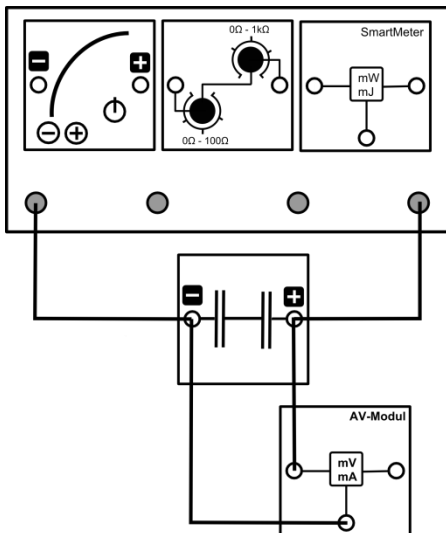
Nimm die t-U- und die t-I-Kennlinie eines 5,4V-5F-Doppelschichtkondensators während des Entladevorgangs auf.

### Geräte

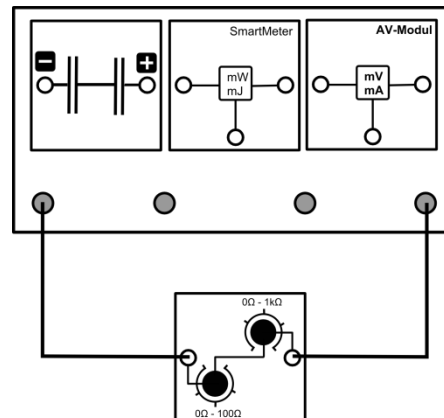
- Grundeinheit
- PowerModul
- AV-Modul
- SmartMeter
- Potentiometer
- Kondensatormodul
- Uhr
- Kabel

### Aufbau

#### Aufladen



#### Entladen





## 3.6 t-U- und t-I-Kennlinie eines Kondensators beim Entladen

### Durchführung

1. Baue zum Aufladen den Versuch entsprechend der Versuchsanleitung auf. Stelle das Potentiometer auf einen Widerstand von  $40\Omega$  und das PowerModul auf eine Spannung von  $5,5V$ .
2. Schalte das PowerModul ein und lade den Kondensator auf eine Spannung von  $4V$ . Trenne die Kabel vom Kondensator sobald die Spannung von  $4V$  erreicht ist. Halte den Messwert der eingespeisten Energie fest.
3. Baue zum Entladen den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. SchlieÙe noch nicht das Kabel an die Grundeinheit an. Setze den Energiewert am SmartMeter wieder auf  $0Ws$ .
4. Versichere dich, dass alle Komponenten in Reihe geschaltet sind und die Spannungsmessung des SmartMeters an dem Kondensator in einer Parallelschaltung erfolgt.
5. SchlieÙe nun das Kabel an die Grundeinheit an und beginne mit der Zeitmessung. Miss zu den gegebenen Zeitpunkten die Spannung am Kondensator und die Stromstärke, die er abgibt. Halte die abgegebene Energie des Kondensators fest.

### Messwerte

Die zugeführte Energie beträgt:  $E_{in} = 43,1J$

t in s	5	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
U in V	3,7	3,2	2,8	2,4	2	1,7	1,5	1,3	1,1	0,9	0,8
I in mA	94	82,2	70,1	59,9	51,5	43,8	37,7	32,2	27,7	23,7	20,4
P in mW	347,8	263	196,3	143,8	103	74,5	56,6	41,9	30,5	21,3	16,3

t in s	330	360	390	420	450	480	510	540	570	600
U in V	0,7	0,6	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,225	0,2
I in mA	17,5	15,2	13,1	11,3	9,8	8,5	7,4	6,5	5,5	5
P in mW	12,3	9,1	6,6	5,1	3,9	3	2,2	1,6	1,2	1

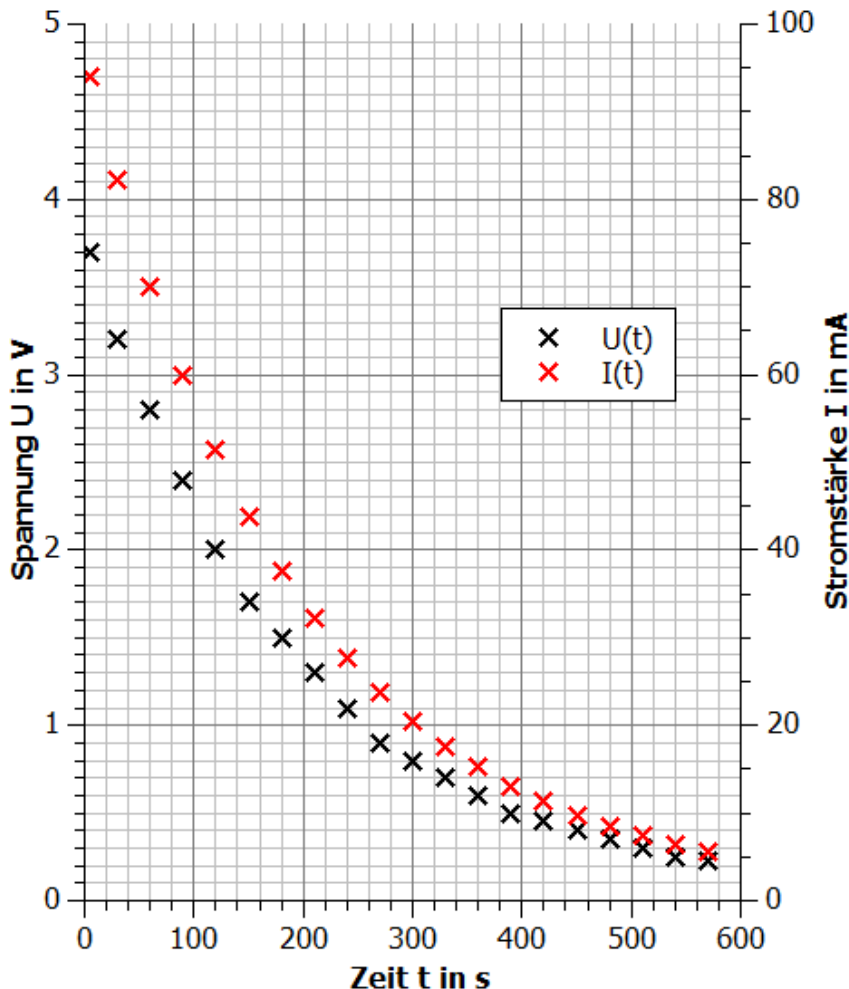
Die abgegebene Energie beträgt:  $E_{ab} = 34,9J$

## 3.6 t-U- und t-I-Kennlinie eines Kondensators beim Entladen

## Auswertung

1. Trage deine Messwerte in das t-U- und das t-I-Diagramm ein.

### t-U- und t-I-Kennlinie eines Kondensators beim Entladen



2. Beschreibe den Verlauf des Zeit-Spannungs- und des Zeit-Stromstärke-Graphen. Erkläre diesen Verlauf und begründe, welchen Werten sich die Spannung und die Stromstärke immer weiter annähern.

Mit zunehmender Zeit nehmen die Spannung und die Stromstärke exponentiell ab.

Die Ursache für die Abnahme der Spannung im Kondensator liegt darin, dass sich mit zunehmender Zeitdauer immer weniger Ladungen im Kondensator befinden. Somit sinkt die elektrische Feldstärke innerhalb des Kondensator. Durch die geringere Spannung verlassen durch den konstanten Widerstand auch immer weniger Ladungen pro Zeiteinheit den Kondensator. Dies drückt sich in der sinkenden Stromstärke aus.

3. Berechne die Leistung des Kondensators zu den verschiedenen Zeitpunkten. Vergleiche das Leistungsverhalten des Kondensators mit dem der Brennstoffzelle mit Hilfe deiner Messergebnisse aus Experiment 3.2 und 3.4.

Im Gegensatz zur Brennstoffzelle ist beim Kondensator weder die Spannung noch die Leistung zeitlich konstant.



### 3.6 t-U- und t-I-Kennlinie eines Kondensators beim Entladen

4. Berechne den Wirkungsgrad des Kondensators und vergleiche ihn mit der reversiblen Brennstoffzelle. Erkläre dein Ergebnis.

Die dem Kondensator zugeführte Energie betrug:  $E_{in} = 43,1J$

Die vom Kondensator abgegebene Energie betrug  $E_{ab} = 34,9J$

Damit beträgt der Wirkungsgrad  $\eta = \frac{E_{ab}}{E_{in}} = \frac{34,9J}{43,1J} \approx 0,81 = 81\%$

Der Wirkungsgrad des Kondensators ist wesentlich höher als der der reversiblen Brennstoffzelle. Ursache dafür ist der zusätzliche Energieumwandelungsschritt von elektrischer in chemische Energie in der Brennstoffzelle. Der Kondensator speichert elektrische Energie direkt im elektrischen Feld.

5. Um Speichersysteme miteinander zu vergleichen, wird die Energiedichte genutzt. Die Energiedichte ist die gespeicherte Energie pro Volumen oder pro Masse des Speichermediums. Berechne die Energiedichte des Wasserstoffs in der reversiblen Brennstoffzelle und des Kondensators bezüglich des Volumens und der Masse. Für die einzelnen Energiespeicher gelten folgende Werte:

Ein Kondensatorzylinder:  $r = 1cm, h = 2,5cm, m = 3g$

Reversible Brennstoffzelle:  $\rho_{Wasserstoff} = 0,09 \frac{g}{ml}$

Nutze ebenfalls deine Ergebnisse aus Experiment 3.2

#### Kondensator

Volumen eines Kondensatorzylinders:  $V_{Zyl} = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot (1cm)^2 \cdot 2,5cm \approx 7,85cm^3$

Gesamtvolumen des Kondensators:  $V = 2 \cdot V_{Zyl} \approx 15,7cm^3$

Abgebbare Gesamtenergie:  $E_{ges} = \eta_{Kon} \cdot E_{gesamt} = \eta_{Kon} \cdot \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = 0,81 \cdot \frac{1}{2} \cdot 5F \cdot (5,4V)^2 \approx 59Ws$

Volumetrische Energiedichte:  $\omega_V = \frac{E_{ges}}{V} = \frac{59Ws}{15,7cm^3} = 3,76 \frac{Ws}{cm^3}$

Gravimetrische Energiedichte:  $\omega_g = \frac{E_{ges}}{m} = \frac{59Ws}{6g} = 9,83 \frac{Ws}{g}$

#### Reversible Brennstoffzelle

Abgebbare Energiemenge:  $E_{ges} = \eta_{rev\ Brennstoffzelle} \cdot E_{gesamt} \approx 0,2 \cdot 193,8Ws \approx 38,8Ws$

Volumetrische Energiedichte:  $\omega_V = \frac{E_{ges}}{V} = \frac{38,8Ws}{14,5cm^3} = 2,7 \frac{Ws}{cm^3}$

Gravimetrische Energiedichte:  $\omega_g = \frac{E_{ges}}{m} = \frac{E_{ges}}{\rho \cdot V} = \frac{38,8Ws}{0,09 \frac{g}{ml} \cdot 14,5ml} = 29,7 \frac{Ws}{g}$

6. Bewerte deine Ergebnisse.

Die volumetrische Energiedichte des Kondensators ist höher als die des Wasserstoffs in der Brennstoffzelle. Die gravimetrische Energiedichte von Wasserstoff ist hingegen größer als die des Kondensators. Die Energiedichte von Wasserstoff kann durch das Komprimieren des Gases erhöht werden, sodass sie deutlich höher liegt, als die eines Kondensators.

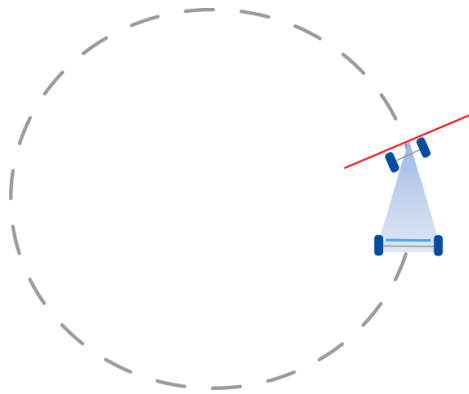


## 3.7 Betrieb des Elektroautos mit dem Kondensator und der Brennstoffzelle

### Aufgabe

Beobachte das Fahrverhalten des Autos.

### Aufbau



### Geräte

- Elektroauto mit Modulplatte
- PowerModul
- Kondensatormodul
- Reversible Brennstoffzelle
- Kabel
- Uhren

### Durchführung

1. Zum Aufladen werden der Kondensator und die Brennstoffzelle direkt an das PowerModul angeschlossen.
2. Lade den Kondensator bis zu einer Spannung von 3V auf. Erhöhe dazu alle 10s die Spannung am PowerModul um 0,5V und verbleibe für 30s bei einer Spannung von 3V.
3. Lade die reversible Brennstoffzelle bei einer Spannung von 2V so lange auf, bis Wasserstoff aus dem Tank entweicht.
4. Miss die Zeit, die das Auto mit dem Kondensator und der reversiblen Brennstoffzelle für 2, (4, 6, 8, 10,...) Runden benötigt.
5. Berechne die Zeit  $\Delta t$  für die vergangenen 2 Runden.

### Messwerte

Anzahl der Runden	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$t_{\text{Kondensator}}$ in s	4	9	16	-	-	-	-	-	-	-
$\Delta t_{\text{Kondensator}}$ in s	4	5	7	-	-	-	-	-	-	-
$t_{\text{Brennstoffzelle}}$ in s	16,1	31,8	46,8	61,6	76,1	90,4	104,8	119,3	134	148,9
$\Delta t_{\text{Brennstoffzelle}}$ in s	16,1	15,7	15	14,8	14,5	14,3	14,4	14,5	14,7	14,9

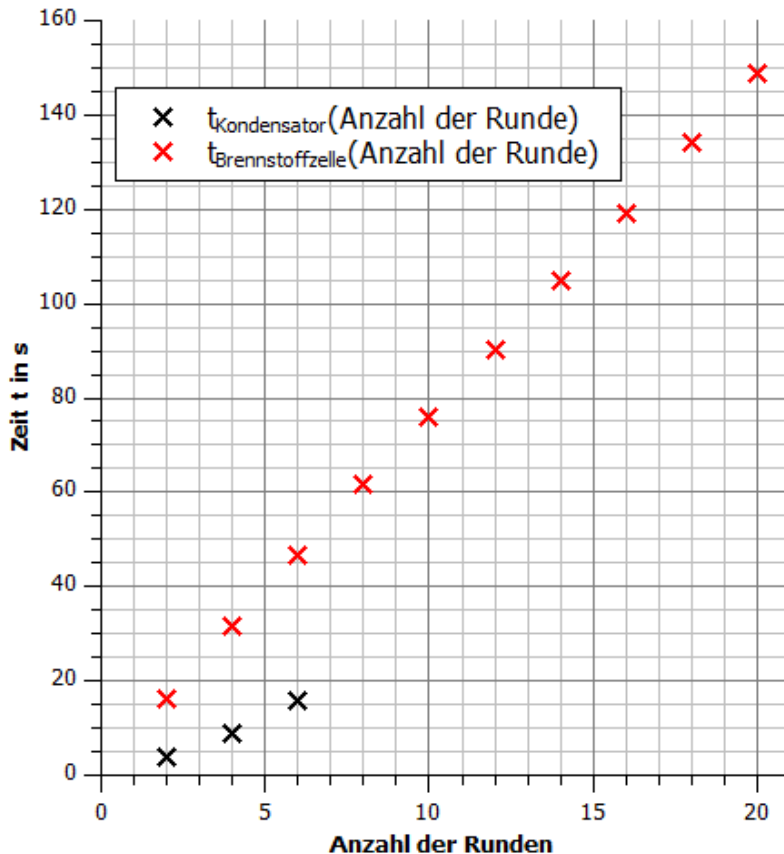




## 3.7 Betrieb des Elektroautos mit dem Kondensator und der Brennstoffzelle

### Auswertung

1. Trage deine Messwerte in das Anzahl der Runden-Zeit-Diagramm ein.



2. Beschreibe die Bewegung der Fahrzeuge mit Hilfe deiner Beobachtungen und des Diagramms.

Mit dem Kondensator ist das Fahrzeug zu Beginn der Bewegung schneller gefahren als mit der Brennstoffzelle. Dies bestätigen die Messwerte, da das Fahrzeug in den ersten sechs Runden pro Runde weniger Zeit benötigte.

Die Geschwindigkeit des „Kondensator-Fahrzeugs“ nahm mit der Zeit allerdings ab. Für die ersten zwei Runden benötigte es 4s, für die nächsten zwei 5s, und für die letzten zwei 7s. Die Geschwindigkeit des „Brennstoffzellenfahrzeugs“ blieb hingegen annähernd konstant bei 15s. Dies erkennt man auch daran, dass die Messpunkte auf einer Linie liegen.

Mit der Brennstoffzelle als Antrieb ist das Fahrzeug länger gefahren als mit dem Kondensator. Dies hängt allerdings mit der Speicherkapazität der beiden Antriebsarten zusammen und gibt keine Rückschlüsse darauf, dass brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge länger fahren als Kondensatorbetriebene.

3. Ziehe Rückschlüsse auf die Eigenschaften der Spannung, die der Kondensatoren und die Brennstoffzellen an den Motor anlegen.

Für den Kondensator war zu beobachten, dass die Geschwindigkeit immer weiter abnahm, je länger das Fahrzeug fuhr. Da geringere Spannung eine geringere Geschwindigkeit bedeuten, kann man darauf schließen, dass die Spannung des Kondensators abnahm.

Für die Brennstoffzelle war zu beobachten, dass die Geschwindigkeit annähernd konstant aber geringer war. Damit legt die Brennstoffzelle eine konstante Spannung an den Motor an, die allerdings geringer als die anfängliche Spannung des Kondensators ist.



## 4.1 Die Leistungsschwankungen einer Photovoltaikanlage

### Ziele

- Die Schüler messen die Leistungsabgabe einer Photovoltaikanlage während eines simulierten Tages.
- Die Schüler zeichnen die Leistungskurve einer Photovoltaikanlage.
- Die Schüler wiederholen die Funktionsweise einer Solarzelle.
- Die Schüler benennen Einflussfaktoren auf die Maximalleistung und erkennen so, dass die Kurve von Tag zu Tag verschieden sein kann.
- Die Schüler bewerten die Zuverlässigkeit und Vorhersagbarkeit der Leistungsabgabe.
- Die Schüler vergleichen die Zuverlässigkeit der Leistungsabgabe mit brennstoffbetriebenen Kraftwerken.
- Die Schüler üben die Bedienung des AV-Moduls, des Potentiometers und die Simulation eines Tages mit der Azimutwinkelskala.

### Vorwissen

- Die Schüler können die Relativität zwischen der Bewegung der Lampe und der Solarzelle nachvollziehen.
- Die Schüler wissen, dass die Leistung das Produkt aus Spannung und Stromstärke ist.
- Die Schüler kennen die Abhängigkeit der Leistung von der Temperatur bei einer Photovoltaikanlage.
- Die Schüler kennen die Funktionsweise des Solarmoduls.
- Die Schüler sind mit der Handhabung der Experimentierkomponenten vertraut und haben den Zusammenhang zwischen der Azimutwinkelscheibe und der Uhrzeit verstanden.
- Die Schüler können natürliche und technische Einflüsse aus ihrem Alltag auf die Leistung der Photovoltaikanlage benennen.
- Die Schüler wissen grundlegende Fakten zur Vorhersagbarkeit von Wettererscheinungen
- Die Schüler wissen, dass die Leistung fossiler Kraftwerke manuell regelbar ist.

### Vorversuche

- Experiment 1.1: Die U-I-Kennlinie des Solarmoduls.
- Experiment 1.2: Die U-I-Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke.
- Experiment 1.3: Die U-I-Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Temperatur.

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Für eine bessere Aufnahme und Vergleichbarkeit der Messergebnisse ist es hilfreich, die Azimutwinkelskala auf dem Tisch zu fixieren.
- Für eine bessere Vergleichbarkeit der Experimente ist es hilfreich während des Versuchs nicht im oder zu nah seitlich des Strahlengangs zu stehen.
- Für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse dürfen die Schüler während des Versuchs nicht den Widerstand ändern, da es sonst zu einer Veränderung der Leistung bei gleichen Ausgangsbedingungen kommt. Die in dem Experiment aufgenommene Leistung entspricht nicht der maximalen Leistung des Solarmoduls bei der entsprechenden Beleuchtung. Für jede Beleuchtungsstärke und Temperatur gibt es einen Maximum-Power-Point (MPP), der nur mit Hilfe eines MPP-Trackers gefunden werden kann. Ein solcher MPP-Tracker ist im Solarmodul nicht eingebaut (weitere Informationen dazu siehe Versuch U-I-Kennlinie des Solarmoduls).



## 4.1 Die Leistungsschwankungen einer Photovoltaikanlage

- Um die Aufgabe 1. b) zu bearbeiten, muss der Einfluss der Temperatur auf die Leistung groß sein. Die Messwerte sollten für eine gute Sichtbarkeit des Temperatureinflusses nicht zu schnell aufgenommen werden.
- Das Experiment eignet sich zur Vertiefung des Themas „Vorhersage von Wettererscheinungen“
- Natürliches Sonnenlicht beeinflusst die Ergebnisse. Die Musterlösungen wurden in einem von Jalousien abgedunkelten Raum aufgenommen.



## 4.1 Die Leistungsschwankungen einer Photovoltaikanlage

### Aufgabe

Nimm die Leistungskurve einer Photovoltaikanlage (des Solarmoduls) im Laufe eines simulierten Tages auf.

### Vorbemerkung

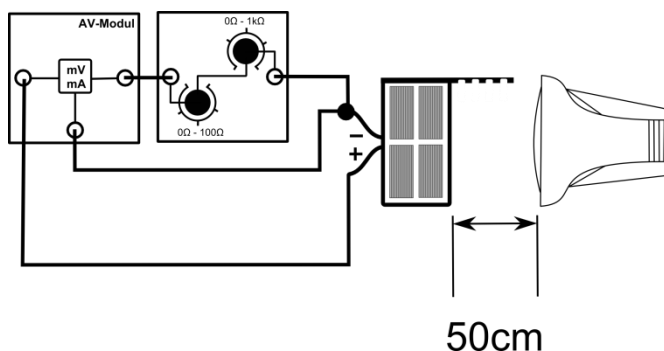
In der Simulation steht das Solarmodul stellvertretend für eine Photovoltaikanlage und die Lampe für die Sonne. In der Realität bewegt sich die Sonne am Himmel und verändert beständig ihren Einstrahlwinkel zur PV-Anlage. In dieser Simulation wird nicht die Lampe (Sonne) bewegt, sondern stattdessen das Solarmodul auf der Azimutwinkelskala gedreht. Hierdurch wird eine größere Genauigkeit in der Messung erreicht.

Achte darauf, dass du während des Versuchs nicht in der Nähe des Strahlengangs der Lampe stehst. Durch Abschattung und Reflexion kann es zu falschen Messwerten kommen.

### Geräte

- Lampe (Sonne)
- Solarmodul mit Standfuß 0° (Photovoltaikanlage)
- AV-Modul
- Potentiometermodul 40Ω (Verbraucher)
- Kabel
- Azimutwinkelskala

### Aufbau





## 4.1 Die Leistungsschwankungen einer Photovoltaikanlage

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Stecke das Solarmodul in einem Winkel von  $0^\circ$  in den Standfuß und stelle es in einem Winkel von  $270^\circ$  auf die Azimutwinkelskala. Stelle die Lampe in einem Abstand von 50cm zur Winkelscheibe auf und lass die Lampe parallel zum Boden scheinen. Stelle auf dem Potentiometer einen Widerstand von  $40\Omega$  ein.
2. Vergewissere dich, dass alle Komponenten in Reihe geschaltet sind und die Spannungsmessung des AV-Moduls parallel zum Solarmodul erfolgt.
3. Miss die Spannung und die Stromstärke für die verschiedenen vorgegebenen Azimutwinkel.
4. Berechne aus der Spannung und der Stromstärke die Leistung des Solarmoduls.

### Messwerte

$\alpha$ in $^\circ$	270	285	300	315	330	345	0
Uhrzeit	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00
U in V	0,17	1,75	3,5	4,56	4,75	4,78	4,78
I in mA	4,2	43,9	88,9	117,6	123	124,2	124,4
P in mW	0,7	76,8	311,2	536,3	584,3	593,7	594,6

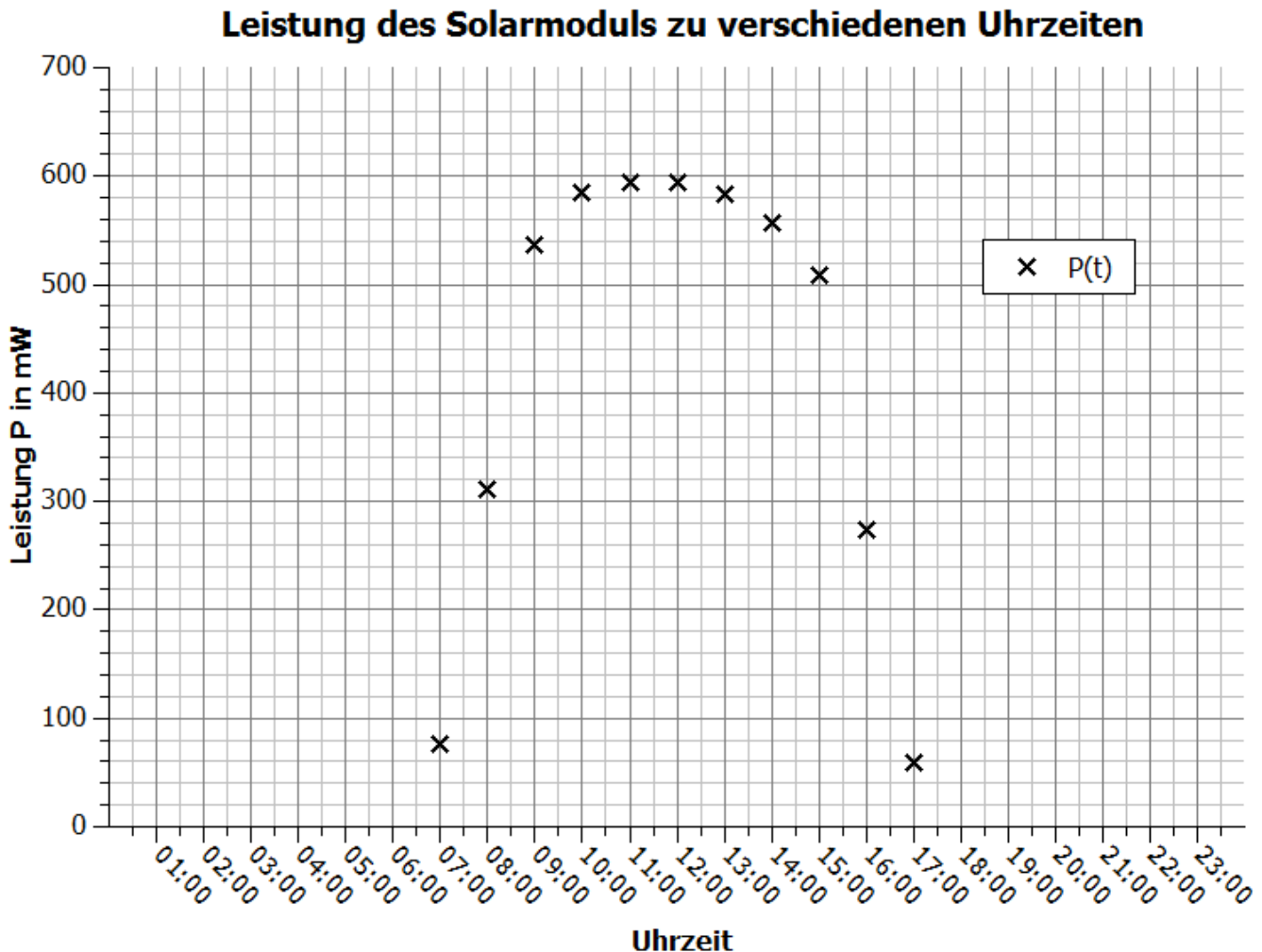
$\alpha$ in $^\circ$	15	30	45	60	75	90
Uhrzeit	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
U in V	4,73	4,63	4,42	3,26	1,53	0,16
I in mA	123,2	120,3	115,1	84	38,8	4,2
P in mW	582,7	557	508,7	273,8	59,4	0,7



## 4.1 Die Leistungsschwankungen einer Photovoltaikanlage

### Auswertung

1. a) Trage deine Messpunkte in das Uhrzeit-Leistungs-Diagramm ein.
- b) Beschreibe den Verlauf der Messpunkte. Gehe dabei auch auf Zeitpunkte ein, in denen die Lampe unter dem gleichen Winkel auf das Solarmodul scheint.
- c) Vermute und begründe, wie sich die Leistung in der Zeit von 0 Uhr bis 6 Uhr und von 18 Uhr bis 24 Uhr verhält.



- b) Die Leistung steigt sehr schnell am frühen Morgen und dann langsamer bis zum Mittag. Von da an sinkt sie langsam und fällt ab ca. 15 Uhr sehr schnell ab. Die größten Leistungswerte werden zwischen 10 Uhr ( $330^\circ$ ) und 13 Uhr ( $10^\circ$ ) mit Leistungen um 600 mW erzielt. Vergleicht man die Leistungswerte, die unter dem gleichen Winkel zwischen Lampe und Modul aufgenommen wurden, so stellt man fest, dass die zeitlich späteren Werte kleiner sind. Dies liegt an der im Laufe des Experiments steigenden Temperatur des Solarmoduls, die die Leistung (bei einem Widerstand von  $40\Omega$ ) verringert.
- c) Da kein Licht auf das Solarmodul fällt, ist die Leistung zu diesen Zeiten gleich null (abgesehen vom Streulicht beim Experiment, das aber in Realität nicht vorhanden ist).



## 4.1 Die Leistungsschwankungen einer Photovoltaikanlage

4. Benenne Faktoren, die in der Realität die Leistung von Photovoltaikanlagen beeinflussen.

- Verschattungen durch Wolken, Smog, Rauch, Schnee
- Temperatur
- Lage: Ausrichtung bezüglich der Himmelrichtung, Ausrichtung bezüglich des Winkels zum Erdboden
- Einstrahlwinkel der Sonne ist tagesabhängig, da die Sonne für jeden Tag im Jahr einen anderen Verlauf am Himmel nimmt.

5. Bewerte die Zuverlässigkeit und die Vorhersagbarkeit der Leistungserzeugung einer Photovoltaikmoduls. Ziehe dabei auch einen Vergleich zu fossilen Kraftwerken.

- Photovoltaikanlagen sind insofern zuverlässig, da die Sonne jeden Tag scheint. Sie geben dementsprechend jeden Tag Leistung ab.
- Die Vorhersage einer durchschnittlichen Leistung zu bestimmten Tageszeiten ist ebenfalls gut möglich, da die Einflussfaktoren Wettererscheinungen sind. Die Sonnenscheindauer und Temperaturen sind prinzipiell gut vorhersagbar.
- Kurzzeitige Leistungseinbrüche, wie beispielsweise durch eine vorbeiziehende Wolke sind nicht vorhersehbar.
- Fossile Kraftwerke sind unabhängig von äußeren Wetterbedingungen. Ihre Leistung kann bis zur Maximalleistung relativ frei reguliert werden. Die Leistung von PV-Anlagen ist hingegen von äußeren Bedingungen festgeschrieben und erreicht nur selten den maximalen Wert.



## 4.2 Die Leistungsschwankungen einer Windkraftanlage

### Ziele

- Die Schüler messen die Abhängigkeit der Leistung von der Windgeschwindigkeit der leXsolar-Windkraftanlage.
- Die Schüler stellen die Messwerte in einem Windgeschwindigkeits-Leistungs-Diagramm dar.
- Die Schüler erklären anhand des Diagramms, dass die Leistung einer Windkraftanlage umso höher ist, je größer die Windgeschwindigkeit ist.
- Die Schüler erkennen, dass die Windkraftanlage erst ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit eine Leistung erbringt.
- Die Schüler wiederholen, dass die Leistung aufgrund von Verwirbelungen und aus Sicherheitsgründen bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten sinkt, beziehungsweise null wird, da sie abgeschaltet werden muss.
- Die Schüler wiederholen die Funktionsweise eines Generators.
- Die Schüler erörtern technische und natürliche Einflussfaktoren auf die Leistung einer Windkraftanlage.
- Die Schüler erklären anhand realer Zeit-Windgeschwindigkeit-Diagramme, dass die Leistung von realen Windkraftanlagen von Tag zu Tag verschieden und auf See größer als an Land ist.
- Die Schüler vergleichen die Leistungsabgabe einer Windkraftanlage mit der Photovoltaikanlage und erkennen, dass sie durch den fehlenden Tag-Nacht-Rhythmus langfristig unzuverlässiger in der Energieerzeugung ist, jedoch den Vorteil hat, dass sie auch nachts Leistung erbringt.
- Die Schüler benennen Möglichkeiten zur Deckung der Last trotz volatiler Erzeuger.
- Die Schüler üben die Bedienung des AV-Moduls, der Windkraftanlage mit Winderzeuger und den Umgang mit der Grundeinheit.

### Vorwissen

- Die Schüler wissen, dass die Leistung das Produkt aus Spannung und Stromstärke ist.
- Die Schüler wissen, dass Windkraftanlagen bei zu hohen Windgeschwindigkeiten abgeschaltet werden.
- Die Schüler wissen, dass Verwirbelungen an den Rotorblättern zu Leistungsverringerungen führen.
- Die Schüler können aus ihrer Alltagserfahrung weitere Faktoren benennen, die die Leistung beeinflussen.
- Die Schüler kennen durch ihre Alltagserfahrungen prinzipielle Möglichkeiten, um erzeugte und benötigte Leistung in Übereinstimmung zu bringen.
- Die Schüler kennen die Funktionsweise eines Gleichstromgenerators.
- Die Schüler kennen die Bedienung des AV-Modul und den Aufbau der Grundeinheit.

### Vorversuche

- Experiment 2.1: Abhängigkeit der Leistung vom Anstellwinkel und Flügelform
- Experiment 2.2: Abhängigkeit der Leistung von 2-, 3- oder 4-Blattrotoren
- Experiment 2.3: Abhängigkeit der Leistung von der Windrichtung

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Die Schüler dürfen während des Versuchs den Widerstand nicht ändern. Eine Veränderung des Widerstandes führt zu einer Veränderung der Leistung bei gleichen Ausgangsbedingungen. Hierdurch wird die Leistungskurve verfälscht.





## 4.2 Leistungsschwankungen einer Windkraftanlage

- Der Versuch eignet sich zur Vertiefung der Themen „Zuverlässigkeit der Vorhersage von Wind“ und „günstige Standorte für Windkraftanlage“.

## 4.2 Leistungsschwankungen einer Windkraftanlage

### Aufgabe

Nimm die Leistungskurve einer Windkraftanlage (des Windgenerators) in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit auf.

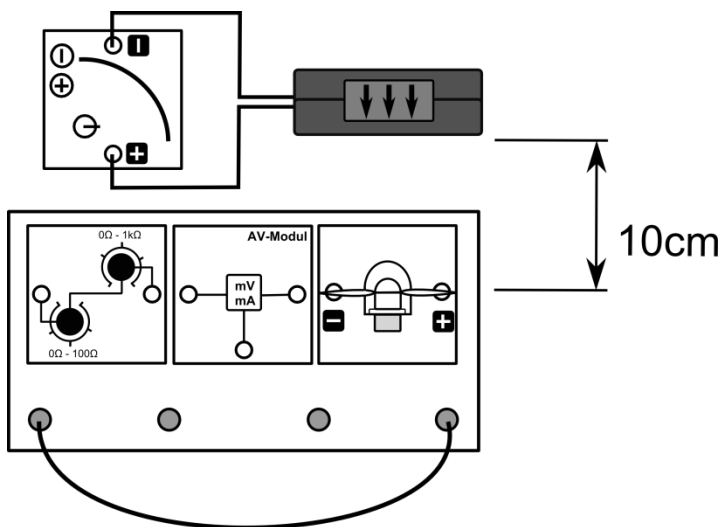
### Vorbemerkungen

Im Gegensatz zu realen Windkraftanlagen gibt die leXsolar-Windkraftanlage anstelle von Wechselstrom einen Gleichstrom ab, da der Generator ein Gleichstromgenerator ist.

Halte aufgrund von Verletzungsgefahren und der Verfälschung von Messwerten keine Gegenstände in der Nähe der Windturbine.

Im Versuch wird die Windgeschwindigkeit zur besseren Nachstellung der Realität schrittweise verringert. Bei einer schrittweise Steigerung der Windgeschwindigkeit kommt es zu Messfehlern, da der Rotor bei niedrigen Windgeschwindigkeiten in Schwingungen gerät und dieser Effekt seine Leistung reduziert.

### Aufbau



### Geräte

- Grundeinheit
- Winderzeuger
- Windgenerator
- Optimiertes Flügelprofil 25° 3-Flügler
- AV-Modul
- PowerModul
- Potentiometer 40Ω (Verbraucher)
- Kabel

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Stelle den Winderzeuger im Abstand von 10cm zur Grundeinheit auf. Drehe die Windkraftanlage frontal zur Windturbine. Stelle das Potentiometer auf einen Widerstand von 40Ω ein. Achte darauf, dass der positive Pol des PowerModuls mit dem roten Anschluss des Winderzeugers verbunden ist und dass der Schalter am Winderzeuger eingeschaltet ist.
2. Vergewissere dich, dass der Stromstärkemesser des AV-Moduls und das Potentiometermodul in Reihe und der Spannungsmesser des AV-Moduls parallel zum Windgenerator geschaltet sind.
3. Schalte den Winderzeuger bei einer Spannung von 12V ein und miss die Spannung und die Stromstärke der Windkraftanlage. Verringere die Spannung am Winderzeuger entsprechend der vorgegebenen Werte in der Messwerttabelle und wiederhole die Messung.
4. Berechne für alle Messpunkte die Leistung der Windkraftanlage.



## 4.2 Leistungsschwankungen einer Windkraftanlage

## Messwerte

$U_{Wind}$ in V	12	11	10,5	10	9,5	9	8,5	8
$v_{Wind}$ in $\frac{m}{s}$	8	7,5	7,3	7	6,8	6,4	6,1	5,8
U in V	3,3	3	2,9	2,75	2,6	2,45	2,3	2,1
I in mA	82	76,5	73	69,5	65	61,5	57	53
P in mW	270,6	229,5	211,7	191,1	169	150,7	131,1	111,3

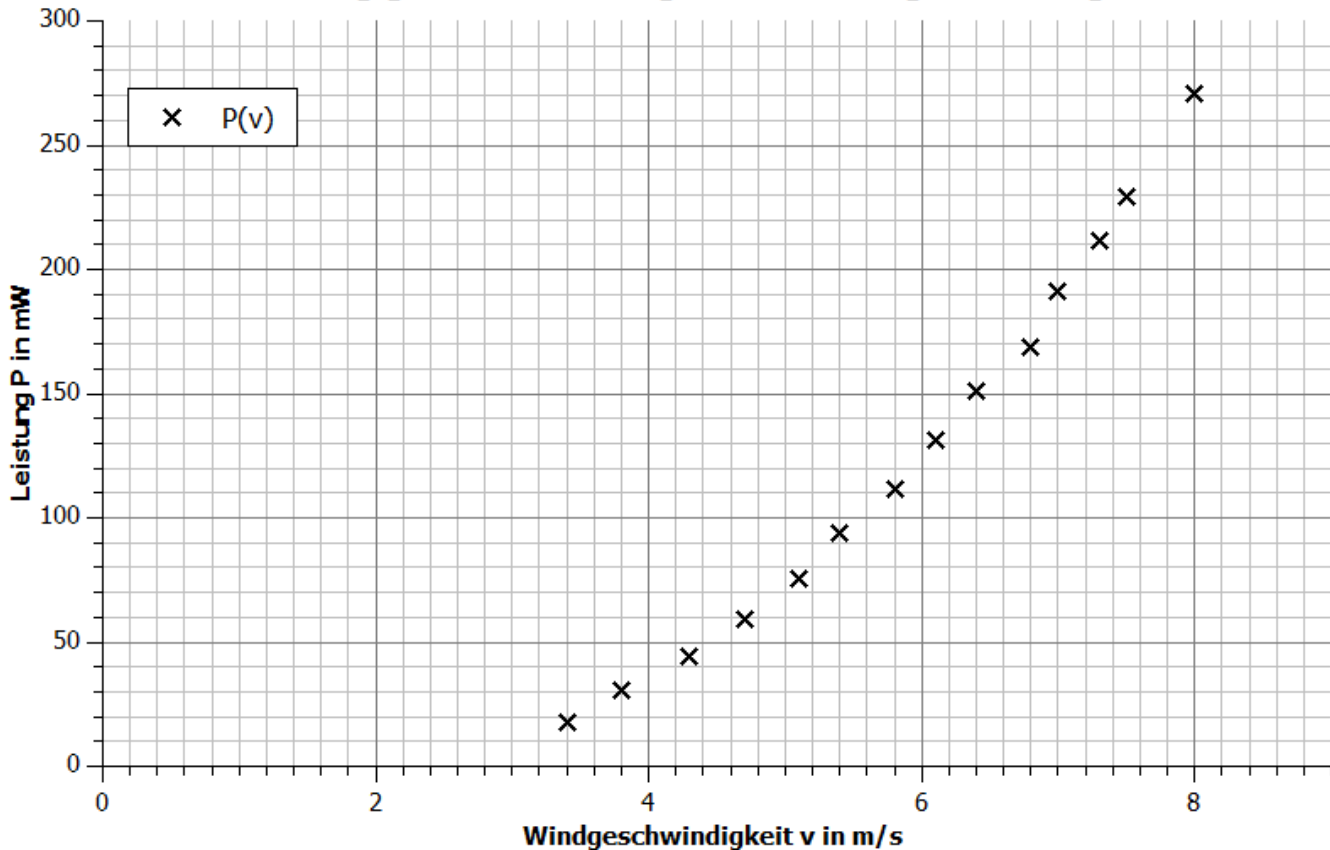
$U_{Wind}$ in V	7,5	7	6,5	6	5,5	5	4,5
$v_{Wind}$ in $\frac{m}{s}$	5,4	5,1	4,7	4,3	3,8	3,4	3
U in V	1,95	1,75	1,55	1,33	1,11	0,85	0
I in mA	48	43,2	38,4	33,1	27,3	21,1	0
P in mW	93,6	75,6	59,5	44	30,3	17,9	0

## 4.2 Leistungsschwankungen einer Windkraftanlage

## Auswertung

1. a) Trage deine Messpunkte in das Windgeschwindigkeit-Leistung-Diagramm ein.
- b) Beschreibe den Verlauf der Messpunkte und schlussfolgere Erkenntnisse über das Verhalten realer Windkraftanlagen.
- c) Vermute und begründe, wie sich die Leistung bei höheren Windstärken verhalten würde.

### Abhängigkeit der Leistung von der Windgeschwindigkeit



- b) Die Leistung ist bis  $\approx 3 \frac{m}{s}$  gleich null, das heißt eine Windkraftanlage benötigt eine Mindestwindstärke, um zu laufen. Ab dieser Windgeschwindigkeit gilt, je größer die Windgeschwindigkeit ist, desto größer ist die Leistung.
- c) Ab einem bestimmten Wert geht die Leistung in eine Sättigung (siehe Bild unten). Typischerweise passiert das bei realen Windkraftanlagen ab Windgeschwindigkeiten von ca.  $15 \frac{m}{s}$ . Ursache sind Verwirbelungen und teilweise Strömungsabriss an den Rotorblättern. Bei zu hohen Windstärken wird der Rotor zudem aus Sicherheitsgründen zum Stillstand gebracht, da es sonst zur Zerstörung der Windkraftanlage kommen kann (Windkraftanlage mit defektem Bremssystem: [https://www.youtube.com/watch?v=W\\_rJokm\\_IDI4](https://www.youtube.com/watch?v=W_rJokm_IDI4)).



## 4.2 Leistungsschwankungen einer Windkraftanlage

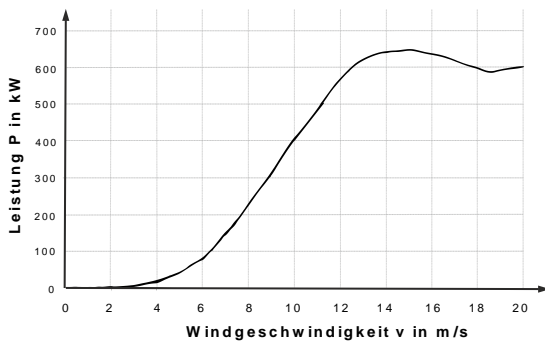


Abb.: Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Leistung einer realen Windkraftanlage

2. Erläutere mit Hilfe deiner Messwerte die physikalischen Vorgänge während des Experiments.

Wenn der Wind zu schwach ist, fängt der Rotor aufgrund der Reibung sich nicht an zu drehen und es wird kein Strom erzeugt. Ist der Wind stark genug, dreht sich der Rotor und innerhalb des Generators wird Bewegungsenergie in elektrische Energie aufgrund elektromagnetischer Induktion umgewandelt. Je schneller sich der Rotor dreht, desto größer ist die Änderung des magnetischen Feldes für die Leiterschleife innerhalb des Generators, und desto größer ist die induzierte Spannung. Hieraus resultiert eine größere Stromstärke und Leistung.

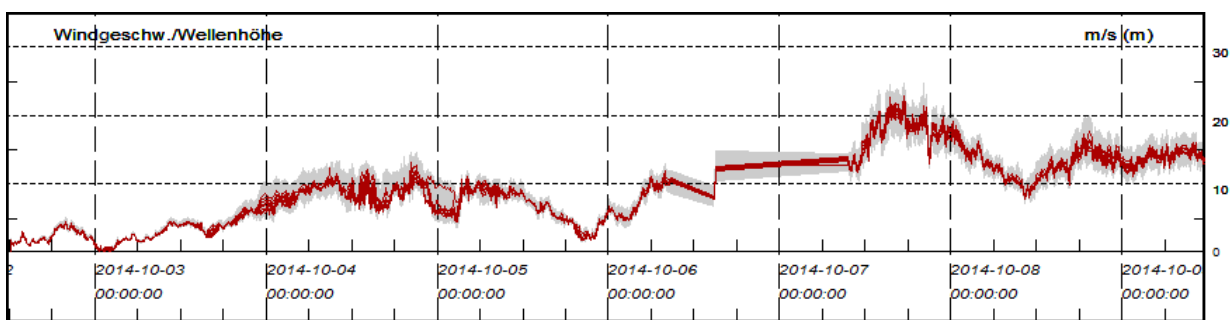
3. Benenne weitere Einflussfaktoren auf die Leistung der Windkraftanlage.

- Die Form der Rotorblätter
- Der Anstellwinkel der Rotorblätter
- Die Höhe der Rotorblätter
- Die Größe der Rotorblätter
- Die Ausrichtung der Rotorblätter
- Die Umgebung um die Windkraftanlage (bewaldet oder freies Feld)

4. In den untenstehenden Grafiken siehst du die Windgeschwindigkeit an verschiedenen Tagen von Wetterstationen in Deutschland.

a) Vergleiche den Verlauf der beiden Orte untereinander.

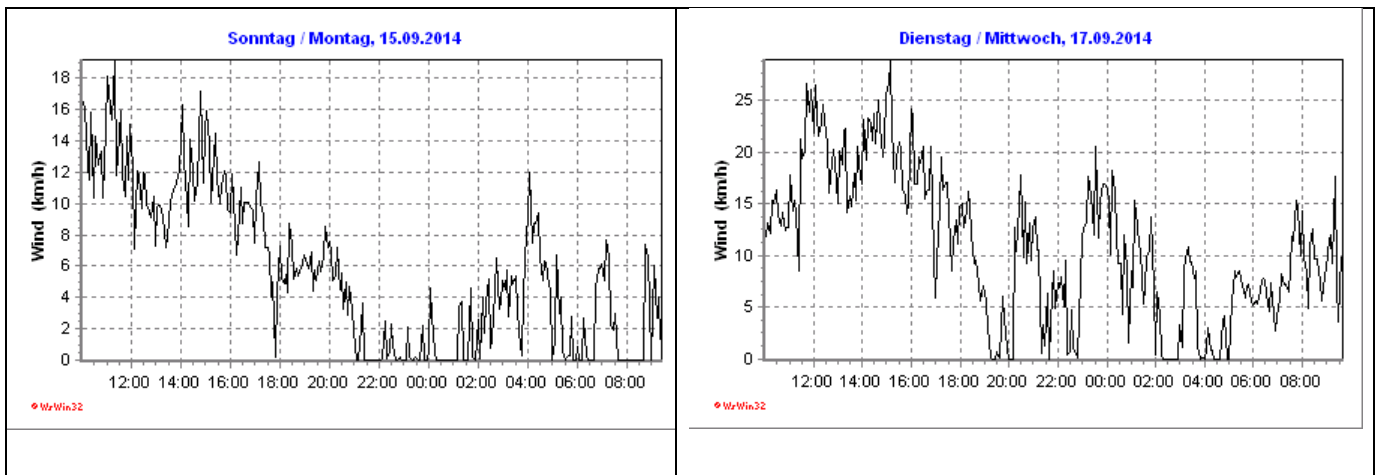
b) Bewerte mit Hilfe deiner Messwerte und anhand der Diagramme die Zuverlässigkeit der Leistungsabgabe von Windkraftanlagen. Ziehe dabei auch einen Vergleich zu den Photovoltaikanlagen.



Forschungsmesstation FINO 1 (Nordsee)



## 4.2 Leistungsschwankungen einer Windkraftanlage



Weißbach (Sachsen, 380-470 über NN)

a) In beiden Diagrammen ist zu erkennen, dass die Windgeschwindigkeit innerhalb eines Tages und zur selben Zeit an verschiedenen Tagen sehr unterschiedlich sein kann. Beispielsweise liegt die Windgeschwindigkeit in der Nordsee am 06.10.14 zwischen  $7,5 \frac{m}{s}$  und  $13 \frac{m}{s}$  und in Weißbach am 17.09.14 zwischen  $0 \frac{m}{s}$  und  $8,3 \frac{m}{s}$ . Ebenso betrug die Windgeschwindigkeit in der Nordsee am 03.10.14 um Mitternacht  $0 \frac{m}{s}$ , einen Tag später  $7 \frac{m}{s}$  und 5 Tage später zwischen  $17 \frac{m}{s}$  und  $18 \frac{m}{s}$ .

Auf dem Meer sind die Windgeschwindigkeiten mit Werten zwischen 0 und  $25 \frac{m}{s}$  deutlich höher als an Land (0 bis  $8,3 \frac{m}{s}$ ).

b) Die Leistungsabgabe ist über mehrere Tage sehr unregelmäßig. Es kann Phasen geben, wo kurzzeitig oder über mehrere Stunden ein starker oder schwacher Wind weht. Die Leistung kann aus diesem Grund innerhalb eines Zeitraumes sehr stark schwanken oder lange Zeit groß oder klein sein. Auf dem Meer können größere Leistungen erzielt werden als an Land. Im Unterschied zur Photovoltaikanlage folgt die Leistungserzeugung keinem Tag-Nacht-Rhythmus. Windkraftanlagen können jedoch auch nachts Leistung erbringen.

5. Die benötigte Leistung für die Verbraucher zu einem gegebenen Tageszeitpunkt ist an zwei aufeinanderfolgenden Werktagen ungefähr gleich groß. Windkraft- und Photovoltaikanlagen erreichen aufgrund äußerer Bedingungen nicht jeden Tag dieselben Leistungen zu einem Zeitpunkt. Benenne Möglichkeiten, um die Leistungsdifferenzen zu beheben.

- Aufbau von fossilen Schattenkraftwerken, die zum Einsatz kommen, wenn die Leistung zu schwach ist.
- Aufbau von Speichern, die überschüssige Energie aufnehmen und zu leistungsschwachen Zeiten wieder abgeben.
- Abschalten von Photovoltaik- und Windkraftanlagen, wenn zu viel Energie erzeugt wird.
- Verbesserung der Energieeffizienz.



## 4.3 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk

### Ziele

- Die Schüler messen die Leistungsabgabe des Kraftwerks (dargestellt durch das PowerModul) und den Energieverbrauch eines Gebäudes (dargestellt durch Glühlampen und Motor).
- Die Schüler zeichnen die Messergebnisse in ein t-P- und t-E-Diagramm.
- Die Schüler wiederholen den Zusammenhang zwischen Leistung und Energie.
- Die Schüler schlussfolgern den Verlauf des Graphen aufgrund des Zusammenhangs zwischen Energie und Leistung und dem Experimentierverlauf.
- Die Schüler erläutern den Unterschied zwischen einer Spannungsquelle und einer Leistungsquelle zur Deckung des Energiebedarfs einer Last.
- Die Schüler erklären, weshalb es bei einer Überversorgung (Unterversorgung) zu einer Überspannung (Unterspannung) kommt und erkennen so, weshalb Netzbetreiber zur Regulierung der Versorgung die Spannung beobachten.
- Die Schüler üben das Experimentieren mit dem SmartMeter, der Grundeinheit und dem PowerModul.

### Vorwissen

- Die Schüler kennen den Zusammenhang zwischen Leistung und Energie.
- Die Schüler kennen das Ohm'sche Gesetz.
- Die Schüler wissen, dass Verbraucher in einer Parallelschaltung unabhängig voneinander Leistung beziehen.
- Die Schüler wissen, dass eine ideale Versorgung vorherrscht, wenn die Spannung an den Haushalten der Nennspannung entspricht.
- Die Schüler wissen, dass sich die Elektroenergieerzeugung nach dem benötigten Verbrauch richtet. Die Erzeugung muss dem benötigten Verbrauch ständig angepasst werden.
- Die Schüler wissen, dass reale Kraftwerke eine gewisse Zeit brauchen um ihre Leistung zu verändern.
- Die Schüler kennen die Bedienung des SmartMeters und des PowerModuls.

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Die Schüler sollten auf den Verbraucherplan aufmerksam gemacht werden.
- Es werden 2-3 Schüler für den Versuch benötigt. Die Aufgaben „Messwerte ablesen“, „Uhrzeit ablesen“, „Verbraucherplan durchführen“ müssen verteilt werden.
- Das Experiment dient dazu, um die optimale Lastkurve für das Gebäude experimentell zu ermitteln. Sie ist Voraussetzung für die Experimente 4.4. und 4.5.



## 4.3 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk

### Aufgabe

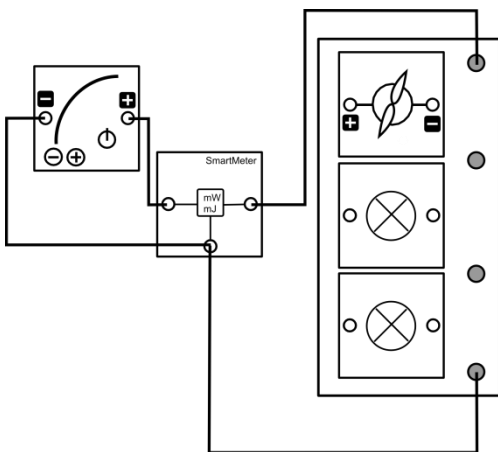
Miss die Leistungsabgabe des Kraftwerks (PowerModul) und den Energieverbrauch eines Gebäudes (Grundeinheit mit Glühlampen und Motor als Verbraucher) während eines simulierten Tages.

### Vorbemerkungen

Das Experiment simuliert den Fall, dass ein Gebäude durch ein Kraftwerk versorgt wird. Das Stromnetz ist dabei nicht mit einem anderen verbunden. Die Verbraucher im Firmengebäude einer Wäscherei werden durch die 2 Glühlampen und den Motor repräsentiert. Die 2 Glühlampen stellen den Verbrauch durch Bildschirme dar und der Motor den Verbrauch der Waschmaschinen. Das PowerModul repräsentiert ein konventionelles Kraftwerk, das an das Gebäude eine Nennspannung von 3V anlegt (In der Realität 230V).

Im Experiment muss das Motormodul schnell von der Grundeinheit abgenommen und aufgesteckt werden. Übe das Auf- und Abnehmen, bevor du den Versuchst durchführst, um bessere Messergebnisse zu bekommen.

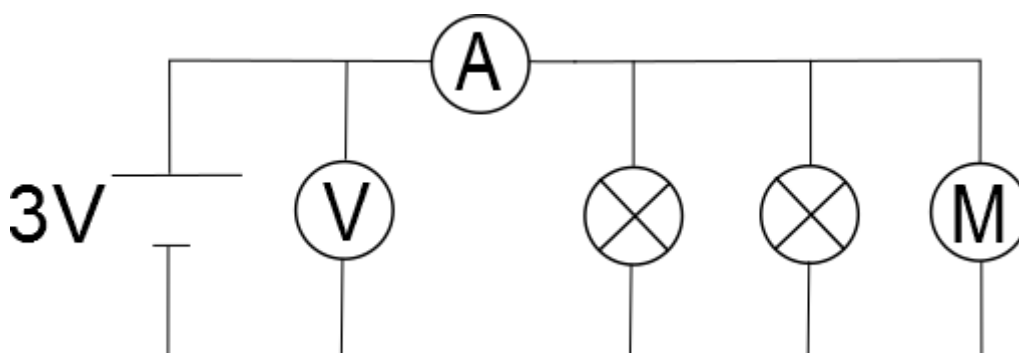
### Aufbau



### Geräte

- Grundeinheit
- SmartMeter
- PowerModul 3V (Kraftwerk)
- 2 Glühlampenmodule (Bildschirme)
- Motormodul (Waschmaschinen)
- Kabel
- Uhr

### Schaltskizze







## 4.3 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Stelle die Energieanzeige am SmartMeter auf 0Ws. Stelle am ausgeschalteten PowerModul eine Spannung von 3V ein.
2. Lies die weiteren Durchführungsschritte und teilt die Aufgaben zunächst untereinander auf.
3. Während des Experiments wird die Zeit von 6.00 Uhr bis 18.00 Uhr simuliert. Es wird angenommen, dass 10s im Experiment einer Stunde des Tages entsprechen. Während des Tages/ des Experiments soll folgender Verbrauchsplan eingehalten werden:
  - Die Bildschirme laufen von 6.00 Uhr bis 18.00 Uhr.
  - Die Waschmaschinen sind von 6.00 Uhr bis 8.30Uhr und von 16.30 Uhr bis 18.00 Uhr in Betrieb.
4. Schalte nun das PowerModul ein und miss alle 10s die Leistung und die bis dahin eingespeiste Energie, die vom PowerModul abgegeben wurde. Trage deine Messwerte in die Tabelle ein. Stecke zum Zu- und Abschalten der Waschmaschine das Motormodul zum richtigen Zeitpunkt auf die Grundeinheit bzw. ziehe es wieder ab.

### Messwerte

$t_{\text{Versuch}}$ in s	0	10	20	30	40	50	60
Uhrzeit	6Uhr	7Uhr	8 Uhr	9 Uhr	10 Uhr	11 Uhr	12 Uhr
$P_{\text{Power}}$ in mW	376	376	376	314	314	314	314
$E_{\text{Power}}$ in Ws	0	3,7	7,3	10,8	14	17,1	20,4

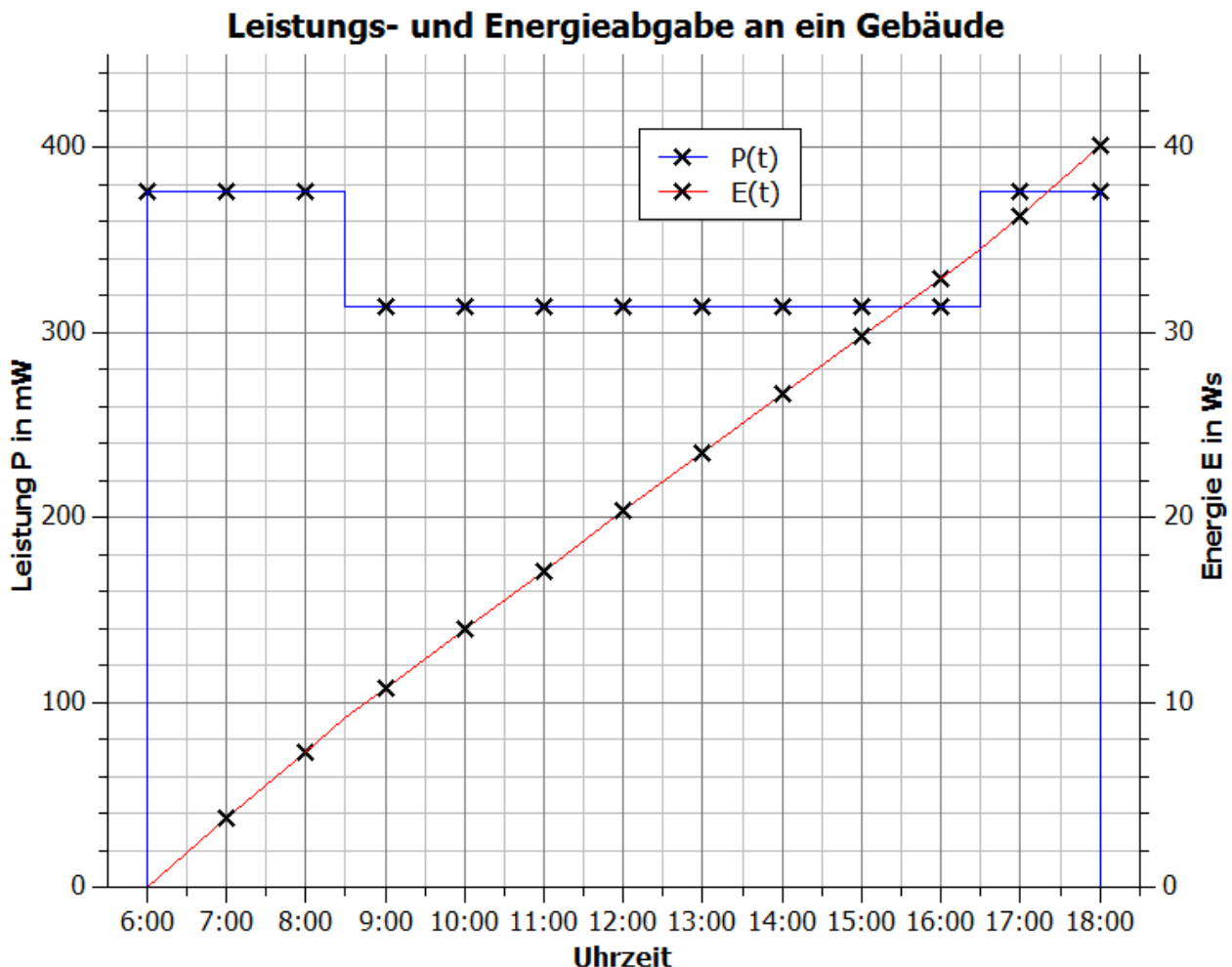
  

$t_{\text{Versuch}}$ in s	70	80	90	100	110	120
Uhrzeit	13 Uhr	14 Uhr	15 Uhr	16 Uhr	17 Uhr	18 Uhr
$P_{\text{Power}}$ in mW	314	314	314	314	376	376
$E_{\text{Power}}$ in Ws	23,5	26,7	29,8	32,9	36,3	40,1

## 4.3 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk

### Auswertung

- Trage deine Messpunkte zur Leistung und Energie für die verschiedenen simulierten Uhrzeiten in das Diagramm ein.



- Beschreibe und erläutere den Zusammenhang zwischen dem Ablauf des Experiments und dem Verlauf der Leistungs- und der Energiemesspunkte. Nutze zur Erläuterung auch den Zusammenhang zwischen Leistung und Energie.

In der Zeit von 6:00 Uhr bis 8:00 Uhr und in der Zeit von 17:00 Uhr bis 18:00 Uhr ist die Leistung konstant bei 376mW. In der Zeit von 9:00 Uhr bis 16:00 Uhr ist die Leistung ebenfalls konstant, jedoch beträgt der Wert 314mW. Die Energie steigt während des gesamten Versuchs, wobei sie in der Zeit von 6:00 Uhr bis 8:00 Uhr und von 17:00 Uhr bis 18:00 Uhr schneller steigt, als in der Zeit von 9:00 Uhr bis 16:00 Uhr.

Der Leistungsverlauf ist durch die konstante Spannung und die 3 Verbraucher erklärbar. Diese bilden einen konstanten Widerstand, der mit einer Spannungsquelle bei 3V verbunden ist. Diese gibt durch den festen Widerstand bei 3V eine konstante Stromstärke und damit eine konstante Leistung ab. Durch das Entfernen eines Widerstandes aus der Parallelschaltung vergrößert sich der Gesamtwiderstand. Dadurch verringert sich entsprechend des Ohm'schen Gesetzes die Stromstärke und damit auch die Leistung.

Die Leistung entspricht der Energiezunahme pro Zeiteinheit. Da die Leistung während des gesamten Versuchs positiv ist, ist auch die Energiezunahme positiv. In der Zeit von 9:00 Uhr bis 16:00 Uhr nimmt die Energie in gleichen Zeiten um einen geringeren Wert zu als in den beiden anderen Zeitintervallen, da die Leistung gesunken ist.



## 4.3 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk

- Verbinde die Messpunkte entsprechend dem Verlauf des Experiment.
- Beschreibe den Zusammenhang zwischen benötigter Energie und Energieverbrauch zu einem Zeitpunkt innerhalb des Experiments. Erläutere diesen Zusammenhang, wenn das PowerModul (Spannungsquelle) sich wie ein reales Kraftwerk (Leistungsquelle) verhalten würde.

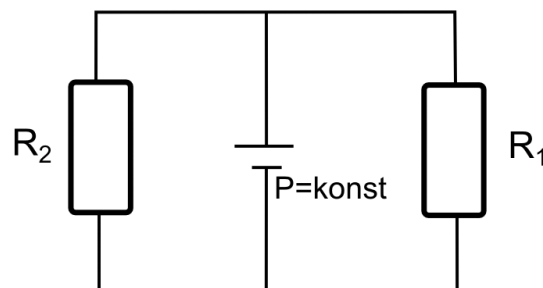
Die Energieerzeugung und die benötigte Energie sind zu jedem Zeitpunkt gleich.

In der Realität würde ein Kraftwerk seine Energieabgabe (Leistung) nicht so schnell ändern können wie das PowerModul, da es seine Leistung der benötigten Energie anpassen muss. Es kommt also zu einer Über- und Unterversorgung. Demzufolge würde es nach dem Abschalten der Wäscherei zu einer kurzzeitigen Überversorgung und nach dem Einschalten zu einer kurzzeitigen Unterversorgung kommen.

Das PowerModul verhält sich demzufolge wie ein schnellreagierendes Kraftwerk.

- In der Realität beobachten Netzbetreiber die Spannung an wichtigen Stromnetzpunkten um eine Über- oder Unterversorgung zu erkennen. Je nach Spannungswert drosseln oder steigern sie die Leistung von Kraftwerken. Die Leistung großer Kraftwerke kann jedoch nur sehr langsam angepasst werden.

Begründe mit Hilfe des nachfolgenden Stromnetzes, weshalb es bei einer Überversorgung (Unterversorgung) zu einer Spannung oberhalb (unterhalb) der Nennspannung kommt. Der Stromkreis besteht aus einem Kraftwerk mit konstanter Leistungsabgabe und 2 Widerständen als Verbraucher. Gehe zunächst davon aus, dass die beiden Verbraucher optimal versorgt werden. Erläutere dann das Verhalten der Spannung, sobald ein Verbraucher entfernt oder ein weiterer hinzugefügt wird.



Da es eine optimale Versorgung gibt, liegt die Spannung über allen drei Verbrauchern bei 230V. Wird nun ein weiterer Verbraucher parallel angeschlossen, kommt es zu einer Unterversorgung und die Spannung kann nicht bei 230V über allen 3 Verbrauchern verbleiben. Würde sie bei 230V verbleiben, müsste ein Strom mit größerer Stromstärke aus dem Kraftwerk herausfließen, und die Kraftwerksleistung wäre gestiegen. Da die Leistung allerdings konstant bleibt, sinkt die Spannung so weit, dass das Produkt aus Spannung und Stromstärke der Kraftwerksleistung entspricht. Bei einer Unterversorgung tritt daher eine Spannung unterhalb der Netzspannung auf.

Nimmt man einen Verbraucher aus dem Stromkreis heraus, so kommt es zu einer Überversorgung. In diesem Fall muss die Kraftwerksleistung vollständig an einen Verbraucher abgegeben werden. Würde die Spannung bei 230V bleiben, würde das Kraftwerk einen Strom mit geringerer Stromstärke abgeben, was nur möglich wäre, wenn die Kraftwerksleistung sofort sinkt. Da die Kraftwerksleistung konstant bleibt, muss sich also die Spannung auf einen Wert erhöhen, bei dem das Produkt aus Spannung und Stromstärke der Kraftwerksleistung entspricht. Man erkennt eine Überversorgung also an einer erhöhten Spannung.



## 4.4 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk und eine Photovoltaikanlage

### Ziele

- Die Schüler gewinnen einen Einblick in die physikalischen Vorgänge in einem Stromkreis mit Widerstand, Spannungsquelle und Leistungsquelle.
- Die Schüler messen die Spannung und die Stromstärke des Solarmoduls sowie die Leistung und die Energieabgabe des PowerModuls.
- Die Schüler verbinden die Messpunkte des Graphen anhand ihrer Kenntnisse über die Leistungsabgabe des Solarmoduls und des PowerModuls.
- Die Schüler beschreiben die physikalischen Vorgänge innerhalb des Versuchs.
- Die Schüler begründen anhand des Diagramms, dass sich die Kraftwerksleistung beständig der Leistung der Photovoltaikanlage anpassen muss.
- Die Schüler vergleichen die Energieabgabe des fossilen Kraftwerks mit dem Experiment 4.3 und erkennen, dass das Kraftwerk weniger Energie abgibt.
- Die Schüler beschreiben anhand des Diagramms, dass sich die Leistung der regenerativen Energiequellen nicht mit der benötigten Leistung deckt.
- Die Schüler erschließen sich anhand des Diagramms und den vorhandenen Komponenten Möglichkeiten, um die regenerative Energie effektiver zu nutzen.

### Vorwissen

- Die Schüler wissen, dass die Gesamtleistung die Summe aller Einzelleistungen ist.
- Die Schüler wissen, dass das Solarmodul seine gesamte Leistung an die Verbraucher abgeben muss (Leistungsquelle)
- Die Schüler wissen, dass eine Überversorgung zu einer Überspannung führt (Netzstörung)
- Die Schüler kennen den Leistungsverlauf des Solarmodul an einem simulierten Tag.
- Die Schüler wissen, dass das PowerModul sich wie ein schnellreagierendes Kraftwerk verhält und seine Leistung der der Solaranlage anpasst, so dass am Gebäude annähernd 3V anliegen (Spannungsquelle)
- Die Schüler kennen das Schaltbild eines Motors.
- Die Schüler wissen, dass weder das Solarmodul noch die Spannungsquelle elektrische Energie verbrauchen können.

### Vorversuche

- Experiment 4.1: Leistungsschwankungen einer Photovoltaikanlage
- Experiment 4.3: Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Das Experiment simuliert ein autarkes Stromnetz aus Kraftwerk und regenerativer Energiequelle, wobei die regenerativen Energiequellen die komplette Versorgung übernehmen können.
- Das Experiment eignet sich, um die Schwierigkeiten bei der zunehmenden Einspeisung von regenerativen Energiequellen zu behandeln (Wetterprognosen müssen erstellt werden, mehr Kraftwerke in Bereitschaft für plötzliche Energieschwankungen, regenerative Energiequellen können nicht alleine die Versorgung übernehmen)
- In der Simulation wird der Tagesverlauf durch diskrete Azimutwinkel des Solarmoduls simuliert, da eine kontinuierliche Beleuchtungsveränderung wie bei einem realen Tagesverlauf per Hand nicht durchführbar ist. Stattdessen stehen die verschiedenen Azimutwinkel stellvertretend für einen bestimmten Tagesabschnitt.



## 4.4 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk und eine Photovoltaikanlage

- Die Versuchsdurchführung ist sehr komplex. Es werden vier Schüler für die Aufgaben „Messwerte ablesen“, „Uhrzeit ablesen“, „Verbraucherplan durchführen“ und „Solarmodul drehen“ gebraucht. Die Schüler sollten sich vor der Durchführung bewusst sein, welche Aufgaben erledigt werden müssen und sich auf eine Aufgabenverteilung einigen.
- Falls das Experiment 4.5 ebenfalls durchgeführt werden soll, sollte aufgrund der Vergleichbarkeit der Aufbau nicht verändert werden.
- Natürliches Sonnenlicht beeinflusst die Ergebnisse. Die Mutterlösungen wurden in einem von Jalousien abgedunkelten Raum aufgenommen.



## 4.4 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk und eine Photovoltaikanlage

### Aufgabe

Miss die Leistungen des Kraftwerks (des PowerModuls) und der Photovoltaikanlage (des Solarmoduls) und die Energie des Kraftwerks, die sie im Laufe eines simulierten Tages an das Gebäude abgeben.

### Vorbemerkungen

Das Experiment simuliert gegenüber Experiment 4.3 den Fall, dass ein Unternehmen sein Firmengebäude mit einer eigenen Solaranlage ausgestattet hat, um die Stromkosten zu verringern. Die Verbraucher in dem Firmengebäude einer Wäscherei werden durch die 2 Glühlampen und den Motor repräsentiert. Die 2 Glühlampen stellen den Verbrauch durch Bildschirme dar, der Motor dagegen den Verbrauch der Waschmaschinen.

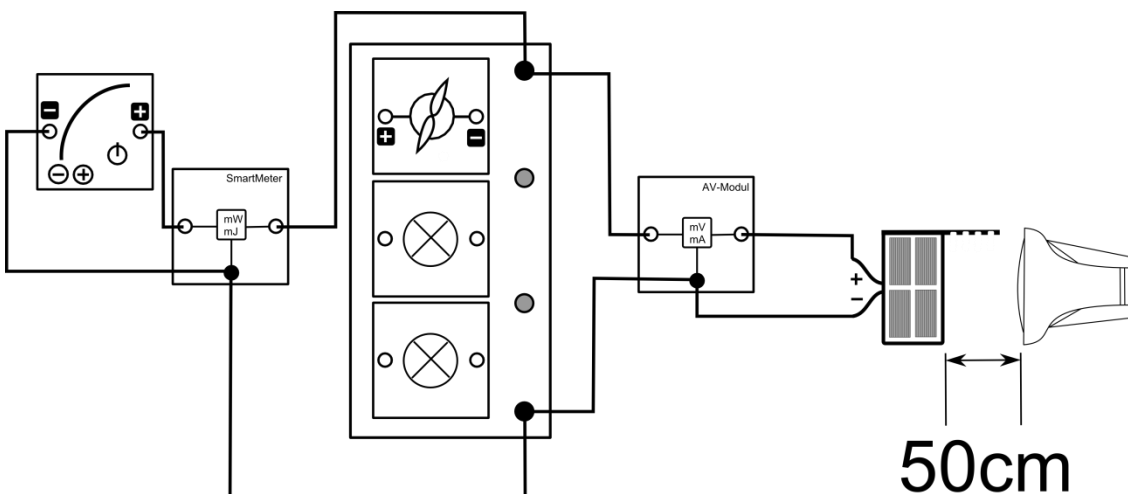
Im Experiment muss das Motormodul schnell von der Grundeinheit abgenommen und aufgesteckt werden. Übe das Auf- und Abnehmen, bevor du den Versuchst durchführst, um bessere Messergebnisse zu bekommen.

Stehe hinter dem Solarmodul, da Reflektionen die Beleuchtungsstärke am Solarmodul verändern.

### Geräte

- Grundeinheit
- PowerModul 3V (Kraftwerk)
- AV-Modul
- SmartMeter
- Solarmodul (Photovoltaikanlage)
- Lampe (Sonne)
- 2 Glühlampenmodule (Bildschirme)
- Motormodul (Waschmaschinen)
- Kabel
- Uhr
- Azimutwinkelskala

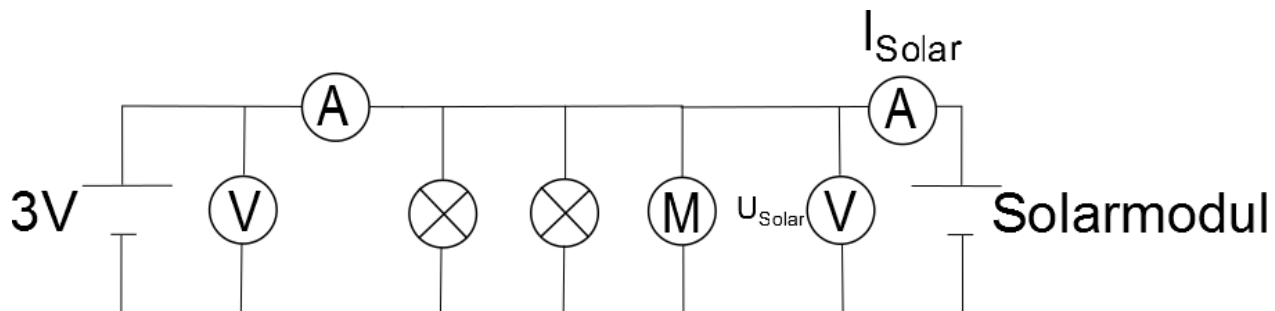
### Aufbau





## 4.4 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk und eine Photovoltaikanlage

## Schaltskizze



## Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Stelle das Solarmodul senkrecht zur Tischebene in der 6.00 Uhr-Stellung zur Lampe. Richte den Strahlengang der Lampe waagrecht aus. Stelle das PowerModul auf eine Spannung von 3V. Stelle die Energieanzeige des SmartMeters auf  $E=0\text{Ws}$ .
2. Lies die weiteren Durchführungsschritte des Versuchs und teile auf, wer welche Aufgaben während des Versuchs übernimmt.
3. Schalte die Lampe ein. Starte die Zeitmessung und schalte das PowerModul zeitgleich ein. Um einen Tagesablauf zu simulieren, drehst du das Solarmodul folgendermaßen:

Position	Zeitdauer, die das Solarmodul in dieser Position stehen soll	Simulierte Uhrzeit
6.00 Uhr	5s	6:00 - 6:30
7.00 Uhr	10s	6:30 - 7:30
8.00 Uhr	10s	7:30 - 8:30
...	...	
17.00 Uhr	10s	16:30 - 17:30
18.00 Uhr	5s	17:30 - 18:00

Miss die Stromstärke und die Spannung des Solarmoduls sowie die Leistung und die Energie, die das PowerModul zu den verschiedenen Tageszeiten an die Verbraucher abgibt. Die Messwerte sollen nach 0s (6Uhr), 10s (7Uhr), 20s (8Uhr),..., 120s (18Uhr) aufgenommen werden. Befolge während des Versuchs folgenden Verbrauchsplan:

- Die Bildschirme laufen von 6Uhr bis 18Uhr.
  - Die Wäscherei ist von 6 bis 8.30Uhr und von 16.30Uhr bis 18Uhr in Betrieb.
4. Berechne Leistung des Solarmoduls und addiere die Leistung beider Anlagen, um die Gesamtleistung zu bestimmen.



## 4.4 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk und eine Photovoltaikanlage

## Messwerte

$t_{\text{Versuch}}$ in s	0	10	20	30	40	50	60
Uhrzeit	6.00 Uhr	7.00 Uhr	8.00 Uhr	9.00 Uhr	10.00 Uhr	11.00 Uhr	12.00 Uhr
$U_{\text{Solar}}$ in V	3	3	3,1	3,2	3,4	3,5	3,5
$I_{\text{Solar}}$ in mA	3,6	40,7	80	115	135,7	147,5	151,5
$P_{\text{Solar}}$ in mW	10,8	122,1	248	368	461,4	516,3	530,3
$P_{\text{PoW}}$ in mW	361	251	135	0	0	0	0
$E_{\text{PoW}}$ in Ws	0	3,2	5,1	6,2	6,2	6,2	6,2
$P_{\text{ges}}$ in mW	371,8	373,1	383	368	461,4	516,3	530,3

$t_{\text{Versuch}}$ in s	70	80	90	100	110	120
Uhrzeit	13.00 Uhr	14.00 Uhr	15.00 Uhr	16.00 Uhr	17.00 Uhr	18.00 Uhr
$U_{\text{Solar}}$ in V	3,5	3,4	3,2	3,1	3	3
$I_{\text{Solar}}$ in mA	146,4	133	111,5	78	36	1,7
$P_{\text{Solar}}$ in mW	512,4	452,2	345,7	241,8	108	5,1
$P_{\text{PoW}}$ in mW	0	0	0	82	263	364
$E_{\text{PoW}}$ in Ws	6,2	6,2	6,2	6,4	8	11
$P_{\text{ges}}$ in mW	512,4	452,2	345,7	323,8	371	369,1

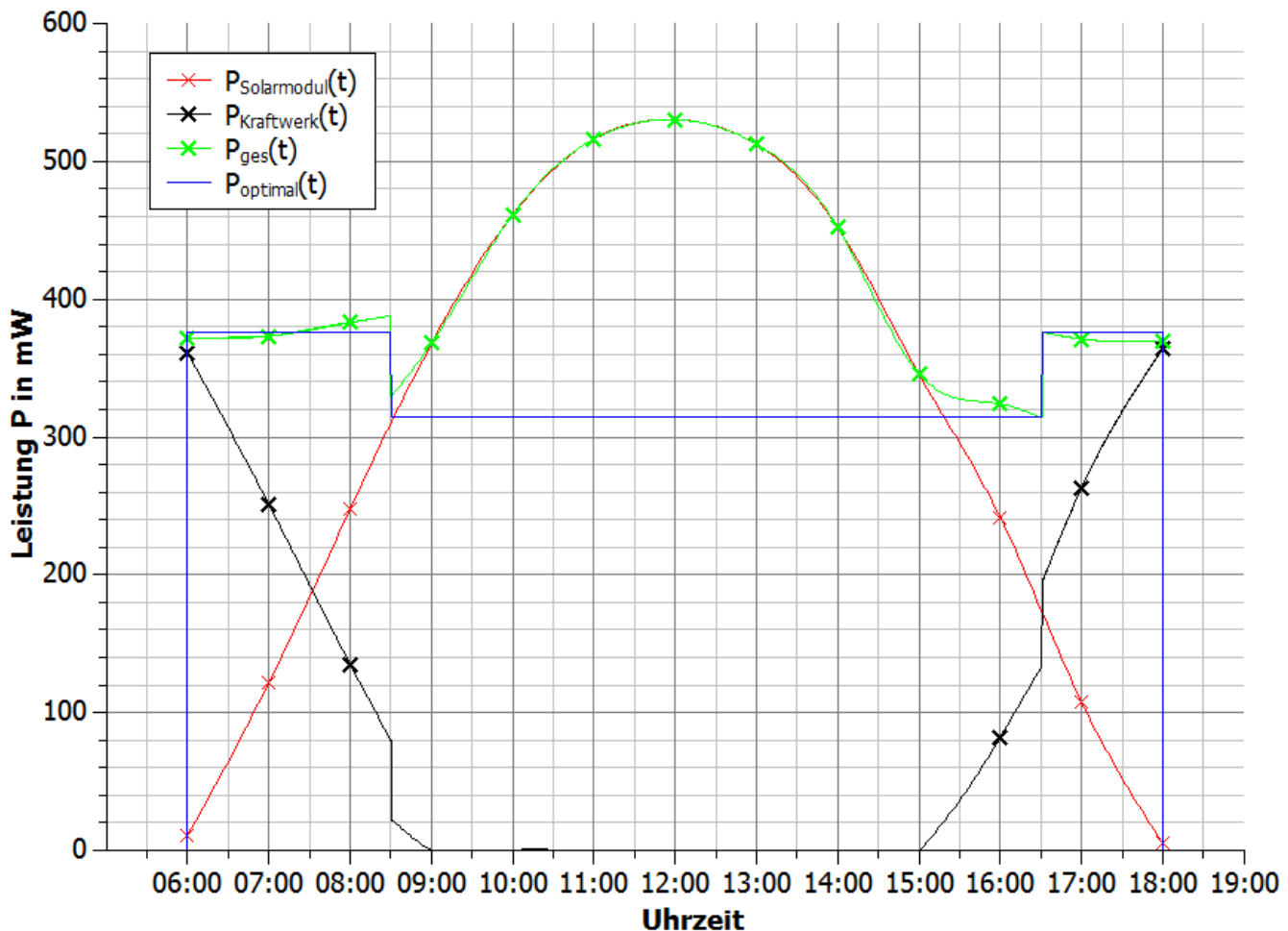


## 4.4 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk und eine Photovoltaikanlage

## Auswertung

- Trage deine Messwerte zur Leistung des Solarmoduls, des PowerModuls und die Gesamtleistung in das Uhrzeit-Leistungs-Diagramm ein. Skizziere die zugehörigen Graphen entsprechend dem Versuchsablauf. Beachte, dass sich der Verbrauch verändert hat. Ergänze den Leistungsgraphen für die optimale Versorgung aus Experiment 4.3.

### Leistungsabgabe eines Kraftwerks und eines Solarmoduls an ein Gebäude



- Beschreibe mit Hilfe deiner Messwerte die physikalischen Vorgänge während des Versuchs.

Zu Beginn des Versuchs versorgen das Solarmodul und das PowerModul die Widerstände gemeinsam, da die Leistung des Solarmoduls nicht ausreicht. Die Spannung an den Widerständen bleibt während dieses Vorgangs nahezu unverändert bei 3V. Sobald das Solarmodul die komplette Versorgung übernimmt, steigt die Spannung an den Widerständen, da das Solarmodul nur so in der Lage ist, seine gesamte Leistung abzugeben.



## 4.4 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk und eine Photovoltaikanlage

3. Beschreibe und bewerte die Versorgung des Gebäudes durch die Photovoltaikanlage und das Kraftwerk. Gehe dabei darauf ein, inwieweit sich die Installation der Photovoltaikanlage zur Energieeinsparung lohnt (Siehe Experiment 4.3) und wie sinnvoll es wäre, auf eine vollständige Versorgung durch die Photovoltaikanlage zu setzen.

Das Gebäude wird in den Zeiten von 6.00 Uhr – 9.00 Uhr und von 15.00 Uhr – 18.00 Uhr optimal versorgt. Diese optimale Versorgung ist jedoch nur möglich, weil das Kraftwerk ebenfalls Energie abgibt. Ohne das Kraftwerk käme es in diesen Zeiten zu einer Unterversorgung. Die Energieabgabe des Kraftwerks ist gegenüber dem Experiment 4.3 von  $E=40,1\text{Ws}$  auf  $E=11\text{Ws}$  gesunken. Aus dieser Sicht hat sich die Errichtung der Photovoltaikanlage zur Energieeinsparung gelohnt.

In der Zeit von 9.00 Uhr bis 15.00 Uhr kommt es jedoch zu einer Überversorgung, da die Solaranlage zu viel Energie erzeugt.

4. Benenne Möglichkeiten die Energieabgabe durch das Kraftwerk weiter zu verringern und die Versorgung zu verbessern bzw. Überspannungen zu vermeiden.
- Abschalten beziehungsweise Drosseln der Solaranlage, sobald es zur Überversorgung kommt.
  - Überschüssige Energie zur Speicherung nutzen und am Morgen und am Abend, wenn die Energie aus dem Kraftwerk benötigt wird, die Energie aus dem Speicher nutzen.
  - Konzept der Lastverschiebung: Die Wäscherei um die Mittagszeit arbeiten lassen.
  - Überschüssige Energie in das Stromnetz einspeisen.



## 4.5 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk, eine Photovoltaikanlage und einen Energiespeicher (Kondensator)

### Ziele

- Die Schüler gewinnen einen Einblick in die physikalischen Vorgänge eines Stromkreises aus einem Verbraucher, einer Spannungsquelle, einem Kondensator und einer Leistungsquelle.
- Die Schüler tragen die Messpunkte über die Leistung des Photovoltaikmoduls mit Kondensator in ein t-P-Diagramm ein und ergänzen das Diagramm mit dem Leistungsgraphen aus Experiment 4.3 und der Leistung der Photovoltaikanlage aus Experiment 4.4.
- Die Schüler erklären den Verlauf der Messpunkte mit Hilfe ihres Wissens über Kondensatoren und das Solarmodul.
- Die Schüler bewerten durch den Vergleich der Kurven den Einsatz von Energiespeichern zum Erhalt der Versorgung und zur Energieeinsparung.

### Vorwissen

- Die Schüler können am Verlauf der beiden Leistungskurven erkennen, ob der Kondensator Energie aufnimmt oder abgibt.
- Die Schüler kennen die Eigenschaften eines Kondensators im Auflade- und Entladeprozess.
- Die Schüler wissen, dass das Solarmodul und das PowerModul keine Energie aufnehmen können.
- Die Schüler wissen, dass ein Solarmodul bei einer höheren Beleuchtung und einem konstanten angeschlossenen Widerstand eine größere Spannung erzeugt und mehr Leistung abgibt.

### Vorversuche

- Experiment 4.1: Leistungsschwankungen einer Photovoltaikanlage
- Experiment 4.3: Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk
- Experiment 4.4: Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk und eine Photovoltaikanlage

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Das Experiment simuliert ein Stromnetz aus Kraftwerk (PowerModul), regenerativer Energiequelle (Photovoltaikanlage), Energiespeicher (Kondensator) und Verbraucher (Glühlampen und Motor), wobei die regenerativen Energiequellen die komplette Versorgung übernehmen können.
- Das Experiment eignet sich dazu, die Arbeitsweise eines virtuellen Kraftwerks einzuführen (Demand-Side-Management beziehungsweise Anreize zum Demand-Side-Response). In dem Versuch wird außerdem die Elektromobilität ins Stromnetz eingeführt, indem der Speicher (Kondensator) direkt für den Betrieb eines Elektroautos (Modellauto) verwendet werden kann.
- In der Simulation wird der Tagesverlauf durch diskrete Azimutwinkel des Solarmoduls simuliert, da eine kontinuierliche Beleuchtungsveränderung, wie bei einem realen Tagesverlauf per Hand nicht durchführbar ist. Stattdessen stehen die verschiedenen Azimutwinkel stellvertretend für einen bestimmten Tagesabschnitt.
- Die reversible Brennstoffzelle kann für diesen Versuch nicht genutzt werden, da sie bei einer Spannung von 3V keine Energie abgeben kann. Ihre Leerlaufspannung beträgt 1V (Experiment 3.3).
- Die Versuchsdurchführung ist sehr komplex. Es werden vier Schüler für die Aufgaben „Messwerte ablesen“, „Uhrzeit ablesen“, „Verbraucherplan durchführen“, „Solarmodul drehen“ und „Kondensator anstecken“ gebraucht. Die Schüler sollten sich vor der Durchführung bewusst sein, welche Aufgaben erledigt werden müssen und eine Aufgabenverteilung erstellen.
- Das Experiment sollte zur Vergleichbarkeit mit demselben Aufbau aus Experiment 4.4 durchgeführt werden.
- Das Auto dient zur Veranschaulichung, dass Elektroautos die dezentralen Speicher sein können.



## 4.5 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk, eine Photovoltaikanlage und einen Energiespeicher

### Aufgabe

Miss die Leistung, die von der Photovoltaikanlage (dem Solarmodul) und einem Speicher (dem Kondensator) und die Energie, die von einem Kraftwerk (das PowerModul) im Laufe eines simulierten Tages an das Gebäude abgegeben werden.

### Vorbemerkungen

Das Experiment simuliert den Fall, dass ein Unternehmen sein Firmengebäude mit einer erneuerbaren Energiequelle und einem Energiespeicher versorgen lässt. Der Energiespeicher ist zu Beginn des Tages vom Vortag noch zum Teil geladen.

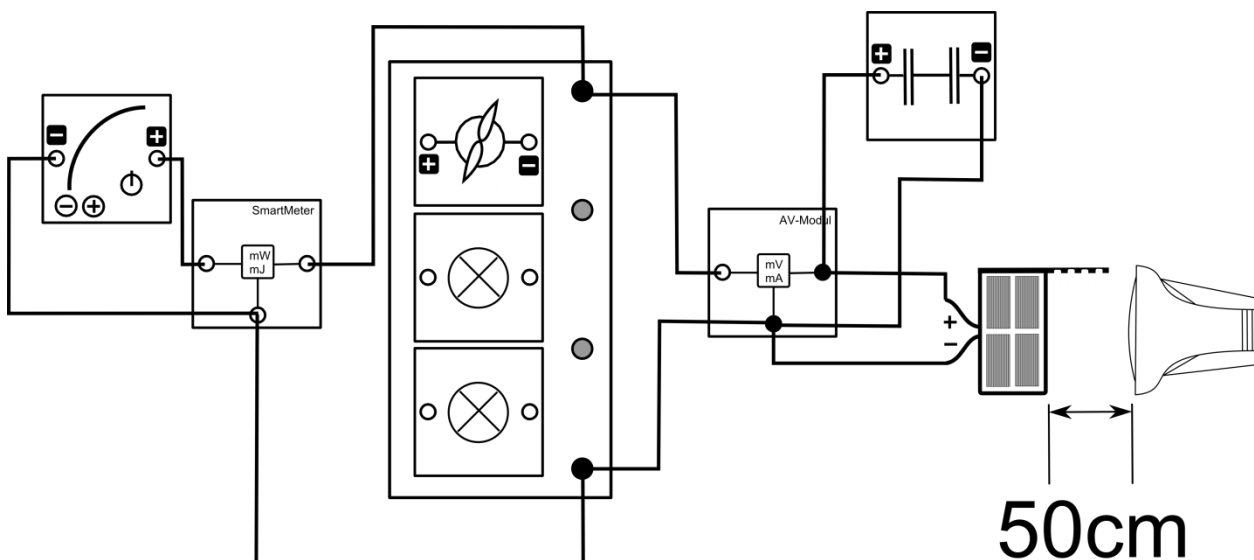
Im Experiment muss das Motormodul schnell von der Grundeinheit abgenommen und aufgesteckt werden. Übe das Auf- und Abnehmen, bevor du den Versuch durchführst, um bessere Messergebnisse zu bekommen.

Stehe hinter dem Solarmodul, da Reflektionen die Beleuchtungsstärke am Solarmodul verändern.

### Geräte

- Grundeinheit
- SmartMeter
- AV-Modul
- PowerModul 3V (Kraftwerk)
- Solarmodul (Photovoltaikanlage)
- Lampe (Sonne)
- 2 Glühlampenmodule (Bildschirme)
- Motormodul (Waschmaschinen)
- Kondensatormodul (Speichermedium)
- Kabel
- Stoppuhr
- Azimutwinkelskala
- Auto

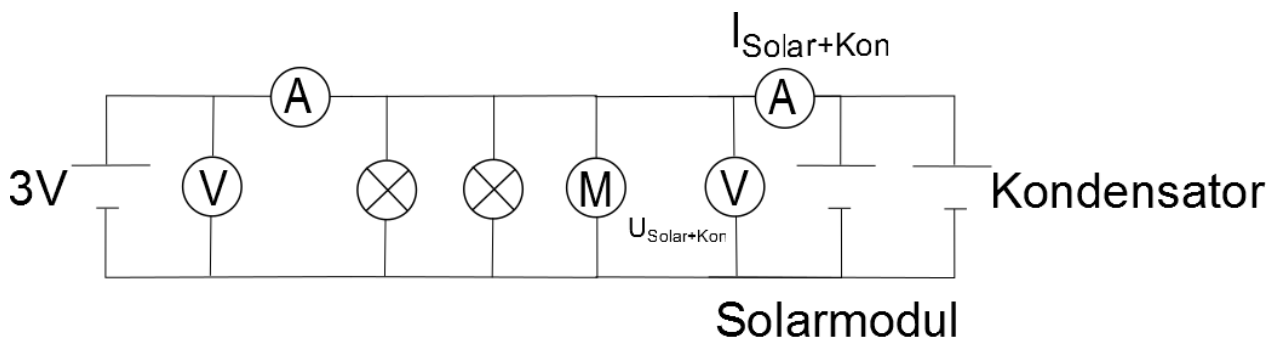
### Aufbau





## 4.5 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk, eine Photovoltaikanlage und einen Energiespeicher

### Schaltskizze



### Durchführung

1. Lade den Kondensator zur Vorbereitung bis auf eine Spannung von 3V auf, aber schließe ihn noch nicht an
2. Baue den Versuch entsprechend des Versuchsaufbaus auf. Stelle das Solarmodul senkrecht zur Tischebene und in 6Uhr-Stellung zur Lampe auf. Richte den Strahlengang der Lampe parallel zur Tischebene aus. Stelle die Energiemessung des SmartMeters auf null. Stelle die Spannung des PowerModuls auf 3V ein.
3. Lies die weitere Durchführung des Versuchs und teile auf, wer welche Aufgaben während des Versuchs übernimmt.
4. Während des Experiments simulieren wir die Zeit von 6.00 Uhr bis 18.00 Uhr, indem wir annehmen, dass 10s im Experiment einer Stunde des Tages entsprechen. Während des Tages/ des Experiments soll folgender Verbrauchsplan eingehalten werden:
  - Die Bildschirme laufen von 6.00 Uhr bis 18.00 Uhr.
  - Die Waschmaschinen sind von 6.00 Uhr bis 8.30Uhr und von 16.30 Uhr bis 18.00 Uhr in Betrieb.
5. Beginne den Versuch in dem du folgende Handlungen gleichzeitig durchführst: Schließe den Kondensator an, schalte das PowerModul ein und beginne mit der Zeitmessung.
6. Miss während des Versuchs die Spannung und die Stromstärke am Solarmodul mit Kondensator und die vom PowerModul abgegebene Energie. Trage alle Werte in die Tabelle ein.
7. Berechne die Leistungsabgabe der Solaranlage und des Kondensators an das Gebäude zu den verschiedenen Tageszeiten.

### Messwerte

$t_{\text{Versuch}}$ in s	0	10	20	30	40	50	60
Uhrzeit	6Uhr	7Uhr	8 Uhr	9 Uhr	10 Uhr	11 Uhr	12 Uhr
$U_{\text{Solar+Kon}}$ in V	3	3	3,1	3,1	3,2	3,3	3,4
$I_{\text{Solar+Kon}}$ in mA	40	42	82	99	114	125	136
$P_{\text{Solar+Kon}}$ in mW	120	126	254,2	306,9	364,8	412,5	462,4
$E_{\text{Pow}}$ in Ws	0	2,6	4,6	5,5	5,5	5,5	5,5



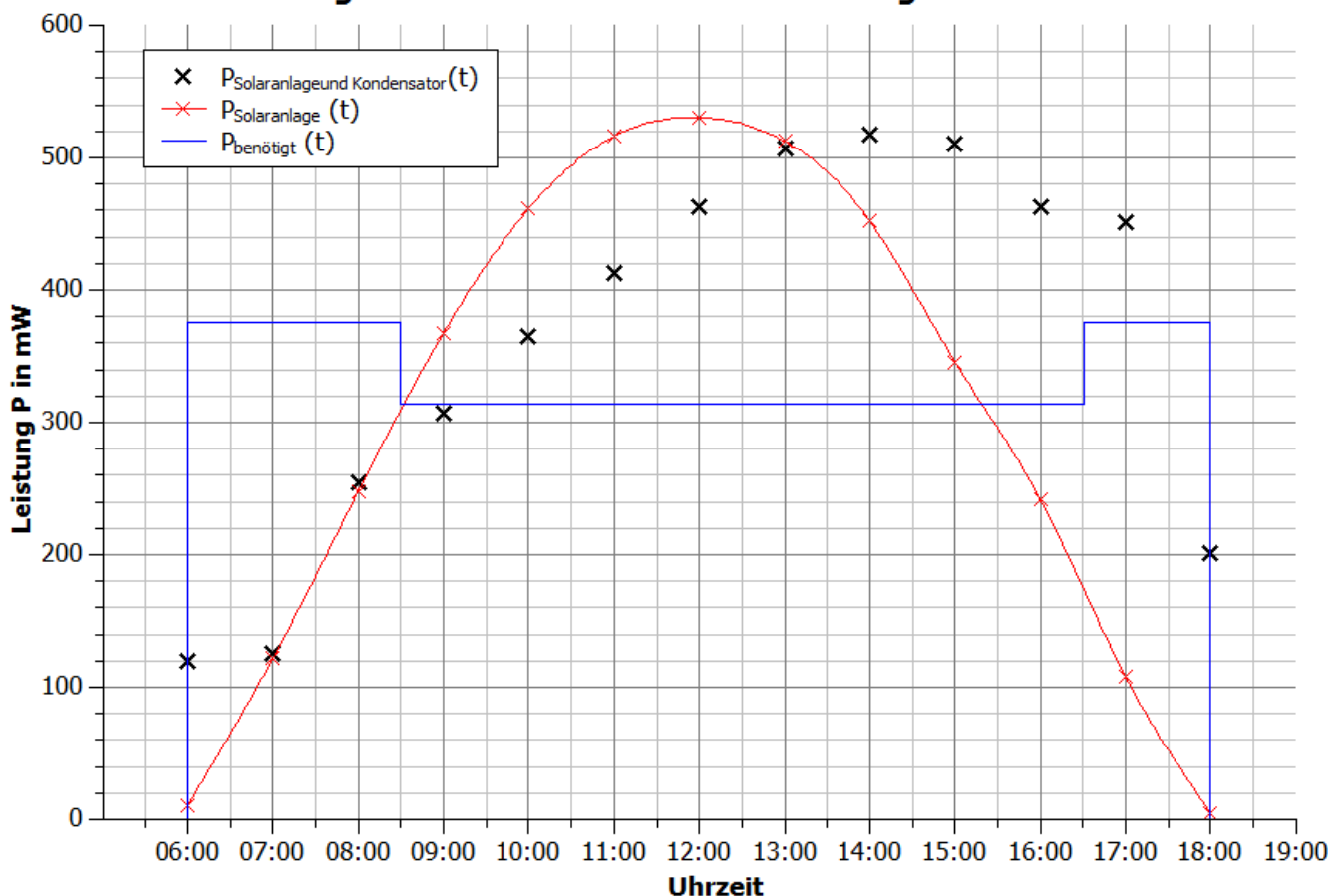
## 4.5 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk, eine Photovoltaikanlage und einen Energiespeicher

$t_{\text{Versuch}}$ in s	70	80	90	100	110	120
Uhrzeit	13 Uhr	14 Uhr	15 Uhr	16 Uhr	17 Uhr	18 Uhr
$U_{\text{Solar+Kon}}$ in V	3,5	3,5	3,5	3,4	3,2	3,1
$I_{\text{Solar+Kon}}$ in mA	145	148	146	136	141	65
$P_{\text{Solar+Kon}}$ in mW	507,5	518	511	462,4	451,2	201,5
$E_{\text{Pow}}$ in Ws	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,9

### Auswertung

- Trage deine Messpunkte über die Leistung des Solarmoduls mit Speichermedium in das Diagramm ein. Ergänze das Diagramm mit den Messpunkten zur Leistung der Solaranlage aus Experiment 4.4 und der benötigten Leistung aus Experiment 4.3

#### Leistungsverhalten einer Photovoltaikanlage mit Kondensator





## 4.5 Versorgung eines Gebäudes durch ein Kraftwerk, eine Photovoltaikanlage und einen Energiespeicher

2. Vergleiche den Verlauf der Leistung des Solarmoduls mit und ohne Kondensator. Erkläre den Verlauf der Messpunkte.

In der Zeit von 6:00 Uhr bis 7:00 Uhr ist die Leistung des Solarmoduls mit Kondensator größer als ohne. Bis mindestens 8:00 Uhr ist die Leistung gleich. Von 9:00 Uhr bis 13:00 Uhr ist die Leistung der Solaranlage mit Kondensator geringer. Ab diesem Zeitpunkt ist sie immer größer.

Von 6:00 Uhr bis 7:00 Uhr gibt das Solarmodul aufgrund des Kondensators Leistung ab. In der Zeit von 7:00 bis 8:00 ist die Spannung zwischen Kondensator und Solarmodul gleich, da die gesamte Leistung des Solarmoduls an die Widerstände abgegeben wird. Ab ca. 8:00 Uhr wird der Kondensator aufgeladen, da die Leistungsabgabe geringer ist als ohne Kondensator. Die Spannung des Solarmoduls ist damit größer als die des Kondensators. Ab ca. 14:00 liegt die Spannung des Solarmoduls unterhalb der Spannung des Kondensators, da der Kondensator wieder Energie abgibt. Die Energieabgabe des Kondensators ist allerdings aufgrund der Spannungsdifferenz zwischen Kondensator und Solarmodul so gering, dass sich seine Leistung kaum verringert und die Kondensatorspannung somit nur sehr langsam abnimmt. Erst ab 17:00 ist die Spannung des Solarmoduls so gering, dass der Kondensator sehr viel Energie abgeben kann und damit die Gesamtleistung sehr schnell sinkt.

3. Bewerte den Einsatz des Speichermediums in Bezug auf die Veränderung des Leistungsverhalten der Photovoltaikanlage und der Einsparung von Energiekosten gegenüber Experiment 4.4.

Der Energiespeicher speichert einen Teil der überschüssigen Energie und gibt sie zu den Zeiten wieder ab, wenn die Leistung der Solaranlage zur Versorgung nicht ausreicht. Allerdings ist die Überversorgung trotzdem noch gegeben. Sie hat sich nur verlagert.

Das Kraftwerk muss statt  $E=11\text{Ws}$  (Experiment 4.4) nur noch  $E=5,9\text{Ws}$  an das Gebäude abgeben. Durch Energiespeicher können damit fossile Rohstoffe eingespart und die Stromrechnung gesenkt werden.

4. Schließe den Kondensator an das Auto an und beschreibe die Energieabgabe eines Kondensators.

Zu Beginn ist das Auto sehr schnell jedoch, wird es sehr schnell langsam. Dies lässt darauf schließen, dass die Energieabgabe und Spannung immer weiter abnimmt. (vgl. Experiment 3.7)



## 4.6 Spannungsverhalten in einem herkömmlichen Strahlennetz

### Ziele

- Die Schüler messen den typischen Verlauf der Spannung in einem Strahlennetz und tragen diese in ein Diagramm ein.
- Die Schüler erklären die Spannungswerte mit Hilfe ihres Wissens über das Ohm'sche Gesetz.
- Die Schüler zeichnen die maximale Abweichung von der Nennspannung in das Diagramm ein und bewerten ihre Messwerte. Hierdurch erkennen die Schüler, dass die Spannungsgrenzen nicht eingehalten werden.
- Die Schüler erarbeiten sich mit Hilfe ihres Wissens über Ohm'sche Widerstände Lösungsmöglichkeiten, für eine bessere Einhaltung des Spannungsbandes.
- Die Schüler erkennen, dass die Spannung am Transformator nicht unbedingt der Nennspannung entspricht.
- Die Schüler überprüfen ihre Lösungsmöglichkeiten soweit wie möglich experimentell.

### Vorwissen

- Die Schüler können das Ohm'sche Gesetz anwenden
- Die Schüler wissen, dass das elektrische Potential hinter einem Widerstand gesunken ist. (Spannungsabfall)
- Die Schüler wissen, dass der Widerstand der Leitung konstant ist

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Dieses Experiment eignet sich dazu die starren Zustände in einem typischen Niederspannungsnetz darzustellen.
- 2 Lösungsansätze aus der Aufgabe 5 wurden experimentell überprüft. Die Messergebnisse sind in Aufgabe 6 und 7 dargestellt.



## 4.6 Spannungsverhalten in einem herkömmlichen Strahlennetz

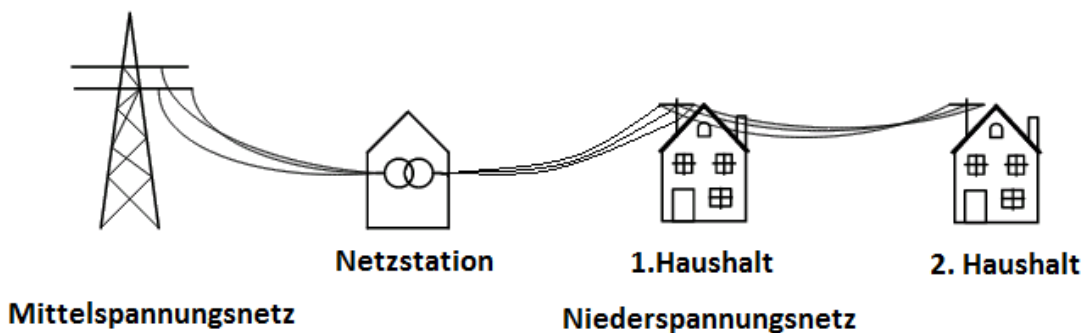
### Aufgabe

Miss die Spannung in einem Strahlennetz mit 2 Wohnhäusern (Glühlampen), das von einem Transformator (PowerModul) versorgt wird.

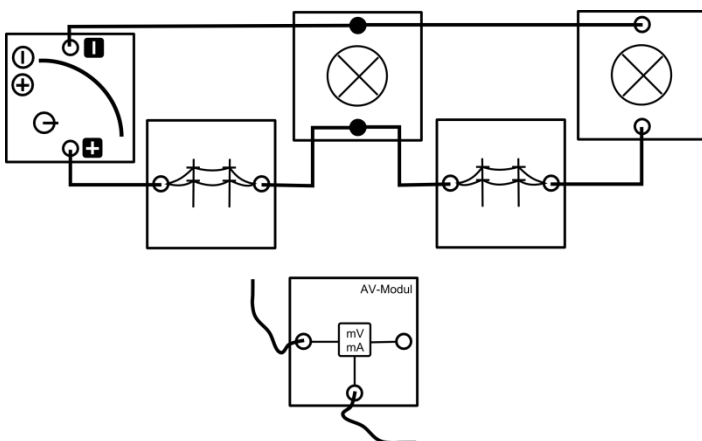
### Vorbemerkung

In diesem Experiment wird das Verhalten der Spannung in einem Ortsnetzgebiet untersucht. Einige Ortsnetzgebiete in Deutschland sind strangförmig aufgebaut. Am Anfang des Stranges befindet sich ein Transformator, der die Spannung des Mittelspannungsnetzes auf das Niveau des Niederspannungsnetzes heruntertransformiert. In diesem Experiment dient das PowerModul als Transformator, der eine Spannung an den Strang anlegt. In der Realität beträgt die Nennspannung 230V. Für die Simulation liegt die Nennspannung bei 3V.

### Realsituation



### Aufbau

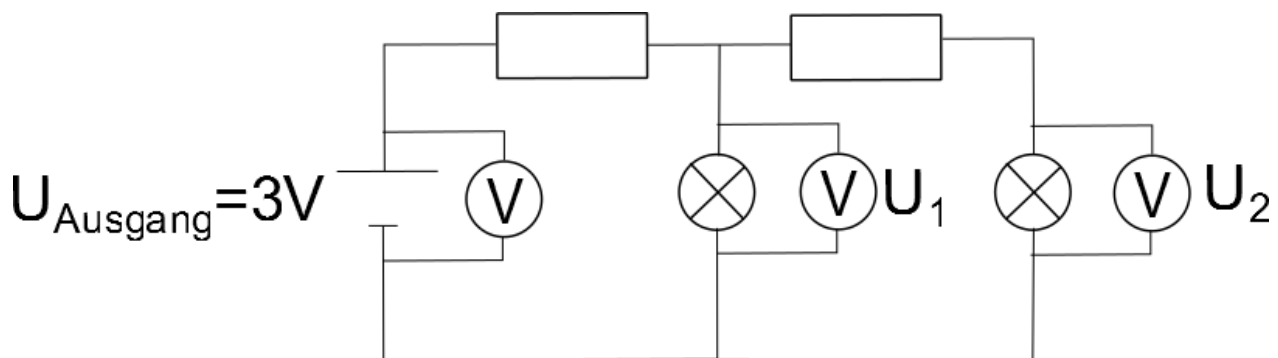


### Geräte

- Grundeinheit
- PowerModul (Transformator)
- AV-Modul mit 2 Kabeln
- 2 Stromnetzmodule (Stromleitungen)
- 2 Lampenmodule (Haushalt 1 und 2)
- Kabel

## 4.6 Spannungsverhalten in einem herkömmlichen Strahlennetz

## Schaltskizze



## Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend des Versuchsaufbaus auf
2. Miss die angelegte Ausgangsspannung  $U_{Ausgang}$  am PowerModul, die Spannung  $U_1$  am mittleren Glühlampenmodul (Haushalt 1) und die Spannung  $U_2$  am rechten Glühlampenmodul (Haushalt 2).

## Messwerte

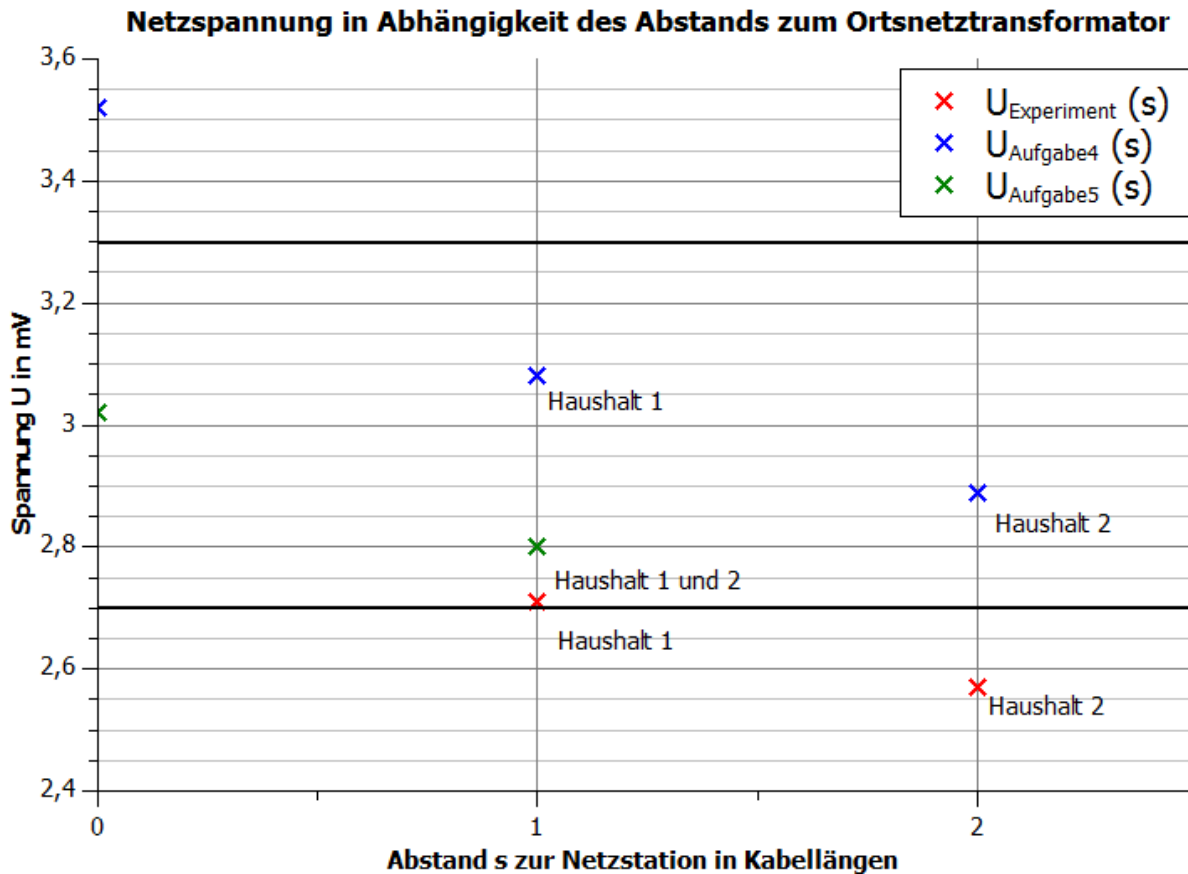
$U_{Ausgang}$ in V	3,02
$U_1$ in V	2,71
$U_2$ in V	2,57



## 4.6 Spannungsverhalten in einem herkömmlichen Strahlennetz

### Auswertung

- Trage deine Messwerte in das Abstand-Spannung-Diagramm. Ein Abstand entspricht einem Stromnetzmodul. Schreibe zu den Messpunkten um welchen Haushalt es sich handelt.



- Vergleiche die drei Spannungswerte miteinander und erkläre die Werte.

Die Spannung am PowerModul ist mit 3,02V um 0,31V größer als am mittleren Glühlampenmodul (2,83V). Diese ist wiederum um 0,13V größer als am rechten Glühlampenmodul (2,7V). Die Ursache liegt in den Leitungswiderständen zwischen dem PowerModul und den Glühlampen, die für einen Spannungsabfall sorgen. Am Leitungswiderstand zwischen dem PowerModul und dem mittleren Glühlampenmodul ist der Spannungsabfall größer als über dem zweiten Leitungswiderstand, da hier eine größere Stromstärke hindurchfließt.

- Erläutere die Bedeutung deiner Experimentierergebnisse für die Realität.

Die Experimentierergebnisse zeigen, dass die Spannung an den Haushalten in einem Netzstrang mit zunehmendem Abstand zum Transformator abnimmt.

- In der Realität ist dieses Verhalten ebenfalls beobachtbar, wobei die Spannung an einem Haushalt maximal um 10% von der Nennspannung 230V abweichen darf. Zeichne mit einer waagerechten Linie die obere und die untere Grenze des erlaubten Spannungsbereichs für die Nennspannung von 3V in das Diagramm ein. Bewerte, ob die Spannungswerte der Haushalte im erlaubten Bereich liegen.

Der Wert von Haushalt 2 liegt außerhalb des Spannungsbereichs. Der Wert von Haushalt 1 liegt an der Grenze zum Spannungsbereich. In dieser Form darf das Strahlennetz nicht genutzt werden.



## 4.6 Spannungsverhalten in einem herkömmlichen Strahlennetz

5. Erläutere Lösungsmöglichkeiten, um die Abweichungen von der Nennspannung für alle Verbraucher möglichst gering zu halten und überprüfe sie, soweit wie möglich, experimentell.
- Die Ausgangsspannung an der Transformatorstation so einstellen, dass die kleinste Abweichung für alle Verbraucher entsteht (Siehe Aufgabe 6).
  - Man könnte widerstandsärmere Leitungen legen, sodass die Spannungsabfälle geringer sind. Die Leitungen kosten für gewöhnlich mehr Geld (Netzausbau).
  - Man könnte die Transformatorstation zwischen den Häusern aufbauen. Dadurch wird der Weg zu den Häusern geringer (Siehe Aufgabe 7).
  - Man sollte so wenig wie möglich Häuser an einen Strang bauen.
6. Miss die Spannungswerte  $U_{Ausgang}$ ,  $U_1$  und  $U_2$  noch einmal für eine Ausgangsspannung von 3,5V. Vergleiche die Messwerte mit dem ursprünglichen Ergebnis und bewerte das Ergebnis.

$U_{Ausgang}$ in V	3,52
$U_1$ in V	3,08
$U_2$ in V	2,89

Die Spannungsabfälle sind größer, da die Stromstärke größer ist. Durch die erhöhte Spannung befinden sich jedoch alle Haushalte innerhalb des Spannungsbandes.

7. Miss die Spannungswerte  $U_{Ausgang}$ ,  $U_1$  und  $U_2$  noch einmal für eine Transformatorstation zwischen den Haushalten und bewerte das Ergebnis.

$U_{Ausgang}$ in V	3,02
$U_1$ in V	2,80
$U_2$ in V	2,80

Die Spannungsabfälle sind kleiner, da die Stromstärke kleiner ist. Alle Haushalte befinden sich innerhalb des Spannungsbandes. Es ist damit günstig den Transformator zwischen den Haushalten zu bauen. Des Weiteren ist es besser die Leitungen einzeln zu Häusern zu ziehen, da dann nur die Stromstärke für diesen Haushalt durch das Kabel fließt. Dies bedeutet allerdings höhere Kosten.



## 4.7-4.9 Experimente zum Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage

### Ziele

#### Experiment 4.7: Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage

- Die Schüler messen die Spannung an 2 Haushalten in einem Niederspannungsstrang und die Leistungseinspeisung eines Transformators und berechnen die Leistung der Photovoltaikanlage zu verschiedenen Tageszeiten und tragen sie in ein Diagramm ein.
- Die Schüler erklären mit dem Wissen über das Zusammenwirken von PowerModul und Solarmodul die Messwerte und interpretieren die Versorgungslage zu verschiedenen Tageszeiten.
- Die Schüler argumentieren anhand ihrer Messwerte, dass die Leistung so groß sein kann, dass die Energie der Photovoltaikanlage in das Mittelspannungsnetz gespeist wird.
- Die Schüler vergleichen die Spannungswerte mit Experiment 4.7 und erkennen, dass das erlaubte Spannungsband bei hoher Bestrahlung verletzt wird.

#### Experiment 4.8: Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage in Abhängigkeit vom Verbrauch

- Die Schüler messen die Spannung an den Haushalten bei unterschiedlichem Verbrauch.
- Die Schüler vergleichen die Messwerte und interpretieren aus den Messwerten, dass eine Verletzung des Spannungsbandes bei einem geringeren Verbrauch wahrscheinlicher ist.
- Die Schüler erklären die Veränderung der Spannung mit Hilfe der U-I-Kennlinie.
- Die Schüler erklären die Veränderung der Spannung in der Realsituation, wenn die Photovoltaikanlage eine konstante Leistung abgibt.

#### Experiment 4.9: Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage in Abhängigkeit von der Länge des Leiters

- Die Schüler messen die Spannung an den Haushalten bei unterschiedlicher Länge des Leiters.
- Die Schüler vergleichen die Messwerte und interpretieren aus den Messwerten, dass eine Verletzung des Spannungsbandes bei einer größeren Länge des Leiters auftritt.
- Die Schüler erklären die Erhöhung der Spannung bei längeren Leitungen.
- Die Schüler schlussfolgern aus den Interpretationen der Messergebnisse von Experiment 4.7 bis 4.9, dass die Gefahr von Überspannungen in ländlichen Gebieten am größten ist.
- Die Schüler erläutern anhand der Experimente 4.7 bis 4.9 Lösungsmöglichkeiten, um die Überspannung abzubauen.

### Vorwissen

- Die Schüler wissen, dass das Windungsverhältnis am Transformator festeingestellt ist und damit die Ausgangsspannung ebenfalls nicht verändert werden kann.
- Die Schüler kennen das Ohm'sche Gesetz.
- Die Schüler kennen die U-I-Kennlinie der Photovoltaikanlage.
- Die Schüler kennen das Zusammenwirken von Spannung, Stromstärke, Widerständen und Spannungsquellen in Reihen- und Parallelschaltungen.
- Die Schüler wissen, dass der Strom immer von der höheren zur niedrigeren Spannungsniveau fließt.
- Die Schüler wissen, dass ein Transformator auch Energie in die Mittelspannungsebene zurückspeisen kann.
- Die Schüler wissen, dass der Vorzeichenwechsel der Leistung auf dem SmartMeter eine Umkehr der Stromflussrichtung ist.
- Die Schüler wissen, dass in ländlichen Gegenden längere Stromleitungen und leistungstärkere Photovoltaikanlagen vorherrschen.



## 4.7-4.9 Experimente zum Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage

### Vorversuche

- Experiment 1.1: U-I-Kennlinie einer Photovoltaikanlage
- Experiment 1.2: U-I-Kennlinie einer Photovoltaikanlage in Abhängigkeit von der Bestrahlung
- Experiment 4.6: Spannungsverhalten in einem herkömmlichen Strahlennetz

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Die Experimente eignen sich, um die Probleme durch das Einfügen von Photovoltaikanlagen in das Niederspannungsnetz experimentell darzustellen.
- Der Experimentieraufbau der Versuche 4.7 bis 4.9 ist sehr ähnlich. Zudem werden nur wenige Messwerte genommen. Es sollte überlegt werden, ob mehrere Experimente aus Effektivitätsgründen hintereinander durchgeführt werden.  
 Bei den Experimenten muss darauf geachtet werden, dass das PowerModul immer Energie abgibt, aber die abgegebene Stromstärke nicht mehr als 190 mA entspricht (Dies entspricht auf dem SmartMeter einer Leistung von 665 mW bei 3,5 V). Andernfalls ist der Unterschied zwischen Realität und Modell noch größer.  
 In dem Fall, dass das PowerModul keine Energie abgibt, müsste es, um einen Transformator zu simulieren, Energie aufnehmen oder weiterleiten. Dieser Vorgang würde die Realität richtig simulieren, da in dieser ein Transformator Energie aus dem Niederspannungsstrang an das Mittelspannungsnetz weitergeben würde. Das PowerModul ist jedoch nur eine Spannungsquelle, die keine Energie aufnehmen oder weiterleiten kann. Im Experiment würde die Spannung an den Verbrauchern beim Erreichen von 0 mA weiter steigen, wenn sich die Leistung der Photovoltaikanlage erhöht. Dies geschieht zwar in der Realität mit einem Transformator ebenfalls, aber die physikalischen Ursachen im Experiment und in der Realität sind verschieden. Das Experiment würde damit ebenfalls die Realität nicht richtig nachstellen.  
 Im Fall von mehr als 190 mA, fließt zu viel Stromstärke durch die Stromnetzmodule, die dann nicht mehr in der Lage sind eine Stromleitung realistisch zu simulieren.  
 Die Leistungsanzeige des SmartMeters kann dabei helfen, die Solaranlage vor den Experimenten so auszurichten, dass das PowerModul bei maximaler Beleuchtung trotzdem Energie abgibt. Der Fall einer zu hohen Stromstärke kann nur auftreten, wenn die vorgegebenen Widerstandswerte in Experiment 4.8 und 4.9 nicht eingehalten werden.
- Die Leistungsanzeige des SmartMeters kann dabei helfen die Solaranlage vor den Experimenten so auszurichten, dass das PowerModul bei maximaler Beleuchtung trotzdem Energie abgibt. Der Fall einer zu hohen Stromstärke kann nur auftreten, wenn die vorgegebenen Widerstandswerte in Experiment 4.8 und 4.9 nicht eingehalten werden..
- Innerhalb des Experiments 4.8 sind Ursache und Wirkung sowohl im Modell als auch in der Realität gleich. Jedoch sind die physikalischen Vorgänge verschieden, da die Leistung realer Photovoltaikanlagen unabhängig von dem angeschlossenen Widerstand ist. In der Musterlösung sind aus diesem Grund zwei Erklärungswege aufgezeigt. Die Musterlösung zu Aufgabe 2 erklärt die physikalischen Vorgänge innerhalb des Experiments durch die U-I-Kennlinie. Die Musterlösung zu Aufgabe 3 erklärt die physikalischen Vorgänge in der Realität durch das Vorhandensein einer Leistungsquelle.
- In den Experimenten 4.8 und 4.9 wird nur der Fall betrachtet, wenn die Beleuchtungsstärke auf die Photovoltaikanlage maximal ist, da hier die größten Spannungsüberschreitungen auftreten.
- Natürliches Sonnenlicht beeinflusst die Ergebnisse. Die Musterlösungen wurden in einem von Jalousien abgedunkelten Raum aufgenommen.



## 4.7 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage

### Aufgabe

Miss die Spannungen an zwei Haushalten in einem Strahlennetz für verschiedene Tageszeiten, die von einem Transformator (PowerModul) und einer Photovoltaikanlage (Solarmodul) versorgt werden.

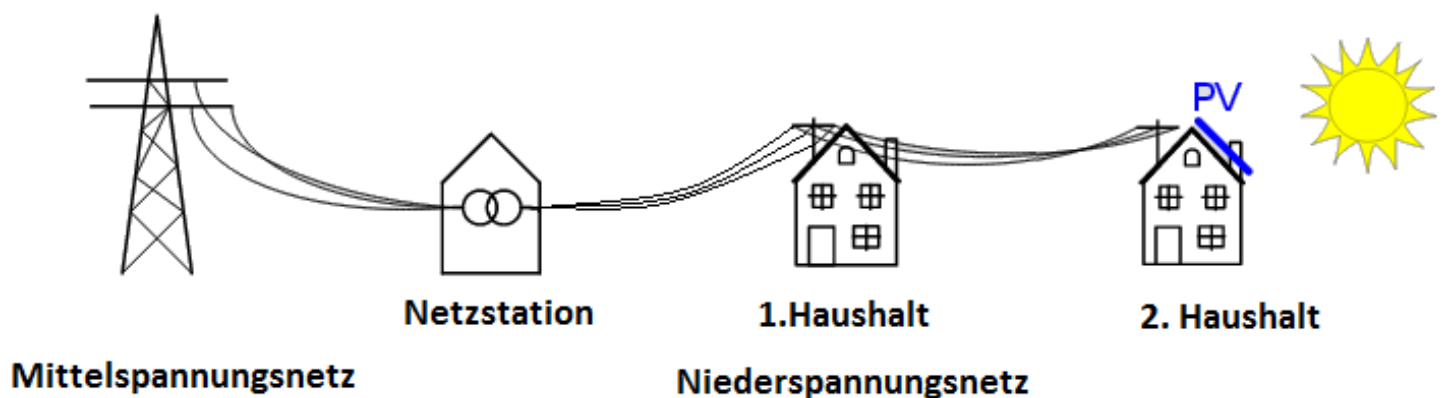
### Vorbemerkung

Bei diesem Experiment hat sich der Besitzer des Haushaltes am Ende des Strangs eine Photovoltaikanlage an seinem Haus installiert. Durch den Betrieb der Photovoltaikanlage musste er sich einen intelligenten Stromzähler (Smart Meter) dazu kaufen, der angibt, ob er Leistung aus dem Netz bezieht oder nicht. Dies erkennt man an dem Vorzeichen der Leistung.

Um die Spannung an jedem Haus bei  $3V \pm 10\%$  zu halten wurde der Transformator so eingestellt, dass er eine Nennspannung von  $3,5V$  einspeist (so wie in Experiment 4.6 bereits realisiert).

Stehe hinter dem Solarmodul, da Reflektionen die Beleuchtungsstärke am Solarmodul verändern.

### Realsituation

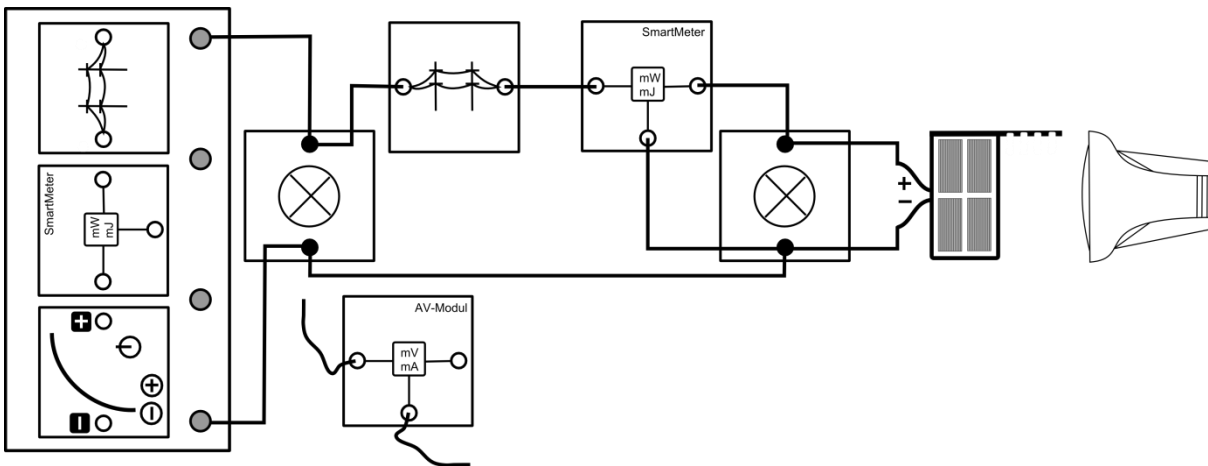


### Geräte

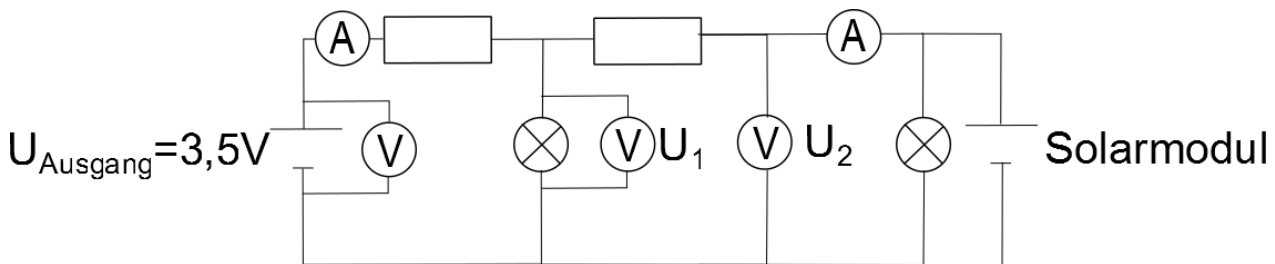
- Grundeinheit
- PowerModul 3,5V (Transformator)
- 2 SmartMeter
- AV-Modul mit 2 Kabeln
- 2 Stromnetzmodule (Stromleitungen)
- 2 Glühlampenmodule (Haushalt 1 und 2)
- Solarmodul (Photovoltaikanlage bei Haus 2)
- Lampe (Sonne)
- Azimutwinkelskala
- Kabel

## 4.7 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage

## Aufbau



## Schaltskizze



## Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend des Versuchsaufbaus auf. Achte auf die richtige Polung des PowerModuls und des Solarmoduls.
2. Stelle das Solarmodul senkrecht zur Tischebene und in 6:00Uhr-Stellung zur Lampe. Stelle die Lampe in 50cm Entfernung auf und richte den Strahlengang parallel zur Tischebene.
3. Schalte die Lampe und das PowerModul ein. Miss die Leistung des PowerModuls, die Leistung beim Haushalt 2 und die Spannung an beiden Haushalten. Achte besonders auf das Vorzeichen der Leistung am Haushalt 2.
4. Drehe das Solarmodul in die weiteren Uhrzeit-Stellungen und wiederhole die Aufnahme der 4 Messwerte.

## Messwerte

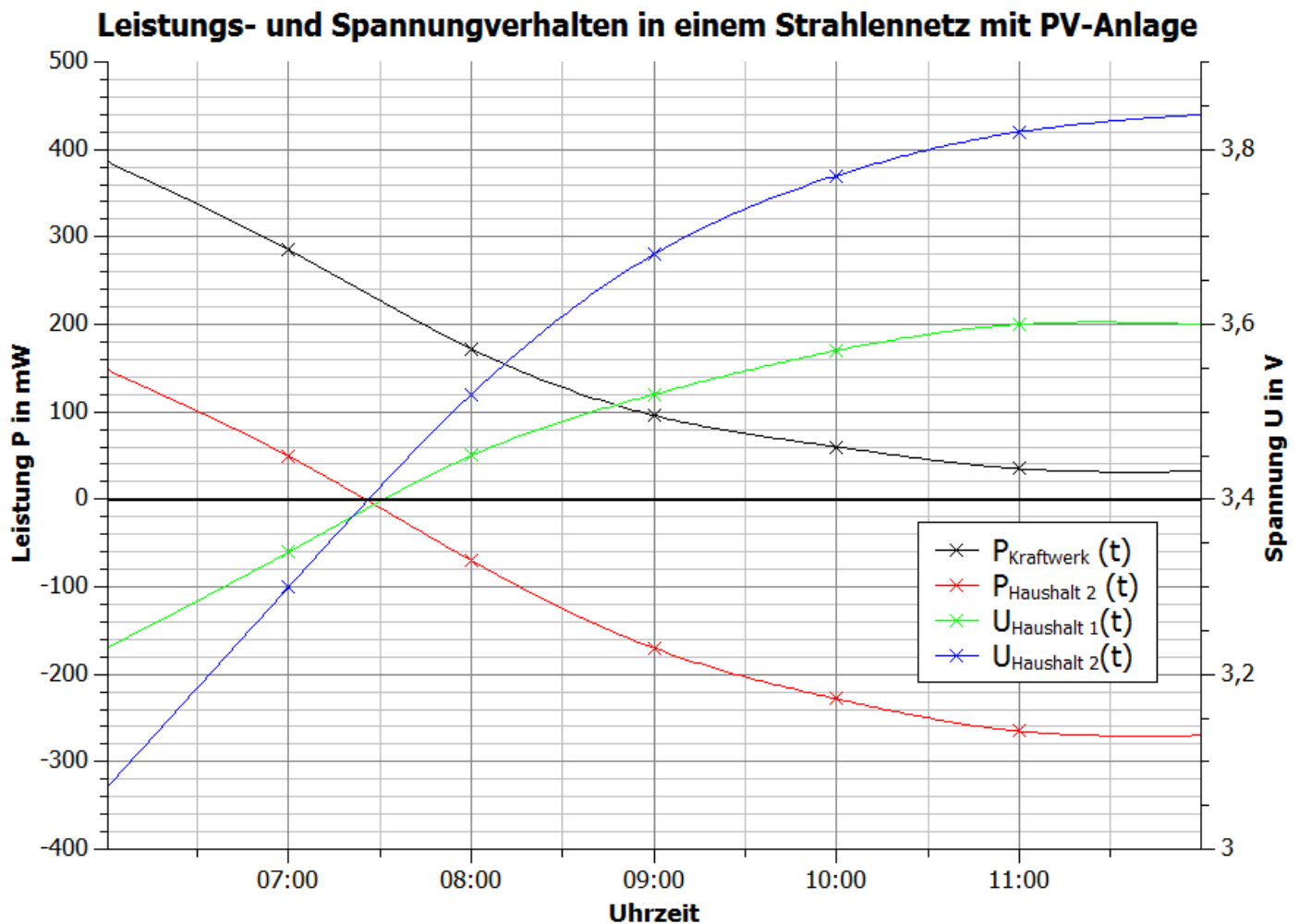
Uhrzeit	6:00 Uhr	7:00 Uhr	8:00 Uhr	9:00 Uhr	10:00 Uhr	11:00 Uhr	12:00 Uhr
$P_{\text{POWER}}$ in mW	386	285	172	96	60	35	32
$P_{\text{Haus2}}$ in mW	148	49	-70	-170	-228	-265	-270
$U_1$ in V	3,23	3,34	3,45	3,52	3,57	3,6	3,6
$U_2$ in V	3,07	3,3	3,52	3,68	3,77	3,82	3,84



## 4.7 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage

## Auswertung

1. Trage deine Messpunkte in das Uhrzeit-Leistung- und das Uhrzeit-Spannung-Diagramm ein. Skizziere die Graphen.



2. Beschreibe und erkläre anhand deiner Messwerte die physikalischen Vorgänge innerhalb des Versuchs mit steigender Bestrahlung des Solarmoduls.

In der Zeit von 6:00 Uhr bis 7:30 Uhr versorgt das PowerModul beide Glühlampenmodule. Das Solarmodul versorgt nur das rechte Glühlampenmodul (Nummer 2). Dies ist daran zu erkennen, dass die Spannung am mittleren Glühlampenmodul höher als am rechten. Mit zunehmender Bestrahlung des Solarmoduls steigt die Spannung an beiden Glühlampenmodulen. Die Leistungseinspeisung des PowerModuls und die Aufnahme von Energie aus dem PowerModul am 2. Glühlampenmodul nehmen ab. Um ca. 7:30 Uhr ist die Spannung an beiden Glühlampenmodulen gleich. Zu diesem Zeitpunkt versorgt das PowerModul nur Glühlampe 1 und das Solarmodul nur Glühlampe 2. Ab ca. 7:30 steigt die Spannung an beiden Haushalten weiter, wobei die Spannung an Glühlampe 2 nun höher ist als an Glühlampe 1. Glühlampe 2 wird vollständig vom Solarmodul versorgt und Glühlampe 1 von PowerModul und Solarmodul. Die größten Spannungen werden bei der höchsten Bestrahlung erzeugt.



## 4.7 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage

3. Erläutere die Bedeutung deiner Messergebnisse für die Realität. Vermute und begründe, was in der Realität passieren müsste, sobald die Leistung des Transformators null ist, aber die Leistung des Solarmoduls weiter steigt.

In einem Strahlennetz sorgt eine Photovoltaikanlage für eine Erhöhung der Spannung an allen angeschlossenen Haushalten. Statt dass die Spannung mit zunehmendem Abstand zum Transformator sinkt, steigt sie nun. Je höher die Bestrahlung ist, desto mehr Haushalte versorgt die Photovoltaikanlage und desto höher ist die Spannung. Die Leistungseinspeisung aus dem Mittelspannungsnetz nimmt immer mehr ab.

Würde der Transformator keine Leistung mehr einspeisen, würde er Energie aus dem Strahlennetz in die Mittelspannungsebene abgeben.

4. Vergleiche die Spannungswerte mit den Ergebnissen aus dem Experiment 4.6. Beachte hierbei auch die Abweichung von der Nennspannung von 3V bei den verschiedenen Beleuchtungswinkeln.

Insgesamt sind die Spannungswerte höher als bei dem Aufbau ohne Solarmodul. Die Spannung ist an den vom Transformator weiter entfernten Haushalten ab einer bestimmten Beleuchtung größer. In Experiment 3 war dieses Verhältnis noch umgekehrt.

Durch die Spannungsheraufsetzung auf 3,5V liegt die Spannung bei geringer Beleuchtung an beiden Haushalten im erlaubten Bereich. Je höher die Beleuchtung wird, desto größer wird die Abweichung und die Grenzwerte werden wieder überschritten.



## 4.8 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage in Abhängigkeit vom Verbrauch

### Aufgabe

Miss die Spannung an den zwei Haushalten (Potentiometermodul und Glühlampenmodul) innerhalb eines Strahlennetzes in Abhängigkeit vom Verbrauch des vorderen Haushalts (Potentiometermodul).

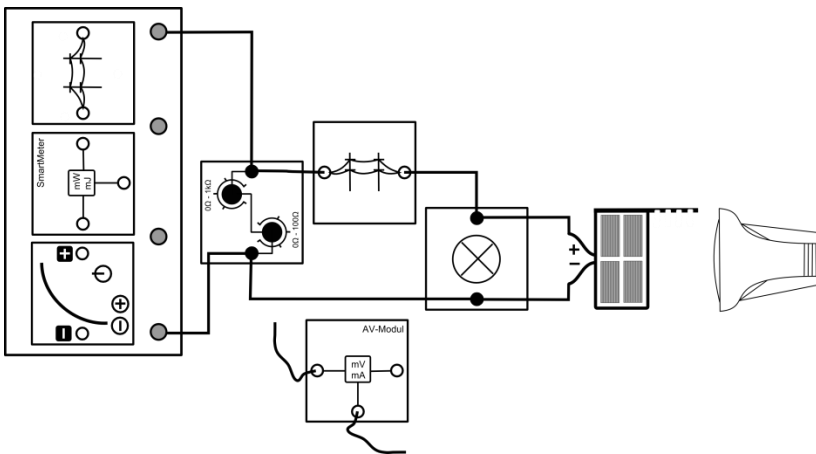
### Vorbemerkung

Der Verbrauch im vorderen Haushalt wird durch einen regelbaren Widerstand verändert. Legen wir an einen Widerstand eine konstante Spannung an, so wird nach dem Ohm'schen Gesetz die durch ihn fließende Stromstärke umso geringer, je größer dieser Widerstand ist. Das bedeutet, mit größer werdendem Widerstand verbraucht der Haushalt weniger Leistung.

Das SmartMeter dient zur Kontrolle, dass immer eine Leistung zwischen 0mW und 665 mW abgegeben wird. Andernfalls entsprechen die physikalischen Vorgänge nicht der Realität.

Stehe hinter dem Solarmodul, da Reflektionen die Beleuchtungsstärke am Solarmodul verändern.

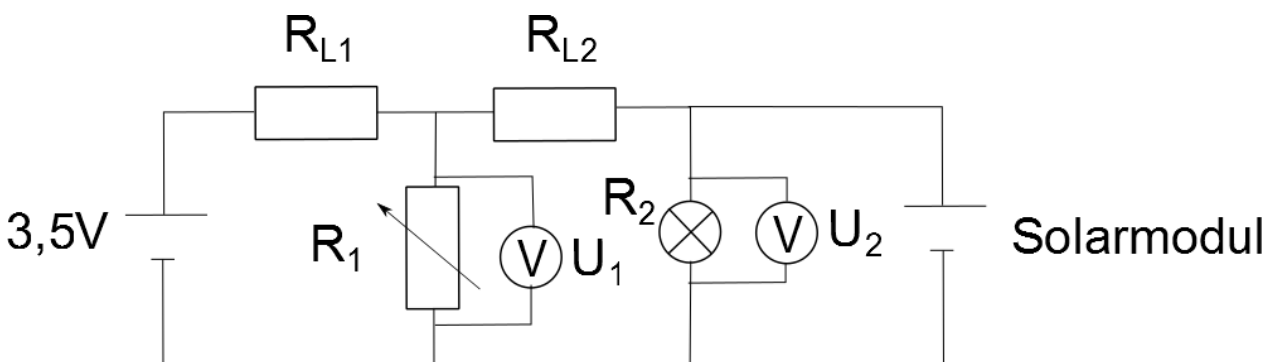
### Aufbau



### Geräte

- Grundeinheit
- PowerModul 3,5V (Transformator)
- SmartMeter
- AV-Modul
- Potentiometermodul (Haushalt 1)
- 2 Stromnetzmodul
- Glühlampenmodul (Haushalt 2)
- Solarmodul (Photovoltaikanlage)
- Lampe (Sonne)
- Kabel

### Schaltskizze



### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend des Versuchsaufbaus auf. Stelle das Solarmodul senkrecht zur Tischebene und frontal in einem Abstand von 50cm zur Lampe. Richte den Strahlengang der Lampe parallel zur Tischebene aus. Stelle das PowerModul auf eine Nennspannung von 3,5V ein. Stelle das Potentiometer auf 20Ω.



## 4.8 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage in Abhängigkeit vom Verbrauch

- Schalte das PowerModul und die Lampe ein. Miss die Spannung zunächst am Potentiometermodul (Haushalt 1,  $U_1$ ) und dann am Glühlampenmodul (Haushalt 2,  $U_2$ ).
- Erhöhe den Widerstand auf  $40\Omega$  und beobachte das Verhalten der Spannung am Glühlampenmodul. Miss die Spannung noch einmal am Potentiometer- und am Glühlampenmodul bei  $40\Omega$ . Notiere deine Beobachtung und die Messwerte.

### Messwerte

$R_1$ in $\Omega$	20	40
$U_1$ in V	3,29	3,59
$U_2$ in V	3,59	3,83

Beobachtung: Die Spannung erhöht sich, wenn man den Widerstand erhöht.

### Auswertung

- Beschreibe deine Messergebnisse.

Je größer der Widerstand war, desto größer war die Spannung am Potentiometer- und Glühlampenmodul.

- Schlussfolgere aus deinen Messwerten den Zusammenhang zwischen dem Verbrauch an Haushalt 1 und der Spannung über den Haushalten.

Je geringer der Verbrauch war, desto größer war die Spannung.

- Erkläre die Veränderung der Spannung aufgrund der Veränderung des Widerstands innerhalb des Experiments.

Durch die Vergrößerung des Widerstands in einer Parallelschaltung wird der Gesamtwiderstand größer. Hierdurch bewegt sich der Arbeitspunkt des Solarmoduls auf der U-I-Kennlinie nach rechts zu höheren Spannung. Hierdurch steigt die Spannung an beiden Haushalten.

- In der Realität arbeitet die Photovoltaikanlage immer bei maximaler Leistung und ist eine Leistungsquelle. Die Spannung verändert sich demzufolge nicht, weil sich der Arbeitspunkt auf der U-I-Kennlinie verschiebt. Erkläre die Physikalischen Vorgänge im Experiment unter der Annahme, dass sie eine Leistungsquelle ist und dass die Leitungen Ohm'sche Widerstände sind.

In dem Versuch wird der Widerstand  $R_1$  von der Spannungsquelle und der Photovoltaikanlage, sowie der Widerstand  $R_2$  nur von der Photovoltaikanlage versorgt. Wird der Widerstand  $R_1$  vergrößert, so vergrößert sich über ihm der Spannungsabfall. Die Ursache hierfür ist, dass der gesamte Spannungsabfall über dem Widerstand  $R_{L1}$  und  $R_1$  durch die Spannungsquelle konstant ist, aber sich das Verhältnis  $\frac{R_1}{R_{L1}} = \frac{U_1}{U_{L1}}$  sich vergrößert.

Der Spannungsabfall  $U_2$  vergrößert sich ebenfalls aufgrund der Veränderung des Widerstandes. Die Ursache ist hierfür, dass der Gesamtwiderstand aus  $R_{L2}$  und  $R_1$  steigt. Bei unveränderter Photovoltaikspannung  $U_2$  würde die Gesamtstromstärke sinken und es käme zu einer Verringerung der Leistung. Da die Leistung allerdings in der Realität konstant ist, steigt die Spannung  $U_2$ .



## 4.9 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage in Abhängigkeit von der Länge des Leiters

### Aufgabe

Miss die Spannung an 2 Haushalten (Glühlampenmodule) in einem Strahlennetz in Abhängigkeit vom Abstand zum Transformator (PowerModul).

### Vorbemerkung

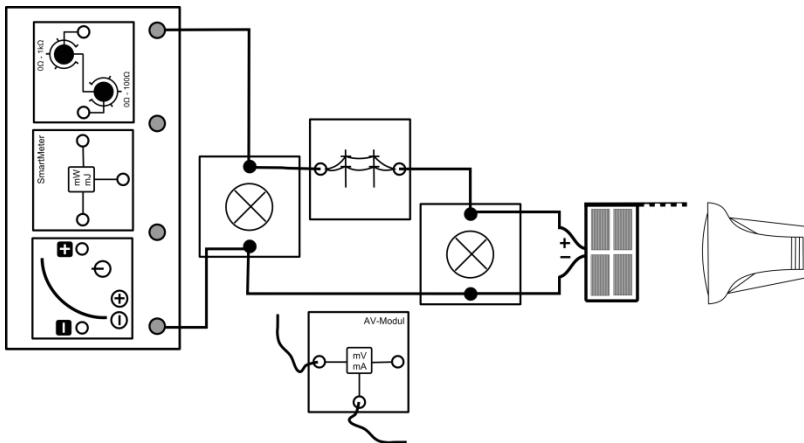
Der Widerstand eines metallischen Leiters ist proportional zu dessen Länge. Die Länge des elektrischen Leiters zwischen Solarmodul und Transformator wird im Versuch durch einen regelbaren Widerstand dargestellt.

Bedenke, dass die am Transformator eingestellte Spannung von dem Widerstand des Leiters abhängt. Ansonsten könnte der erlaubte Spannungsbereich ohne Leistungseinspeisung der Photovoltaikanlage an den Haushalten nicht eingehalten werden.

Das Smart Meter dient zur Kontrolle, dass keine Stromstärke größer als 190mA durch das Potentiometer fließt. Überschlage mithilfe des Leistungswerts die aktuelle Stromstärke und schalte gegebenenfalls das PowerModul sofort wieder ab. Andernfalls kann das Potentiometer dauerhaft beschädigt werden.

Stehe hinter dem Solarmodul, da Reflektionen die Beleuchtungsstärke am Solarmodul verändern.

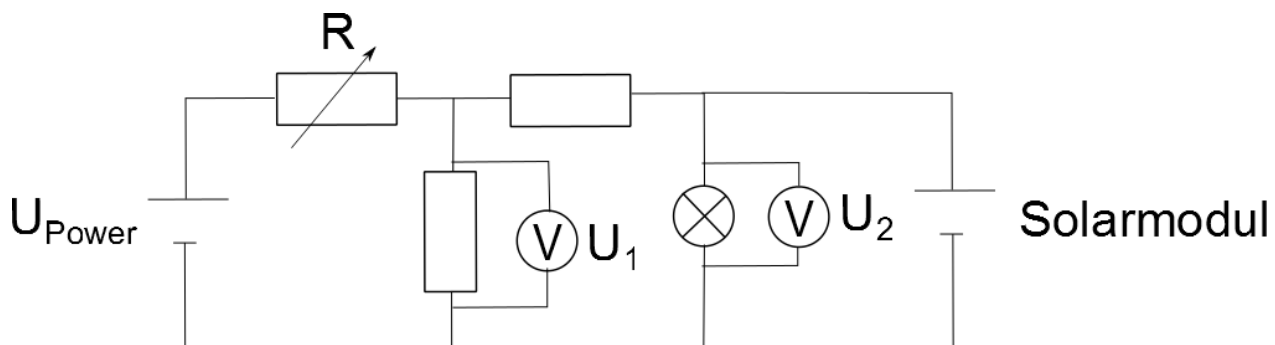
### Aufbau



### Geräte

- Grundeinheit
- PowerModul (Transformator)
- AV-Modul mit Kabeln
- SmartMeter
- Potentiometermodul (Stromleitung zwischen Haushalt 1 und Transformator)
- Stromnetzmodul (Stromleitung zwischen den Haushalten)
- 2 Glühlampenmodule (Haushalt 1 und 2)
- Solarmodul (Photovoltaikanlage)
- Lampe (Sonne)
- Kabel

### Schaltskizze





## 4.9 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage in Abhängigkeit von der Länge des Leiters

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend des Versuchsaufbaus auf. Das Solarmodul soll im Abstand von 50cm zur Lampe stehen. Stelle das Solarmodul frontal zur Lampe und senkrecht zur Tischebene. Der Strahlengang der Lampe soll parallel zur Tischebene verlaufen.
2. Stelle das Potentiometer auf den minimalen Widerstand und schalte das PowerModul ein. Finde die passende Spannung am PowerModul, bei der beide Glühlampenmodule (Haushalt 1 und 2) die geringste Abweichung von der Nennspannung 3V aufweisen. Notiere die Werte in der Messwerttabelle. Schalte die Lampe ein und miss die Spannung an beiden Verbrauchern noch einmal.
3. Schalte die Lampe wieder aus und wiederhole Schritt 2 für einen Widerstand von  $20\Omega$  und  $40\Omega$ .

### Messwerte

R in $\Omega$	Minimaler Widerstand ( $2\Omega$ - $5\Omega$ )		20		40	
	Ohne Beleuchtung	Mit Beleuchtung	Ohne Beleuchtung	Mit Beleuchtung	Ohne Beleuchtung	Mit Beleuchtung
$U_{\text{Power}}$ in V	3,5		5		6,5	
$U_1$ in V	3,07	3,63	3,13	3,98	3,02	4,09
$U_2$ in V	2,94	3,85	3	4,1	2,9	4,2

### Auswertung

1. Beschreibe deine Messwerte.

Je größer die angelegte Spannung des Transformators war und je größer der Leiterwiderstand war, desto größer war die Spannung an den beiden Glühlampen bei hoher Beleuchtung.

2. Erkläre deine Messergebnisse.

Durch die Spannung des PowerModuls wird eine Spannung an die beiden Glühlampenmodule angelegt. Je weniger Leistung von dem PowerModul an den Netzstrang abgegeben wird, desto geringer ist der Stromstärke innerhalb des Potentiometers und desto geringer ist der Spannungsabfall am Potentiometermodul. Hierdurch steigt die Spannung am linken Glühlampenmodul (Nummer 1). Je höher die Ausgangsspannung des PowerModuls ist, desto höher ist demzufolge die Spannung am ersten Glühlampenmodul. Dies sorgt unmittelbar dafür, dass die Spannung am rechten Glühlampenmodul ebenfalls steigt.

3. Erläutere die Bedeutung deiner Messergebnisse für die Realität.

Je Länger das Leiterkabel ist, desto größer ist die Spannung an beiden Haushalten.

4. Schlussfolgere aus den Experimenten 4.7 bis 4.9 unter welchen Voraussetzungen große Spannungen durch eine PV-Anlage in einem Strahlennetz entstehen.

Die höchsten Spannungen entstehen:

- bei hoher Leistungsabgabe des Solarmoduls infolge großer Bestrahlungsstärke
- bei größerem Abstand zur Transformatorstation
- bei wenig Verbrauch innerhalb des Strahlennetzes



## 4.9 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage in Abhängigkeit von der Länge des Leiters

5. Vermute und begründe, in welchen Regionen es zu solchen Extremsituationen kommen kann.

Die Regionen sind ländliche Gebiete, wo die Stromleitungen sehr lang sein können, große Photovoltaikanlagen entstehen. In Städten ist dies eher nicht zu erwarten, da hier wenig PV-Anlagen vorhanden sind, der Verbrauch sehr hoch ist und geringe Abstände zu den Transformatorstationen herrschen (Außerdem werden hier Ringnetze gebaut).

6. Erläutere anhand der physikalischen Ursachen reale Lösungsmöglichkeiten, um dieses Problem zu beheben.

- Netzausbau, der zu einer Verringerung des Widerstands in den Leitungen führt.
- Drosselung der Leistungsabgabe durch die PV-Anlagen.
- Einbau einer steuerbaren Last um die Leistung direkt an der Photovoltaikanlage abzunehmen. Sie kann den Verbrauch so erhöht werden, dass sich die Spannungswerte im gewöhnlichen Bereich befinden. Ein Beispiel ist hierfür ein Elektroauto.
- Anpassung der Leistungsabgabe des Transformators je nach aktuellem Verbrauch und Leistungserzeugung der PV-Anlage. Hierzu muss die Spannung über das Windungsverhältnis reguliert werden (Smart Grid Komponente: regelbarer Ortsnetztransformator).



## 4.10-4.12 Lösungsverfahren zur Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage

### Ziele

- Die Schüler bekommen durch die Versuche einen Einblick in reale Lösungsmaßnahmen zur Verringerung der Spannungsüberschreitung in einem Strahlennetz.

#### Experiment 4.10: Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und intelligentem Ortsnetztransformator

- Die Schüler messen die Spannung an den Haushalten bei verschiedenen Transformatorspannungen und Beleuchtungsstärken am Solarmodul.
- Die Schüler erkennen anhand ihrer Messwerte, dass ein Herabsetzen der Transformatorspannung zu einer Verringerung der Spannung an den Haushalten führt.
- Die Schüler erklären, weshalb die Spannung sinkt, sobald die Transformatorspannung sinkt.
- Die Schüler bewerten den Einsatz von intelligenten Ortsnetztransformatoren.
- Die Schüler erläutern anhand ihrer Messwerte die benötigten Informationen zur Spannungsregelung.

#### Experiment 4.11: Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und Energiespeicher

- Die Schüler messen die Spannung am hinteren Haushalt bei einer hohen Bestrahlungsstärke und in Abhängigkeit von einem Vorwiderstand der Brennstoffzelle.
- Die Schüler erläutern die Messwerte mit Hilfe ihres Wissens über das Widerstandsverhalten der reversiblen Brennstoffzelle.
- Die Schüler bewerten den Einsatz von Speichermedien zur Spannungsregulierung
- Die Schüler benennen Medien zur Speicherung elektrischer Energie im Haushalt.

#### Experiment 4.12: Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und Lastmanagement

- Die Schüler messen die Spannung und die Stromstärke am hinteren Haushalt bei unterschiedlichem Verbrauch des hinteren Haushalts.
- Die Schüler erklären die physikalischen Vorgänge, die zu einer Spannungsveränderung führen.
- Die Schüler benennen elektrische Geräte die flexibel benutzt werden können, beziehungsweise kurzzeitig mehr Energie beziehen, um anschließend über längere Zeit nicht laufen zu müssen.
- Die Schüler positionieren sich zum Demand Side Response Konzept.

### Vorwissen

- Die Schüler kennen das Ohm'sche Gesetz.
- Die Schüler kennen die Eigenschaften der reversiblen Brennstoffzelle als Verbraucher (Experiment 3.1-3.2).
- Die Schüler kennen das Zusammenwirken von Spannungsquelle und Solarmodul.
- Die Schüler kennen das Verhalten von Stromstärke und Spannung bei Veränderungen von Widerständen in Parallel- und Reihenschaltung.
- Die Schüler sind sich der Bedeutung des Vorzeichens der Stromstärke im AV-Modul bewusst.

### Vorversuche

- Experiment 4.6 – 4.9: Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit und ohne Photovoltaikanlage
- Experiment 3.1 und 3.2 (für Experiment 4.11)





## 4.10-4.12 Lösungsverfahren zur Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Diese Versuchsreihe eignet sich, um die Themen intelligente Ortsnetzstation, E-Mobility, Smart Metering und die Lastmanagementkonzepte zu veranschaulichen.
- Die Benutzung des Autos in Experiment 4.11 dient zur Veranschaulichung des E-Mobility-Konzepts.
- In den Experimenten 4.11 und 4.12 wird das Solarmodul immer bei größtmöglicher Beleuchtung beschienen, da dies der Fall mit größten Spannungsüberschreitungen ist.
- Für den Versuch 4.10 können keine späteren Uhrzeiten verwendet werden, da das PowerModul dann so geringe Spannungen annehmen müsste, dass es keine Energie mehr abgibt, sondern in das Mittelspannungsnetz einspeisen müsste. Da das PowerModul dies nicht kann, entspricht die Physik im Experiment nicht der Physik in der Realität.
- Es sollte darauf geachtet werden, dass das Potentiometer keinen geringeren Widerstand als  $20\Omega$  besitzt (Gefahr, dass  $190\text{mA}$  überschritten werden).
- Das SmartMeter am PowerModul dient zur Einhaltung der Grenzwerte (Siehe Experimentierhinweise 4.7-4.9).
- Natürliches Sonnenlicht beeinflusst die Ergebnisse. Die Mutterlösungen wurden in einem von Jalousien abgedunkelten Raum aufgenommen.

## 4.10 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und einer intelligenten Ortsnetzstation

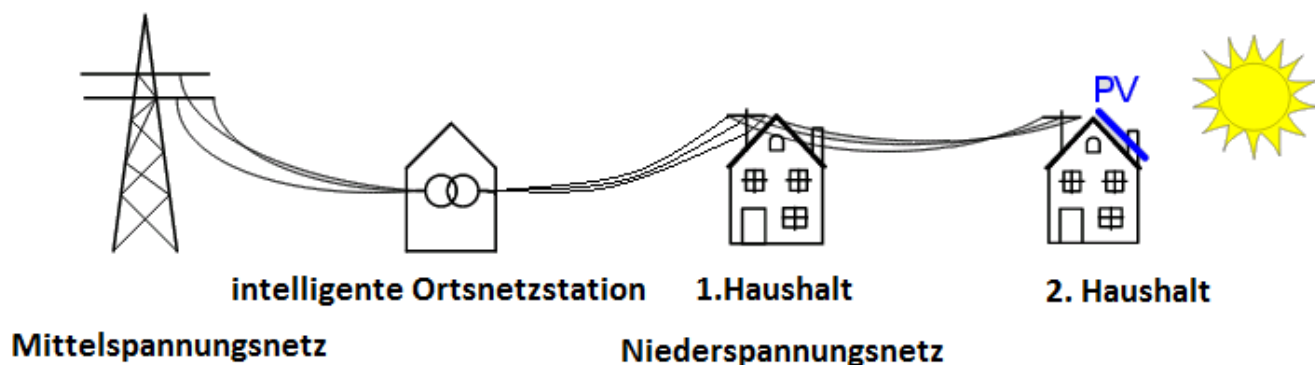
### Aufgabe

Miss zu verschiedenen Uhrzeiten die Spannung in einem Netzstrang mit 2 Haushalten (Glühlampenmodule), das von einem intelligenten Ortsnetztransformator (PowerModul) und einer Photovoltaikanlage (Solarmodul) versorgt wird zu verschiedenen Uhrzeit.

### Vorbemerkung

Bei diesem Experiment wurde zur Verbindung der Mittelspannungs- mit der Niederspannungsebene eine intelligente Ortsnetzstation installiert. Diese Station besteht aus einem Transformator, der im Gegensatz zu herkömmlichen Transformatoren sein Windungsverhältnis verändern und so eine andere Spannung an das Strahlennetz anlegen kann. In der Simulation ist die intelligente Ortsnetzstation das PowerModul, an dem man nun während des Versuchs die Spannung ändert. Das Smart Meter dient zur Kontrolle, dass immer eine Leistung zwischen 0mW und 665mW abgegeben wird. Andernfalls entsprechen die physikalischen Vorgänge nicht der Realität. Achte darauf nicht zwischen Solarmodul und Lampe zu stehen, da es sonst aufgrund von Reflexionen zu einer Verfälschung der Messwerte kommt.

### Realsituation

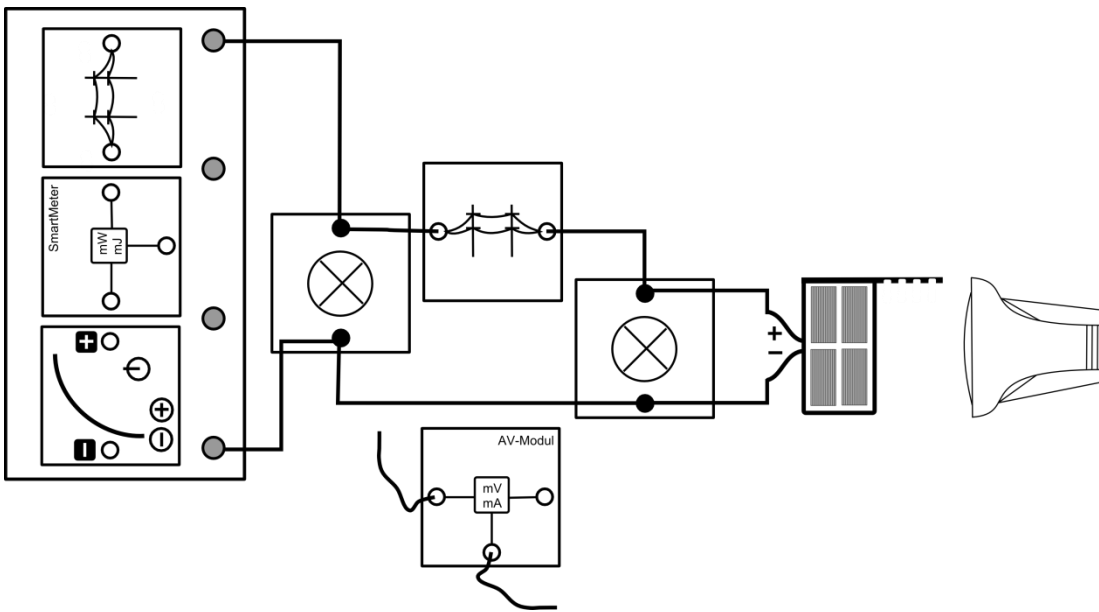


### Geräte

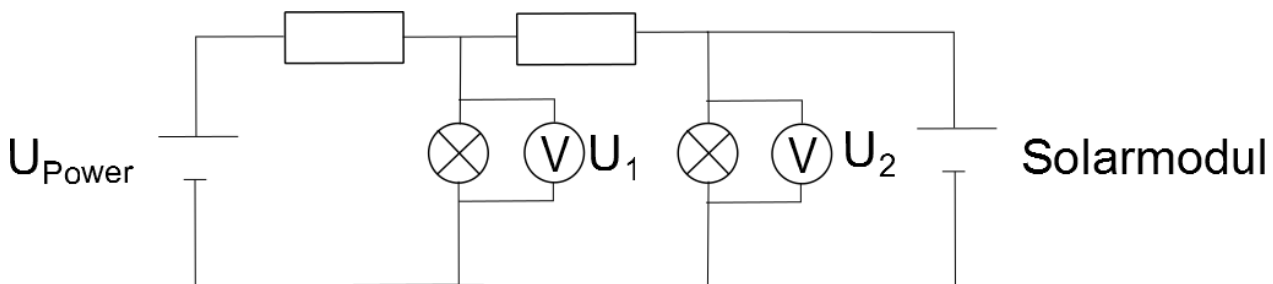
- Grundeinheit
- PowerModul (intelligente Ortsnetzstation)
- SmartMeter
- AV-Modul mit 2 Kabeln
- 2 Stromnetzmodule (Stromleitungen zwischen den Haushalten)
- 2 Lampenmodule (Haushalt 1 und 2)
- Solarmodul (Photovoltaikanlage)
- Lampe (Sonne)
- Azimutwinkelskala
- Kabel

## 4.10 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und einer intelligenten Ortsnetzstation

### Aufbau



### Schaltskizze



### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend des Versuchsaufbaus auf. Achte auf die Polung des PowerModuls und des Solarmoduls. Stelle das Solarmodul senkrecht zur Tischebene und in 6:00 Uhr-Stellung zur Lampe. Stelle die Lampe in 50cm Entfernung auf und richte den Strahlengang parallel zur Tischebene aus. Stelle das PowerModul auf eine Spannung von 3V.
2. Schalte die Lampe und das PowerModul ein. Miss die Spannung an beiden Glühlampenmodulen (Haushalt 1 und 2). Setze die Spannung am PowerModul auf 3,5V und miss noch einmal die Spannung über beiden Glühlampenmodule (Haushalt 1 und 2).
3. Drehe das Solarmodul in die weiteren Uhrzeit-Stellungen und wiederhole die Aufnahme der Messwerte für die zwei Spannungen am PowerModul.



## 4.10 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und einer intelligenten Ortsnetzstation

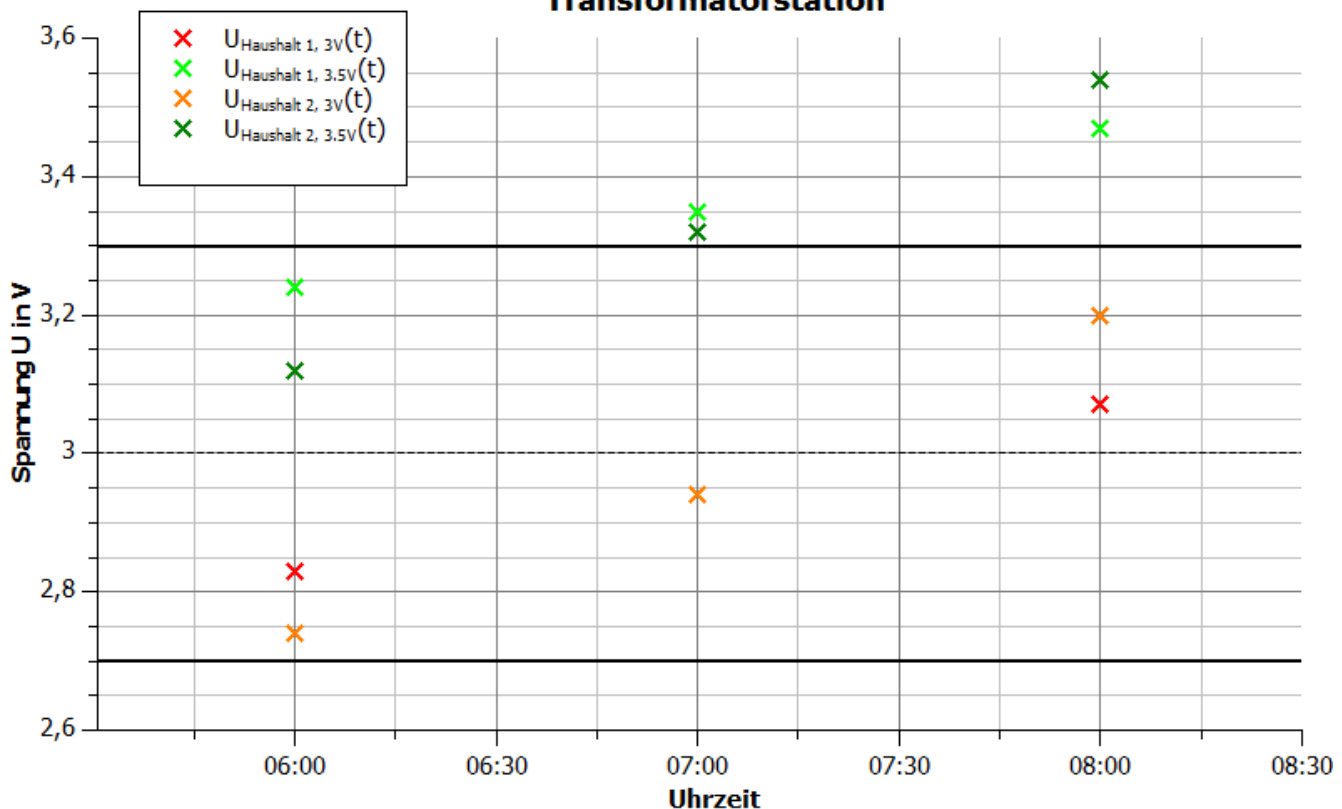
### Messwerte

Uhrzeit	6:00Uhr		7:00Uhr		8:00Uhr	
$U_{\text{Power}}$ in V	3	3,5	3	3,5	3	3,5
$U_1$ in V	2,83	3,24	2,94	3,35	3,07	3,47
$U_2$ in V	2,74	3,12	2,94	3,32	3,2	3,54

### Auswertung

- Trage deine Messpunkte zu den verschiedenen Haushalten und Transformatorstationsspannungen in das Uhrzeit-Spannung-Diagramm ein.

#### Spannungsverhalten in einem Strahlennetz in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke einer PV-Anlage und der Netzspannung an der Transformatorstation



- Beschreibe deine Messwerte.

Je höher die Bestrahlung ist und je höher die Spannung des PowerModuls ist, desto höher ist die Spannung an beiden Glühlampenmodulen. Je nach Leistung des Solarmoduls, ist die Spannung an dem rechten oder dem linken Glühlampenmodul größer. Bei geringer Leistung ist die des linken Haushalts und bei höherer die des rechten Haushalts höher.



## 4.10 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und einer intelligenten Ortsnetzstation

3. Erkläre, weshalb Spannung an den beiden Glühlampenmodulen sinkt, wenn die Spannung am PowerModul gesenkt wird.

Durch das Herabsetzen der PowerModul-Spannung sinkt der Spannungsabfall über die ersten Stromleitung und dem mittleren Glühlampenmodul (Nummer 1). Da der Widerstand des ersten Stromnetzmoduls und der Glühlampe konstant bleiben, verringert sich auch die Gesamtstromstärke in diesem Stromkreis und damit auch die Spannung über beide Komponenten.

Da der Spannungsabfall und die Stromstärke am ersten Glühlampenmodul gesunken ist, sinkt auch der Spannungsabfall über dem zweiten Stromnetzmodul. Der Spannungsabfall von der ersten Glühlampe und dem zweiten Stromnetzmodul entspricht nach dem Maschensatz dem Spannungsabfall über der zweiten Glühlampe. Dieser ist damit ebenfalls gesunken.

4. Bewerte den Einsatz einer Ortsnetzstation zur Steuerung der Spannung an Haushalten im Laufe eines Tages mit Hilfe deiner Messwerte.

Lässt man die Spannung an einem Ortsnetztransformator unverändert, so überschreiten die Spannungswerte an dem Haushalt nach kurzer Zeit die Grenzwerte. Durch Verringerung der Spannung kann der erlaubte Bereich wieder eingehalten werden. Vermutlich müsste die Spannung nach kurzer Zeit wieder verringert werden, da die Leistung der Photovoltaikanlage im Laufe eines Tages weiter steigt.

Prinzipiell ist es möglich die Spannung an den Haushalten durch Steuerung des Transformators einzuhalten.

5. Erläutere die Informationen, die die Station zur Steuerung benötigt.

Sie benötigt die aktuellen Spannungen an den Haushalten, die per Datenübertragung zu ihr geschickt werden müssten. Des Weiteren benötigt sie die Information über die angelegte Spannung aus der Mittelspannungsebene, um das richtige Windungsverhältnis zu berechnen.

## 4.11 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und Energiespeicher (reversible Brennstoffzelle/ E-Mobility)

### Aufgabe

Miss das Verhalten der Spannung am Ende eines Strahlennetzes in Abhängigkeit von dem Vorwiderstand vor einer reversiblen Brennstoffzelle.

### Vorbemerkungen

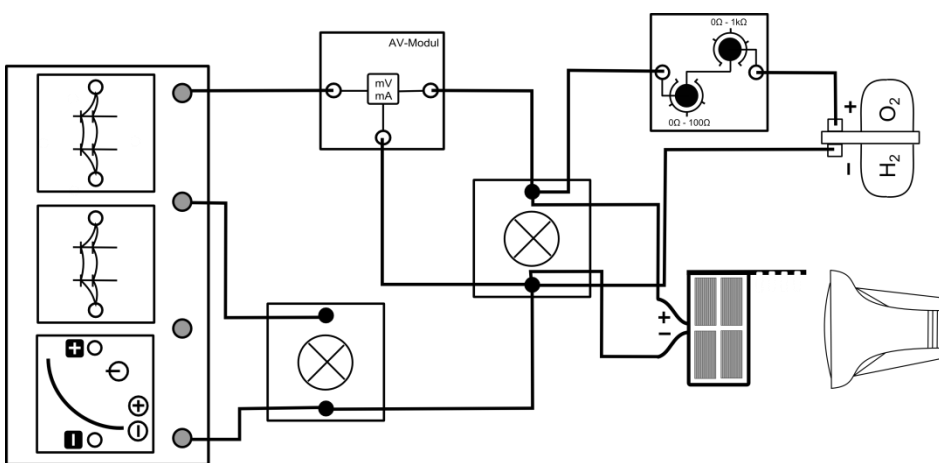
In dieser Simulation befindet sich am 2. Haushalt ein Energiespeicher in Form einer reversiblen Brennstoffzelle, die zu Beginn des Experiments nicht aufgeladen ist. Das Experiment soll eine Situation wiedergeben, in der das Solarmodul über einen längeren Zeitraum unter hoher Sonneneinstrahlung beschienen wird.

Stehe hinter dem Solarmodul, da Reflektionen die Beleuchtungsstärke am Solarmodul verändern.

### Geräte

- Grundeinheit
- PowerModul 3,5V (Transformator)
- Solarmodul mit Standfuß (Photovoltaikanlage)
- Lampe (Sonne)
- AV-Modul
- 2 Glühlampenmodule (Haushalt 1 und 2)
- 2 Stromnetzmodule (Stromleitungen zwischen den Haushalten und dem Transformator)
- Potentiometermodul
- Reversible Brennstoffzelle (privates Speichermedium)
- Kabel
- Auto

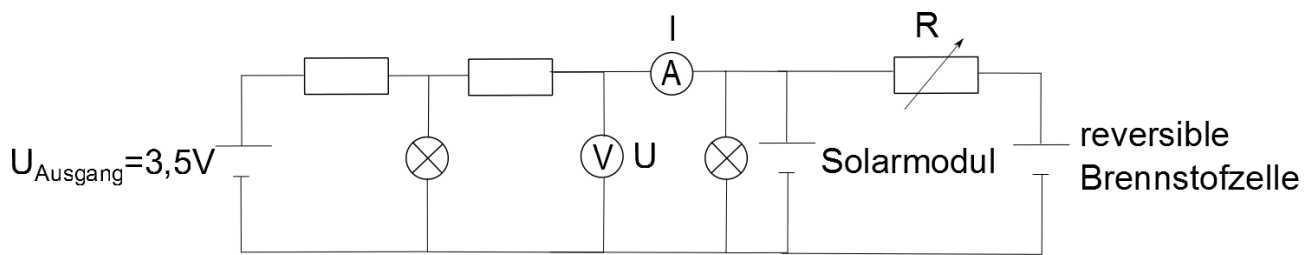
### Aufbau





## 4.11 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und Energiespeicher (reversible Brennstoffzelle/ E-Mobility)

### Schaltskizze



### Durchführung

1. Bereite die Brennstoffzelle für den Betrieb vor (Siehe Kapitel 2).
2. Baue den Versuch bis auf die reversible Brennstoffzelle mit dem Potentiometermodul entsprechend der Versuchsanleitung auf. Stelle das Solarmodul in einem Abstand von 50cm frontal zur Lampe und senkrecht zur Tischebene. Der Strahlengang der Lampe sollte parallel zur Tischebene verlaufen. Das PowerModul soll auf eine Spannung von 3,5V eingestellt werden. Drehe das Potentiometermodul auf den maximalen Widerstand.
3. Schalte das PowerModul ein und nimm die Spannung und die Stromstärke des rechten Glühlampenmoduls auf.
4. Schalte nun die Lampe ein und nimm noch einmal die beiden Messwerte auf.
5. Schließe die reversible Brennstoffzelle mit dem Potentiometermodul bei 1,1k $\Omega$  an und miss wieder die Spannung und die Stromstärke am rechten Glühlampenmodul. Wiederhole die Messung für die vorgegebenen Widerstände.
6. Lade die Brennstoffzelle noch mindestens 3min weiter.

### Messwerte

Spannung bevor das Solarmodul beschienen wird:  $U=3,09V$

Stromstärke bevor das Solarmodul beschienen wird:  $I=52,7mA$

Spannung bei beschienenem Solarmodul, aber kurz bevor die reversible Brennstoffzelle angeschlossen wird:  $U=3,88V$

Stromstärke bei beschienenem Solarmodul, aber kurz bevor die reversible Brennstoffzelle angeschlossen wird:  $I=-80,3mA$

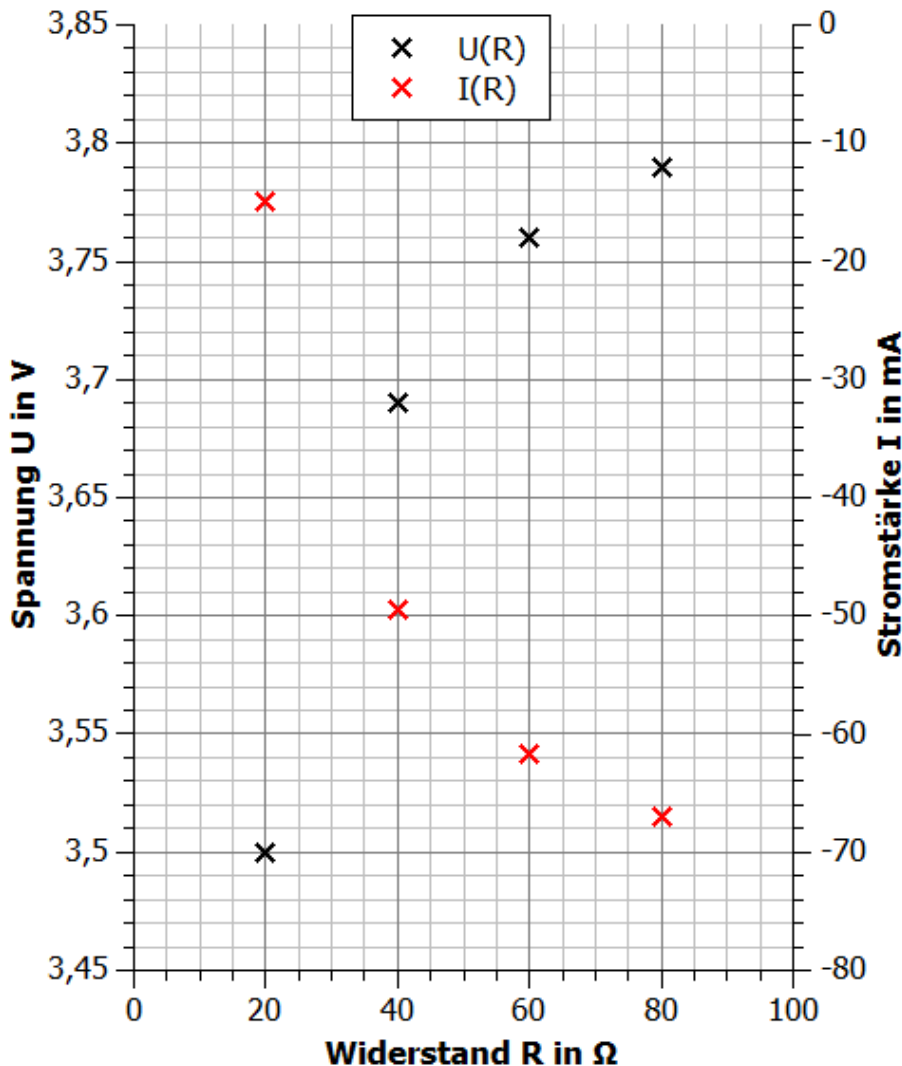
R in $\Omega$	1100	100	80	60	40	20
U in V	3,88	3,8	3,79	3,76	3,69	3,5
I in mA	-80,3	-69,7	-67	-61,7	-49,5	-15

## 4.11 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und Energiespeicher (reversible Brennstoffzelle/ E-Mobility)

### Auswertung

1. Trage deine Messwerte aus der Tabelle in das R-U- und das R-I-Diagramm ein.

### Spannungs- und Stromstärkeverlauf beim Anschließen einer reversiblen Brennstoffzelle in Abhängigkeit von einem Vorwiderstand



2. Beschreibe und erkläre die Messwerte für die verschiedenen Widerstände.

Je geringer der Widerstand ist, desto geringer ist die Spannung an der rechten Glühlampe und desto größer ist die Stromstärke des elektrischen Stroms, der vom PowerModul fließt.

Mit dem Potentiometer und der reversiblen Brennstoffzelle wurde eine zusätzlicher Widerstand in die Schaltung eingefügt. Das Potentiometer regelt den Gesamtwiderstand aus beiden Komponenten. Je geringer dieser wird, desto geringer wird der Gesamtwiderstand. Da der Gesamtwiderstand sinkt, bewegt sich der Arbeitspunkt auf der U-I-Kennlinie nach links zu niedrigeren Spannungen. Die Folge ist, dass immer weniger Leistung an das linke Glühlampenmodul abgegeben wird, wie man an der sinken Stromstärke erkennt. Die Situation, dass das PowerModul nur das linke Glühlampenmodul und das Solarmodul alle anderen Verbraucher versorgt, ändert sich nicht.





## 4.11 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und Energiespeicher (reversible Brennstoffzelle/ E-Mobility)

3. Bewerte anhand deiner Messwerte, ob sich Speichermedien zur Einhaltung der erlaubten Spannungswerte eignen und ob Speichermedien nur durch regenerative Enerquellen gespeist werden können. SchlieÙe anhand deiner Messwerte auch auf die Spannung am vorderen Haushalt.

Das Experiment hat gezeigt, dass eine reversible Brennstoffzelle als zusätzliche Last zur Spannungsregelung nutzbar ist, da die Spannung mit dem Anschließen gesunken ist. Ebenso kann dafür gesorgt werden, dass das Speichermedium nicht Strom aus dem Netz bezieht. Die Spannung am vorderen Haushalt kann nicht höher gewesen sein als am hinteren, da immer Stromstärke vom hinteren Haus zum vorderen geflossen ist.

4. Benenne Speichermedien für den privaten Gebrauch.

- Elektrofahrzeuge
- Akkus an der Photovoltaikanlage

5. Stecke die reversible Brennstoffzelle auf das Auto und verbinde den Automotor mit ihr. Beschreibe das Verhalten des Elektroautos und ziehe Rückschlüsse auf die Spannung und die Leistungsabgabe der Brennstoffzelle.

Das Auto fährt mit einer annähernd konstanten Geschwindigkeit. Dem zufolge liegt am Motor eine konstante Spannung an und die Brennstoffzelle gibt eine konstante Leistung ab. (vgl. Experiment 3.7)

## 4.12 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und Lastmanagement

### Aufgabe

Messen Sie die Spannungen an beiden Haushalten (Glühlampenmodul und Potentiometermodul) bei einem veränderten Verbrauch im hinteren Haushalt (Potentiometermodul) in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage (Solarmodul).

### Vorbemerkungen

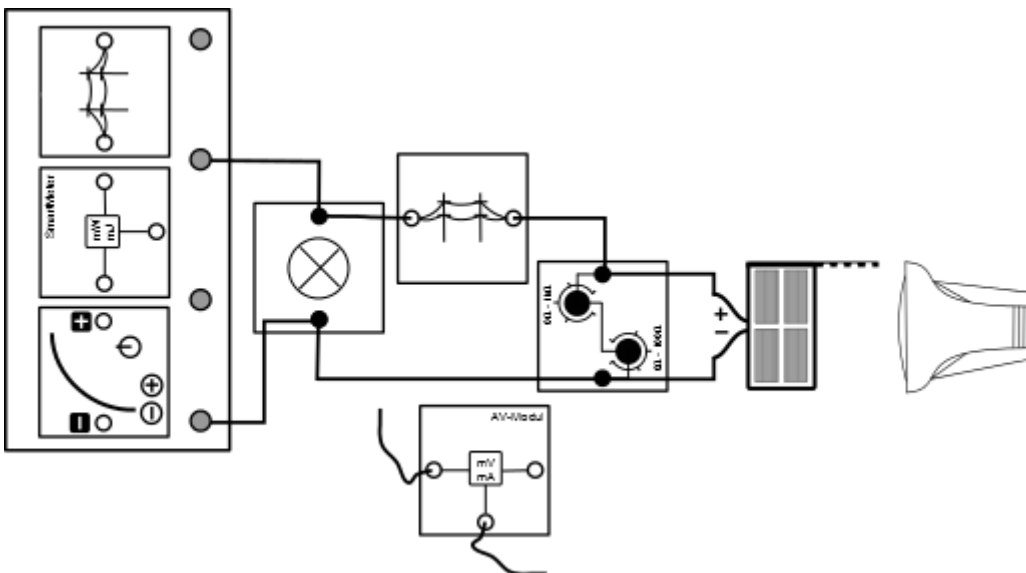
Der Verbrauch im hinteren Haushalt wird durch einen regelbaren Widerstand verändert. Legen wir an einen Widerstand eine konstante Spannung an, so wird nach dem Ohm'schen Gesetz die durch ihn fließende Stromstärke umso geringer, je größer dieser Widerstand ist. Das bedeutet, mit größer werdendem Widerstand verbraucht der Haushalt weniger Leistung.

Das SmartMeter dient zur Kontrolle, dass immer eine Leistung zwischen 0mW und 665 mW abgegeben wird. Andernfalls entsprechen die physikalischen Vorgänge nicht der Realität. Stehe hinter dem Solarmodul, da Reflektionen die Beleuchtungsstärke am Solarmodul verändern.

### Geräte

- Grundeinheit
- PowerModul 3,5V (Transformator)
- Solarmodul mit Standfuß (Photovoltaikanlage)
- Lampe (Sonne)
- AV-Modul
- SmartMeter
- Glühlampenmodul (Haushalte 1)
- 2 Stromnetzmodule (Stromleitungen)
- Potentiometermodul (Haushalt 2)
- Kabel

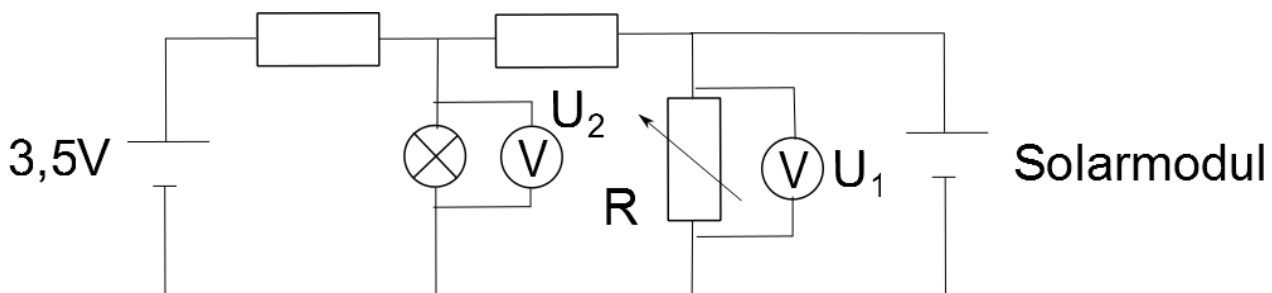
### Aufbau





## 4.12 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und Lastmanagement

### Schaltskizze



### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanleitung auf. Stelle das Solarmodul in einem Abstand von 50cm frontal zur Lampe und senkrecht zur Tischebene. Der Strahlengang der Lampe sollte parallel zur Tischebene verlaufen. Das PowerModul soll auf eine Spannung von 3,5V eingestellt werden. Drehe das Potentiometermodul auf einen Widerstand von  $40\Omega$ .
2. Schalte das PowerModul und die Lampe ein. Miss die Spannung an der Glühlampe und am Potentiometermodul.
3. Verringere den Widerstand auf  $20\Omega$  und miss die Spannung erneut.

### Messwerte

R in $\Omega$	20	40
$U_1$ in V	3,27	3,45
$U_2$ in V	3,27	3,62

### Auswertung

1. Beschreibe deine Messergebnisse.

Je größer der Widerstand war, desto größer war die Spannung an dem Glühlampenmodulen und dem Potentiometer. Die Spannung am Potentiometer ist immer größer oder gleich der Spannung an der Glühlampe.

2. Erkläre die physikalischen Vorgänge innerhalb des Experiments.

Durch die Verringerung des Widerstands in einer Parallelschaltung wird der Gesamtwiderstand kleiner. Hierdurch bewegt sich der Arbeitspunkt des Solarmoduls auf der U-I-Kennlinie nach links zu einer niedrigeren Spannung. Hierdurch sinkt die Spannung am hinteren Haushalt.

3. Erläutere die Bedeutung deiner Messwerte für die Realität.

Je geringer der Verbrauch am hinteren Haushalt war, desto größer war die Spannung über beiden Haushalten.



## 4.12 Spannungsverhalten in einem Strahlennetz mit Photovoltaikanlage und Lastmanagement

4. In einem Smart Grid wird unter anderem versucht die Anwohner über die Energiekosten zu einem höheren oder geringeren Verbrauch anzuregen, um die Spannungswerte einzuhalten. Benenne und erläutere Haushaltsgeräte, die flexibel an- oder abschalten werden können oder die flexibel kurzzeitig energieintensiver laufen können, um dann kurzzeitig weniger Energie zu verbrauchen.
  - Flexibel an oder abschaltbar:
    - Geschirrspüler
    - Waschmaschine
    - Trockner
  - Flexibel kurzzeitig energieintensiver um über längere Zeit weniger Energie zu verbrauchen
    - Kühlschränke
    - Boiler
    - Gefrierschränke
    - Klimaanlage
    - Wärmepumpen
5. Positioniere dich dazu, inwieweit Netzbetreiber über bestimmte Geräte in deinem Haushalt die Kontrolle haben dürfen, um die Versorgungssicherheit aufrecht zu halten.



## 4.13 Leiterseilmonitoring

### Ziele

- Die Schüler messen die Spannung und die Stromstärke über dem Stromnetzmodul bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.
- Die Schüler berechnen die Leistungsabgabe und den Widerstand des Stromnetzmoduls.
- Die Schüler interpretieren die Messergebnisse als Temperaturerhöhung infolge des hohen Stromflusses innerhalb des Stromnetzmoduls.
- Die Schüler überprüfen ihre Interpretation durch ein qualitatives Experiment.
- Die Schüler benennen neben dem Stromfluss weitere Faktoren, die die Leiterseiltemperatur erhöhen.
- Die Schüler erläutern die Auswirkungen der Temperaturerhöhungen.

### Vorwissen

- Die Schüler können das Ohm'sche Gesetz anwenden.
- Die Schüler wissen, dass die Leistung innerhalb eines Leiters in Wärme umgewandelt wird.
- Die Schüler wissen, dass der Stromfluss für die Erwärmung verantwortlich ist
- Die Schüler wissen, dass sich Metalle durch Erwärmung ausdehnen und stärker belastet werden .

### Vorversuche

- Experiment 4.2: Leistungsschwankungen einer Windkraftanlage

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Das Experiment simuliert den Fall, dass die Windparks im Norden ein Lastzentrum im Süden versorgen und hierdurch die Leitungen sich durch den Stromfluss erwärmen.
- Dieses Experiment eignet sich für die Thematik Netzausbau und Auswirkungen des Auseinanderdriftens von Erzeuger- und Lastzentren.
- Die Überprüfung der Erwärmung des Leiters, findet im Experiment qualitativ statt. Die quantitative Ermittlung ist nur mit einem Temperatursensor möglich, da die Wärmeabgabe zu gering für gewöhnliche Laborthermometer ist.
- Das Solarmodul ist für diesen Versuch ungeeignet, da seine Stromstärke zu groß für die PTC-Sicherung ist.
- Der Widerstand der PTC-Sicherung ist von der Umgebungstemperatur abhängig. Der Versuch funktioniert am besten, je größer die Raumtemperatur ist.



## 4.13 Leiterseilmonitoring

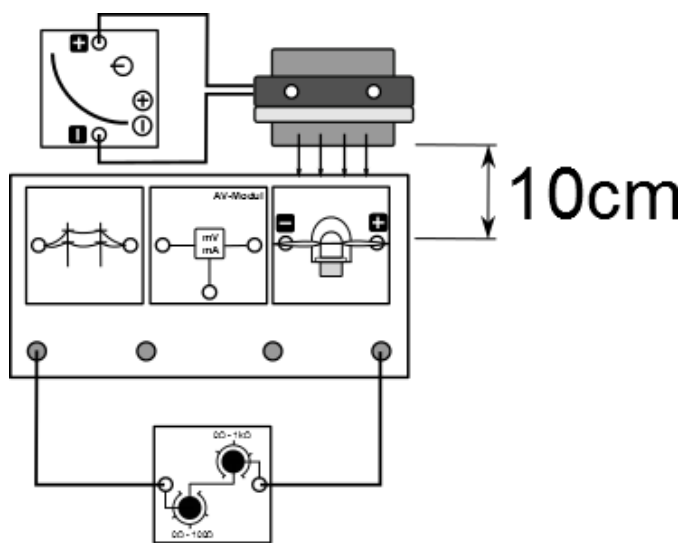
### Aufgabe

Miss die Spannung und die Stromstärke an und in einer Stromnetzleitung (Stromnetzmodul).

### Vorbemerkungen

Das Experiment simuliert eine Hochspannungsleitung, durch die große Energiemengen fließen. Achte darauf keine Gegenstände in der Nähe des Windturbinenrotors zu halten, da es sonst zu Verletzungen und falschen Messwerten kommen kann.

### Aufbau



### Geräte

- Grundeinheit
- PowerModul
- Winderzeuger
- Windgenerator (Windpark)
- Optimiertes Flügelprofil 25° 3-Flügler
- AV-Modul
- Stromnetzmodul (Hochspannungsleitung)
- Potentiometermodul (Versorgungszentrum)
- Kabel
- Stoppuhr

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Platziere den Winderzeuger im Abstand von 10cm zu den Flügeln und stelle die Flügel frontal in den Wind. Stelle das Potentiometer auf den minimalen Widerstand, um einen hohen Strombedarf zu simulieren.
2. Versichere dich, dass alle Komponenten in Reihe geschaltet sind und die Spannungsmessung parallel zum Stromnetzmodul erfolgt.
3. Schalte das PowerModul bei einer Spannung von 6V ein. Miss die Spannung und die Stromstärke am Stromnetzmodul nach 30s und nach 60s. Erhöhe die Spannung um 1V.
4. Wiederhole diesen Schritt solange, bis du die Spannung am PowerModul 12V erreicht.
5. Berechne den Widerstand des Stromnetzmoduls und die Leistung, die im Stromnetzmodul verbraucht wird.



## 4.13 Leiterseilmonitoring

## Messwerte

$U_{\text{Power}}$ in V	6		7		8		9	
$v_{\text{wind}}$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	4,3		5,1		5,8		6,4	
	30s	1min	30s	1min	30s	1min	30s	1min
$U_{\text{Netz}}$ in mV	38	37	245	248	317	320	380	380
$I_{\text{Netz}}$ in mA	12,4	12,7	83,5	82,2	105,5	105,2	123,7	122,9
P in mW	0,47	0,47	20,46	20,39	33,44	33,66	47,01	46,7
R in $\Omega$	3,06	2,91	2,93	3,02	3	3,04	3,07	3,09

$U_{\text{Power}}$ in V	10		11		12	
$v_{\text{wind}}$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	7		7,5		8	
	30s	1min	30s	1min	30s	1min
$U_{\text{Netz}}$ in mV	444	451	494	496	513	517
$I_{\text{Netz}}$ in mA	138	138,1	148,2	148,7	150	151,5
P in mW	61,27	62,28	73,21	73,76	76,95	78,33
R in $\Omega$	3,22	3,27	3,33	3,34	3,42	3,41

## Auswertung

1. Beschreibe und Begründe das Verhalten der Widerstandswerte des Leiters mit Hilfe deiner Messwerte.

Der Widerstand eines Leiters verändert sich nur aufgrund einer Temperaturerhöhung. Die Temperaturerhöhung kann durch die Messwerte der Stromstärke und Leistung bestätigt werden.

Da die Temperaturerhöhung sich durch den elektrischen Stromfluss erhöht, muss die Stromstärke steigen, je größer der Widerstand ist. Diesen Fall können die Messwerte bestätigen.

Eine Temperaturerhöhung bedeutet ebenfalls, dass eine größere Wärmeabgabe an die Umgebung erfolgt. Da Leiter ihre Leistung in Form von Wärme abgeben, müsste der Widerstand steigen, je größer die Leistung ist. Dieser Fall kann ebenfalls bestätigt werden.



## 4.13 Leiterseilmonitoring

- Überprüfe deine Begründung: Stelle am PowerModul eine Spannung von 12V ein und simuliere einen starken Verbrauch, indem du das Potentiometer aus dem Stromkreis herausnimmst. Hierdurch wird die Stromstärke maximal. Beobachte das Verhalten von Stromstärke und Spannung über dem Stromnetzmodul. Berühre nach ca. 2min das isolierte Stück am Stromnetzmodul und beobachte die Spannung und die Stromstärke weiter. Notiere deine Beobachtungen.

Bei einer konstanten Windgeschwindigkeit steigt der Spannungsabfall über dem Leitungsmodul mit der Zeit an, wohingegen die Stromstärke annähernd konstant bleibt. Dies bedeutet, dass der Widerstand langsam steigt. Berührt man den Leiter, so fühlt er sich zunächst warm an. Während der Berührung sinkt die Wärmeabgabe allerdings wieder. Durch die geringere Wärmeabgabe müsste der Widerstand sinken, was man auch an einer Abnahme des Spannungsabfalls erkennt. Die Stromstärke bleibt auch während des Abkühlungsvorgangs nahezu konstant. Es bestätigt sich somit, dass der Widerstand sich infolge des Stromflusses erwärmt.

- Bisher wurde die Temperatur von Stromtrassen nicht überwacht. Es gibt gesetzliche Vorgaben, die aus Sicherheitsgründen nur eine Maximaltemperatur von 80°C erlauben. Diese Temperatur wird dann erreicht, wenn bestimmte Extremwetterlagen vorliegen und die Leitung die maximal erlaubte Stromstärke erreicht. Da diese Extremwetterlagen aber selten auftreten und die Grenzwerte der Stromstärke trotzdem eingehalten werden müssen, werden die Übertragungsleitungen bisher zeitweise weit unterhalb der möglichen Kapazität genutzt. Um den Aufwand des Netzausbau einzuschränken und die bestehenden Netze besser auszulasten, soll das Smart Grid nun die Temperatur überwachen.
  - Benenne und erläutere neben dem Stromfluss weitere Faktoren, die die Leiterseiltemperatur erhöhen oder erniedrigen können
    - Je stärker die Sonneneinstrahlung ist, desto stärker ist die Wärmestrahlung der Sonne und desto höher ist die Leiterseiltemperatur.  
Je höher die Umgebungstemperatur, desto größer ist die Wärmeübertragung durch die Luftteilchen  
Je größer die Windgeschwindigkeit, desto mehr Wärme kann an die vorbeiströmenden Luftteilchen abgegeben werden.
  - Benenne Auswirkungen der Temperaturerhöhung, die eine gefahrenfreien Nutzung beeinträchtigen.
    - Je höher die Temperatur ist, desto größer ist die thermische Ausdehnung des Materials. Durch die thermische Ausdehnung werden die Leiterseile länger und es kann eher zu einem Kurzschluss kommen. Des Weiteren wird durch die höhere Temperatur das Material stärker beansprucht und muss ausgetauscht werden. Dies verursacht höhere Kosten.





## 4.14 Szenarienversuch: Smart Grid

### Ziele

- Die Schüler entdecken die wichtigsten Komponenten eines Smart Grids.
- Die Schüler bekommen einen Einblick in die Aufgaben und den Einfluss der Komponenten für verschiedene Szenarien.

### Vorwissen

- Die Schüler können anhand des Vorzeichens der Leistung am Smart Meter die Richtung des Stromflusses bestimmen.

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Der Versuch ist eine Zusammenfassung des Themas Smart Grids in einem komplexen Stromkreis.
- Der Versuch kann sowohl als Einführung in die Thematik als auch zur Wiederholung des Themas genutzt werden.
- Auf eine Schaltskizze wird in diesem Versuch verzichtet, da die Vorgänge nicht erklärt werden, sondern lediglich die prinzipiellen Vorgänge veranschaulicht werden sollen.

## 4.14 Szenarienversuch: Smart Grid

### Aufgabe

Notiere deine Beobachtungen für die verschiedenen Durchführungsszenarien.

### Vorbemerkungen

Das Experiment ist Nachstellung eines vereinfachten Aufbaus eines Smart Grids mit den wichtigsten Komponenten: konventionelles Kraftwerk, regenerative Kraftwerke und ein Speichermedium. Die Energieverbraucher befinden sich auf der Grundeinheit und stehen simultan für Haushalte. An sie sind der dezentrale Speicher und die Photovoltaikanlage direkt angeschlossen, da sie sich beide Komponenten in der Realität in unmittelbarer Nähe befinden. Über Stromleitungen sind mit den Verbrauchern zusätzlich ein Kraftwerk und eine Windkraftanlage verbunden. Sie sind in der Realität häufig in größerer Entfernung zu finden.

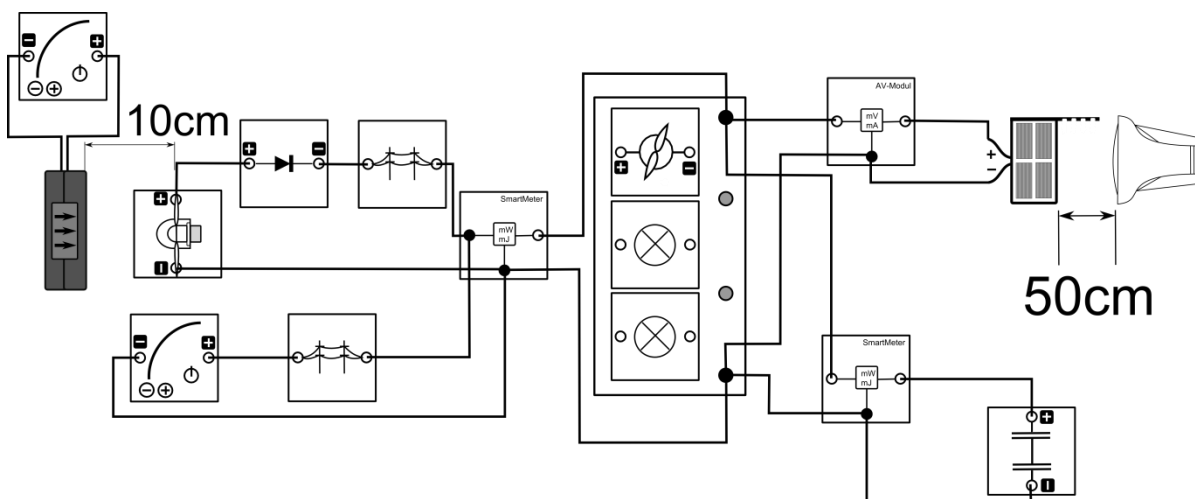
Die Nennspannung liegt bei 3V, wobei eine Abweichung von 10% erlaubt ist.

Achte darauf keine Gegenstände in der Nähe des Windturbinenrotors zu halten, da es sonst zu Verletzungen und falschen Messwerten kommen kann.

### Benötigte Geräte

- Solarmodul (Photovoltaikanlage)
- Lampe (Sonne)
- Windgenerator mit 3-blättrigem Rotor und Anstellwinkel von 25° (Windkraftanlage)
- Winderzeuger mit PowerModul
- PowerModul 3,5V (Kraftwerk)
- Kondensator (dezentraler Speicher)
- 2 Glühlampenmodule (Verbraucher)
- Motormodul (Verbraucher)
- 2 Stromnetzmodule (Stromleitungen)
- 2 SmartMeter
- AV-Modul
- Diode
- Kabel
- Grundeinheit

### Aufbau





## 4.14 Szenarienversuch: Smart Grid

### Durchführung

1. Lade den Kondensator bis zu einer Spannung von 3V auf.
2. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Platziere den Winderzeuger im Abstand von 10cm zu den Flügeln und stelle die Flügel frontal in den Wind. Stelle das Solarmodul im Abstand von 50cm zur Lampe auf und richte den Strahlengang der Lampe direkt auf das Solarmodul und parallel zur Tischebene. Schließe den Kondensator noch nicht an und stecke das Motormodul noch nicht auf die Grundeinheit.
3. Führe nun die Szenarien nacheinander durch. Beobachte für jedes Szenario die Spannung an der Grundeinheit, die Leistungseinspeisung durch das PowerModul und den Windgenerator und den Leistungsfluss am Kondensator. Notiere deine Beobachtungen.
4. Szenario 1 (Die Versorgung durch das Kraftwerk): Schalte das PowerModul mit einer Spannung von 3,5V ein und schließe den Kondensator an.
5. Szenario 2 (Der Wind weht stark): Stelle das PowerModul am Winderzeuger auf 12V und schalte dieses sowie den Winderzeuger ein.
6. Szenario 3 (Die Sonne kommt hinter den Wolken hervor): Schalte die Lampe ein.
7. Szenario 4 (Das Kraftwerk fällt aus): Schalte das PowerModul im Stromkreis ab.
8. Szenario 5 (Der Wind flacht ab) Schalte das PowerModul am Winderzeuger ab.
9. Szenario 6: (Der Verbrauch nimmt zu): Stecke das Motormodul auf die Grundeinheit.
10. Szenario 7: (Die Sonne scheint nicht mehr): Schalte die Lampe aus. (Beginne mit Szenario 8 sobald die Spannung unter 2,5V liegt)
11. Szenario 8: (Das Kraftwerk ist wieder aktiv): Schalte das PowerModul im Stromkreis wieder an.

### Beobachtungen

#### Szenario 1:

- Es fließt keine Leistung zum Kondensator oder von ihm ab ( $P=0\text{mW}$ ).
- Das PowerModul speist mit einer konstanten Leistung von 357mW.
- Die Spannung am Haus beträgt 3,14V.

#### Szenario 2:

- Die Leistung vom PowerModul und vom Windgenerator steigen auf ca. 430mW.
- Die Spannung am Gebäude steigt auf 3.23V.
- Die Leistung am Kondensator ist positiv und sinkt auf null.

#### Szenario 3:

- Die Leistung von PowerModul und Windgenerator sinkt auf 40mW.
- Die Spannung steigt auf 3,8V.
- Der Leistungsfluss am Kondensator ist positiv und sinkt auf null.

#### Szenario 4:

- Spannung verbleibt bei 3,8V.
- Leistungseinspeisung vom Windgenerator ist konstant bei  $P=30\text{mW}$ .
- Leistungsfluss am Kondensator ist null.

#### Szenario 5:

- Spannung sinkt auf 3,7V
- Leistungseinspeisung von Windgenerator und Kraftwerk sind null.
- Leistungsfluss am Kondensator ist negativ und steigt.

#### Szenario 6:

- Spannung fällt auf 3,55V.
- Leistungsfluss am Kondensator ist negativ und steigt.

#### Szenario 7:

- Spannung fällt.
- Leistungsfluss am Kondensator ist negativ und steigt.



## 4.14 Szenarienversuch: Smart Grid

### Szenario 8:

- Leistungseinspeisung vom Kraftwerk sinkt.
- Spannung steigt auf 3,07V.
- Leistungsfluss am Kondensator ist positiv und fällt auf null.

### Auswertung

1. Beschreibe mit Hilfe deiner Beobachtungen die Vorgänge in der Realität während der jeweiligen Szenarien. Gehe dabei auf Überspannungen ein.
  - Szenario 1: Das Kraftwerk übernimmt die alleinige Versorgung und gibt eine konstante Leistung ab. Der Speicher ist inaktiv und gibt weder Leistung ab, noch nimmt er welche auf. Die Versorgung entspricht der herkömmlichen Struktur.
  - Szenario 2: Die Leistungseinspeisung am Gebäude steigt, da nun zusätzlich die Windkraftanlagen Energie abgeben. Hierdurch steigt die Spannung am Gebäude. Der Speicher nimmt zusätzlich Energie auf, da dieser günstige Energie von Windkraftanlagen beinhaltet.
  - Szenario 3: Durch die Photovoltaikanlage wird in unmittelbarer Nähe zu den Verbrauchern Energie erzeugt. Das Kraftwerk gibt weniger Energie ab, so dass die Gesamtleistung aus Kraftwerk und Windkraftanlage sinkt. Die Spannung steigt weiterhin. Dies lässt darauf schließen, dass die Gesamtleistung aus allen 3 Anlagen insgesamt gestiegen ist. Der Speicher nimmt zusätzlich Energie auf, da hier günstige Energie der Photovoltaikanlagen gespeichert werden kann. Die Photovoltaikanlage ist sogar so leistungsfähig, dass es zu einer Überspannung am Gebäude kommt.
  - Szenario 4: Durch den Kraftwerksausfall fehlt Leistung. Photovoltaikanlage und Windkraftanlage sind jedoch in der Lage die Versorgung zu erhalten und erzeugen sogar immer noch eine Überspannung.
  - Szenario 5: Durch die fehlende Leistungseinspeisung des Windes, sinkt die Spannung am Gebäude. Der Speicher gibt etwas Energie ab, um die fehlende Leistung zu kompensieren. Die Überspannung bleibt erhalten.
  - Szenario 6: Durch die Zunahme des Verbrauchs sinkt die Spannung weiterhin. Hierdurch kann die Überspannung etwas verringert werden.
  - Szenario 7: Die einzige Energiequelle ist der dezentrale Speicher. Er schafft es über kurze Zeit die Versorgung aufrecht zu halten. Jedoch sinkt seine Leistungsabgabe stetig und der Energievorrat schrumpft.
  - Szenario 8: Das Kraftwerk übernimmt wieder die Versorgung, wie in Szenario 1. Die Spannung ist nun geringer, da der Verbrauch höher ist. Der Speicher wird durch das Kraftwerk für Notfälle geladen.



## Kapitel 4: Literaturverzeichnis

- Buchholz, Bernd Michael; Styczynski Zbigniew: Smart Grids, Grundlagen und Technologien der elektrischen Netze der Zukunft. Berlin. VDE Verlag 2014
- Quanschning, Volker: Regenerative Energiesysteme. Technologie – Berechnung – Simulation. München. Hanser Verlag 2009
- Pathmaperuma, Daniel; Schippl, Jens (2011): ITA-Monitoring “Intelligente Stromnetze”. URL: <http://www.itas.kit.edu/pub/v/2011/epp/pasc11-pre01.pdf> - Download vom 27.11.2014.





leXsolar GmbH  
Strehleener Straße 12-14  
01069 Dresden / Germany

Telefon: +49 (0) 351 - 47 96 56 0  
Fax: +49 (0) 351 - 47 96 56 - 111  
E-Mail: [info@lexsolar.de](mailto:info@lexsolar.de)  
Web: [www.lexsolar.de](http://www.lexsolar.de)