

Norbert Auner und Gerd Lippold

Von Sand und Sonne zu Elektrizität und Wasserstoff

Polysilane als Basismaterialien zur Erzeugung von hochreinem Silicium, Silicium-Halbleiterschichten und Wasserstoff-Speicherverbindungen

Die Endlichkeit fossiler Energieträger einerseits, aber auch die dringend erforderliche Reduktion des CO₂-Ausstoßes als Klima zerstörendes Treibhausgas andererseits, führen dazu, dass die Erforschung alternativer Energien in den Mittelpunkt zahlreicher Forschungsaktivitäten rückt. Dabei stehen besonders die Erneuerbaren Energien – die Nutzung der Sonnenenergie, der Wind- und Wasserkraft sowie der Biomasse – im Focus des Interesses. Diese Energieformen sind zwar ausreichend verfügbar, werden aber meistens nur an Orten mangelnder Infrastruktur zugänglich. Dies zeigt sich insbesondere in der Kraft der Sonne: Innerhalb einer Stunde erreicht mehr Sonnenenergie die Erdoberfläche, als die Menschheit während eines ganzen Jahres verbraucht. Mit anderen Worten: Etwa 700 km x 700 km der Sahara mit Solarmodulen belegt, würde den weltweiten Gesamtenergiebedarf permanent decken!

Vor diesem Hintergrund stellt sich deshalb zwingend die Frage nach einer effizienten Energieumwandlung von Sonnenenergie in Elektrizität, die entweder in existierende Netze eingespeist wird oder – für den Fall einer Überproduktion – chemisch sicher und permanent gespeichert an Orte des Bedarfs transportiert werden kann. Unsere globale Energiediskussion und die daraus resultierenden Fragestellungen fasste Jürgen Hambrecht, Vorstandsvorsitzender der BASF, im November 2006 so zusammen: „Our fantasy is that in the future solar energy will be stored and put to work chemically, much as it is in plants through photosynthesis“ [1].

Sonnenenergie steht frei zur Verfügung; ihre Umwandlung in elektrische Energie, die in Photovoltaikmodulen (PV) erfolgt, ist jedoch teuer. Einer großflächigen Nutzung von PV-Anlagen steht daher weltweit der hohe Preis von PV-Zellen auf Basis von polykristallinem Silicium entgegen. Die Fortschritte in Forschung und Entwicklung zur Produktion von hocheffizienten Modulen sind indes äußerst vielversprechend: Wie dem Economist 2007 zu entnehmen ist, stieg die Effizienz der Zellen aus kristallinem Silicium in den letzten 50-60 Jahren von anfangs 6 auf heute über 20 %; Fortschritte in ihrer Fertigung reduzierten die Kosten dramatisch von ca. USD 200/Watt um 1950 auf USD 2,70/Watt im Jahr 2004. Für die nächsten drei bis acht Jahre erwarten Experten, dass Solarstrom mit dem Preis für Netzstrom herkömmlicher Erzeugung konkurrieren kann (grid-parity) – dies ist in Japan heute schon erreicht. In Deutschland werden die Erzeuger von Solarstrom großzügig über Einspeiseregulungen subventioniert, ein Modell, dass von vielen Staaten schrittweise übernommen wird – damit wird Solarstrom attraktiv. Deutschland verfügt heute weltweit über die am weitesten entwickelte Solarstromindustrie; die Marktanteile steigerten sich während der letzten fünf Jahre um 40 %/Jahr und erreichten im Jahr 2005 ein globales Umsatzvolumen von USD 11 Mrd. [2].

Die Solarbranche hat sich zum „Big Business“ entwickelt. Nachdem die Photovoltaik in den Anfängen von den „Silicium-Abfällen“ der Halbleitertechnologie lebte und sich die rasante Entwicklung von einer anfänglichen Nutzung in der Raumfahrt auch für terrestrische Anwendungen einer dezentralen Energieversorgung an Orten mangelnder Infrastruktur als geeignet erwies, führte dies etwa ab dem Jahr 2000 zur gezielten großtechnischen Darstellung von PV-Silicium nach dem Siemens- oder Degussa-Prozess. Während im ersteren Fall flüssiges Trichlorsilan aus metallurgischem Silicium (Abbildung 1e) und Chlorwasserstoff erzeugt und destillativ aufgereinigt wird, wird Monosilan, SiH_4 , die Ausgangsverbindung im Degussa-Prozess, durch katalytische Konvertierungsreaktion aus Trichlorsilan und Wasserstoff erzeugt. Durch thermische Zersetzung bei ca. 1100 bzw. 900 °C wird aus beiden Vorstufen Silicium in PV-Qualität generiert. Nach Aufschmelzen des polykristallinen Materials wird dieses Silicium nach unterschiedlichen Verfahren zunächst zu Wafern, anschließend zu Modulen verarbeitet. In beiden Prozessen werden dabei, ausgehend vom Trichlor- bzw. Monosilan pro kg erzeugtem Silicium mehr als 18 kg Siliciumtetrachlorid (STC) gebildet, das wieder hydriert oder zu pyrogener Kieselsäure oder in Glasfasermaterial umgearbeitet wird. Eine erfolgreiche Prozessierung nach dem Siemens- oder Degussa-Prozess ist anspruchsvoll und investitionsintensiv und wird deshalb weltweit nur von wenigen Firmen durchgeführt. Wegen der durch den boomenden Photovoltaikmarkt weiterhin zunehmenden Nachfrage hat dies weitreichende Konsequenzen: (i) das PV-Silicium wird immer knapper und damit auch teurer, (ii) die Entwicklungen neuer Dünnschichttechnologien werden verstärkt voran getrieben und (iii) wird die Einführung neuer Prozesse zur Erzeugung von PV-Silicium zunehmend attraktiver.

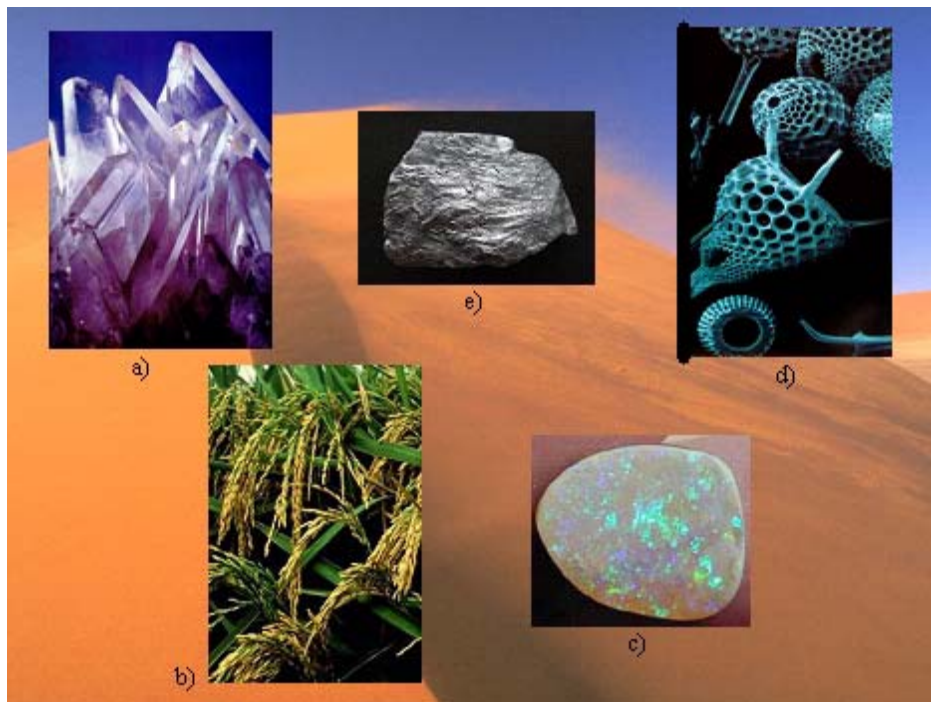


Abb. 1: Sand (SiO_2) in seinen natürlichen Erscheinungsformen und daraus generiertes Silicium: Vor dem Hintergrund einer Sandwüste (SiO_2 -Gehalt > 85 %) sind abgebildet a) der Bergkristall b) Reispflanzen: die Verbrennung liefert Reisasche mit hohem SiO_2 -Anteil c) Opal d) Diatomeen e) metallurgisches Silicium.

Vor diesem Hintergrund entwickelte unsere Arbeitsgruppe zwei neue, korrespondierende Syntheseverfahren zur Erzeugung von PV-Silicium, die in den Abbildungen 2a und 2b dargestellt sind. Während die konventionelle Siliciumproduktion von teuren Quarzmaterialien ausgeht, starten die

hier vorgestellten Prozesse von Sand, z.B. aus der Wüste, dem Meer oder auch von Reisasche, die u.a. aus nahezu reinem Siliciumdioxid besteht (Abbildung 1). Im Verfahren nach (2a) werden diese Sande mit Kohlenstoff beliebiger Quelle gemischt und in Gegenwart von Chlorwasserstoff bei Temperaturen oberhalb 1200 °C nahezu quantitativ direkt zu STC umgesetzt. Das während der Reaktion freigesetzte Wasser ($\text{SiO}_2 + 4 \text{HCl} \rightarrow \text{SiCl}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$) führt dabei nicht zur Hydrolyse des Produktes; das Wassergasgleichgewicht ist völlig in Richtung CO und Wasserstoff verschoben. Der Energieeintrag kann konventionell oder über Mikrowellen-Einstrahlung erfolgen, dabei dient der Kohlenstoff als Reduktionsmittel und im letzteren Fall auch als Wärmeüberträger [3].

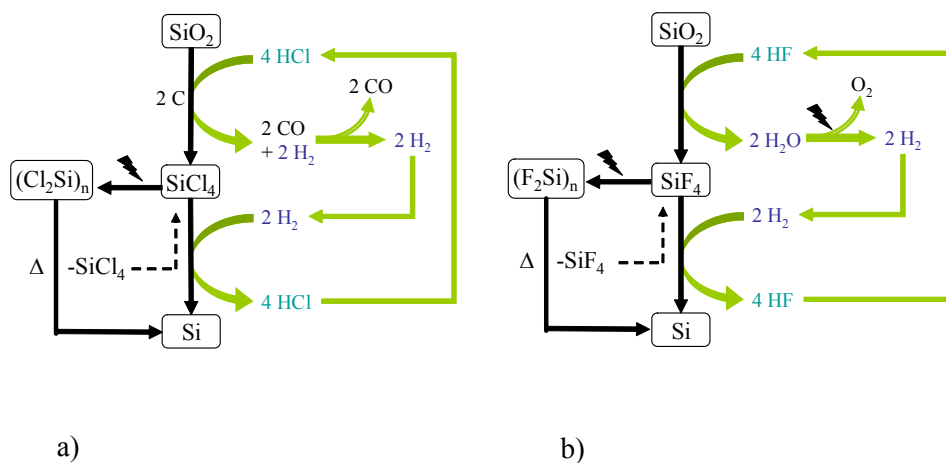


Abb. 2: Zwei- und dreistufige Gewinnung von Silicium aus Sand: a) kohlehaltiger Prozess, derzeit Optimierung im Technikumsbetrieb und b) kohlefreie Darstellung von Silicium (im Labor verifiziert).

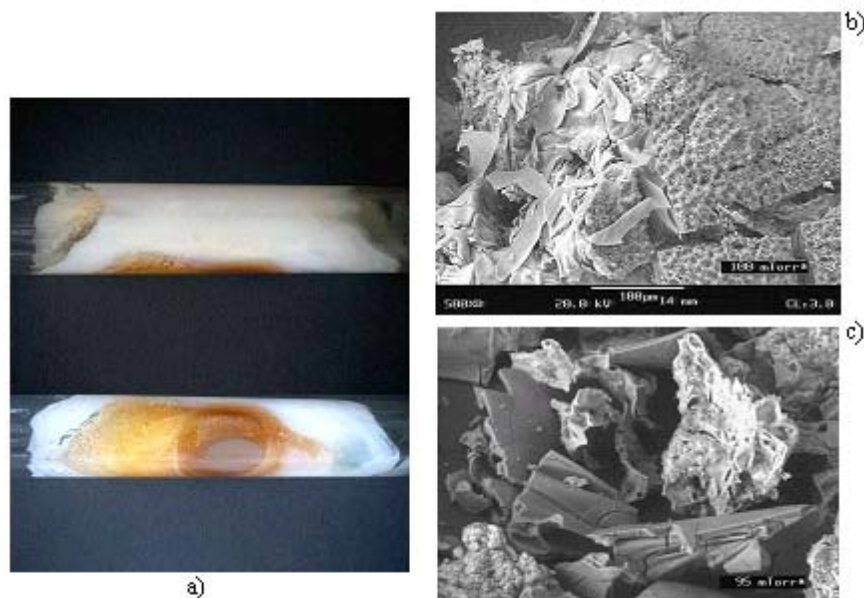


Abb. 3: (a) Wachsartiges, weißes, perchloriertes Polysilan. Die braunen Flächen belegen bereits eine beginnende Bildung von amorphem Si. (b) REM-Aufnahme des weißen Polymers (500-fache Vergrößerung). EDX-Analyse (an Luft) [Gew.%]: Si 30.23, Cl 63.46, O 0.63. (c) REM-Aufnahme einer Si-Probe, die direkt aus SiCl_4 abgeschieden wurde (500-fache Vergrößerung). Deutlich erkennbar sind kristalline Si-Anteile neben weißem Polymer. EDX-Analyse (an Luft) [Gew.%]: Si 89.72, Cl 1.55, O 8.74.

Unter weiterem Mikrowelleneintrag wird das STC in Gegenwart von Wasserstoff zu elementarem Silicium reduziert, das dabei in PV-Qualität anfällt. Nachteilig ist, dass das Silicium die Reaktorinnenfläche belegt und sich diese stark erhitzt – um ein Aufschmelzen des Reaktors zu vermeiden, muss die Reaktion daher abgebrochen werden. Reduziert man jedoch den Energieeintrag deutlich (im Laborexperiment von ca. 350 auf 50 Watt), belegt sich der Reaktor je nach Reaktionsbedingungen mit wachsartig festem oder hochviskosem, STC-löslichem, perchloriertem Polysilan $(\text{Cl}_2\text{Si})_n$, das sich aus cyclischen und kettenförmigen Verbindungen der allgemeinen Formeln $\text{Si}_n\text{Cl}_{2n}$ bzw. $\text{Si}_n\text{Cl}_{2n+2}$ zusammensetzt (Abbildungen 3a-c). In einer nachgeschalteten Pyrolyse wird das Polysilan dann oberhalb von 400 °C in Silicium und STC überführt, das anschließend wieder in den Polymerisationsprozess eingeschleust wird [4].

Die plasmachemische Herstellung von perchloriertem Polysilan in Gegenwart von Wasserstoff wurde im Pilotprojekt inzwischen optimiert und auch für die Darstellung von Silicium hoher Reinheit in den Technikumsmaßstab übertragen. Anstelle des Mikrowelleneintrages kommen dort großvolumige Plasmaanregungsmethoden zum Einsatz, die bereits nahe Raumtemperatur zur Polysilanbildung führen. Überträgt man dieses Reaktionskonzept auf die plasmachemische Erzeugung von perfluoriertem Polysilan mit anschließender Pyrolyse zum Silicium (Abbildung 2b und Abbildungen 4a-c, $T \sim 500\text{-}600\text{ °C}$), steht damit ein absolut kohle/kohlendioxidfreier Zugang zu diesem Material – auch hier in PV-Qualität – zur Verfügung.

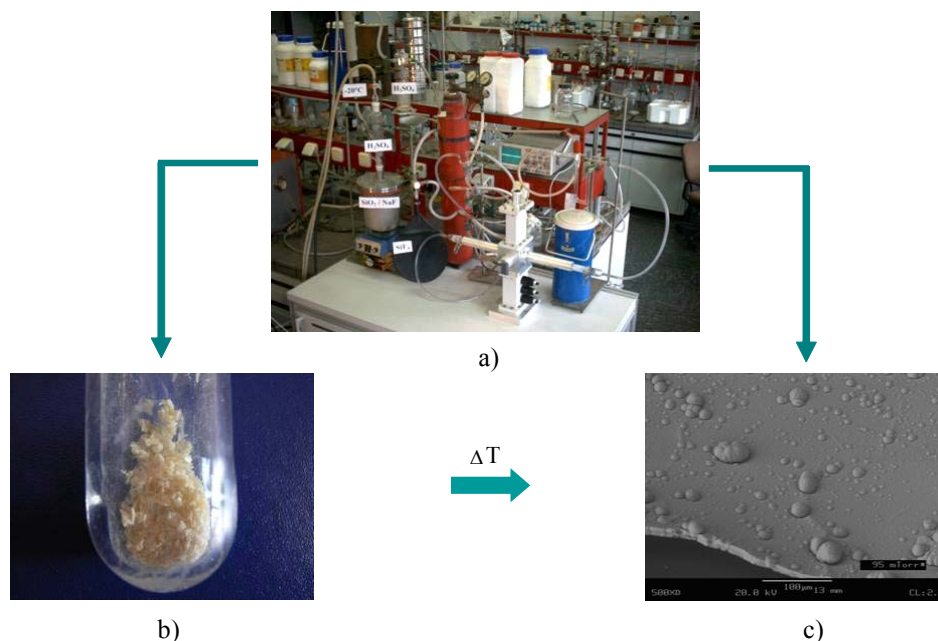


Abb. 4: (a) Laborapparatur zur mikrowellenassistenten Polysilan- und Siliciumdarstellung aus Sand; (b) perfluoriertes Polysilan, $(\text{F}_2\text{Si})_n$; (c) REM-Aufnahme (500-fache Vergrößerung) von Silicium, erzeugt über die kohlefreie SiF_4 -Route. EDX-Analyse an Luft [Gew.%]: Si 98.48, F 1.06, O 0.4.

Aus perchloriertem Polysilan erzeugtes, kristallines Silicium kann problemlos aufgeschmolzen und zu Wafern und Modulen verarbeitet werden. Damit wird dieses Verfahren zu einer Konkurrenz für die thermische Zersetzung von Trichlorsilan oder von Silan im Siemens- oder Degussa-Prozess. Darüber hinaus kann das in diesen Prozessen in großen Mengen anfallende STC quantitativ in PV-Silicium überführt werden, die technisch bereits realisierten Prozesse werden damit deutlich effizienter. Das neue, energieeffiziente Verfahren, das STC letztendlich vollständig in

PV-Silicium umwandelt, bietet weitere Möglichkeiten, gerade auch vor dem Hintergrund einer direkten STC-Synthese aus Sand.

Aufgrund ihrer Si–X (X = Si, Cl, F)-Funktionalität zeigen perhalogenierte Polysilane erwartungsgemäß eine hohe Reaktivität gegenüber Si–Si-Spaltungsreaktionen bzw. der Einführung anderer Substituenten, wie z.B. von Organoresten oder von Wasserstoff. Während die letztgenannten Substitutionsreaktionen weitgehend unter Erhalt des Polysilangerüsts erfolgen und damit die Polymere $(X_2Si)_n$ zu Ausgangsmaterialien einer weiten Palette neuer Derivate macht, führen Thermolyse- und/oder Chlorierungsreaktionen am Polychlorsilan unter Si–Si-Bindungsspaltung zum Aufbau definierter, kurzkettigerer Oligosilane Si_nCl_{2n+2} (n = 2 bis 7). Anschließende Hydrierung liefert Oligosilane Si_nH_{2n+2} (n = 2 bis 7), wichtige Ausgangsverbindungen zur Erzeugung dünner Silicium-Filme durch CVD- und PECVD-Verfahren (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). Der Einsatz hydrierter Oligosilane als SiH_4 -Additive führt zu drastisch erhöhten Silicium-Abscheidungsraten und erleichtert damit den Aufbau von effizienten amorphen α -Si/ μ -Si-Tandemzellen [5].

Vollständige Hydrierung von Polychlorsilan mit Lithiumaluminiumhydrid ($LiAlH_4$) führt in nahezu quantitativer Ausbeute zu einem weiß-gelblichen, festen Pulver, dem H-substituierten Polysilan $[(H_2Si)_n, HPS]$, einer stabilen Verbindung, die ausschließlich aus Silicium und Wasserstoff besteht. Erste spektroskopische Untersuchungen des nahezu unlöslichen Produktes legen einen linearen Aufbau mit mindestens 20 bis 40 Siliciumatomen im Polymergerüst nahe. Dieses Polymer überzieht sich an Luft nur langsam mit einer SiO_2 -Schicht, entzündet sich bei Temperaturen oberhalb 80 °C spontan und zersetzt sich unter Inertgas bei etwa 300 °C ohne aufzuschmelzen unter Bildung von Silicium und Wasserstoff. Die prozess-basierten Zusammenhänge sind schematisch in Abbildung 5 dargestellt und eröffnen insbesondere bezüglich HPS weitreichende Möglichkeiten einer technischen Nutzung:

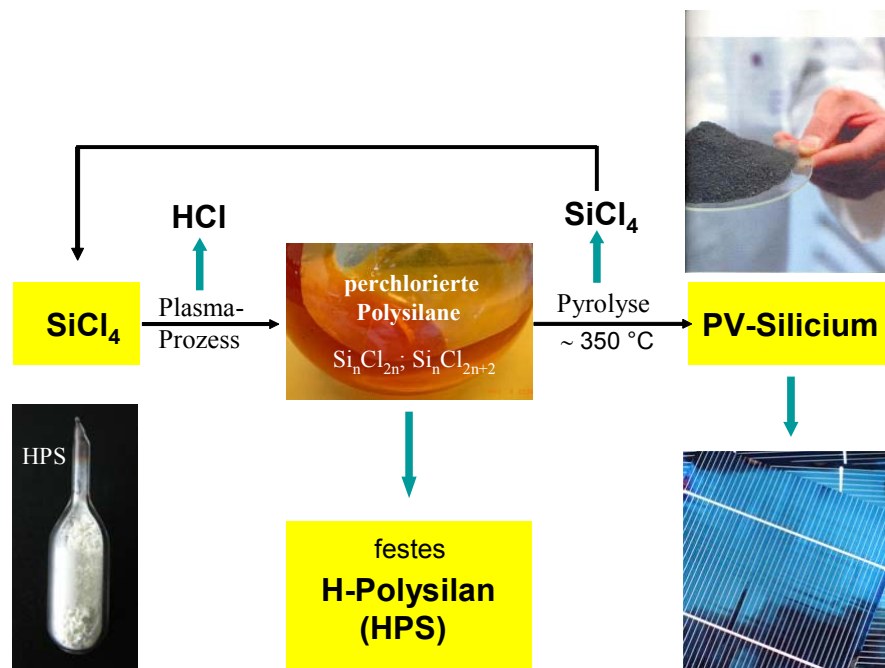


Abb. 5: Gesamtprozess: Perchlorierte Polysilane als Bindeglied zwischen Solarenergie und dezentraler Wasserstoff-erzeugung aus HPS

- 2006 berichtete ein japanisches Forscherteam über die Herstellung von Silicium-Filmen und -Transistoren aus Lösungen von Cyclopentasilan, $(\text{H}_2\text{Si})_5$. Mit Hilfe dieses Precursors wurden Poly-Si-Filme durch „spin-coating“ und „ink-jet printing“ zugänglich [6]. Cyclopentasilan, das 7-stufig nach dem Hengge-Verfahren dargestellt wurde [7], wird dabei sehr aufwändig und nur in g bzw. ml-Mengen erhalten. Dagegen wird HPS, ausgehend von SiO_2 , 3-stufig in kg-Mengen zugänglich $[\text{SiO}_2 \rightarrow \text{SiX}_4 \rightarrow (\text{X}_2\text{Si})_n \rightarrow (\text{H}_2\text{Si})_n]$ und sollte, ebenso wie die flüssige perchlorierte Vorstufe, als effizientes Reagens im Bereich der „printable electronics“ Verwendung finden. Erste Versuche zur Darstellung von Silicium-Halbleiterschichten durch Drucktechniken verliefen äußerst viel versprechend.
- Wie vorlaufend bereits angesprochen, kann HPS zur Niedertemperatur- und Normaldruckdarstellung von hochreinem Silicium genutzt werden ($T > 300^\circ \text{C}$).
- Besonders attraktiv erscheint HPS als effizienter Wasserstoffträger, der verlustfrei transportiert und uneingeschränkt gelagert werden kann. Mit einer Wasserstofffreisetzung von mehr als 20 Gew.%, bezogen auf eingesetztes HPS, überschreitet es in einer Reaktion mit Wasserdampf bei Temperaturen um 300°C bei weitem die DOE-Norm (20,35 vs. 6,5 % [8]). Damit wird HPS zum exzellenten Wasserstofflieferanten für sowohl stationäre als auch mobile Anwendungen, z.B. in Kombination mit PEM-Nieder- und/oder Hochtemperaturbrennstoffzellen.

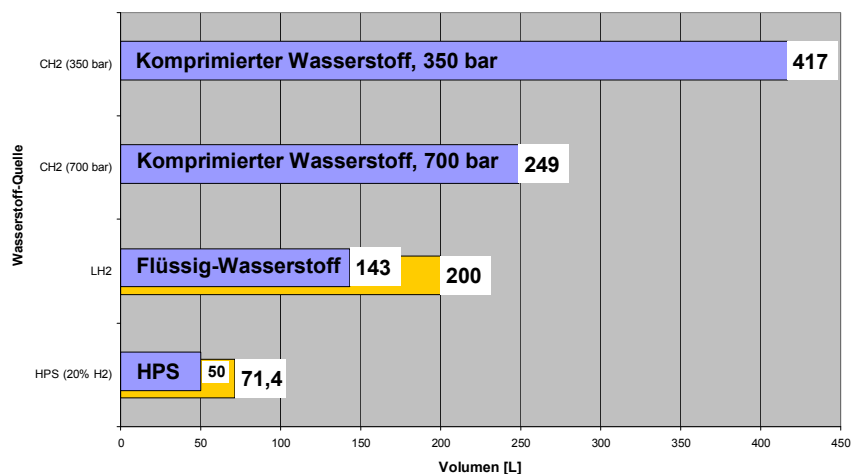


Abb. 6: Energieausstoß pro kg des Energieträgers im mobilen Antrieb. Zugrunde liegende Wirkungsgrade: Dieselmotor 36 %, Otto-Motor 33 %, Verbrennungsmotor H_2 33 %, PEM-Brennstoffzelle 50 %. Die gelb unterlegte Fläche von zusätzlich 1.32 kWh in der Spalte „HPS im Verbrennungsmotor“ entspricht einer direkten Verbrennung von HPS mit Nutzung der freigesetzten chemischen Energie. Ausschließliche Nutzung des aus HPS freigesetzten Wasserstoffs reduziert den Energieeintrag (blau hinterlegte Fläche).

Wie aus Abbildung 6 hervorgeht, ist der Energieausstoß pro kg HPS demjenigen konventioneller Energieträger in automobilen Systemen durchaus vergleichbar. Unter Berücksichtigung eines nahezu verdoppelten Wirkungsgrades im Vergleich eines Verbrennungsmotors zur PEM-Brennstoffzelle, ergäben sich bei einer „on-board“-Wasserstoffherzeugung aus HPS für beide Antriebssysteme vergleichbare Reichweiten. Da eine Wasserstofffreisetzung jedoch mit der Bildung von abrasivem, u.U. sehr feinem SiO_2 verbunden ist, empfiehlt sich HPS besonders als Speicher-substanz für stationäre Anwendungen, z.B. zur kostengünstigen H_2 -Erzeugung in Wasserstoff-

Tankstellen unter Vermeidung einer kostenintensiven Infrastruktur. Die Vorteile von HPS bzgl. einer Lagerung von Wasserstoff gehen eindrucksvoll aus Abbildung 7 hervor, in der die unterschiedlichen Speichervolumina für gasförmigen und flüssigen Wasserstoff gegen den Speicherbedarf von HPS aufgetragen sind.

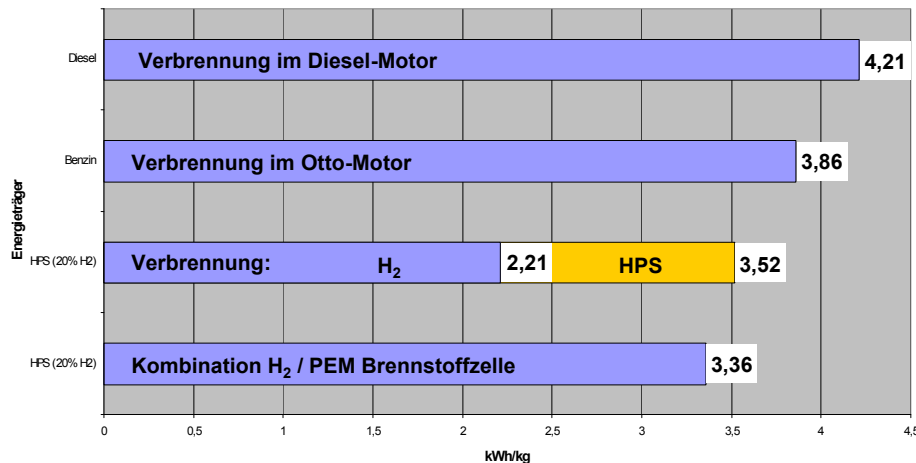


Abb. 7: Volumenerfordernisse zur Speicherung von je 10 kg Wasserstoff. Die für Flüssig-Wasserstoff und HPS angegebenen erweiterten Volumina beinhalten Systemzuschläge, z.B. für LH2 Material, Leerraum und Isolierung, für HPS Material, Packungsdichten je nach Formgebung des Materials (Pellets, Kugeln, Würfel usw.).

Aus vorstehenden Ausführungen wird ersichtlich, dass die anfänglich beschriebene Vorstellung Lambrecht's vor ihrer möglichen Realisierung steht: Solarenergetische Erzeugung von Siliciumtetrachlorid oder -fluorid aus natürlichen Sandvorkommen, beispielsweise im „Sunbelt“ unserer Erde, mit anschließender plasmachemischer Überführung in die korrespondierenden perhalogenierten Polysilane führt zu Schlüsselverbindungen einer Palette Silicium-basierter chemischer Produkte, zu Wasserstoff- und damit Energiespeicherverbindungen und zur kostengünstigen Erzeugung von PV-Silicium, das, zu Wafern und Modulen verarbeitet, vor Ort elektrischen Strom zur Einspeisung in Versorgungsnetze zur Verfügung stellt.

Überschüssige Elektrizität wird beispielsweise zur Wasserelektrolyse verwendet, um als Zwischenspeicher einen solarenergetischen 24-Stunden-Kraftwerksbetrieb aufrecht zu erhalten. Kostengünstige Hydrierung der Polysilane $(X_2Si)_n$ ($X = Cl, F$) mit derartig erzeugtem Wasserstoff führt zum wasserstoffsubstituierten HPS, das als permanenter Wasserstoffträger gefahrlos an solche Orte transportiert und dort gelagert werden kann, an denen der daraus bedarfsgerecht erzeugte Wasserstoff durch konventionelle Verbrennung oder durch Kombination mit effizienten Brennstoffzellensystemen in elektrische Energie umgewandelt wird.

Selbstverständlich kann Silicium selbst als Wasserstoff-Generator dienen, wenn auch im Vergleich zu HPS mit verminderter Effizienz. Durch Umsetzung mit wässriger Lauge bildet sich Silikat und Wasserstoff ($Si + 2 NaOH + H_2O \rightarrow Na_2SiO_3 + 2 H_2$), wobei die eingesetzte Lauge unter definierten Bedingungen wieder zurück gewonnen werden kann [9]. Der unter Wasserstoffgewinnung produzierte „Sand“ kann wieder dem Recycling zugeführt werden. Nach vorliegendem Konzept wird erneuerbare Energie an den Ort des Verbrauchers transportiert. Damit stellen diese konzeptionellen Überlegungen, die in Abbildung 8 zusammen gefasst sind, einen möglichen Beitrag des Siliciums für eine zukünftige Energiewirtschaft dar.

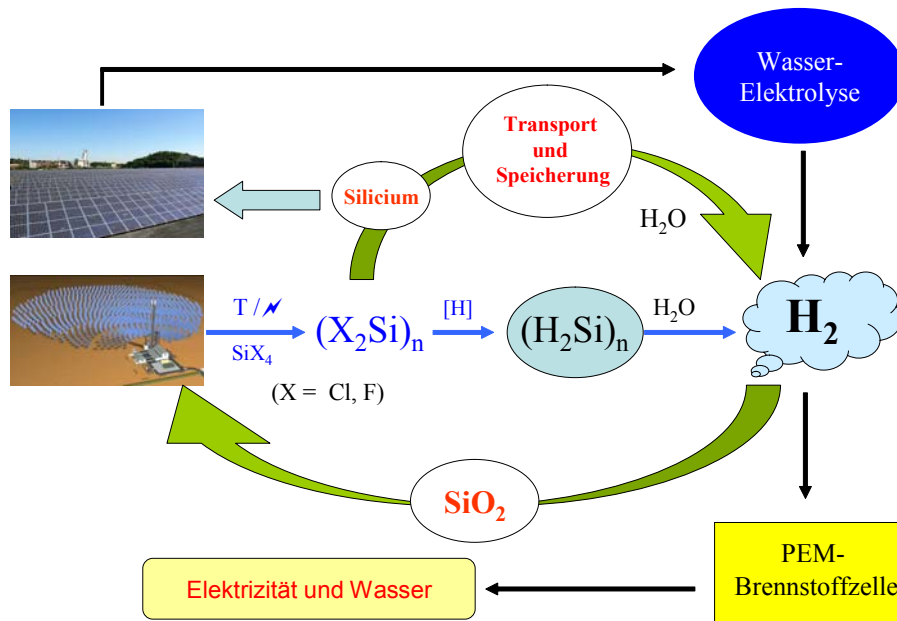


Abb. 8: Zusammenfassendes Schema zur Beschreibung eines möglichen Beitrags des Siliciums bzw. seines hydrierten Polysilans HPS für eine zukünftige Energiewirtschaft.

Mit diesen Ausführungen wird dem natürlichen, fossilen Energiekreislauf und damit der Photosynthese ein neuer synthetischer Kreislauf zur Seite gestellt: Kohlenstoff wird durch Silicium ersetzt, die Energiedichten und -inhalte sind für beide Elemente praktisch identisch [C: 32,8 Si: 32,6 kJ/g; 74,2 vs. 75.9 kJ/ml]. Silicium, nach dem Sauerstoff mit 26,3 % das zweithäufigste Element des Periodensystems, führt als Energieträger aus dem Problem der Endlichkeit der Ressourcen, zumal das beim Energie liefernden Prozess entstehende SiO₂ („Sand“) im Gegensatz zum CO₂ solarenergetisch schnell und vollständig wieder zurück gewonnen werden kann. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 9 dargestellt.

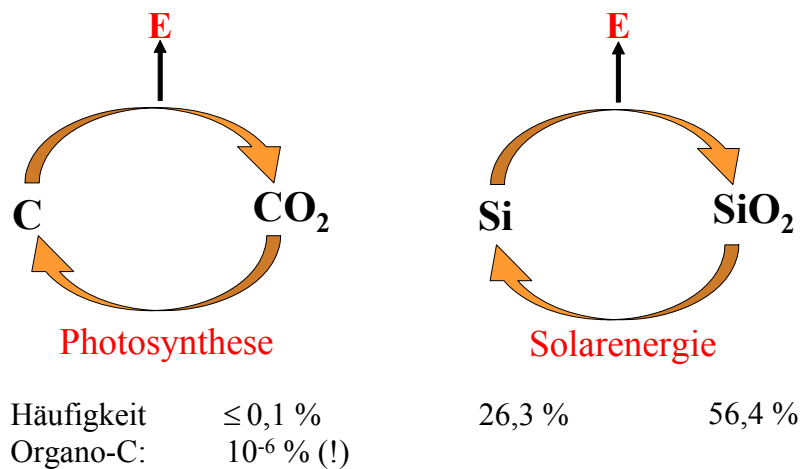


Abb. 9: Energieliefernde Prozesse E auf photosynthetischer und auf solarenergetischer Basis

Analoge Zusammenhänge existieren auch für die korrespondierenden Element-Wasserstoffverbindungen C_nH_{2n+2} vs. Si_nH_{2n+2} , wobei aus der Erforschung der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten des Si-H-basierten „anorganischen Öls“ zukünftig noch ein reichhaltiges Potential erwartet werden darf.

Danksagung

N.A. dankt den Firmen Dow Corning Corp./Ltd. (Midland, USA und Barry, GB) und Wacker-Chemie GmbH für großzügige Förderung. Der Firma City Solar AG wird für außergewöhnlich gute Kollegialität, finanzielle Unterstützung und insbesondere für die Einrichtung einer Stiftungsprofessur am IAAC der Goethe-Universität, Frankfurt am Main, gedankt. Dem Wolfener Entwicklungsteam um G.L., den Drs. R. Deltschew, C. Bauch, V. Mohsseni und S. Holl wird für unermüdlichen Einsatz in der Durchführung der Pilotphase gedankt. Dem Arbeitskreis von Prof. Kolbesen, IAAC, danken wir für bereitwillige Hilfestellung zur Analyse von polymeren und festen Materialien.

Literatur

- [1] Zitat von J. Hambrecht, Chief Executive of BASF, in: *The Economist*, Nov. 4th, 2006, p. 77-78.
- [2] *Bright Prospects*, in: *World Power 2007*, p. 130; *The Economist Technology Quarterly*, March 10-16th, 2007, The Economist Newspaper Limited, London.
- [3] N. Auner, WO 2006/053675; WO 2006/053676; S. Nordschild, N. Auner, *Chem. Eur. J.* 2008, 3694-3702.
- [4] N. Auner, WO 2006/125425.
- [5] A. Hammad, E. Amanatides, D. Mataras, D. Rapakoulias, *Thin Solid Films* 451-452 (2004), 255-258.
- [6] Solution-processed silicon films and transistors: T. Shimoda, Y. Matsuki, M. Furusawa, T. Aoki, I. Yudasaka, H. Tanaka, H. Iwasawa, D. Wang, M. Miyasaka, Y. Takenchi, *Nature*, 440, 783-786 (2006).
- [7] Cyclopentasilan, das erste unsubstituierte cyclische Siliciumhydrid, E. Hengge und G. Bauer, *Angew. Chem.* 85, 304-305 (1973).
- [8] Bezüglich der Anforderungen von Automobilherstellern und der technischen Zielsetzungen des US-Departments of Energy (DOE) für 2010 und 2015 sollte ein Wasserstoffspeicher mehr als 6 Gew.% Wasserstoff enthalten. Dieser Wert beinhaltet das Tank-, Verteiler- und Ventilsystem, die Befüllung mit Wasserstoff sollte nicht länger als 5 Min. dauern; die von der DOE angegebenen Prozente sind demnach Systemwerte, der Wert für HPS entspricht jedoch der erzeugten Wasserstoffmenge. Die eigentliche HPS-H₂-Effizienz muss deshalb systemangepasst korrigiert, d.h. reduziert, werden. S. auch: *Nanotechnical Aspects in Materials for Hydrogen Storage*, M. Fichtner, *Adv. Eng. Mater.* 2005, 7, 443-455.
- [9] Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Wasserstoff, D. Herbst, *Deutsche Offenlegungsschrift* 1 99 54 513, 1998. Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Wasserstoff, D. Herbst, *Deutsche Offenlegungsschrift* 1 01 55 171. Wasserstoffspeicherung in Silicium – Alternative als Kraftstoff für Brennstoffzellen, D. Herbst, *ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift* 102 (7/8), 2000, 622-627. Silicium für Sekundärenergie, D. Herbst, *BWK Brennstoff Wärme Kraft* 52 (7/8), 2000; 52-55. S. auch: Silicium als Bindeglied zwischen Erneuerbaren Energien und Wasserstoff, N. Auner, *Deutsche Bank Research, Research Notes*,

Working Paper Series No. 11, 30. April 2004, 1-15; verfügbar unter www.dbresearch.de.
Bemerkenswerterweise sind auf diese Weise schon Ballons und Zeppeline mit Wasserstoff befüllt worden. Nachteilig wirkt sich hier für eine effiziente Wasserstoffgewinnung der enorme Masse-Transport Wasser/wässrige Lauge aus, der ein solches System besonders für eine mobile Anwendung wenig attraktiv gestaltet.

[29.08.08]

Anschrift der Autoren:

Prof. Dr. Norbert Auner¹
Johann Wolfgang Goethe-Universität
Institut für Anorganische Chemie
Max-von-Laue-Str. 7
D – 60438 Frankfurt am Main
e-mail: aurer@chemie.uni-frankfurt.de

¹ Korrespondenzautor

Dr. Gerd Lippold
City Solar Technologie GmbH
Chemiepark Bitterfeld-Wolfen
Kunstseidenstraße 6
D – 06766 Wolfen
e-mail: gerd.lippold@citysolar.de