

Dipl.-Ing. Jörg Schindler, L-B-Systemtechnik GmbH

(Antworten erstellt zusammen mit Ulrich Büniger, Werner Weindorf, Reinhold Wurster, Werner Zittel)

Gliederung

	Seite
Vorbemerkung	2
Neue Energieträger erzeugt aus fossilen (und nuklearen) Primärenergieträgern: Verwendungszusammenhänge	2
• Wasserstoff als Energiespeicher in „Stromsystemen“	2
• Methanol als Transportvektor für „Stranded Gas“	3
• Wasserstoff aus Erdgas für stationäre kraft-wärmegekoppelte Energiewandler	4
• Methanol aus Erdgas für stationäre kraft-wärmegekoppelte Energiewandler	6
• Wasserstoff aus Kohle	7
• Wasserstoff aus Kernenergie	8
• Wasserstoff und Methanol als Energieträger für mobile Kleinanwendungen	9
• Wasserstoff / Methanol als Kraftstoffe für den Verkehr	10
Neue Energieträger erzeugt aus regenerativen Energiequellen: Verwendungszusammenhänge	11
• Wasserstoff aus Biomasse für dezentrale BHKWs	11
• Methanol aus Biomasse für dezentrale BHKWs	12
• Wasserstoff als Transportvektor für erneuerbaren Strom	13
• Wasserstoff als Stromspeicher für den Lastausgleich mit der Option der Wärmenutzung	15
• Wasserstoff / Methanol aus erneuerbaren Energiequellen als Kraftstoffe für den Verkehr	17
Zusammenfassende Einschätzung	20

Vorbemerkung

Ausgangspunkt ist die Tatsache, dass heutige Energieversorgungsstrukturen nicht nachhaltig sind.

Die Beschäftigung mit neuen Sekundärenergieträgern beruht auf der Arbeitshypothese, dass durch den Einsatz von Wasserstoff (oder auch Methanol) der Übergang zu nachhaltigeren Energieversorgungsstrukturen erleichtert werden kann.

Motive für die Beschäftigung mit neuen Sekundärenergieträgern und die verfolgten Ziele sind daher:

- Das Streben nach Diversifizierung der Primärenergiequellen.
- Das Ermöglichen eines kontinuierlichen Übergangs von fossilen Energieträgern zu einem stetig steigenden Anteil von erneuerbaren Energien.
- Die Reduzierung der lokalen und globalen Emissionen.
- Die prinzipielle Eignung für konventionelle wie auch für neue Energiewandler.

Neue Energieträger aus fossilen (und nuklearen) Primärenergieträgern: Verwendungszusammenhänge

- **Wasserstoff als Energiespeicher in „Stromsystemen“**

Der Sekundärenergieträger dient in dieser Verwendung dem Ausgleich zwischen unterschiedlichen Erzeugungs- und Verbrauchslastgängen. Zu unterscheiden sind dabei die unterschiedlichen Zeiten und damit auch die Energiemengen und deren Dynamik, die zwischengespeichert werden sollen.

Angedacht in einem konventionellen Energieerzeugungskontext ist insbesondere Wasserstoff zum kurzfristigen Spitzenausgleich. Zum Beispiel kann in Schwachlastzeiten mit einem Elektrolyseur Wasserstoff erzeugt werden, der dann in Spitzenlastzeiten wieder verstromt wird oder als Kraftstoff für Fahrzeuge verwendet wird.

Zu erfüllen in konventionellen Systemen ist auch die Funktion von unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV). Heutige Techniken sind Batteriesysteme und Dieselgeneratoren (auch im Verbund). USV lassen sich auch mit Brennstoffzellensystemen (nur PEM Systeme sind geeignet) und Wasserstoff als Energiespeicher realisieren.

Beitrag zur Nachhaltigkeit

Ab einer gewissen Menge der zu speichernden oder in USV bereitzustellenden Energiemenge ist ein deutlich geringerer Materialeinsatz bei Wasserstoff als bei Batteriesystemen erforderlich.

Wirtschaftliche Fragen

Die spezifischen Gesamtkosten von Batteriesystemen sind hoch, diejenigen von Dieselgeneratoren eher niedrig. Abhängig von der zu speichernden bzw. der bereitzustellenden Energiemenge sowie den Anforderungen an die Dynamik der Leistungsbereitstellung, der geforderten Zuverlässigkeit und den Umweltaanforderungen können auch Brennstoffzellensysteme eine wirtschaftliche Chance haben.

Entwicklungen von USV Systemen auf der Basis von Brennstoffzellen werden von einigen Firmen betrieben und es gibt bereits erste kommerzielle Produkte.

- **Methanol als Transportvektor für „Stranded Gas“**

Die Idee ist, Erdgas oder Nebenproduktgas der Ölförderung, das in so kleinen und/oder so entlegenen Feldern liegt, dass sich der Bau einer Pipeline nicht lohnt, durch die vor Ort Umwandlung in Methanol zu nutzen. Der Transport des Methanols zu den Orten des Verbrauchs kann dann wesentlich billiger erfolgen als ein Transport des Erdgases. Dadurch sollen ansonsten nicht erschließbare Erdgasreserven zusätzlich nutzbar gemacht werden.

Dieser Transportvektor konkurriert mit der Umwandlung des Erdgases vor Ort in Flüssigerdgas (LNG) oder der Erzeugung von flüssigen Kohlenwasserstoffen via Fischer-Tropsch Synthese („Gas to Liquids“).

Beitrag zur Nachhaltigkeit

Bei der Nutzung ansonsten abgepackelten Gases der Erdölförderung könnte ohne zusätzliche CO₂-Emissionen ein nutzbarer Energieträger bereitgestellt werden.

Wirtschaftliche Fragen

Für die Möglichkeit einer wirtschaftlichen Nutzung von „stranded gas“ entscheidend sind folgende Aspekte:

- die Größe der Felder,
- die Entfernung zum nächsten Einspeisepunkt (Pipeline) (bestimmt die Kosten für eine konventionelle Nutzung des Erdgases),
- die geographische Lage der Erdgasvorkommen (schwierige Randbedingungen z.B. Arktis).

Bisher sind derartige Projekte nur vereinzelt realisiert worden (Beispiele: Anlagen von Methanex in Süd Chile, Trinidad und Neuseeland).

Es ist wahrscheinlich, dass aus wirtschaftlichen Gründen Anlagen zur Methanolerzeugung kleiner sein können als Anlagen zu Ergasverflüssigung.

Im Augenblick ist es für uns schwer einschätzbar, ob dieser Energievektor in Zukunft einmal zunehmende Bedeutung erlangen kann.

- **Wasserstoff aus Erdgas für stationäre kraft-wärmegekoppelte Energiewandler**

Dezentrale Blockheizkraftwerke mit Brennstoffzellentechnik und mit Erdgas als Primärenergiequelle sind in den letzten Jahren entwickelt worden und gehen zunehmend in die Erprobung. Anwendungsfälle sind insbesondere kleine Systeme für die Hausenergieversorgung und größere Systeme für den gewerblichen und industriellen Einsatz.

Die technische Herausforderung liegt in der Entwicklung von Reformern, die für die Umwandlung von Erdgas in Wasserstoff und für die anschließende Verwendung in PEM Brennstoffzellen erforderlich sind.

Verschiedene Systemkonzepte für die Hausenergieversorgung sind denkbar:

- kleine dezentrale Reformer und BHKWs für die Versorgung von Einfamilienhäusern,
- größere Reformer und lokale Wasserstoffnetze zur Versorgung von kleinen dezentralen BHKWs,
- sowie größere Reformer in Verbindung mit größeren BHKWs und kleinen Nahwärmenetzen.

Das erste und letzte Konzept dürften in der Einführungsphase priorisiert sein, da das zweite Konzept in unserem Wohnungsbestand mit relativ hohem spezifischen Raumwärmebedarf, der zusätzlich zum BHKW Spitzenlastkessel erforderlich macht, was zu einer unsinnigen Direktverbrennung von Wasserstoff führen würde.

Merkmal derartiger Anlagen ist die Substitution des Strombezuges durch Eigenerzeugung und auch die Einspeisung von Stromüberschüssen in das Netz. Virtuelle Kraftwerke werden möglich, die einen Teil des heutigen Kraftwerkparks ersetzen können und vorhandene Netzkapazitäten im Mittel- und Hochspannungsbereich überflüssig machen. Treiber für die Entwicklung dieser Anwendungen sind die Fortschritte in der Brennstoffzellentechnik (Lebensdauer, Kosten) und vor allem auch in der Gasaufbereitung (Reformer, Gasreinigung).

Bei der Wärmenutzung sind verschiedene Technologien mit jeweils verschiedenen Temperaturniveaus zu unterscheiden: Niedertemperatur (bei PEM Brennstoffzellen) und Hochtemperatursysteme (SOFC und MCFC Brennstoffzellen).

Reiner Wasserstoff als Energieträger ist nur bei PEM-Systemen erforderlich.

Beitrag zur Nachhaltigkeit

Im Vergleich zum Strommix Deutschland für den Zeitraum 2005 bis 2010 und Wärmebereitstellung mit dezentralen Erdgas Brennwertkesseln sind bis zu 25 % CO₂ Reduktion möglich – abhängig von den Betriebskonzepten.

Brennstoffzellensysteme, insbesondere Hochtemperatur Brennstoffzellen, sind auch geeignet für den Betrieb mit Biogas und können so eine Brücke bilden für den Einsatz erneuerbarer Energien.

Wirtschaftliche Fragen

Die Strompreise sind kritisch für die wirtschaftliche Durchsetzung: die Bezugspreise und die Entgelte bei der Einspeisung von dezentral erzeugtem Strom in das Netz. Fragen des Netzzugangs und der Netzbenutzungsgebühren sind ebenfalls von entscheidender Bedeutung.

Großes Interesse und zielgerichtete Aktivitäten gibt es derzeit bei allen wichtigen Herstellern von Heizungssystemen (z.B. Vaillant und Buderus). Aber auch große Stromversorger (Beispiele sind EnBW, RWE) gehen dieses Thema proaktiv an.

Bei den PEM Systemen gibt es starke Synergien mit der Entwicklung von Brennstoffzellenantrieben für den mobilen Einsatz. Sowohl Ballard als auch GM werden in naher Zukunft stationäre Systeme anbieten.

Entsprechende Systeme auf der Basis von Brennstoffzellen werden sich auf dem Markt durchsetzen können, sobald die spezifischen Kosten etwa € 1000 – 2000 je kW_{el} unterschreiten.

Eine Markterschließung für Hausenergiesysteme wird ab etwa 2004 – 2005 erwartet.

- **Methanol aus Erdgas für stationäre kraft-wärmegekoppelte Energiewandler**

Methanol wird dabei in zentralen Anlagen aus Erdgas erzeugt (heutiger Stand der Technik).

Die Methanolreformierung zu Wasserstoff erfolgt dezentral und der Wasserstoff wird in PEM Brennstoffzellen verwendet.

Derartige Systeme könnten als Ersatzsystem für heutige Heizöl- und Butan/Propan-Systeme in nicht mit Erdgas versorgten ländlichen Regionen geeignet sein.

Beitrag zur Nachhaltigkeit

Der Umwandlungswirkungsgrad ist schlechter als bei der Kette Erdgas-Wasserstoff.

Wirtschaftliche Fragen

Es ist eine neue Infrastruktur für den Transport und die dezentrale Lagerung von Methanol beim Verbraucher erforderlich. Nicht geklärt sind dabei Fragen im Zusammenhang mit der Giftigkeit von Methanol. Bezüglich der Brennbarkeit ist Methanol eher mit Benzin als mit Diesel und Heizöl vergleichbar.

Es ist uns nicht bekannt, dass dieses Konzept im Augenblick in Europa von der Industrie verfolgt wird. In den USA und Kanada gibt es aber entsprechende Überlegungen.

- **Wasserstoff aus Kohle**

Wasserstoff kann durch die Vergasung von Kohle hergestellt werden. Wasserstoff entsteht auch bei der Koksherstellung (das früher gebräuchliche Stadtgas bestand zu etwa 60 % aus Wasserstoff).

Beitrag zur Nachhaltigkeit

In Konkurrenz zu einer Wasserstofferzeugung aus Kohle und anschließender Verstromung steht die Kohlevergasung in großen Anlagen zu Synthesegas und die anschließende Verstromung in GuD-Anlagen. Diese Prozesskette hat einen höheren Wirkungsgrad (GuD Kraftwerke mit Kohlevergasung haben einen Umwandlungswirkungsgrad von > 45%). Daher scheint die Wasserstofferzeugung aus Kohle zum Zweck der Stromerzeugung kein sinnvoller Energiepfad zu sein.

Anders könnte sich die Situation in Ländern wie China darstellen, deren Energieversorgung sich auch künftig nennenswert auf Kohle abstützen wird. Hier könnte die Erzeugung von Synthesegas und/oder von Wasserstoff und die Verteilung in Pipelinesetzen

sinnvoll werden, da auf diesem Weg eine saubere Kohlenutzung über die Stromerzeugung hinaus möglich wird.

Konkurrierendes Verfahren: Synthesegas aus Kohle kann auch direkt (ohne externen Reformer) in Hochtemperatur Brennstoffzellen in kleinen Leistungsgrößen effizient (60 bis 70 %) in Strom umgewandelt werden.

Wirtschaftliche Fragen

Bei kostengünstiger Kohleförderung kann fallweise eine vergleichsweise günstige Bereitstellung von Wasserstoff möglich werden.

- **Wasserstoff aus Kernenergie**

Grundlast Überschüsse in Erzeugungsverbänden mit hohem Anteil der Kernenergie könnten für Spitzenlastzeiten nutzbar gemacht werden.

Ebenso ist bei entsprechenden Gegebenheiten auch die Erzeugung von Wasserstoff als Kraftstoff für den Verkehr möglich.

Beitrag zur Nachhaltigkeit

Hier wäre die gesamte Debatte über die Nachhaltigkeit der Kernenergie anzuführen – die konkrete Fragestellung dieser Anhörung ist aber eher nicht der geeignete Ort dafür.

Wer Kernenergie befürwortet, wird auch keine Probleme mit Wasserstoff aus Kernenergie haben. Und umgekehrt.

Wirtschaftliche Fragen

Zentral ist die Frage, ob es überhaupt nennenswerte neue Kernkraftkapazitäten geben wird – in Deutschland, in Europa, an anderen Orten der Welt. Strom aus neu errichteten Kernkraftwerken wäre z.B. in den USA heute schon nicht mehr preiswerter als Strom aus Windkraft.

Im Augenblick können wir nicht sehen, dass Kernenergie ein Treiber für Wasserstoff als Sekundärenergieträger sein könnte. Auch nicht, dass der Wunsch nach Wasserstoff als neuem Kraftstoff im Verkehr zu einer größeren Akzeptanz der Kernkraft führen könnte.

- **Wasserstoff und Methanol als Energieträger für mobile Kleinanwendungen**

Entwickelt werden derzeit verschiedenste Systeme zur Strombereitstellung in Klein- oder Kleinstanwendungen, z.B. DMFC-Systeme (d.h. Brennstoffzellen, die Methanol direkt nutzen können ohne vorherige Umwandlung in Wasserstoff) für Notebooks, Organizer, Handys, sowie PEMFC-Systeme mit Reformer für kleine stationäre oder portable Anwendungen.

Anwendungen sind also im wesentlichen: Batterie- und Akkuersatz für elektrische Kleingeräte.

Beitrag zur Nachhaltigkeit

Vermeidet Probleme der Batterieentsorgung. Die neuen Systeme haben den Vorteil längerer Betriebszeiten, was bei Primärbatterien zu einer deutlichen Reduktion der Stoff- und Lieferströme für den Energiespeicheraustausch führt.

Wirtschaftliche Fragen

In mobilen Kleinanwendungen kann es sehr früh Wasserstoff oder Methanol geben, da höhere spezifische Kosten kein Hindernis sind weil die technischen Vorteile gegenüber konventionellen Lösungen überwiegen.

Absolut gesehen wird dieser Markt vielleicht ein wichtiger Einführungsmarkt werden, aber energiewirtschaftlich gesehen ansonsten ein Nischenmarkt bleiben.

- **Wasserstoff / Methanol als Kraftstoffe für den Verkehr**

Wasserstoff und Methanol aus Erdgas, aber auch Wasserstoff erzeugt aus Benzin oder Diesel in Verbindung mit Brennstoffzellenantrieben werden von der Autoindustrie, der Energiewirtschaft und von Forschungsinstituten untersucht und entwickelt.

Beitrag zur Nachhaltigkeit

Wasserstoff (und in einem geringeren Maße Methanol) ermöglichen einen höheren Wirkungsgrad über die gesamte Energiekette „well to wheel“ bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieben als bei direkter Nutzung von Erdgas und Benzin in Verbrennungsmotoren. Dies gilt insbesondere für Druckwasserstoff als Kraftstoff und für Fahrzeuge, die in einem städtischen oder stadtnahen Fahrprofil betrieben werden.

Wirtschaftliche Fragen

Neue Kraftstoffe können eine Brücke zwischen fossil und erneuerbar erzeugten Kraftstoffen herstellen: ein schrittweises Einphasen von erneuerbaren Energien in den Verkehrssektor wird möglich. Dabei gibt es einen Trade-off zwischen der Höhe der CO₂-Reduktion durch einen Kraftstoff mit einem höheren regenerativen Energieanteil auf der einen Seite und den dadurch bedingten höheren spezifischen Kraftstoffkosten auf der anderen Seite. Mit fortschreitender Zeit und in einem Kontext mittelfristig steigender Preise für fossile Energieträger und sinkender Preise für erneuerbare Energien kann so der Anteil der erneuerbaren Energien kontinuierlich gesteigert werden.

Grundsätzlich gilt hier jedoch, dass die Fortschritte bei der Entwicklung von Brennstoffzellenantrieben (mit ihren Vorteilen in Bezug auf Effizienz und die Emission von Schadstoffen) ein wesentlicher Treiber sind für neue Kraftstoffe.

Neue Kraftstoffe wie Wasserstoff (oder Methanol) sind nutzbar sowohl in konventionellen Antrieben als auch in künftigen Brennstoffzellenantrieben. Dies erleichtert die Einführung.

(Weitere Ausführungen zu diesem Thema weiter unten beim Verwendungszusammenhang „Wasserstoff / Methanol aus erneuerbaren Energiequellen als Kraftstoffe für den Verkehr“.)

Neue Energieträger aus erneuerbaren Primärenergieträgern: Verwendungszusammenhänge

- **Wasserstoff aus Biomasse für dezentrale BHKWs**

Die energetische Nutzung der Biomasse erfolgt durch eine Umwandlung in Wasserstoff in einem Vergasungsprozess. Dabei kann der Energiegehalt der ganzen Pflanze genutzt werden. Der so erzeugte Wasserstoff wird dann in Brennstoffzellen zu Strom und Wärme umgewandelt. Dies kann erfolgen in dezentralen BHKWs zur Hausenergieversorgung sowie zur Energieversorgung für das Gewerbe.

Dazu ist eine Wasserstoffverteilung von der Erzeugung zum Ort des Verbrauchs erforderlich, z.B. ein lokales Wasserstoff-Pipeline-Netz.

Bei der Erzeugung von Reinwasserstoff via Biomassevergasung fällt während der Feinreinigung des Wasserstoffs in der Druckwechseladsorptionsanlage (DWA bzw. PSA) auf jeden Fall Spülgas an (das ist ein Gasgemisch bestehend aus Wasserstoff, CO, CO₂ und Methan), das zusätzlich in einem Verbrennungsmotor, einer Gasturbine oder einer Hochtemperaturbrennstoffzelle genutzt werden kann (und auch werden sollte).

Eine Alternative zu dem beschriebenen Verwendungszusammenhang kann so aussehen: Unmittelbare Verwendung des bei der Vergasung der Biomasse entstehenden Synthesegases (ohne CO-Konvertierung in Wasserstoff und ohne Wasserstoff-Feinreinigung – es ist nur eine Entstaubung erforderlich) in Hochtemperaturbrennstoffzellen oder in Gasturbinen oder Gasmotoren oder Gas- und Dampfturbinen (GuD). Sinnvolle Anlagengrößen in den eben genannten Anwendungen liegen bei 1 bis 5 MW elektrisch (und sind damit deutlich größer als die Brennstoffzellen-BHKWs in den einzelnen Häusern). Die Wärmenutzung erfordert ein Nahwärmenetz, dafür entfällt das H₂-Netz.

Beitrag zur Nachhaltigkeit

Die Gesamtwirkungsgrade der beiden Varianten „H₂-Nutzung in dezentralen PEMFC-BHKWs“ und „Verstromung des Synthesegases“ liegen nahe beieinander. Je nach Güte des Wirkungsgrads des mit Synthesegas betriebenen Energiewandlers, der auskoppelbaren Wärmemenge, dem Temperaturniveau der ausgekoppelten Wärme etc. kann der Wirkungsgrad der Variante mit Erzeugung von Reinwasserstoff, Verteilung über ein H₂-Netz und Verstromung in einer PEMFC besser oder schlechter sein als die Alternative. Beide Varianten stellen im Prinzip sinnvolle regenerative Energiepfade dar und verursachen niedrige Emissionen an Treibhausgasen.

Wirtschaftliche Fragen

Verschiedene Biomasse-Heizkraftwerke auf der Basis von Dampfturbinen werden zur Zeit errichtet, vereinzelt auch Anlagen mit Biomassevergasung und Verbrennungsmotor. Anlagen zur Biomassevergasung mit dem Ziel der Produktion von Wasserstoff befinden sich erst in der Entwicklung. Die Treiber für die Entwicklung der Anlagen zur Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse dürften kaum die dargestellten möglichen stationären Anwendungen sein (wegen der geringen möglichen Vorteile im Vergleich zu den Alternativen) sondern die Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff für den Verkehr. Der beschriebene stationäre Verwendungszusammenhang wird also nur dann eine Chance haben, wenn sich ein Markt für Wasserstoff als Kraftstoff und in der Folge auch ein Markt für Wasserstoff aus Biomasse entwickelt.

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten dürfte die Variante mit Nahwärmenetz eher günstiger sein.

- **Methanol aus Biomasse für dezentrale BHKWs**

Die Prozessfolge für diesen Verwendungszusammenhang umfasst alle Schritte der oben geschilderten Variante mit Wasserstoff als Energieträger plus zwei zusätzlichen Umwandlungsstufen. Die Prozessfolge umfasst die folgenden Schritte: Biomasseverga-

sung, *Methanolsynthese*, Transport, *Methanolreformierung*, Wasserstoff, Wasserstoffnutzung in Brennstoffzellen.

Beitrag zur Nachhaltigkeit

Im Vergleich zur direkten Nutzung von Wasserstoff sind zwei Prozessschritte mehr erforderlich. Es gibt keine Vorteile auf anderen Gebieten. Daher handelt es sich hier um keinen aussichtsreichen Verwendungszusammenhang.

Wirtschaftliche Fragen

Aufgrund der Vielzahl der notwendigen Prozessschritte und der im Vergleich zu den Alternativen zusätzlichen Prozessschritte ist der Einsatz von Bio-Methanol in stationären Anlagen mit hoher Wahrscheinlichkeit die teuerste Variante der Biomassenutzung. Es handelt sich hier nicht um einen aussichtsreichen Verwendungszusammenhang.

- **Wasserstoff als Transportvektor für erneuerbaren Strom**

Hierbei geht es um den Import von Solar-Wasserstoff aus dem Sonnengürtel der Erde oder um die Nutzung von großen Wind- oder Wasserkraftpotenzialen über große Entfernungen. Mögliche Beispiele sind: Transport von Energie aus solarthermischen Kraftwerken in Südeuropa und Nordafrika; die Nutzung von Wasserkraft in Kanada, Grönland; die Nutzung der Geothermie in Island; die Windkraftnutzung in Patagonien und anderen entlegenen Gebieten; etc. Der Wasserstoff wird entweder über Pipelines als Druckwasserstoff oder verflüssigt in Schiffen transportiert.

Die Alternative zu Wasserstoff als Transportvektor für erneuerbaren Strom ist der Stromtransport via Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ). Dies gilt nicht für den transozeanischen Transport über große Entfernungen (hier hat die HGÜ keinen Vorteil).

(Einen anderen Fall stellt Wasserstoff als Transportvektor für regenerativen Strom mit der anschließenden Nutzung als Kraftstoff dar. Dieser Fall wird weiter unten behandelt.)

Beitrag zur Nachhaltigkeit

Wasserstoff als Transportvektor ermöglicht die globale Nutzung erneuerbarer Energiequellen.

Der kumulierte Energieaufwand für diesen Energiepfad ist höher als bei der HGÜ (im Vergleich zur HGÜ ist auch die Rückverstromung erforderlich). Somit sind die Bereitstellungswirkungsgrade geringer als beim HGÜ-Pfad (siehe Tabelle). Insgesamt entstehen trotzdem sehr geringe kumulierte Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente), die lediglich auf die Emissionen verbunden mit dem Energieeinsatz für Anlagenherstellung und –wartung zurückzuführen sind.

	Strom via LH ₂	Strom via CGH ₂	Strom via HGÜ
Wirkungsgrad	23%	ca. 30%	77%
CO ₂ -Äquivalente [g/kWh _{el}]	32	< 32	10

Wirtschaftliche Fragen

Die Kosten bewegen sich in folgenden Größenordnungen (Zeithorizont 2010-2020):

- Stromgestehungskosten z.B. eines solarthermischen Kraftwerks in Nordafrika: ca. 0,06 €/kWh
- H₂-Gestehungskosten inklusive LH₂-Transport: ca. 0,20 €/kWh_{LH₂} (davon Schiff und Hafenanlagen: ca. 0,02 €/kWh_{LH₂})
- Nach Rückverstromung ergeben sich daraus Stromgestehungskosten von: ca. 0,40 €/kWh (Wirkungsgrad PEMFC ca. 50% angenommen; Kapitalkosten für PEMFC vernachlässigt)

Zum Vergleich bewegen sich die geschätzten Kosten für den Stromtransport aus einem solarthermischen Kraftwerk mittels HGÜ in der folgenden Größenordnung:

- Stromgestehungskosten z.B. eines solarthermischen Kraftwerks in Nordafrika: ca. 0,06 €/kWh
- Kosten des Stromtransports mittels HGÜ: ca. 0,03 €/kWh

- Kosten der Stromverteilung bis auf Niederspannungsebene:
ca. 0,03 €/kWh
- Gesamtkosten:
ca. 0,12 €/kWh

Dies zeigt, dass die Realisierung von LH₂ als Transportvektor für regenerativen Strom im Vergleich zur HGÜ eher weniger sinnvoll ist. Allerdings ist eine HGÜ Infrastruktur in Verbindung mit regenerativer Stromerzeugung erst jenseits von 2 GW wirtschaftlich.

Dieser Transportvektor wird nur dann erforderlich und sinnvoll sein, wenn der Bau oder die Genehmigung einer HGÜ schwierig oder unmöglich ist.

Trotzdem könnte Wasserstoff als Transportvektor unter folgenden Bedingungen aussichtsreich sein:

- Transportleistung < 2 GW;
- Große transozeanische Transportentfernungen;
- Standort der Rückverstromung des Wasserstoffs in Hafennähe;
- (zusätzliche) Verwendung des Wasserstoffs als Kraftstoff im Verkehr.
- Wasserstoff als Stromspeicher für den Lastausgleich mit der Option der Wärmenutzung

- **Wasserstoff als Stromspeicher für den Lastausgleich mit der Option der Wärmenutzung**

Angesprochen ist hier die generelle Funktion von Wasserstoff als Energiespeicher im Kontext erneuerbarer Energieversorgungssysteme. In naher Zukunft könnten insbesondere Wind-/Wasserstoffsysteme Bedeutung erlangen, in denen entweder Überschussstrom aus Windkraft in Wasserstoff gespeichert wird (oder eventuell auch off-shore Windkraftanlagen speziell zur Wasserstoffherzeugung errichtet werden).

Eine naheliegende Anwendung stellt auch die Versorgung von Energie-Inseln (auch im wörtlichen Sinne!) dar.

Die Nutzung des gespeicherten Wasserstoffs erfolgt dann über die Rückverstromung und gegebenenfalls auch mit der Möglichkeit der Wärmenutzung in BHKWs.

(Wasserstoff als Kraftstoff siehe weiter unten.)

Beitrag zur Nachhaltigkeit

Ausbau der erneuerbaren Energien bis zu 100% möglich.

Wirtschaftliche Fragen

In einer weitgehend auf erneuerbaren Energien basierenden Wirtschaft ist die Energiespeicherfunktion erforderlich, um den notwendigen Ausgleich zwischen den Lastgängen von Erzeugung und Verbrauch zu bewerkstelligen. Die Notwendigkeit der Speicherfunktion ist abhängig vom Anteil der Erneuerbaren an der gesamten Energiebereitstellung und auch von der Größe der Energieverbände (Netze).

Konkurrierende Systeme sind:

- Die weitgehende direkte Verwendung des Stroms, ermöglicht durch ein effizientes *Demand-Side-Management*, so dass der Ausgleich zwischen Energieangebot und -nachfrage keine (oder nur wenig) Energiespeicherung erfordert.
- Hybride Systeme aus fluktuierenden regenerativen Energien (wie PV und Wind) und speicherbare regenerative Energien (Biomasse) können die Lastanpassung ebenfalls bewerkstelligen.
- Batteriesysteme, Pumpspeicherkraftwerke und Druckluft-Kavernen-Speicher.

Im Kontext von Inselversorgungen sind die folgenden Aspekte relevant:

- Es besteht eine direkte Konkurrenz zum Dieselgenerator (auch mit Pflanzenöl möglich). Wesentlicher Faktor sind hier (wie natürlich auch in anderen Zusammenhängen der Erneuerbaren) die relativen Preise der fossilen Energien.
- Welche Investitionen wären notwendig für eine Einbindung der „Insel“ in übergeordnete Stromnetze?

„Inselssysteme“ haben insbesondere große Marktchancen in Entwicklungs- und Schwellenländern, in denen ausgebaute Stromnetze nicht vorhanden sind.

Außerdem können Inselssysteme mit Wasserstoff als Speicher auch in nördlichen Breitengraden aussichtsreich sein. Denn H₂-Speicher können auch hier – in Anwendungs-

fällen, in denen die Versorgung für etwa für 3-5 Tage sichergestellt werden muss - gegenüber Batteriespeichern die wirtschaftlichere Alternative darstellen.

- **Wasserstoff / Methanol aus erneuerbaren Energiequellen als Kraftstoffe für den Verkehr**

Der Wasserstoff verbindet den Stromsektor mit dem Kraftstoffsektor.

Ferner eröffnet Wasserstoff erstmals die Möglichkeit einer flexiblen Einführung biogener Kraftstoffe in einer einheitlichen Qualität.

Wasserstoff und Methanol sind grundsätzlich sowohl für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor wie auch für Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb geeignet.

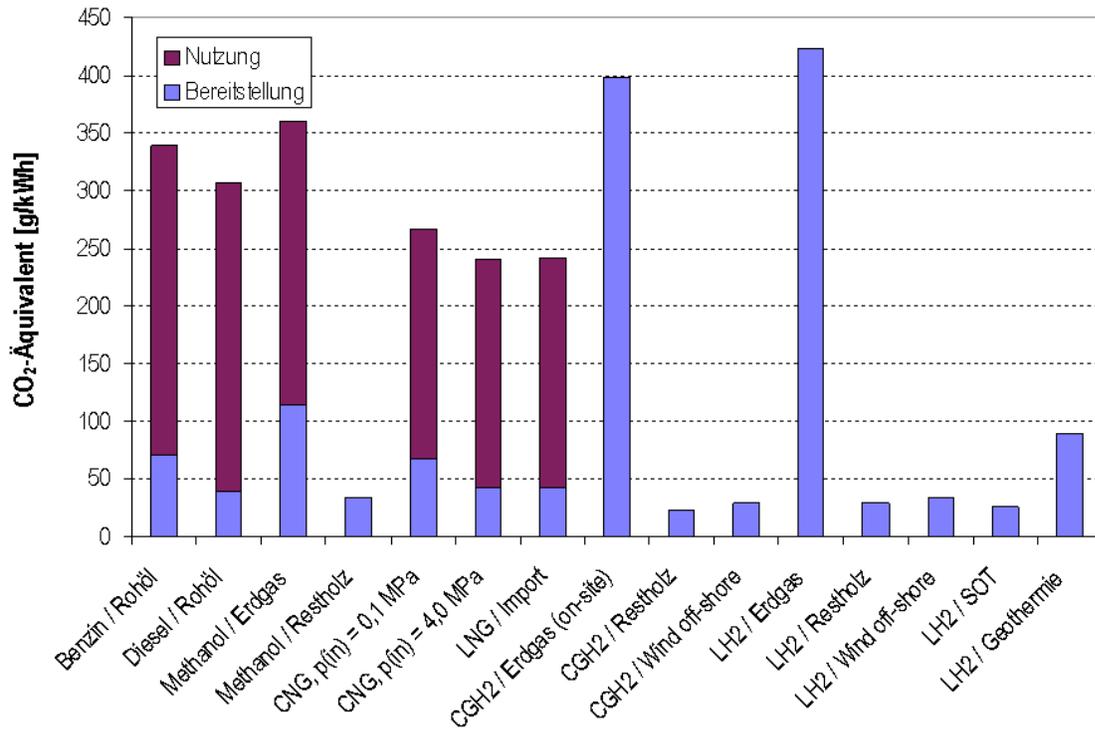
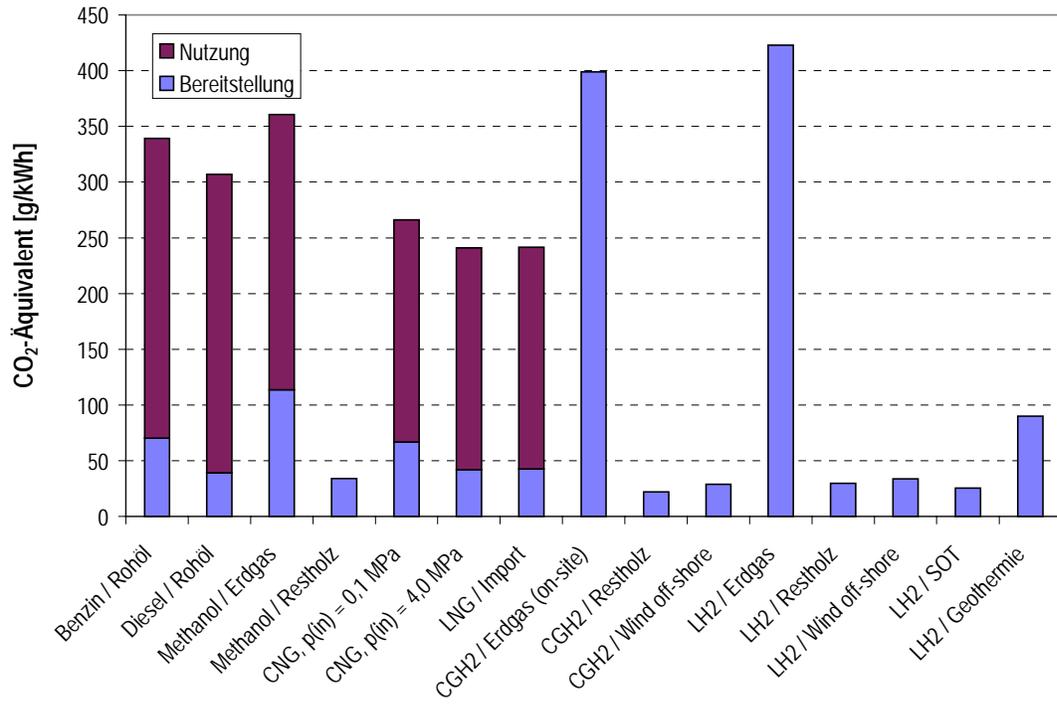
Beitrag zur Nachhaltigkeit

Die Emissionen an Treibhausgasen (CO₂-Äquivalente) bei Bereitstellung und Nutzung unterschiedlicher Kraftstoffe sind in dem folgenden Bild dargestellt.

- **Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente) verschiedener Kraftstoffpfade**

Kraftstoffe aus erneuerbaren Energiequellen zeichnen sich durch erheblich niedrigere Emissionen aus. Die im Vergleich zu den anderen erneuerbaren Energiequellen höheren Emissionen bei der Bereitstellung von Wasserstoff aus geothermischen Kraftwerken resultieren aus dem im geförderten Wasser gelösten CO₂. Ansonsten werden die Treibhausgasemissionen im wesentlichen nur verursacht durch den kumulierten Energieaufwand für die Anlagenherstellung und –wartung.

Eine Ausnahme bildet der dedizierte Anbau von Biomasse: in diesem Fall wird auf Grund der erforderlichen Düngung das sehr klimawirksame Lachgas (N₂O) in die Atmosphäre freigesetzt. Zusätzlich können Treibhausgas-Emissionen entstehen sofern bisher nicht landwirtschaftlich genutzte oder lange stillgelegte Flächen für eine agrarische Nutzung aktiviert werden (Veränderung des Kohlenstoffgehalts der Böden).



Wirtschaftliche Fragen

Wasserstoff als Kraftstoff für den Verkehr erfordert den Aufbau neuer Infrastrukturen (Erzeugung, Verteilung, Tankstellen). Bei Methanol als neuem Kraftstoff sind die notwendigen Anpassungen in der Infrastruktur geringer.

Es ist ein struktureller Vorteil von Wasserstoff, gleich aus welcher Quelle er erzeugt wird, dass auf der Fahrzeugseite nicht unterschiedliche Energiewandler entwickelt und zugelassen werden müssen. Dagegen würden wahrscheinlich im Falle von Pflanzenölen, RME, Ethanol oder Sunfuels (synthetische Kohlenwasserstoffe aus Biomasse) in letzter Konsequenz vier Motorenvarianten notwendig sein. In Deutschland wird im Rahmen der „Verkehrswirtschaftlichen Energie Strategie“ (VES), in der namhafte Automobilfirmen und Energieunternehmen zusammenarbeiten, die Einführung neuer Kraftstoffe untersucht und vorbereitet. Wasserstoff ist im Rahmen von VES als aussichtsreicher Kraftstoff identifiziert worden. Es ist geplant, ab 2005 mit dem Aufbau einer flächendeckenden Tankstellen Infrastruktur für Wasserstoff zu beginnen. Die Kosten verschiedener Kraftstoffe (inklusive Transport und Verteilung sowie Tankstelle) sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Die Kosten für die neuen Kraftstoffe für den Zeithorizont 2010 bis 2020 sind natürlich mit vielen Unsicherheiten behaftet. Sie sollen daher nicht „punktgenau“ interpretiert werden sondern sollen als Größenordnungen und als relative Reihung gelesen werden.

Kosten verschiedener Kraftstoffe an der Tankstelle

Kraftstoff	€/kWh
Benzin (inkl. Steuern)	0,11
Diesel (inkl. Steuern)	0,08
Benzin (ohne Steuern)	0,03
Diesel (ohne Steuern)	0,03
Methanol aus Erdgas	0,05
Methanol aus Restholz	0,08
CGH ₂ aus Erdgas (Reformer on-site)	0,07

CGH ₂ aus Restholz	0,09
CGH ₂ aus Wind off-shore (Elektrolyse on-site)	0,15
LH ₂ aus Erdgas	0,08
LH ₂ aus Restholz	0,13
LH ₂ aus Wind offshore	0,15
LH ₂ aus solarthermischen Kraftwerken	0,23
LH ₂ aus geothermischen Kraftwerken	0,15

Einige wesentliche Annahmen für die in der Tabelle dargestellten Kostendaten sind:

- Allgemeine Annahmen:
 - Zinssatz 8%.
 - Abschreibungsdauer bei den Kraftwerken = Lebensdauer, bei sonstigen - Anlagen 15 Jahre.
 - Druckwasserstoff Tankstellen geeignet zur Befüllung von 70-MPa-Fahrzeugtanks.
- Benzin und Diesel:
 - Die aktuellen Preise entsprechend www.benzinpreise.de (Benzin: 1,851 DM/l; Diesel: 1,555 DM/l).
 - MWSt. 16%.
 - Mineralölsteuer Benzin: 1,16 DM/l; Mineralölsteuer Diesel: 0,80 DM/l.

Zusammenfassende Bewertung

Wasserstoff als Energiespeicher in konventionellen Stromsystemen wird auch in Zukunft kaum eine Rolle spielen.

Die energetische Nutzung von Biomasse für stationäre kraft-wärmegekoppelte Anwendungen wird aller Wahrscheinlichkeit nach nicht über die Sekundärenergieträger Wasserstoff und Methanol realisiert werden.

Wasserstoff- und Methanolanwendungen für mobile Kleinanwendungen werden wohl kommen und sind getrieben durch technologische Motive und nicht durch energiewirtschaftliche Erwägungen.

Wasserstoff als Kraftstoff im Verkehr ermöglicht in Verbindung mit Brennstoffzellenantrieben die Reduktion von CO₂-Emissionen bereits im Falle von Erdgas als Primärenergieträger. Erst recht gilt dies für erneuerbar hergestellten Wasserstoff. Wasserstoff stellt somit die ideale Brücke von fossilen Kraftstoffen zu erneuerbaren Kraftstoffen dar.

Die Brennstoffzelle wird im Fahrzeug als Antriebsquelle kommen – insbesondere mit der direkten Speicherung von Wasserstoff an Bord –, da sie eine einfache und potenziell auch kostengünstige Lösung darstellt.

Es gibt erhebliche technische und wirtschaftliche Synergien für den Einsatz von mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellensystemen im Verkehr und in kleinen dezentralen BHKW Anwendungen. Synergien sind möglich zwischen der mobilen und stationären Verwendung von Wasserstoff und Brennstoffzellen auf folgenden Gebieten:

- Material- und Verfahrensforschung und Entwicklung,
- Produktion von Brennstoffzellen,
- Nutzung derselben Aggregate für stationäre und mobile Zwecke (langfristig),
- Herstellung von Wasserstoff,
- Infrastruktur für Wasserstoff (z.B. „Urban Fuel Cell Networks“).

Sobald Brennstoffzellen im Auto verfügbar sein werden, werden sie auch bei stationären Anwendungen zu neuen und dezentraleren Strukturen führen. In weitgefächerten Leistungsklassen wird eine effiziente Kraft-Wärme-Kopplung (und bei gesteigerten Betriebstemperaturen der PEMFC auch Kraft-Kältekopplung) möglich. Die stationären Anwendungen werden zuerst sowohl auf der Basis von Erdgas als auch von LPG erfolgen (mit Reformern).

Erneuerbar hergestellter Wasserstoff bietet all die Vorteile, welche man von heutigen Kohlenwasserstoffen fordern möchte, aber nur mit zunehmendem und zunehmend unverhältnismäßigem Aufwand erreichen kann: klimarelevante Unbedenklichkeit, keine lokalen Emissionen, reichliche Verfügbarkeit, effiziente Erzeugung und Nutzung, strategische Unabhängigkeit von einer oder wenigen Lieferregionen und Lieferanten.