Wasserstoff aus Wasser und Sonnenenergie

Hochtemperatur-Solarchemie

Das Labor für Solartechnik (LST) am PSI und die Professur für Erneuerbare Energieträger (PRE) an der ETH erforschen gemeinsam thermochemische Hochtemperatur-Prozesse, mit denen konzentrierte Sonnenenergie effizient in speicher- und transportierbare chemische Brennstoffe wie Wasserstoff umgewandelt werden kann. Dadurch lässt sich der Ausstoss von Treibhausgasen und anderen Schadstoffen vermeiden, die bei der Wärme- und Stromproduktion durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen entstehen. Solare Brennstoffe ermöglichen eine umweltfreundliche Energieversorgung und leisten damit einen Beitrag zur Lösung der Klimaproblematik. Mit der Inbetriebnahme einer Pilotanlage zur solaren Zinkherstellung ist kürzlich ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur industriellen Umsetzung gelungen[1)].

Anton Meier, Christian Wieckert, Aldo Steinfeld

Auf lediglich einem Promille der verfügbaren Landfläche der Erde liesse sich mittels Solaranlagen mit einem Wirkungsgrad von 20% soviel Energie gewinnen, dass der gegenwärtige Energiebedarf sämtlicher Bewohner dieses Planeten gedeckt werden könnte. Die Sonnenenergie ist im Wesentlichen uneingeschränkt vorhanden und ihre Verwendung ist ökologisch sinnvoll. Allerdings ist die auf die Erde treffende Solarstrahlung stark verdünnt, nicht dauernd verfügbar sowie ungleichmässig über die Erdoberfläche verteilt. Diese Nachteile können überwunden werden, wenn die Sonnenenergie konzentriert und in chemische Energieträger umgewandelt wird, und zwar in Form von solaren Brennstoffen, die über lange Zeit gespeichert und über weite Distanzen transportiert werden können.

Die Werkzeuge, mit denen solare Brennstoffe für das 21. Jahrhundert hergestellt werden können, finden sich schon in den Schriften zweier herausragender Gelehrter des 19. Jahrhunderts, Carnot und Gibbs. Die beiden Wissenschaftler gehören zu den wichtigsten Begründern der Thermodynamik. In Bild 1 ist das thermodynamische Rezept für die Umwandlung von Sonnenenergie in chemische Energie dargestellt: Mit Hilfe von parabolischen Spiegeln wird das einfallende Sonnenlicht konzentriert, um diese Strahlungsenergie als Hochtemperaturwärme für endotherme chemische Reaktionen zu nutzen. Der maximale Wirkungsgrad eines solchen Energieumwandlungsprozesses ist durch den Carnot-Wirkungsgrad einer äquivalenten Wärmekraftmaschine begrenzt. Mit der Sonne als Wärmereservoir bei einer Temperatur von 5800 Kelvin, die bei maximaler solarer Konzentration erreichbar ist, und mit der Erde als Wärmesenke könnte im Prinzip 95% der Sonnenenergie in chemische Energie von Brennstoffen umgewandelt werden. Natürlich liegt es an den Wissenschaftlern und Ingenieuren, eine geeignete Technologie zu entwerfen und zu entwickeln, um möglichst nahe an diese Grenze heranzukommen.

Die Konzentration der Sonnenenergie erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie bei einem Vergrösserungsglas, doch statt mit einer Linse wird das Sonnenlicht mit einem Parabolspiegel fokussiert. Bild 2 zeigt den Solarkonzentrator am PSI. Der Flachspiegel (Heliostat) folgt der Sonne auf ihrer Bahn am Himmel und reflektiert die Sonnenstrahlen auf einen Parabolspiegel, von wo sie im Wesentlichen auf eine kleine Kreisfläche fokussiert wer-

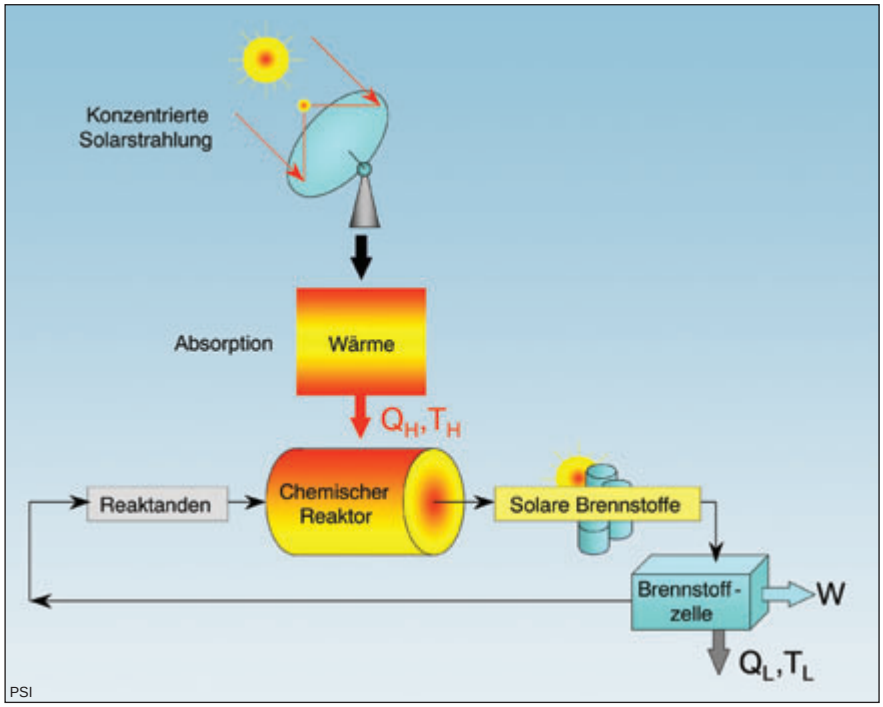


Bild 1 Schematische Darstellung der Umwandlung von Sonnenenergie in solare Brennstoffe
Konzentrierte Solarstrahlung dient als Energiequelle für die Hochtemperatur-Prozesswärme, womit chemische Reaktionen für die Herstellung von speicher- und transportierbaren Brennstoffen angetrieben werden.

Bild 2 Solarofen am PSI

Der Solarofen am PSI besteht aus einem Flachspiegel (Heliostat), der der Sonne nachgeführt wird, und einem stationären Parabolspiegel. Maximale Energieflussdichten über 5 MW/m² (5000 Sonnen) und Temperaturen über 2000 °C können mit dieser Forschungsanlage erreicht werden, die sich auf dem neusten Stand der Technik befindet. Der Solarkonzentrator am PSI und die Hochfluss-Solarsimulation am PSI und an der ETH werden für die experimentelle Untersuchung von Hochtemperatur-Prozessen in Solarreaktoren benutzt.

den. Die Energie, die auf diese kleine Fläche auftrifft, ist gleichbedeutend mit derjenigen von 5000 Sonnen. Mit dieser Technologie können leicht jene sehr hohen Temperaturen erreicht werden, die für die Herstellung von solaren Brennstoffen benötigt werden.

Solarthermische Herstellung von Wasserstoff

Brennstoffzellen erzeugen schadstofffrei Energie durch die kontrollierte Reaktion von Sauerstoff mit Wasserstoff. Dieser gilt denn auch als einer der verheissungsvollsten Brennstoffe für eine nachhaltige Energienutzung. Dazu müsste der Wasserstoff allerdings auch mit erneuerbaren Energiequellen produziert werden. Die in Bild 3 dargestellten fünf thermochemischen Hauptwege zur Herstellung von solarem Wasserstoff benutzen konzentrierte Solarstrahlung als Energiequelle für die Hochtemperatur-Prozesswärme. Für die solare Thermolyse und die geschlossenen solaren thermochemischen Kreisprozesse wird einzig Wasser (H_2O) verbraucht. Bei den hybriden solar-fossilen Prozessen wie beim solaren Kracken (von Erdöl), der solaren Dampfreformierung (von Erdgas) und der solaren Dampfvergasung (von Kohle) dienen die fossilen Brennstoffe lediglich als chemische Ausgangsstoffe für den solaren Wasserstoff. Die karbothermische Zinkoxid-Reduktion schliesslich ist ein Hybridprozess, bei dem der Kohlenstoff als Reduktionsmittel zur Herstellung von Zink wirkt, aus dem dann durch Reaktion mit Wasser Wasserstoff gewonnen wird.

Wasserstoff aus Wasser

Die solarthermische Herstellung von Wasserstoff (H_2) aus Wasser (H_2O) ist ein attraktiver chemischer Prozess. Bei hohen Temperaturen über 2500 °C und abhängig vom Druck spaltet sich Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff (O_2). Dieser Prozess wird als Thermolyse von Wasser bezeichnet:

$$H_2O \rightarrow H_2 + \tfrac{1}{2} O_2 \qquad (1)$$

Die direkte Wasserspaltung wäre ein geniales Konzept, doch fehlt bislang eine wirksame Technik zur Trennung des Wasserstoffs vom Sauerstoff bei hohen Temperaturen, um nicht mit einem explosiven Gemisch zu enden. Dieses Trennungsproblem kann umgangen werden, indem man thermochemische Kreisprozesse mit Wasserspaltung verwendet, die auf so genannten Metalloxid-Redox-Systemen basieren. Wie diese Idee funktioniert, zeigt Bild 4 schematisch am Beispiel des Zinkoxid-Redox-Systems. In einem ersten, endothermen Schritt wird Zinkoxid (ZnO) im Brennfleck eines Solarkonzentrators bei einer Temperatur von nahezu 2000 °C zu Zink (Zn) und Sauerstoff reduziert:

$$ZnO \rightarrow Zn + \tfrac{1}{2} O_2 \qquad (2)$$

In einem zweiten, exothermen Schritt lässt man Zink bei etwa 600°C mit Wasserdampf reagieren, wobei reiner Wasserstoff frei wird:

$$Zn + H_2O \rightarrow ZnO + H_2 \qquad (3)$$

Die Nettoreaktion entspricht somit Gleichung (1), und weil Wasserstoff und Sauerstoff in verschiedenen Schritten anfallen, müssen die beiden Gase nicht ge-

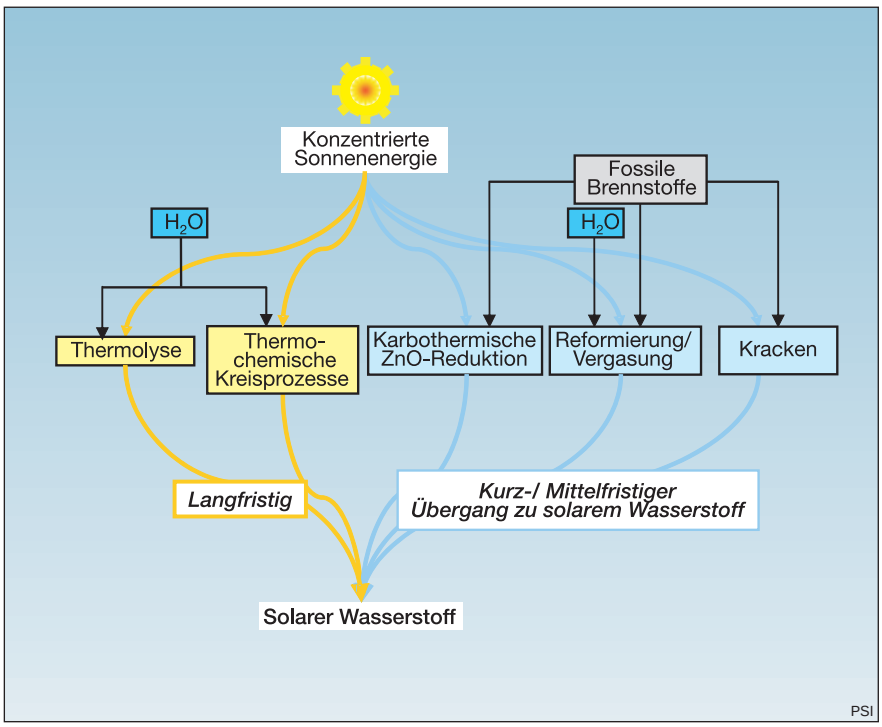


Bild 3 Fünf thermochemische Wege zur Herstellung von solarem Wasserstoff

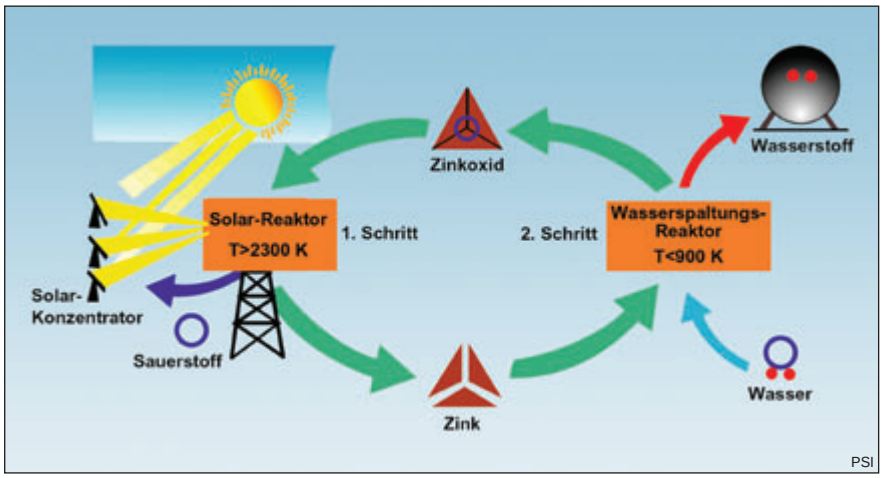


Bild 4 Zweistufiger thermochemischer Kreisprozess für die solare Herstellung von Wasserstoff aus Wasser, basierend auf dem Zinkoxid-Redox-System

trennt werden. Der Energieumwandlungswirkungsgrad dieses zweistufigen solaren Wasserspaltungs-Kreisprozesses kann über 40 Prozent erreichen. Die hohe Effizienz macht den Prozess auch ökonomisch interessant. Im Gegensatz zur konventionellen Herstellung via Reformierungsprozesse ist der solare Wasserstoff nicht durch kohlenstoffhaltige Gase kontaminiert und kann beispielsweise direkt in PEM-Brennstoffzellen verwendet werden.

Ein Solarreaktor für die Zersetzung von Zinkoxid gemäss Gleichung (2) ist in Bild 5 schematisch dargestellt. Die Reaktorkonfiguration besteht aus einem rotierenden Hohlraum-Receiver, dessen Wände infolge der Zentrifugalkraft mit einer pulverförmigen Zinkoxid-Schicht bedeckt sind. Das Zinkoxid ist direkt der hoch konzentrierten Solarstrahlung bei Temperaturen von 2000 °C ausgesetzt. Die Produktgase werden rasch abgekühlt, um die Rückreaktion von Zink und Sauerstoff zu Zinkoxid zu vermeiden. Dieses Reaktorkonzept wurde vom PSI patentiert und im Solarofen des PSI mit einem Prototyp von 5 kW thermischer Eingangsleistung erfolgreich getestet. Die weiteren Arbeiten bei der Reaktorentwicklung konzentrieren sich darauf, optimale Betriebsbedingungen zur Erreichung eines maximalen Exergie-Wirkungsgrads zu finden.

Die Reaktionstemperatur eines Prozesses kann gesenkt werden, indem man ein chemisches Reduktionsmittel beifügt. Verwendet man Kohle oder Erdgas als Reduktionsmittel, so beginnt die karbothermische Reduktion von Zinkoxid bereits bei etwa 1000 °C:

$$ZnO + C \rightarrow Zn + CO$$
$$ZnO + CH_4 \rightarrow Zn + CO + 2H_2 \qquad (4)$$

300-kW-Solarreaktor in Israel

Im Rahmen eines EU-Projekts namens Solzinc mit massgeblicher Schweizer Beteiligung wird der ZnO/C-Prozess gegenwärtig in einer Pilotanlage mit 300 kW solarer Leistung getestet. Die solare Reaktortechnologie ist eine Schweizer Entwicklung des PSI und der ETH Zürich und bildet das Herzstück der Anlage. Bild 6 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Reaktors, der basierend auf Versuchen im 10-kW-Massstab im Solarofen des PSI in der Schweiz gebaut wurde und nun in der bestehenden Solaranlage am Weizmann Institute of Science in Israel im Einsatz steht. Weitere Teile der Solzinc-Pilotanlage stammen von den Projektpartnern aus Schweden (Firma ScanArc, Abgassystem zur Gewinnung von Zinkstaub) und Frankreich (Promes-CNRS, Instrumentierung).

Etwa 300 kW konzentrierte Sonnenenergie fallen von oben in den Solarreaktor mit innerem Durchmesser von 1,4 m ein und heizen ihn auf etwa 1200 °C auf. Etwa 50 kg Zinkstaub werden stündlich aus dem Abgas auskondensiert und mit Hilfe eines Zyklons abgeschieden. Der thermische Wirkungsgrad dieser Anlage (d.h. der Anteil der einfallenden Sonnenenergie, die für die chemische Reaktion und die Aufheizung der Reaktanden Zinkoxid und Holzkohlenstaub verwendet wird), liegt bei 30%. Bei grösseren industriellen Anlagen wird ein thermischer Wirkungsgrad von 50 … 60% erwartet. Der produzierte Zinkstaub eignet sich besonders für die Herstellung von Zinkanoden für Zink-Luft-Batterien, in denen der Energieinhalt des Zinks in Strom umgewandelt werden kann. Dabei entsteht wiederum ZnO, geeignet zur Rückführung in den Solarreaktor. Alternativ kann das solare Zink aber auch für die Wasserstoffherstellung gemäss Gleichung (3) eingesetzt werden. Die optimale Form der Zinkabscheidung für die Wasserstoffherstellung ist noch Gegenstand weiterer Untersuchungen. Mit der Solzinc-Pilotanlage steht uns ein ideales Instrument zur Verfügung, um diese Technologien im nah-industriellen Massstab weiterzuentwickeln.

Wasserspaltung mit Zinkdampf

Während das PSI den ersten, solaren Prozess-Schritt weiterentwickelt, ist es den ETH-Wissenschaftlern nun gelungen, den zweiten, nicht-solaren Schritt so

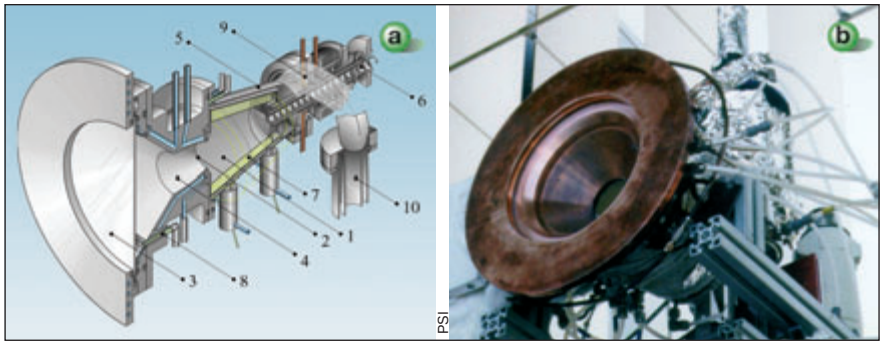


Bild 5 Solarchemischer Drehkavität-Reaktor

(a) Schematische Darstellung eines solarchemischen Drehkavität-Reaktors für die thermische Zersetzung von ZnO zu Zn und O_2 bei 2000 °C. Der Reaktor besteht aus einem rotierenden konischen Hohlraum-Receiver (1) mit einer Öffnung, der Apertur (2), für den Eintritt von konzentrierter Solarstrahlung durch ein Quarzfenster (3). Die solare Strahlungsfluss-Konzentration wird weiter erhöht durch den Einbau eines Sekundärkonzentrators (CPC) (4) vor der Apertur. Fenster und CPC sind wassergekühlt und in eine konzentrische, nicht rotierende konische Schale integriert (5). Mit einem Schneckenförderer (6) werden ZnO-Partikel in den hinteren Teil des Reaktionsraums eingebracht. Durch die Zentripetalbeschleunigung wird das ZnO-Pulver an die Wand gedrückt und bildet dort eine Schicht aus ZnO (7), wodurch die thermische Belastung auf die Innenwände der Kavität reduziert wird. Ein Gasstrom strömt tangential in den vorderen Teil des Hohlraum-Receivers (8) ein, kühlt das Fenster und hält es gleichzeitig frei von kondensierbaren Gasen. Die gasförmigen Produkte Zn und O_2 verlassen die Reaktionskammer kontinuierlich durch einen Ausgangskanal (9), wo sie in einem Quensch-Apparat rasch abgeschreckt werden (10).
(b) Foto des Solarreaktors gemäss (a)

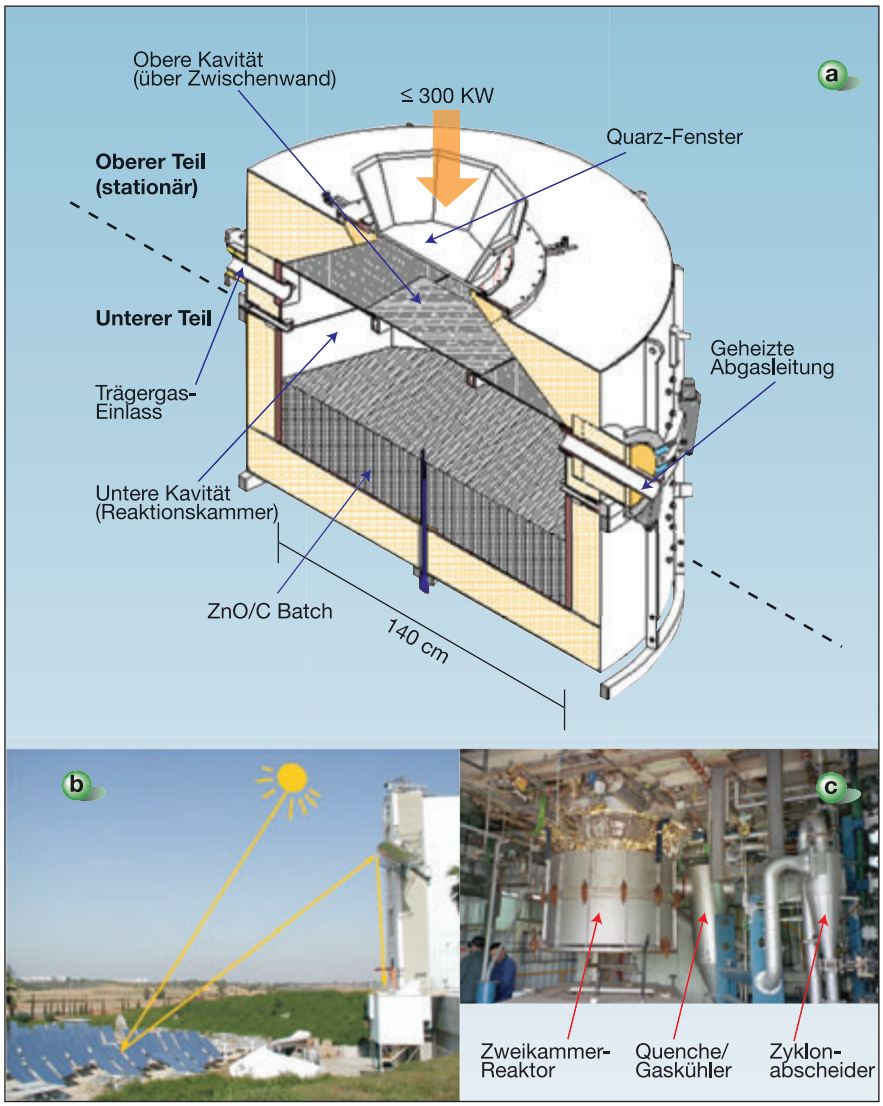


Bild 6 Solzinc-Pilotanlage

(a) Schematische Darstellung des solarchemischen Zwei-Kammer-Pilotreaktors für die karbothermische Reduktion von Zinkoxid. Zwei Kavitäten sind in Serie geschaltet und durch eine gut Wärme leitende, dünne Graphitwand getrennt, wobei die obere als Strahlungsabsorber dient und die untere die Reaktionskammer bildet. Die obere Kavität hat eine mit einem Quarzfenster versehene Öffnung, die Apertur, durch die die konzentrierte Solarstrahlung eintreten kann. Ein Sekundärkonzentrator zur weiteren Verstärkung der solaren Strahlungsdichte endet direkt über der Apertur. Die Reaktionskammer ist gut isoliert und enthält eine Schüttung aus ZnO und Kohlenstoff. Sie wird durch Wärmestrahlung der Graphit-Zwischenwand aufgeheizt. In dieser Anordnung schützt die Zwischenwand das Quarzfenster gegen Partikel und kondensierbare Gase aus der Reaktionskammer. Der chemische Reaktor ist speziell für vertikal eintreffende Strahlung konzipiert: ein hyperbolischer Reflektor an der Spitze eines Turms lenkt das Sonnenlicht vom Heliostatenfeld auf den Empfänger am Boden (so genannte Cassegrain-Optik, siehe [b]).
(b) Das Heliostatenfeld und der Solarturm am Weizmann Institute of Science in Rehovot/Israel. Für die Solzinc-Pilotanlage wird die Solarstrahlung durch den am Turm angebauten hyperbolischen Spiegel umgelenkt und tritt von oben in das weisse Gebäude ein, in dem sich die Pilotanlage unter einem Sekundärkonzentrator befindet.
(c) Die Solzinc-Pilotanlage mit dem Reaktor und Teilen des Abgassystems zur Gewinnung von solarem Zink in Staubform.

weit zu verfeinern, dass Wasserstoffausbeuten bis zu 80% möglich sind. Hierzu werden zunächst Zink-Nanopartikel durch Quenschen (rasches Abschrecken) von Zinkdampf mit Wasserdampf bei kontrollierter Temperatur und Verweilzeit im Reaktor hergestellt. Die Zink-Nanopartikel hydrolysieren bei hinreichend kleiner Partikelgrösse um 20 Nanometer auf Grund ihrer grossen spezifischen Oberfläche, des verbesserten Wärme- und Stofftransports und einer erhöhten Reaktionsrate vollständig zu Zinkoxid und Wasserstoff. Vorteile dieser neuartigen Reaktortechnologie sind Einfachheit, Skalierbarkeit sowie Kontrollierbarkeit der Prozessführung. Sowohl der Hydrolyseprozess als auch der Hydrolysereaktor wurden von der ETH patentiert und werden derzeit mit Hilfe rechnergestützter Modelle optimiert.

Ein zentraler Aspekt der Forschungsarbeit am PSI und an der ETH ist die Modellierung des Wärme- und Stofftransports in chemischen Reaktorsystemen. Vor allem die Strahlungsübertragung, gekoppelt mit der chemischen Reaktionskinetik, bildet ein komplexes Phänomen, das mit CFD (Computational Fluid Dynamics) und Monte-Carlo-Ray-Tracing-Methoden untersucht wird. Diese Modelle dienen dem fundamentalen Verständnis der solaren thermochemischen Prozesse und deren Optimierung. Die Forschung auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Solarchemie an der ETH und am PSI verbindet somit grundlegende physikalische und chemische Studien mit der verfahrenstechnischen Entwicklung von solarchemischen Reaktoren.

Solarer Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen

Die Substitution von fossilen Brennstoffen durch rein solar hergestellte Brennstoffe wie solaren Wasserstoff ist ein längerfristiges Ziel, zu dessen Verwirklichung die Entwicklung neuartiger solarchemischer Technologien erforderlich ist. Mittelfristig ist es durchaus sinnvoll, solare Hybridprozesse zu entwickeln, die zwar fossile Brennstoffe als chemische Ausgangsstoffe zur Herstellung von Wasserstoff verwenden, die benötigte Prozesswärme jedoch ausschliesslich aus konzentrierter Sonnenenergie beziehen. Solche Brennstoffe sind somit sauberer als die ursprünglichen fossilen Brennstoffe. Die hybriden Prozesse schaffen eine Verbindung zwischen den heutigen fossilen Technologien und den zukünftigen solarchemischen Technologien und ermöglichen den Übergang zu den solaren Brennstoffen.

Bild 7 zeigt zwei energieaufwändige solare Hybridprozesse, nämlich das Kracken und die Vergasung bzw. Reformierung von fossilen Brennstoffen. Diese werden in Wasserstoff umgewandelt und gleichzeitig dekarbonisiert, wobei der Kohlenstoffanteil beseitigt wird, um CO_2-Emissionen zu verhindern. Durch die Zufuhr von Sonnenenergie als Prozesswärme wird der Heizwert des fossilen Brennstoffs erhöht.

Das solare Kracken bezieht sich auf die thermische Zersetzung von Erdgas, Öl und anderen Kohlenwasserstoffen, wie aus der vereinfachten Nettoreaktion zu ersehen ist:

$$C_xH_y = xC(gr) + \frac{y}{2}H_2 \qquad (5)$$

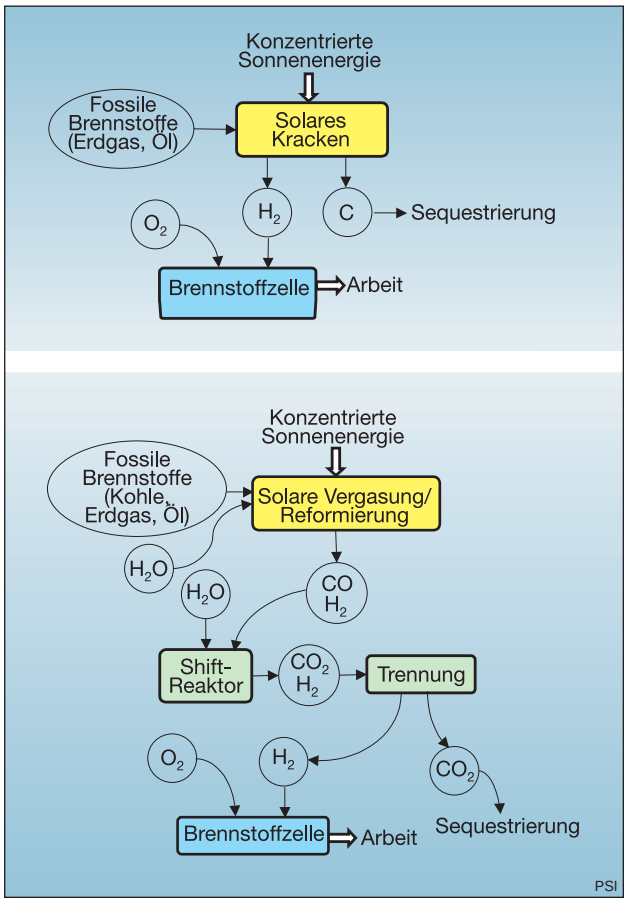


Bild 7 Schema von zwei solaren Hybridprozessen für die Dekarbonisierung von fossilen Brennstoffen zur Herstellung von Wasserstoff und Strom

Fossile Brennstoffe dienen als Rohmaterial und die konzentrierte Sonnenenergie als Quelle für die Hochtemperatur-Prozesswärme. Die Vorteile dieser Prozessführung sind dreifach: 1) CO_2-Emissionen werden vermieden; 2) die gasförmigen Produkte werden nicht durch Verbrennungsnebenprodukte kontaminiert; 3) der Heizwert des fossilen Brennstoffs wird erhöht.

Insbesondere bei der Reaktion mit Kohle können auch andere Verbindungen entstehen, wobei allerdings einige Verunreinigungen des Rohmaterials bereits vor dem Dekarbonierungsprozess entfernt werden. Das Hauptprodukt ist qualitativ hoch stehendes Synthesegas als Ausgangsstoff für eine Vielzahl von synthetischen Treibstoffen wie Fischer-Tropsch-Chemikalien, Wasserstoff, Ammoniak und Methanol. Die Qualität des Synthesegases wird hauptsächlich durch die Molverhältnisse von H_2:CO und CO_2:CO bestimmt. Beispielsweise liefert die solare Dampfvergasung von Anthrazitkohle oberhalb von etwa 1200 °C ein Synthesegas mit einem Molverhältnis von H_2:CO = 1,2 und einem Molverhältnis von CO_2:CO = 0,01. Über eine katalytische Wassergas-Shift-Reaktion ($CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$) kann der Grossteil des CO im Synthesegas mit Wasserdampf zu CO_2 umgesetzt und dadurch die Wasserstoffmenge erhöht werden. Das produzierte CO_2 kann anschliessend mit der PSA-Technik (Pressure Swing Adsorption) vom Wasserstoff getrennt werden.

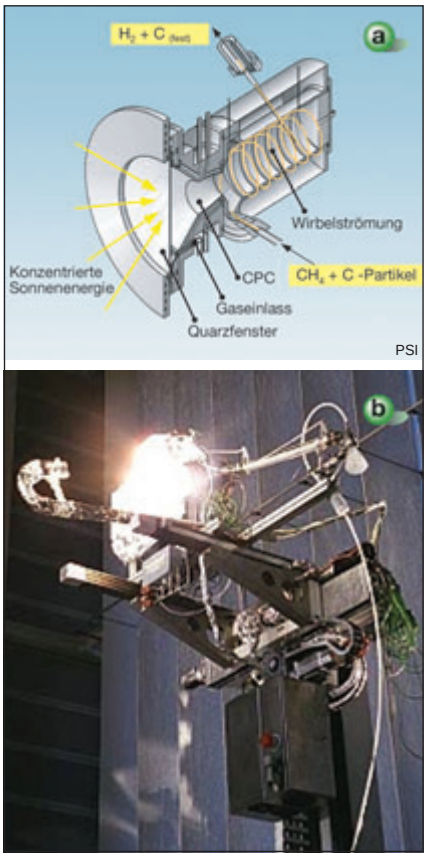


Bild 8 Solarchemischer Reaktor

(a) Schematische Darstellung eines solarchemischen Reaktors für die thermische Zersetzung von CH_4. In der Kavität wird eine Wirbelströmung aus CH_4 und Kohlenstoff-Partikeln erzeugt, wobei Letztere als Strahlungsabsorber und Nukleationskeime dienen; (b) Test des Prototypreaktors gemäss (a) mit 5 kW Leistung im Solarofen des PSI.

Je nach Reaktionskinetik und Verunreinigung des Rohmaterials können weitere Verbindungen entstehen. Die thermische Zersetzung liefert ein kohlenstoffreiches Kondensat und ein wasserstoffreiches Gas. Die kohlehaltigen festen Bestandteile können entweder als Reduktionsmittel in metallurgischen Prozessen eingesetzt, als Gebrauchsmaterial unter weniger strengen CO_2-Einschränkungen verwendet oder ohne CO_2-Emissionen sequestriert werden. Feste Kohle lässt sich einfacher trennen, behandeln, transportieren und lagern als gasförmiges CO_2. Während Dampfreformierung bzw. Dampfvergasung zusätzliche Reaktionsschritte zur Konvertierung von CO und anschliessendes Abtrennen von CO_2 verlangen, erledigt das thermische Kracken die Beseitigung und Abscheidung von Kohle in einem einzigen Schritt. Nachteilig ist zwar der Energieverlust bei der Endlagerung der Kohle, dennoch kann das solare Kracken die bevorzugte Option für Erdgas und andere Kohlenwasserstoffe mit hohen H/C-Verhältnissen darstellen.

Wasserstoff aus Methan

Die solarthermische Zersetzung von Methan (CH_4) zur Herstellung von Wasserstoff und Kohlenstoff wurde experimentell untersucht. Der in Bild 8a gezeigte Solarreaktor besteht aus einer Kavität, in der eine mit Kohlenstoffpartikeln beladene Wirbelströmung aus CH_4 erzeugt wird. Die Kohlenstoffpartikel absorbieren die Solarstrahlung und dienen gleichzeitig als Nukleationskeime für den neu gebildeten Kohlenstoff. Ein Prototypreaktor mit einer solaren Leistung von 5 kW, der mit Strahlungsintensitäten von teilweise über 3500 kW/m^2 im Solarofen am PSI und im Hochfluss-Sonnensimulator an der ETH getestet wurde (Bild 8b), erzielte einen CH_4-Umsatz zu H_2 und festem C von 67% bei einer Temperatur von 1300°C und einem Druck von 1 bar. Die Struktur des gebildeten Kohlenstoffs gleicht derjenigen von Nanofasern, wie aus Bild 9 zu ersehen ist. Der vorgeschlagene solare Hybridprozess schont die Erdgasreserven, reduziert die CO_2-Emissionen und stellt eine Übergangsphase auf dem Weg zu solarem Wasserstoff dar.

Die Dampfreformierung von Erdgas, Öl und anderen Kohlenwasserstoffen sowie die Dampfvergasung von Kohle und anderen kohlehaltigen Materialien kann durch eine vereinfachte Nettoreaktion dargestellt werden:

$$C_xH_y + xH_2O = \left(\frac{y}{2} + x\right)H_2 + xCO \quad (6)$$

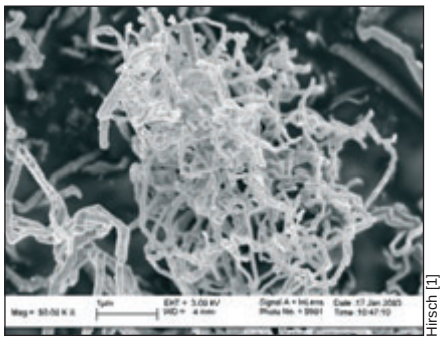

Hirsch [1]

Bild 9 Kohlenstoff-Nanofasern, entstanden bei der solarthermischen Zersetzung von CH_4, aufgenommen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) [1]

Die hohe Qualität des Synthesegases, die durch thermodynamische Berechnungen vorausgesagt wird, konnte experimentell nachgewiesen werden. Dazu wurde eine mit Wasserdampf durchströmte Wirbelschicht direkt der konzentrierten Solarstrahlung im Hochfluss-Sonnensimulator der ETH ausgesetzt. Bild 10 zeigt die Zusammensetzung des Produktgases als Funktion der Temperatur, wie sie im Gaschromatographen (GC) gemessen wurde. Nicht berücksichtigt ist hier der überschüssige Wasserdampf, der stromabwärts auskondensiert wurde. Oberhalb von 1000°C besteht das Synthesegas-Gemisch hauptsächlich aus einer äquimolaren Mischung von H_2 und CO, wie im thermodynamischen Gleichgewicht zu erwarten ist. Der CO_2-Gehalt beträgt weniger als 5%. Dieses Synthesegas besitzt eine bedeutend höhere Qualität als jenes, das in konventionellen autothermen Reformern gewonnen wird (z.B. Texaco-Prozess), neben den zusätzlichen Vorteilen des erhöhten Heizwerts durch die Zuführung von Sonnenenergie.

Solare Veredelung von Kohle und Erdgas

Der Exergie-Wirkungsgrad für die betrachteten Wege zu solarem Wasserstoff ist definiert als Verhältnis der Arbeitsleistung einer Brennstoffzelle $W_{F.C.}$ zum gesamten thermischen Energieeintrag aus Sonnenenergie Q_{solar} und Heizwert der fossilen Ausgangsstoffe HHV_{fossil}:

$$\eta_{exergie} = \frac{W_{F.C.}}{Q_{solar} + HHV_{fossil}} \qquad (7)$$

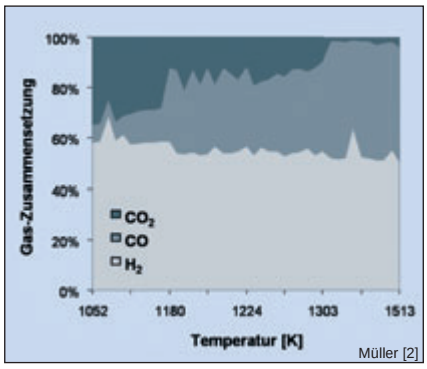
Dabei gibt HHV_{fossil} den oberen Heizwert des fossilen Brennstoffs an, z.B. etwa 890 kJ•mol^{-1} für Erdgas. Nimmt man eine H_2/O_2-Brennstoffzelle mit einem Wirkungsgrad von 65%, dann ist der Exergie-Wirkungsgrad für das solare Kracken 30%. Wird die Kohle sequestriert, entstehen auf diesem Weg keine CO_2-Emissionen. Allerdings bezahlt man für die komplette Vermeidung von CO_2-Emissionen einen energetischen Preis, indem die Stromproduktion um 30% tiefer ist als bei der direkten Verwendung von Erdgas zum Betrieb eines Kombiprozesses mit 55% Wirkungsgrad.

Nimmt man wiederum eine H_2/O_2-Brennstoffzelle mit einem Wirkungsgrad von 65% und einen oberen Heizwert HHV_{fossil} von 35700 kJ•kg^{-1} für Anthrazitkohle, dann beträgt der Exergie-Wirkungsgrad für die solare Kohlevergasung 46%. Auf diesem Weg kann, je nach verwendeter Kohle, etwa 1,7…1,8 Mal mehr elektrischer Strom erzeugt werden als bei der direkten Verwendung von Kohle in einer Dampfturbine mit 35% Wirkungsgrad. Wenn CO_2 nicht sequestriert wird, erreichen die spezifischen CO_2-Emissionen bei der solaren Kohlevergasung 0,53…0,56 kg CO_2/kWh$_e$, was etwa der Hälfte der Emissionen eines konventionellen Kraftwerks entspricht.

Solarer Wasserstoff für eine umweltfreundliche Energieversorgung

Konzentrierte Sonnenenergie kann mittels thermochemischer Hochtemperatur-Prozesse effizient in speicher- und transportierbare chemische Brennstoffe wie Wasserstoff umgewandelt werden. Dadurch lässt sich der Ausstoss von Treibhausgasen und anderen Schadstoffen vermeiden, die bei der Wärme- und Stromproduktion durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen entstehen. Solare Brennstoffe ermöglichen eine umweltfreundliche Energieversorgung bei zentralen und dezentralen Anwendungen im Elektrizitäts-, Transport- und Chemiesektor der Weltenergiewirtschaft und leisten damit einen Beitrag zur Lösung der Klimaproblematik.

Obwohl intensiv an Prozessen gearbeitet wird, mit denen aus Sonnenlicht und Wasser solare Brennstoffe hergestellt werden können, wird es noch einige Zeit dauern, bis diese neue Technologie für



Müller [2]

Bild 10 Änderung der Zusammensetzung des Produktgases (gemessen mit einem Gaschromatographen) als Funktion der Temperatur der Wirbelschicht während der solaren Dampfvergasung von Kohle [2]

Hochtemperatur-Solarchemie: Gemeinsame Forschung am PSI und an der ETH

Das Forschungsprogramm des Labors für Solartechnik (LST) am PSI bezweckt langfristig die Entwicklung von Brennstoffen, die mit einer sauberen, universellen und nachhaltigen Energiequelle hergestellt werden. Solare Brennstoffe können für eine umweltfreundliche Energieversorgung genutzt werden und damit einen Beitrag zur Lösung der Klimaproblematik leisten. Das Leitbild des Labors für Solartechnik besteht in der Entwicklung der Wissenschaft und Technologie zur Umwandlung der Sonnenenergie in chemische Energieträger in einem industriellen Massstab und mit einem thermochemischen Prozess, der diese Umwandlung wirtschaftlicher durchführt als jeder andere gegenwärtig verfügbare solare Prozess zur Herstellung von Brennstoffen. Weitere Informationen sind zu finden unter *http://solar.web.psi.ch*.

Das Forschungsprogramm der Professur für erneuerbare Energieträger (PRE) an der ETH Zürich ist ausgerichtet auf die Förderung der thermischen und thermochemischen Ingenieurwissenschaften mit Anwendung auf dem Gebiet der erneuerbaren Energietechnologien. Es umfasst als Schwerpunkte die Strahlungsübertragung von chemisch reaktiven Mehrphasen-Strömungen, die thermodynamische Analyse von neuartigen Energieumwandlungsprozessen, die Verfahrenstechnik von thermochemischen Hochtemperatur-Reaktoren, solarchemische Prozesse zur Herstellung von Wasserstoff sowie Technologien zur Dekarbonisierung und Verminderung des CO_2-Ausstosses. Weitere Informationen sind zu finden unter *www.pre.ethz.ch*.

Die Forschungsprogramme auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Solarchemie an der ETH und am PSI werden teilweise finanziert vom Bundesamt für Energie (BFE), vom Bundesamt für Bildung und Wissenschaft (BBW), vom Schweizerischen Nationalfonds (SNF) und von der Europäischen Union.

kommerzielle Anwendungen in grossem Massstab einsatzbereit ist. Es bestehen jedoch gute Aussichten, dass die solaren thermochemischen Technologien gegenüber konventionellen, auf fossilen Energieträgern basierenden Technologien konkurrenzfähig werden, sofern die externen Kosten für die Verbrennung fossiler Brennstoffe berücksichtigt werden. Dies zeigen Studien, die in Projekten an der ETH und am PSI in Zusammenarbeit mit der Internationalen Energie-Agentur (IEA) und industriellen Partnern durchgeführt wurden.

Referenzen

[1] D. Hirsch, A. Steinfeld: International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 29, pp. 47-55, 2004

[2] R. Müller, P. von Zedtwitz, A. Wokaun, A. Steinfeld: Chem. Eng. Sci. Vol. 58, pp. 5111-5119, 2003

Weiterführende Literatur

A. Steinfeld, A. Meier: Solar Fuels and Materials, Encyclopedia of Energy, C. J. Cleveland Ed., Elsevier, Vol. 5, pp. 623-637, 2004

Angaben zu den Autoren

Dr. ***Anton Meier*** ist seit 1990 wissenschaftlicher Mitarbeiter des Labors für Solartechnik und seit 2005 Leiter der Gruppe Solare Verfahrenstechnik am PSI. Dr. Meier leitet seit 2004 das Solarchemie-Programm von IEA – SolarPACES (International Energy Agency - Solar Power And Chemical Energy Systems).
PSI – Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, anton.meier@psi.ch.

Dr. ***Christian Wieckert*** war 14 Jahren lang bei ABB im Bereich F&E für Müllverbrennungsanlagen tätig, bevor er im Jahr 2000 an das PSI wechselte. Dort arbeitet er als Projektleiter im Labor für Solartechnik. Er ist wissenschaftlicher Koordinator des EU-Forschungsprojektes SOLZINC.
PSI – Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen-PSI, christian.wieckert@psi.ch.

Dr. ***Aldo Steinfeld*** ist seit 2004 Ausserordentlicher Professor für Erneuerbare Energieträger an der ETH Zürich. Er leitet ebenfalls das Labor für Solartechnik am Paul Scherrer Institut. Prof. Steinfeld ist der Herausgeber von ASME – Journal of Solar Energy Engineering.
ETH – Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 8092 Zürich, aldo.steinfeld@eth.ch

[1] Erweiterte Fassung eines Beitrags, der im GWA 3/2005 erschienen ist