

Thermochemische Wasserstoffherstellung aus Biomasse zur größtmöglichen Steigerung der Effizienz der energetischen Biomassennutzung



Beispiel: Zuckerrohranbau¹

Schülerwettbewerb der Siemens Stiftung

„Energie-Genies der Zukunft - Ideen für mehr Effizienz“

Autoren: Fabian Braun, Markus Kaiser, Kai Hippler

Betreuende Lehrkraft: Herr Oliver Frühwein, Einhard-Gymnasium Aachen

¹ Bildquelle: wikimedia.org unter: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d5/Cultura_cana-de-açucar_REFON_.jpg (22.12.2009).

1. Abstract

Die Arbeit „Thermochemische Wasserstoffherstellung aus Biomasse zur größtmöglichen Steigerung der Effizienz der energetischen Biomassenutzung“, verfasst von Fabian Braun, Markus Kaiser und Kai Hippler von November 2009 bis Januar 2010, beschäftigt sich mit der Frage, wie Biomasse innerhalb des Energiesystems am effizientesten in Nutzenergie umgesetzt werden kann.

Der Fokus der Arbeit liegt auf dem Verfahren der thermochemischen Wasserstoffherstellung aus Biomasse. Dieses Verfahren wird im Bezug auf Funktionsweise, Wirkungsgrad und Potential, sowie auf mögliche Einbindungsszenarien in das Energiesystem untersucht und mit etablierten bzw. bekannten Methoden der energetischen Biomassenutzung verglichen. Das Ziel der Arbeit ist es, auf der Basis dieser Informationen zu bewerten, ob die thermochemische Wasserstoffherstellung den erstrebenswertesten Weg darstellt, Biomasse energetisch zu nutzen. Wie sich aus den erarbeiteten Daten schließen lässt, ist Biowasserstoff durch seine Überlegenheit an Effizienz und Potential und seine vielfältige Verwendungsmöglichkeit den herkömmlichen Methoden, Biomasse zu verwerten, deutlich überlegen. Daraus ergibt sich die Konsequenz, dass jede für energetische Zwecke verfügbare Biomasse über die Option Biowasserstoff genutzt werden sollte.

Inhaltsverzeichnis

1. Abstract.....	2
2. Einleitung und Ausgangssituation	7
3. Energetische Nutzung von Biomasse heute	7
I. Biogas.....	7
II. Rapsdiesel.....	8
III. Bioethanol	8
IV. Biomasseverbrennung.....	8
V. BtL-Kraftstoff	9
4. Problemskizze und Lösungsansatz.....	9
5. Lösungsweg - Biowasserstoff	10
VI. Dampfreformierung von Biomasse zur Wasserstoffherstellung.....	10
VII. Autothermer Wirbelschichtvergasungsreaktor	13
VIII. Effizienz.....	14
IX. Potential	17
X. Wirtschaftlichkeit.....	19
XI. Referenzanlage in Güssing	19
XII. Möglichkeiten der Wasserstoffnutzung.....	20
6. Ergebnis.....	23
XIII. Vergleich von Biowasserstoff und konventioneller Biomassenutzung	23
XIV. Fazit und Ausblick	24
7. Literaturverzeichnis	25

Abkürzungen und Glossar

Abkürzung	Erläuterung
atro	absolut trocken
BHKW	Brenn-Heiz-Kraftwerk
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BtL	Biomass to Liquid – Verflüssigung von Biomasse zur Kraftstoffgewinnung, auch FT-Treibstoff genannt.
BZ, FC	Brennstoffzelle(n), fuel cell
CCS	Carbon Capture&Storage – Kohlenstoffabtrennung und -speicherung zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen.
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DWV	Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband
EEE	Europäische Zentrum für erneuerbare Energie
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FZJ	Forschungszentrum Jülich
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe
IPHE	International Partnership for the Hydrogen Economy
KKW	Kraftwärmekopplung
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NHA	National Hydrogen Association
TM	Trockenmasse

Begriff	Erläuterung
anaerob	Lebewesen, die für ihren Atemprozess keinen Sauerstoff (O ₂) benötigen, bezeichnet man als anaerob.
autotherm	Bezeichnung für chemische Prozesse, bei denen eine endo- und exotherme Reaktion gleichzeitig ablaufen, so dass der Prozess von äußerer Wärmezufuhr unabhängig ist.
Biowasserstoff	Wasserstoff, der aus Biomasse hergestellt wurde.
FT-Synthese	Fischer-Tropsch-Synthese: Verfahren zur Herstellung flüssiger Kraftstoffe aus festen Kohlenwasserstoffen (z.B. Biomasse, Kohle), FT-Treibstoff oder

	BtL genannt.
Konventionelle Biomassenutzung	Heute verbreitete bzw. bekannte Methoden zur energetischen Nutzung von Biomasse, die zum Großteil im 3. Teil dieser Arbeit erläutert werden (Biogas, Biotreibstoff der 1. und 2. Generation).
Vergasung	Chemischer Prozess bei dem ein fester oder flüssiger Stoff in einen gasförmigen umgewandelt wird. Die Vergasung ist sehr ähnlich zur Verbrennung, findet jedoch bei Sauerstoffmangel statt.
Wirkungsgrad	Angaben über den Wirkungsgrad sind sofern nicht anders vermerkt auf den Gesamtprozess und auf den Heizwert des eingesetzten Stoffes bezogen.

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abbildung 1: Gleichgewichtskurven bei Kohlenstoffvergasung	12
Abbildung 2: Thermochemische Wasserstoffherstellung	13
Abbildung 3: Autothermer Steam-Reformer	14
Abbildung 4: Flow Sheet der H ₂ Patent GmbH	17
Abbildung 5: Biowasserstoff statt Öl und Gas	18
Abbildung 6: Wasserstoff-Speicherung in Salzkavernen	20
Abbildung 7: Energieverbrauch im Vergleich	24

Vorwort

Wir bedanken uns vielmals für die persönlichen Auskünfte und Informationen

von

*Michael Anton, Hayo Sieckmann, Dr. Ing. Wolfgang Wendel, Dip. Ing. Karl-Heinz
Tetzlaff und Prof. Dr.-Ing. Markus Schröder.*

Außerdem bedanken wir uns für Selbiges bei der

H₂Patent GmbH

und der

*Tuttahs & Meyer Ingenieurgesellschaft für Wasser;
Abwasser und- Abfallwirtschaft mbH.*

2. Einleitung und Ausgangssituation

Im Zuge des Klimawandels und der zunehmenden Ressourcenknappheit fossiler Energieträger wird verstärkt über die Nutzung erneuerbarer Energiequellen nachgedacht. Ein Beispiel ist die energetische Nutzung von Biomasse. Hiermit ist neben der Verwertung biogener Reststoffe oft auch der gezielte Anbau von Energiepflanzen gemeint. Dabei gilt es zu beachten, dass der Energiepflanzenanbau nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion treten darf. Es dürfen nur überschüssige landwirtschaftliche Flächen für Energiepflanzen genutzt werden. Aus dieser „Teller-Tank-Diskussion“ lässt sich schließen, dass, wenn die energetische Verwendung von Biomasse in Betracht gezogen wird, sie möglichst effizient sein sollte, damit so wenig Fläche wie möglich gebraucht wird. Welche Möglichkeiten zur energetischen Verwertung von Biomasse gibt es? Wo finden sich in diesem Zusammenhang „Ideen für mehr Effizienz“? Welche innovative, kreative Lösung gibt es möglicherweise? Diese und damit zusammenhängende Fragen sollen in dieser Arbeit beantwortet werden. Zunächst werden die prominenteren „konventionellen“ Methoden, Biomasse zu verwerten, kurz genannt und erklärt.

3. Energetische Nutzung von Biomasse heute

I. Biogas

Zur Herstellung von Biogas lässt sich Biomasse in Form von Reststoffen wie beispielsweise Gülle sowie Energiepflanzen (z. B. Mais) verwenden. Jedoch ist weder die ganze Pflanze noch jede Pflanzensorte nutzbar, da das organische Material für die Biogasanlage „verdaulich“ sein muss. So können alle holzartigen Pflanzen, die Lignin beinhalten (z. B. Miscanthus), nicht verwendet werden, da die eingesetzten Bakterien dies nicht angreifen können.²

Die nutzbare Biomasse wird in einem Behälter ohne Sauerstoffzufuhr zum Vergären gebracht. Bei der Zersetzung der Biomasse durch anaerobe Bakterien entsteht Faulgas, welches nach einer Trocknung, Entschwefelung und CO₂-Abtrennung als Biomethan in das Erdgasnetz eingespeist oder an Tankstellen verkauft werden kann. Die meistgenutzte Alternative dazu ist die direkte Verbrennung in einem Blockheiz-

² Was ist Biogas?, Enaro Biogas unter: http://www.enaro-biogas.de/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=27.

kraftwerk, welches Strom und Wärme produziert. Der Strom lässt sich mithilfe des EEG in das Stromnetz einspeisen außerdem kann die Wärme standortbedingt zum Heizen in nahe gelegenen Gebäuden genutzt werden. Nach dem „Scheffer-Konzept“ könnten Hektarerträge von mehr als 7.000 l Öl-Äquivalent in Form von Strom und Wärme (entspricht 300,53 GJ/ha) nutzbar gemacht werden.³ Vernachlässigt man die beim Biomassetransport und -anbau verursachten Emissionen, ist Biogasnutzung CO₂-neutral.⁴

II. Rapsdiesel⁵

Zur Herstellung von Rapsdiesel wird Raps angebaut. Dessen Samen wird geerntet und das enthaltene Pflanzenöl wird zu Rapsmethylester(=Rapsdiesel) weiterverarbeitet. Der in Deutschland verkaufte Dieselkraftstoff beinhaltet laut Gesetz zu mindestens 5% Biodiesels.

Der Hektarertrag liegt bei 1600l Rapsdiesel⁶ (entspricht 53,44 GJ/ha).

III. Bioethanol

Zur Herstellung von Bioethanol lassen sich verschiedene Getreidesorten sowie zuckerhaltige Pflanzen (z.B. Zuckerrohr) nutzen. Je nach Konsistenz der Biomasse müssen Enzyme bzw. Säuren eingesetzt werden, um enthaltene Stärke oder Cellulose aufzuspalten. Danach wird die Biomasse mit Hefe versetzt und fermentiert. Anschließend wird das enthaltene Ethanol konzentriert und auf eine Reinheit von 99,95% gebracht.⁷ Der Flächenertrag entspricht bei Zuckerrohr 6380l/ha (entspricht 134,36 GJ/ha), bei Weizen 2760l/ha Bioethanol (entspricht 58,12 GJ/ha)⁸. Bioethanol und Rapsdiesel sind aufgrund von Lachgasemissionen klimaschädlich.⁹

IV. Biomasseverbrennung

Verwenden lässt sich jede Form von Biomasse, solange sie trocken genug zur Verbrennung ist (< 15% Wassergehalt). Dabei unterscheidet man zwischen der Ko-Verbrennung, bei der Biomasse in bestehenden Kohlekraftwerken mit verbrannt wird,

³ Vgl. Dipl.-Ing. Götz, Johann, GETproject, Broschüre, *Verwertung nachwachsender Rohstoffe* S.2.

⁴ Geht man davon aus, dass die zur Herstellung von Biogas (Biomasserstoff) benötigten Rohstoffe mithilfe von Fahrzeugen produziert und verteilt werden, die regenerativen Kraftstoff nutzen, ist Biogas CO₂-neutral. Dies ist für eine vollständig erneuerbare Energiewirtschaft anzustreben.

⁵ Die Begriffe Rapsöl, Rapsdiesel und Biodiesel werden äquivalent verwendet.

⁶ Claas Vision, *Raps – die Frucht mit Riesenpotenzial*, unter: http://www.claas.com/countries/generator/cl-pw/de/services/claas-vision/archiv/vision21_lang=de_DE.pdf, S.5 (21.12.2009).

⁷ Vgl. Dr. Norbert Schmitz, Studie: *Technikfolgenabschätzung Theorie und Praxis, Schwerpunkt Biogene Kraftstoffe – Kraftstoffe der Zukunft?*, unter: <http://www.itas.fzk.de/tatup/061/schm06a.htm> (03.01.2010).

⁸ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., *Biokraftstoffe Basisdaten Deutschland* S.3

⁹ *Biosprit heizt den Klimawandel an*, netzeitung unter: <http://www.netzeitung.de/spezial/klimawandel/895959.html> (24.12.2009).

und der Verbrennung in speziellen Öfen in Wohn- und Wirtschaftsgebäuden. Der Wirkungsgrad der Ko-Verbrennung ist in etwa so groß wie der der Kohleverbrennung. Biomasseverbrennung ist CO₂-neutral¹⁰. Ist das Ziel die Bereitstellung von Wärmeenergie, so kann Biomasse in Öfen verbrannt werden. Wirkungsgrade werden hier im Bereich von 80% angegeben (Holzöfen).¹¹

V. BtL-Kraftstoff

BtL (Biomass to Liquid) ist synthetischer, aus Biomasse hergestellter Kraftstoff. Dabei lassen sich Bioabfall, Holz, Stroh sowie andere NawaRo wie Mais verwenden. Durch ein Vergasungsverfahren wird aus der Biomasse Synthesegas hergestellt, welches einer Gasreinigung und CO₂-Abtrennung unterzogen wird. Die im Synthesegas enthaltenen Kohlenwasserstoffe werden mithilfe der FT-Synthese zu einem flüssigen Kraftstoff zusammengefasst.¹² Für die FT-Synthese wird im Synthesegas ein Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenmonoxid von 2:1 benötigt. Daher wird zuvor aus einem Teil des Kohlenmonoxids über eine Shiftreaktion¹³ Wasserstoff hergestellt.¹⁴

Bei der Nutzung von Energiepflanzen wird ein Kraftstoffenergieertrag von 4030l/ha (entspricht 137,1 GJ/ha) erreicht.¹⁵ Hinzuzufügen ist, dass in Fahrzeugen genutzter BtL an den Verbrennungsmotor gebunden ist, welcher heutzutage eine reale Effizienz von 15-20% hat.¹⁶ Ein Vorteil von BtL ist, dass die vorhandene Infrastruktur genutzt werden kann. Bei der Nutzung von BtL entsteht laut der Firma CHOREN nur wenig mehr CO₂, als die Pflanzen zuvor gebunden haben.

4. Problemskizze und Lösungsansatz

Die konventionellen Biokraftstoffe benötigen enorme Flächen, damit Kraftstoff in ausreichender Menge produziert werden kann. Pflanzenöle und Alkohole hätten sehr begrenzte Potentiale, schreiben auch die Autoren von "Ölwechsel". Daher müsse man neue Wege gehen. Sie empfehlen die Option der Vergasung von Biomasse

¹⁰ Vorausgesetzt es wird nicht mehr Biomasse geerntet als angebaut.

¹¹ Holzöfen Camino-Ennigerloh unter: <http://www.camino-ennigerloh.de/irondog.html> (21.12.2009).

¹² CHOREN unter: http://www.choren.com/de/biomass_to_energy/btl-produktion/ (23.12.2009).

¹³ Siehe Seite 12 (6).

¹⁴ Persönliche Information eines CHOREN-Mitarbeiters.

¹⁵ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., *Biokraftstoffe Basisdaten Deutschland* S.5

¹⁶ Vgl. presstext austria unter: <http://www.pte.at/news/071121035/die-zukunft-gehört-dem-elektroauto/>.

(Wasserstoffherstellung), da dieser Weg durch vollständige Nutzung der Pflanzen und eine breite Auswahl an Sorten ein deutlich höheres Potential bietet.¹⁷

Außerdem sei die Effizienz bei der Umwandlung in Kraftstoff deutlich höher.¹⁸

Die thermochemische Wasserstoffherstellung sorgt gleichzeitig für die Voraussetzungen vielfacher Verwendungsmöglichkeiten des erzeugten Energieträgers Wasserstoff. Im Folgenden soll dieses Wasserstoffherstellungsverfahren genauer untersucht werden. Entscheidendes Vergleichskriterium zu den prominenteren Methoden energetischer Biomassennutzung ist die Effizienz der Nutzung der Primärenergie Biomasse und, damit zusammenhängend, das Nutzungspotential.

5. Lösungsweg - Biowasserstoff

VI. Dampfreformierung von Biomasse zur Wasserstoffherstellung

Seitdem der Mensch das Feuer entdeckte und zum Heizen nutzte, wendet er die thermochemische Umwandlung von Biomasse in Wasserstoff an. Jedenfalls teilweise, denn neben Kohlendioxid entsteht bei der Oxidation von Holz auch Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Wird die Sauerstoffzufuhr gedrosselt und besonders nasses Holz verwendet, steigert man die Wasserstoffproduktion. Prinzipiell funktioniert genau so die thermochemische Konversion von Biomasse in Wasserstoff.

Zunächst soll der Prozess der Dampfreformierung („Steam-Reforming“) zur Wasserstoffherzeugung beschrieben werden. Diese wird heute schon mit Erdgas, also Methan, betrieben, um den Wasserstoffbedarf der (chemischen) Industrie zu decken.



Statt Erdgas kann jedoch auch Biomasse eingesetzt werden:



Biomasse und Wasserdampf reagieren in einem Vergasungsprozess endotherm zu Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff. Dieses Gasgemisch heißt auch Synthesegas und wird bei ca. 850°C hergestellt. Im Falle der Biomasse kann man auf die partielle

¹⁷ Vgl. Campell, Colin J.; Liesenborgis, Frauke; Schindler, Jörg; Zittel, Werner, *Ölwechsel – Das Ende des Erdölzeitalters und die Weichenstellung für die Zukunft*, München 2007Neuausgabe, (dtv), S.255.

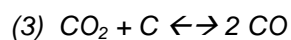
¹⁸ Vgl. Campell, Colin J.; Liesenborgis, Frauke; Schindler, Jörg; Zittel, Werner, a. a. O., S.261f..

¹⁹ Vgl. Tetzlaff, Karl-Heinz, *Wasserstoff für alle*, 2008², (Books on Demand, GmbH, Norderstedt), S.350.

Oxidation (Teilverbrennung) zurückgreifen, um die benötigte Energie zum Anschlag der Reaktion zu liefern. Diese Energie geht nicht verloren, sondern bleibt durch Wärmerückkopplung im Prozess.²⁰

Ein Vorteil des Verfahrens ist, dass alle Arten von Biomasse, d. h. auch biogene Reststoffe verwendet werden können.²¹ Das erhöht das Potential enorm.

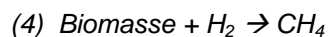
Bei der partiellen Oxidation entsteht Kohlenstoffmonoxid und zum Teil auch Kohlenstoffdioxid. Dies hat zur Folge, dass das Synthesegas teilweise „unerwünschtes“ CO₂ beinhaltet. Daher sollte die Boudouard-Gleichgewichtsreaktion möglichst unterstützt werden.



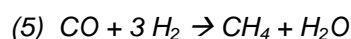
Boudouard-Gleichgewicht

Dieses Gleichgewicht stellt sich bei der Umsetzung von CO₂ mit dem Kohlenstoff der Biomasse, bei entsprechend hoher Temperatur, zu Gunsten des Produktes (CO) ein.²² Für die Herstellung von Wasserstoff ist es günstig, dass möglichst viel CO statt CO₂ im Synthesegas vorhanden ist, so dass die Wassergas-Reaktion (6) genutzt werden kann. Dazu später mehr.

Ein weiterer Störeffekt für das Produktionsziel Wasserstoff ist die Entstehung von Methan bei der Synthesegasherstellung durch folgende Reaktionen:



Methanisierung



CO-Methanisierung

Um den Methananteil im Synthesegas möglichst gering zu halten, sollte die Dampf-Methan-Reaktion (1) möglichst unterstützt und die Reaktionen (4) und (5) möglichst unterdrückt werden. Dies kann u. a. durch die Nutzung katalytischer Effekte geschehen (z. B. durch die Wahl eines methanhemmenden Bettmaterials).²³ Ein anderer entscheidender Faktor ist die Reaktortemperatur.

²⁰ Vgl. Tetzlaff, Karl-Heinz, a. a. O., S.122f..

²¹ Vgl. *Blauer Turm Herten - Wasserstoff aus biogenen Reststoffen*, Ruhr Energy, unter: <http://www.ruhrenergy.de/visitorcentre/projekte/projektdetail.php?lang=de&id=13>.

²² Vgl. Atkins, *Physikalische Chemie*, VCH, 2.Auflage 1996.

²³ Vgl. Tetzlaff, Karl-Heinz, a.a.O., S.358f..

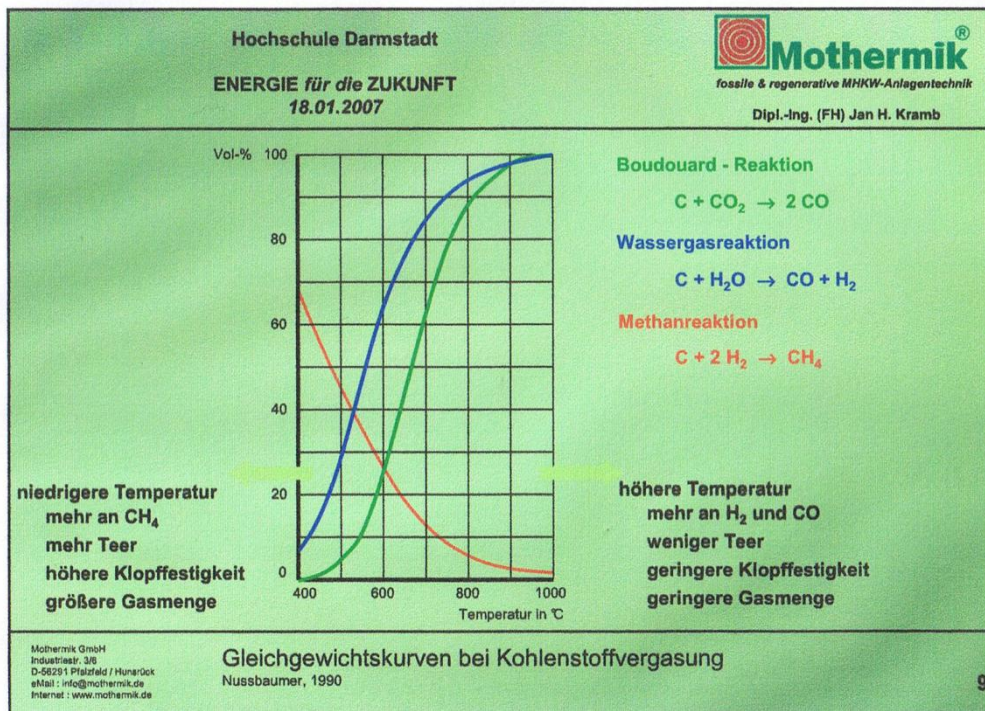
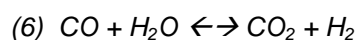


Abbildung 1: Gleichgewichtskurven bei Kohlenstoffvergasung

Wie Abbildung 1 anschaulich zeigt, ist zur Unterstützung der gewünschten Reaktionen eine hohe Temperaturführung notwendig.

Der „Knackpunkt“ der Wasserstoffherstellung ist die Gasreinigung: Der Wirkungsgrad hängt entscheidend hiervon ab. Bevor aus dem Synthesegas reiner Wasserstoff hergestellt werden kann, muss es von Staub, Teer und Katalysatorgiften gereinigt werden. Auch wenn das prinzipielle Know-How vorhanden ist, besteht hier, für eine möglichst optimale Synthesegasreinigung, noch Entwicklungs- und Testbedarf.²⁴ Die H₂-Patent GmbH hat ein spezielles Verfahren hierzu entwickelt, worauf im Zusammenhang mit dem Prozesswirkungsgrad noch eingegangen wird. Die Asche, die bei der Reinigung anfällt, kann als Mineraldünger auf den Acker zurückgeführt werden und so fossile Dünger ersetzen.²⁵ Sie kann bei Bedarf von Schwermetallen befreit werden, die metallurgisch verwertet werden können. So wird der Boden entgiftet.²⁶

Wenn nun reiner Wasserstoff erzeugt werden soll, so führt man im Folgenden die Wassergas-Reaktion (shift reaction) durch.



Wassergas-Reaktion

²⁴ Dr. Ing. Wendel, Wolfgang, H2Patent GmbH, persönliche Auskunft.

²⁵ Vgl. Tetzlaff, Karl-Heinz, a.a.O., S.94.

²⁶ Anton, Michael, H2Patent GmbH, persönliche Auskunft.

Kohlenmonoxid und Wasserdampf reagieren mit Hilfe von Katalysatoren bei 200 – 400°C leicht exotherm zu Kohlendioxid und Wasserstoff.²⁷

In einer Druckwechselabsorptionsanlage („Pressure Swing Absorption“, PSA) werden Kohlendioxid und Wasserstoff voneinander getrennt. Da die PSA-Anlage gewöhnlich mit einem Druck im Bereich von 20-70 bar arbeitet, kann Wasserstoff ohne zusätzliche Verdichtung über ein Rohrleitungssystem transportiert werden.²⁸

Shift-Reaktor und PSA-Anlage sind längst Stand der Technik.²⁹

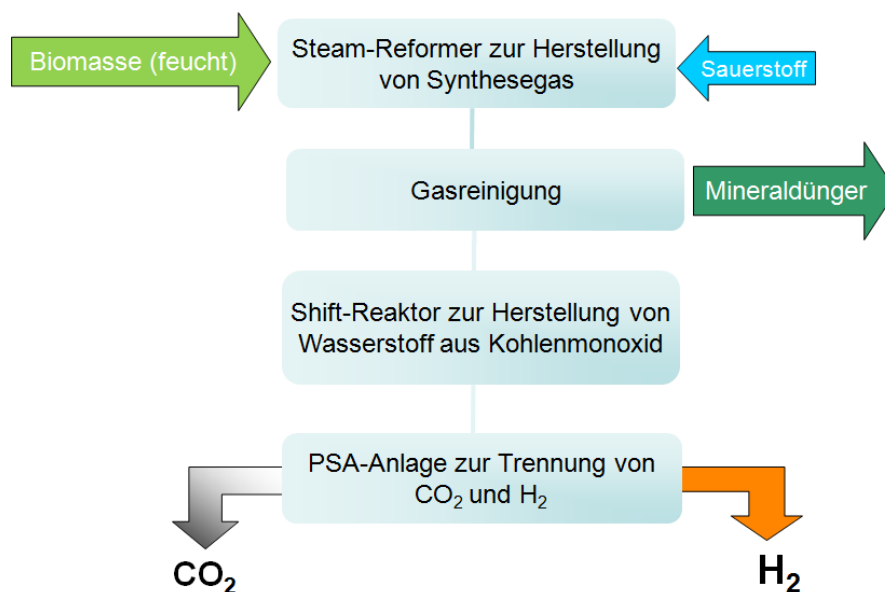


Abbildung 2: Thermochemische Wasserstoffherstellung

Abbildung 2 zeigt die Stufen der Wasserstoffherstellung in einer Übersicht.

Die verschiedenen verfahrenstechnischen Werkzeuge, in denen die oben beschriebenen Prozesse stattfinden, werden in einer „Wasserstofffabrik“ kombiniert. Diese Fabriken werden eher einer Chemieanlage als einem heutigen Kraftwerk ähneln. Statt Thermodynamik kommt die Thermochemie zum Einsatz und es geht kaum Wärmeenergie verloren.

VII. Autothermer Wirbelschichtvergasungsreaktor

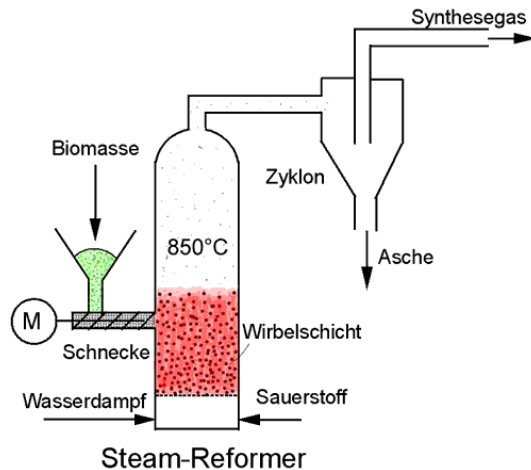
Ein gut bekanntes Prinzip zur Durchführung der Dampfreformierung, das seit vielen Jahren vor allem in Kohlekraftwerken verwendet wird, ist das der Wirbelschicht.

²⁷ Vgl. Tetzlaff, Karl-Heinz, a.a.O., S.358f..

²⁸ Vgl. Tetzlaff, Karl-Heinz, a.a.O., S.362.

²⁹ Vgl. *Wasserstoffanlagen*, Air Liquide unter: <http://www.airliquide.de/loesungen/produkte/equipment/erzeugung/ee-hyco.html> .

Hierbei wirbelt ein Gas (z. B. $\text{H}_2\text{O}-\text{O}_2$ -Gemisch) von unten eine Sandschicht auf. Wirbelschichtreaktoren werden heute auch genutzt, um aus möglichst trockener Biomasse ein somit H_2 -armes für die Verbrennung optimiertes (CO -reiches) Synthesegas herzustellen. Das ist bei der Herstellung von Wasserstoff nicht notwendig.³⁰



Die Abbildung zeigt, wie Biomasse über eine Schnecke in das Wirbelbett eingepresst und dort zu Synthesegas umgesetzt wird. Ein $\text{H}_2\text{O}-\text{O}_2$ -Gasmisch dient als Wirbelgas.

Abbildung 3: Autothermer Steam-Reformer³¹

Die Wirbelschicht in solchen Reaktoren gewährleistet eine gleichmäßige Temperaturverteilung, was für den gewünschten Prozess von Vorteil ist, da dadurch die Temperatur an keiner Stelle zu hoch werden kann. Es wird eine möglichst hohe Temperatur gehalten, die eine hohe H_2 -Ausbeute begünstigt. Biomasse hat einen niedrigen Ascheschmelzpunkt.³² Bei Erreichen der Schmelztemperatur, käme es zu Klumpenbildung wodurch die Wirbelschicht nicht mehr funktionieren würde.³³ Daher ist die Temperatur nicht frei wählbar.

Das Druckniveau der Reaktoren sollte etwa 20-70 bar betragen, dies ist vergleichbar mit Erdgasreformern.³⁴ Für einen hohen Druck wird zwar eine etwas stärkere Reaktorwand benötigt, aber die Reaktorleistung steigt, wodurch die relativen Investitionskosten gesenkt werden.

VIII. Effizienz

Der Schlüssel für eine möglichst ertragreiche energetische Nutzung von Biomasse ist ein hoher Umwandlungsgrad in Wasserstoff. Den Wirkungsgrad für autotherme Re-

³⁰ Vgl. Tetzlaff, Karl-Heinz, a.a.O., S.357f..

³¹ Grafikquelle: Tetzlaff, Karl-Heinz, a.a.O., S.366.

³² Abhängig von der eingesetzten Biomasse: bei Holz setzt die Ascheerweichung bei 1225 °C ein, bei Weizen schon bei 695 °C.

³³ Vgl. Tetzlaff, Karl-Heinz, a.a.O., S.360.

³⁴ Vgl. *Synthesegasherstellung*, FCIO Chemische Industrie unter:

<http://www.fcio.at/DE/kunststoffe.fcio.at/Wissenswertes%20über%20Kunststoff/Kunststoffverwertung/Synthesegasherstellung/Synthesegasherstellung.aspx> .

aktoren errechnet der Verfahreningenieur Karl-Heinz Tetzlaff unter Bezugnahme auf die Erdgasgroßanlage von TOPSØE³⁵ mit 79%³⁶. Der Wert ist auf den Gesamtprozess, d. h. einschließlich Shift-Reaktor und PSA-Anlage, sowie auf den Heizwert bezogen.

Die Wirkungsgrade für andere heutige Erdgas-Reformer werden mit 85,2%, für Biomasse-Reformer mit 83,9% angegeben³⁷. Der reale Wirkungsgrad für die Verwendung von Biomasse liegt also $83,9\% - 85,2\% = 1,3\%$ unter dem für Erdgas. Daher kann man von einem Wirkungsgrad für Wasserstoffabriken mit autothermen Wirbelschichtreaktoren auf der Basis Biomasse von $79\% - 1,3\% = 77,7\%$ ausgehen.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) geht von einem Wirkungsgrad im Bereich von 69% bis 72% für Vergasungsanlagen aus, die aus Biomasse Wasserstoff herstellen. Allerdings ist hier zu berücksichtigen, dass von sehr kleinen Anlagen ($25 \text{ MW}_{\text{th}}$) ausgegangen wird.³⁸

Laut dem Forschungsverbund Sonnenenergie (FVS) beträgt die Wasserstoffausbeute 75%.³⁹

Zu beachten ist bei allen Wirkungsgradangaben die Zeitabhängigkeit. Das US Department of Energy gibt im Report für Tankstellen-Steam-Reformer auf der Basis Erdgas im Jahr 2002 folgende Entwicklung an: 2001: 80%; 2005: 82%; 2010: 85%.⁴⁰ Man kann also davon ausgehen, dass der Wirkungsgrad auch bei Anlagen zur Wasserstoffproduktion im Laufe der Entwicklung und durch die Erfahrungen bei Pilotprojekten noch weiter steigen wird.

Der Wirkungsgrad steigt außerdem mit der Größe der Anlage, da die einzelnen technischen Apparaturen effizienter arbeiten. Durch die Nutzung von Abwärme aus anderen Prozessen für die Kohlenstoff-Wasserdampf-Reaktion, z. B. von Hochtemperaturbrennstoffzellen (Solid Oxid Fuel Cell), kann man ebenfalls den Wirkungsgrad verbessern. Die elektrische Energie der Brennstoffzelle kann für die Nebenapparaturen verwendet werden, z. B. für die Kompression von reinem Sauerstoff aus der Luft. Eine weitere Option ist die Modifikation der Gasreinigung, so dass möglichst wenige Teerstoffe entstehen. Karl-Heinz Tetzlaff dazu: „Gereinigtes Synthesegas erleichtert

³⁵ Vgl. S. Winter Madsen, *Large Scale Hydrogen Production using TOPSØE Reforming Technology*, NPRA Annual Meeting, March 15-17, 1998, San Francisco, California.

³⁶ Vgl. Tetzlaff, Karl-Heinz, a.a.O., S.365.

³⁷ Vgl. *New and Advanced Processes for Biomass Conversion*, H. den Uil, ECN report No. ECN-RX-99-007.

³⁸ Vgl. *Perspektiven solarthermischer Verfahren zur Wasserstoffherzeugung* (S. 33f.), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart, Januar 2008.

³⁹ Vgl. *Forschungsstrategie für Energiegewinnung aus Biomasse*, Pressinformation, 6. Februar 2006, unter: http://www.fv-sonnenenergie.de/fileadmin/presseinformation/07_02_06_biomasse_01.pdf.

⁴⁰ Vgl. Tetzlaff, Karl-Heinz, a.a.O., S.368.

die Wärmerückgewinnung enorm, denn der Wirkungsgrad ließe sich auf über 95% steigern, wenn alle fühlbare Wärme aus dem Synthesegasstrom wieder in den Prozess eingekoppelt werden könnte.“⁴¹

Die H₂Patent GmbH⁴² hat ein entsprechendes Verfahren entwickelt, bei dem die Gasreinigung wie folgt funktioniert:

Synthesegas hat Teergehalte von bis zu 100 mg/m³. Das verklebt jeden Wärmetauscher. In einer dänischen Anlage wurden bereits 1-5 mg/m³ Teer erreicht, diese Werte genügen den Ansprüchen der Wärmerückführung. Nach dem Verfahren der H₂Patent GmbH geschieht die Teervermeidung nicht durch eine Gaswäsche nach der Reformierung, sondern durch primäre Maßnahmen, die die Bildung von Teerstoffen schon im Vergasungsprozess verhindern, bzw. diese cracken sollen. Die Umsetzung der Biomasse erfolgt dazu in zwei Stufen. In der 1. Stufe, der Pyrolyse, bei ca. 600C° entsteht ein Synthesegas welches noch Methan und Teerstoffe enthält. Diese werden in der 2. Stufe, in der Wirbelschicht bei 900C° aufgespalten. Dazu soll ein Bett aus glühendem Kohlenstoff verwendet werden, welches sich im Betrieb auf der Wirbelschicht bildet. Ist ein nahezu teerfreies Synthesegas vorhanden, kann die Wärme recycelt werden.

Der Teergehalt sollte aber durch sekundäre Maßnahmen (z. B. über einen Filter) nach dem Reformier auf etwa 0,1 mg/m³ gesenkt werden, damit Teere nicht bei der Gasaufarbeitung und Reinigung stören und Anlagenteile (z. B. die PSA-Anlage) durch höhere Standzeiten ökonomischer arbeiten.⁴³

Die H₂Patent GmbH gibt einen Gesamtsystemwirkungsgrad auf den Heizwert bezogen von 93% an.⁴⁴

⁴¹ Tetzlaff, Karl-Heinz, a.a.O., S.370.

⁴² H₂PatentGmbH unter: <http://www.h2patent.eu/index.php> .

⁴³ Die Verfahrensbeschreibung bezieht sich auf persönliche Auskünfte von: Michael Anton, Hayo Sieckmann, Karl-Heinz Tetzlaff, Wolfgang Wendel, alle H₂Patent GmbH.

⁴⁴ Vgl. Wendel, Wolfgang, *Biomass based Hydrogen Economy* (S. 7), H₂-Patent GmbH, Bad Iburg, Germany, verfügbar unter: http://www.h2patent.eu/H2_Wendel_Hydrogen.pdf.

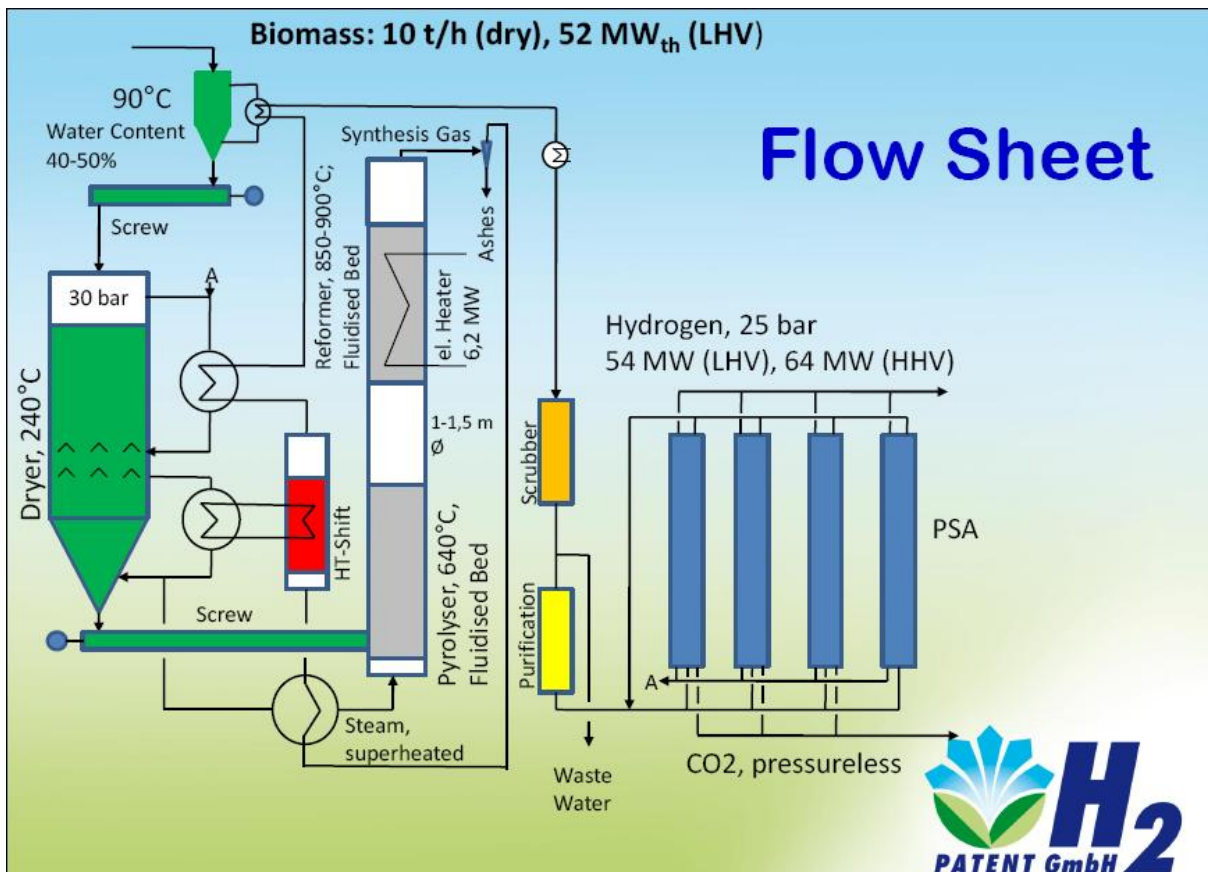


Abbildung 4: Flow Sheet der H₂Patent GmbH

Unter Berücksichtigung des heutigen Stands der Entwicklung und der dazu verschiedenen ermittelten Daten halten die Autoren dieser Arbeit den Wirkungsgrad von 93% für sehr hoch angesetzt. Zu beachten ist außerdem, dass auf den Gesamtprozess gesehen auch die Energieverluste für den Transport, sowie den Anbau der Biomasse mit eingerechnet werden müssen. Diese Faktoren sind in Wirkungsgradangaben nicht enthalten.

Lerneffekte und Erfahrungswerte sind bei technischen Anlagen jedoch von hoher Bedeutung. Nach dem Bau einiger Großanlagen wird sicher ein Wirkungsgrad von ca. 90% erreicht werden.

IX. Potential

Energiepflanzen können im „Energieökosystem“ in Form von einer Zweikulturennutzung nach Prof. Konrad Scheffer angebaut werden. Das verspricht nicht nur hohe Erträge, sondern schneidet im Vergleich zu allen anderen Methoden

auch am ökologischsten ab.⁴⁵ Der Vorteil des Vergasungsverfahrens liegt darin, dass die ganze Pflanze genutzt werden kann. Die Sortenauswahl ist nicht derart eingeschränkt wie bei Biogas und die meisten biogenen Reststoffe, die z. B. bei der Ernte auftreten und tlw. in keinen Statistiken erfasst werden, können genutzt werden.

Die Biomasseerträge liegen schon heute bei ca. 30t TM/ha pro Jahr und werden in Zukunft noch deutlich steigen.⁴⁶ Die KWS Saat AG gibt als Ziel von Züchtungen eine Verdopplung der Erträge innerhalb von 2005 bis 2015 an.⁴⁷

Laut einer Studie des BMU könnten im Jahre 2030 auf 4,4 Mio. Hektar Energiepflanzen angebaut werden, ohne die Versorgung mit Nahrungsmitteln zu gefährden⁴⁸. Auf dieser Fläche lassen sich bei einem Heizwert der Biomasse von 17,5 GJ/t 2310 PJ Bioenergie ernten. Dies entspricht $2310 \text{ PJ} \cdot 0,9 = 2079 \text{ PJ}$ Wasserstoff.

An energetisch nutzbaren, biogenen Reststoffen stehen heute ca. 2096 PJ zur Verfügung^{49 50 51}, d. h. $2096 \text{ PJ} \cdot 0,9 = 1886,4 \text{ PJ}$ Wasserstoff.

Summa summarum wären dementsprechend 3965,4 PJ Wasserstoff für das Jahr 2030 zu erwarten. Damit könnte sowohl der gesamte Kraftstoff- als auch Erdgasbedarf der BRD durch Biowasserstoff substituiert werden!

Erdgasbedarf	2.107,82	alle Angaben in PJ	
Kraftstoffbedarf (Verkehr)	2.437,63	Verkehr mit Wasserstoff	3 Effizienzfaktor (Brennstoffzellenfahrzeuge)
davon Erdgas	4,09	12% Verdichtungsverlust	
davon elektrischer Strom (des Schienenverkehrs)	59,04		
ohne Erdgas und Strom	2.374,50	Wasserstoffherstellung	3.965,4 Biowasserstoff aus
benötigter Wasserstoff	2.107,82 Erdgassubstitution	971,1	Überschüssiger Wasserstoff
	886,48 Kraftstoff		
	2.994,30 Summe		

Abbildung 5: Biowasserstoff statt Öl und Gas⁵²

⁴⁵ Vgl. Scheffer, Konrad; *Die Bedeutung einer integralen Landwirtschaft*, EUROSOLAR-Konferenz; Wie wird der Landwirt zum Energie- und Rohstoffwirt? ; Bonn Bad Godesberg 31.-31. Januar 2003; Konferenzband, Seite 51-57.

⁴⁶ Vgl. Scheffer, Konrad; a. a. O..

⁴⁷ *Die faszinierenden Möglichkeiten der Energiepflanzenzüchtung. Chance für mehr Ökologie und Ökonomie in der Landwirtschaft* Schmidt, Walter (KWS), unter: http://www.ikzm-d.de/addons/pdfs/136_Z_uchtung.pdf (2005).

⁴⁸ Vgl. *Der volle Durchblick in Sachen Bioenergie*, Agentur für Erneuerbare Energien (2008) unter: http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/Der_volle_Durchblick_in_Sachen_Bioenergie.pdf, S.10, (04.12.2009).

⁴⁹ Vgl. TA-Datenbank-Nachrichten, Nr.1, 9. Jahrgang, März 2000.

⁵⁰ Vgl. *Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit*; WBGU vom 21.03.2003, S. 62.

⁵¹ Vgl. Tetzlaff, Karl-Heinz, a.a.O., S.436.

⁵² Selbst erstellte Tabelle, Erdgas und H₂ können etwa gleich effizient zum Heizen genutzt werden, Datengrundlage für Erdgas- und Kraftstoffbedarf aus: *Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2007*, AG Energiebilanzen unter: http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?i_dpage=63 ; Verdichtungsverluste: *Twenty Hydrogen Myths*, Lovins, Amory B., CEO Rocky Mountain Institute (2003) unter: http://www.rmi.org/cms/Download.aspx?id=1360&file=E03-05_20HydrogenMyths.pdf , S.20; der Effizienzfaktor ergibt sich durch den Unterschied der Wirkungsgrade eines Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor bzw. BZ.

Abbildung 5 zeigt ein mögliches Szenario für die Nutzung von Wasserstoff in einer erneuerbaren Energiewirtschaft.⁵³

Der Hektarertrag von Wasserstoff beträgt 583,33 GJ.⁵⁴

X. Wirtschaftlichkeit

Die Gestehungskosten des durch die Biomassevergasung gewonnenen Wasserstoffes werden nach „[...] europäischen Studien (EC 2006 und EUCAR 2007) [...] mit 3,2 bis 4,7 €/kWh H₂ für zentrale Produktionsanlagen angegeben [...]“⁵⁵ Dieser Preis ist konkurrenzfähig zu der heute meistgenutzten Wasserstoffherstellung aus Erdgas. Die spezifischen Investitionskosten einer biomassebasierten Wasserstofffabrik gibt der WBGU zu 500€/kW für eine Anlagengröße von 40 MW_{H₂} an.⁵⁶ Das ist im Vergleich zu Erdgasanlagen (350€/kW) noch recht teuer. Diese Kosten werden aber bei Großanlagen (500 MW_{H₂}, 185€/kW⁵⁷) niedriger liegen und durch Lerneffekte u. a. bei der Serienfertigung (Kostendegression bei Verdopplung der Fertigungsmenge von Steamreformern 12%⁵⁸) solcher Anlagen weiter sinken.

XI. Referenzanlage in Güssing

Tatsächlich gibt es schon Anlagen, die jedenfalls so ähnlich wie eine Wasserstofffabrik arbeiten. Als Beispiel hierfür lässt sich die (drucklose) Biomassevergasungsanlage im österreichischen Güssing mit ca. 4.000 Einwohnern nennen. Dort wird aus Biomasse ein Synthesegas hergestellt und über einen Motor verstromt. Die anfallende Abwärme wird über ein Nahwärmenetz zum Heizen genutzt. Die Gemeinde kann sich somit autark mit Energie versorgen. Als Biomasse genutzt wird weniger als 40% des jährlichen Holzneuzuwachses aus den umliegenden Wäldern. In einer Filmdokumentation zu Güssing wird dargestellt, dass ausreichend Biomasse zur Verfügung steht, um in Österreich die komplette Substituierung von Erdgas durch Biogas zu ermöglichen.⁵⁹

Die Güssinger Vergasungsanlage ließe sich zu einer Wasserstofffabrik erweitern, indem ein Shiftreaktor und eine PSA-Anlage hinter den Reformier geschaltet werden.

⁵³ Unberücksichtigt ist hierbei, dass ein Teil des Wasserstoffs zwischengespeichert werden muss, wofür zusätzlich Energie benötigt wird. Der überschüssige Wasserstoff ist hierfür aber mehr als ausreichend. Auf die Speicherung von Wasserstoff wird später noch eingegangen.

⁵⁴ $30 \text{ t/ha} * 17,5 \text{ GJ/t} * 0,9 \text{ (Wirkungsgrad Bio-H}_2\text{-Herstellung)} = 583,33 \text{ GJ}$.

⁵⁵ *Perspektiven solarthermischer Verfahren zur Wasserstoffherzeugung*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., (Stuttgart, Jan. 2008), S.36.

⁵⁶ *Welt im Wandel - Energiewende zur Nachhaltigkeit*, WBGU unter: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003.pdf, S. 86 (März 2003).

⁵⁷ Vgl. Tetzlaff, Karl-Heinz, a.a.O., S. 445f.

⁵⁸ Vgl. Tetzlaff, Karl-Heinz, a.a.O., S. 446.

⁵⁹ Vgl. ATV, Reportage zu Güssing, unter: <http://atv.at/contentset/17158/97047> (11.12.2009).

Durch Druckerhöhung im Vergasungsreaktor auf 25 bar ließe sich die Leistung von 8MW_{th} auf $200\text{MW}_{\text{Wasserstoff}}$ steigern, ohne dass sich die Anlage vergrößern würde. Die Wandstärke des Reaktors müsste allerdings etwas erhöht werden.

XII. Möglichkeiten der Wasserstoffnutzung

Biowasserstoff kann in einer für die Zukunft von verschiedenen Organisationen (IPHE, NHA, DWV etc.) forcierten Wasserstoffwirtschaft (z. B. in Island geplant) einen Teil des Wasserstoffbedarfes decken. Hierbei gibt es jedoch recht unterschiedliche Vorstellungen von einer „Wasserstoffwirtschaft“ und noch kontroverser wird das Potential von Biomasse diskutiert. Primär wird meist an die Wasserstofferzeugung aus Elektrolyse (Wirkungsgrad ca. 80%⁶⁰) gedacht, um erneuerbare Energien speicherbar und damit grundlastfähig zu machen.

a) Wasserstoff als Energiespeicher

Wasserstoff lässt sich wie Erdgas in unterirdischen Salzkavernen und ehemaligen Gas- oder Öllagern speichern.

Speicherbare Energie für Modellspeicher mit je 3.000.000 m³ Volumen

Pumpspeicher, Potential weitgehend ausgeschöpft	2 GWh
adiabater Druckluftspeicher (Salzkaverne), Moderne Technik	8 GWh
Wasserstoffspeicher (Salzkaverne)	1.230 GWh (Heizwert)

Abbildung 6: Wasserstoff-Speicherung in Salzkavernen⁶¹

Abbildung 6 zeigt, dass die Wasserstoffspeicherung, im Vergleich mit etablierten Energiespeichern, potentialbezogen überlegen ist. Für die Speicherung wird H_2 auf ein Druckniveau im Bereich von 200 bar verdichtet. Daher muss von ca. 9% Energieverlusten ausgegangen werden.⁶² Wasserstoff lässt sich wie Erdgas über ein Rohrleitungssystem transportieren. Für kurzzeitige Schwankungen lässt sich dieses Rohrnetz auch als Speicher nutzen. Die zu erwartenden Energieverluste von 0,035% sind vernachlässigbar.⁶³

⁶⁰ Dr. Smolinka, Tom, *Wasserstoff aus Elektrolyse – Ein technologischer Vergleich der alkalischen und PEM-Wasser-elektrolyse Fraunhofer*, Institut Solare Energiesysteme unter: <http://www.wbzu.de/home/070521-smolinka.pdf>, S. 24, (24.12.2009).

⁶¹ *Wasserstoff-Speicherung in Salzkavernen zur Glättung des Windstromangebots* F. Crotogino und R. Hamelmann KBB Underground Technologies GmbH, Baumschulenallee 16, D-30625 Hannover, und Kompetenzzentrum für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Fachhochschule Lübeck, Mönkhofer Weg 239, 23562 Lübeck.

⁶² Angabe für 350 bar, min. 9% Verluste nach: *Twenty Hydrogen Myths*, Lovins, Amory B., CEO Rocky Mountain Institute (2003) unter: http://www.rmi.org/cms/Download.aspx?id=1360&file=E03-05_20HydrogenMyths.pdf, S.20.

⁶³ Vgl. Tetzlaff, Karl-Heinz, a.a.O., S. 342.

Bei Biowasserstoff kommt der Vorteil der als Silage speicherbaren Biomasse hinzu, wobei hier ca. 10% Verluste mit einberechnet werden müssen.⁶⁴

b) Wasserstoff als Zwischenspeichermedium für Strom

In diesem Szenario wird Wasserstoff als zentraler Zwischenspeicher für Strom genutzt. Temporär überschüssig erzeugter Strom wird mittels Elektrolyse zur Wasserstoffherstellung genutzt. In Spitzenlastzeiten wird dieser Wasserstoff dann dezentral in Brennstoffzellen rückverstromt, die als virtuelles Kraftwerk in Haushalten installiert und zentral gesteuert werden. Das setzt ein H₂-Rohrleitungssystem voraus.

Energieeffizienzketten für überschüssigen Strom:

$0,8$ (Elektrolyse⁶⁵) * $0,91$ (H₂-Speicherung⁶⁶) * $1,16$ (BZ⁶⁷) * $0,954$ (4,6% Verluste des Stromnetz⁶⁸)
= 80% (Strom und Wärme).

c) Verstromung in Motor-BHKW

In diesem Verwendungsszenario wird Wasserstoff in dezentralen Motor-Blockheizkraftwerken in Strom und Wärme umgewandelt.

Der elektrische Wirkungsgrad eines Motor-BHKW liegt bei etwa 28%.⁶⁹

Eine solche Anlage versorgt beispielsweise eine Schule in Bottrop. Der benötigte Wasserstoff wird im Rahmen eines Forschungsprojekts der Emschergenossenschaft über Steam-Reforming aus dem Faulgas der Kläranlage Bottrop hergestellt. Das BHKW produziert Strom für die Schule und mithilfe der Abwärme wird das Schulschwimmbad beheizt. Als Speicher für den Wasserstoff genügt die Rohrleitung von der Kläranlage bis zur Schule.⁷⁰

Durch die Nutzung der Abwärme erzielt man einen Wirkungsgrad von über 85%⁶⁷, bezogen auf den Heizwert des eingesetzten Wasserstoffs.

Vorteil des Motors ist, dass der Wasserstoff keine besonders hohe Reinheit aufweisen muss. In einer flächendeckenden Umsetzung dieser Versorgungsoption, würde

⁶⁴ Optimierung der Beschaffungs- und Distributionslogistik bei großen Biogasanlagen, Universität für Bodenkultur Wien unter: http://www.blt.bmlfuw.gv.at/vero/veroeff/1080_Endbericht_Logistik_Biogasanlagen.pdf, S. 75 (21.12.2009).

⁶⁵ Für die Berechnung der Gesamteffizienz wird der schlechtere Wirkungsgrad der Elektrolyse zu Grunde gelegt, mit Bio-Wasserstoff ist die Effizienz etwas höher, allerdings ist schwierig abzuschätzen welchen Anteil Bio-Wasserstoff am Gesamt-wasserstoffbedarf decken kann. Daher wurde entschieden hier vorsichtig zu rechnen.

⁶⁶ Zu berücksichtigen ist, dass vermutlich niemals der gesamte erzeugte Wasserstoff in einer Kaverne unter entsprechendem Druck zwischengespeichert werden muss. Weil der Anteil des zu speichernden Wasserstoffs, jedoch schwer zu ermitteln ist, wird hier vereinfacht davon ausgegangen, dass der gesamte Wasserstoff zwischengespeichert wird.

⁶⁷ Hier wird der produzierte Strom und die Wärme der Brennstoffzelle genutzt. Das Zustandekommen des Wirkungsgrads der Brennstoffzellenbrennwertheizung wird im Abschnitt e) auf S. 22 erläutert.

⁶⁸ Berechnet nach *Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2007*, AG Energiebilanzen unter: <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=63>.

⁶⁹ Bezug auf Anlage in Güssing, *Modell Güssing*, EEE unter: http://www.eee-info.net/cms/netautor/napro4/appl/na_professional/parse.php?mlay_id=2500&xmlval_ID_DOC%5B0%5D=1000029 (24.12.09).

⁷⁰ Persönliche Besichtigung der Anlagen in Bottrop durch die Autoren, Präsentation und Führung durch Prof. Markus Schröder, Ing. Büro, Tuttahs und Meyer.

beispielsweise eine Siedlung mit Strom aus einem BHKW versorgt werden und die Abwärme via Nahwärmenetz eingebunden werden. Nach diesem Prinzip funktioniert auch die Energieversorgung in Güssing⁷¹ allerdings mit Synthesegas statt Wasserstoff.

d) Verstromung in Brennstoffzellen-BHKW

Ein Brennstoffzellen-BHKW erreicht einen elektrischen Wirkungsgrad von ca. 60%⁷² und ist insofern dem Motor-BHKW überlegen. BZ besitzen jedoch eine hohe Anfälligkeit gegenüber Gasverunreinigungen. Langfristig denkt man in Bottrop an den Einsatz eines BZ-BHKWs. Kombiniert man ein Brennstoffzellen-BHKW mit einem Nahwärmenetz⁷³, wird ein Wirkungsgrad von ca. 85%⁷⁴ erreicht.

Energieeffizienzketten für Wärme und Strom aus Wasserstoff:

$0,8 \text{ (Elektrolyse }^{65}) * 0,91 \text{ (H}_2\text{-Speicherung }^{66}) * 0,85 \text{ (BHKW (Brennstoffzelle oder Motor))} = \underline{62\%}$.

e) Brennstoffzellenheizung in Kombination mit Wärmepumpe

Eine weitere Möglichkeit wäre, Brennstoffzellen extrem dezentral in jedem Haushalt zu installieren. Weder ein Nahwärmenetz noch ein Hochspannungsstromnetz werden in diesem Fall benötigt.

Der Wasserstoff könnte über das heutige Erdgasnetz zum Verbraucher transportiert werden.⁷⁵ Übergangsweise kann auch zu mindestens 5,0% Wasserstoff zum Erdgas beigemischt werden.⁷⁶

Eine Brennstoffzellenbrennwertheizung stellt in etwa gleichem Verhältnis Strom und Wärme bereit und besitzt einen Wirkungsgrad von bis zu 116%. Der Wirkungsgrad von über 100% kommt durch die Nutzung des Brennwertes aber der Berechnung bezogen auf den Heizwert zustande.⁷⁷ Da im Haushalt mehr als 80% der benötigten Energie Wärmeenergie ist, muss überschüssiger Strom in Wärme umgewandelt werden. Strom kann nahezu verlustfrei über das Tauchsiederprinzip in Wärme umgewandelt werden. Es bietet sich aber hier insbesondere die Nutzung von Wärmepumpen an, die ein Vielfaches ihres Eigenverbrauchs an Strom in Form von Wärmeenergie

⁷¹ Siehe oben: Referenzanlage in Güssing. S.19f .

⁷² Vgl. Tetzlaff, Karl-Heinz, a.a.O., S. 152.

⁷³ Vgl. Rifkin, Jeremy, *Die H2-Revolution* (2006).

⁷⁴ Schätzungsweise vergleichbar mit Motor-BHKW.

⁷⁵ *Abschätzung der Möglichkeit einer Wasserstoff-Diffusion durch Gasleitungen aus Gußeisen*, Wolf, Werner (FGR), unter: http://81.169.135.155/cms_fgr_2/frontend/upload/publikationen/fgr10-s55.pdf .

⁷⁶ energie | wasser-praxis 12/2009 – DVGW Jahresrevue, S.7.

⁷⁷ Vgl. Tetzlaff, Karl-Heinz, a.a.O., S. 77.

gie aus der Umgebung gewinnen (tlw. Faktor 3,5; spezifische Jahresheizzahl). Bei einem Wärmebedarf an der Gesamtenergie im Haushalt von 80% und unter der Voraussetzung, dass 50% der Haushalte Wärmepumpen nutzen, ließe sich die theoretische Effizienz der Hausenergiezentrale mit Brennstoffzellenheizung und Wärmepumpe auf durchschnittlich 129,15% steigern.⁷⁸

Die Gesamteffizienz des Systems berechnet sich wie folgt:

$$0,8 \text{ (Elektrolyse }^{65})} * 0,91 \text{ (H}_2\text{-Speicherung }^{66})} * 1,29 \text{ (BZ-Heizung+Wärmepumpe)} = \underline{94\%}$$

Im Vergleich dazu liegt die Gesamteffizienz des heutigen Systems bei ca. 34,1%⁷⁹. Dies bedeutet also eine Effizienzsteigerung um den Faktor drei.

Durch vollständige Nutzung der Abwärme der Brennstoffzelle und die Einbindung von Wärmepumpen ist diese dezentrale Wasserstoffnutzung besonders effizient.

6. Ergebnis

XIII. Vergleich von Biowasserstoff und konventioneller Biomassenutzung

Es wurde festgestellt, dass Biowasserstoff nahezu eine Verdopplung (Faktor 1,94) der Flächeneffizienz aufweist gegenüber Biogas, das im Vergleich unter den konventionellen biogenen Energieträgern die höchste Hektarausbeute besitzt.

Das Potential von Biowasserstoff ist durch die mögliche Nutzung fast jeder (grünen) Biomasse vergleichsweise groß. Biowasserstoff ist klimaneutral, wenn nicht sogar klimapositiv!⁸⁰ Wasserstoff ist ein vielfältig nutzbarer Energieträger und via Brennstoffzelle bzw. Wärmepumpe sehr effizient verwertbar. Die zugleich einfachste und effizienteste Nutzung ist wie bei Erdgas die direkte Verbrennung z. B. zum Heizen.⁸¹ Im Verkehr ist Wasserstoff nicht an die ineffiziente Technologie des Verbrennungsmotors gebunden, wie z. B. BtL, dessen Herstellung Wasserstoff benötigt, der mit höherer Effizienz direkt verwertet werden kann.

⁷⁸ Rechnung: $(1,16 * 0,8 - 0,56) * (2/3,5) * 0,5 + 1,16 = 129,15\%$.

⁷⁹ Energieversorgung in Deutschland – Bestandsaufnahme, Prof. Dr. Wiederuh, Eckhardt, FH Gießen--Friedberg unter: http://www.succidia.de/downloads/get.html?file=/archiv/suc_835.pdf&name=ETA0207_Wiederuh%2CE_Energieversorgung_in_Deutschland.pdf , S.1 (21.12.2009).

⁸⁰ Das bei der Bio-Wasserstoff-Herstellung anfallende CO₂ kann ähnliche wie bei Kohle über CCS im Untergrund gespeichert und so der Atmosphäre entzogen werden. Dies ist auch bei Biogas möglich. Im Zuge eines stärker werdenden Klimawandels, bei dem eine Ursachenbekämpfung alleine nicht ausreichend ist, sollte verstärkt über diese Option, „den Klimawandel rückgängig“ zu machen, nachgedacht werden.

⁸¹ Abgesehen von Wärmepumpennutzung kein realer „Wirkungsgrad“ angeben lässt.

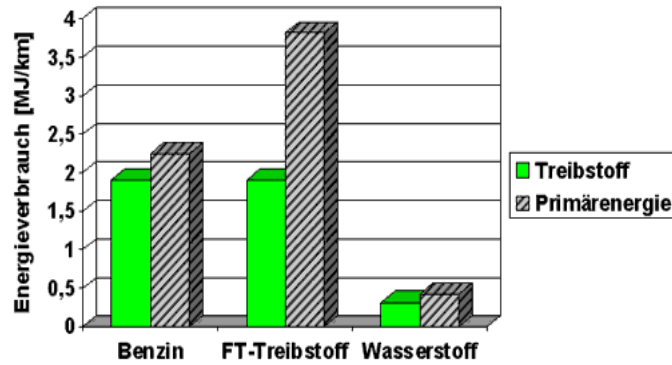


Abbildung 7: Energieverbrauch im Vergleich ⁸²

Abbildung 7 zeigt die deutlich höhere Effizienz der Nutzung von Wasserstoff im Verkehr und die Verschwendung von Primärenergie im Falle der BtL-Nutzung. Ein Nachteil von Wasserstoff gegenüber BtL ist jedoch, dass die vorhandene Infrastruktur nicht genutzt werden kann. Die Wasserstoffspeicherung in einem Drucktank oder flüssig in tiefkaltem Zustand ist zudem aufwendiger als bei flüssigen Kraftstoffen. Die breite Nutzung von Brennstoffzellen (und Wärmepumpen) bedeutet erhebliche Investitionskosten. Strebt man an, die heutige Nutzung von Biomasse durch die Produktion von Biowasserstoff zu substituieren, würde dies einen großen Strukturwandel bedeuten. Ein schneller Umstieg auf Biowasserstoff dürfte allein durch die gewünschte Amortisierung von z. B. Biogasanlagen ausgebremst werden. Außerdem gibt es da noch ein Problem mit den Langzeitlieferverträgen für Erdgas...

XIV. Fazit und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Nutzung von Biowasserstoff insbesondere aufgrund der hohen Herstellungseffizienz und dem damit verbundenen Potential, wie im fünften Teil dieser Arbeit dargestellt, wünschenswert ist. Auch wenn Biowasserstoff aufgrund beschränkten Biomassepotentials möglicherweise nur einen kleinen Teil der Energieversorgung decken kann, so sollte zumindest die verfügbare Biomasse auf diesem höchsteffizienten Weg genutzt werden. Damit es dazu kommen kann, werden innovative Investoren benötigt, die zunächst ein Pilotprojekt in Angriff nehmen.

⁸² Tetzlaff, Karl Heinz, unter: <http://bio-wasserstoff.de/h2/Brennstoffzellen/Mobil/mobil.html> (24.12.2009), Benzin- und BtL-Verbrauch nach einer GM-Studie.

7. Literaturverzeichnis

- Gründinger, Wolfgang, *Die Energiefalle – Rückblick auf das Erdölzeitalter*, München 2006^{Originalausgabe}, (Verlag C. H. Beck oHG).
- Tetzlaff, Karl-Heinz, *Biowasserstoff*, 2008, (Books on Demand).
- Tetzlaff, Karl-Heinz, *Wasserstoff für alle*, 2008², (Books on Demand).
- Campell, Colin J.; Liesenborgis, Frauke; Schindler, Jörg; Zittel, Werner, *Ölwechsel – Das Ende des Erdölzeitalters und die Weichenstellung für die Zukunft*, München 2007^{Neuausgabe}, (dtv).
- Buchal, Christoph, FZJ; DLR; FZK, *Energie*, Baden-Baden 2008², (Koelblin-Fortuna-Druck GmbH & Co. KG).
- Follath, Erich; Jung, Alexander (Hg.), *Der neue kalte Krieg – Kampf um die Rohstoffe*, München 2006¹, (Spiegel Buchverlag).
- Rifkin, Jeremy, *Die H₂-Revolution*, o.O. 2002, (Jeremy P. Tarcher).
- Seifert, Thomas; Werner, Klaus, *Schwarzbuch Öl – Eine Geschichte von Gier, Macht und Geld*, Wien 2008, (Ulstein).
- *Was ist Biogas?*, Enaro Biogas unter: http://www.enaro-biogas.de/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=27 (03.01.2010).
- Dipl.-Ing. Götz, Johann, GETproject, Broschüre, *Verwertung nachwachsender Rohstoff* unter: http://www.krimmelbein-ag.de/fileadmin/user_upload/Dokumente/getproject_Bioenergie_Broschuere.pdf (03.01.2010).
- Claas Vision, *Raps – die Frucht mit Riesenpotenzial*, unter: http://www.claas.com/countries/generator/cl-pw/de/services/claas-vision/archiv/vision21,lang=de_DE.pdf (21.12.2009).
- Dr. Norbert Schmitz, Studie: *Technikfolgenabschätzung Theorie und Praxis, Schwerpunkt Biogene Kraftstoffe – Kraftstoffe der Zukunft?* unter: <http://www.itas.fzk.de/tatup/061/schm06a.pdf> (03.01.2010).
- *Biosprit heizt den Klimawandel an*, netzeitung unter: <http://www.netzeitung.de/spezial/klimawandel/895959.html> (24.12.2009).
- Holzöfen Camino-Ennigerloh unter: <http://www.camino-ennigerloh.de/irondog.html> (21.12.2009).
- CHOREN unter: http://www.choren.com/de/biomass_to_energy/btl-produktion/ (23.12.2009).
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., *Biokraftstoffe Basisdaten Deutschland* unter: http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_174-basisdaten_biokraftstoff.pdf (03.01.2010).
- presstext austria, *Die Zukunft gehört dem Elektroauto* unter: <http://www.pta.at/news/071121035/die-zukunft-gehört-dem-elektroauto/> (03.01.2010).
- *Blauer Turm Herten - Wasserstoff aus biogenen Reststoffen*, Ruhr Energy, unter: <http://www.ruhrenergy.de/visitorcentre/projekte/projektdetail.php?lang=de&id=13> (03.01.2010)
- Atkins, *Physikalische Chemie*, VCH, 2. Auflage 1996
- *Wasserstoffanlagen*, Air Liquide unter: <http://www.airliquide.de/loesungen/produkte/equipment/erzeugung/ee-hyco.html> (03.01.2010).
- *Synthesegasherstellung*, FCIO Chemische Industrie unter: <http://www.fcio.at/DE/kunststoffe.fcio.at/Wissenswertes%20über%20Kunststoff/Kunststoffverwertung/Synthesegasherstellung/Synthesegasherstellung.aspx> (03.01.2010).
- *Perspektiven solarthermischer Verfahren zur Wasserstofferzeugung*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart, Januar 2008 unter:

- http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/SolH2_Bericht_final.pdf (03.01.2010).
- *New and Advanced Processes for Biomass Conversation*, H. den Uil et al, ECN report No. ECN-RX-99-007.
 - *Forschungsstrategie für Energiegewinnung aus Biomasse*, Pressinformation, 6. Februar 2006, unter: http://www.fv-sonnenergie.de/fileadmin/presseinformation/07_02_06_biomasse_01.pdf
 - Wendel, Wolfgang, *Biomass based Hydrogen Economy* (S. 7), H2-Patent GmbH, Bad Iburg, Germany, verfügbar unter: http://www.h2patent.eu/H2_Wendel_Hydrogen.pdf (03.01.2010).
 - Scheffer, Konrad; *Die Bedeutung einer integralen Landwirtschaft*; EUROSOLAR-Konferenz; Wie wird der Landwirt zum Energie- und Rohstoffwirt? ; Bonn Bad Godesberg 31.-31. Januar 2003; Konferenzband, Seite 51-57.
 - *Die faszinierenden Möglichkeiten der Energiepflanzenzüchtung_Chance für mehr Ökologie und Ökonomie in der Landwirtschaft* Schmidt, Walter (KWS), unter: http://www.ikzmd.de/addons/pdfs/136_Z_achtung.pdf (2005).
 - *Der volle Durchblick in Sachen Bioenergie*, Agentur für Erneuerbare Energien (2008) unter: http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/Der_volle_Durchblick_in_Sachen_Bioenergie.pdf, S.10, (04.12.2009).
 - TA-Datenbank-Nachrichten, Nr.1, 9. Jahrgang, März 2000.
 - *Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit*, WBGU, März 2003
 - *Twenty Hydrogen Myths*, Lovins, Amory B., CEO Rocky Mountain Institute (2003) unter: http://www.rmi.org/cms/Download.aspx?id=1360&file=E03-05_20HydrogenMyths.pdf
 - Dr. Smolinka, Tom, *Wasserstoff aus Elektrolyse – Ein technologischer Vergleich der alkalischen und PEM-Wasser-elektrolyse* Fraunhofer, Institut Solare Energiesysteme unter: <http://www.wbzu.de/home/070521-smolinka.pdf> (03.01.2010).
 - *Wasserstoff-Speicherung in Salzkavernen zur Glättung des Windstromangebots* F. Crotogino und R. Hamelmann KBB Underground Technologies GmbH, Baumschulenallee 16, D-30625 Hannover, und Kompetenzzentrum für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Fachhochschule Lübeck, Mönkhofer Weg 239, 23562 Lübeck.
 - *Optimierung der Beschaffungs- und Distributionslogistik bei großen Biogasanlagen*, Universität für Bodenkultur Wien unter: http://www.blm.bmlfuw.gv.at/vero/veroeff/1080_Endbericht_Logistik_Biogasanlagen.pdf (21.12.2009).
 - *Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2007*, AG Energiebilanzen unter: <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=63> (03.01.2010).
 - *Modell Güssing*, EEE unter: http://www.eee-in-o.net/cms/netautor/napro4/appl/na_professional/parse.php?mlay_id=2500&xmlval_ID_DOC%5B0%5D=1000029 (24.12.09).
 - *Abschätzung der Möglichkeit einer Wasserstoff-Diffusion durch Gasleitungen aus Gußeisen*, Wolf, Werner (FGR), unter: http://81.169.135.155/cms_fgr_2/frontend/upload/publikationen/fgr10-s55.pdf .
 - energie | wasser-praxis 12/2009 – DVGW Jahresrevue.
 - *Energieversorgung in Deutschland – Bestandsaufnahme*, Prof. Dr. Wiederuh, Eckhardt, FH Gießen--Friedberg unter: http://www.succidia.de/downloads/get.html?file=/archiv/suc_835.pdf&name=ETA0207_Wiederuh%2CE._Energieversorgung_in_Deutschland.pdf (21.12.2009).
 - Tetzlaff, Karl Heinz, unter: <http://ww.bio-wasserstoff.de/h2> (03.10.2010).