

ENERGIE-SPIEGEL

FACTS FÜR DIE ENERGIEPOLITIK VON MORGEN

ZUSAMMENFASSUNG**SOLARENERGIE****Solare Technologien heute**

2

SOLARE BRENNSTOFFE**Solarchemie – der andere Weg**

3

INTERVIEW**«Langfristig investieren»**

4

IMPRESSUM

4

Die Sonne als Urbild des Lebens hat den Menschen schon immer fasziniert. Heute weiss man, dass Sonnenlicht und -wärme den heutigen Primärenergiebedarf theoretisch bei weitem decken könnten. Deshalb spielt die Sonnenenergie in der Diskussion um eine nachhaltigere Energieversorgung eine besondere und oft emotionale Rolle. Die symbolbefrachtete Sonnenenergie wirkt zwangsläufig sympathisch und gilt als umweltfreundlich. Wunschdenken darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass ihre Nutzung mit grossen Investitionen verbunden ist. Die naturgegebenen Rahmenbedingungen entscheiden letztlich, ob und wo sich diese Investitionen lohnen. Wie weit die Sonnenenergie ihrem Ruf als Hoffnungsträgerin für die Zukunft nachkommen kann und wo die Forschung diesbezüglich steht, erläutert dieser Energie-Spiegel.

Sonnenkollektoren leisten bereits heute einen sinnvollen Beitrag an die Warmwasserversorgung im Privatbereich. Die Versorgung mit solarem Strom aus Photovoltaikanlagen ist zur Zeit nur als Lösung in abgelegenen Gegenden wirtschaftlich interessant. Für Grossanlagen im MW-Bereich ist die Schweiz nicht geeignet. Selbst in sonnenreichen Gebieten sind der Photovoltaik bezüglich Wirkungsgrad und Kosten klare Grenzen gesetzt, auch wenn Silizium-Photozellen heute kommerziell erhältlich sind und in Zukunft noch günstiger werden. Hier muss an neuen Materialien für Photozellen geforscht werden, die Sonnenlicht besser ausnützen.

Für die solare Stromerzeugung in grösserem Rahmen gibt es heute nur einen Anlagentyp, der in sonnenreichen Gebieten kommerziell erprobt und relativ konkurrenzfähig ist: dabei wird konzentrierte Solarstrahlung in thermischen Anlagen mit Dampfturbinen in Strom umgewandelt.

Alle diese Technologien haben noch Entwicklungspotenzial, doch die zentralen Herausforderungen für die Forschung liegen teilweise anderswo. Wenn es gelänge, Sonnenenergie kostengünstig zu speichern, z. B. durch die Umwandlung von konzentrierter Solarstrahlung in lagerfähigen und transportierbaren chemischen Brennstoff wie etwa Wasserstoff, so würde dies einen wirklichen Durchbruch bedeuten. Die Erforschung solarchemischer Systeme ist deshalb ein Schwerpunkt der Energieforschung am PSI in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich.

SOLARE TECHNOLOGIEN HEUTE

CO₂-Reduktion und Dekarbonisierung bestimmen die Energiediskussion heute. Sonnenklar, dass der umweltbewusste Verbraucher zu gerne weg von den fossilen und hin zu den erneuerbaren Energiequellen möchte, worunter die Sonnenenergie Wunschkandidat Nummer eins ist. Ist sie aber eine echte Alternative?

Alle solaren Techniken sind von Dauer und Intensität der Lichteinstrahlung abhängig. Diese ist in unseren Breitengraden am kleinsten, wenn der Strom- und Wärmebedarf am grössten ist. Zudem ist Sonnenenergie noch schlecht speicherbar. Allein aufgrund dieser naturgegebenen Rahmenbedingungen kann die Sonne in der Schweiz mittelfristig nur eine begrenzte Rolle spielen. Ganz anders in sonnenreichen Gebieten: hier werden Solartechnologien günstiger und ihr Potential für die Zukunft grösser.

Solare Wärme Warmwasserkollektoren für Wohnen und Industrie können auch in der Schweiz effizient angewandt werden. Sie setzen Sonnenlicht auf einfache Weise in Warmwasser mit Temperaturen von 50 bis 200°C um. Anlagen mit verglasten Flachkollektoren liefern pro Jahr und m² zwischen 380 und 450 kWh Wärme. Mit 4 bis 6 m² Kollektorfläche lassen sich damit in einem Einfamilienhaus im schweizerischen Mittelland 40 bis 80% des jährlichen Energieverbrauchs für die Warmwasserbereitung decken. Bei Anfangsinvestitionen von ca. Fr 8000.- ergeben sich über 25 Jahre Gestehungskosten von 30 bis 40 Rp/kWh.

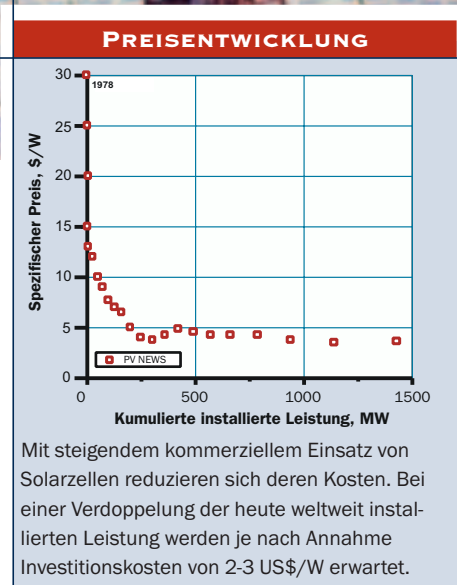
Solarer Strom Ob Alpthütte oder Satellit, wo kein Netzanschluss verfügbar ist, wird die Photovoltaik auch wirtschaftlich interessant. Dabei wird Sonnenlicht über Silizium-Photozellen direkt in elektrische Energie umgewandelt. Die Nutzung vorhandener Dach- und Fassadenflächen ist sinnvoll. Heutige Silizium-Solarzellen haben einen Wirkungsgrad von 12 bis 17%. Mit einer Anlage im Schweizer Mittelland können so pro m² und Jahr 90-125 kWh Wechselstrom erzeugt werden. Aller-

dings sind im Mittelland die Produktionskosten mit 85 Rp/kWh noch etwa 10 mal grösser als bei Strom aus herkömmlichen Kraftwerken und rund 4 mal grösser als der Konsumentenpreis. Um den Preis von Photovoltaikstrom zu senken, kann man:

- Grosstechnisch fertigen (Lernprozess, siehe Grafik)
- günstige Halbleitermaterialien einsetzen, Materialbedarf senken
- Kosten bei Verkapselung und Tragstrukturen senken
- Gebiete mit hoher Sonneneinstrahlung bevorzugen
- Teuere Zellen durch Konzentration des Lichtes besser nutzen
- Wirkungsgrad steigern (realistisches Niveau ≈ 25% in 20 Jahren).

Das PSI fokussiert seine Forschung auf den letzten Punkt und entwickelt dünne Silizium-Germanium-Schichten mit Strukturierung im Nano-Bereich (= Millionstel Millimeter).

Der billigste Solarstrom wird heute mit solarthermischen Anlagen (parabolische Tröge mit einer Dampfturbine) hergestellt. In Gegenden mit einer jährlichen Einstrahlung von mindestens 2200 kWh pro m²



produzieren derartige Anlagen, wie z. B. die 350 MW Anlage in Barstow, Kalifornien, Strom zu 12-15 US Cents/kWh. Mit verbessertem Kollektor-Design, Serienproduktion und grösseren Anlagen könnte man bis zum Jahr 2020 4-5 US Cents/kWh erreichen.

Thermo-Photovoltaik, d.h. die Umwandlung von z. B. Flammenlicht in Strom, ist ein wichtiger Abkömmling der solaren Photovoltaik. Die Sonne wird hier durch Licht aus Verbrennungsvorgängen ersetzt. Hier ist das PSI aktiv und hat im Labor den weltweit höchsten Umwandlungswirkungsgrad erreicht. Gegenwärtig wird die Technik in einem Heizkessel eingesetzt.

PHOTOVOLTAIK-OPTIONEN IM ÜBERBLICK

Materialsystem	Vorteile	Nachteile	Verbesserungspotential
Kristallines Silizium, c-Si	Bewährt, stabil, in beliebigen Mengen und überall verfügbar, umweltfreundliches Material, hoher Wirkungsgrad 15-20%	Geringe Absorption bedingt grosse Dicke (200-400 µm), grosser Materialbedarf, verlangt hochwertiges Si	Abscheidetechnik, Dünnschichttechnik, Wirkungsgrad, Lichteinfang, Mehrfachzellen, Quanten-Strukturen
Amorphes Silizium, a-Si	Hohe Absorption, geringer Materialbedarf, Abscheiden auf billige Substrate, umweltfreundlich	Wirkungsgrad gering (7-10%), nimmt unter Lichteinstrahlung ab	Stabiler Wirkungsgrad, Tandemzellen aus mikrokristallinem Si und amorphen Si
Konzentrator-technik Si, GaAs, InP	Geringer Materialbedarf, hoher Wirkungsgrad 25-30%	Nutzt nur direkt eingestrahlichtes Licht, Zelle muss stets auf Sonne gerichtet sein	Konzentrator, Mehrfachzellen, Wirkungsgrad >35%
Verbindungshalbleiter CIS, CIGS, CdTe	Kostengünstige Abscheidetechnik, sehr hohe Absorption, sehr dünne Schichten	Seltene Elemente (In, Te), benötigt geringe Mengen toxisches Cd, Te	Wirkungsgrad, Mehrfachzellen, Anpassung an Spektrum, billige Substrate
Elektrochemische Zellen	Billige Halbleiter (z. B. TiO ₂)	Einschluss des chemischen Systems (Elektrolyt), Degradation	Neuartige Elektrolyten, Halbleiter und Farbstoffe, Nanostrukturen, Wirkungsgrad

SOLARCHEMIE — DER ANDERE WEG

Forschung an PSI und ETHZ Ziel der PSI-Forschung ist es, mit Hilfe von thermochemischen Kreisprozessen und Sonnenlicht Wasserstoff aus Wasser zu gewinnen; aus einem sonnenreichen Produktionsgebiet könnte der Wasserstoff in die Schweiz transportiert und hier z. B. von einem Brennstoffzellen-Auto beliebig genutzt werden.

Solarreaktoren Das PSI entwickelt in Zusammenarbeit mit der ETHZ Solarreaktoren für solche solarchemische Anwendungen. Eine wichtige Grundlage für das Design des Solarreaktors sind Vollständigkeit und Geschwindigkeit von chemischen Reaktionen im Solarofen; diese Daten müssen zuerst im Experiment bestimmt werden, ebenso die optischen Eigenschaften, welche die Wechselwirkung des Sonnenlichts mit den eingesetzten Materialien bestimmen. Die Auslegung des Solarreaktors muss gewährleisten, dass die chemische Reaktion möglichst vollständig abläuft und die einfallende konzentrierte Solarstrahlung optimal in chemische Energie umgewandelt wird. Ausserdem muss der Reaktor so gestaltet sein, dass die Reaktionstemperatur von 2000 °C erreicht wird, der Reaktor aber trotzdem mit kommerziell erhältlichen Materialien gebaut werden kann, welche meist nur bis 1400 °C stabil sind (z. B. Stahl).

Das Bild zeigt einen Solarreaktor, welcher diese zwei scheinbaren Gegensätze vereint. Er wurde am PSI entworfen und getestet und wird für die solare Zersetzung von Zinkoxid eingesetzt. Kernstück des Reaktors ist eine rotierende Stahltrommel. Diese wird kontinuierlich mit Zinkoxid beschickt. Durch die Rotation wird das Oxid an die Wand der Trommel gedrückt und es bildet sich eine Schicht, welche die Stahltrommel vor der konzentrierten

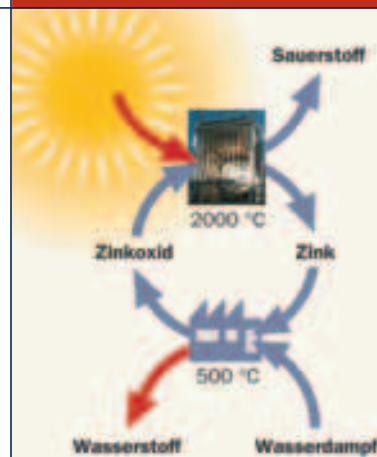
Solarstrahlung schützt. Die Zersetzung des Zinkoxids läuft nur auf der Oberfläche ab, weil die Solarstrahlung nur dort die nötigen Temperaturen erzeugt. Der entstehende Zinkdampf und der Sauerstoff werden aus dem Reaktor transportiert und Zinkoxid fortwährend nachgeführt. Damit wird ein kontinuierlicher Betrieb des Reaktors möglich. Das Zinkoxid dient also gleichzeitig als Strahlungsabsorber, Wärmeisolator und chemischer Reaktionsstoff.

Zur Zeit wird an diesem Solarreaktor noch intensiv geforscht und entwickelt. 2002 wird das PSI ein 4-jähriges EU-Projekt starten, um diese neue Technologie

Soll Sonnenenergie in Zukunft in grossem Rahmen genutzt werden, so muss sie in eine einfach transportierbare und lagerfähige Form mit hoher Energiedichte gebracht werden können, um ihre zeitlich begrenzte Verfügbarkeit wettzumachen. Sie muss eine Rolle übernehmen, welche heute z. B. Benzin einnimmt. Im Zentrum der Diskussion stehen Wasserstoff H_2 und Methanol CH_3OH .

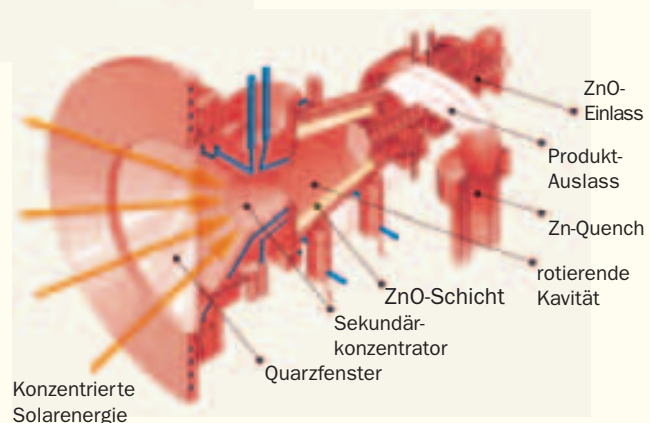
auf einem Leistungsniveau von 500kW im Solarreaktor zu demonstrieren. In weiteren 20-30 Jahren dürfte sie auch grossmassstäblich eingesetzt werden können; nach optimistischen Schätzungen wird dann für solaren Wasserstoff ein Preis von 15-20 US Cents/kWh (ohne Transport in die Schweiz) zu erwarten sein.

TREIBSTOFF AUS WASSER, SONNE UND METALL



In einem Solarreaktor wird Zinkoxid (ZnO) bei mehr als 2000 °C in Zink (Zn) und Sauerstoff (O_2) zersetzt. Dabei wird das konzentrierte Sonnenlicht in chemische Energie umgewandelt und ist nach der Reaktion im Zink gespeichert. Lässt man darauf das Zink mit Wasserdampf reagieren, entstehen energiereicher Wasserstoff (H_2) und das ursprünglich eingesetzte Zinkoxid. Dieses wird rezykliert und wieder in den Solarreaktor gegeben. Der Wasserstoff aber kann nun transportiert und als Treibstoff eingesetzt werden.

Man erwartet einen Wirkungsgrad von ca. 20% für den gesamten Kreisprozess. Durch die Speicherung bei hohen Temperaturen wird zwar ein hoher maximaler Wirkungsgrad erreicht, aber die Entwicklung des Solarreaktors stark erschwert.





Aldo Steinfeld doktorierte 1989 in Maschinenbau an der Universität von Minnesota, USA. Nach einem Post-Doc-Aufenthalt am Energy Research Center des Weizmann Institute of Science, Israel, trat er 1991 ins PSI ein und wurde 1992 Leiter der Gruppe Solare Verfahrenstechnik. Seit 1999 ist er Assistenzprofessor für Erneuerbare Energieträger an der ETH Zürich. Sein Forschungsgebiet sind erneuerbare Energiesysteme und nachhaltige Energienutzung, mit Schwerpunkt „Solarchemie“ (z. B. solarer Wasserstoff; www.pre.ethz.ch).

«LANGFRISTIG INVESTIEREN»

Welche Rolle spielen Solarstrom oder Solarchemie für die Schweiz? Die geringe Sonneneinstrahlung in der Schweiz begrenzt den Anteil von Strom aus Solartechnologien im Energiemix. Längerfristig jedoch könnten diese Techniken weite Verbreitung finden, z. B. in modularen Kleinanlagen. Die Solarchemie hat eine ganz andere Dimension: Sie nutzt Solarstrahlung zur Herstellung von Energieträgern wie z. B. Wasserstoff. So kann im Sonnengürtel der Erde Sonnenenergie effizient in chemische Brennstoffe umgewandelt werden. Diese könnten gespeichert und in die industrialisierten Zentren transportiert werden und dort fossile Brennstoffe für Wärme- und Stromerzeugung ersetzen.

Wo liegen die Grenzen des Anteils an Sonnenenergie für die Schweiz? Die wichtigste Einschränkung ist die jährliche solare Einstrahlung. Hierzulande beträgt sie ca. halb soviel wie z. B. in Südeuropa. Deshalb kostet Strom aus einer Photovoltaik-Anlage in Sizilien etwa halb soviel wie aus einer vergleichbaren Anlage in Zürich. Eine weitere Einschränkung ist der Flächenbedarf, der proportional zur eingesammelten Sonnenenergie ist. Dies spielt für grosse Stromproduktionsanlagen im MW-Massstab eine Rolle; dezentralisierte Kleinanlagen können ästhetisch in Dächern und Fassaden von Gebäuden eingefügt werden.

Photovoltaik ist sehr materialintensiv; kann man etwas dagegen tun? Man kann die Thermodynamik nicht überlisten. Die Materialien für Photovoltaik-Anlagen (vor allem Silizium) müssen aus Mineralerzen gewonnen werden, was mit einigem Energieaufwand verbunden ist. Man könnte die Wiederverwertung der Materialien

mit weniger energieintensiven Prozessen verbessern und erneuerbare Prozesswärme und Strom zur Herstellung bzw. Wiederverwertung von Materialien einsetzen, um Emissionen zu vermeiden.

Was kann Forschung in der Schweiz zur Zukunft dieser Technologie beitragen? Wer sind die Nutzniesser? Die Schweiz kann eines der führenden Länder auf dem Gebiet der Solartechnologie werden. Wir haben hochqualifizierte Ingenieure, die Komponenten und Systeme entwickeln und herstellen können, die in der ganzen Welt Absatz fänden. Die Entwicklung erneuerbarer Energietechnologien ist nicht nur Lösung für Probleme, die durch andere Technologien verursacht wurden, sondern auch Triebkraft für nachhaltige Entwicklung, Wirtschaftswachstum und Arbeitsplatzbeschaffung. Längerfristig könnte der Schweizer Energiemarkt von solarchemischen Brennstoffen profitieren, die für Wärme, Strom und im Transportwesen eingesetzt werden können, ohne Schadstoffe abzugeben.

Mit welcher Strategie kann man dem Konsumenten die (bezahlbare) Liebe zum Solarstrom beibringen? Nachhaltigkeit ist nicht gratis. Sie hat ihren Preis. Ich persönlich betrachte sie als eine langfristige Investition, die unseren Kindern als umweltfreundliches Energieversorgungssystem zurückbezahlt wird. Schon heute bezahlen viele Leute freiwillig „mehr“ für sauberen Strom. Aber in Wirklichkeit ist das nur der „faire“ Preis: Der heutige Preis für fossile Brennstoffe enthält keine externen Umweltkosten für die Verminderung oder gar Vermeidung von CO₂ und anderen Schadstoffen. Früher oder später wird sich das ändern.

ENERGIE-SPIEGEL ist das Newsletter des Projektes GaBE, Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen. Es erscheint alle vier Monate.

Auflage

15 000 Exemplare

Verantwortlich für den Inhalt

Paul Scherrer Institut
GaBE
Dr. Stefan Hirschberg
5232 Villigen PSI
Tel. 056 310 29 56
Fax 056 310 44 11
Stefan.Hirschberg@psi.ch
www.psi.ch/GaBE

Redaktion

Ruth Schmid

Layout

Dominik Kuenz

Was ist GaBE?

Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen ist ein gemeinsames Projekt des Paul Scherrer Instituts, Villigen, und der ETH Zürich. Ziel ist es, heutige und künftige Energiesysteme umfassend und detailliert zu beurteilen. Betrachtet werden insbesondere gesundheitliche, ökologische und ökonomische Kriterien. Auf der Basis von Life Cycle Assessment (LCA), energiewirtschaftlichen Modellen, Risikoanalysen, Schadstoffausbreitungsmodellen und schliesslich einer Multikriterienanalyse ist es möglich, unterschiedliche Energieszenarien zu vergleichen, um Grundlagen für politische Entscheidungen zu schaffen.

GaBE arbeitet zusammen mit:

- Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL
- Massachusetts Institute of Technology, MIT
- University of Tokyo
- Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, OECD
- Organisation der Vereinten Nationen, UNO
- Europäische Union, EU