

# Regenerativer Wasserstoff – Erzeugung, Nutzung und Syntheserohstoff

## Einleitung und Problemstellung

Für eine zukünftige Energiewirtschaft, die zu einem hohen Anteil auf Wasserstoff als Energieträger basiert, stellt sich die Frage nach dessen regenerativer Bereitstellung.

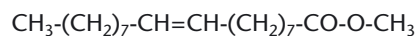
Es bestehen aber Zweifel am Sinn einer Wasserstoff-Energiewirtschaft. Gründe hierfür sind v.a. die Verluste bei Verwendung von Elektrizität zur elektrolytischen Erzeugung des Wasserstoffs und bei dessen „Zurückverstromung“. Ein weiteres Argument gegen die Wasserstoff-Energiewirtschaft sind die enormen Investitionen für den Aufbau einer Infrastruktur zur Wasserstoff-Verteilung. Diese Bedenken sind nicht von der Hand zu weisen. Die resultierende Frage ist, ob dies einen Verzicht auf Wasserstoff als zukünftigen Energieträger bedeutet oder ob es Bereiche gibt, in denen die Einführung von Wasserstoff ihre Berechtigung hat. Bereits heute besteht eine „real existierende Wasserstoffwelt“ mit einem Wasserstoffbedarf, der ca. 2% des Weltprimärenergieverbrauchs bzw. ca. 10% des weltweiten Kraftstoffverbrauchs für den Verkehr entspricht. Dieser Wasserstoff wird jedoch zum überwiegenden Teil aus fossilen Primärressourcen erzeugt und sowohl energetisch als auch stofflich genutzt.

Im Verlauf des vorliegenden Beitrags sollen Bereiche identifiziert werden, in denen regenerativ erzeugter Wasserstoff bzw. mögliche Folgeprodukte in der heute bestehenden Infrastruktur genutzt werden können. Wenn es gelingt, diese Potenziale auszuschöpfen, ist ein kurzfristiger Einsatz möglich, der im Laufe von Jahrzehnten kontinuierlich ausgebaut werden kann, ohne auf eine flächendeckende Infrastruktur für Wasserstoff angewiesen zu sein.

## Regenerativer Wasserstoff

Ziel einer zukünftigen Energiewirtschaft ist der rationelle Umgang mit Energie und ein Versorgungssystem mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energie und nicht der Wasserstoff per se. Wasserstoff ist also ein Mittel zum Zweck. Für die Verwendung von Wasserstoff spricht die Möglichkeit zur Energiespeicherung und die Nutzung als Sekundärenergieträger. Ein weiterer Grund ist die effiziente Energiewandlung in Prozessen, die über Wasserstoff als Zwischenenergieträger ablaufen.

Neben gasförmigem bzw. flüssigem Wasserstoff gibt es eine Vielzahl von chemischen Verbindungen, in denen Wasserstoff chemisch gebunden vorliegt und die als Energieträger verwendet werden können. Dies gilt für viele regenerative Energieträger, die sich bereits im Markt etabliert haben. Genannt seien hier beispielsweise das Bio-Ethanol ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) aus Biogas und Pflanzenöle bzw. Pflanzenölmethylester mit dem Hauptbestandteil Ölsäuremethylester mit der Formel:



aber auch Holz mit der angenäherten Zusammensetzung  $\text{CH}_{1,52}\text{O}_{0,65}$ . In all diesen Verbindungen ist regenerativer Wasserstoff zu einem hohen Anteil enthalten. Die Bezeichnung regenerativer Wasserstoff sollte folglich erweitert werden, um die verschiedenen wasserstoffhaltigen Energieträger mit einzubeziehen, auch wenn das in der öffentlichen Wahrnehmung und selbst in Fachkreisen bisher nicht üblich ist.

## Regenerative Ressourcen

Zur nachhaltigen Erzeugung von Wasserstoff bzw. wasserstoffreichen Verbindungen gehört neben der Verwendung von Strom aus erneuerbaren Ressourcen also auch die Biomasse.

Dr. Michael Specht

ZSW

[michael.specht@zsw-bw.de](mailto:michael.specht@zsw-bw.de)

Dr. Ulrich Zuberbühler

ZSW

[ulrich.zuberbuehler@zsw-bw.de](mailto:ulrich.zuberbuehler@zsw-bw.de)

Ursula Wittstadt

Fraunhofer ISE

[ursula.wittstadt@ise.fraunhofer.de](mailto:ursula.wittstadt@ise.fraunhofer.de)

Im Jahre 2001 trug die Biomasse immerhin ca. 11 % (ca. 45 EJ) zum Weltprimärenergieverbrauch (ca. 420 EJ) bei [1]. Dieser Anteil ist zwar noch steigerbar, dürfte aber kaum auf mehr als das 2-3-fache des heutigen Wertes ansteigen. Die maximalen Substitutionspotenziale belaufen sich bezogen auf den heutigen Primärenergieverbrauch auf ca. 8 % für Deutschland und ca. 25 % weltweit. Werden Umwandlungsverluste berücksichtigt (maximal 60 % energetischer Wirkungsgrad für Wasserstoff aus Biomasse), sinken diese Werte entsprechend.

Damit wird die Biomasse zukünftig zwar einen erheblichen Anteil am Weltprimärenergiebedarf decken können, diese Ressourcen sind aber limitiert. Hierbei stellt sich zusätzlich die Frage des ökoeffizienten Einsatzes biogener Ressourcen, was das folgende Beispiel verdeutlichen möge: Aus 6 t Holz lassen sich ca. 1 t Dieselkraftstoff (bzw. Wasserstoff als Dieselkraftstoffäquivalent) über eine thermochemische Gaserzeugung herstellen. Würden diese 6 t Holz stationär im Wärmemarkt eingesetzt, so ließen sich ca. 2 t Heizöl substituieren. In welchem Umfang die Biomasse also zukünftig zur Wärme- und Stromerzeugung oder zur Erzeugung von Sekundärenergieträgern wie Wasserstoff bzw. wasserstoffhaltigen Verbindungen verwendet wird, hängt von Weichenstellungen ab, die sich neben der Vermeidung von Treibhausgasemissionen auch an der Diversifizierung in den verschiedenen Verbrauchssektoren (Wärme, Strom, Kraftstoff) orientieren müssen.

Da landwirtschaftliche Anbauflächen nur begrenzt zur Verfügung stehen, ist der pro Fläche erzielbare Ertrag für die Herstellung von Sekundärenergieträgern von besonderer Bedeutung. Die höchsten Nettoerträge sind mit Herstellungsverfahren zu erzielen, die über eine primäre Gaserzeugung ablaufen (Synthesegas- bzw. Biogaserzeugung). Bei Verfahren, die nur bestimmte Pflanzenteile wie Öl, Zucker und Stärke nutzen (Biodiesel, Ethanol), sind die Flächenerträge kleiner. Die Bandbreite reicht unter mitteleuropäischen Klimabedingungen hierbei von ca. 11 MWh/(ha x a) für Biodiesel aus Raps bis zu ca. 40 MWh/(ha x a) für die Erzeugung von Wasserstoff aus dem Gras *Miscanthus* über die thermochemische Gaserzeugung [2].

Um aufzuzeigen, in welcher Bandbreite die Anzahl von Fahrzeugen liegt, die pro Flächeneinheit (erforderliche Fläche für den landwirtschaftlichen Anbau oder für die solare Stromerzeugung) versorgt werden können, seien verschiedene Beispiele mit hohen und niedrigen Flächenerträgen bei unterschiedlichem Energiebedarf für den Fahrtrieb dargestellt. Für die nachhaltige Versorgung mit Kraftstoff sind im Fall von Biodiesel beim heutigen Durchschnittsverbrauch von 8 l Diesel pro 100 km und durchschnittlicher Jahresfahrleistung von 12000 km/a fast 10.000 m<sup>2</sup> pro Fahrzeug notwendig. Bei optimierten Flächenerträgen, einer Gaserzeugung der Biomasse zur Erzeugung von Wasserstoff und dessen Verwendung in hocheffizienten „3-Liter-Fahrzeugen“ kann der Flächenbedarf auf unter 1000 m<sup>2</sup> pro Fahrzeug sinken. Bezieht man zukünftige Möglichkeiten der photovoltaischen Stromerzeugung im Sonnengürtel der Erde mit anschließender elektrolytischer Wasserstoffherzeugung (z. B. als flüssig-H<sub>2</sub>) in die energetischen Vergleichsbetrachtungen mit ein, so ergäbe sich für ein „3-Liter-Fahrzeug“ ein Photovoltaik-Flächenbedarf von nur ca. 30 m<sup>2</sup>.

Ohne sich bereits jetzt auf einen konkreten Pfad festzulegen, soll dieses Zahlenbeispiel die langfristig angelegten Vorteile der „solaren“ Kraftstoffherzeugung bzgl. des Flächenbedarfs gegenüber der „biogenen“ Kraftstoffherzeugung verdeutlichen. Weiterhin muss die Einführung „flächeneffizienter“ Kraftstoffe von „energieeffizienten“ Fahrzeugantrieben begleitet werden.

## Erzeugungswege für Wasserstoff aus regenerativen Ressourcen

### Elektrolyse

Wasserstoff hat den großen Vorteil, über verschiedene Herstellungswege zugänglich zu sein. Weit verbreitet ist das Verfahren der alkalischen Elektrolyse. In zunehmendem Maße werden auch saure Elektrolysen auf dem Markt angeboten. In beiden Verfahren wird Wasser durch Anlegen einer elektrischen Spannung in einer elektrochemischen Zelle in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Während die alkalische Elektrolyse mit flüssigen Elektrolyten arbeitet

(meist KOH), werden in der sauren Elektrolyse protonenleitende Polymer-Membranen eingesetzt (PEM-Elektrolyse). Die alkalische Elektrolyse wird bevorzugt zur Produktion großer Wassermengen eingesetzt, während die PEM-Elektrolyse ihre Anwendung im kleinen Leistungsbe- reich ( $< 30 \text{ m}_N^3/\text{h}$ ) findet. Im Zusammenhang mit regenerativen Energien ist hier der Vorteil des besseren Teillastverhaltens zu nennen.

### Wasserstoff aus Biomasse

Bei der Wasserstoffherzeugung aus Biomasse ist zwischen den thermochemischen und den biologischen Konversionsverfahren zu unterscheiden. Bei den thermochemischen Umwandlungsverfahren wird die Biomasse unter Luftabschluss erhitzt (Pyrolyse) bzw. in Gegenwart von einem Gas / Dampfgemisch (z. B. Luft, Sauerstoff, Wasserdampf) in die Gasphase überführt. In einem Folgeschritt wird das entstandene Gas konditioniert und gereinigt. Aus dem erzeugten Produktgas kann z. B. durch eine Druckwechseladsorptionsanlage Wasserstoff abgetrennt werden. Ein Sonderfall ist die hydrothermale Gaserzeugung, bei der unter hohem Druck (bis über 300 bar unter superkritischen Bedingungen) Biomasse mit Wasser umgesetzt wird.

Im Gegensatz zu den thermochemischen Konversionsverfahren laufen die biologischen Verfahren in einem Temperaturbereich deutlich unterhalb von  $100^\circ\text{C}$  ab. Bei der anaeroben Vergärung wird zunächst ein methanhaltiges Biogas erzeugt, das in einer nachfolgenden Wasserdampf-Reformierung zu Wasserstoff umgesetzt werden kann. Durch fermentative Verfahren ist aus zucker- bzw. stärkehaltigen Pflanzen Ethanol zugänglich, das sich analog durch Reformierung zu Wasserstoff konvertieren lässt.

## Forschungs- und Entwicklungsprojekte im FVS zur Herstellung von regenerativem Wasserstoff

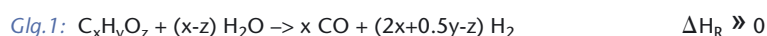
Schwerpunkt der Aktivitäten beim ZSW ist die Herstellung von Wasserstoff/Synthesegas aus Biomasse über den Weg der thermochemischen Gaserzeugung mit dem Ziel, ein Synthesegas

mit einer genau eingestellten Zusammensetzung herzustellen für kohlenstoffhaltige Kraftstoffe bzw. für die Herstellung reinen Wasserstoffs. Die Arbeiten am Fraunhofer ISE konzentrieren sich auf die Speicherung von Energie über Wasserstoff als saisonales Speichermedium zur Versorgung von autarken Inseln wie sie z. B. in der Telekommunikation erforderlich sind.

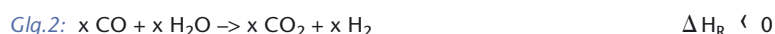
### Der AER-Prozess zur Gaserzeugung aus Biomasse

Der AER-Prozess (Absorption Enhanced Reforming) wurde zur in situ-Konditionierung bei der Gaserzeugung aus Biomasse entwickelt. Das bei der thermochemischen Umwandlung von Biomasse entstehende gasförmige  $\text{CO}_2$  wird z. B. durch CaO absorbiert und als Feststoff ( $\text{CaCO}_3$ ) gebunden, womit das chemische Gleichgewicht in Richtung  $\text{H}_2$  verschoben wird. Der AER-Prozess kann durch die Kombination der Wasserdampf-reformierung/-gaserzeugung in Gleichung 1 (Glg. 1) mit der homogenen Wassergas-Shift-Reaktion (Glg. 2) und der Hochtemperatur  $\text{CO}_2$ -Absorption (Glg. 3) zur Summenformel (Glg. 4) zusammengefasst werden. Die bei der exothermen Absorption freigesetzte Energie steht direkt der endothermen Gaserzeugung / Reformierung zur Verfügung.

#### AER-Wasserdampfgaserzeugung aus Biomasse:



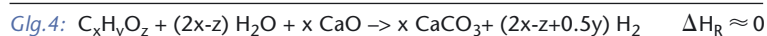
+ Shift-Reaktion:



+ Hochtemperatur  $\text{CO}_2$  Absorption:



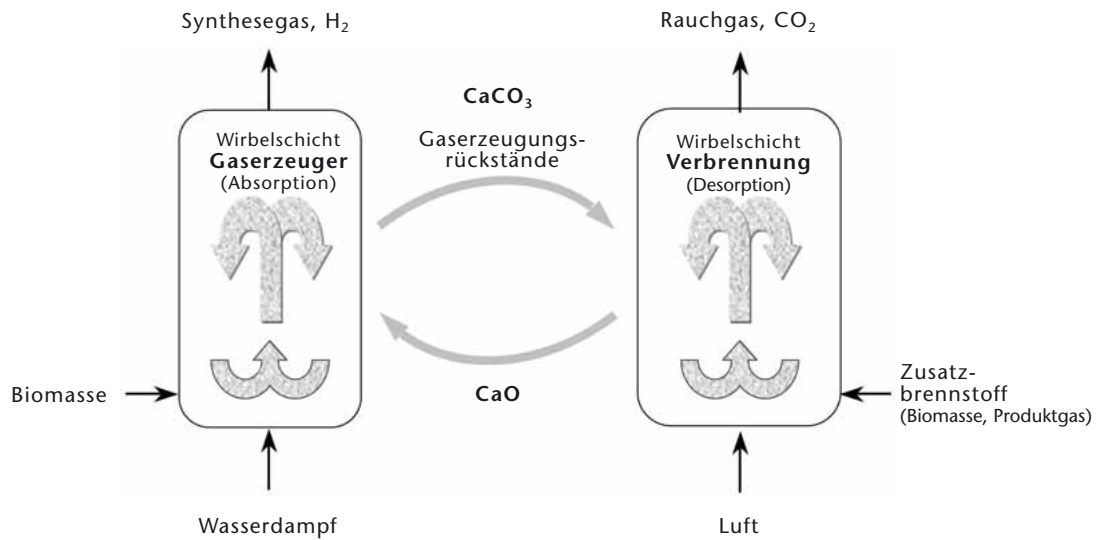
= AER-Prozess:



$\Delta H_R$  = Reaktionsenthalpie

Die Reaktionen finden parallel in einem Reaktor bei  $600 - 700^\circ\text{C}$  statt. Das zur  $\text{CO}_2$ -Absorption eingesetzte Calciumoxid wird als Calciumcarbonat zusammen mit nicht vollständig umgesetztem Kohlenstoff in einem separaten Prozessschritt regeneriert und kann erneut zur  $\text{CO}_2$ -Absorption eingesetzt werden.

Abbildung 1  
Verfahrensschema zur kontinuierlichen, absorptionsunterstützten Gaserzeugung aus Biomasse in zwei gekoppelten Wirbelschichten



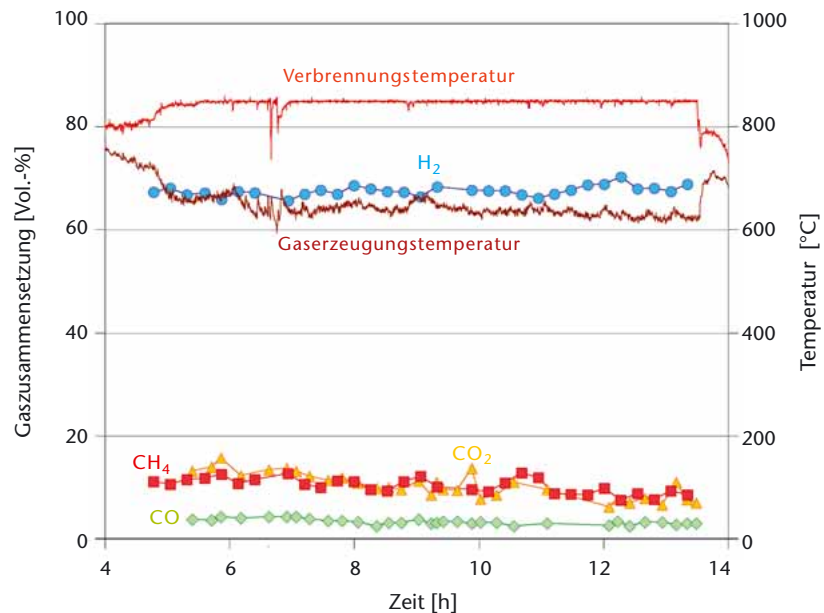
H<sub>2</sub>-reiches Synthesegas und CO<sub>2</sub> (je nach Verfahrenstechnik in aufkonzentrierter Form bzw. zusammen mit dem Abgas der Regenerierung) fallen als separate Gasströme in getrennten Reaktoren an, was einen erheblichen Vorteil gegenüber konventionellen Verfahren darstellt.

Biomasse kann dies auf einem relativ niedrigen Temperaturniveau von 600-700°C erfolgen. Dies ermöglicht auch den Einsatz von halmgutartigen Biomassen, welche wegen des hohen Mineralgehalts einen niedrigen Ascheschmelzpunkt aufweisen.

Eine technische Realisierung des kontinuierlichen Prozesses kann in zwei gekoppelten Wirbelschichtreaktoren erfolgen, wie es in Abb. 1 skizziert ist. Im linken Reaktor wird die Biomasse unter Zugabe von Dampf und Absorptionsmittel thermochemisch umgesetzt. Im Vergleich zu konventionellen Gaserzeugungsverfahren aus

Mit diesem Verfahren wurden Wasserstoffkonzentrationen von über 70 Vol.% im trockenen Produktgas erzeugt (Abb. 2) [3]. Dagegen liegen die bisher bei der thermochemischen Gaserzeugung aus Biomasse erreichten H<sub>2</sub>-Konzentrationen bei allen bisher bekannten Prozessen bei deutlich unter 50 Vol.%.

Abbildung 2  
Produktgaszusammensetzung bei der AER-Gaserzeugung aus Holz in zwei gekoppelten Wirbelschichten



In den letzten Jahren wurden verstärkt Technologien zur Nutzung fossiler Ressourcen diskutiert, bei denen sich CO<sub>2</sub> abtrennen und anschließend – z. B. in Aquiferen – deponieren lässt. Die Nutzung fossiler Primärenergieträger wäre hierbei nicht durch klimaschädliche Emissionen belastet. Insbesondere haben diejenigen Verfahren das höchste Entwicklungspotenzial, die zunächst ein wasserstoffreiches Gas durch Gas-erzeugung bzw. Reformierung herstellen, aus dem vor der Verbrennung CO<sub>2</sub> abgetrennt wird. Durch die Weiterentwicklung dieser Technologien, zu denen auch der AER-Prozess zählt, könnte die Wasserstoffherstellung aus fossilen Ressourcen in einem neuen Licht erscheinen.

**Autonome Stromversorgungssysteme mit saisonaler Energiespeicherung**

Ziel des in Abb. 3 dargestellten autonomen Energieversorgungssystems ist, die netzferne Stromversorgung (z. B. von Komponenten der Telekommunikations-Infrastruktur) ohne Nachlieferung von Brennstoff sicherzustellen. Die tageszeitliche Speicherung erfolgt hierbei über eine Batterie, die saisonale Speicherung über die elektrolytische Wasserstofferzeugung.

Im normalen Betrieb wird der Verbraucher – zum Beispiel eine Telekommunikationseinrichtung (TE) – mit einer Dauerverbrauchsleistung 100 - 300 W durch die Batterie (BAT) (48 V, 19 kWh Speicherkapazität) mit Energie versorgt. Tagsüber erfolgt eine Nachladung der Batterie durch ein photovoltaisches Modul (PVM mit 1.5 kW) mit nachgeschaltetem Laderegler (LR). In Zeiten andauernder geringer Einstrahlung (Winter oder lang andauernde Schlechtwetterperioden) wird die Batterie nicht genug nachgeladen, so dass als zweite Energiequelle die Brennstoffzelle (BZ mit 300 W) zugeschaltet wird. Diese wird mit Wasserstoff aus dem Wasserstoffspeichersystem (HSS; Metallhydrid, 30 bar, Kapazität 70 m<sub>N</sub><sup>3</sup>) versorgt. Die Brennstoffzelle ist über einen Gleichspannungswandler (GW) an die Batterie und über den Gleichstromkreis mit allen übrigen Komponenten verbunden.

Um vollständige Autonomie zu erreichen, wird der in den Sommermonaten anfallende Überschuss in der Stromproduktion durch die Solarzellen im Elektrolyseur (ELY, 1 kW<sub>e</sub>, 30 bar) in Wasserstoff umgesetzt. Dieser wird im Wasserstoffjahresspeicher saisonal gespeichert.

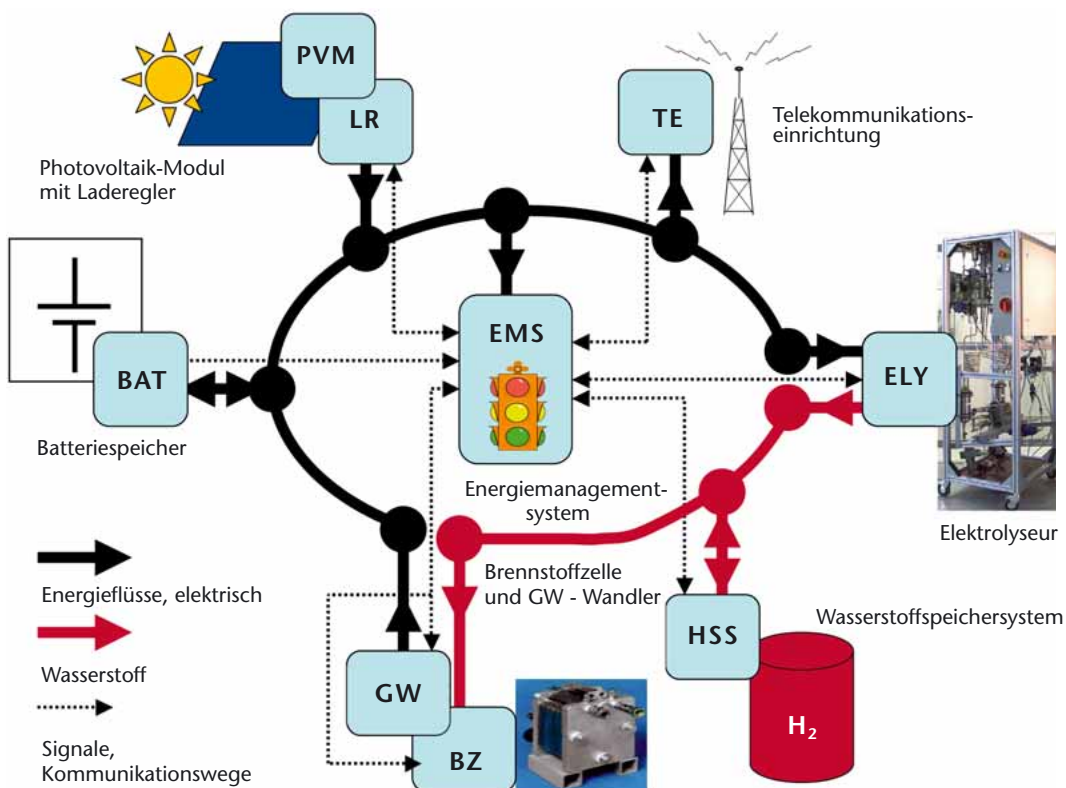
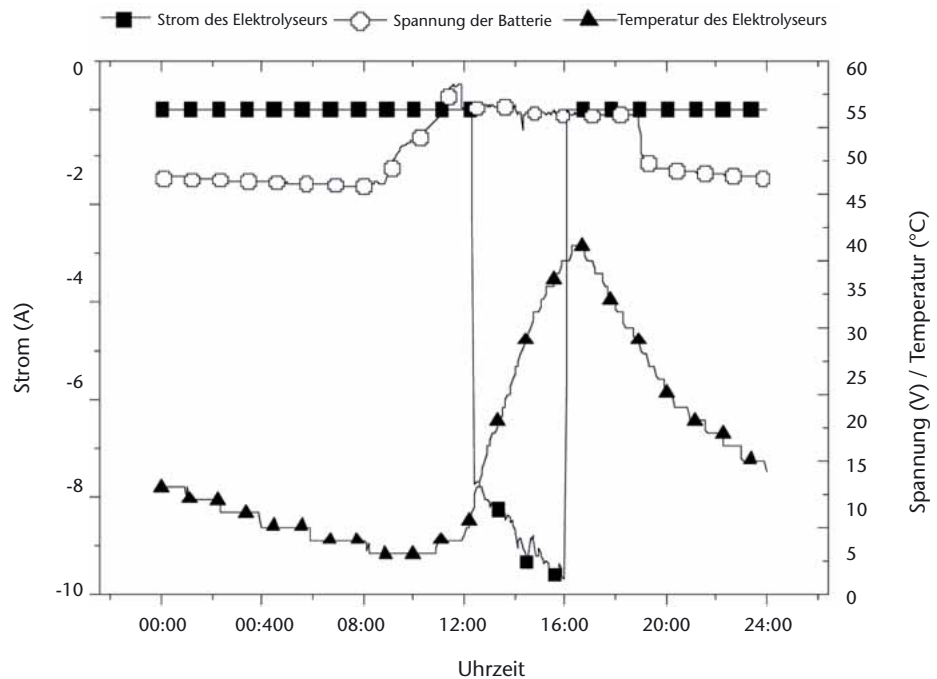


Abbildung 3  
Autonomes Energieversorgungssystem mit saisonalem Energiespeicher

Abbildung 4  
Betrieb des autonomen  
Energieversorgungssystems an einem  
typischen Sommertag



Die Batterie dient als Kurzzeit- bzw. Tagesspeicher. Das Energiemanagementsystem (EMS) koordiniert Erzeuger und Verbraucher, überwacht bzw. berechnet den Füllstand der Speicher und sorgt für eine verlässliche Stromversorgung. Die Stromversorgung ist für alle Wetteranomalien durch eine entsprechende Dimensionierung der Komponenten gesichert.

Das System konnte seine Eignung für den Einsatz in einem autonomen Energieversorgungssystem unter Beweis stellen. Beispielhaft für den Betrieb sind in Abb. 4 Daten eines typischen Sommertags mit Wasserstoffproduktion dargestellt. Mit Sonnenaufgang wird die Batterie aus den PV-Modulen geladen. Nachdem die Batterieladung einen Wert von 85 % überschritten hat, startet das Energiemanagementsystem den Elektrolyseur. Um 16 Uhr wird die Wasserstoffproduktion gemäß der aus den Optimierungsrechnungen bestimmten Regeln für den Sommerbetrieb gestoppt, weil die Lichteinstrahlung allein nicht mehr ausreicht, den Verbraucherbetrieb und den Elektrolyseur zu versorgen. Die Batterie würde bis zum Sonnenuntergang in Anspruch genommen und teilweise entladen. Ihre Ladekapazität wird aber für die nächtliche Stromversorgung des Verbrauchers benötigt, bzw. für den Betrieb in einer Periode mit niedriger Sonneneinstrahlung [4].

Das entwickelte System ist unabhängig von der Systemgröße und kann auch für größere Anlagen – z. B. für die Dorfstromversorgung – adaptiert werden. Das Ausführungsbeispiel zur Anwendung von solar erzeugtem Wasserstoff zeigt, dass Wasserstoff auch ohne eine Wasserstoff-Infrastruktur sinnvoll im Zusammenhang mit regenerativer Energie genutzt werden kann.

## Wasserstoff-Nutzung zur Herstellung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe

Aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid/Kohlendioxid (Synthesegas) ist eine Reihe kohlenstoffbasierter Kraftstoffe zur Speicherung und zum Vertrieb des Wasserstoffs herstellbar. Das Synthesegas muss frei von Teer, Partikeln und Katalysatorgiften sein sowie neben einem geringen Inertgasanteil einen hohen Wasserstoffgehalt aufweisen. Weiterhin muss für einen hohen Umsatz zu Alkoholen bzw. Kohlenwasserstoffen das  $H_2/CO/CO_2$ -Verhältnis optimal eingestellt werden.

Die Herstellung von Methanol erfolgt über die so genannte Niederdruck-Synthese bei einem Druck von bis zu 100 bar und Temperaturen

von 250 bis 280 °C unter Verwendung von Katalysatoren auf Cu/ZnO-Basis. Aus thermodynamischen Gründen kann nur ein Teil des eintretenden Synthesegases zu Methanol konvertiert werden. Das Syntheserestgas wird recycelt, um eine möglichst hohe Kohlenstoff-Konversion zu erzielen. Voraussetzung hierfür ist eine genaue Einstellung der Zusammensetzung des Synthesegases. Alternativ kann eine Auslegung mit niedrigeren energetischen Wirkungsgraden (bezogen auf Methanol) gewählt werden, bei der das Syntheserestgas zur Co-Generation von Strom verwendet wird.

Synthetische Benzin- und Dieselmotorkraftstoffe können mittels Fischer-Tropsch-Synthese hergestellt werden. Die Reaktion findet bei Temperaturen von 200 - 300 °C bei einem Druck bis 25 bar unter Verwendung von Eisen- und Cobalt-basierten Katalysatoren statt. Die Primärprodukte sind nicht nur die gewünschten Kohlenwasserstoff-Fraktionen, sondern auch langkettige Kohlenwasserstoffe (wachsreiches „Syn crude“), die in einem weiteren Verfahrensschritt durch Zugabe von Wasserstoff in Kohlenwasserstoffe der gewünschten Kettenlänge umgewandelt werden müssen. Auch methanreiche Gase (SNG; Substitute Natural Gas) können aus Synthesegas durch eine so genannte Methanisierung hergestellt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von Kohlenwasserstoffen ist der MTG-Prozess (Methanol-to-Gasoline), bei dem Methanol an Zeolith-Katalysatoren umgesetzt wird. Methanol wird bei Temperaturen von 350 - 450 °C und geringem Überdruck von einigen Bar zunächst zu Dimethylether konvertiert, der über die Stufe der leichten Olefine schließlich zu Benzin-Fraktionen reagiert.

Auch Wasserstoff selbst wird im Wesentlichen aus Synthesegas hergestellt. Über die Wassergas-Shift-Reaktion wird der CO-Anteil im Synthesegas mit Wasserdampf in Wasserstoff und CO<sub>2</sub> umgewandelt und anschließend Wasserstoff vom Restgas (CO<sub>2</sub>, Rest-CO, Wasserdampf, evtl. N<sub>2</sub>, nicht umgesetzte Ausgangsstoffe) über eine Druckwechseladsorption (PSA) abgetrennt.

Neben biomassestämmigen, CO-haltigen Synthesegasen können für die Methanol-, Methan- und die Fischer-Tropsch-Synthese auch CO-freie Synthesegase verwendet werden. Dies eröffnet die Möglichkeit, kohlenstoffbasierte Kraftstoffe auch aus CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> zu erzeugen. Alle heute verwendeten, auf fossiler Basis hergestellten Kraftstoffe sind prinzipiell auch auf regenerativem Wege aus Biomasse, aus erneuerbarer Elektrizität bzw. deren Kombination zugänglich.

## Schlussfolgerungen

Für eine zukünftig mögliche Energiewirtschaft, die auf regenerativem Wasserstoff basiert, lassen sich folgenden Thesen formulieren:

### Was ist regenerativer Wasserstoff ?

Regenerativer Wasserstoff ist ein aus erneuerbarer Primärenergie erzeugter Sekundärenergieträger – und keine „Energiequelle“. Wasserstoff ist nur dann als Energieträger sinnvoll, wenn seine Erzeugung und Nutzung langfristig mit einer Einsparung klimarelevanter Emissionen einhergeht. Wasserstoff ist ein Sekundärenergieträger unter verschiedenen weiteren Optionen (z. B. Alkohole, Kohlenwasserstoffe), die regenerativen Wasserstoff in chemisch gebundener Form enthalten und bereits heute marktfähig sind.

### Woher kommt der regenerative Wasserstoff ?

Biomasse ist zwar – verglichen mit anderen regenerativen Quellen – relativ kostengünstig, die Ressourcen sind aber limitiert und müssen sich der Konkurrenz der Wärme- und Stromerzeugung stellen. Dieser Nutzungsweg kann mittelfristig (> 20 Jahre) für die Wasserstoffherzeugung erschlossen werden. Die Ressourcen über „solare“ Wege sind im Gegensatz zur Nutzung von Biomasse „theoretisch unbegrenzt“ verfügbar.

### Was ist „CO<sub>2</sub>-freier“ Wasserstoff ?

Neben regenerativem Wasserstoff lässt sich „CO<sub>2</sub>-freier“ Wasserstoff im Prinzip auch aus fossilen Energieträgern herstellen, wenn bei seiner Erzeugung das entstehende CO<sub>2</sub> abgetrennt und deponiert wird.

### Wie wird erneuerbare Energie am besten transportiert und in bestehende Energieverteilungsstrukturen integriert ?

Oberstes Ziel ist, die bestehende Infrastruktur auch für erneuerbare Energien zu nutzen. Dies gilt vor allem für die Energieverteilungsstrukturen über das Stromnetz, Verteilungswege für flüssige Kraftstoffe und das Erdgasnetz.

Steht regenerativ erzeugte Elektrizität zur Verfügung, so ist sowohl deren Transport wie auch deren direkte Nutzung einer Wasserstoffnutzung vorzuziehen.

Die kohlenstoffbasierten, flüssigen Kraftstoffe verfügen über etablierte Vertriebswege, die indirekt auch für den Wasserstoff erschlossen werden können („Erneuerbare Petrochemie“). Auch Methan ist ein exzellenter „Energie- und Wasserstoffträger“. Wasserstoff kann als Zusatzgas (einige Vol. % H<sub>2</sub> in Erdgas) oder als Austauschgas (z. B. synthetisches Methan aus H<sub>2</sub>/CO) über bestehende Gaspipelines vertrieben werden.

### Wann kommt die Wasserstoffwirtschaft ?

Das Ziel einer zukünftigen Versorgung mit Wärme, Strom und Kraftstoff ist nicht in erster Linie die Wasserstoffwirtschaft, sondern ein rationaler Umgang mit den Ressourcen und ein hoher Anteil erneuerbarer Energie. Erst wenn diese Voraussetzungen geschaffen sind, wird regenerativem Wasserstoff eine tragende Rolle zukommen. Denn die Nutzung erneuerbarer Elektrizität für die Wasserstoffherstellung ist teuer und erst dann sinnvoll, wenn 30 - 50% der Stromerzeugung aus regenerativen Quellen stammt (Zeithorizont > 50 Jahre).

Der Einstieg in eine Energieversorgung mit regenerativem Wasserstoff als Energieträger und -speicher ist aber in bestimmten Anwendungsfeldern bereits heute angezeigt. Beispiele hierfür sind die thermochemische Gaserzeugung aus Biomasse zu einem wasserstoffreichen Produktgas, das effizient verstromt aber auch zu Kraftstoffen umgewandelt werden kann. Auch eine saisonale Energiespeicherung über Wasserstoff zur Stromversorgung von Inseln in abgelegenen Gebieten ist bereits heute wirtschaftlich. Viele Anwendungen von regenerativ erzeugtem Wasserstoff können durch eine

optimale „Verzahnung“ mit dem heutigen Energiesystem erschlossen werden, ohne auf eine großflächige Wasserstoff-Infrastruktur angewiesen zu sein.

## Literatur

- [1] International Energy Agency: „Key World Energy Statistics“, Paris (2004)
- [2] M. Specht, U. Zuberbühler, A. Bandi, „Kraftstoffe aus erneuerbaren Ressourcen - Potentiale, Herstellung, Perspektiven“, Nova Acta Leopoldina NF 91, Nr. 339, S. 239 (2004)
- [3] T. Marquard-Möllenstedt, P. Sichler, M. Specht, M. Michel, R. Berger, K.R.G. Hein, E. Höftberger, R. Rauch, H. Hofbauer, „New Approach for Biomass Gasification to Hydrogen“ Proceedings of the „2<sup>nd</sup> World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection“, 10.-14.06.2004, Rom, p. 764 (2004)
- [4] J. Benz, U. Wittstadt, B.Hacker, F. Isorna, A.M. Chaparro, L. Daza, „Autonomous PV-hybrid system with electrolyser and fuel cell: Operating experience“, Proceedings des 14. Intern. Sonnenforum EUROSUN 2004, 20.-23.06.2004, Freiburg (2004)