

## Erneuerbare Energien im Experiment

Tobias Wolfrum\* und Angela Fösel\*

\*Didaktik der Physik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, [tobias.wolfrum@fau.de](mailto:tobias.wolfrum@fau.de) und [angela.foesel@fau.de](mailto:angela.foesel@fau.de)

### Kurzfassung

Erneuerbare Energien rücken immer mehr in den Fokus einer modernen Energiepolitik. Solar- und Windenergie beispielsweise bieten Möglichkeiten für eine regenerative, „saubere“ Energieversorgung, und deren Nutzung ist mittlerweile durch Photovoltaik- und Windenergieanlagen vielerorts präsent. Noch recht selten anzutreffen sind Häuser bzw. Einrichtungen, die schon jetzt vollends energieautark sind, vielmehr wird meist eine Einspeisung in das öffentliche Stromnetz betrieben.

Auch im Physikunterricht wird eine Intensivierung der Auseinandersetzung mit der Thematik „regenerative“ Energien angestrebt. Geeignete Modellexperimente, die Technologie, Funktionsweise und Wirkungsgrad von Solarzellen und Windrädern für Schülerinnen und Schüler erfahrbar und verständlich machen, gibt es bislang nur wenige.

An der Friedrich-Alexander-Universität wurde im Rahmen eines physikdidaktischen Studierendenseminars ein energieautarkes Modellhaus konzipiert und gebaut, das mit Solar- und Windenergie versorgt wird. Im Anschluss an das Seminar wurden im Rahmen einer Zulassungsarbeit Schülerexperimente für die Sekundarstufe 1 entwickelt: Sie bieten Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit, sich an diesem Haus und mithilfe der Experimente realitätsnah mit regenerativen Energien auseinanderzusetzen und zu erleben, dass eine sinnvolle Nutzung ein (Modell-)Haus energieautark machen kann.

### 1. Einleitung

Um den modernen Alltag weiter gewährleisten zu können und die Emission von Treibhausgasen wie  $CO_2$  einzudämmen, ist ein Umdenken und Handeln bezüglich fossiler Energieträger nie aktueller gewesen als heute, was sich in einem stark wachsenden Aufkommen von erneuerbaren Energien zeigt [1]. Dabei fasst man unter dieser Bezeichnung „Ressourcen zusammen, die sich entweder mittelbar oder unmittelbar aus der Energie speisen, die die Sonne auf die Erde einstrahlt, oder aus Gezeiten und Geothermie“ [2]. Sicherlich auch begünstigt durch den wachsenden globalen Energiebedarf ist es daher notwendig, diese Problematik verstehen und analysieren zu können.

Basierend auf diesem Ansatz und in Anlehnung an die mittlerweile intensivere Auseinandersetzung mit dem Thema erneuerbare Energien im Physikunterricht werden in diesem Artikel eigens konzipierte Experimente vorgestellt. Sie verfolgen das Ziel, „saubere“ Energiewandler erfahrbar zu machen, aber auch ein Verständnis zu den damit verbundenen Begriffen der Energie- bzw. Leistungseffizienz zu schaffen.

#### 1.1. Energieautarkes Modellhaus

Die Experimente sind im Nachgang zu einem physikdidaktischen Seminar an der Friedrich-Alexander-Universität entstanden: Mit dem Fokus auf der Förderung interdisziplinärer Forschung konzipierten und

bauten Lehramtsstudierende ein energieautarkes Modellhaus [3].

Das Haus hat ein Volumen von etwa einem Kubikmeter und ist mit einer 16 cm dicken Schicht aus Hanfwolle gedämmt. Es wird mit Solar- und Windenergie betrieben, welche in Nickel-Metallhydrid-Akkus gespeichert und so bei Bedarf durch einen Wasserkreislauf bzw. Warmwasserspeicher im Fußboden wieder in thermische Energie umgewandelt werden kann. Das ganze Konzept unterliegt einer automatischen, elektronischen Regelung, sodass beispielsweise zur Optimierung der Leistung die Lastwiderstände für Windenergieanlage (WEA) und Photovoltaikanlage (PVA) den momentan herrschenden Windgeschwindigkeiten und Bestrahlungsstärken stets angepasst werden. Auch der Energiefluss im Haus ist geregelt, was bedeutet, dass die Heizung (Wasserkreislauf) einschaltet, sobald die Temperatur im Haus unter und die Temperatur im Wasserspeicher gleichzeitig über einen bestimmten Wert fällt bzw. steigt. An den außen angebrachten Displays kann stets sowohl die aktuelle Leistung von WEA und PVA, als auch die Temperatur im Haus und der Akkuladestand abgelesen werden.

### 2. Experimente

Bevor die Modellexperimente vorgestellt und erläutert werden, sollen vorab noch einige Anmerkungen gemacht werden. Die Experimente sind forschungs-

nah konzipiert und können dennoch einfach und modular auf- und nachgebaut werden können. Sie sind allesamt für die Sekundarstufe 1 entwickelt worden und können sowohl als Demonstrations- wie auch als Schülerversuche durchgeführt werden, da alle Richtlinien zur Sicherheit im Unterricht (RISU, Beschluss KMK vom 28. März 2003) eingehalten werden. Die Experimente thematisieren schwerpunktmäßig die Funktionsweise des Energiewandlers, aber auch ebenso dessen Leistung und eine Optimierung des Wirkungsgrads. Die Bindung der Experimente an das eben beschriebene energieautarke Modellhaus ist nicht zwingend notwendig. Sie können jedoch dazu dienen, einzelne Entscheidungsschritte während der Konzeption des Hauses nachvollziehbar darzustellen und die Funktionsweisen einiger Komponenten zu erklären.

Im Folgenden wird je ein Experiment zu den Themen Windenergie und Photovoltaik, welche beide Komponenten des Modellhauses darstellen, vorgestellt, beschrieben und kurz ausgewertet. Des Weiteren wird eine Methode vorgestellt, diese Energie mit Hilfe von Wasser(-stoff) „sauber“ zu speichern.

### 2.1. Windenergie

Zu diesem Thema wurde ein Versuch erarbeitet, welcher zur Leistungsoptimierung einer Windenergieanlage dient. Im Folgenden wird dies nur an Anlagen mit horizontaler Drehachse, sogenannten Auftriebsläufern, thematisiert. Dabei geht man den Weg, Aspekte der Anlage so zu wählen, dass die Eingangsleistung (Windleistung) bestmöglich genutzt wird. Konkret bedeutet das in diesem Versuch, dass verschiedene Flügelprofile auf ihr Strömungsbild bzw. auf ihre Aerodynamik untersucht werden, da der Auftrieb der Rotorblätter die elektrische Leistung  $P_{el} = U \cdot I$  stark beeinflusst.

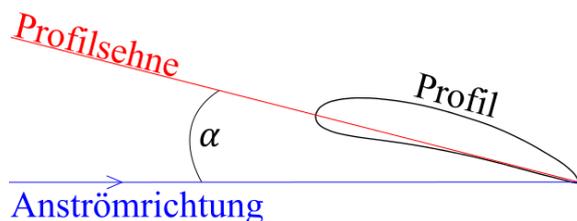


Abb.1: Anstellwinkel

Hierbei gilt bekanntlich, dass der Anstellwinkel  $\alpha$  zwischen Profilsehne und Anströmrichtung (s. Abb.1) bis zu einem bestimmten Wert  $\alpha_{max}$  direkt proportional zum Auftrieb (-sbeiwert  $c_a$ ) ist. Dieser Wert ist abhängig von der Blattgeometrie, sodass durch den Einsatz optimierter Rotorblätter der Wirkungsgrad einer solchen Anlage erhöht werden kann [4].

Um die Strömung um die Profil besser sichtbar zu machen, wird ein Diodenlaser der Schutzklasse II verwendet. Da der Strahlungsquerschnitt für Schulversuche nicht verändert werden darf, wird der Laser auf einen Spiegel gerichtet, welcher auf den Bürstenkopf einer elektrischen Zahnbürste geklebt ist. Durch

die Rotation des Kopfes geht von ihm ein „Laserfeld“ aus, in welches das zu untersuchende Profil gestellt wird. Damit das Licht des Lasers auch an die Unterseite gelangen, wird dem Bürstenkopf gegenüber ein weiterer Spiegel aufgestellt. Das Profil wird mit Rauch, welcher in einem Plastikbeutel gefangen wird,

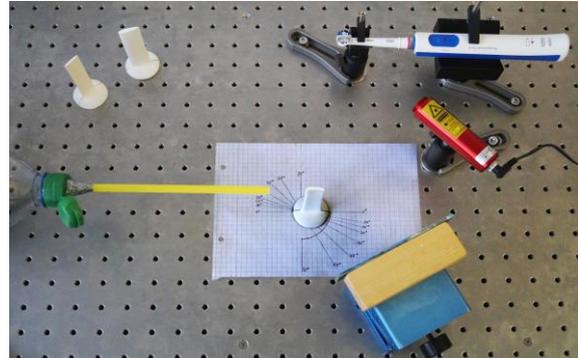


Abb.2: Versuchsaufbau zur Strömungsvisualisierung

angeströmt. Der Plastikbeutel wird mit einer aufgeschnittenen Plastikflasche verbunden, in deren Deckel ein Strohhalm befestigt ist, um das Strömungsfeld besser kontrollieren zu können. Dabei ist darauf zu achten, dass die Rotationsachse des Bürstenkopfes senkrecht auf dem entstehenden „Laserfeld“ steht.

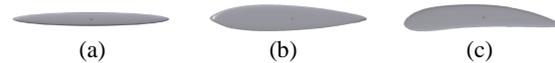


Abb.3: Untersuchte Profile

In Abb.3 sind die verwendeten Blätter zu sehen: Eine Platte (a), ein symmetrisches (b) und ein unsymmetrisches (c) Profil. Werden diese für unterschiedliche Anstellwinkel (beispielsweise  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  und  $45^\circ$ ) untersucht, erkennt man, dass  $\alpha_{max}$  bei der Platte schon bei ca.  $20^\circ$  erreicht ist und die Strömung somit abreißt. Bei dem symmetrischen Profil tritt dies bei ca.  $35^\circ$  ein, bei dem unsymmetrischen erst bei ca.  $40^\circ$ . Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Luft bei letzterem stärker nach unten abgelenkt wird, als es bei dem symmetrischen Profil der Fall ist, was ein Indiz für einen größeren Auftrieb (-sbeiwert  $c_a$ ) ist.

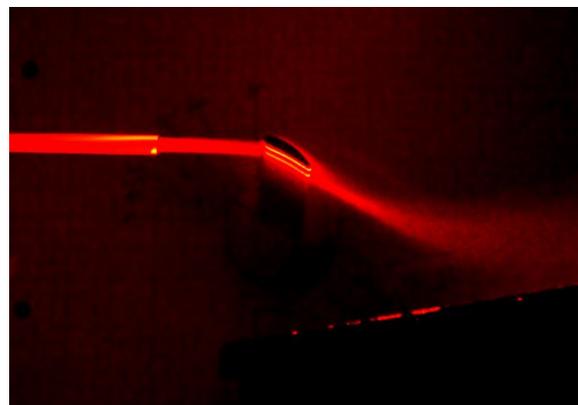


Abb.4: Strömungsbild bei  $\alpha = 30^\circ$  (unsymmetrisch)

### 2.1.1. Anfahrwirbel

Als „Nebenprodukt“ dieses Experiments ergibt sich ein Demonstrationsversuch, bei dem SchülerInnen eine Erklärung zur Entstehung der Auftriebskraft verdeutlicht werden kann. Bei niedrigen Anströmgeschwindigkeiten und Anstellwinkeln von ca.  $20^\circ$  entstehen Anfahrwirbel, welche auch für kurze Zeit ortsfest bleiben (s. Abb.5). Da der Drehimpuls eine Erhaltungsgröße ist, lässt sich auf eine entgegengesetzte Zirkulation um den Flügel schließen. Damit lassen sich die Druckunterschiede und die Ablenkung der Luft aufgrund der durch die Zirkulation resultierenden unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten über unter dem Flügel erklären [5].

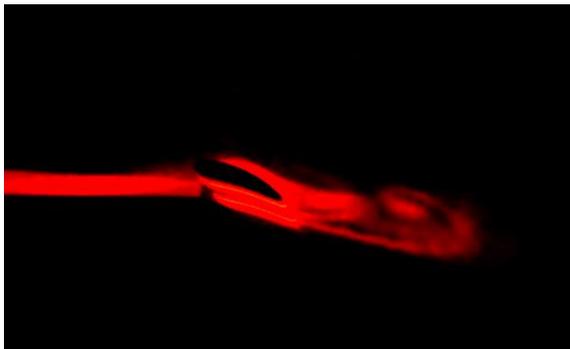


Abb.5: Entstehung von Anfahrwirbeln

### 2.2. Photovoltaik

Auch bei diesem Experiment ist, analog zum eben beschriebenen „Rauchkanal“ zur Strömungsvisualisierung, der Begriff der Leistungsoptimierung auf der Input-Seite zentral. Das bedeutet, dass die elektrische Leistung einer Solarzelle bzw. eines Solarmoduls durch „Garantieren“ einer senkrechten Sonneneinstrahlung maximiert wird [6]. Dass dies in der Realität für eine fest installierte Solarzelle bzw. ein Solarpanel nicht der Fall ist, sollen die SchülerInnen an dem in Abb.6 gezeigten Sonnengangmodell erfahren. In der Mitte ist ein kleines polykristallines Solarmodul eingespannt (etwa  $55\text{ mm} \times 65\text{ mm}$ ,  $U_l = 5\text{ V}$ ,  $I_k = 81\text{ mA}$  bei Standardbedingungen). Betrachtet man dieses Modell im Äquatorsystem, so lässt sich zum einen die Lage des Horizonts im Raum bzw. zur Erdachse über den Breitengrad  $\varphi$  einstellen (Nürnberg:  $\varphi \approx 45^\circ$ ). Die Modellsonne (hier: Hochleistungs-LED) ist fest am Meridian im Süden verankert, sodass der Stundenwinkel  $\tau$  und damit auch der Tagesverlauf durch Rotation des Himmelsäquators um die Erdachse modelliert werden. Die Deklination  $\delta$  ist der Winkelabstand vom Himmelsäquator zum Objekt (hier: Modellsonne). Die tatsächliche Höhe im Kulminationspunkt auf dem Meridian ( $\tau = 0^\circ$ ) des Objekts über dem Horizont (also für den Beobachter) ist die sogenannte Kulmination  $h$ , welche abhängig von der Deklination  $\delta$  und dem Breitengrad  $\varphi$  ist:

$$h = (90^\circ - \varphi) + \delta \quad \{1\}$$

Deklination der Sonne ist über das Jahr nicht konstant und nimmt Werte von  $-23,4^\circ$  (Wintersonnwende,

21.12.) über  $0^\circ$  (Tag-Nacht-Gleiche, 21.3. und 23.9.) bis  $+23,4^\circ$  (Sommersonnwende: 21.6.) an. Diese können im Modell durch Verschieben der Lampe entlang des Meridians variiert werden [7]. Ebenso kann die Neigung des Solarmoduls zum Horizont (beispielsweise die Neigung des Dachs) in Form des Winkels  $\beta$  eingestellt werden. Für die Bestrahlungsstärke  $E$  gilt abhängig vom Tagesverlauf:

$$E(\tau) = E_0 \cdot \cos(\tau) \quad \{2\}$$

Abhängig vom Jahresverlauf gilt:

$$E(h + \beta) = E_0 \cdot \cos(h + \beta) \quad \{3\}$$

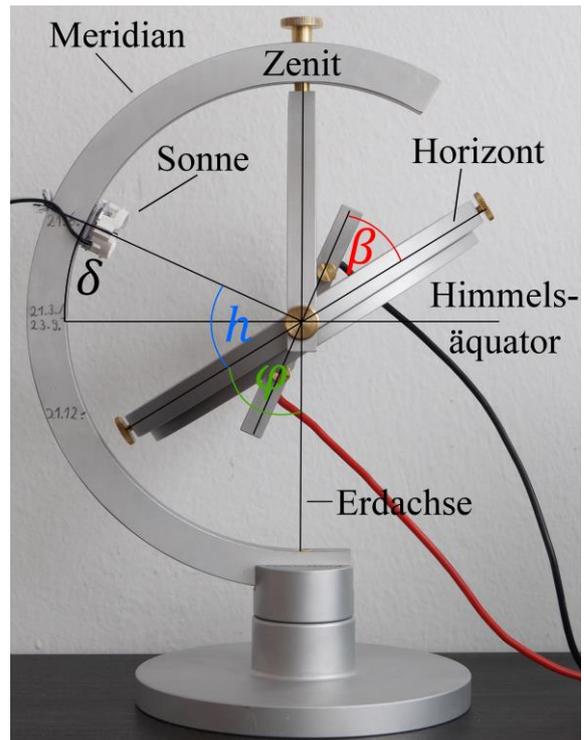


Abb.6: Sonnengangmodell

Da der Kurzschlussstrom  $I_k$  einer kristallinen Siliziumsolarzelle nahezu linear mit der Bestrahlungsstärke  $E$  wächst, bildet dieser die wichtigste Messgröße, da die Leerlaufspannung  $U_l$  im Gegensatz dazu annähernd logarithmisch mit  $E$  steigt und somit schon bei relativ geringer Bestrahlungsstärke nahe an ihren Maximalwert gelangt. Somit ist vor allem  $I_k(E)$  in Bezug auf die Leistung interessant. Diese Tatsache spiegelt sich auch in den Messwerten (aufgenommen bei  $\beta = 0^\circ$  und  $\varphi = 45^\circ$ ) mit diesem Modell wieder (s. Abb.7): Im Tagesverlauf am 21.6. ist der Kurzschlussstrom vormittags bzw. abends ( $\tau = \pm 80^\circ$ ) um ca. 42% kleiner als mittags ( $\tau = 0^\circ$ ), während die Leerlaufspannung hier nur um ca. 7% fällt. Auch im Jahresverlauf erkennt man die eben beschriebenen Abhängigkeiten der beiden Größen zur Bestrahlungsstärke. Hier wurden die Werte jeweils in der Kulmination aufgenommen.  $I_k$  ist dabei im (Modell-)Winter um bis zu 70% geringer als im (Modell-)Sommer und  $U_l$  nur um 13%. Um qualitative Aussagen über die Ausrichtung einer Solarzelle zur Sonne treffen zu können, ist es für SchülerInnen daher ausreichend,

den Kurzschlussstrom über den Tages- und Jahresverlauf der Modellsonne mit einem digitalen Multimeters aufzutragen und mit dem vorher bei  $\tau = 0^\circ$ ,  $h + \beta = 90^\circ$  gemessenen Referenzwert zu vergleichen. Hierbei ist anzumerken, dass nicht beachtet wird, dass sich die Sonneneinstrahlung auf der Erde aus der diffuser und direkter Einstrahlung zusammensetzt und dass sich das Sonnenspektrum bei größerem Weg durch die Atmosphäre verändert. Dennoch ist dieses Modell ausreichend, um zu verstehen, dass die Schaffung der direkten Sonneneinstrahlung zum maximalen Wirkungsgrad führt. Somit kann es auch als Diskussionsgrundlage für die Notwendigkeit bzw. Wirtschaftlichkeit einer tages- bzw. jahresabhängigen Nachführung dienen.

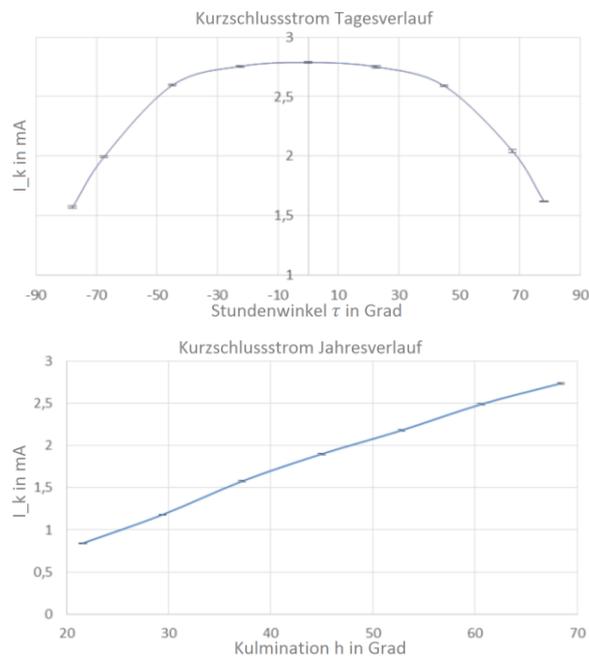


Abb.7: Kurzschlussstrom Tages- und Jahresverlauf

### 2.3. Wasserstoffbasierte Energiespeicher

Diese Experimente sollen den SchülerInnen eine moderne und „saubere“ Vorgehensweise zur Energiespeicherung näherbringen, was bei der Versorgung mit erneuerbaren Energien wie Photovoltaik und Windenergie aufgrund ihres fluktuierenden Charakters unverzichtbar ist. Zwar wurde dies im Studierendenseminar zum Modellhaus mit Nickel-Metallhydrid Akkus realisiert, doch entsteht als einziges „Abfallprodukt“ bei der Kombination von Wasserelektrolyse und Brennstoffzelle als Speichereinheit Wasser. Mit einem Modell kann die Elektrolyse von Wasser und die Funktion einer Brennstoffzelle als Energiewandler mit einfachen Mitteln erfahrbar gemacht werden.

In Abb.8 ist das Modell einer reversiblen Brennstoffzelle zu sehen. Sie kann sowohl als Elektrolyseur, als auch als Brennstoffzelle verwendet werden. Für die reversible Modellzelle benötigt man destilliertes Wasser in einem Becherglas, dessen Leitfähigkeit durch Zugabe einer Säure (z.B. Schwefelsäure

$H_2SO_4$ ) oder Base (z.B. Kalilauge  $KOH$ ) erhöht wird. In diese Lösung werden die Elektroden in einem Abstand von wenigen Zentimetern soweit wie möglich eingetaucht, denn so wird der Zellwiderstand durch Vergrößerung der Elektrodenfläche und Verkleinerung des Abstandes verringert. Als Elektrodenmaterial kann Graphit dienen (Bleistiftminen).



Abb.8: Modell einer reversiblen Brennstoffzelle

Zwar besitzt es eine höhere Wasserstoffüberspannung als beispielsweise Platin oder Metalloxide wie Titanoxid, doch sind seine chemischen Eigenschaften für die hier benötigten Zwecke ausreichend. Ebenso zeigt es als Wasserstoffkathode in saurer Lösung bei geringen Konzentrationen ( $0,1 \frac{mol}{l}$ ) ausreichende Oxidationsbeständigkeit [8], [9]. Legt man an die Elektroden eine Gleichspannung von 3 - 6 V an, welche größer als die Zersetzungsspannung von 1,23 V ist, betreibt man die Zelle als Elektrolyseur, bildet sich Wasserstoff an der Kathode und Sauerstoff an der Anode. Diese haften an der rauen Oberfläche der Graphitelektroden und werden so „gespeichert“. Sehr gut zu erkennen ist, dass für jedes Sauerstoffatom zwei Wasserstoffatome entstehen, was in doppelt so hoher Blasenanzahl an der Kathode als an der Anode zu erkennen ist. Nimmt man die Gleichspannung weg, kann eine Potentialdifferenz an den Elektroden gemessen werden. Verbindet man die diese über einen äußeren Stromkreis, ist ein Stromfluss messbar, man betreibt die Zelle als Brennstoffzelle. Dabei ist es möglich, dass Leerlaufspannungen von über 1,23 V (reversible Zellspannung) erreicht werden. Der Grund dafür ist die Bildung von Ozon ( $O_3$ ), wobei Ozon-Wasserstoff-Elemente mit einem Elektrodenpotential von 2,07 V entstehen können. Der Kurzschlussstrom ist groß genug, um beispielsweise eine LED für kurze Zeit zu betreiben (s. Abb.9).

Da der Aufbau dieses Modells nur wenig Material beansprucht, können bei Bedarf auch mehrere dieser Zellen seriell oder parallel geschaltet werden, um größere elektrische Leistungen zu erreichen. Stehen Platinelektroden zur Verfügung, kann eine saure Lösung höherer Konzentration verwendet werden, da dieses Material sehr beständig ist, sodass der Innenwiderstand der Zelle sinkt. Um die Tatsache zu betonen,

dass die Spannung der Brennstoffzelle nicht von der vorher angelegten Gleichspannung abhängt, kann die Elektrolyse mit verschiedenen Spannungswerten durchgeführt und trotzdem stets die gleiche Leerlaufspannung an der Brennstoffzelle gemessen werden [10].

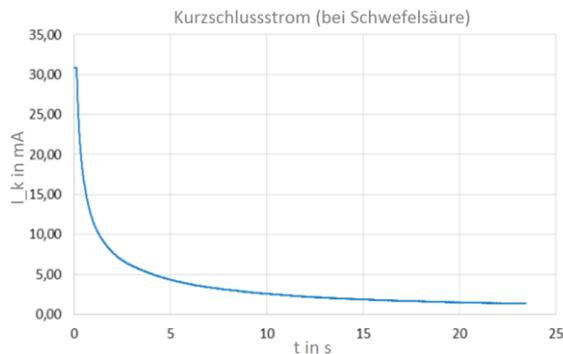


Abb.9: Kurzschlussstrom mit Schwefelsäure ( $0,075 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$ )

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurden Modelleexperimente vorgestellt, welche sowohl als Demonstrations-, als auch als Schülerexperiment durchgeführt werden können. Aufgrund ihres modularen Charakters können sie einfachst nachgebaut werden.

Um die Begriffe der Energieentwertung und vor allem Leistungseffizienz zu unterstreichen, können die Experimente als Grundlage für sogenannte Wirkungsgradketten dienen. Aufgabe der SchülerInnen ist es, mehrere Energiewandler in einer Kette zusammen zu schalten, ausgehend von Energiewandlungen, wie sie sie aus dem Haushalt kennen (z.B. mechanische in elektrische, elektrische in chemische Energie, etc.). Zum einen ist auf die geschickte Anordnung der Glieder in der Kette zu achten, zum anderen ist der Einsatz der Glieder so zu gestalten, dass die größtmögliche Leistung weitergegeben bzw. der größtmögliche Wirkungsgrad erreicht wird. Da sich der Gesamtwirkungsgrad multiplikativ aus den Wirkungsgraden der einzelnen Energiewandler zusammensetzt, ist es nötig Vorgaben zu beispielsweise der Anzahl der Wandler in der Kette zu machen. Je nach vorhandenen Mitteln lässt sich dies auch in einer kompetitiven bzw. kooperativen Unterrichtsmethode wie einem Kleingruppenwettbewerb durchführen. Die Aufgabenstellung könnte lauten: *Baut eine Kette aus mindestens 4 Energiewandlern zusammen. Das erste Glied dürft ihr an die Steckdose anschließen. Die Kette mit dem größten Gesamtwirkungsgrad gewinnt!* So könnte eine Kette beispielsweise lauten:

Windkanal - Modellwindanlage - LED - monokristalline Solarzelle. Man kann hier noch weitere Vorgaben machen, beispielsweise mit welcher Energieform begonnen oder mit welcher Energieform die Kette beendet werden soll. Ohne Einschränkung der Wandler kann es aber problematisch werden, da der Gesamtwirkungsgrad sonst zu gering wird. Wichtig ist, dass die Erkenntnisse aus den Experimenten (z.B. welches Profil man für die Windanlage verwendet, wie die Solarzelle zur (Modell-)Sonne steht, etc.) hier begründet angewendet werden. Die SchülerInnen müssen sich daher zunächst überlegen, durch welche Geräte bzw. Bauteile die Energiewandlungen erreicht werden. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass die Aufgabenstellung dennoch offen genug ist, damit die Kompetenzbereiche Erkenntnisgewinn und Kommunikation durch eigenständiges Arbeiten und Experimentieren sowie Auswertung und Prüfung von Hypothesen gefördert werden.

### 4. Literatur

- [1] Müller, W. (2006): Umweltphysik. In: Praxis der Naturwissenschaften Physik 55, Nr. 6, S. 7-21
- [2] Berger, Roland; Rincke, Karsten (2015): Elektrische Energie - Bereitstellung und Nutzung. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik 26, Nr. 146, S. 2-10
- [3] Fösel, Angela; Gräbner, Anna (2016): Ein energieautarkes Modellhaus als Zugang zu interdisziplinärer Forschung. Beitrag DD 112 zur Frühjahrstagung – Hannover 2016,
- [4] Böswirth, Leopold (2010): Technische Strömungslehre. Vieweg & Teubner: Wiesbaden
- [5] Wodzinski, Rita (2000): „Wie erklärt man das Fliegen in der Schule?“ - Versuch einer Analyse verschiedener Erklärungsmuster. PLUS LUCIS 2/99
- [6] Berge, Otto Ernst (2003): Photovoltaik. In: Naturwissenschaften im Unterricht - Physik 14, Nr. 77, S. 4-15
- [7] Zenkert, Arnold (2009): Faszination Sonnenuhr. Harri Deutsch: Frankfurt am Main
- [8] Kurzweil, Peter (2013): Brennstoffzellentechnik - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. Springer Vieweg: Wiesbaden
- [9] Kurzweil, Peter; Dietlmeier, Otto (2015): Elektrochemische Speicher - Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Grundlagen. Springer Vieweg: Wiesbaden
- [10] Kuhn, Jochen (2004): Brennstoffzelle. In: Naturwissenschaften im Unterricht - Physik 15, Nr. 79, S. 13-19