

# Einflussfaktoren auf die nutzbare Energieeinstrahlung auf Solarzellen experimentell überprüfen - Ein Schülerprojekt -

Tran Ngoc Chat\*, Simon F. Kraus\*

\*Universität Siegen, Didaktik der Physik, Adolf-Reichwein-Straße, 57068 Siegen  
tran@physik.uni-siegen.de, kraus@physik.uni-siegen.de

## Kurzfassung

Im Rahmen eines Schülerprojektes soll vermittelt werden, wie der Nutzungsgrad der Sonnenenergie durch eine Solarzelle von ihrer Orientierung zur Sonne abhängt. Das Potential von Nachführungen für die Steigerung der Effizienz der Solartechnik soll durch einfache Experimente und Simulationen vermittelt werden. Erste grundlegende Anforderungen an eine Nachführung lassen sich aus Beobachtungen der Natur ableiten. Im weiteren Verlauf richtet sich der Fokus auf die Konstruktion einer einfachen Nachführung durch die Lernenden. Das Verständnis der zugrundeliegenden Schaltungen soll dabei durch Computersimulationen vertieft werden.

## 1. Einleitung

Das Ziel des Projektes, aus welchem im vorliegenden Beitrag ein kleiner Ausschnitt dargestellt wird, ist die Entwicklung eines Ausbildungsmoduls für die Lehrerbildung in Vietnam. Hierbei ist eine langfristige Weichenstellung im Hinblick auf den zu erwarteten starken Anstieg des Energiebedarfs angedacht, welche trotz einer Verknappung fossiler Brennstoffe und Bedrohungen durch die Emission klimaschädlicher Gase, Entwicklungspotentiale eröffnet. Dabei sind Teile des Projektes direkt auf den Schulunterricht, etwa der gymnasialen Oberstufe, übertragbar.

Die Ausgangsfrage für die Lernenden, natürlich auch an europäischen Schulen, könnte für das vorgestellte Teilprojekt lauten: Wie lassen sich Solarzellen so ausrichten, dass ein Maximum der Energieeinstrahlung genutzt werden kann?

Alle Simulationen die im Folgenden zur Beantwortung dieser Frage vorgestellt werden, wurden eigens für dieses Projekt und sind als Zusatzmaterial zu diesem Beitrag erhältlich.

Anzumerken ist, dass der Fokus der Lehrereinheit auf dem geophysikalisch-mathematisch Bereich liegt. Die Physik der Halbleiter und weitere Aspekte astronomischer Natur sollen an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden. Dementsprechend sind auch Begriffe wie eingestrahelte Energie oder Energieeffizienz zu verstehen. Hier ist nicht etwa der Output des Gesamtsystems aus Solarzelle und Nachführung gemeint, sondern jeweils der mögliche Input einer Solarzelle.

## 2. Ziele der Lehrereinheit

Als Lernziele der im Folgenden vorgestellten Lehrereinheit sind zu nennen:

- Das Optimierungspotential bei der Verwendung von Nachführungen verstehen,
- die Entstehung des Tagbogens nachvollziehen können,
- das Funktionsprinzip einer automatisch nachgeführten Solarzelle verstehen,
- die Konstruktion einer einfachen Nachführung im Wesentlichen selbstständig durchführen können.

Insbesondere dem letztgenannten Punkt soll im Rahmen des Projektes besondere Beachtung zuteilwerden, da die Konstruktion auch für die regionalen Bildungseinrichtungen in Vietnam, d.h. Schulen und Institute der Lehrerbildung an den Universitäten, durchführbar sein soll. Dabei sind stets die besonderen Rahmenbedingungen dieser Einrichtungen, wie das Vorhandensein von Werkzeug und die Versorgung mit elektronischen Bauteilen, zu berücksichtigen.

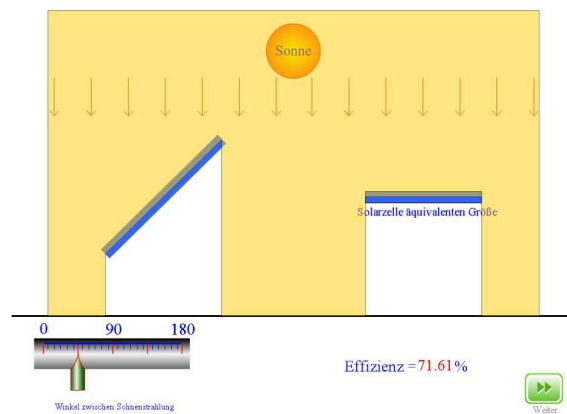


Abb. 1 Simulation 1: Abhängigkeit der Energieeinstrahlung vom Sonnenstand

### 3. Problemstellung

Die Effizienz einer Solarzelle hängt im großen Maße von ihrer Orientierung zur Richtung der einfallenden Sonnenstrahlen ab.

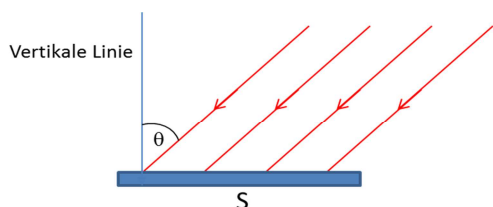
Abweichungen von der Senkrechten führen hier schnell zu einem deutlichen Abfall der Leistungsfähigkeit. Die *Simulation 1* (Bild 1) zeigt links eine Solarzelle, die sich mit dem Schieberegler darunter verkippen lässt. Die Einfallrichtung der Sonnenstrahlen wird hierbei stets als senkrecht zur Erdoberfläche angenommen. Die Solarzelle rechts behält ihre horizontale Ausrichtung bei, verändert jedoch ihre Größe, um das nutzbare Potential zu visualisieren.

Man erkennt, dass beispielsweise eine Neigung um  $45^\circ$  zu einem Abfall der Effizienz auf etwa 70 % führt.

Im zweiten Teil der Simulation ist eine horizontal aufgestellte Solaranlage dargestellt. Hier ist nun die Sonne beweglich, um verschiedene Einfallswinkel darstellen zu können. Die Simulation errechnet für beliebige Winkel die eingestrahlte Energie pro Quadratmeter sowie die Effizienz, d.h. denjenigen Anteil an der Solarkonstanten, der im betrachteten Augenblick für die weitere technische Nutzung zur Verfügung steht.

### 4. Mathematische Betrachtung

Die Sonnenscheindauer lässt sich mit relativ einfachen mathematischen Mitteln herleiten. Auf Einzelheiten der Herleitung kann an dieser Stelle jedoch nicht eingegangen werden (siehe dazu [1]).



**Abb. 2** Einstrahlung paralleler Sonnenstrahlen unter dem Winkel  $\theta$  auf eine Solarzelle der Fläche S

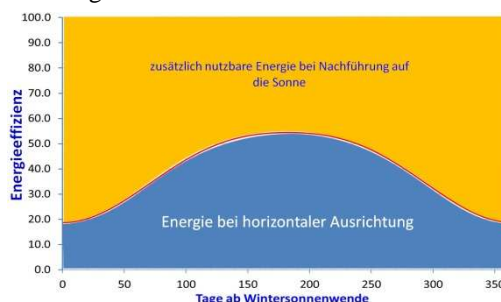
Es sei nur so viel gesagt: Wesentlicher Ansatzpunkt hierbei ist die Energieeinstrahlung auf eine horizontale Fläche S, die um einen, von der Senkrechten abweichenden Winkel  $\theta$ , erfolgt (Abb. 2).

Für sämtliche Grafiken und Simulationen wurde eine daraus abgeleitete und verallgemeinerte Formel zugrunde gelegt. Sie soll ebenfalls ein wesentliches Element der Lehreinheit sein:

$$E = S \cdot \frac{33}{\pi} \cdot \left( \sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot \sin \frac{\gamma}{2} - \frac{\gamma}{2} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta \right)$$

Die Formel ergibt sich aus den Herleitungen und ist auch für Schülerinnen und Schüler der Oberstufe nachvollziehbar. Hierbei ist  $\alpha$  der Winkel zwischen

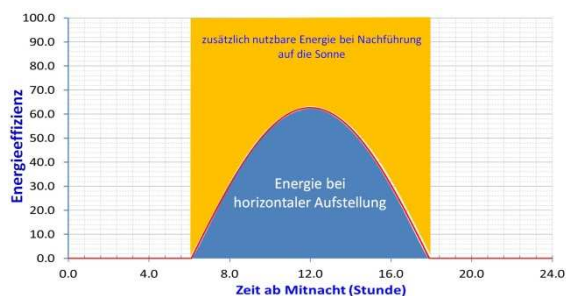
der Erdachse und den einfallenden Sonnenstrahlen,  $\beta$  ist der Breitengrad des betrachteten Ortes,  $\gamma$  ist der Winkel zwischen Auf- und Untergangspunkt der Sonne und S ist die Fläche der Solarzelle (bei horizontaler Aufstellung). Damit lässt sich die eingestrahlte Energie in kWh innerhalb eines klaren Tages für beliebige Punkte der Erdoberfläche bestimmen.<sup>1</sup>



**Abb. 3** Energieeffizienz einer horizontal montierten Solarzelle im Jahresverlauf

Die Elementarisierung des mathematischen Zusammenhanges wird im Weiteren durch die Simulationen und Grafiken geleistet.

Stellt man anhand der Formel die Effizienz einer horizontal aufgestellten Solarzelle im Jahresverlauf grafisch dar, wird das Potential einer Nachführung unmittelbar deutlich (Abb. 3).



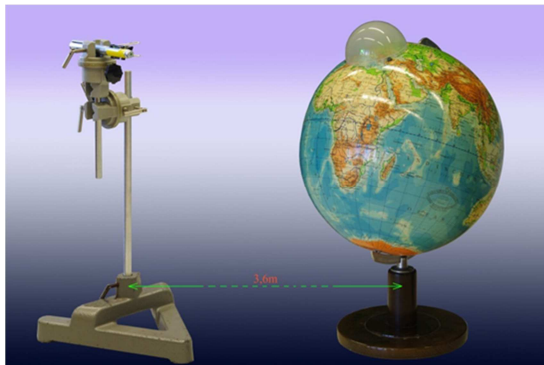
**Abb. 4** Energieeffizienz im Tagesverlauf für den Standort Mainz am 20. März

Betrachtet man weiterhin die Energieeffizienz der horizontal montierten Solarzelle im Verlauf eines einzelnen Tages, hier etwa den 20. März (Abb. 4), lässt sich der Verlauf des Wirkungsgrades über den Tage hinweg zeigen, mit dem Maximum bei ca. 62 %, was sich aus der oberen Kulmination der Sonne von  $40^\circ 05'$  für den gewählten Tag und Standort ergibt. Hierbei wird zweierlei deutlich: Erstens wird das volle Potential der Sonnenenergie gerade in den Morgen- und Abendstunden praktisch überhaupt nicht ausgeschöpft. Zweitens ist selbst zur Mittagszeit, wenn die Sonne ihren höchsten Stand erreicht, der Nutzungsgrad noch optimierungsbedürftig.

<sup>1</sup> Die atmosphärische Extinktion und weitere Effekte sollen an dieser Stelle unberücksichtigt bleiben, gleichwohl wird die nutzbare Energie dadurch teilweise bedeutsam herabgesetzt.

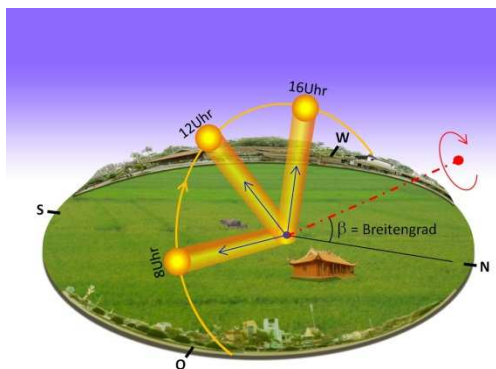
### 5. Ein Experiment zum Tagbogen

Die Entstehung des Tagbogens mag bei näherer Betrachtung für einige Schüler noch rätselhaft erscheinen. Ein Verständnis seiner Entstehung ist im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung der Thematik jedoch äußerst wünschenswert. Ein einfaches Demonstrationsexperiment kann in Form des Aufsetzens einer Plexiglashalbkugel auf einen Globus durchgeführt werden. Die Halbkugel steht dabei stellvertretend für die scheinbare Himmelskugel.



**Abb. 5** Demonstrationsexperiment zum Tagbogen

Diese wird aus einer genügend großen Entfernung, um der Forderung nach der Parallelität der einfallenden Lichtstrahlen zu genügen, mit einem Laser angestrahlt. Beginnend beim Aufgangspunkt der Sonne im Osten wird der Globus nun gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Dabei lässt sich die Wanderung des Laserpunktes auf der Oberfläche der Halbkugel nachverfolgen und markieren. Durch den Vergleich von Sommer- und Winterhalbjahr wird die unterschiedliche Ausprägung des jeweiligen Tagbogens deutlich. Mit Hilfe einer Schablone ist sogar eine erste, größenordnungsmäßige Bestimmung der Sonnenscheindauer möglich.



**Abb. 6** Der Tagbogen der Sonne und die Rotationsachse der Nachführung

Anhand der Abbildungen 5 und 6 können die Lernenden nun eine erste Forderung an eine Nachführung für Solarzellen ableiten. So sollte die Rotationsachse der Nachführung parallel zur Erdachse ausgerichtet sein, um die Sonne im Tagesverlauf auf ihrem Weg „verfolgen“ zu können. Die Art der

Nachführung entspricht damit einer äquatorialen Montierung, wie sie von Teleskopen her bekannt ist.

Mit dieser Form der Nachführung um eine Achse lässt sich bereits ein deutlich größerer Anteil der Sonnenenergie nutzen.

Bild 7 zeigt ein Modell einer solchen Nachführung. Im *Video 1*<sup>2</sup> lässt sich der Bewegungsablauf zur optimalen Ausrichtung der Solarzellen nachverfolgen.



**Abb. 7** Modell einer Nachführung

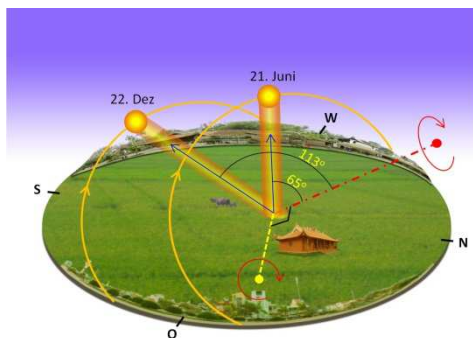
### 6. Die Nachführung im Detail

Gleichsam wird bei näherer Betrachtung jedoch auch deutlich, dass eine solche Nachführung einen entscheidenden Nachteil mit sich bringt. Vergleicht man den Höhenwinkel der oberen Kulmination der Sonne in seinen Extremwerten, ist gut erkennbar, dass eine solche Nachführung nicht ganzjährig gute Erträge verspricht. In Situationen mit ungünstigen Sonnenständen, kann die Solarzelle, bei einachsiger Nachführung, nicht mehr senkrecht zur einfallenden Sonnenstrahlung ausgerichtet werden (siehe auch *Video 2*).

An dieser Stelle sollen die Lernenden erkennen, dass eine zweite Achse, die senkrecht zur Stundenachse ausgerichtet ist, die unterschiedlichen Höhenwinkel der Sonne im Jahresverlauf kompensiert und die optimale Ausrichtung der Solarzelle zu jedem Zeitpunkt garantieren kann (Abb. 8).

*Video 3* zeigt uns nun die Rotation des Modells um beide Achsen. Diese Funktion war bislang zu Demonstrationszwecken blockiert. Es wird deutlich, dass die Solarzelle, auch in den Extremstellungen der Sonne, senkrecht zur Einfallsrichtung der Sonnenlichts gedreht wird.

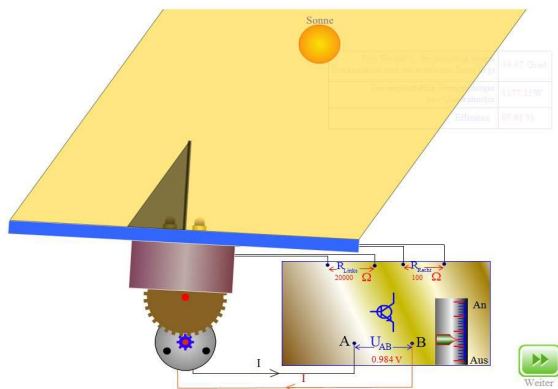
<sup>2</sup> siehe Zusatzmaterial zu diesem Beitrag



**Abb. 8** Vergleich der Kulminationswinkel im Jahresverlauf

### 7. Funktionsweise der Schaltung

Das Grundprinzip der Steuerung einer solchen Nachführung für Solaranlagen lässt sich anhand von *Simulation 2* verdeutlichen. Die wichtigsten Bauelemente sind dabei jeweils zwei Fotowiderstände, die auf die veränderlichen Beleuchtungsbedingungen reagieren. *Simulation 2* (Abb. 9) zeigt die Schaltung zunächst im Wesentlichen als Blackbox, die eine Veränderung des Verstärkungsfaktors erlaubt, sonst jedoch nur die Werte der beiden Fotowiderstände sowie die Spannung am Motor und dessen Drehrichtung darstellt. Zu erkennen ist, wie die Widerstände auf eine Positionsänderung der Sonne reagieren und der Motor die Solarzelle in Rotation versetzt, bis die Lichtstärke an beiden Widerständen ausglich ist und die Spannung am Motor wieder auf 0 Volt zurückgeht.



**Abb. 9** Simulation 2: Funktionsprinzip der Nachführung

Im zweiten Schritt ist an dieser Stelle auch ein detaillierterer Blick auf die Schaltung möglich.<sup>3</sup> Die Fotowiderstände sind dabei durch einen veränderlichen Widerstand repräsentiert, dessen Änderung eine positive bzw. negative Spannung an den Klemmen A-B bewirkt, die wiederum die Drehrichtung des Motors bestimmt.

<sup>3</sup> Wengleich die Darstellung im Sinne der Reduktion auch hier die sehr komplexe reale Schaltung auf ihre grundlegenden Elemente beschränkt.

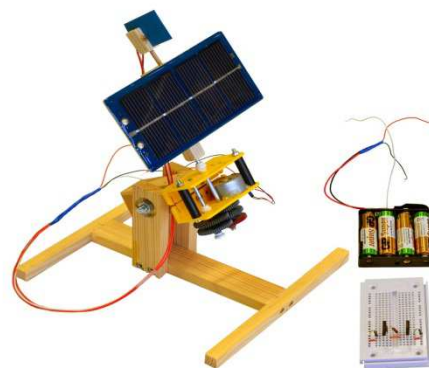
### 8. Konstruktion eines eigenen Modells

Das wesentliche Ziel der Unterrichtssequenz liegt auf der eigenständigen Konstruktion des eigenen Modells durch die Lernenden. Hierbei sind einige Einschränkungen hinsichtlich des Funktionsumfangs zu machen, um das Modell in einer überschaubaren Zeit anfertigen zu können, sowie den Werkzeugeinsatz auf ein Mindestmaß zu beschränken. So ist die Variante für Schüler auf die Nachführung um eine Achse reduziert. Auch ist die Komplexität der Schaltung deutlich herabgesetzt, ohne dabei jedoch auf ein gutes Ansprechverhalten zu verzichten (Bild 10).

Die vereinfachte und stark optimierte Schaltung besteht aus lediglich acht Bauelementen. Neben den beiden Fotowiderständen sind dies vier weitere Widerstände sowie zwei Transistoren.

Zur Unterstützung des Verständnisses der Schaltung wurde *Simulation 3* (Abb. 11) erstellt. Nachdem die Spannungsquelle an die richtige Position geschoben und die Lichtquelle per Klick eingeschaltet wurde, kann die Funktionsweise durch die Lernenden genauer untersucht werden.

Die Simulation umfasst die vollständige Schaltung und zeigt relevante Größen, wie etwa den aktuellen Wert der Fotowiderstände, die Kollektorspannungen der Transistoren sowie die Klemmenspannung  $U_{AB}$  direkt an. Der jeweils aktive Teil der Schaltung wird durch Einfärbung des Strompfades hervorgehoben. Die resultierende Drehrichtung des Elektromotors ist per Mouse-Over-Effekt ebenfalls direkt zugänglich. Per Klick auf die Schaltzeichen werden ferner Abbildungen der realen Bauelemente eingeblendet, um

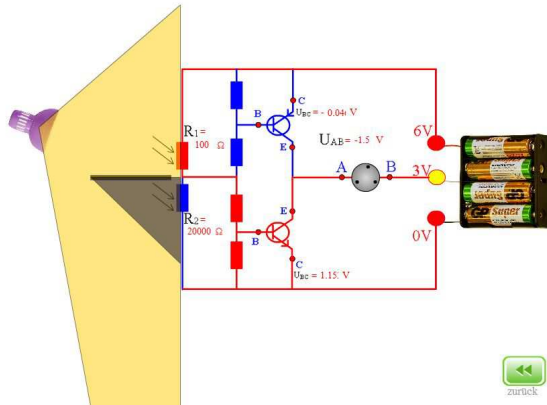


**Abb. 10** Einfaches Modell zur Nachführung um eine Achse

das identifizieren der Elemente zu erleichtern.

Beim Zusammenbau der Schaltung wurde auf eine Steckplatine gesetzt, um auf den Einsatz von LötKolben etc. verzichten zu können. Der Zeitbedarf für die Assemblierung der Schaltung reduziert sich damit, für einen geübten Bastler, auf unter 2 Minuten. Die Zusammenführung mit einem bereits vorgefertigten Modell kann dann ebenfalls in kürzester Zeit erfolgen. Die Videos 4 und 5 zeigen diese Bearbeitungsschritte.





**Abb. 11** Simulation 3: Darstellung der Details der Schaltung

Die Schülerinnen und Schüler haben anschließend die Möglichkeit, die vorab betrachteten theoretischen Grundlagen am Modell zu erproben und etwa Strom-Spannungs-Kennlinien bei günstiger und ungünstiger Ausrichtung der Solarzelle aufzunehmen.

## 9. Ausblick

Die Erprobung der Modelle und Simulationen erfolgte bislang im institutseigenen Schülerlabor. Im nächsten Schritt ist die Einbindung in eine Stoffeinheit im Themenfeld der Umweltphysik bzw. regenerativen Energien geplant, um diese mit Schulklassen durchführen zu können.

Die endgültige Adaption an den Schulunterricht und die Lehrerbildung in Vietnam wird durch die dortigen Einrichtungen erfolgen um einen optimalen Grad an Integration des Projektes in den Unterricht zu gewährleisten.

## 10. Literatur

- [1] Tran, Ngoc Chat; Kraus, Simon F. (2012): Eine Näherungsrechnung zu Sonnenscheindauer und Sonnenenergie. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 49. Jahrgang, Heft 2, S. 18 - 22
- [2] Kraus, Simon F.; Tran, Ngoc Chat (2012): Ein Demonstrationsversuch zum Tagbogen der Sonne. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 49. Jahrgang, Heft 2, S. 23 - 25