

Herstellung von Wasserstoff – Photokatalyse

Ausgangssituation

Die Entwicklung von Verfahren zur photokatalytischen Wasserspaltung ist noch nicht sehr weit fortgeschritten, obwohl die grundsätzliche Möglichkeit an nicht-biologischen Systemen seit etwa 40 Jahren nachgewiesen ist. Das am häufigsten explorierte System ist Titanoxid, teils in Verbindung mit anderen Metallen oder Aktivatoren. Bei UV-Bestrahlung werden teils Quantenausbeuten über 50 % berichtet, die höchsten Ausbeuten bei Bestrahlung im sichtbaren Spektralbereich liegen aber nur bei 2,5 %, und auch das nur im kurzwelligen Teil des sichtbaren Spektrums, obwohl grundsätzlich die Wasserspaltung bei Licht mit Wellenlängen von knapp über 1000 nm, entsprechend etwa 1.2 eV/Elektron möglich sein sollte. Für die direkte Zweielektronenreaktion ($\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2$, $\Delta G = 237 \text{ kJ mol}^{-1}$) wäre dagegen nur Licht mit Wellenlängen unter etwa 500 nm nutzbar.

Attraktiv wäre die photokatalytische Reduktion oder Hydrierung von CO_2 , für die es allererste Ansätze gibt. Diese sind allerdings noch weniger gut entwickelt als die Ansätze zur direkten Spaltung von Wasser, so dass der Forschungs- und Entwicklungsbedarf noch wesentlich höher ist und der Weg zu einer möglichen technischen Nutzung länger.

Forschungs- und Innovationsbedarf

Bei den derzeit erreichten Quantenausbeuten ist die photokatalytische Wasserspaltung keine ernsthafte Option zur Erzeugung von Wasserstoff aus Sonnenlicht. Es gibt Schätzungen, dass Gesamtenergieausbeuten von über 10% erreicht werden müssten, um solche Systeme ernsthaft in Betracht zu ziehen. Um solche Werte zu erreichen, gibt es Forschungs- und Innovationsbedarf an einer Reihe von Stellen:

- Die photokatalytische Wasserspaltung ist ein Mehrelektronen-Transferprozess. Solche Prozesse werden derzeit nur unzureichend verstanden. Daher ist physikalisch-chemische Grundlagenforschung erforderlich, um eine mögliche Realisierung der photokatalytischen Wasserspaltung auf ein solides theoretisches Fundament zu stellen und gezielt entsprechende Katalysatorsysteme entwickeln zu können.
- Es muss nach neuen Photokatalysatoren gesucht werden. Dies können anorganische Systeme sein, wie sie derzeit im Zentrum des Interesses stehen, aber auch Hybridsysteme und biomimetische Systeme, die Teilfunktionen des biologischen Photosystems nachbilden, könnten viel versprechende Wege sein.
- Die Stabilität solcher Systeme ist ein kritischer Punkt auf dem Weg zu einem technischen Einsatz. Da bisher die Quantenausbeuten absolut unbefriedigend sind, müssen weitergehende Untersuchungen zur Stabilität der Systeme systematisch durchgeführt werden.
- Einbindung der Wasserspaltung in ein System. Viele Katalysatoren liefern derzeit ein Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch. Es ist zunächst erforderlich, die Gase nach der Bildung

schnell zu trennen, um die Explosionsgefahr zu verringern. Außerdem wird für eine technische Anlage zur Wasserspaltung die Entwicklung eines integrierten Anlagenkonzepts (Gastrennung, Gastrocknung, Verdichtung, Lagerung, Transport etc.) erforderlich.

Potentialabschätzung

Angenommen wird eine Effizienz des Gesamtprozesses von 10 %, was aufgrund des Energiebedarfs der Anlagentechnik eine Effizienz der eigentlichen Spaltungsreaktion voraussetzt, die deutlich darüber liegt. Einer solch hohen Effizienz scheinen derzeit keine fundamentalen Hindernisse im Wege zu stehen, wir sind davon aber z.Zt. um etwa zwei Größenordnungen entfernt.

Die minimale Anlagengröße wird aufgrund der Notwendigkeit von Reinigung, Pumpen, Lagerung, Transportkapazität mit 50 000 t/a angenommen; dieser Wert ist aber schwierig abzuschätzen. Bei einer durchschnittlichen jährlichen Sonneneinstrahlung in Deutschland von 1000 kWh/m² und einer Effizienz der photokatalytischen Umwandlung von 10% würde eine Anlagenfläche von 16,65 km² benötigt. Ungenutzte zusammenhängende Flächen dieser Größenordnung stehen in Deutschland eher nicht zur Verfügung. Eventuell bilden ausgekohlte Braunkohleareale (ca. 500 km²) eine Ausnahme, d.h. maximal 0,14 % der Fläche Deutschlands könnten derartig genutzt werden. Das würde einer Energieproduktion von 0,18 EJ/a und einem potentiellen Anteil von 1,23 % am Primärenergieverbrauch Deutschlands entsprechen.

Allerdings kann angesichts des heutigen Standes der Technik nicht erwartet werden, dass innerhalb der nächsten 20 Jahre die hierfür erforderliche Energieausbeute erreicht wird. Dafür sind vermutlich erheblich längere Zeiträume erforderlich.

Welt

Mit einer Energieausbeute von $250 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1} = 900 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (entspricht der mittleren eingestrahlten Sonnenenergie in den sonnenreichsten Gebieten der Erde, etwa Sahara, multipliziert mit der angestrebten Effizienz von 10 % einer photokatalytischen Fabrik zur Wasserspaltung) ergibt sich ein Flächenbedarf von 506.068 km² zur Deckung des Weltenergiebedarfs. Diese Fläche steht in Nordafrika problemlos zur Verfügung. Allerdings wäre hierbei ein Investitionsvolumen für insgesamt mehr als 10.000 Anlagen der o.g. Größenordnung erforderlich. Der Wasserbedarf beliefe sich auf $4,5 \times 10^9 \text{ t}$, die vermutlich erst beschafft und aufgearbeitet werden müssten.

Nutzungskonkurrenz

Flächen, die für die photokatalytische Wasserspaltung eingesetzt würden, stünden weder für die Produktion von Nahrungsmitteln noch für die Produktion von Biomasse zur Energiegewinnung noch für die Photovoltaik zur Verfügung. Derzeit haben kommerzielle Photovoltaikanla-

gen bereits eine Effizienz von bis zu 17 %. Mit einer nachgeschalteten Wasserelektrolyse, deren Effizienz mit 70 % abgeschätzt werden kann, ergibt sich bereits jetzt für diese Technologie eine Gesamteffizienz bis zur Herstellung von feuchtem Wasserstoff von über 10 %. Dies ist die wesentliche Konkurrenz zur photokatalytischen Wasserspaltung. Auch die Umwandlung von Sonnenenergie in Hochtemperaturwärme in Parabolrinnen- oder Turmkraftwerken hat eine Effizienz, die der photovoltaischen Wasserstoffherzeugung zumindest gleichkommt, möglicherweise sogar höher liegt.

Fazit

Die photokatalytische Wasserspaltung hat theoretisch das Potential, einen sehr deutlichen Beitrag zur Energieversorgung der Welt, sogar auch in Deutschland für Deutschland, zu leisten. Allerdings ist hierzu eine Verbesserung der Effizienz der Systeme um mindestens zwei Größenordnungen erforderlich, was kurz- und mittelfristig nicht in Sicht scheint. Angesichts der relativ weit entwickelten Alternativen sollte kurz- und mittelfristig trotz des insgesamt hohen Potentials die Förderung dieser Technologien nicht mit hoher Priorität verfolgt werden. Aufgrund der möglichen langfristigen Bedeutung ist allerdings eine explorative Förderung anzuraten. Aufgrund der CO₂-Problematik ist auch eine explorative Förderung von Ansätzen zur photokatalytischen CO₂-Reduktion erforderlich.