

Bio-Wasserstoff als idealer Kraftstoff

Karl-Heinz Tetzlaff / Deutscher Wasserstoffverband e.V. / Mörikestr. 6 / D-65779 Kelkheim

Zusammenfassung

Der ideale Kraftstoff für den künftigen Verkehr mit Brennstoffzellenfahrzeugen ist Wasserstoff aus Biomasse. Durch die hohe Effizienz der Energiekette kann bereits von Stilllegungsflächen so viel Energie (10% PEV) bereitgestellt werden, dass davon der gesamte Verkehr versorgt werden könnte. Die Kraftstoffkosten sind geringer als bei heutigen Diesel- oder Benzinfahrzeugen. Bio-Wasserstoff ist auch bei der stationären Erzeugung von Strom und Wärme viel billiger als unsere derzeitige Praxis. Durch eine Besonderheit bei der Herstellung von Wasserstoff fällt konzentriertes CO₂ kostenlos an, das sich mit sehr geringen Aufwand in geologischen Schichten der Erde speichern lässt. Damit werden neue Kohlenstoffdeposits für unsere Urenkel geschaffen und zugleich unsere Klimaschulden zurück gezahlt.

Einleitung

Die gängigen Kraftstoffe für Otto- und Dieselmotoren erfüllen schon lange nicht mehr die Anforderungen an einen modernen Umweltschutz. Durch bessere Motoren, Rußfilter, schwefelarmen Kraftstoff und Abgaskatalysatoren versucht man diesen Mangel abzumildern. Bei den recht häufigen Kurzfahrten zum Einkauf oder zur Arbeitsstelle, kann ein Katalysator allerdings nicht die notwendige Betriebstemperatur erreichen. Fast alle Automobilhersteller nutzen zudem eine Lücke im Gesetz und schalten den Katalysator ab 120 km/h einfach ab (was die meisten Autofahrer allerdings nicht wissen). Weitere Gesundheitsgefahren bestehen im Tankstellenbereich und durch die Verwendung des Antiklopfmittels MTBE, das ab 2002 in den USA wegen Verseuchung des Grundwassers verboten wird. Eine Lösung für den Umweltschutz ist das alles nicht, für den Klimaschutz sind diese Maßnahmen sogar kontraproduktiv. Die aus Biomasse hergestellten Treibstoffe, Ethanol, Methanol und Bio-Diesel belasten zwar nicht das Klima, sind aber keine Lösung des Umweltproblems. Wasserstoff kann dagegen das Umwelt- und das Klimaproblem zugleich *lösen*. Mit Wasserstoff betriebene Ottomotoren erfüllen zwar die Anforderungen, erfordern aber wegen des geringen Wirkungsgrades viel Primärenergie. Brennstoffzellenantriebe, deren Serienproduktion die Industrie für 2004 angekündigt hat, ist Wasserstoff der ideale Kraftstoff. Dabei kommt dem aus Biomasse hergestellten Wasserstoff (Bio-Wasserstoff) eine besondere Bedeutung zu.

Die Wasserstoffwirtschaft wird kommen

Unter Fachleuten ist unbestritten, dass die zukünftige Energiewirtschaft eine Wasserstoffwirtschaft sein wird. Nur über den Zeitpunkt ihrer breiten Einführung gibt es unterschiedliche Meinungen. Wasserstoff lässt sich praktisch aus jeder Energieform und jedem Energieträger herstellen. Das Schlüsselement einer Wasserstoffwirtschaft ist die Brennstoffzelle. Sie kann Wasserstoff mit hohem Wirkungsgrad emissionsfrei in elektrische Energie wandeln. Sie ist als Kraftwerk viel billiger als jeder andere Kraftwerkstyp und verliert auch bei kleinen Baugrößen nicht diese grundlegenden Eigenschaften. Brennstoffzellen lassen sich sowohl als kleine Kraft-Wärme-Kopplungs-Einheiten stationär als auch im Verkehr einsetzen. Die Brennstoffzellen sind bereits fertig entwickelt, die Fertigungsanlagen geplant. Was fehlt, ist eine Order zur Massenproduktion. Hier kann die Landwirtschaft das entscheidende Signal geben. Durch die Massenproduktion werden die Brennstoffzellen so billig (< 50 DM/kW), dass sie in wenigen Jahren die Verbrennungsmotoren im Verkehr und die Großkraftwerke bei der Stromerzeugung verdrängen werden.

Herstellung von Bio-Wasserstoff

Der grundlegende Prozess zur Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse ist ein Vergasungsprozess. Die Prozesstechnik ist aus der Vergasung von Kohle, Öl und Gas seit mehr als 100 Jahren bekannt. Unser Stadtgas wurde so hergestellt. Der kohlenstoffhaltige Energieträger wird dabei zusammen mit Wasser auf Temperaturen oberhalb von 800°C erhitzt. Dabei entsteht Wasserstoff (H₂), Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO₂). Die Chemiker nennen diese Gasmischung Synthesegas. In einem nachgeschalteten Reaktor (Shift-Reaktor) kann dieses Gas bei etwa 350°C nahezu vollständig zu H₂ und CO₂ umgesetzt werden. Die beiden Gase lassen sich in einfachen Apparaten von einander trennen. Bei der Herstellung von reinem Wasserstoff fällt also zwangsläufig auch konzentriertes CO₂ an. Das ist das für den Klimaschutz ein Glücksfall. Etwa 75% der in der Biomasse enthaltenen Energie wird an den Wasserstoff übertragen, jeweils auf den Heizwert bezogen (Hu). Anders als bei der Verbrennung von Biomasse, ist ein hoher Wassergehalt nicht von Nachteil, denn der Wasserstoff kommt überwiegend aus dem Wasser.

Die Anlagentechnik hängt natürlich vom Einsatzstoff ab, so ist die Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas apparatetechnisch einfacher als aus Kohle oder Biomasse. Stand der Technik bei der Vergasung der Biomasse ist die Verwendung einer Wirbelschicht aus Sand. Um Störungen der Wirbelschicht durch den niedrigen Schmelzpunkt der Asche zu vermeiden, kann man die Temperatur nicht über 900°C erhöhen. Das gilt besonders beim Einsatz von Getreide, bzw. Getreidestroh. Da bei 900°C nicht alle höhermolekularen Verbindungen (Teer) sofort zerstört werden, ist eine längere Reaktionszeit oder der Einsatz katalytischer Systeme erforderlich. Wegen des geringeren Chlor- und

Schwefelgehaltes kann die Reinigung vor dem Eintritt in den Shift-Reaktor etwas einfacher gestaltet werden als bei der Nutzung von Kohle. Neben dem Wirbelschichtsystemen gibt es auch einige innovative Verfahren, die technisch einsatzfähig sind.¹ Shift-Reaktor und die H₂/CO₂-Trennung sind bewährte Prozessstufen, die keiner besonderen Anpassung bedürfen. Zur Zeit gibt es jedoch noch keine vollständigen Referenzanlagen zur Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse, jedenfalls nicht in technischer Größe. Das liegt nicht daran, dass man diese Anlagen nicht bauen könnte, sondern an einem Mangel an Phantasie über die Verwendung des erzeugten Wasserstoffs. Vorzeigbare Referenzanlagen produzieren nur Synthesegas zur Verwendung in Motor-BHKW's oder zielen auf die Herstellung von Methanol.

Neue Rohstoffdepots und doppelter Klimaschutz

Wie oben erwähnt, erhält man bei der Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse konzentriertes CO₂ als Kuppelprodukt ohne zusätzliche Kosten. Dieses CO₂ lässt sich in tiefen geologischen Schichten der Erde speichern.² CO₂ kann auch dazu genutzt werden, die Ausbeute in Öl- und Gasfeldern zu steigern. Aus dem eingelagerten CO₂ könnten unsere Urenkel z. B. die ganze Palette der Chemieprodukte herstellen.

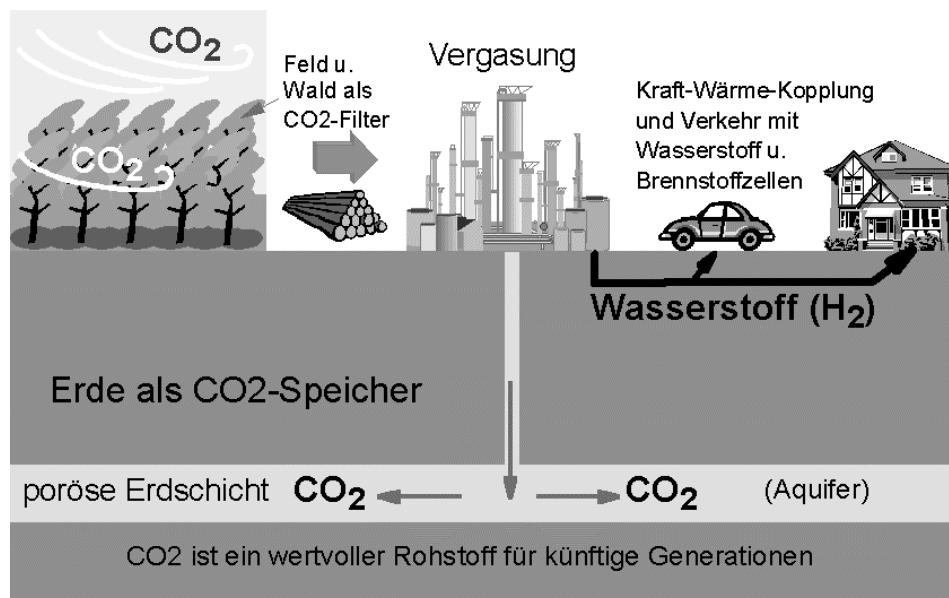


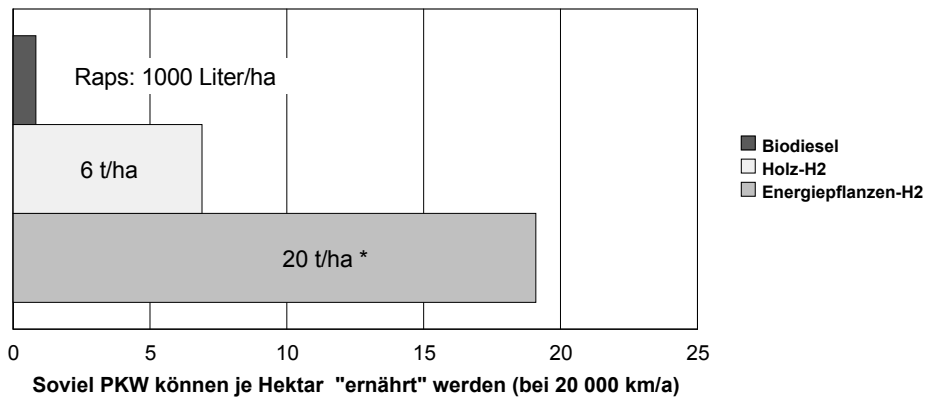
Abbildung 1 Wasserstoff aus Biomasse wirkt als CO₂-Filter und Kohlenstoffdepot

Da die Verbrennung von Biomasse an sich klimaneutral ist, wird durch die CO₂-Speicherung der Atmosphäre dieses Treibhausgas dauerhaft entzogen. Damit könnten wir also unsere Klimaschulden zurückzahlen. Für die Gesellschaft hat der aus Biomasse erzeugte Wasserstoff daher einen doppelten „Wert“. Im Vergleich dazu ist die Erzeugung von Wasserstoff aus fossilen Energieträgern auch bei Speicherung des CO₂ „nur“ klimaneutral. Das ist hinsichtlich der steuerpolitischen Behandlung von erheblicher Bedeutung.

Die Effizienz von Bio-Wasserstoff als Kraftstoff

Die Effizienz dieses Kraftstoffs kommt erst mit dem Einsatz von Brennstoffzellen richtig zur Geltung. Anders als bei Verbrennungsmotoren haben diese Antriebe auch im Teillastbereich (in der Stadt) einen hohen Wirkungsgrad. Das liegt an den hohen Wirkungsgraden von Brennstoffzelle (60%) und Elektromotor (90%). Da alle wesentlichen Antriebs- und Steuerungskomponenten „elektrisch“ sind, lassen sich kleine Schwungrad-Speicher oder Superkondensatoren zur Rückgewinnung von Bremsenergie leicht integrieren. Der typische Verbrauch eines PKW wird daher voraussichtlich bei etwa 0,5 kg Wasserstoff je 100 km liegen.² Die Automobilindustrie entwickelt solche Antriebe, weil sie davon ausgeht, dass diese in Zukunft billiger und komfortabler sein werden als herkömmliche Antriebe.

Die Effizienz bei der Anwendung besagt aber noch nicht alles. Bedeutsam sind auch die Umwandlungsverfahren von der Biomasse bis zum Tank. Bei der Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse wird der Energiegehalt der Ganzpflanze genutzt. Beim Biodiesel wird nur der Ölgehalt der Frucht genutzt, beim Ethanol nur Zucker und Stärke.



Abbild 2 Effizienz von Bio-Wasserstoff und Biodiesel

Im Vergleich zum vielgelobten Biodiesel wird deutlich, dass Bio-Wasserstoff eine weitaus bessere Ausnutzung der Agrarflächen verspricht. Abbild 2 zeigt auch, dass Energiepflanzen bessere Erträge abwerfen als der Wald. Bei gezieltem Wassermanagement lassen sich die Ernteerträge durchaus verdoppeln. Da es auf den Wassergehalt der Pflanzen nicht ankommt, können die Pflanzen auch im Stadium der Milchreife geerntet und anschließend siliert werden. Dadurch sind mehrere Ernten pro Jahr möglich. Langfristig sind weitaus höhere Erträge möglich, da die züchterischen Möglichkeiten der Energiepflanzen noch lange nicht ausgereift sind.

Das Tank-Reichweite-Problem

Die Brennstoffzellen mit den zugehörigen elektrischen Aggregaten nehmen heute kaum mehr Platz ein als ein Antrieb mit Verbrennungsmotor. Den Tank für Wasserstoff kann man hingegen nicht so einfach verstecken wie bisher. Nimmt man flüssigen Wasserstoff an Bord (-253°C), so braucht man für 600 km Reichweite ein Tankvolumen von 42 Liter. Der Tank ist zwar nicht größer als bei einem herkömmlichen Benziner, erfordert aus Gründen der Stabilität und Isolierung aber eine annähernd zylindrische Form. Nachteilig ist auch, dass etwa ein Drittel der Energie für die Verflüssigung aufgewendet werden muss. Die Verdichtung auf einige hundert bar, erfordert dagegen nur einen geringen zusätzlichen Energieaufwand. Das erforderliche Volumen eines Druckbehälters für 600 km Reichweite liegt aber bei ca. 130 Liter, das Gewicht bei etwa 24 kg. Diese Druckbehälter bestehen aus hochfesten Kohlenstofffasern. Die Herstellkosten sind bei Kleinproduktionen von 500 000 Stück/a mit ca. 800 US\$ noch recht hoch, bei einer wirklichen Massenproduktion wird sich das aber ändern. Das entscheidende Kriterium für Komponenten im Kraftfahrzeug ist aber das Gewicht. Hier schneidet der Drucktank am besten ab. Ein Tank-Reichweite-Problem ist daher nicht (mehr) erkennbar, allerdings ein Design-Problem.

Die Belieferung der Tankstellen mit gasförmigem Wasserstoff hat zudem den Vorteil, dass die Wasserstoff-Rohrleitungen für die Stromerzeugung und Heizung mitgenutzt werden kann.

Ist Wasserstoff aus Methanol ein Ausweg?

Einige Automobilfirmen nehmen das Tank-Reichweite-Problem allerdings als Vorwand um eine Methanol-Infrastruktur zu favorisieren. Zur weiteren Begründung wird angeführt, dass der Kunde einen flüssigen Energieträger tanken möchte, weil das einfacher sei. Wie Millionen von Autofahrern bezeugen können, die Erdgas als Druckgas tanken, ist der Betankungsvorgang genau so einfach und schnell wie beim Benzin. Der ernste Hintergrund dieser Scheindebatte liegt freilich darin, dass die Ölindustrie keinen Wasserstoff an ihren Tankstellen anbieten möchte, weil sie sonst 50-100% ihres Treibstoffmarktes verlieren würde.

Die erste Stufe der Methanol-Herstellung ist mit dem geschilderten Vergasungsprozess identisch. Die weitere Umsetzung läuft allerdings energetisch gesehen, rückwärts. Der hochwertige Wasserstoff reagiert mit dem minderwertigen CO₂ unter Energieverlusten zu Methanol. Im PKW wird der Vergasungsprozess ein zweites Mal in Gang gesetzt, was wiederum mit Energieverlusten einhergeht. Anstelle von Wasserstoff wird der Brennstoffzelle dann ein wasserstoffhaltiges Gas angeboten, was zu Effizienzverlusten führt. Die mit der zweifachen Energiewandlung verbundene Ressourcenverschwendung wäre noch hinnehmbar, wenn nicht andere gravierende Nachteile hinzu kämen:

- Ein wirksamer Klimaschutz ist mit Methanol nicht möglich.
- Anders als bei Benzin oder Diesel, befindet sich im Tank immer ein explosives Gemisch.
- Methanol kann das Grundwasser großflächig verseuchen, weil es wasserlöslich ist.
- Methanol ist giftig (60 ml sind tödlich), macht süchtig und führt zur Erblindung.

Durch die weltweite leichte Verfügbarkeit wäre dieser Billigalkohol eine große Gefahr für die armen Länder. So wie Ethanol die indogenen Völker zur Bedeutungslosigkeit hat verkommen lassen, kann Methanol auf makabre Weise zur

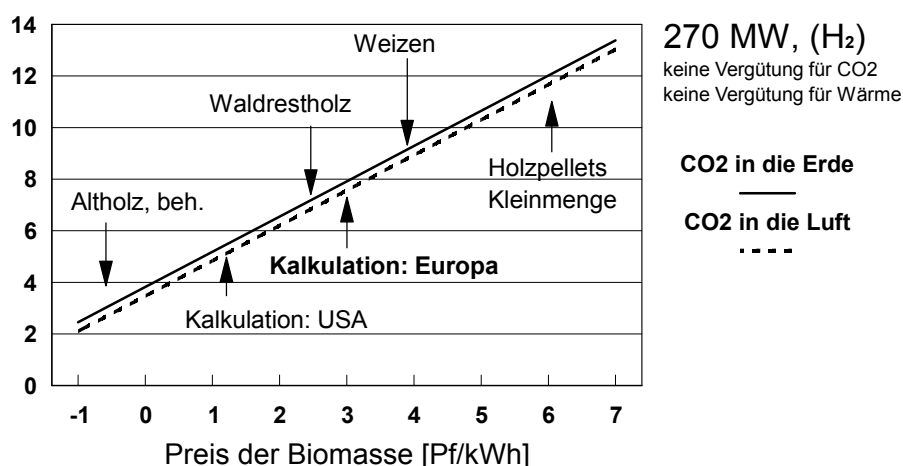
Ausrottung der Armut führen. Methanol ist also keine Lösung des Infrastruktur-Problems, auch keine Zwischenlösung. Unter Sicherheitsaspekten bietet Methanol keinen Vorteil gegenüber Wasserstoff.

Wirtschaftlichkeit von Bio-Wasserstoff

Der Gedanke, dass mit konsequenter Einführung einer Wasserstoffwirtschaft die Energiekosten halbiert und ein voller Klimaschutz gewährleistet werden kann², ist sicher gewöhnungsbedürftig.

Obwohl es noch keine großen Referenzanlagen gibt, ist die Abschätzung der Herstellkosten für Bio-Wasserstoff, ingenieurtechnisch gesehen, nicht besonders schwierig. Um der drohenden Glaubwürdigkeitslücke zu entgehen, möchte ich Arbeiten zitieren, die von der United Nations University 1998 angefertigt wurden.³

Wasserstoffpreis, Hu [Pf/kWh]



Abbild 3 Herstellkosten von Bio-Wasserstoff

Die Daten wurden lediglich auf die Besiedlungsdichte von Deutschland adaptiert. Das betrifft vor allem die Transportwege, die von 240 km auf 20 km gekürzt wurden. Um den gesamten Verkehr zu bedienen reichen 135 Anlagen mit 270 MW aus. Statistisch gesehen befindet sich nur unter jeder zweiten Anlage ein CO₂-Speichergestein von >800 m Tiefe. Deshalb wurden 80 km CO₂-Rohrleitung je Anlage kalkulatorisch berücksichtigt. Kernstück der Anlage ist ein allothermer druckaufgeladener Reaktor (75 bar) mit zirkulierender Wirbelschicht.

Die Preise für Biomasse in den USA habe ich im Diagramm eingetragen, halte sie aber für Europa nicht für realistisch. Mit 3 Pf/kWh für die Biomasse ist sicher eine bessere Annäherung an die Realität erreicht. Das bedeutet: wenn der Weizen als Ganzpflanze an die Vergasungsanlage verkauft wird, erzielt man einen etwas höheren Erlös als wenn nur die Körner wie bisher vermarktet werden. Mit dem Anbau von speziellen Energiepflanzen kann man natürlich mehr verdienen. Das Engagement der Bauern für die Energiewirtschaft wird dazu führen, dass der Landwirt wieder Herr über die Preise seiner Produkte wird!

Bei Erlösen von 3 Pf/kWh Biomasse muss man mit Herstellkosten von ca. 8 Pf/kWh für den Wasserstoff rechnen. Ich gehe davon aus, dass die Option „CO₂-Speicherung“ angesichts der geringen Preisunterschiede genutzt wird.

Bei Lieferung an den Privathaushalt würde dieser Wasserstoff inklusive Mehrwertsteuer ca. 11 Pf/kWh kosten. Daraus ließe sich für 11 Pf/kWh Strom herstellen, wenn man bereit ist für die anfallende Wärme 9,3 Pf/kWh zu zahlen. Der Erdgaspreis müsste beim Strombezug aus Großkraftwerken schon unter 4 Pf/kWh fallen, um gegenüber einer Vollversorgung mit Wasserstoff konkurrenzfähig zu sein.

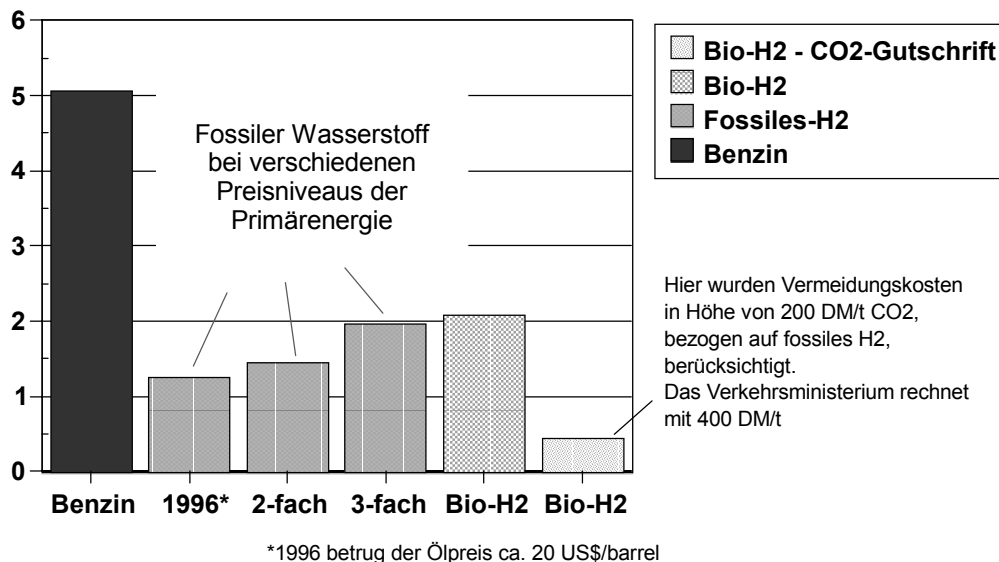
An der Tankstelle würde der Wasserstoff inklusive Mehrwertsteuer ca. 14 Pf/kWh kosten. Die höheren Kosten entstehen durch die Personalkosten einer Tankstelle und dem Aufwand zur Verdichtung auf 550 bar. Bei einem Verbrauch von 0,5 kg Wasserstoff/100 km sind das Kraftstoffkosten von ca. 2,40 DM/100 km. Bio-Wasserstoff ist also auch aus ökonomischer Sicht ein idealer Kraftstoff.

Die Konkurrenzsituation an der Tankstelle

Wie Abbild 4 zeigt, ist die Konkurrenzsituation gegenüber Benzin ganz ausgezeichnet. Hier können hohe Pioniergewinne erzielt werden, selbst dann, wenn die Politik diese Technologie nicht fördert. Man kann aber davon ausgehen, dass die Ölkonzerne ihre Verweigerungshaltung nicht sehr lange durchhalten werden. Früher oder später werden sie Wasserstoff aus fossilen Energieträgern an ihren Tankstellen anbieten.

Bio-Wasserstoff bedarf zur breiten Einführung daher der richtigen politischen Begleitung. Eine allgemeine Steuer auf Energie nützt da wenig. Eine CO₂-Steuer (auch negativ) oder Zertifikate, die auf die Besonderheit des gespeicherten biologischen Kohlenstoffs (als CO₂) Rücksicht nehmen, wären schon besser. Man kann das eingelagerte CO₂ bzw. die Ausfilterung von CO₂ aus der Atmosphäre auch vergüten. Wenn die vom Ministerium intern benutzten Zahlen je Tonne vermiedener CO₂-Emissionen zum halben Nennwert einsetzen würde, wäre Bio-Wasserstoff gegenüber dem fossilen Wasserstoff auf jeden Fall konkurrenzfähig (Abb. 4). Für die Volkswirtschaft zahlt sich das auf jeden Fall aus, denn die ganze Wertschöpfung bleibt im Lande. Auf Steuern muss der Staat dennoch nicht verzichten, bei gleichen spezifischen Kraftstoffkosten kann er sogar mehr verdienen als beim Benzin.

Treibstoffkosten [DM/100 km], ohne Steuern



Abbild 4 Bio-Wasserstoff mit fossiler Konkurrenz

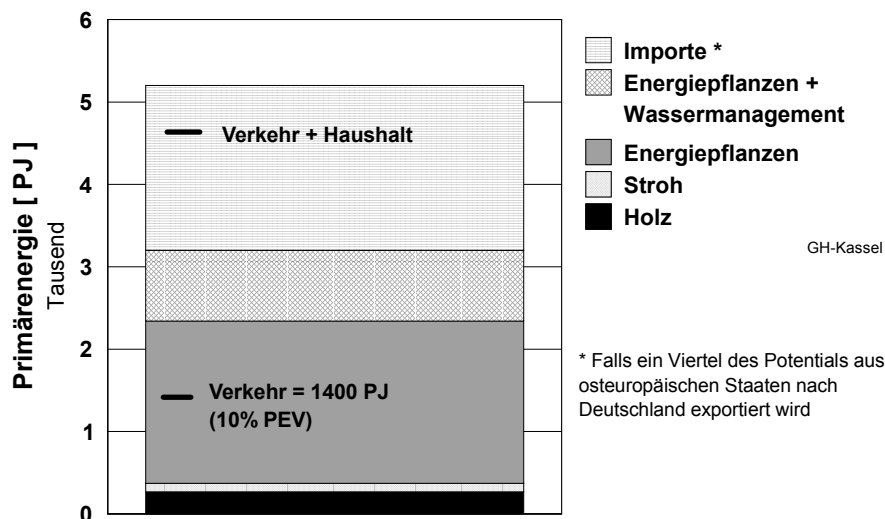
Man kann mit Sicherheit davon ausgehen, dass jede Regierung dafür sorgen wird, dass der Landwirt als Energiewirt genau so gut behandelt wird wie der Landwirt als Nahrungsmittelproduzent, wahrscheinlich aber viel besser, weil an Energie, anders als bei Lebensmitteln, stets ein Mangel herrschen wird. Durch die enge Verzahnung von Pflanzen für Lebensmittel und Pflanzen zur Energieproduktion, wird sich auch die Überfluss-Situation bei den Lebensmitteln radikal ändern – mit unabsehbaren Auswirkungen auf das Preisniveau. Wer wünscht sich da nicht einen Bauernhof?

Potentiale

Das Potential der Biomasse wird in aller Regel unterschätzt. In vielen Köpfen spukt Biomasse als irgendwo herumliegender Abfall herum. Bei einer breiten kommerziellen Nutzung geht es aber um den gezielten Anbau von ertragreichen Energiepflanzen auf allen verfügbaren Flächen und mehren Ernten/a. Das ist ein großer Unterschied.

Ohne besondere Anstrengungen könnten wir in Deutschland 10% des Primärenergieverbrauchs (PEV) aus Biomasse gewinnen. Dafür werden in etwa die vorhandenen bzw. geplanten Stilllegungsflächen in der Landwirtschaft benötigt. Dieses Potential reicht aus, um den gesamten zukünftigen Verkehr zu versorgen.

Die Produktion von Wasserstoff aus Holz und Energiepflanzen würde auch die Integration der osteuropäischen Länder in die EU entscheidend erleichtern. Die hohe finanzielle Belastung, die sich aus dem Überangebot von Agrarflächen ergibt, könnte durch die Produktion von Wasserstoff leicht zu einer sprudelnden Einnahmequelle werden. Durch die Veredelung der Biomasse zu Wasserstoff sind die Exportkosten nach Westeuropa zudem außerordentlich niedrig (0,2-0,6 Pf/kWh). Das trägt zur Stärkung dieser Volkswirtschaften bei. Mit der Produktion des heimischen Energieträgers „Wasserstoff“, könnte die EU nicht nur die Importabhängigkeit von Energieträgern vermindern, sondern auch den Ausstoß von Treibhausgasen möglicherweise um mehr als 50% reduzieren. Eine finanzielle Belastung der Bevölkerung ist damit nicht verbunden.



Abbild 5 Potential der Biomasse

Bio-Wasserstoff trägt auch zur Stabilisierung des Weltfriedens bei. Auf Öllieferungen aus unsicheren Ländern sind wir dann nicht mehr angewiesen. Bio-Wasserstoff könnte ein Modellfall für die dichtbevölkerten Länder der Dritten Welt sein. Anders als sonst, könnte eine nachhaltige Entwicklung von ländlichen Regionen ausgehen. Die Wasserstofftechnologien könnten für den Mittelstand zum Exportschlager werden.

Bio-Wasserstoff ist mehr als ein idealer Kraftstoff

Biowasserstoff lässt sich genau so gut zur dezentralen Stromerzeugung einsetzen. Dadurch lässt sich die Wasserstoff-Infrastruktur gemeinsam nutzen. Diese Infrastruktur wird im Wesentlichen aus dem vorhandenen Erdgasnetz bestehen, das ohne grundlegende Modifikationen für Wasserstoff nutzbar ist. Die Kapazität dafür muss nur geringfügig ausgebaut werden, auch wenn die gesamte Energiewirtschaft auf Wasserstoff umgestellt wird. Wegen der erheblichen Vorteile von Bio-Wasserstoff wird man sicher so viel Wasserstoff aus Biomasse erzeugen wie möglich. Damit bleibt aber noch genügend Raum für die Erzeugung von Wasserstoff aus fossilen Energieträgern, was weder umweltschädlich noch klimaschädlich ist. Die Einführung einer Wasserstoffwirtschaft wird auch ein Türöffner für die solaren Technologien sein, die mit Wasserstoff ein geeignetes Speicher- und Transportmedium vorfinden. Hinsichtlich Klimaschutz sind die Vorteile von Bio-Wasserstoff nicht zu übertreffen. Selbst wenn nur der Verkehr mit Bio-Wasserstoff versorgt werden würde, was etwa einem Primärenergieanteil von 10% entspricht, könnte unsere CO₂-Bilanz schon um ca. 33% verbessert werden. Dass man durch viel Auto fahren den Klimaschutz noch verbessern kann, ist für viele allerdings gewöhnungsbedürftig.

Hinweis:

Vortrag im Tagungsband „NAROSSA, 7th International Conference for Renewable Resources“ 11-12 Juni 2001, Magdeburg

Literatur:

¹ Carbo-V-Vergasung der UET, Freiberg

² TETZLAFF, K.-H. (1999): Das Treibhausproblem lösen und die Energiekosten senken – das geht. SHAKER Verlag, Aachen; ISBN 3-8265-6631-9; <http://www.k-tz.de/tz2/index.html>

³ WILLIAMS, Robert H. Chapter 6 “Fuel decarbonisation for fuel cell applications and sequestration of the separated CO₂” in AYRES, Robert U. (Editor) (1998): Eco-restructuring: Implications for sustainable development; United Nations University Press; UNUP-984; ISBN 92-808-0984-9; <http://www.unu.edu/unupress/unubooks/uu24ee/uu24ee00.htm>