



Solar-Rallye: eine Herausforderung besonderer Art

Teil 1

Durchgeführt in Klasse 9, Realschule

Material:

Pro Fahrzeug: 3 Solarpaneele; Solar-motor, 2 Zahnräder (Modul 0,5).

Rundstäbe verschiedener Durchmesser: Holz, Metall (Messing, ALU, Federstahl, Schweißdraht)

Plattenmaterial: Balsaholz, Styrodur (Hartschaum), Kunststoffplatten (Plexiglas, Tiefziehfolien, Zweischichtkunststoffplatten); Kohlefaserplatten

Kleber: Sekundenkleber, Zwei-Komponentenkleber, Epoxydharzkleber.

Lager: Kugellager (auf Leichtgängigkeit achten) oder Teflonstab für Gleitlager.

Werkzeug:

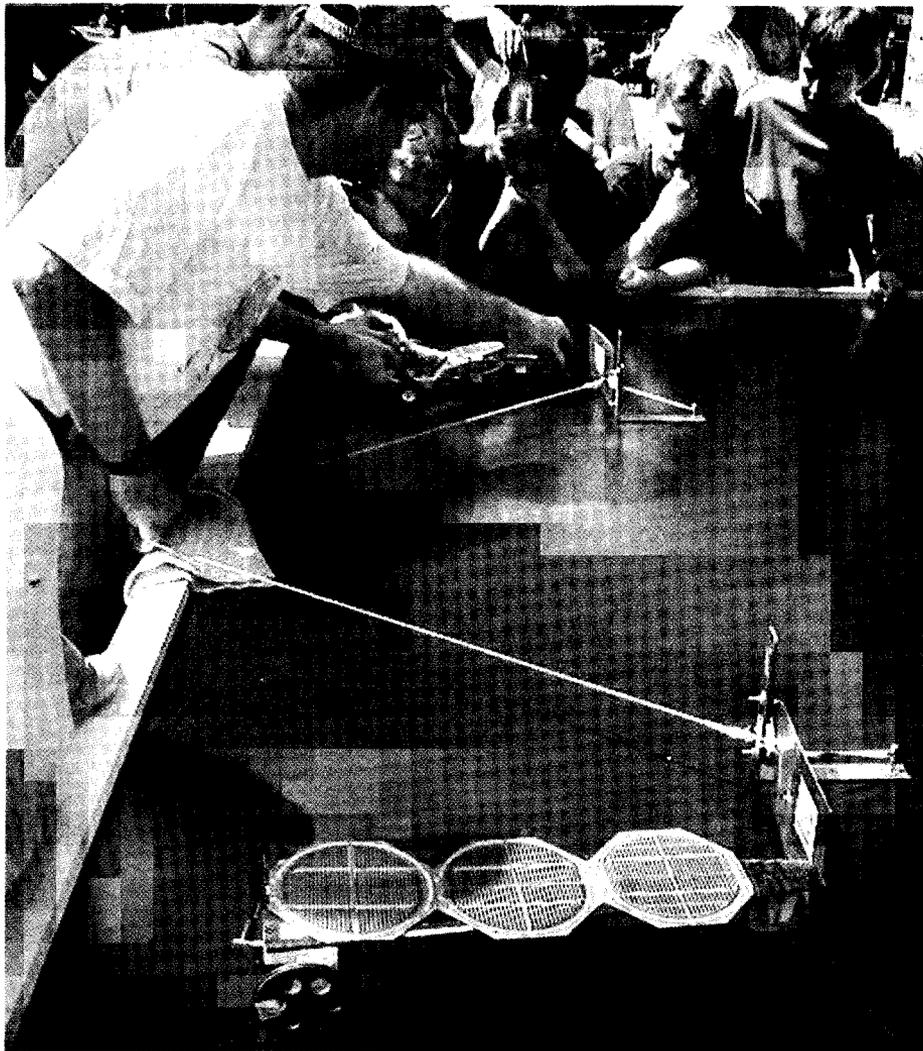
Feilen (Metall) unterschiedlicher Größen und Hiebe; scharfe Messer; LötKolben, Bohrmaschinen; Schleifmaschine; CNC-Tischfräsmaschine (z. B. KOSY, zum Fräsen der Räder, Kugellagerpassungen usw.)

Unterrichtspraxis VuE, 2

DIE **TECHNIK** STUNDE

VERSORGUNG UND ENTSORGUNG

129



KORREKTURBLATT

Solar-Rallye: eine Herausforderung besonderer Art

Teil 1

Bei den Kosten wurden versehentlich DM-Preise angegeben. Hier sind die korrigierten Preise.

Kosten:

Solarpaneele (3 x 6 €); Solarmotor: ca. 2,50 €; sonstiges Material: ca. 10 € (pro Modell, inklusive Lager)

Unterrichtspraxis **VuE**, 2

Kosten:

Solarpaneele (3 x 12 €); Solarmotor: ca. 5 €; sonstiges Material: ca. 20 € (pro Modell, inklusive Lager)

Dauer:

ca. 30 Stunden

Grundlagen:

VuE, 2: Nutzung der Solarenergie – Solarzellen und Solarmodule; TECHNIKSTUNDE 131, 132.

LERNZIELE**Handlungsperspektive:**

- Verschiedene Materialien miteinander kombinieren und verarbeiten
- Experimente zur Informationsgewinnung und Entscheidungsfindung durchführen
- Optimierungsprozesse durchführen
- Eine Dokumentation erstellen
- Den Umgang mit der CNC-Fräsmaschine üben
- Selbstständigkeit, Kooperation und Aufgabenverteilung in Teamarbeit üben

Kenntnis- und Strukturperspektive:

- Neue Materialien und Verarbeitungstechniken kennen lernen
- Technisches Experiment und Optimierung technischer Konstruktionen als wichtige Methoden bei Entwicklungsprozessen erkennen
- Die Funktionsweise von Solarzellen kennen
- Verschiedene Gütekriterien eines Modellfahrzeugs erarbeiten

Bedeutungs- und Bewertungsperspektive:

- Die Fahrzeuge unter verschiedenen Aspekten analysieren, bewerten und die Unterschiede in der Rangfolge begründen
- Problemfelder am eigenen Fahrzeug erkennen und bewerten

- Kritische Auseinandersetzung mit der Arbeit des eigenen Teams
- Sich selbst bezüglich der Teamarbeit einschätzen und bewerten

VORBEMERKUNGEN

Manchmal gibt es Gelegenheiten und Themen im Technikunterricht, die, sind sie einmal realisiert, einen Schub an Ideen, Erfahrungen und Rückkopplungsprozessen auslösen können, die weit über das aktuelle Schuljahr hinaus wirksam sind. Die „Initialzündung“ für das Thema „Solar-Renner“ war ein Wettbewerb in Basel/Schweiz, der beteiligten Schülern nachhaltig in Erinnerung bleiben wird.

Der Reiz der offenen Problemstellung und die Aussicht, sich mit den Ergebnissen unbekannter Gruppen messen zu müssen, löste eine Dynamik aus, die man sich für Projekte mit Schülern intensiver nicht wünschen könnte. Die Qualität des technischen Erkenntnisgewinns nach einem solchen Ereignis ergibt sich aus den eigenen Entwicklungsprozessen einerseits, und aus der Gesamtschau der Realisierungsmöglichkeiten andererseits.

Gruppen, die an einem solchen Wettbewerb teilgenommen haben, möchten am liebsten in folgenden Jahren Gelegenheit haben, ihre gewonnenen Erkenntnisse und neuen Ideen erneut auf die Probe zu stellen. Schon bei den ersten Vergleichen mit parallel arbeitenden Teams entsteht ein Eifer um Einfälle und Optimierung im Detail. Nach der Wettbewerbserfahrung ist die Wahrnehmung technischer Zusammenhänge in bestimmten Bereichen zusätzlich geschärft; so werden die Ergebnisse von Folgejahrgängen kritisch begutachtet, vor dem Hintergrund der eigenen Erfahrungen, und stets kommt der Ruf nach Neuauflage des Wettstreits ...

PROJEKTBESCHREIBUNG**1. Ausschreibung**

Die Ausschreibung eines Wettbewerbs mit klaren materiellen und terminlichen Vorgaben bietet gleichzeitig Motivation und zeitliche Begrenzung des Themas. Eine Zeitspanne von 9–12 Wochen ist ratsam, wenn man einen sehr offenen Entwicklungs-Prozess zulassen will. Wenn die Möglichkeit besteht, einen solchen Wettbewerb zwischen verschiedenen Schulen oder gar überregional auszurichten, erreicht das ganze Vorhaben natürlich noch einmal ein ganz anderes Niveau an Spannung und Verbindlichkeit.

2. Durchführung

Als Wettbewerb durchgeführt wird in diesem Fall ein Kurzstreckenrennen mit jeweils dem direkten Vergleich zweier Fahrzeuge: eine gerade Strecke (glatte Fläche) von 10 Metern Länge (und ca. 3 Metern Breite) soll so schnell wie möglich zurückgelegt werden. In zwei Durchgängen soll sich ein Fahrzeug gegen einen direkten Kontrahenten durchsetzen, indem es jeweils die Zielinie zuerst überquert.

Die einzelnen Läufe werden im K.O.-System durchgeführt, es sollte aber eine Turnierform mit mehreren Gruppen gewählt werden, um einem Fahrzeug mehrere Starts zu ermöglichen. Nicht selten kommt es nämlich zu überraschenden Effekten bei ähnlich starken Fahrzeugen (A schlägt B, B schlägt C, aber A unterliegt in seinem Lauf gegen C; -> Entscheidungslauf!) Im Gegensatz zu Langstreckenrennen mit Solarfahrzeugen, stehen hier sozusagen „Sprintqualitäten“ im Vordergrund, die auch einen Wettbewerb mit vielen Fahrzeugen zu einem dynamischen, kurzweiligen und dennoch erkenntnisreichen Ereignis machen.

3. Vorgaben

Die Ausschreibung ist eng in den Materialvorgaben und sehr offen in den Konstruktionsmöglichkeiten. Zur Verfügung gestellt werden:

- 3 kleine 2V-Solar-Paneele (beispielsweise bei Versand Traudl-Riess) mit Anschlusskabeln und Klemmen,
- ein Solarmotor mit 2 mm Welle,
- außerdem zwei Zahnräder (Modul 0,5).

Mit diesen Möglichkeiten, einen Antrieb zu realisieren, sind die Begrenzungen des Projekts auch schon gegeben (Abb. 1).

Hinweis: Ergänzungen für den Turnierbetrieb könnten folgende Hinweise sein: Zwei Flächen (z.B. 3 x 3 cm) am Chassis für das Anbringen von Startnummern oder einen Schalter zum Schließen des Stromkreises einbauen.

Darüber hinaus kann also ein Fahrzeug mit beliebiger Grundkonstruktion und Räderzahl, aus beliebigen Materialien entwickelt werden. Auch die Anordnung der Paneele oder der Antriebsachse ermöglicht eine Vielzahl von konstruktiven Lösungen. Dieses breite Spektrum sollte beim Unterrichtsfortgang unbedingt erhalten bleiben (Abb. 2, 3; siehe auch Teil 2).

4. Namensgebung

Für die Entwicklung eines Fahrzeugs sollen sich Teams finden, die ihrem Renner (und damit auch der „Crew“) einen Namen geben. Unter diesem Namen melden sie sich auch zum Wettbewerb an (kreative Beispiele: „Eat my dust“, „Firewall“, „Hell of fire“, „Sunflower“, „Sunfire“). Ein Team sollte dabei nicht aus mehr als drei, maximal vier Schüler/Innen bestehen, damit die

Möglichkeit von Handlungserfahrungen und daraus entstehender Transfers für den Einzelnen nicht zu sehr eingeschränkt sind.

5. Preise

Jeder Wettbewerb erhält durch das Ausloben von Preisen einen gesteigerten Aufforderungscharakter. Neben der Prämierung der Turnierschnellsten ist es eine Überlegung wert, ob man eine zusätzliche Kategorie (z. B.: Design, Originalität ...) mit in die Ausschreibung aufnimmt. Dies erfordert natürlich die Einrichtung einer Jury, während der eigentliche Rennwettbewerb in der Regel offensichtliche Ergebnisse erbringt.

6. Äußere Bedingungen

Mit den vorgegebenen Materialien ist ein Solarrennen auch bei schwierigeren Wetterbedingungen durchführbar. Nur wenn die Lichtverhältnisse sehr wechselhaft sind, entstehen unterschiedliche Leistungswerte der Antriebe, was aber immer beide im Duell antretenden Fahrzeuge betrifft. Dennoch empfiehlt sich eine rasche Turnierendurchführung, um Diskussionen über wechselnde Bedingungen zu vermeiden.

7. Öffentlichkeit

Nicht nur um etwaigen Sponsoren von Preisen (z. B. aus der Solartechnik) eine Bühne zur öffentlichen Darstellung zu bieten, sondern vor allem um den teilnehmenden Teams einen interessanten Rahmen für den Wettbewerb zu ermöglichen, ist es von Vorteil, wenn sich das Ereignis inmitten der Öffentlichkeit abspielen kann (Marktplatz; Fußgängerzone; Rathausplatz; Schulfest o. Ä.)

Hier hat darüber hinaus ein moderner Technikunterricht die Möglichkeit, Laien wie versierten Betrachtern einen Ein-

blick in Anspruch und Inhalte des Faches zu gewähren (Abb. 4). Wahrnehmung und Wertschätzung in der Öffentlichkeit hat das Fach in diesen Zeiten nötiger denn je!

8. Realisierung

Achtung! Die bisherige Beschreibung soll nicht den Eindruck erwecken, dass nur so und mit diesem Aufwand das Projekt durchzuführen ist. Im Gegenteil! Die einfachste Form, den Wettbewerb in der eigenen Schule beziehungsweise in einer Klasse auszuschreiben, verspricht kaum weniger Motivation bei den Schülern. Der organisatorische Aufwand verringert sich aber um ein Vielfaches im Vergleich zur Ausschreibung auf Stadt- oder Schulamtebene. Sponsorsuche und Öffentlichkeitsarbeit entfallen oder halten sich in leicht überschaubarem Rahmen.

8.1 Rahmenbedingungen

Für die Realisierung des Wettbewerbs im Großen gilt es zunächst, Partner zu finden, um die finanzielle Seite des Projekts zu sichern und Öffentlichkeits- und Organisationsarbeit zu verteilen. So könnten Sponsoren aus Solartechnik, Energieversorgungsunternehmen, Fahrzeugbau oder Fahrzeugvertrieb beispielsweise die Bereitstellung der Materialvorgaben (Solarpaneele, Motor) finanziell übernehmen. Das würde die teilnehmenden Schulen finanziell entlasten.

Die staatlichen Schulämter sind sicherlich gerne bereit, ihre finanzielle oder logistische Unterstützung anzubieten. Eine offizielle Ausschreibung von Seiten des Schulamtes stärkt das Projekt. Als Schaltstelle für die Öffentlichkeits-

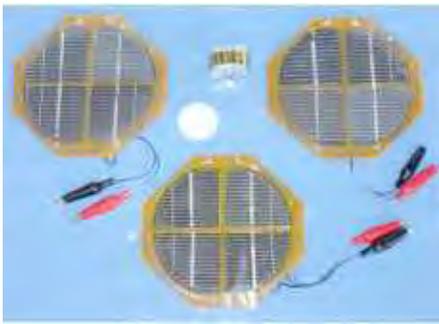


Abb. 1: Materialvergabe für die Solar-Renner



Abb. 2: Modell beim Start



Abb. 3: Modell beim Start



Abb. 4: Rennstrecke, Startvorrichtung



Abb. 5: Solar-Rennen

arbeit bietet sich das eigene Rektorat an. Auch Fachberater des Faches können Tipps geben und unterstützen.

Gibt es beispielsweise von wenigen Schulen Rückmeldung, so kann die Zahl der Fahrzeuge pro Schule größer gehalten werden; melden sich viele Schulen an, muss die Zahl der Fahrzeuge pro Schule limitiert werden (2!). Bei eingeschränkter Zulassung sind unter Umständen Ausscheidungsrennen intern in den Schulen erforderlich. Materialsets hierfür können dann zum Selbstkostenpreis beim Veranstalter bezogen werden.

TIPP: Die Suche nach sinnvollen WVR-Projekten (Baden-Württemberg) bzw. fächerübergreifenden Projekten ist oftmals belastend für die Schulen. Eine Solarrallye weist alle Elemente auf, die ein solches Projekt haben sollte!

8.2 Möglicher zeitlicher Ablauf

September/Oktober: Erstellung eines Grundkonzepts, Suche nach Partnern, Ausschreibung an den Schulen.

November/Dezember: Rückmeldung von den Schulen und Verschicken der Solarpaneele und Motoren.

Mai/Juni: Bau der Rennstrecke und der Startvorrichtung (für Materialien und Hilfe bei der Konstruktion: Baumärkte, Zimmermannsbetriebe oder Schreinereien als Sponsoren suchen), Präsentation der Sponsoren vorbereiten.

Juli: Durchführung der Rallye (Abb. 5), Auswertung der Erfahrungen.

Autoren: Wolfgang Degelmann,
Freiburg;
Meinrad Lauber, Freiburg



Solar-Rallye: eine Herausforderung besonderer Art

Teil 2

UNTERRICHTSVERLAUF

1. Erarbeitung des Themas

Bevor die Arbeitsgruppen mit dem Erfindungs- und Konstruktionsprozess beginnen, werden mit der ganzen Klasse die Kriterien erarbeitet, die den Erfolg des Solarmobiles bestimmen und als Grundlage einer späteren Beurteilung und Bewertung dienen. Die Platzierung beim Rennen soll ja in einer abschließenden Reflexion kritisch analysiert werden.

Des Weiteren muss den Arbeitsgruppen eine einheitliche Ausgangsposition verschafft werden, die es in der folgenden, völlig offenen Phase der Entwicklung und Herstellung immer wieder ermöglicht, die eigene Arbeit mit den gefundenen Kriterien abzugleichen und den Gruppen Orientierung zu bieten.



Die Erarbeitung der Kriterien kann durch Bilder von Rennen mit bemann- ten Solarmobilen unterstützt werden (siehe Internet), wobei eine Abgrenzung bezüglich der verschiedenen Zielset- zungen stattfinden muss. Die Schüler finden unter anderem folgende Kriterien:

- Gewicht des Modells (die Milligramm- waage der Chemie gibt Auskunft!)
- Geringe Reibung aller beweglichen Teile (Leichtlauf)
- Präziser Geradeauslauf
- Hohe Energieausbeute der Paneele
- Gute Balance zwischen Beschleu- nigung und Endgeschwindigkeit (Radgrößen)

Die Kriterien werden auf ein Plakat geschrieben und im Technikraum auf- gehängt.

Zur weiteren Klärung der Aufgabe und zur Unterstützung der Arbeitsverteilung in den einzelnen Gruppen wird das So- larmodell in verschiedene Baugruppen eingeteilt. In der Zusammenschau mit den gefundenen Kriterien erlaubt dies- ses Vorgehen einen ersten Blick auf die anstehenden Probleme.

Als mögliche Einteilung ergibt sich:

- Chassis
- Befestigung des Motors
- Konstruktion von Rädern und Achsen
- Anbringen der Solarpaneele
- Elektrische Schaltung

Diese Baugruppen werden ebenfalls auf einem Plakat fixiert und neben den Kriterien aufgehängt.

Anschließend ist es unerlässlich, Ver- einbarungen über die Arbeit in einer Gruppe zu treffen. Fragen wie „Wer macht was?“, „Wie werden Arbeiten verteilt?“, „Wie werden Entscheidungen getroffen?“, „Wie effektiviert man Teamarbeit?“ spielen eine große Rolle, da die völlig offene Unterrichtsphase der Entwicklung und Herstellung des Modells sonst schnell zu Frustrationen,

Motivationsverlust oder Leerlauf führt. Der Aspekt der Leistungsbeurteilung in einer Gruppe muss hier ebenso geklärt werden: Übernahme von Verantwor- tung, Kooperationsfähigkeit, Einsatz- bereitschaft, das Entwickeln und Ein- bringen von Ideen, setzen von Impul- sen usw.

Zum Aufzeichnen der Gruppenpro- zesse haben sich standardisierte Ar- beitsprotokolle als hilfreich erwiesen, die schnell auszufüllen sind und eine Reflexion erleichtern.

Es kann sich hierbei um ein gemeinsam entwickeltes Formblatt handeln, das beispielsweise folgende Rubriken ent- hält:

- Was wir erreicht haben.
- Probleme, die es zu untersuchen und bewältigen gilt.
- Was bis zur nächsten Stunde besorgt und erledigt werden muss.
- Wer übernimmt welche Aufgaben und Arbeiten?

Die Sammlung der Protokolle eignet sich, mit dem entsprechenden Bild- und Zeichnungsmaterial versehen, zum Erstellen einer Abschlussdokumen- tation.

Das Ausfüllen der Protokolle am Ende jeder Stunde erfordert eine gruppen- interne Reflexion über das Gesche- hene, schafft Klarheit über das zu Erle- digende und ermöglicht einen wöchent- lichen Austausch im Plenum über den Stand der Arbeiten. Dieses ritualisierte Vorgehen verhilft zu einer gewissen Struktur und Orientierung (roter Faden!) im offenen Unterrichtsverlauf.

2. Konstruktion, Entwicklung und Herstellung

2.1 Vorbemerkungen

Die Vorgaben für das Projekt erlauben es, dass die Schüler nahezu völlig frei sind, was die Konstruktion und Herstel-

lung der Modelle anbelangt. Dies führt, wie bereits erwähnt, zu einem komplett offenen Unterrichtsverlauf und einer großen Eigenverantwortung der Schüler. Der Lehrer muss sehr fein- fähig im Beobachten der Gruppenpro- zesse sein, um vielleicht doch helfend oder regulierend zur Hand gehen zu können. Frustrationen bleiben nicht aus und es bedarf immer wieder neuer Motivation. Die Stunden werden wenig planbar sein, erfordern dafür aber um so mehr der nachträglichen Aufberei- tung. Dies ist der Grund dafür, dass es nicht möglich ist, diesen offenen Pro- zess detailliert darzustellen.

Die Schüler geraten in einen Entwick- lungsprozess, der, von einer Grundkon- struktion ausgehend, aus dem Wechsel von auftauchenden Problemen und neuen Lösungsideen besteht (siehe Titelbild). Die Problemorientierung er- gibt sich bei jeder Gruppe in un- terschiedlicher Weise und wird von der Kreativität der Gruppe, den eingesetz- ten Materialien und Fertigungsverfahren, sowie dem Willen der Gruppe zu ständiger Verbesserung abhängen. Dem Wunsch zu Optimieren steht oft- mals die Schwierigkeit der Umsetzung entgegen. Der Lehrer muss jeweils ent- scheiden, wie weit er helfend und Im- pulse setzend eingreifen oder lenken möchte.

Neben den erwähnten Arbeitsprotokol- len hilft ein klarer Zeitrahmen, diesen Entwicklungsprozess zu strukturieren. Inhaltlich ist die Frage des Materials (Abb. 6) und der Materialbeschaffung sowie das Durchführen verschiedener Experimente zur Informationsgewin- nung von Bedeutung.

Eine Vielzahl an Materialien ermöglicht unterschiedlichste Problemlösungen. Es empfiehlt sich, zu Beginn der Kon- struktionsphase mit den Schülern eine Materialsammlung zu erstellen. Bereits

im Technikraum vorhandene Materialien werden mit neuen von den Schülern entdeckten Materialien ergänzt.

Achtung! Hierbei besteht die Gefahr, dass sich alle Schüler auf die am besten geeignet scheinenden Materialien stürzen. Der Blick für fantasievolle oder durch Experimente gefundene bessere Möglichkeiten bleibt dann verschlossen.

Variante: Es bietet sich an, gezielt ein neues Material oder eine neue Materialverarbeitung einzuführen, beispielsweise das Laminieren von dünnen Balsaholz- oder Hartschaumplatten mit Epoxidharz und Glasfasergeflecht. In diesem Fall muss man dann in Kauf nehmen, dass ein Teil der Konstruktion bei allen Schülergruppen gleich ausfällt.

Im Folgenden werden, an den Baugruppen orientiert, einige Aspekte vorgestellt, auf die die Schüler während der Arbeiten stoßen können. Das bedeutet jedoch nicht, dass die Experimente und Konstruktionsmerkmale zwingend für ein Gelingen des Projektes sind.

2.2 Solarzellen

Im Mittelpunkt der Arbeit mit den Solarzellen steht für die Schüler die Frage nach der Effektivität bei der Stromerzeugung. Die Schüler untersuchen in verschiedenen Versuchsreihen, inwieweit sich der Winkel der Solarzellen zur Sonneneinstrahlung auf die Höhe der erzeugten Spannung auswirkt. Diese Arbeit setzt den sachgerechten Umgang mit Voltmeter und Amperemeter voraus. Das Ergebnis zeigt, dass sich im Wesentlichen nur eine Beschattung der Solarzellen, nicht aber eine kleine Veränderung des Einstrahlungswinkels negativ auf die Effektivität der Solarzellen auswirkt (das ist bei großen Solar-

modulen anders, siehe Grundlagen). Dies erlaubt Schlussfolgerungen bezüglich des Anbringens der Solarpaneele: der vermehrte Arbeitsaufwand und die Erhöhung des Gesamtgewichts, wenn man die Paneele beweglich gestalten will, muss zu einer geringen Wirkung in Relation gesetzt werden.

TIPP: Bei schlechtem Wetter: zum Durchführen der beschriebenen Versuche reicht die Raumbelichtung als Lichtquelle nicht aus. Der Tageslichtprojektor hingegen erweist sich als ausreichend. Vorher ausprobieren!

Weiteren Anlass zur Durchführung von Versuchsreihen gibt die Frage nach der Verschaltung der drei Solarpaneele (Grundlagen). Aus dem Physikunterricht kennen die Schüler die Reihen- und Parallelschaltung und müssen nun Wege finden zu klären, wie die Solarpaneele am effektivsten verschaltet werden. Vorstellbar ist zum einen eine akustische Kontrolle, bei der der Motor an die parallel oder in Reihe geschalteten Solarzellen angeschlossen wird. Durch die Tonhöhe des Laufgeräuschs oder optisch durch einen Propeller wird die höhere Drehzahl festgestellt. Präziser wäre eine Versuchsanordnung, bei der der Motor beispielsweise eine Schnur aufwickelt, an der ein bestimmtes Gewicht hängt (Abb. 7). Die Schüler messen sowohl die Zeit, die der Motor zum Aufwickeln der Schnur benötigt, wie auch die maximale Zugkraft. Eine Leistungsmessung ist auf diese Weise eher möglich. Die Versuchsreihen bieten dem Lehrer die Möglichkeit, bei aller Offenheit des Unterrichtsverlaufs helfend einzugreifen und mit den Schülern das „wissenschaftlich korrekte“ Vorgehen solcher Experimente zu erarbeiten. Den Schülern ist schnell klar, dass man immer nur einen Parameter der Versuchsanordnung verändern darf, will

man aussagekräftige Ergebnisse erzielen. Schon das Wechseln der Motoren würde das Ergebnis verfälschen, da die Motoren herstellungsbedingte Leistungsschwankungen aufweisen. Diese Unterschiede könnte man z. B. untersuchen um festzustellen, ob die Ausgangsvoraussetzungen der Gruppen wirklich nahezu identisch sind.

Hinweis: Die Motoren und Solarzellen sollten vor der Ausgabe an die Schüler vom Lehrer geprüft und zusammen getestet werden. In der Regel wird die Reihenschaltung der Solarpaneele die bessere Lösung sein, weil die Motoren (je nach Bauart) meist eine höhere Spannung benötigen, als die Solarzellen in Parallelschaltung liefern.

Die Milligramm-Waage aus der Chemie wird bei den Schülern einen regelrechten Enthusiasmus bei der Gewichtersparnis auslösen. Um jedes Gramm wird gerungen, da man ja die Zwischenergebnisse der anderen Gruppen mitbekommt. Auffällig ist das hohe Gewicht der Solarpaneele, das durch Abschleifen der Rückseite stark verringert werden kann.

Vorsicht! Die Schüler unternehmen abenteuerliche Versuche, um die Rückseite der Solarpaneele auf äußerst gefährliche Weise an der Bandschleifmaschine abzuschleifen. Nur absolut sichere Vorrichtungen zum Abschleifen werden zugelassen! Mit der CNC-Fräsmaschine könnte man diese Aufgabe auch gefahrlos bewältigen!

Der von der Ausschreibung verlangte Schalter wird nach dem Gesichtspunkt des Gewichts in den diversen Fachkatalogen ausgesucht und in die Schaltung eingebaut.

Da alle Schülergruppen sich mit den Solarzellen näher befassen müssen, liegt es nahe, einen Exkurs über die Herstellung, Funktionsweise und Verwendung von Solarzellen durchzuführen. Die Rolle der Sonnenenergie (Solarzellen, Sonnenkollektoren) in unserer Gesellschaft findet ebenso darin Platz, wie die technisch-physikalischen Aspekte des Themas (s. Grundlagen).

2.3 Chassis

Der Bau des Chassis wird wesentlich von den Kriterien Gewicht und Stabilität bestimmt. Die Schüler befinden sich in einem permanenten Optimierungsprozess, in dem sie Gefahr laufen, den einen Faktor zu verbessern und dabei den anderen zu verschlechtern. So kann beispielsweise zu wenig Gewicht den „Grip“ beeinflussen! Zur Verfügung stehendes oder selbst entdecktes Material und Einfallsreichtum lassen eine Vielfalt an Konstruktionen und Designs entstehen (Abb. 8, 9, 10). Kohlefaserstangen, laminiertes Balsa Holz, Aluschienen oder einfach gebogener Schweißdraht können Grundlage der Konstruktionen sein. Die Solarpaneele als Chassis selbst zu verarbeiten führt zu dem Problem, die Solarpaneele stabil zu verbinden und die Räder irgendwie anbringen zu müssen. Prinzipiell muss die Entscheidung getroffen werden, ob man ein dreirädriges oder ein vierrädriges Modell bauen möchte. Der Zusammenbau des Chassis bedarf unter Umständen einer Montagevorrichtung, die das Verziehen des Materials verhindert und damit durch gleichmäßiges Aufsetzen der Räder den Geradeauslauf gewährleistet.

2.4 Räder und Achsen/Wellen

Zunächst müssen die Schüler festlegen, ob sie die nicht angetriebenen Räder, die nicht auf der Antriebswelle sitzen, auf einer Achse oder Welle lagern wollen.

TIPP: In jedem Fall empfiehlt es sich, den Schülern den Hinweis zu geben, mit Kugellagern zu arbeiten. Es kann vorkommen, dass neue Kugellager noch schwergängig sind. In diesem Fall müssen sie „eingefahren“ werden, was ohne große Umbaumaßnahmen am Leistungsmessstand (Abb. 7) geschehen kann. Es ist auch möglich, statt der Kugellager **Gleitlager** aus Teflon zu verwenden. Dazu besorgt man sich einen Teflonstab mit einem geeigneten Durchmesser (Kunststoff-Fachhandel), von dem man die Lager in der benötigten Länge einfach absägen und aufbohren kann. **Achtung:** Teflonstäbe sind teuer! Die benötigte Länge vor dem Einkauf abschätzen.

Das Befestigen der Lager im Rad oder in der Halterung der Welle wird zu einer Aufgabe, die die Schüler vor große Probleme stellen kann. Schlechtes Justieren führt zu unrundem Laufverhalten und wenig Spurtreue. Wellen, die in einem Kugellager gelagert werden, müssen gegen seitliches Verrutschen gesichert werden. Diese Problemstellung ergibt sich ebenso bei der Lagerung der Antriebswelle (Abb. 11). In dieser Phase tendieren die Schüler gern zu großen Mengen Klebstoff und Heißkleber. Eine kurze Unterbrechung der Gruppenarbeiten könnte „technischere“ Lösungen und deren Vorteile für das Fixieren von Achsen und Rädern zum Gegenstand haben (Abb. 12).

Die Herstellung der Räder wird sich an den Kriterien Gewicht, runder Lauf, Durchmesser und Haftung orientieren. Den Schülern wird schnell klar, dass ein kleiner Durchmesser der Antriebsräder zwar eine hohe Anfangsbeschleunigung bewirkt, die Endgeschwindigkeit jedoch relativ gering bleibt. Umgekehrt bringt es nichts, wenn Räder mit über-

großem Durchmesser zwar eine hohe Endgeschwindigkeit versprechen, aber die Beschleunigung viel zu gering ist. Versuchsreihen mit verschiedenen Raddurchmessern wären sinnvoll. Meist fällt es den Schülern jedoch schwer, ein variables Achsen- und Radkonzept zu entwerfen, so dass Testfahrten mit verschiedenen Radgrößen durchgeführt werden können (Abb. 12).

Als Material für die Räder eignet sich zunächst alles, was rund ist oder rund gemacht werden kann. Der Fantasie der Schüler ist bei dieser Baugruppe keine Grenze gesetzt. Materialien, die sich mit der CNC-Fräse bearbeiten lassen, haben den Vorteil, dass sie exakt zentrisch gefräst werden können und Passungen für Kugel- oder Teflonlager kein Problem sind. Außerdem ist es möglich, gewichtersparende Ausfräsungen in den Rädern vorzunehmen.

TIPP: Als Radprofile eignen sich Dichtringe aus dem Sanitärbereich, die auf die Räder aufgeklebt werden oder einfach durch ihre Spannung auf dem Rad halten. Die Haftung der Räder kann somit wesentlich erhöht werden.

Montagevorrichtungen für den Zusammenbau von Rädern, Achsen und Chassis sind von großer Bedeutung. Nur so können die Achsen parallel zueinander mit dem Chassis verbunden werden. Ebenso muss darauf geachtet werden, dass die Räder rechtwinklig zu den Achsen/Wellen montiert sind.

2.5 Motorenbefestigung

Die Art und Lage der Motorenbefestigung wird im Wesentlichen durch die Chassiskonstruktion bestimmt. Oftmals operieren die Schüler mit sehr viel Klebstoff und lassen dabei außer Acht, dass der Motor nun nicht mehr so leicht abgebaut werden kann, will man



Abb. 6: Auswahl an Materialien für die Räder



Abb. 7: Versuchsanordnung zum Leistungstest der Solarzellen

Reparaturen oder Modifikationen vornehmen. Sie stellen aber während den ersten Erprobungen sehr bald fest, dass die Reibungsverluste zwischen Motor und Zahnrad bei nicht optimalem Zusammenbau enorm hoch sind. In diesem Fall sind Korrekturen dringend angebracht, die bei eingeklebtem Motor aufwendig sind oder kaum noch vorgenommen werden können. (Abb. 13) Denkbar ist, statt der Zahnräder auch einen Riemenantrieb zu realisieren.

Achtung! Bei der Auswahl von Motor und Zahnrad unbedingt darauf achten, dass die Durchmesser der Bauteile zueinander passen. Ein zu großer Motordurchmesser kann zu Berührung von Motor und Antriebsachse führen (Abb. 13).

In Verbindung mit dem Fach Physik (Elektromagnetismus) können Funktion und bauartbedingte Unterschiede von Elektromotoren mit den Schülern erarbeitet werden.

3. Erprobung und Optimierung

Erste Testfahrten absolvieren die Gruppen „im Verborgenen“, sie werden vom Lehrer dazu angehalten, ein Testprotokoll zu erstellen. Dieses Testprotokoll hilft zum einen beim Optimierungsprozess als neue Aufgabenliste und ergänzt zum anderen die Gesamtdokumentation der Gruppe.

Erfahrungsgemäß sind die Schüler zu diesem Zeitpunkt ganz auf das Rennen fixiert und würden gerne die Optimierung als nicht so dringlich einstufen. Der Lehrer muss möglicherweise motivierend durch Verweis auf bessere Siegeschancen unterstützen. Die Gruppen, die eine flexible Konstruktion bezüglich Verbindungen und schneller Austauschbarkeit der Teile zur Grundlage haben, können den Optimierungsprozess zügig und effizient durchführen (Abb. 12). Ein Sachverhalt, der in der Reflexion aufgearbeitet werden muss.

Vergleichsrennen und Spionage in dieser Phase nehmen dem Wettbewerb den Reiz und sollten verhindert werden.

4. Das Rennen

Die Vorbereitung auf das Rennen – eventuell an einem anderen Ort als die Schule – ist meist von Vorfreude aber auch großer Nervosität geprägt. Hier werden bei einfachen Handgriffen oder beim Transport Teile verbogen oder gar abgebrochen. Deshalb empfiehlt sich ein ganzes Reparaturset aus Ersatzteilen, Lötkolben, Werkzeug und vor allem geeigneten Klebstoffen!

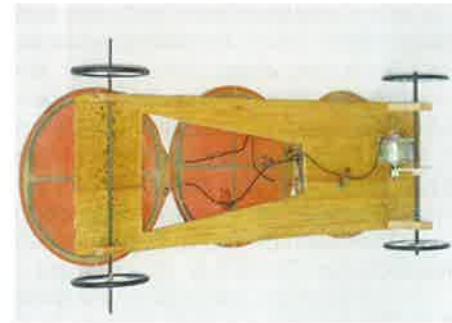


Abb. 8: Chassisform



Abb. 9: Chassisform

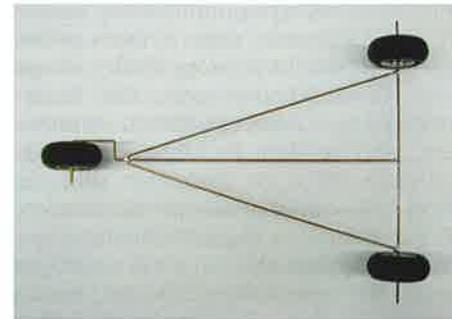


Abb. 10: Chassisform

Die Rennstrecke sollte möglichst eben und glatt sein. Einfachste schulinterne Variante ist der gut gefegte Pausenhof. Als professionelle Möglichkeit eignet sich sehr glattes Plattenmaterial, das zur besseren Handhabung der Fahrzeuge, aber auch zur besseren Beobachtung durch Zuschauer, mindestens auf 80–100 cm Höhe aufgebockt sein sollte (Abb. 4, 5, Teil 1). Ein denkbarer



Abb. 11: Lagerung Antriebswelle, Befestigung Räder

Aufbau: 5 Siebdruckplatten (3 x 2 Meter) waagrecht aufgebockt und auf drei Seiten mit Holzleisten als Umrandung versehen; die Zielseite sollte offen sein, damit die beschleunigten Fahrzeuge nicht auf einen harten Rand aufahren. Allerdings müssen die Renner dann von einem Teammitglied geschickt aufgenommen werden, wenn sie diese „Rampe“ durchfahren haben – ebenfalls eine Situation, die eventuell Reparaturen erforderlich macht. Jeweils ca. 50 cm von den Längsseiten der Rampe entfernt sind Start- und Ziellinie aufgebracht. Für einen zeitgleichen Start, ohne Möglichkeit der Einflussnahme für Teammitglieder, kann eine Startvorrichtung sorgen, an der die Renner mit „eingeschaltetem Motor“ anstehen, und die durch Wegklappen den Geradeauslauf ermöglicht. (Dies ist ebenfalls ein reizvolles Projekt für den Technikunterricht, zum Beispiel mit einer sehr schnellen Gruppe. Titelbild, Teil 1). Wie erwähnt, gewinnt der Wettbewerb mit der Teilnehmerzahl in der Regel auch an Qualität und Wirkung. Damit jedem Team eine gewisse Anzahl von Läufen möglich ist, sollte ein Gruppenturnier durchgeführt werden, in dem man zunächst gegen alle Renner der Gruppe antritt. Dann können zum Beispiel die zwei besten jeder Gruppe gegen die anderen Gruppenbesten im K.O.-System antreten, um so ins Finale vorzustoßen.

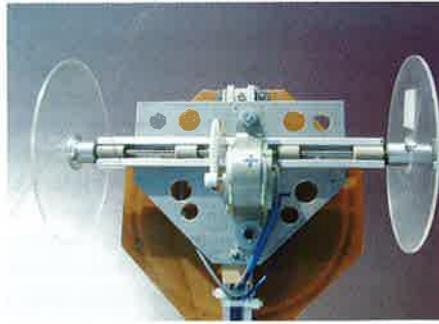


Abb. 12: Motorbefestigung, Lagerung Antriebswelle

5. Auswertung und Dokumentation

Eine enorm wichtige Bedeutung für das gesamte Unterrichtsprojekt kommt der Phase der Nachbetrachtung und analytischen Auswertung zu. Mit einigem zeitlichen Abstand zum Renntag sind Sieges euphorie oder die Frustrationen einer Niederlage soweit abgeklungen, dass man sich den so vielfältigen technischen Sachverhalten wieder nüchtern nähern kann.

Zunächst ist natürlich die Rangfolge der gestarteten Fahrzeuge aussagekräftig. Darüber hinaus ist es aber von großem Wert, Bilddokumente von möglichst vielen Lösungen auch anderer Gruppen zur Verfügung zu haben (Ideal: eine Digitalkamera und ein frecher Fotograf!). Damit kann eine detaillierte Nachbetrachtung und Analyse nach den vorher erarbeiteten Gütekriterien erfolgen. Jeder Schüler sollte diese Arbeit auf einem Bewertungsbogen, bezogen auf eine Reihe ausgewählter Objekte, im Vergleich zum eigenen Renner, durchführen. Hier kann ein aus eigener Wettbewerbs erfahrung und der Beobachtung der anderen heraus geschärfter Blick auf die Details bewiesen werden. Das Unterrichtsgespräch auf der Grundlage einer solchen Bewertung ist dann ein Gespräch unter Experten. Die Schlüsselstellen der eigenen Entwicklungsarbeit,

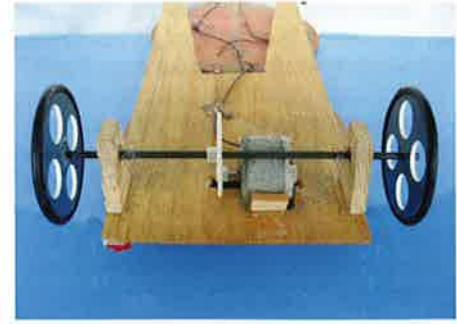


Abb. 13: Ungünstige Befestigung des Motors

die Detailentscheidungen, die Wahl der Materialien und Verfahren lassen sich jetzt klar heraus arbeiten. Der Bewertungsbogen sollte also auch Raum für Optimierungsvorschläge lassen.

Vor dem Hintergrund der damit erworbenen Erfahrungen kann dann auch die Leistung der eigenen Gruppe bewertet werden und in eine Benotung einfließen.

Abschließend sollen die einzelnen Gruppen ihr gesamtes Projekt dokumentieren, von der anfänglichen Entwicklungsarbeit, den Skizzen und Entwürfen, über die durchgeführten Experimente (Protokolle) bis zum fertigen Ergebnis. Dieses dann ergänzt um die Beschreibung der Rennerfahrten bis hin zum Bewertungsbogen als technischer Nachbetrachtung.

Für Gruppen, die in einem folgenden Jahr an einem gleichen Vorhaben teilnehmen, wären solche „Dossiers“ natürlich von unschätzbarem Wert. Deshalb sind sie aber sehr dosiert oder gar nicht einzusetzen, um der Neugier und dem vollständigen Durchdringen wie auch „Durchleben“ dieses reizvollen Themas nichts an Kraft zu nehmen.

Autoren:
Wolfgang Degelmann, Freiburg;
Meinrad Lauber, Freiburg

Nutzung der Solarenergie – Solarzellen und Solarmodule

Teil 1

1. Die Sonne als Energiequelle

Die Sonne ist die Grundlage aller Lebensprozesse auf der Erde. In ihrem Inneren herrschen Temperaturen bis zu 15 Mio. K, bei denen in jeder Sekunde einige 100 Mio. Wasserstoffatome in Helium umgewandelt werden. Die dabei frei werdende gewaltige Energie wird bei einer Oberflächentemperatur von etwa 5800 K als Licht- und Wärmestrahlung in den Weltraum abgegeben. Da bei diesem Prozess Masse in Energie umgesetzt wird, wird die Sonne in jeder Sekunde um 4 Mio. Tonnen leichter. Von dieser Energie kommen bei der Erde (außerhalb der Atmosphäre) noch $1,37 \text{ kW/m}^2$ an Strahlungsleistung an, die sogenannte Solarkonstante. Sie gibt die Strahlungsleistung an, die senkrecht auf eine Fläche von 1 m^2 trifft.

Durch Reflexion an den oberen Schichten der Atmosphäre, der Wolkendecke und dem Erdboden, durch Streuung und Absorption in der Erdatmosphäre erreicht nur ein gewisser Teil der Sonnenstrahlung die Erdoberfläche. Wie Abb. 1 (sep. Kopiervorlage) zeigt, werden ca. 31 % der ankommenden Strah-

lung bereits an der Atmosphäre und etwa 4,3 % von der Erdoberfläche reflektiert (Albedo-Strahlung) und wieder in den Weltraum zurückgeworfen. Auch beim Durchgang durch die Atmosphäre entstehen Verluste durch Streuung und Reflektion an Wolken, Aerosolen und Molekülen in der Atmosphäre. 17,4 % der Strahlungsenergie erwärmen die Lufthülle, 32,7 % die Wassermassen der Ozeane und etwa 14,3 % die Landflächen der Erde.

Lediglich 0,2 % dieser Energie wird in Wind, Wellen und Meeresströmung umgesetzt – was jedoch immer noch eine unvorstellbar große Energiemenge ist – und 0,1 % nutzen die Pflanzen der Erde zur Photosynthese. Betrachtet man den von den Menschen technisch realisierten Energieumsatz, so sind dies etwa nur 0,0006 %! Sieht man von der Atomenergie, der Geothermik und der Gezeitenenergie ab, so sind alle anderen Energieformen von der Primärener-



giequelle Sonne abgeleitete Energien: Wasserkraft, Windkraft, Wellenbewegung, Meeresströmung, Wärme der Erdoberfläche und der Atmosphäre, Solarstrahlung und Biomasse (Kohle, Öl, Gas, Holz).

In einem Jahr trifft etwa das 20 000-fache der Energiemenge auf die Erdoberfläche, die von den Menschen in diesem Zeitraum benötigt wird, das sind pro Tag etwa 50-mal mehr Energie, als die Menschheit in einem ganzen Jahr verbraucht. Die Tatsache, dass die Energie der Sonne wohl noch für die nächsten 4 Milliarden Jahre zur Verfügung stehen wird, die fossilen und die nuklearen Energievorräte aber in naher Zukunft aufgebraucht sein werden (ohne Fusion), legen eine verstärkte Nutzung der Solarenergie in ihren verschiedenen Formen nahe.

2. Bedingungen auf der Erde zur Solarenergienutzung

Für die direkte Nutzung der Solarenergie sind 4 verschiedene Faktoren ausschlaggebend:

- die Strahlungsleistung der Sonne auf der Erdoberfläche (Energiedichte)
- die Anzahl der Sonnenscheinstunden pro Tag, Monat und Jahr
- die Globalstrahlung und
- die Luftmasse, die vom Sonnenlicht durchlaufen werden muss.

Die Strahlungsleistung auf der Erdoberfläche

Die Strahlungsleistung der Sonne am oberen Rand der Erdatmosphäre wird durch die sog. Solarkonstante angegeben. Ihr Wert liegt bei $1,37 \text{ kW/m}^2$. Auf der Erde kann dieser Wert nicht vollständig genutzt werden, ihr maximaler Wert bei klarem Himmel liegt etwa zwischen $0,8$ und 1 kW/m^2 . Durch Wolken oder Nebel kann dieser Anteil bis auf Null absinken.

Die Sonnenscheinstunden

Eine Sonnenscheinstunde ist definiert als eine Stunde direkter Strahlung von mindestens 200 W/m^2 . In Deutschland beträgt die Sonnenscheindauer etwa 1400 bis 2000 Stunden pro Jahr. Die Zahlen schwanken – ähnlich wie die Zahlen der Globalstrahlung – je nach Ort erheblich. Dieses Maß ist allerdings nur eingeschränkt aussagekräftig, besser ist die Berücksichtigung der Globalstrahlung.

Die Globalstrahlung

Wie bereits dargestellt, gehen von der ankommenden Energie der Sonne beim Durchgang durch die Erdatmosphäre etwa 53 % verloren. Die restlichen 47 % bestehen aus direkter Sonnenstrahlung (das ist diejenige Strahlung, die Schatten wirft) und aus sogenannter diffuser Strahlung, die durch Streuung des Sonnenlichts an Molekülen und Aerosolen in der Atmosphäre entsteht (Abb. 2, sep. Kopiervorlage). Die Summe von direkter und diffuser Strahlung nennt man **Globalstrahlung**. Sie gibt an, wieviel Sonnenenergie auf der Erdoberfläche zur Verfügung steht.

Die Globalstrahlung schwankt im Laufe der Tages- und Jahreszeiten und ist abhängig von Breitengrad und Witterung. In Deutschland liegt die jährliche Globalstrahlung zwischen 900 und 1.100 kWh/m^2 bei einem Anteil der direkten Strahlung von etwa 50%. Die Abb. 3 (sep. Kopiervorlage) zeigt den typischen Verlauf der mittleren täglichen Globalstrahlung über den Zeitraum eines Jahres. Aus diesem Bild wird eine Schwäche der Solarstrahlung deutlich: in den Monaten, in denen am meisten Energie benötigt wird, wird am wenigsten eingestrahlt. Bei der Solarenergienutzung spielt also die Speicherung der Energie eine besondere Rolle. Die regionalen Unterschiede im Sonnen-

energieangebot sind beträchtlich, so ist die Sonneneinstrahlung im nördlichen Afrika etwa doppelt so hoch wie in Deutschland. Da auch innerhalb Deutschlands die Unterschiede sehr groß sind ist es sinnvoll, sich über diese Verteilung einen Überblick zu verschaffen. Die Abb. 4 zeigt die aktuellen Daten (Juni 2002) für Deutschland; die Verteilung für die verschiedenen Monate kann man sich vom Solarserver ([www.solarserver.de/ service/strahlungsdaten.html](http://www.solarserver.de/service/strahlungsdaten.html)) herunterladen.

Die Luftmasse AM

Strahlung, die senkrecht auf die Erdatmosphäre trifft, durchläuft sie auf dem kürzesten Weg zur Erdoberfläche. Dafür hat man den Begriff AM 1 eingeführt (AM bedeutet Luftmasse, engl. air mass). Mit diesem Begriff wird die Abschwächung der Strahlungsleistung beschrieben, wenn die Strahlung in einem anderen Winkel auf die Atmosphäre trifft und so eine längere Strecke bis zum Erdboden zu überwinden hat (Abb. 5, sep. Kopiervorlage).

Als Anfangswert gilt die spektrale Strahlungsleistung außerhalb der Atmosphäre, die mit AM 0 bezeichnet wird. Bei AM 1 nimmt das Sonnenlicht den direkten, kürzesten Weg, bei AM x wird der x-fache Weg von AM 1 zurückgelegt. Der wichtigste Standardwert ist AM 1,5, der einer globalen Strahlungsleistung von 1 kW/m^2 entspricht. In der Abb. 5 sind die Werte für die Sonnenstände der Sonnenwende (21.6. und 21.12.) und der Tag- und Nachtgleiche (21.3. und 23.9.) für Berlin ($52,5^\circ$ nördlicher Breite) und Freiburg (48° nördlicher Breite) dargestellt. (Siehe dazu auch: AuP, 1: Planen und Herstellen einfacher Sonnenuhren, TECHNIK-STUNDE Nr. 101).

3. Nutzungsmöglichkeiten der Solarenergie

Es gibt grundsätzlich vielfältige Formen, Solarenergie zu nutzen:

- als Wärme (Heizen von Räumen, Erhitzen von Wasser)
- zum Kühlen
- als elektrische Energie
- als mechanische Energie (Stirling-Motor, Solarmobile)
- für die Solarchemie
- zur direkten Tageslichtnutzung.

In diesem Beitrag soll nur die direkte Gewinnung von elektrischer Energie in Solarzellen und einige Formen ihrer Anwendung behandelt werden.

4. Der photoelektrische Effekt

Mit diesem Begriff wird ein Naturphänomen beschrieben, das darin besteht, dass bei der Bestrahlung von Materialien mit Licht unmittelbar freie Ladungsträger entstehen. Die Entdeckung dieses Phänomens gelang 1839 dem französischen Physiker A. E. Becquerel, dem Vater von Henry Becquerel, der die natürliche Radioaktivität entdeckte. Er registrierte eine elektrische Spannung zwischen zwei Elektroden, die in einen Elektrolyten eintauchen, von denen die eine mit Licht oder UV-Licht bestrahlt wird.

Heute unterscheidet man den atomaren, den äußeren, den inneren und den Sperrschichtphotoeffekt.

Der **atomare Photoeffekt** (Photoionisation) tritt bei Gasentladungen und in Zählrohren auf, wenn durch einfallende Strahlung Elektronen von der äußeren Hülle eines Atoms abgelöst werden. Dadurch wird aus einem neutralen Atom ein positiv geladenes, ionisiertes Atom.

Beim **äußeren photoelektrischen Effekt** (Photoemission) werden Elektronen durch Bestrahlung (mit Licht, Röntgen- oder Gammastrahlen) aus einem Festkörper durch seine Oberfläche hindurch herausgelöst und an die Umgebung abgegeben. Dieser Effekt wird bei sog. Photozellen genutzt, die man zur Messung von Lichtintensitäten verwendet. Da die aus dem bestrahlten Stoff austretenden Elektronen technisch nicht zur Stromerzeugung genutzt werden können, spielen die Photozellen in der Solartechnik keine Rolle.

Beim **inneren photoelektrischen Effekt** oder **Halbleiterphotoeffekt** dagegen verbleiben die durch die Bestrahlung frei werdenden Ladungsträger im Material (meist Silizium) und stehen dort zum Stromtransport zur Verfügung (Abb. 6). Dies bedeutet aber, dass durch den inneren photoelektrischen Effekt lediglich die Leitfähigkeit und damit der Widerstand des Materials verändert wird, was man bei **Fotowiderständen** ausnutzt (Zum Aufbau von Halbleitermaterialien und deren Leitungsmechanismus siehe auch: Grundlagen LuK: Bauelemente der Elektronik und ihre Grundschaltungen, Teil 1, TECHNIKSTUNDE Nr. 109)

Doch damit hat man noch keine Solarzelle (Solar-Spannungsquelle), die dadurch gekennzeichnet ist, dass durch Lichteinstrahlung direkt elektrische Energie gewonnen werden kann, also eine elektrische Spannung entsteht, die in einem äußeren Stromkreis einen Strom treiben kann.

Da elektrische Spannung eine Ungleichverteilung von Ladungsträgern ist, muss man die durch Beleuchtung entstehenden Ladungsträger (Elektro-

nen und Löcher) innerhalb des Materials örtlich trennen, so dass ein Bereich mit Elektronenüberschuss (-) und ein Bereich mit Löcherüberschuss (+) entsteht. Um dies zu erreichen, muss man auf die entstehenden Ladungsträger eine Kraft ausüben, die sie in verschiedene Bereiche des Materials „befördert“. Eine Kraftwirkung auf Ladungen entsteht aber durch ein elektrisches Feld, also durch Ladungen (Abb. 7). Bringt man eine Ladung in dieses Feld, so wirken Anziehungs- bzw. Abstoßungskräfte auf sie ein und beschleunigen sie in Richtung der gegenpoligen Ladung.

Um die Ladungen zu trennen ist es also notwendig, in das Material ein solches Feld einzubauen. In der Abb. 8 habe ich dieses Wirkungsprinzip dargestellt. Bringt man dann an den Bereichen der Ladungsträgerüberschüsse Metallelektroden an, kann man die entstehende Spannung nach außen abgreifen und nutzbar machen.

Dieses innere elektrische Feld wird in der Praxis wie bei Dioden und Transistoren erzeugt: durch gezieltes Verunreinigen mit Fremdatomen, das sogenannte **„Dotieren“** kann künstlich ein Überschuss an negativen oder positiven Ladungsträgern im Kristall erzeugt werden. Man spricht dabei von n-Leitung bzw. von p-Leitung. Grenzt in einem Halbleiterkristall eine n-dotierte direkt an eine p-dotierte Schicht (pn-Übergang), so bildet sich an dieser Grenze das innere elektrische Feld aus (Sperrschicht), das die Ursache für die Ladungstrennung ist (Abb. 9). Solarzellen bestehen also aus zwei unterschiedlich dotierten Halbleiterschichten (sind also eine Art Dioden). Aus diesem Grund nennt man diesen Effekt auch den **Sperrschichtphotoeffekt**.

5. Arten von Solarzellen

Von allen in Frage kommenden Materialien ist Silizium zur Zeit am geeignetsten. Aus diesem Material werden unterschiedliche Arten von Zellen hergestellt:

Monokristalline Solarzellen sind sehr teuer, da sie aus Silizium-Einkristallen gefertigt werden, die in einem aufwendigen Verfahren hergestellt werden müssen. Sie haben den zur Zeit höchsten Wirkungsgrad von ca. 13 bis 14,5 %.

Polykristalline Solarzellen haben einen etwas niedrigeren Wirkungsgrad, da sie direkt aus der Schmelze in quadratische Blöcke gegossen werden, wobei beim Erstarren die homogene Kristallstruktur verloren geht und sich Bereiche unterschiedlicher Ausrichtung bilden. An diesen Korngrenzen entstehen natürlicherweise Verluste, die Herstellung dieses Materials ist aber nicht so teuer. Der Wirkungsgrad solcher Zellen liegt bei ca. 11 bis 12 %.

Amorphe (gestaltlose) Si-Solarzellen bestehen aus Silizium, dessen Atome willkürlich angeordnet sind, das also keine Gitterstruktur aufweist. Sie werden hergestellt, indem man das Silizium auf ein Trägermaterial aufdampft und es dann dotiert. Wegen der geringen Schichtdicke werden sie auch als Dünnschicht-Solarzellen bezeichnet. Sie haben eine Reihe von Vorteilen, z. B. hohe Lichtabsorption, hohe Leerlaufspannung, geringer Materialaufwand, geringer Aufwand bei der Herstellung, weisen aber einen Wirkungsgrad von nur ca. 5 bis 6 % auf. Der größte Nachteil besteht jedoch in ihrer Instabilität bei starker Sonneneinstrahlung. Dadurch sinkt die Energieausbeute um etwa 10 bis 30 % in der Anfangsphase des Betriebs, um sich dann zu stabilisieren. Aus diesem Grund wer-

den amorphe Zellen vor allem für elektronische Geräte verwendet, die bei Innenraumbelichtung betrieben werden (Uhren, Taschenrechner usw.).

Dünnschicht-Solarzellen: Aus Stabilitätsgründen weisen herkömmliche Solarzellen eine Dicke von 0,2 bis 0,3 mm auf, bei Dünnschicht-Solarzellen beträgt diese Dicke lediglich einige Mikrometer (μm). Dafür werden unterschiedliche Materialien verwendet: neben Silizium (s. o.) vor allem Cadmiumtellurid (CdTe) oder Kupfer-Indium-Diselenid (CuInSe_2). Ihre Vorteile liegen in dem geringen Rohstoffverbrauch und in der einfachen Herstellung. Es werden auch gute Wirkungsgrade erzielt. Gallium-Arsenid (GaAs)-Zellen haben hohe Wirkungsgrade und sind relativ temperaturunabhängig. Gallium kommt sehr selten vor und Arsen ist hochgiftig, weshalb sie vor allem für Spezialanwendungen, wie den Einsatz im Weltall, hergestellt werden. Gerade in Deutschland sind bei den Dünnschicht-Solarzellen intensive Forschungsarbeiten im Gang, die vor allem die Eignung verschiedener Materialien zum Ziel hat.

MIS-Inversionsschicht-Zellen: Ihr Prinzip wurde 1985 an der Uni Erlangen entwickelt: das innere elektrische Feld wird nicht durch einen pn-Übergang erzeugt, sondern durch den Übergang einer dünnen Si-Oxidschicht zu p-dotiertem Silizium. Über die Oxidschicht wird ein Kontaktgitter aus Aluminium gelegt. Der Effekt, auf dem diese Zelle beruht ist nun der, dass diese Schichtung zwar für Elektronen durchlässig ist, für die im p-dotierten Material entstehenden Löcher aber nicht, so dass sich eine Trennung der Ladungsträger ergibt. Der Vorteil dieser Zelle liegt darin, dass sie weniger Herstellungsschritte benötigt und sich doppelseitig nutzen lässt. Bei Verwendung von monokristallinem Si erreicht der Wirkungsgrad 15 %, bei polykristallinem Si 12 %.

Neue Entwicklungen:

Kristalline Silizium-Dünnschichtzellen (gegenwärtige Entwicklung des Freiburger Instituts für solare Energiesysteme): Es handelt sich dabei um ein neues Verfahren, bei dem auf einem kostengünstigen Trägermaterial eine hauchdünne Schicht aus hochreinem kristallinem Silizium aufgebracht wird. Die KSD-Solarzelle, wie sie auch genannt wird, vereint damit die Vorteile des **kristallinen** Siliziums mit denen der Dünnschichtzelle. Sie hat zur Zeit einen Wirkungsgrad von 13 % und wird weiter optimiert und zur Marktreife entwickelt.

Neben den Silizium- bzw. Halbleiter-Solarzellen werden auch noch **organische oder Farbstoff-Solarzellen** entwickelt, die ähnlich der Photosynthese der Pflanzen arbeiten, indem sie mittels eines Farbstoffes Licht in elektrisch angeregte Ladungsträger umwandeln. Der erreichte Wirkungsgrad beträgt gegenwärtig nur etwa 3 % und die Langzeitstabilität ist noch nicht befriedigend. Dafür sind die Ausgangsmaterialien sehr preisgünstig und die Herstellungsschritte sehr einfach, was die Zellen billig macht. Durch den Einsatz der Nanotechnologie ist es den Forschern des Freiburger Instituts für solare Energiesysteme inzwischen gelungen, den Wirkungsgrad auf 8 % zu erhöhen, für die Zukunft sind 13 % angepeilt. Die Vorteile der organischen Solarzellen liegen neben der kostengünstigen Herstellung vor allem in ihrer mechanischen Flexibilität, was erlaubt, sie auch auf gewölbten Flächen anzubringen und in Gebäudefassaden zu integrieren.

Tandem-Zellen (Kaskadenzellen, III-V-Solarzellen) bestehen aus zwei oder mehr aufeinanderliegenden Solarzellen z. B. aus Si und GaAs, wodurch das Spektrum des einfallenden Lichtes

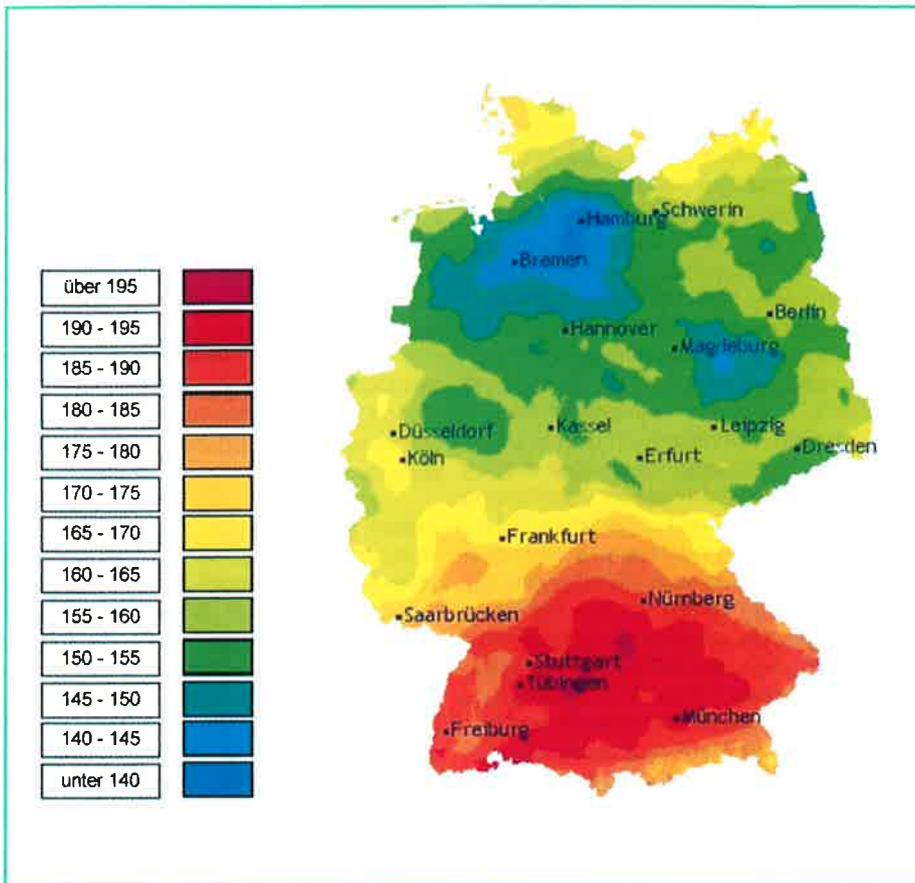


Abb. 4: Verteilung der Globalstrahlung in Deutschland, Juni 2002

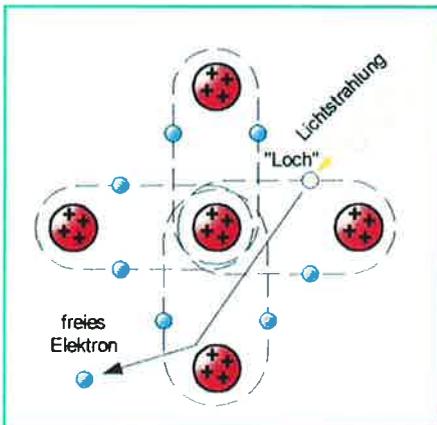


Abb. 6: Innerer photoelektrischer Effekt

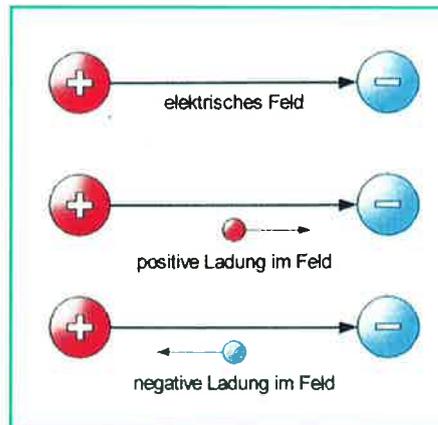


Abb. 7: Elektrisches Feld

besser genutzt werden kann und der Wirkungsgrad somit höher ist. Den bisher höchsten mit Photovoltaik erzielten Wirkungsgrad erreichte eine Tripelzelle des Freiburger Fraunhoferinstituts mit stolzen 33,5 % bei 308-facher Sonnenkonzentration.

Geforscht wird auch an der **Oberflächenstrukturierung** zur Verminderung von Reflexionsverlusten: zum Beispiel Antireflexschichten oder Aufbau der Zelloberfläche in Pyramidenstruktur, damit einfallendes Licht mehrfach auf die Oberfläche trifft.

6. Messungen an Solarzellen

Um exakte Messungen an Solarzellen durchführen zu können, muss ein Solarmeter zur Verfügung stehen, mit dem die Bestrahlungsstärke der Sonne gemessen werden kann. Nur so ist es möglich, die erzeugte Spannung bzw. den gewonnenen Strom in Relation zur Bestrahlungsstärke der Sonne zu setzen. Hier kann sicher das Fach Physik aushelfen, ansonsten kann man nur qualitative Untersuchungen durchführen. Da man dabei an den kleinen Flächen der Solarzellen misst, ist zu beachten, dass 1 kW/m² 100 mW/cm² entsprechen.

Kurzschlussstrom

Schließt man an eine Solarzelle direkt ein Strommessgerät (ohne Verbraucher) an, so kann der Kurzschlussstrom der Zelle bei verschiedenen Bestrahlungsstärkengemessen werden (Abb. 10, sep. Kopiervorlage). Die Messergebnisse zeigen eine lineare Abhängigkeit des Stroms von der Beleuchtungsstärke. Dies kann man sich auch ohne weiteres klar machen: je mehr Photonen in das Material eindringen und Bindungselektronen (und Löcher) frei-, „schießen“, desto größer wird die Stromstärke.

Dasselbe Ergebnis erhält man, wenn man bei konstanter Beleuchtung ein Viertel, die Hälfte oder drei Viertel der Zelle abdeckt: ein Viertel der abgedeckten Fläche reduziert den Kurzschlussstrom um ein Viertel, so dass sich der Strom um 1/4, die Hälfte bzw. 3/4 seines Anfangswertes verkleinert (Abb. 10). Es sollte darauf geachtet werden, dass die Abdeckungen sorgfältig angebracht werden, damit sie die entsprechenden Flächen der Zelle abdunkeln.

Leerlaufspannung

Unter Leerlaufspannung versteht man die Spannung einer Quelle, die man ohne Belastung (also ohne Stromfluss durch einen „Verbraucher“) messen kann. Wichtig ist, dass für diese Messung ein (Digital)Voltmeter mit einem hohen Innenwiderstand verwendet wird (Abb. 11, sep. Kopiervorlage). Die Messwerte zeigen, dass die in der Zelle entstehende Spannung nicht linear von der Beleuchtung abhängt, sondern schon bei sehr geringen Bestrahlungsstärken schnell auf etwa 0,5 V ansteigt und einen maximalen Wert von etwa 0,55 V erreicht (Abb. 12, sep. Kopiervorlage). Die Leerlaufspannung hängt von der Zellentemperatur ab, d. h. wenn die Zelle bei längerer Bestrahlung aufgeheizt wird, sinkt die Spannung ab.

Führt man auch dieses Experiment bei konstanter Beleuchtungsstärke und abgedunkelter Zellenfläche durch, so zeigt sich, dass sich die Spannung bei 25 %, 50 % und 75 % abgedunkelter Zellenfläche nicht im selben Maß reduziert: sie nimmt bei einer Abdeckung von 75 % nur um etwa 25 % ab.

U-I-Kennlinie

Das Verhalten einer Solarzelle, wenn sie einen Verbraucher speist, lässt sich mit der sog. U-I-Kennlinie ermitteln. Wie die Abb. 13 (sep. Kopiervorlage) zeigt, muss dafür (bei gleicher Bestrahlungsstärke) für unterschiedliche Verbraucherwiderstände die Spannung und die Stromstärke der Zelle ermittelt werden. Die unterschiedlichen Verbraucherwiderstände kann man sich in der Form einer Widerstandsdekade (mehrere 1-V-Widerstände mit Zwischenabgriffen) selbst herstellen. Wichtig ist, dass man dafür präzise Metallschichtwiderstände mit einer geringen Toleranz verwendet. Die typische Form dieser Kennlinien zeigt die Abb. 14 für mehrere Bestrahlungsstärken. Der Schnittpunkt der Kennlinie mit der Spannungsachse kennzeichnet die Leerlaufspannung der Zelle, der Schnittpunkt mit der Stromachse zeigt die Höhe des Kurzschlussstroms an.

Wie man sieht, verläuft die Stromstärke bei ansteigendem Verbraucherwiderstand zunächst annähernd waagrecht, knickt dann aber steil nach unten, so dass der Strom bei weiter zunehmendem Widerstand schnell abnimmt.

MPP-Maximum Power Point

Für jeden Punkt auf der U-I-Kennlinie lässt sich ein Rechteck zeichnen, das die Größe der in diesem Punkt abgegebenen Leistung der Zelle darstellt. Bei den Extrempunkten Kurzschlussstrom ($I_K = \max.$, aber $U_L = 0$) und Leerlaufspannung ($U_L = \max.$, aber $I_K = 0$) ist die Leistung der Zelle jeweils Null, da das Produkt Null ergibt. Der Punkt, bei dem die Solarzelle ihre größte Leistung abgibt, heißt MPP und liegt in dem Knickpunkt der Kennlinie (Abb. 15). Dies ist der optimale Arbeitspunkt, der sich im Betrieb bei den stark veränderlichen Bedingungen nicht ohne weiteres aufrecht erhalten lässt.

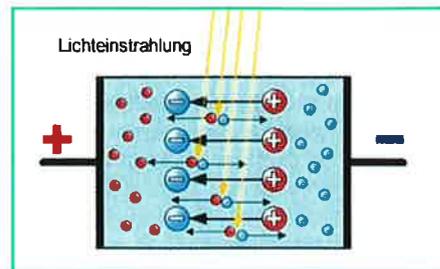


Abb. 8: Ladungstrennung durch elektrisches Feld

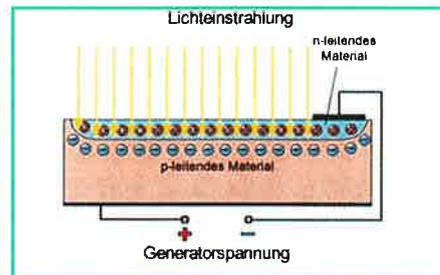


Abb. 9: Sperrschichtphotoeffekt der Solarzelle

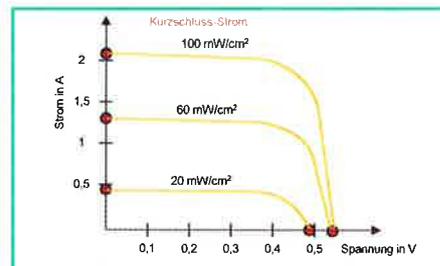


Abb. 14: U-I-Kennlinie einer Solarzelle bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken

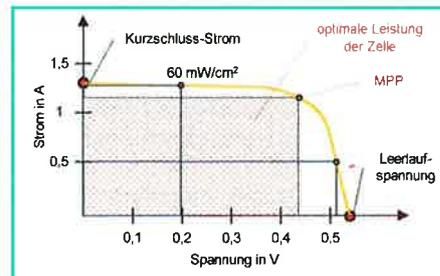
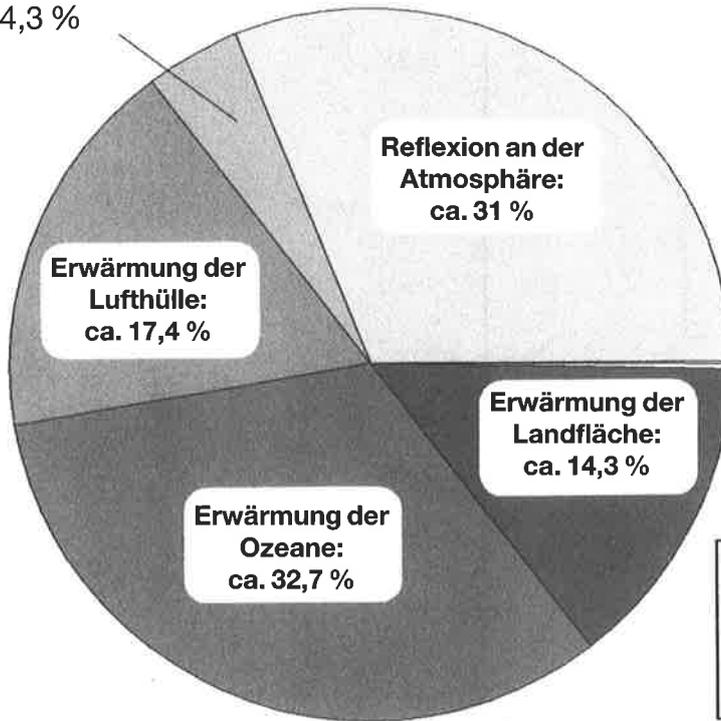


Abb. 15: MPP der Solarzelle

Autor: Helmuth Fies, Biengen

Reflexion an der
Erdoberfläche:
ca. 4,3 %



Photosynthese,
Biomasse:
ca. 0,1 %

Wind, Wellen,
Meeresströmung:
ca. 0,2 %

Technischer
Energieumsatz durch
die Menschen:
ca. 0,0006 %

Abb. 1: Anteile der Sonnenstrahlung

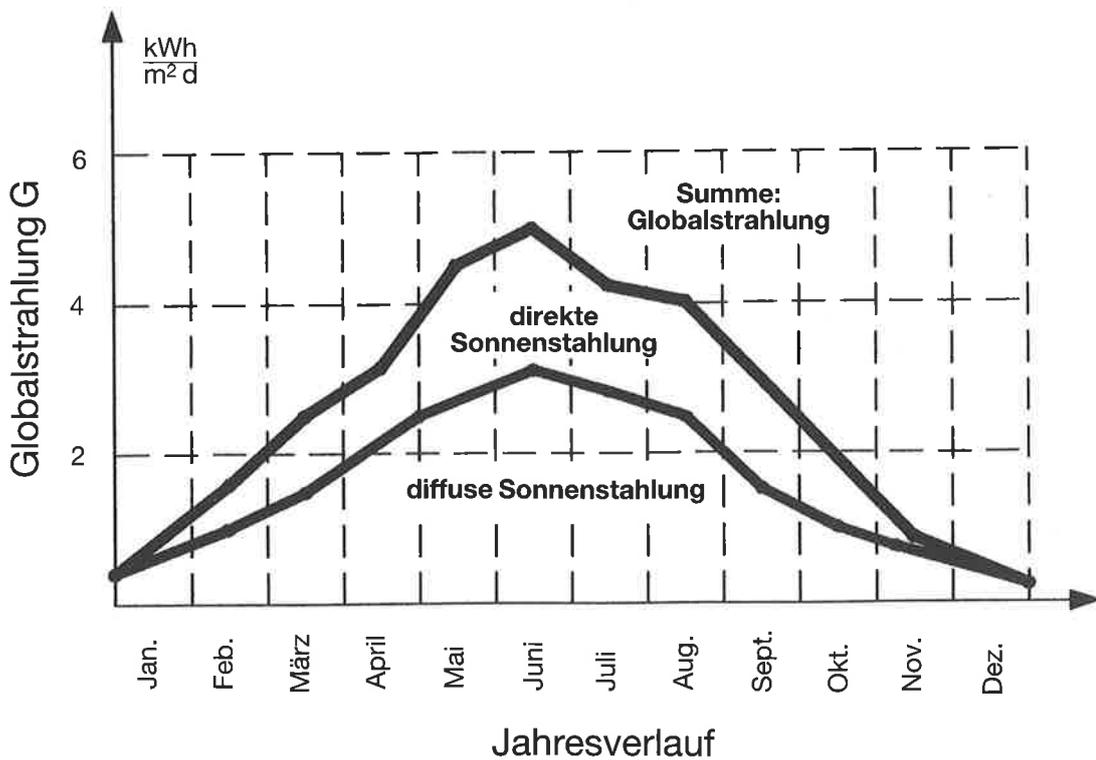


Abb. 3: Typischer Jahresverlauf der Globalstrahlung

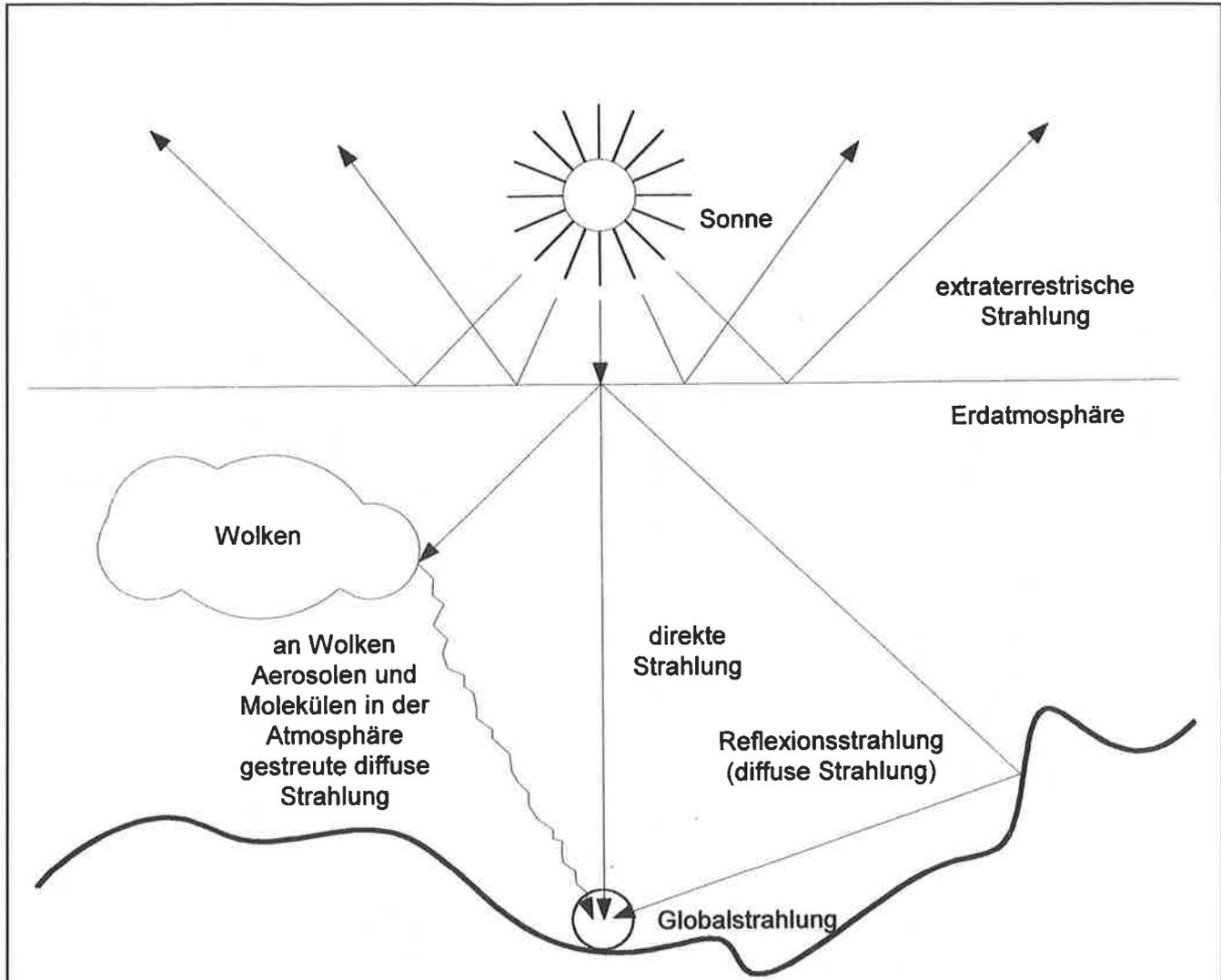


Abb. 2: Globalstrahlung

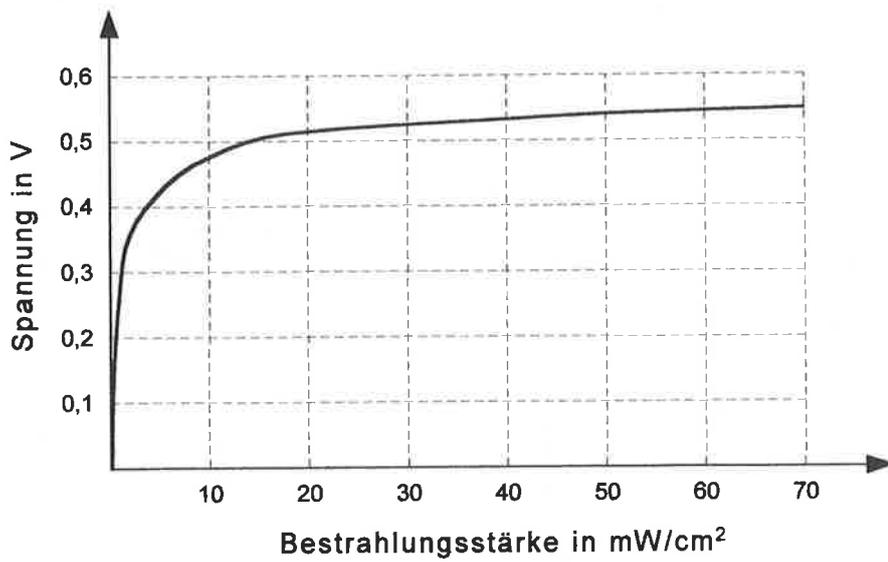


Abb. 12: Leerlaufspannung einer Solarzelle

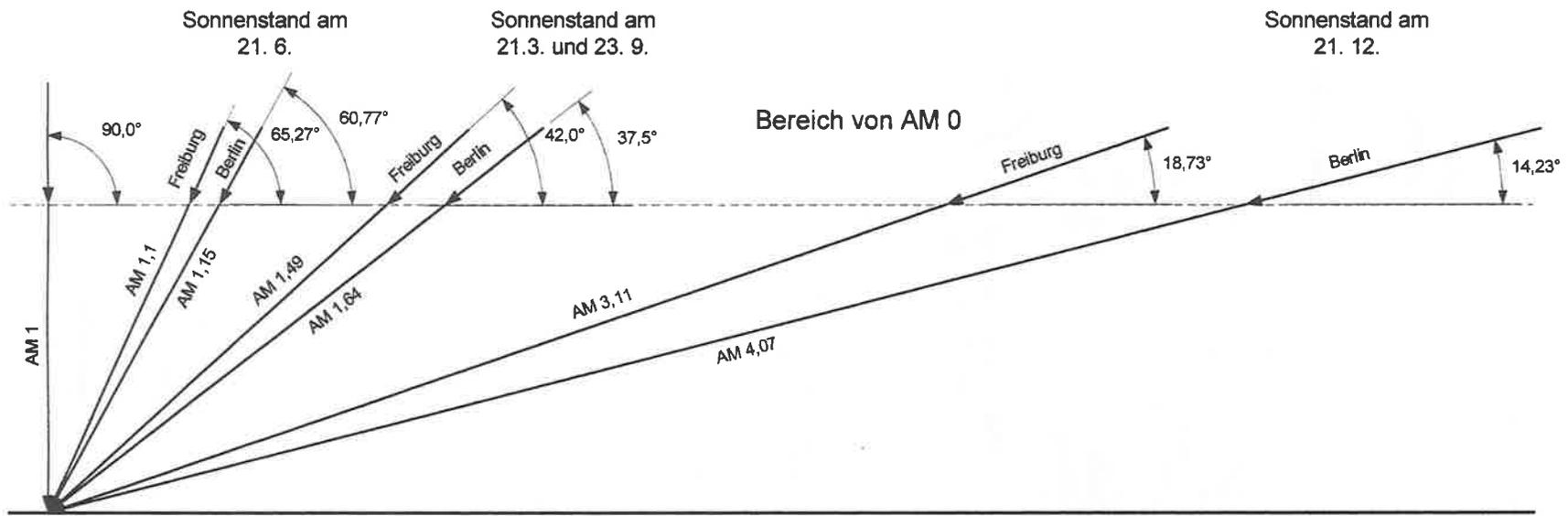


Abb. 5: AM: air mass

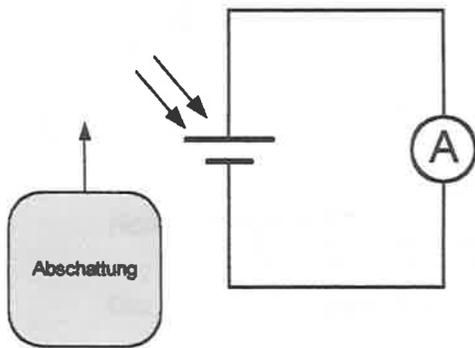


Abb. 10: Messung des Kurzschlussstroms

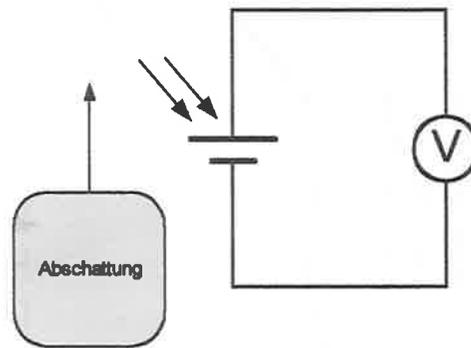


Abb. 11: Messung der Leerlaufspannung

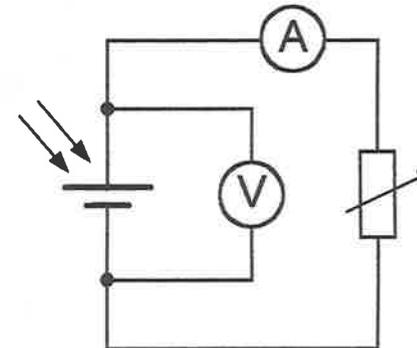


Abb. 13: Messung der U-I-Kennlinie

Nutzung der Solarenergie – Solarzellen und Solarmodule

Teil 2

Einstrahlwinkel

Für stationär eingebaute Solaranlagen verändert sich im Tagesverlauf der Einstrahlwinkel des Lichts. Ermittelt man die Leistung einer Zelle in Abhängigkeit zu diesem Winkel (am besten den Kurzschlussstrom messen, Abb. 16), bekommt man als Ergebnis eine Abhängigkeit, die dem Kosinus des Einstrahlwinkels folgt, d.h. dass bei kleinen Abweichungen kaum eine Reduzierung der Leistung stattfindet (Abb. 17, sep. Kopiervorlage). Wegen der Wirkung der diffusen Strahlung misst man in der Praxis bei 90° immer noch eine Leistung, was beim präzisen Messen z. B. durch schwarzen Karton abgeschirmt werden muss.

7. Verschaltung von Solarzellen

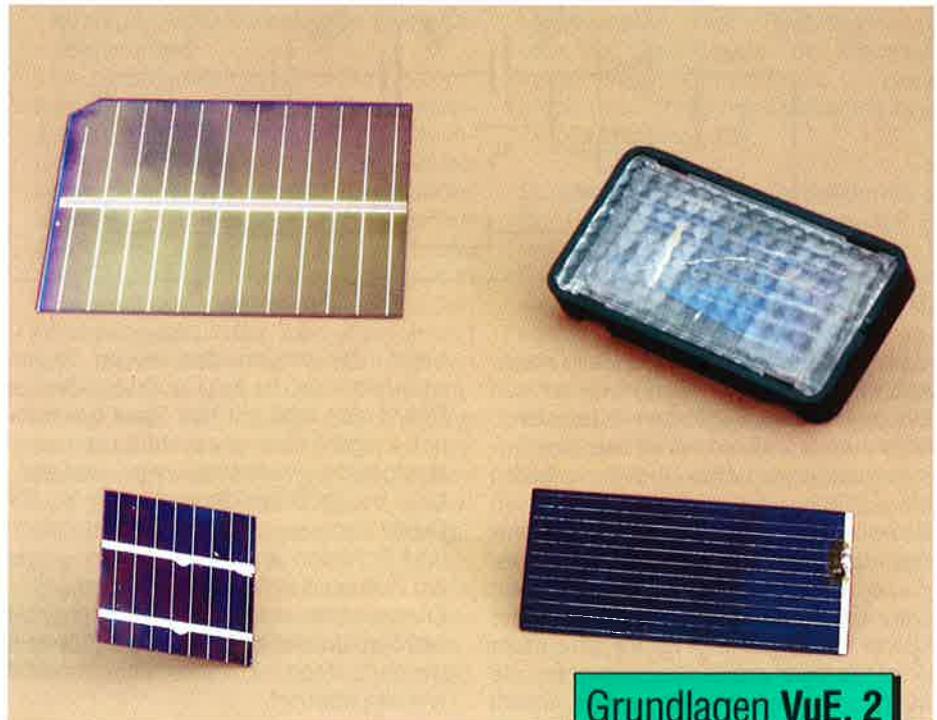
Da Spannung und Stromstärke einzelner Solarzellen für die meisten Anwendungen zu niedrig sind, schaltet man die Zellen zu sog. Modulen zusammen. Dabei gelten die üblichen Schaltungsmöglichkeiten für Quellen.

Reihenschaltung:

Schaltet man einzelne Zellen hintereinander (in Reihe), so addieren sich ihre Spannungen. Auf diese Weise lassen sich beliebig hohe Spannungen erzeugen (Abb. 18). Weisen die Zellen zwar die gleiche Spannung, aber unterschiedliche Stromstärken auf, so ergibt sich als Gesamtstrom die Stromstärke der schwächsten Zelle (Abb. 18).

Hot Spots:

Werden alle Zellen eines Moduls gleichmäßig abgeschattet, wie dies bei jeder Dämmerung geschieht, so sinkt zunächst die Leistung ab, da der Photostrom proportional zur Bestrahlungsstärke abnimmt. Ab einer bestimmten Grenze sinkt dann auch die Spannung und bei totaler Dunkelheit liefert das Modul keine Leistung mehr.



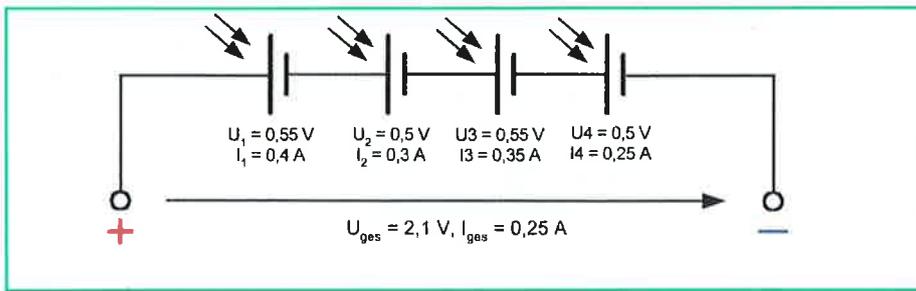


Abb. 18: Reihenschaltung von Solarzellen

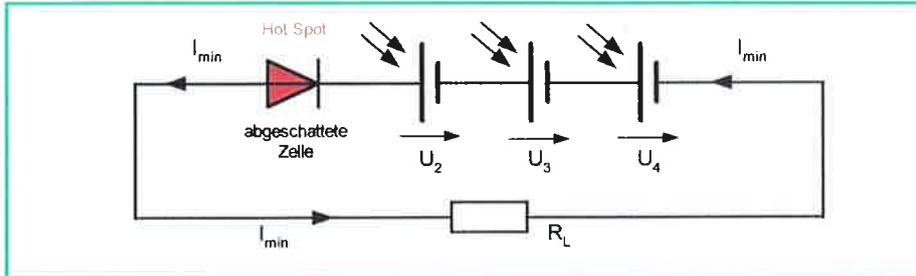


Abb. 19: Hot Spot

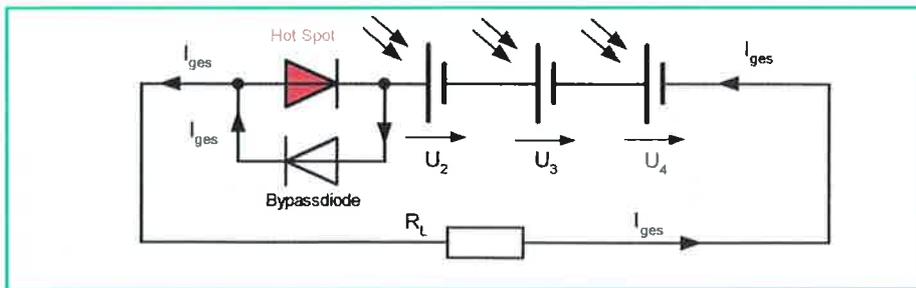


Abb. 20: Bypassdiode

Wird aber nur eine einzelne Zelle abgeschattet (z. B. durch Schattenwurf von Bäumen oder Gebäuden oder durch Verschmutzung), so verliert sie ihre Generatoreigenschaften und übrig bleibt eine Diode, die in Sperrrichtung im Stromkreis liegt (Abb. 19). Das bedeutet, dass die gesamte Reihe, in der diese Diode liegt, keinen merklichen Strom mehr liefert. Je nach Position der Diode im Modul liegt an ihr eine mehr oder weniger große Spannung an, die auch in Sperrrichtung einen Strom

treibt, der wegen des hohen Sperrwiderstandes die Zelle aufheizt. Dieses Phänomen wird mit **Hot Spot** bezeichnet. Es geht also eine nicht zu vernachlässigende Verlustleistung verloren, bzw. bei größeren Spannungen an der Diode kann es sogar zu Durchbrüchen und Schäden an der Zelle oder sogar am Aufbau des Moduls kommen. Es muss also sorgfältig darauf geachtet werden, dass die Module so aufgestellt werden, dass sie nicht abgeschattet werden können.

Man kann die Module vor solchen Schäden schützen, indem man sog. Bypassdioden einsetzt (Abb. 20). Sie liegen antiparallel zum Hot Spot und leiten den Strom an der abgeschatteten Stelle vorbei. Früher wurden Module hergestellt, bei denen zu jeder einzelnen Zelle eine Bypassdiode antiparallel geschaltet wurde, heute versieht man nur noch mehrere Zellen oder ganze Stränge von z. B. 12 Zellen damit. Im Falle der Abschattung fällt dann allerdings gleich die ganze Reihe aus. Diesen Nachteil muss man durch entsprechende Dimensionierung des Gesamtsystems ausgleichen.

Parallelschaltung:

Schaltet man einzelne Zellen parallel, so addieren sich ihre Ströme, während die Spannung erhalten bleibt. Auf diese Weise lassen sich beliebig hohe Ströme erzeugen (Abb. 21). Dabei muss darauf geachtet werden, dass die einzelnen Zellen die gleiche Spannung aufweisen. Ist dies nicht der Fall oder wird z. B. eine Zelle so stark abgeschattet, dass ihre Spannung merklich abfällt, so wird sie von den anderen Zellen mit Strom versorgt, es fließen sog. Ausgleichsströme, die die Zelle aufheizen und sie sogar zerstören können (Abb. 22). Abhilfe schaffen hier in Reihe geschaltete Blockierdioden, die in Sperrrichtung zu den möglichen Ausgleichsströmen liegen (Abb. 23).

Solarmodule:

Durch eine gemischte Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen kann man Module für beliebige Spannungen und Ströme zusammenstellen. Wichtig ist dabei, dass die Schutzmaßnahmen getroffen werden, die oben beschrieben wurden (Abb. 24, sep. Kopiervorlage).

Solche Module kann man heute für verschiedene Leistungen und Anwendungen fertig konfektioniert erwerben. Sie

sind dadurch gekennzeichnet, dass die Solarzellen auf einem Träger montiert und zwischen zwei speziell gehärteten Glasscheiben eingekapselt sind, die sie gegen Umwelteinflüsse schützen. Oft ist die Frontscheibe noch entspiegelt, um die Reflektionsverluste zu minimieren. Größere Module werden mechanisch durch einen Edelstahlrahmen stabilisiert. Auch solche Module können selbstverständlich wieder in Reihe und parallel geschaltet werden, so dass Solarpanels oder Solargeneratoren für größere Leistungen entstehen.

8. Solar-Systeme, Solaranlagen

Um die Solarmodule in der Praxis einsetzen und damit die unterschiedlichsten Verbraucher mit Strom versorgen zu können, müssen sie – je nach Anforderungen – aus verschiedenen Komponenten zu kompletten Solaranlagen zusammengesetzt werden. Dabei ergeben sich unterschiedlich komplexe Gesamt-Systeme, deren Leistungsbe- reich sich über einen großen Bereich erstreckt: Systeme für den μW -, mW -, W - und kW -Bereich.

Dann unterscheidet man Solaranlagen für den Inselbetrieb und solche mit Netzan- kopplung. Mit Inselbetrieb ist eine Betriebsart bezeichnet, bei der die Anlage keine Verbindung mit dem öffentlichen Stromnetz hat.

Solaranlagen für den Inselbetrieb:

Für bescheidene Aufgaben kommt man ohne Speicherung und Elektronik aus, mit zunehmenden Anforderungen werden die Systeme komplexer und beinhalten Teilfunktionen wie: Speicherung, Schutz vor Tiefentladung oder Überladung des Speichers, Spannungs- und Stromumformung, Sicherung gegen Kurzschlüsse, Optimierung des Wirkungsgrades, Temperaturüberwachung, Blitzschutz, Mess- und Registrieraufgaben usw. Im Rahmen dieses

Beitrags soll nur ein grober Überblick über die verschiedenen Systemgruppen gegeben werden.

Einfachste Form:

Für Verbraucher, die nur bei ausreichender Sonnen- bzw. Kunstlichteinstrahlung ihre Funktion ausüben müssen und keine besonderen sonstigen Anforderungen stellen (z. B. keine Wechselspannung), kann die einfachste Form (Abb. 25, sep. Kopiervorlage) gewählt werden. In diesem Fall liefert der Solargenerator eine Spannung und einen Strom, der seiner Zellenfläche und der Bestrahlungsstärke proportional ist. Deshalb muss er für die höchste Spannung und die höchste Stromstärke, für die der Verbraucher ausgelegt ist, bemessen werden. Solche Verbraucher können z. B. Taschenrechner, Ventilatoren zur Belüftung eines Fahrzeuges oder Wohnmobils oder eine Pumpe zur Feldbewässerung, sein, die hauptsächlich bei starker Sonneneinstrahlung benötigt wird, aber auch Solar- spielzeuge sind häufig so aufgebaut.

Versorgung mit Speicherung:

Für Verbraucher, die ständig oder über längere Zeiträume betrieben werden sollen, muss die Energie zwischengespeichert werden, da ein Solarmodul ja nur bei Bestrahlung Strom liefern kann. Die einfachste Form, die hier denkbar ist, zeigt Abb. 26 (sep. Kopiervorlage). Sie besteht aus einem Akku, einer Sicherung vor zu großen Ladeströmen, einer Schutzdiode zur Trennung des Akkus vom Modul, (wenn die Spannung des Akkus größer als die des Moduls ist) und einem Tiefentladeschutz, der den Akku vom Verbraucher trennt, wenn die Spannung des Akkus unter einen Minimalwert zu sinken droht.

Akkus: Grundsätzlich lassen sich dafür alle wiederaufladbaren Akkus und Batterien verwenden. Allerdings sollte man

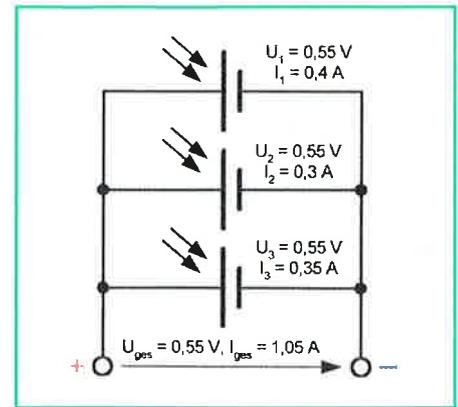


Abb. 21: Parallelschaltung von Solarzellen

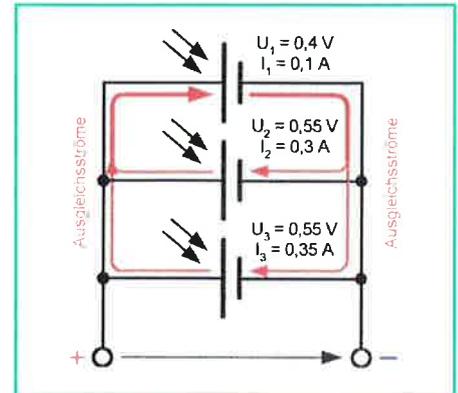


Abb. 22: Ausgleichsströme bei ungleichen Spannungen

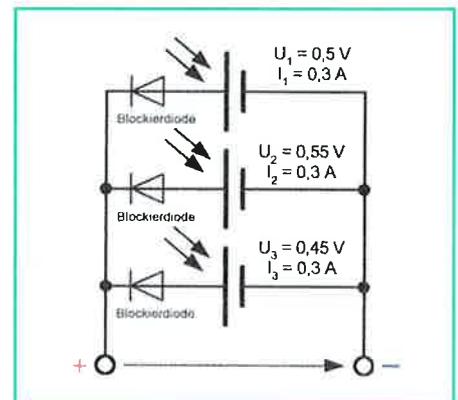


Abb. 23: Blockierdioden

beachten, dass etwa die „normalen Autobatterien“ zwar problemlos große Stromstöße (Starten) verkraften können, gegen Tiefentladung (unter 10,5V) allerdings recht empfindlich sind: man kann sie danach zwar wieder aufladen, sie behalten ihre Ladung aber nur kurze Zeit und sind nur noch eingeschränkt brauchbar.

Aus diesem Grund hat man spezielle **Solarakkus** entwickelt, die tiefer entladen werden können, eine kleinere Selbstentladung haben und robuster gegen ständiges Laden und Entladen sind.

Tiefentladeschutz: Es handelt sich um einen elektronischen Schalter, der beim Unterschreiten einer (meist einstellbaren Spannungsschwelle) den Stromkreis unterbricht und damit den Verbraucher vom Akku trennt. Steigt die Spannung des Akkus wieder an, verbindet die Schaltung bei einem etwas höheren Wert den Stromkreis wieder.

Laderegler: In aufwendigeren Systemen werden sog. Laderegler eingesetzt (Abb. 27, sep. Kopiervorlage). Sie stellen den Ladestrom auf einen für die Akkus optimalen Wert ein, regeln ihn beim Ladevorgang und schützen die Akkus vor Überladung. Die meisten Laderegler haben heute einen Tiefentladeschutz eingebaut. Die einfachste Form einer Ladespannungsregelung für Ni-Cd-Akkus zeigt die Abb. 28 (sep. Kopiervorlage). Hier wird über eine Z-Diode und evtl. einer zusätzlichen Diode die Ladespannung für den Akku auf ein eingestelltes Maximum gehalten (Spannungsstabilisierung), was den Akku vor einem zu hohen Ladestrom schützt.

Solche Systeme mit Speicherung eignen sich für Garten-, Teich-, Gartenhausbeleuchtungen oder zur Versorgung spezieller Gleichstromgeräte in Ferienhäusern, Caravans, Reisemobi-

len oder Booten (Beleuchtung, Kühlschränke, Fernseher, Unterhaltungselektronik usw.)

Versorgung von Wechselspannungsverbrauchern:

Die meisten elektrischen Maschinen und Geräte, die wir im Alltag benutzen, benötigen Wechselspannung (meist 230 V), Solarmodule liefern jedoch Gleichspannung. Sollen Solaranlagen zur Versorgung von Wechselspannungsverbrauchern eingesetzt werden, muss man aus der Gleichspannung Wechselspannung machen. Dies geschieht in sog. Wechselrichtern. Die Funktionsblöcke einer solchen Anlage zeigt Abb. 29 (sep. Kopiervorlage).

Wechselrichter: Alle Geräte für die Unterhaltungselektronik arbeiten mit Gleichspannung als Versorgungsenergie. Da unser Stromnetz aber nur Wechselspannung zur Verfügung stellt, besteht die übliche Aufgabe darin, aus dieser Wechselspannung eine Gleichspannung einer bestimmten Größe und Konstanz zu machen. Dies geschieht in sog. Gleichrichtern (Abb. 30). Wechselrichter haben genau die umgekehrte Aufgabe: sie müssen die Gleichspannung z. B. eines Solarmoduls in eine Wechselspannung umwandeln, mit der man einen Wechselspannungsverbraucher versorgen kann (Abb. 31).

Viele Elektrogeräte oder kleinere Elektrowerkzeuge für 230 V stellen keine großen Ansprüche an die Form und die Konstanz der Wechselspannung, weshalb man für ihren Betrieb billigere Wechselrichter einsetzen kann, die z. B. eine trapezförmige statt einer sinusförmigen Spannung liefern. Außerdem weisen sie oft einen niedrigen Wirkungsgrad auf. Bei Fernsehern, Computern, Druckern, Modems usw. können dagegen bei der Speisung mit einer nicht sinusförmigen Wechselspannung unerwünschte Störungen auftreten.

Wechselrichter, die hohen Anforderungen an die Sinusform, die Größe und die Frequenz der erzeugten Spannung gerecht werden, sind aber teuer.

Versorgung von Wechselspannungsverbrauchern mit Hilfsenergiequelle:

Aus Wirtschaftlichkeitsgründen bemisst man Solaranlagen nicht so groß, dass sie den Strombedarf über das ganze Jahr abdecken können. Eine bessere Lösung besteht darin, für längere Zeiten eines geringen Solarnergieangebots eine zusätzliche Hilfsenergie vorzusehen (Abb. 32, sep. Kopiervorlage). Dabei kann es sich um einen Windgenerator oder einen Motor-generator handeln. Der Einsatz eines Motorgenerators benötigt zwar fossile Brennstoffe (Öl oder Gas), hat aber den Vorteil, dass er als Kraft-Wärme-Kopplungsanlage gleichzeitig noch Wärme liefern kann (Abb. 33). In beiden Fällen jedoch erhält man Wechselstrom, den man in Gleichstrom umwandeln muss, wenn er in den Akkus gespeichert werden soll (Abb. 32).

Solaranlagen mit Netzankopplung:

Solche Anlagen haben den Vorteil, dass sie in Zeiten niedrigen Solarenergieangebots die benötigte elektrische Energie aus dem öffentlichen Netz beziehen können, während sie in Zeiten eines Überangebots an Solarenergie die überschüssige Energie in das öffentliche Netz einspeisen können. Für die Elektrizität, die ins Netz eingespeist wird, müssen sehr strenge Auflagen erfüllt werden, unter anderem eine genaue Synchronizität von Spannung und Frequenz mit dem Netz. Solche „netzgeführten“ Wechselrichter, sind recht aufwendig und teuer und müssen von den zuständigen EVUs genehmigt werden. Wer eine solche Anlage plant, sollte sich rechtzeitig erkundigen, welche Wechselrichter und welches

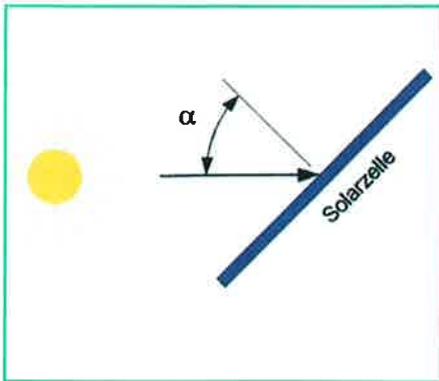


Abb. 16: Messen der Richtungsabhängigkeit der Leistung

technische Zubehör seitens des EVU vorgeschrieben ist. Eine Darstellung der wichtigsten Funktionsblöcke für eine solche Anlage zeigt Abb. 34 (sep. Kopiervorlage).

9. Bedingungen für den Einsatz der Solarenergie:

Solarenergie ist unerschöpflich, sie setzt keine Schadstoffe und klimawirksamen Spurengase frei und reicht aus, um jeden denkbaren Energiebedarf der Menschheit zu decken. Dennoch hat sie gegenüber den fossilen und den nuklearen Energieträgern zwei gravierende Nachteile:

- Ihre **Energiedichte** (das ist die Leistung eines Energiestroms je m^2 Querschnitt) ist gering: ihr Wert außerhalb der Atmosphäre ist $1,37 \text{ kW/m}^2$, auf der Erde liegt ihr maximaler Wert bei klarem Himmel etwa zwischen $0,8$ und 1 kW/m^2 . Solarenergie hat deshalb einen hohen spezifischen Flächenbedarf (Flächenbedarf pro Energieeinheit), was einen hohen Materialaufwand für die Empfänger zum Einsammeln der Energie bedeutet. (Zum Vergleich: Energiedichte von Wasserkraft: ca. 108 kW/m^2 .)

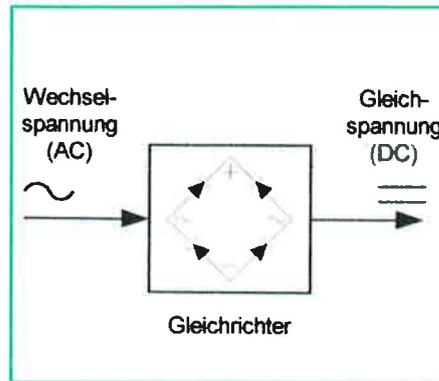


Abb. 30: Funktion eines Gleichrichters

- Außerdem ist ihre **Verfügbarkeit** großen Schwankungen unterworfen, sei es in Abhängigkeit vom Tag- und Nachtrhythmus, von den Jahreszeiten oder vom Wetter. Deshalb ist bei kontinuierlicher Nutzung ein Reservesystem oder eine Speicherung erforderlich, um Perioden schwacher Einstrahlung oder sonnenlose Zeiten zu überbrücken.

Um die Solarenergie wirtschaftlich nutzen zu können, müssen **Systemkonzepte** erstellt werden, die alle Bedingungen erfassen und die **einzelnen Komponenten optimal aufeinander abstellen**. Bei der Solararchitektur bedeutet das z. B. nicht nur den Einbau von Solarmodulen oder -kollektoren in ein Haus, sondern ein intelligentes Gebäudekonzept, das die Ausrichtung und architektonische Gestaltung des Gebäudes, eine optimale Wärmedämmung und Verglasung, die Nutzung vorhandener Massen und Flächen zum Einsammeln der Energie als Wärme und Licht usw. umfasst. Dies erfordert eine individuelle und genaue Planung.

Diese Überlegungen beziehen sich auch auf andere Anwendungen wie z. B. Solarfahrzeuge. Sie nutzen Solarstrom als Antriebsenergie für die Elek-

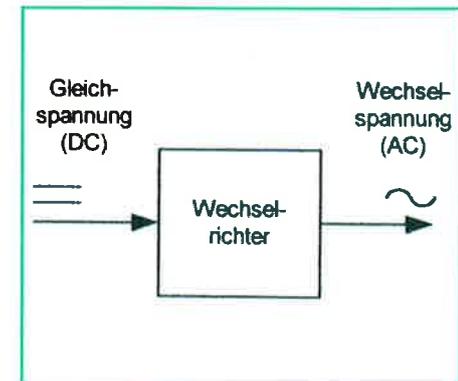


Abb. 31: Funktion eines Wechselrichters

tromotoren, die von Akkus gespeist werden. Ihre Leistung und Reichweite hängt vom Gewicht und der Kapazität der verwendeten Akkus, speziellen energiesparenden Konstruktionen (Leichtbauweise, aerodynamische Konstruktion), optimaler Regelung durch MPP-Tracker, optimaler Motorsteuerung, Minimierung aller Reibungsverluste usw. und dem Typ und der Fläche der verwendeten Solarzellen ab. Die grundsätzlichen Funktionsblöcke eines Solarautos zeigt Abb. 35.

Solarboote verkehren fahrplanmäßig auf der Binnenalster in Hamburg, am Bodensee und im Hafen von Sidney. Auch Segelflugzeuge mit großer Spannweite wurden bereits mit Solarzellen ausgestattet, z. B. das Icaré Solarflugzeug der Uni Stuttgart oder das unbemannte Nurflügelflugzeug Pathfinder der NASA. Einige Firmen bieten in der Zwischenzeit Solarmobile, andere Solarroller oder Elektro-Liegeräder serienmäßig an. Ich glaube allerdings, dass sich als Energielieferant für Elektrofahrzeuge langfristig Brennstoffzellen durchsetzen werden.

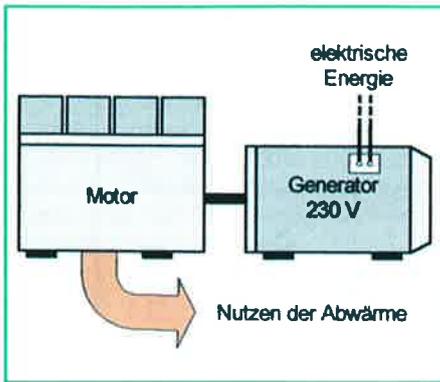


Abb. 33: Motorgenerator als Hilfenenergiequelle

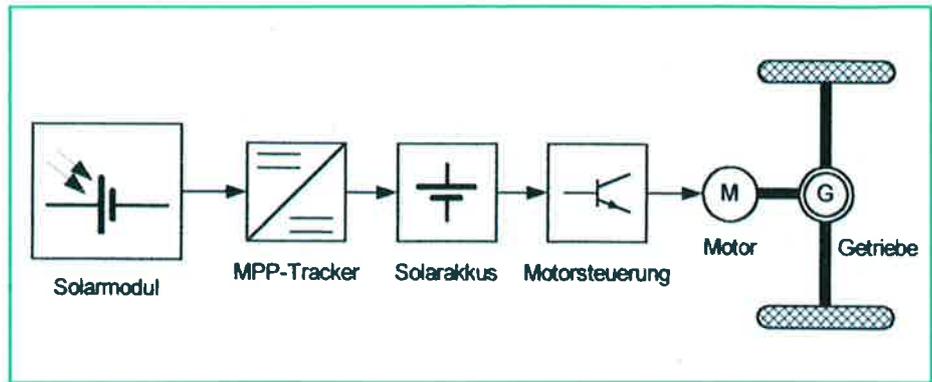


Abb. 35: Funktionsblöcke eines Solarmobils

10. Bewertung

Umweltverträglichkeit:

Damit wird der Grad bezeichnet, in dem eine technische Anlage die Umwelt durch die Gewinnung und Aufbereitung der Energierohstoffe, durch ihren Herstellungsprozess, ihren Betrieb und durch ihre Entsorgung belastet.

Gewinnung und Aufbereitung der Energierohstoffe: keine Belastung, da die Sonnenstrahlung unmittelbar zur Verfügung steht.

Herstellung: Da die Energiedichte der Solarstrahlung gering ist, werden bei der Stromgewinnung durch Solarzellen große Flächen benötigt, was insgesamt große Anlagenteile und damit viel Material bedeutet. Unter anderem wird auch Chlor bei der Herstellung der Zellen verwendet. Das fertige Endprodukt, die Solarzelle (Si), enthält jedoch (anders als bei PVC) keine Chlorverbindungen. Lediglich die Dünnschichtzellen, bei denen auch Cadmium und Arsen verwendet werden, können Umwelt und Menschen belasten und gefährden: Cadmium und Arsen sind hochgiftig.

Betrieb: im Unterschied zur Nutzung von fossilen Brennstoffen, bei denen riesige Mengen des Treibhausgases CO₂, außerdem Schwefeldioxid, Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Schwefelwasserstoff, toxische Schwermetalle und auch radioaktive Gase entstehen und aus der Abluft ausgefiltert und entsorgt werden müssen, arbeiten Solarzellen völlig lautlos und emissionsfrei. Am wichtigsten dabei erscheint das Treibhausgas CO₂, das man nicht entsorgen kann, immerhin werden in Deutschland in Wärmekraftwerken (Kohle, Öl, Gas) über 60 % des Stroms erzeugt. Hier gilt: jede kWh Solarstrom, die erzeugt wird, spart ca. 1 kg CO₂ ein. Auch im Vergleich mit den hochgiftigen und strahlenden Altlasten, die die Kernkraftwerke hinterlassen, ist die Erzeugung von elektrischer Energie mit Solarzellen **eine saubere Energie**.

Entsorgung: Es ist keine spezielle Entsorgung erforderlich, es handelt sich um dieselben Anlagenteile, die auch bei anderen technischen Systemen und in der Elektronik anfallen.

Energetische Amortisation:

Darunter versteht man die Energierücklaufzeit, also die Zeitspanne, die eine Solaranlage benötigt, um soviel Energie zu erzeugen, wie für ihre Herstellung benötigt wurde. Dabei ergeben sich für

- monokristallines Silizium: 48–75 Monate,
- polykristallines Silizium: 25–57 Monate,
- amorphes Silizium: 17–41 Monate.

Erntefaktor:

Er gibt das Verhältnis an zwischen der Energie, die man für Herstellung und Betrieb einer Anlage benötigt, zur Energie, die eine Anlage während ihrer Nutzungsdauer liefert. Für die verschiedenen Solarzellentypen ergeben sich folgende Faktoren:

- monokristallines Silizium: 4,8–7,4
- polykristallines Silizium: 6,2–14
- amorphes Silizium: 8,6–21.

Autor: Helmuth Fies, Biengen

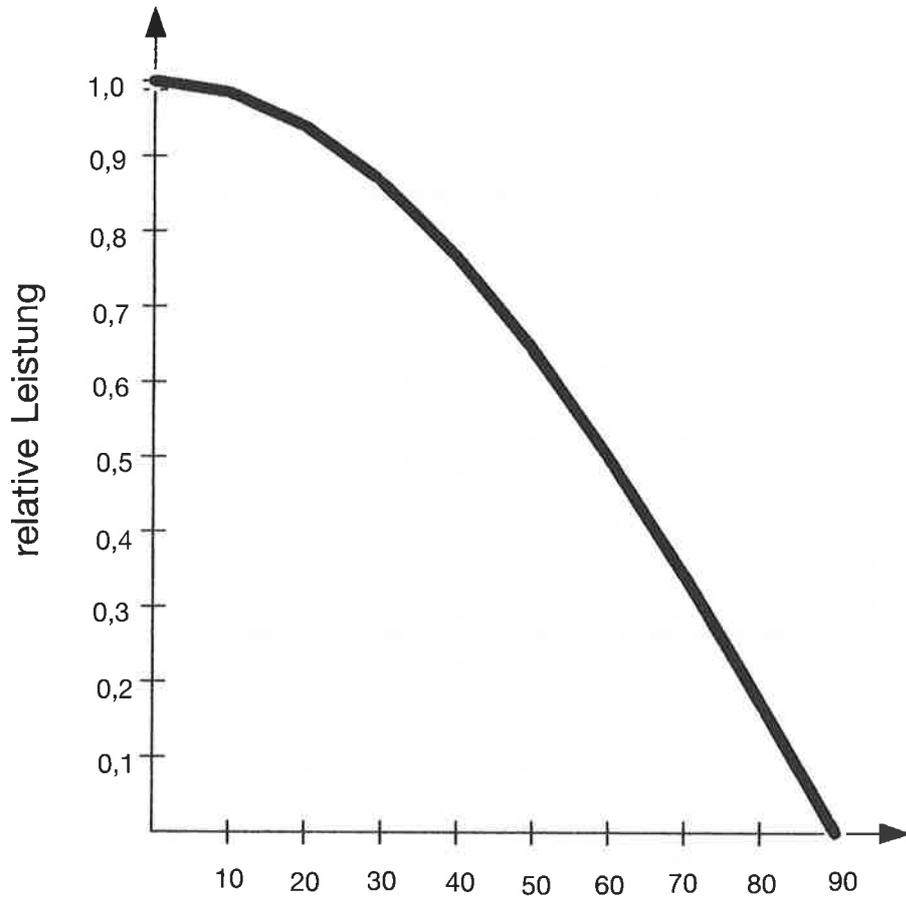


Abb. 17: Richtungsabhängigkeit der Leistung

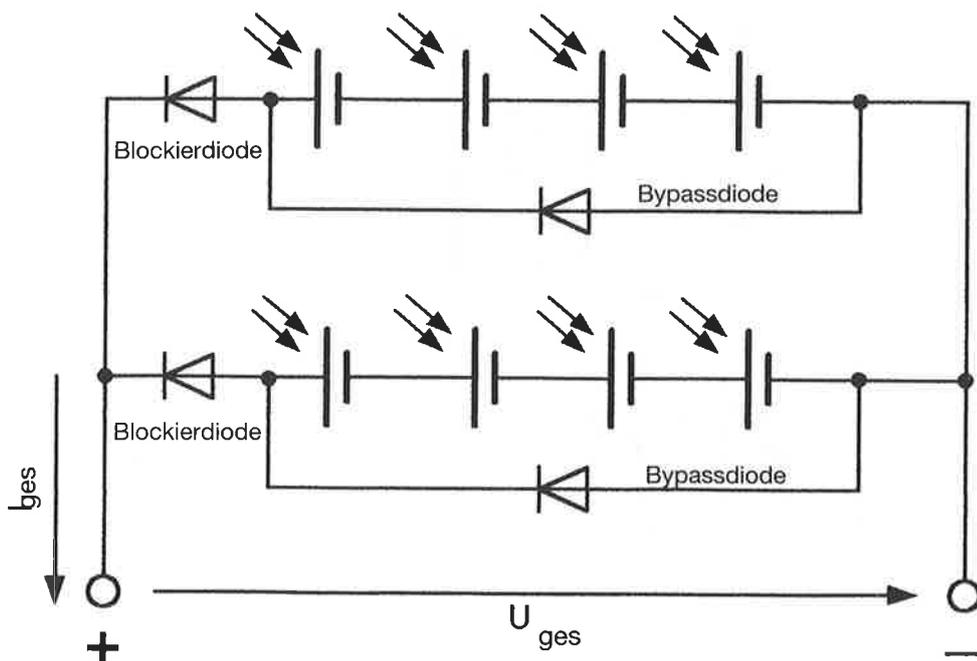


Abb. 24: Solarmodul

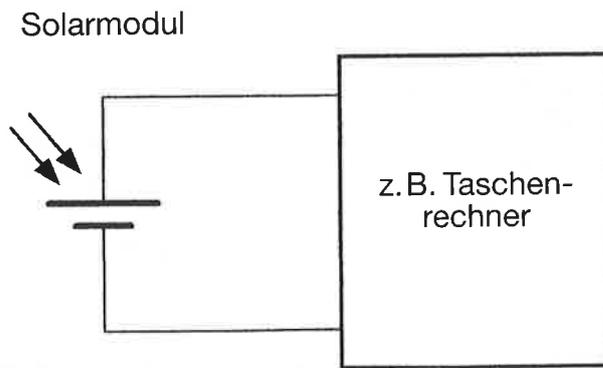


Abb. 25: Einfachste Struktur eines Solarsystems

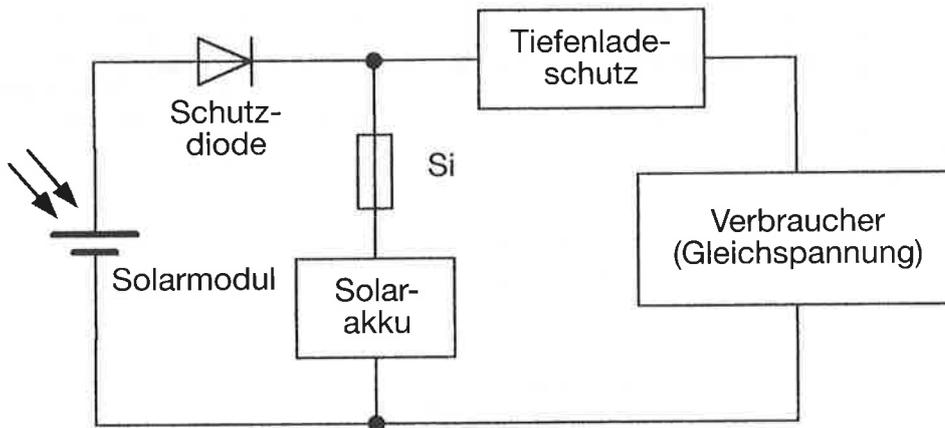


Abb. 26: Solarsystem mit Speicher

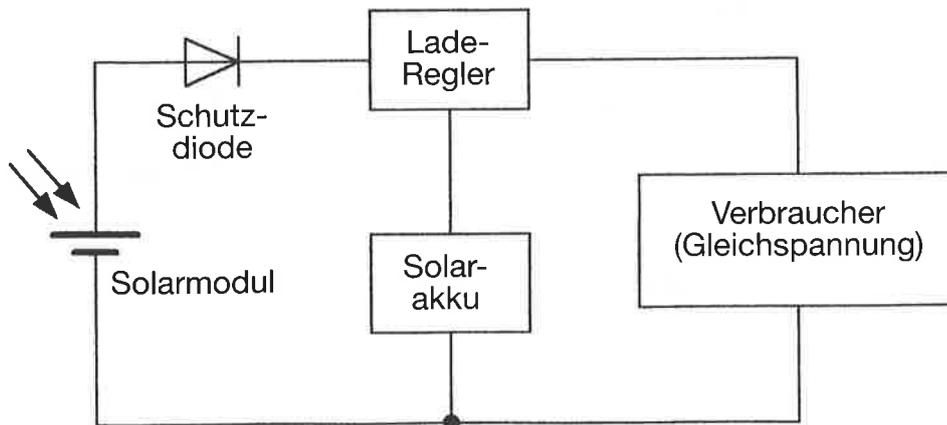


Abb. 27: Solarsystem mit Laderegler

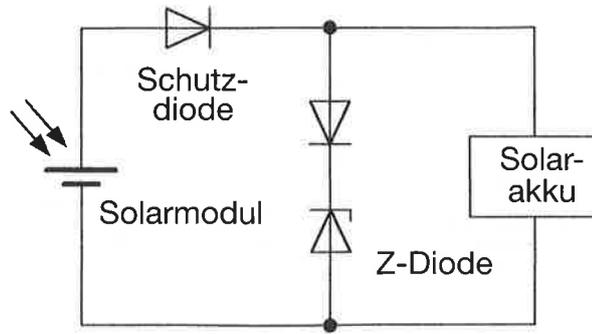


Abb. 28: Einfachste Form einer Laderegung

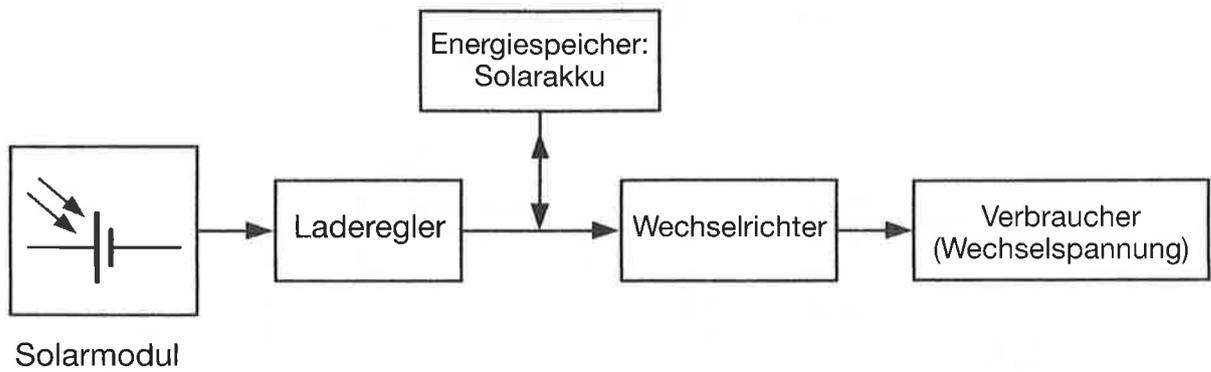


Abb. 29: Solarsystem für Wechselspannungsverbraucher

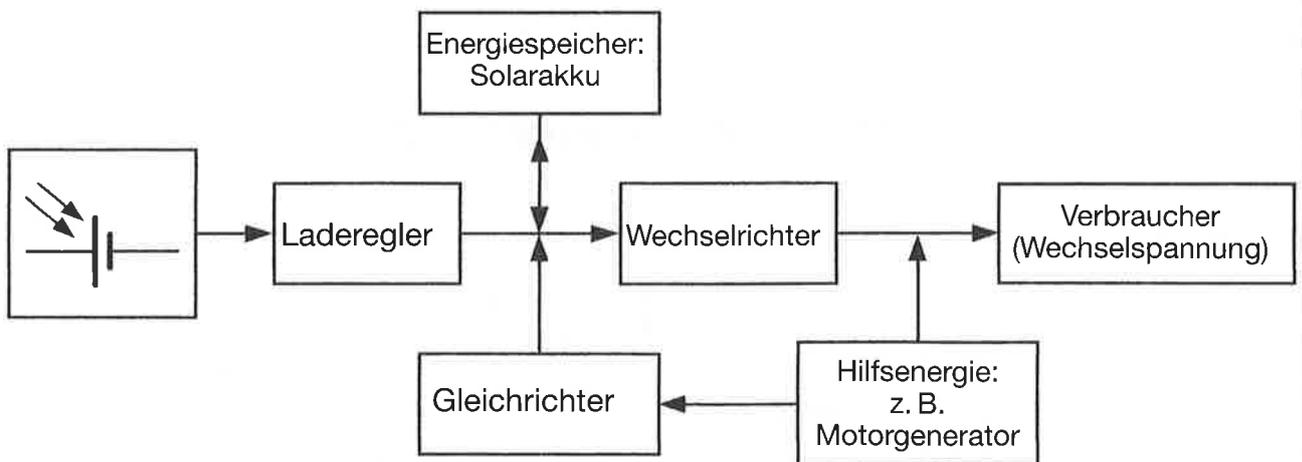


Abb. 32: Solarsystem mit Hilfsenergie

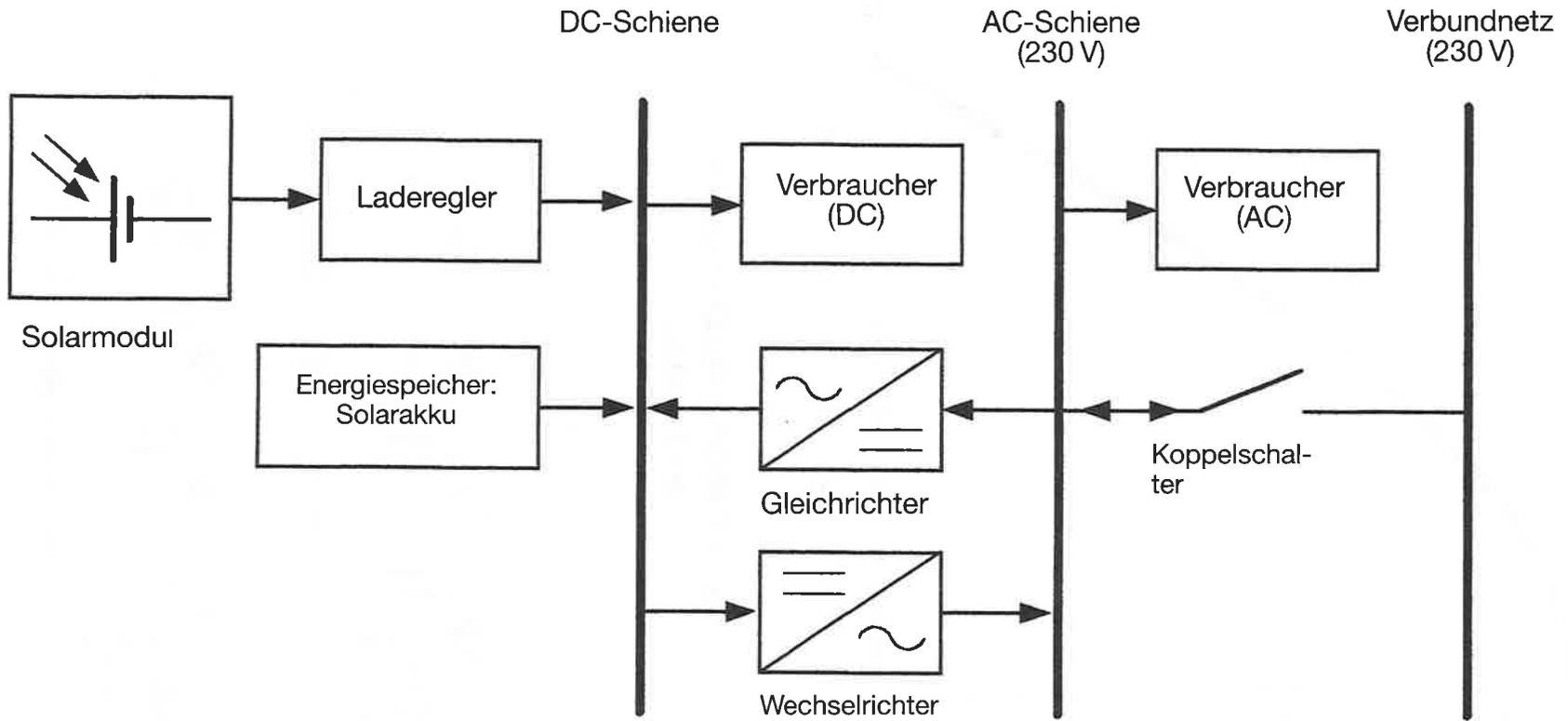


Abb. 34: Solarsystem mit Netzanbindung