

Potenziale der solaren Wasserstoffherzeugung



Zusammenfassung



**Studie im Auftrag
der
Wasserstoff-Gesellschaft Hamburg e. V.**

**Peter Burger und Mirjam Perner
Universität Hamburg**

Januar 2010

Inhaltsverzeichnis

1 Ausgangslage	1
I. Hydrogen Economy & Stand der Wasserstofferzeugung	1
II. Zukünftige alternative Wasserstofferzeugung	2
III Potenzial der solaren Wasserstofferzeugung	4
IV. Solarer Wasserstoff – quo vadis	4
V. Ziel der Studie	6
VI. Literaturliste	7
2 Einführung und verfahrenstechnische Grundlagen	8
3 Photokatalyse und Photoelektrochemie	19
I. Grundlagen	19
II. Funktionale Materialien im (UV-) sichtbaren Bereich	25
III. Zelldesign	26
IV. PV/PEC	26
V. SCLJ/PEC	27
VI. SCLJ/SCLJ PEC	28
VII. SCLJ/PV PE	29
VIII. Abschließende Bewertung der PEC	31
IX. Neue photokatalytische Wege	32
X. Literaturliste	33
4 Photobiologie	34
I. Übersicht der photobiologischen Prozesse	35
II. Potenziale der photobiologischen Prozesse	36
III. Wirkungsgrad der photobiologischen Prozesse	39
IV. Lebensdauer der photobiologischer Systeme	40
V. Kosten der Realisierung	41
VI. Bewertung und Forschungspotential	42
VII. Literaturliste	44
5 Thermochemische Wasserstofferzeugung	45
6 PV@Elektrolyse	49
I. PV-Module	50
II. Wasserelektrolyse (Elektrolyseur)	53
III. Gesamtwirkungsgrad des PV@Elektrolyse-Verfahrens	54
7 Solarthermische Elektrizität@Elektrolyse	56
8 Potenziale der solaren Wasserstofferzeugung	57
I. Photobiologische und Photoelektrochemische Systeme	57
II. PV@Elektrolyseur	58
III. Thermochemische Wasserstofferzeugung	59
IV. Solarthermische Elektrizität@Elektrolyse	60
V. Résumé - Sauerstoffproduktion O ₂ als Chance	61
9 Zusammenfassung	62

9 Zusammenfassung

Die fossilen Primärenergieträger Erdgas, Erdöl und Kohle tragen mit über 80% zum globalen Energiemix bei und sind die wesentliche Quelle der anthropogenen Emissionen des Treibhausgases CO₂. Vor dem Hintergrund der abnehmenden Erdölressourcen sowie der Prognosen für den Klimawandel und der Verdopplung des globalen Energiebedarfs bis 2050 wird klar, dass die zukünftige Energieversorgung die zentrale Herausforderung des 21. Jahrhunderts ist. Wasserstoff als Brennstoff und Energiespeicher kann einen entscheidenden Beitrag zur Lösung dieses Problems liefern. Voraussetzung ist allerdings, dass Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen gewonnen wird. Naheliegend ist die Nutzung der Sonnenenergie, deren jährliche Strahlungsleistung den globalen Energiebedarf um ca. den Faktor 10⁴ übersteigt. Das Ziel der vorliegenden Studie war es, das Potenzial der solaren Wasserstoffherzeugung zu bewerten. Für insgesamt fünf der im folgenden genannten Verfahren (a-e) wird das Prinzip erläutert und ihr maximaler Wirkungsgrad, Status und Forschungsbedarf und soweit möglich auch Wirtschaftlichkeit, d.h. Investitions- und Betriebskosten analysiert. Die Langzeitstabilität der Verfahren spielt hierbei eine wichtige Rolle. In Betracht gezogen wurden Systeme mit inherenter Wasserstoffherzeugung, dazu gehören, (a) Photobiologie (b) Photoelektrochemie (c) Thermochemie sowie Kombinationslösungen aus photovoltaischer (d) und solarthermischer Stromerzeugung (e) mit nachfolgender Wasserelektrolyse.

Die direkte photosynthetische Umwandlung von Sonnenlicht in chemische Energie unter Bildung von Wasserstoff und Sauerstoff wird in der photobiologischen Wasserstoffherstellung mit Bakterien und Grünalgen (a) und in der artifiziiellen Photosynthese mit Photokatalysatoren und photoelektrochemischen Systemen (b) genutzt. Die theoretischen Obergrenzen für die Wirkungsgrade zur Nutzung des Sonnenlichts liegen bei 30-40%. In den photobiologischen Systemen beschränken weitere Schritte die maximale Effizienz für die Wasserstoffherstellung auf unter 15%. In der Realität werden bislang allerdings i.d.R. nur 5 % mit den photobiologischen und -elektrochemischen Systemen erreicht. Höhere Werte bis zu 18% sind für das letztere Verfahren bekannt, bedürfen aber aufwendiger Technologie, die meist keine Langzeitstabilität aufweist. Beide Verfahren (a) und (b) haben Potenzial für die zukünftige solare Wasserstoffherzeugung. Aufgrund des hohen Bedarfs für Grundlagenforschung ist die genaue zeitliche Perspektive noch nicht absehbar.

Thermochemische Verfahren (c) nutzen die konzentrierte Wärmestrahlung der Sonne entweder zur direkten Spaltung von Wasser in Wasser- und Sauerstoff oberhalb von 2500 °C oder setzen auf thermochemische Zyklen mit typischen Temperaturen zwischen 500° und 1500 °C. Die hohen Temperaturen werden hierbei durch Konzentration des Sonnenlichts in einem sogenannten Konzentrator, z.B. mit einem Parabolspiegel erreicht, der maßgeblich zu den Investitionskosten beiträgt. Die maximalen theoretischen Wirkungsgrade sind von der Temperatur, der Konzentration des Sonnenlichts und dem individuellen Prozess abhängig, typische Werte liegen zwischen 30% und 75%. Pilotprojekte bescheinigen das grundsätzliche Potenzial des Verfahrens zur solaren Wasserstoffherzeugung, allerdings fehlt noch der Beweis für den Dauereinsatz. Aufgrund der hohen thermischen Materialbelastung gibt es auch hier noch großen Forschungsbedarf im Bereich der angewandten und Grundlagenforschung sowie in der ingenieurtechnischen Umsetzung. Vor 2020 ist mit einer kommerziellen Nutzung vermutlich nicht zu rechnen.

Primäres Ziel der abschließend untersuchten Verfahren ist die photovoltaische (d) bzw. solarthermische Stromerzeugung (e), der in der nachfolgenden Wasserelektrolyse zur Produktion von Wasserstoff für die Energiespeicherung oder als Brennstoff genutzt werden kann. Folglich stehen bei diesen Verfahren die Wirkungsgrade und Kosten der Stromgestehung im Vordergrund, für den Gesamtwirkungsgrad geht die Effizienz der Wasserelektrolyse noch als weiterer Faktor ein. Dieser ist für beide Verfahren im Prinzip gleich, allerdings besitzt die photovoltaisch/elektrolytische Wasserstoffherzeugung hierbei einen Vorteil. Da in der Wasserelektrolyse Gleichstrom eingesetzt wird, kann der in der Photovoltaikzelle erzeugte Gleichstrom direkt genutzt werden, während die Solarthermie Wechselstrom liefert, der erst noch mit entsprechenden Verlusten gleichgerichtet werden muss. Die photovoltaische Stromgestehung ist für die solare Wasserstoffherzeugung bislang

noch zu teuer und ineffizient, typische Gesamtwirkungsgrade betragen derzeit nur ca. 10%. Erst ab einem Wirkungsgrad von mehr als 20% für die solare Stromgestehung und einem Preis der PV-Zellen von unter 0.20 \$/W ist eine Kommerzialisierung nach Meinung des amerikanischen Energieministeriums (DOE) lohnend. Aktuelle und absehbare Preisentwicklungen sowie vielversprechende Forschungsergebnisse belegen aber eindeutig das Potenzial dieses Verfahrens mit einem Zeithorizont nach 2020. Für die Kombination aus solarthermischer Stromgestehung und anschließender Wasserelektrolyse stehen die Chancen ebenfalls gut, sollte der vorhergesagte Preis von 5-6 Cent/kWh erreicht werden, der im Rahmen des Desertec-Projekts für die Zeit nach 2020 vor Kurzem genannt wurde.

Verfahren	aktueller Wirkungsgrad	Forschungsbedarf	Potenzial	Zeithorizont
Photokatalyse	5%	Grundlagen	+/-	2030
Photoelektrochemie	<5%	Grundlagen	✓	2030
Photobiologie	<5%	Grundlagen	✓	2030
Thermochemie	>30%	angewandte/Ing.-Wiss.	✓	2020
Photovoltaik@Elektrolyse	<10%	Grundlagen/angewandte/Ing.-wiss.	✓	2020
Solarthermie@Elektrolyse		angewandte/Ing.-wiss.	✓	2015

Alle Verfahren haben somit Potenzial zur solaren Wasserstoffherzeugung. Ein abschließender Vergleich der Verfahren untereinander ist aber aufgrund der sehr unterschiedlichen Entwicklungsstadien *nicht* möglich. Die photobiologischen und -elektrochemischen Verfahren (a,b) besitzen einen zeitlichen Rückstand in der technologischen Umsetzung und haben insbesondere einen großen Bedarf in der angewandten und Grundlagenforschung, der aber unter Berücksichtigung nicht-linearer Entwicklungen in der Forschung schnell aufgeholt sein könnte. Auch für die thermochemischen Verfahren (c) müssen noch neue langzeitstabile Materialien gefunden oder entwickelt werden, um gegenüber den hohen Temperaturen oder z.T. aggressiven Zwischenprodukten dauerhaft die notwendige Resistenz zu besitzen. Neue Ansätze aus der Grundlagenforschung, die oben nicht diskutiert wurden und auf einer Kombination von photo- und thermochemischen Schritten bei tieferen Temperaturen beruhen, haben ebenfalls ein gewisses Potenzial. Im Unterschied hierzu gibt es für die photovoltaischen und solarthermischen Verfahren d) und e) bereits mehrjährige Erfahrungen im Alltagseinsatz. Ob es aber im Großmaßstab unter den intermittierenden Bedingungen der solaren Nutzung gelingt, die geforderte Langzeitstabilität von über 25 Jahre mit geringen Betriebskosten zu erreichen, bleibt aber abzuwarten. Die unseres Wissens bislang nicht berücksichtigte Vermarktung des Beiprodukts aller genannter Verfahren, namentlich Sauerstoff, O₂, mag zusätzlichen Schub für die Einführung der solaren Wasserstoffherzeugung geben. Es bleibt spannend!