

**Forschungsaktivitäten im Bereich  
der Wasserstofferzeugung und -speicherung**

**Einblicke und Perspektiven für Hamburg**

**„HH@HH“**

Peter Burger

Institut für Anorganische und Angewandte Chemie

Universität Hamburg

April 2007

# Inhaltsverzeichnis

Einleitung und Rahmenbedingungen	1
1) Wasserstofferzeugung	3
a) Wasserstoff aus Primärenergieträgern	3
Fossile Rohstoffe	3
CO <sub>2</sub> -Sequestrierung	4
b) Elektrolyse von Wasser	6
c) Solare H <sub>2</sub> -Erzeugung	7
Photochemische Wasserspaltung	8
Photovoltaikzellen	9
d) Wasserstofferzeugung aus Biomasse	10
2) Wasserstoffspeicherung	12
a) Stationäre Anwendungen	12
b) Mobile Anwendungen	12
c) indirekte H <sub>2</sub> -Speicherung in Methanol	14
3) Strukturierte Nachwuchsförderung	16
4) Beteiligte Arbeitsgruppen und –themen	19

## **Einleitung und Rahmenbedingungen**

Die Landesinitiative Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie hat das Ziel, Hamburg zu einer führenden Metropole für die wirtschaftliche Nutzung von Wasserstoff zu etablieren. Dies fügt sich nahtlos in das Klimaschutzkonzept der Hansestadt ein und wird z.B. durch die Ansiedelung des World Future Councils sowie der gerade erfolgten Einsetzung des Klimaschutzbeirates unterstrichen. Diese Politik wird bislang zusätzlich, z.B. durch eine vom HVV im Rahmen des von der EU geförderten Programms CUTE mit Wasserstoff betriebene, höchst zuverlässige Buslinie sehr wirksam vermittelt. Hierdurch wird die gewünschte Akzeptanz dieser Technologie in der breiten Bevölkerung hergestellt.

Im Folgenden soll auf eine weitere Stärke des Hamburgischen Standorts für die zukünftige breitflächige Einführung und Umsetzung der Wasserstofftechnologie eingegangen werden. Hierbei wird neben weiteren anwendungsnahen Aspekten auch die Grundlagenforschung beleuchtet und die universitäre Lehre auf diesem Sektor diskutiert. Eine frühere Zusammenfassung dieser Aktivitäten findet sich in einer im Auftrag der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU) von der L-B-Systemtechnik erstellten Studie aus dem Jahr 2004.<sup>1</sup> Neben der im Vergleich zu anderen führenden Bundesländern<sup>2</sup> ebenfalls sehr guten Hamburger Landesförderung, stellte letzteres Gutachten die im Unterschied zur Hansestadt in Nordrhein-Westfalen bereits realisierte unterstützende Einrichtung der „Initiative Zukunftsenergien“ als wichtige Erkenntnis heraus. Eine bedarfsgerechte sichere Energieversorgung ist die Voraussetzung des wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Überlebens, unabhängig von den unterschiedlichen Versorgungsszenarien. Sie muss daher auch Voraussetzung aller Überlegungen zur Wasserstoffwirtschaft sein.

---

<sup>1</sup> Brennstoffzellen- und Wasserstoff-Technologien als wirtschaftliche Chance für Hamburg.  
<http://fhh.hamburg.de/stadt/Aktuell/behoerden/stadtentwicklung-umwelt/umwelt/energie/zz-stammdaten/download/studie-wasserstoff.property=source.pdf>

<sup>2</sup> Bayern, Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen.

Der in Hamburg im Rahmen des Leitbilds der „Wachsenden Stadt“ als zentraler Bestandteil entwickelte „Cluster für nachhaltige Energieversorgung und Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“ ist sicherlich ein notwendiger erster Schritt. Für einen dauerhaften Erfolg bedarf es allerdings neben diesen unmittelbaren wirtschaftsfördernden anwendungsnahen Forschungsmaßnahmen, einer *deutlich* besseren Unterstützung der in diesem Bereich ebenfalls sehr stark vertretenen Grundlagenforschung. Insbesondere die damit verbundene exzellente Ausbildung des akademischen Nachwuchses an den Hamburger Hochschulen ist ein essentieller Beitrag zur dauerhaften Sicherung des Hamburger Bedarfes an hochqualifizierten Absolventen für diesen Sektor.

Der folgende Teil beschäftigt sich mit den langfristigen Kernfragen der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, die einen Bezug zur anwendungsorientierten Grundlagenforschung in Hamburg haben. Die wesentlichsten Fragestellungen in der Reihenfolge ihrer Bedeutung sind 1.) die klimafreundliche, ökonomische Wasserstofferzeugung, 2.) Etablierung neuer Materialien für die (mobile) Wasserstoffspeicherung und deren Systemintegration. Die theoretische bzw. computerunterstützte Modellierung ist in den Forschungsbereichen 1) und 2) von großer Bedeutung und wird innerhalb der jeweiligen Unterpunkte diskutiert. Auf geplante und existierende strukturelle Maßnahmen zur Ausbildung des notwendigen akademischen Nachwuchses für diese Bereiche wird abschließend unter Punkt 3) eingegangen.

## 1) Wasserstofferzeugung

Freier Wasserstoff,  $H_2$ , steht auf der Erde nur in vernachlässigbarem Umfang zur Verfügung und muss folglich entweder aus a) Primärenergieträgern, z.B. Methan, oder b) mittels anderen Sekundärenergieträgern, z.B. Strom durch Elektrolyse hergestellt werden. Hierbei besteht die einhellige Meinung, dass zukünftig nur die  $H_2$ -Erzeugung aus regenerativen bzw. alternativen Energien zum nachhaltigen Erfolg der Wasserstofftechnologie beitragen kann. Lösungsansätze der Hamburger Forschungsgruppen auf diesem Gebiet werden unter Punkt c) für die solare Energieerzeugung und d) aus Bio- oder organischer Masse vorgestellt. Innerhalb der EU wird zwar Kernenergiestrom, etwa von Frankreich, als weitere bedeutsame Option angesehen, bleibt aber wegen der aktuellen politischen Rahmenbedingungen in Deutschland hier unberücksichtigt.

### a) Wasserstoff aus Primärenergieträgern

**Fossile Rohstoffe:** Gegenwärtig beträgt die globale Wasserstoffproduktion ca. 500 Milliarden  $m^3$ , die vorwiegend in der Ammoniaksynthese (51%) und in der Erdölraffination (35 %) Abnehmer finden. Zum besseren Verständnis dieser Zahl sei darauf hingewiesen, dass für den avisierten kompletten Umstieg des derzeit ölbasierenden Transportsektors<sup>3</sup> auf die Wasserstofftechnologie eine Steigerung der  $H_2$ -Produktion auf insgesamt ca. 8'000 Milliarden  $m^3 H_2$ , d.h. um den Faktor 16 notwendig wäre! Während die Elektrolyse von Wasser bislang mit 4% nur eine untergeordnete Rolle spielt (vgl. 1d)), tragen die fossilen Primärenergieträger Erdgas, Erdöl und Kohle momentan einen Anteil von 48%, 30% und 18% zur  $H_2$ -Erzeugung bei. Aufgrund der Vorhersagen für die Reichweite der im Vergleich Erdgas und -öl (50 - 90 bzw. 70 - 230 Jahre) sehr viel höheren Kohle-reserven<sup>4</sup> (450 - 1000 Jahre) wird allgemein von einer Renaissance der Kohlevergasung ausgegangen. Hier muss allerdings angemerkt werden, dass dabei erhebliche Investitionskosten aufgewendet werden müssten, sodass auch andere Technologieansätze von

---

<sup>3</sup> Der Ölverbrauch im Jahr 2002 betrug 1.7 Milliarden Tonnen.

<sup>4</sup> Die angegebenen Bereiche ergeben sich aus den statischen und dynamischen Vorhersagen und basieren aufgrund aktueller Verbrauchswerte bzw. der zu erwartenden Preis- und Forschungsentwicklungen.

Interesse sein könnten, hierzu wird auf die Direct-Carbon-Brennstoffzelle im Teil Brennstoffzellen und Systemtechnik eingegangen.

**Erzeugung:** Die H<sub>2</sub>-Erzeugung aus den kohlenstoffbasierenden Rohstoffquellen Erdgas und -öl erfolgt i.d.R. durch Dampfreformierung. Für Erdgas verläuft diese Reaktion in zwei Schritten über i)  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$  und ii)  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ . Obwohl diese Reaktionssequenz weltweit großtechnische Anwendung<sup>5</sup> findet, z.B. bei der Fa. Linde in Brunsbüttel, weisen beide Teilschritte *signifikante* Nachteile auf. Dies läßt sich durch den stark endothermen Charakter der Dampfreformierung (i)) erklären, der zu hohen Kosten durch zusätzlichen Energiebedarf führt, sowie durch die so genannte Wassergasshiftreaktion (ii)), WGSGR, in der zwangsweise das ungewünschte Treibhausgas CO<sub>2</sub> gebildet wird. Die Wasserstofferzeugung aus Kohle durch die sog. Kohlevergasung basiert auf verschiedenen Reaktionen: iii)  $\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$ , iv)  $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ , v)  $\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2 \text{CO}$  und die bereits erwähnte WGSGR,  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ . Für die gezeigten Reaktionsschritte besteht erhöhter Forschungsbedarf, dem Arbeitsgruppen aus Hamburg Rechnung tragen. Hierbei sind insbesondere die Arbeitsgruppen von Herrn Burger, Proscenc und Weller (UHH) zu nennen, die sich mit neuen molekularen bzw. nanostrukturierten Katalysatoren für die Wassergasshiftreaktion beschäftigen. Neben experimentellen Methoden setzen die Gruppen von Herrn Burger und Proscenc hierzu auch quantenmechanische Rechenverfahren für das Design und die Modellierung neuer Katalysatorsysteme ein. Im Zusammenhang mit der im folgenden diskutierten Bildung des CO<sub>2</sub>-Treibhausgases bei der Wasserstofferzeugung aus kohlenstoffbasierenden fossilen Rohstoffen steht auch die Hydrierung von Kohlendioxid zu Methanol, deren Katalyse ebenfalls von den zuvor genannten Arbeitsgruppen untersucht wird (vgl. 2c)).

**CO<sub>2</sub>-Sequestrierung:** Die in diesem Jahr vorgestellte IPCC-Klimastudie weist dringlich auf die Reduktion der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen hin. Allerdings wird für die zügige, breite Einführung der Wasserstofftechnologie bis zur Verfügbarkeit von ausreichenden regenerativen bzw. alternativen Energiequellen nicht auf die oben genannten fossilen

---

<sup>5</sup> Aktueller Forschungsbedarf besteht in der Entwicklung kleiner kostengünstiger *dezentraler* Reformiereinheiten.

Rohstoffquellen zur H<sub>2</sub>-Produktion verzichtet werden können. Zur Lösung dieser Problematik werden gegenwärtig CO<sub>2</sub>-neutrale Prozesse für die Strom- und Wasserstoffherzeugung diskutiert. Diese Technik basiert auf der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung, d.h. der Abtrennung und Langzeitspeicherung von CO<sub>2</sub> und ist, obwohl bereits erste Pilotprojekte u.a. in Deutschland realisiert werden,<sup>6</sup> gegenwärtig Stand aktueller Forschung. Neben Problemen mit der verschlechterten Energiebilanz bei gleichzeitiger Sequestrierung (7 - 14%) gilt es, insbesondere den Nachweis für die dauerhafte, sichere CO<sub>2</sub>-Speicherung in z.B. ehemaligen Erdgasspeichern oder in tiefen Aquiferen zu erbringen.

Hierbei sind in beiden Forschungsbereichen Arbeitsgruppen aus Hamburg aktiv: Der erste Teilschritt der Kohleverflüssigung (iii) läßt sich durch den Einsatz von Sauerstoff - anstelle der bisher verwendeten Luftgebläse (O<sub>2</sub>:N<sub>2</sub> ca. 1:4 v/v) - deutlich (oxyfuel) verbessern.<sup>7</sup> Die Entwicklung der Direct-Carbon-Brennstoffzelle ist eine alternative Option, mit höherem Wirkungsgrad gleichzeitig eine Stofftrennung des Produktgases von der Abluft zu erreichen und so die CO<sub>2</sub> Abtrennung nach der Kondensation des Wasseranteils einfach zu erreichen. Im AK von Herrn Winkler (HAW) werden dazu Systemanalysen durchgeführt (siehe Teil Brennstoffzellen und Systemanalyse<sup>8</sup>). Durch die gleichzeitige starke Abnahme der Gasmenge führt dies ebenfalls zu einer wesentlichen Kostenreduktion für die nachfolgende CO<sub>2</sub>-Abtrennung. Hierbei sind für die H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>-Trennung Membrane von Bedeutung, die in der Arbeitsgruppe von Frau Nunes (GKSS) bearbeitet werden. Für die hierzu notwendige Strömungsmodellierung (CFD) besteht hervorragende Expertise durch die AKs von Herrn Hapke und Herrn Struckmeier (TUHH & UHH), Femlab-Modellierungen werden im AK von Herrn Winkler (HAW) genutzt. Die Optimierung und Modellierung der partiellen Kohlenoxidation, Schritt i), ist ein Forschungsgebiet des AK von Herrn Kather (TUHH). Neben der Langzeit- wird hierbei sicherlich auch ein Bedarf für die temporäre, lokale CO<sub>2</sub>-Zwischenspeicherung entstehen. Für diesen Bereich können die von der AK Fröba (UHH) untersuchten neuen Materialien (vgl. 2a)) eingesetzt werden. Mit wichtigen seismologischen Untersuchungen zur

---

<sup>6</sup> In der Nähe von Cottbus realisiert Vattenfall gegenwärtig ein Braunkohlekraftwerk mit CO<sub>2</sub>-Sequestrierung.

<sup>7</sup> Es besteht aber die Gefahr, dass der Energieaufwand und die Komplexität der Anlage bei der Luftzerlegung unterschätzt wird, daher ist hier eine kritische Prüfung zu empfehlen.

<sup>8</sup> Dieser Teil wird momentan von Herrn Winkler erstellt.

Bewertung und Monitoring von CO<sub>2</sub>-Langzeitlagerstätten beschäftigt sich die Arbeitsgruppe von Herr Gajewski von der Universität Hamburg.

## **b) Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse von Wasser**

Ein Elektrolyseur entspricht im Aufbau einer Wasserstoffbrennstoffzelle, in dem unter *Stromaufnahme* Wasser in Wasser- und Sauerstoff elektrochemisch zerlegt wird. Es gibt verschiedene Typen von Elektrolyseuren, die sich stark in ihren Anwendungsgebieten, Betriebstemperaturen und -drücken sowie Wirkungsgraden unterscheiden. Aufgrund des beschränkten Wirkungsgrades (ca. 60 - 70%) des kommerziell etablierten Alkalischen Elektrolyseurs (AWEL), konzentrieren sich aktuelle Forschungsrichtungen auf die Optimierung von PEM-Elektrolyseuren (polymer electrolyte membrane) und von SO-Elektrolyseuren (solid oxide). Für PEM-Elektrolyseure steht hierbei i) die Kostenreduktion im Vordergrund, die auf eine Reduktion der für die Elektrodenbeschichtung verwendeten Edelmetallkatalysatoren (insbesondere Pt) bei gleich bleibend hoher Stromdichte zielt. Zusätzlich wird nach einem kostengünstigeren Ersatz für die gegenwärtig überwiegend eingesetzten fluorierten Nafion-Polymermembrane (ii) gesucht. Beide Forschungsgebiete sind in Hamburg im Zusammenhang mit der Verbesserung der PEM-Wasserstoffbrennstoffzelle, PEM-FC, sehr stark vertreten. An der TUHH beschäftigt sich die Arbeitsgruppe von Herrn Jörg Müller mit großem Erfolg mit der Herstellung von PEM-FCs mit sehr niedriger Platinbeladung. Komplementäre Forschung zur Entwicklung neuer Membranmaterialien findet unter Leitung von Frau Nunes (GKSS) und Herrn Luinstra (UHH) statt. Mit einem neuen Ansatz, die sich am Vorbild von Hydrogenasen aus der Natur orientieren, beschäftigten sich die Gruppen von Herr Prosenc und Herr Burger (UHH). Hierbei ist geplant, Elektroden mit einer katalytischen Beschichtung aus elektronenreichen Metallkomplexen auf Nickel- und Eisenbasis zum Einsatz zu bringen. Im Bereich von Hochtemperaturbrennstoffzellen (SOFC) sowie deren Systemintegration sei abschließend auf die Arbeiten von Herrn Winkler von der HAW hingewiesen, der international ausgewiesener Experte auf diesem Gebiet ist. Die Arbeiten zu Brennstoffzellen und Systemtechnik sind Gegenstand des Teils Brennstoffzellen und Systemtechnik.

Die Elektrolyseurtechnik zur H<sub>2</sub>-Erzeugung hängt klar erkenntlich von der zukünftigen Verfügbarkeit (günstiger) Elektrizität aus regenerativen Quellen ab. Neben großtechnischen Installationen ist die Einführung kleinerer dezentraler Elektrolyseure im Falle der Einführung der Wasserstoffwirtschaft zu erwarten, wobei dann neben Brennstoffzellen auch mit einem sich entwickelnden Markt für Elektrolyseure zu rechnen ist. Im kürzeren Zeitraum wird diese Technologie bislang nur im Zusammenhang mit der Speicherung der in Offshore-Windparks erzeugten überschüssigen Energie in Form von Wasserstoff diskutiert und hat hierbei eine durchaus realistische Chance zum Einsatz zu kommen.<sup>9</sup> Andererseits muss beachtet werden, dass NaS-Batterie, deren Entwicklung insbesondere in Japan vorangetrieben wird, eine sehr ernstzunehmende Alternative für die Nutzung des Wasserstoffs darstellt. Entsprechende Planungen von NEDO<sup>10</sup> deuten in diese Richtung.

### **C) Solare Wasserstofferzeugung: photochem. Wasserspaltung und Photovoltaik**

Die Nutzung der Sonnenenergie wird allgemein als ein wesentlicher Bestandteil des zukünftigen Energiemix der regenerativen bzw. alternativen Energieversorgung erachtet.<sup>11</sup> Im Zusammenhang mit der solaren Wasserstofferzeugung stehen prinzipiell zwei verschiedene Varianten zur Verfügung. Die *direkte* photochemische Wasserspaltung in Wasser- und Sauerstoff,  $\text{H}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$  nach dem Vorbild der Natur im Photosystem I und II ist zwar sehr viel versprechend bedarf aber noch wesentlicher Forschungsanstrengungen (i)). Die zweite Möglichkeit (ii)) besteht in der vorgeschalteten photovoltaischen Stromerzeugung, der sich im zweiten Schritt die Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse anschließt. Beide Forschungsbereiche i) und ii) werden von Arbeitsgruppen an der Universität Hamburg bearbeitet. Im Unterschied zu den bereits bekannten Photovoltaiksystemen auf Siliziumbasis fokussieren diese Arbeiten auf neuen molekularen oder nanostrukturierten Photosensibilisatoren mit höherer Effizienz. Es soll hierbei klar herausgestellt werden, dass diese Forschungsprojekte i.d.R. einen langfristigen Zeithorizont im Bereich von 10 - 20 Jahren bis zu ihrer potentiellen Anwendung besitzen.

<sup>9</sup> Für derartige Anwendungen steht mit der Fa. Repower vor Ort ein Ansprechpartner zur Verfügung.

<sup>10</sup> NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization.

<sup>11</sup> s. z.B. Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen "Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit", Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2003 (auch erhältlich unter [http://www.wbgu.de/wbgu\\_jg2003.pdf](http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003.pdf)).

**Photochemische Wasserspaltung:** Im Arbeitskreis von Herrn Heck werden hierzu modifizierte Eisen- und Rutheniummetallocenderivate mit intramolekularen Elektronentransferakzeptoren (Viologen) untersucht, für die experimentell bereits eine sehr gute Ladungsseparation nachgewiesen werden konnte. In der Arbeitsgruppe von Herrn Burger werden gegenwärtig wasserstabile und -lösliche Molybdän- und Wolframkomplexe bearbeitet, die aufgrund ihrer elektrochemischen Reversibilität, der Einstellbarkeit der elektrochemischen Potentiale und insbesondere aufgrund ihrer photophysikalischen Eigenschaften auf ein hohes Potential für die Bereiche i) und ii) schließen lassen. Die Absorptionsspektren der letztgenannten Komplexe weisen eine gute Übereinstimmung mit dem solaren Emissionsspektrum auf. Dies gilt auch die von Herrn Weller untersuchten anorganischen Quantumdots, deren Bandlücken sich durch Quantisierungseffekte über einen weiten Bereich variieren lassen und eine wesentliche Voraussetzung für die effiziente solare Energiegewinnung ist. Mit leitenden Polymeren mit eingebettetem (nanoskaligen) Titandioxid,  $\text{TiO}_2$ , deren Absorptionseigenschaften sich durch Übergangsmetall-dotierung einstellen lassen, beschäftigt sich Herr Luinstra (UHH). Hierbei stellt die Einstellung der Redoxpotentiale der Polymere eine große Herausforderung dar, die aber durch die Möglichkeit kostengünstige Solarzellen herzustellen, mehr als kompensiert wird. Neben der Arbeitsgruppe von Herrn Fröba ist die Analytikarbeitsgruppe von Herrn Broekaert in diese Forschungsarbeiten integriert. Letztere unterstützt die zuvor genannten Projekte durch Messungen der dotierungsabhängigen Bandlücken, und konzentriert sich auf die Analyse lokaler Verunreinigungen sowie Dotierungsgrade. Hierzu werden u.a. ICP/AES- sowie ortsabhängige Röntgenfluoreszenzmessungen am DESY eingesetzt, die durch EXAFS- und XANES-Messungen der Gruppe von Herrn Fröba an selbiger Stelle ergänzt werden. Die experimentellen Untersuchungen werden schließlich durch quantenchemische Berechnungen zur Vorhersage photo- und elektrochemischer Eigenschaften komplettiert (Burger, Prosenč).

**Photovoltaikzellen:** Der überwiegende Teil der eingesetzten kommerziellen Photovoltaikzellen basiert auf der Siliziumsolarzelle. Neben den Vorhaben von Herrn J. Müller (TUHH) auf diesem Gebiet, die die Entwicklung einer kristallinen Silizium-Dickschicht-

Solarzelle auf Mittel- und Hochtemperatursubstraten als Gesamtziel hat, beschäftigen sich die Arbeitsgruppen von Herrn Burger und Herrn Heck (UHH) mit einer neuen viel versprechenden Alternative. Hierbei handelt es sich um die so genannte Grätzel-Zelle, bei der Photosensibilisatoren auf nanoskaligem  $\text{TiO}_2$  geträgert werden und in eine Elektrolytlösung eintauchen. Zwar erreichen diese PV-Zellen bislang noch nicht ganz die Effizienz von Silizium-basierenden Solarzellen, allerdings zeichnet sich das Potential für diese bereits kommerziell verfügbare Technik ab.<sup>12</sup> Die Arbeitsgruppen von Herrn Burger und Heck setzen hierzu die bereits oben beschriebenen Mo,W- bzw. Fe,-Ru-Übergangsmetallkomplexe ein. Diese Forschungsvorhaben werden durch die Gruppe von Herrn Weller ergänzt, der sich mit neuen p- und n-dotierten nanostrukturierten Photosystemen beschäftigt, die ein interpenetrierendes Netzwerk bilden. Dies führt zu einer großen Kontaktfläche zwischen n- und p-dotierten Materialien, so dass auf ein hohes Potential für die Quantenausbeute und Ladungsseparation mit nachfolgender Elektron- und Lochleitung dieser Systeme geschlossen wird. Für die Kommerzialisierung dieser Systeme bietet sich hierbei der Aufbau von Hybridmaterialien in mesoporösen Systemen oder Polymeren an, die von Herrn Fröba und Herrn Kaminsky (UHH) realisiert werden.

---

<sup>12</sup> <http://www.dyesol.com>

#### **d) Wasserstoffherzeugung aus Biomasse**

Die Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse ist ein weiterer wichtiger Baustein für die nachhaltige, umweltfreundliche Energieversorgung, da die Prozesse CO<sub>2</sub>-neutral ablaufen und nicht auf fossilen Energiequellen basieren. Momentan wird hierzu in der Gruppe von Herrn Stegmann (TUHH) die thermophile biologische Wasserstoffherzeugung durch Fermentation biogener Roh- und Reststoffe untersucht. Dieser Vergärungsprozess verläuft vierstufig und würde im *vierten* und letzten Schritt zu Methan und CO<sub>2</sub> führen. Durch die gezielte Inhibierung der letzten Stufe kann jedoch der auf der *dritten* Stufe gebildete Wasserstoff aus dem System entnommen werden. Der Energieinhalt der auf dieser Stufe ebenfalls gebildeten organischen Säuren wird in einem nachgeschalteten Prozess durch Vergärung zu CO<sub>2</sub> und Methan verwendet. Methan kann dann weiteren Anwendungen, z.B. zur Erzeugung von Wasserstoff durch Steamreforming oder zur Stromerzeugung in Brennstoffzellen, zugeführt werden. Die prozesstechnischen und substratspezifischen Untersuchungen werden durch die Gruppe von Herrn Stegmann durchgeführt. An der Suche und Entwicklung neuer mikrobiologischer Systemen für die H<sub>2</sub>-Erzeugung sind von der Seite der Grundlagenforschung die Arbeitsgruppen der Herren Antranikian und R. Müller (TUHH) und W. Streit (UHH) durch Modellierung und gentechnologische Modifikation beteiligt. Dieses Team wird durch den Arbeitskreis von Herrn Liese (TUHH) komplettiert, der sich mit der Entwicklung nachhaltiger Prozesse auf Basis der neu entwickelten biokatalytischen Systeme beschäftigt. Von der (verfahrens-) technischen Seite wird diese Forschung durch die Arbeitsgruppe von Herrn Kather (TUHH) begleitet, dessen wesentliche Forschungsaktivitäten im Bereich der biologischen Wasserstoffherzeugung sich auf die thermochemische Erzeugung aus Biomasse konzentrieren. Ein Schwerpunkt ist hierbei die Analyse und Evaluierung der thermochemischen Vergasung durch Simulationsmodelle, z.B. mittels des 2-stufigen Carbo-Vergasers der Firma CHOREN oder der VERENA-Prozess zur hydrothermalen Vergasung mit überkritischem Wasser. Hierdurch wird es möglich, die Wirtschaftlichkeit der angesprochenen Prozesse unter gleichen Randbedingungen abzuschätzen. Dies ist nicht nur bzgl. der H<sub>2</sub>-Produktion aus Biomasse eine wesentliche Voraussetzung für die zukünftige Entwicklung der Wasserstoffversorgung. Aufgrund der vergleichbaren

Umweltwirkungen soll abschließend auf die Forschungsarbeiten zur Kraftstofferzeugung an der HAW aus Biomaterial eingegangen werden. Die Arbeitsgruppe von Herrn Scherer und Frau Kuchta an der HAW befassen sich mit der Methandarstellung mittels Bioprozesstechnik. Die Kraftstoffgewinnung aus Holz mittels thermischer Verfahren ist Ziel der laufenden Forschungsarbeiten der Arbeitsgruppe von Herrn Willner an der HAW.

## **2) Wasserstoffspeicherung:**

Auf dem Gebiet der Wasserstoffspeicherung sind Forschungsgruppen der Hamburger Metropolregion international anerkannt. Die Anwendungsgebiete lassen sich hierbei in die Bereiche der a) stationären und b) mobilen Speicherung unterteilen, die sehr unterschiedliche Stadien ihrer technologischen Umsetzung und dementsprechenden Forschungsbedarf aufweisen. Unter 2c) wird abschließend eine weitere Alternative, d.h. die indirekte chemische Speicherung von Wasserstoff in Methanol diskutiert.

### **a) Stationäre Anwendungen:**

In der Arbeitsgruppe von Herrn Fröba (UHH) wird im Rahmen eines BMBF-Projekts die Synthese und Charakterisierung nanoporöser Hybridmaterialien untersucht. Diese neuen viel versprechenden Materialien mit hoher Speicherdichte werden bislang nur für Methan und Kohlendioxid entwickelt, lassen aber auch auf ein hohes Potential für Wasserstoff schließen. In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Herrn Burger (UHH) ist geplant, diese Forschung zukünftig auf polymere Übergangsmetallskordinationsverbindungen (metal-organic frameworks, MOFs) auszudehnen. Hierbei soll die im Design neuer Systeme bislang nur wenig beachtete Chemisorption durch Übergangsmetall-Diwasserstoff-Wechselwirkungen und auf Basis von polymeren N-heterocyclischen Carbenen (Burger, Luinstra) berücksichtigt werden, um die Thermodynamik für die Wasserstoffbindung zu verbessern.

### **b) Mobile Anwendungen:**

Zwischen der TU Hamburg-Harburg, der Helmut-Schmidt-Universität (HSU) und dem GKSS hat sich eine hervorragend funktionierende Zusammenarbeit auf diesem Forschungsgebiet entwickelt. Zusätzlich bestehen zahlreiche Kooperationen mit industriellen Partnern und europäischen Forschungsnetzwerken. Neben der Untersuchung von Alantaten steht gegenwärtig insbesondere die Suche nach neuen Leichtmetallhydriden auf Basis von Magnesium und Bor im Vordergrund. Hierzu werden in der Abteilung von Herrn Dornheim neue Hydride durch Hochenergiemahlen und gegebenenfalls anschließende Auslagerung unter hohen Wasserstoffdrücken, sowie u.a. durch *reaktives*

Hochenergiemahlen synthetisiert. Die Bestimmung der thermodynamischen und kinetischen Daten der Wasserstoffaufnahme und -abgabe erfolgt durch Hochdruck-DSC-Messungen (Herr Klassen, HSU) sowie durch den Einsatz gasvolumetrischer Methoden (Herr Dornheim, GKSS). Das GKSS-Forschungszentrum hat mit den Reaktiven Hydridkompositen auf Basis von  $MgH_2$  und verschiedenen Borhydriden neuartige potentielle Speichermaterialien für den Wasserstoff entwickelt, die bei hohen gravimetrischen Speicherkapazitäten von bis zu 11 Gew.% gleichzeitig für den mobilen Einsatz überaus viel versprechende thermodynamische Eigenschaften haben. Bei diesen steht die Optimierung der kinetischen Eigenschaften im Vordergrund. Die Erforschung der Reaktionsmechanismen der Wasserstoffaufnahme und -abgabe und insbesondere die Identifikation der geschwindigkeitsbestimmenden Schritte sind hierbei von besonderem Interesse. Hierzu werden eine Reihe von Methoden eingesetzt werden, z.B. Messungen der Absorptions- und Desorptionskinetiken, sowie die Identifikation von Zwischenschritten durch hochentwickelte *in-situ* Methoden, z.B. *in-situ* XRD am Synchrotron. Eine besondere Bedeutung kommt auch der Entwicklung neuer Katalysatoren zu. Weiterhin sind bei der Entwicklung leistungsfähiger Speichermaterialien auch thermophysikalische Eigenschaften wie die thermische Wärmeleitfähigkeit, der thermische Ausdehnungskoeffizient etc. für die Anwendungstauglichkeit eines neuen Speichermaterials von Bedeutung. Da gerade die Wärmeleitfähigkeit für die Funktion und die konkrete Gestaltung des Speichers mit ausschlaggebend ist, sollen zukünftig Wärmeleitfähigkeitsmessungen durch Herrn Kabelac (HSU) erfolgen und durch 3-dimensionale Modellierung unterstützt werden.

Eine zusätzliche Stärkung dieses Bereiches ist zukünftig durch die Erweiterung der Zusammenarbeit mit Arbeitsgruppen an der Universität Hamburg zu erwarten. Da der räumlichen Verteilung der katalytisch aktiven Dotierungskomponenten eine entscheidende Rolle für die Effizienz der Wasserstoffspeicherung zukommt, ist die orts aufgelöste Charakterisierung von besonderer Bedeutung. Hierzu können die Arbeitsgruppen von Herrn Broekaert und Herrn Bings, z.B. durch den Einsatz der Plasmamassenspektrometrie und Röntgenfluoreszenzmessungen mit Synchrotronstrahlung mit hoher Element- und Ortsauflösungen wesentlich beitragen. Weiterhin wichtige ergänzende Mess-

methoden sind die Ramanspektroskopie (Burger, UHH) sowie BET- und EXAFS/-XANES-Messungen von Herrn Fröba (UHH).

Das GKSS-Forschungszentrum verfügt über umfangreiche Erfahrungen im Upscaling des Produktionsverfahrens. In einer sehr erfolgreichen bestehenden Kooperation mit der Gruppe um Herrn Hapke und Herrn Ranong (TUHH), die für das Design und den Bau von Prototypentanks auf Basis von Metallhydriden langjährige Erfahrung besitzen, wird derzeit im Rahmen des FP6 – EU-Projektes StorHy ein Wasserstoffspeichertank auf Basis von 8 kg NaAlH<sub>4</sub> als Speichermaterial konstruiert. Die Erfahrungen, die in diesem Projekt gesammelt werden, dienen als Grundlage für die Konzipierung von Wasserstoffspeichertanks auf Basis von neueren komplexen Leichtmetallhydriden mit noch höheren Speicherkapazitäten, die jetzt bereits in der Entwicklung sind. Zur Entwicklung von möglichen Prototypentanks kommen neben den entsprechenden Tests auch CFD-Simulationen zum Einsatz.

### **C) Indirekte Wasserstoffspeicherung in Methanol:**

Die bereits kurz unter Punkt 1a) erwähnte Hydrierung von CO<sub>2</sub> zu Methanol gemäß  $\text{CO}_2 + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$  könnte zukünftig große Bedeutung gewinnen, wenn Wasserstoff aus regenerativen Energien in großem Umfang zur Verfügung stehen wird. Hierdurch könnten denkbare Probleme mit der Langzeitlagerung von sequestriertem CO<sub>2</sub> gelöst werden. Das gebildete Methanol könnte u.a. in DMFC-Brennstoffzellen eingesetzt werden, die in der AG Müller (TUHH) untersucht werden. Alternativ könnte Methanol auch durch die von Herrn Fröba (UHH) modifizierten Eisenoxid-haltigen mesoporösen Katalysatorsysteme für die Wasserstofferzeugung eingesetzt werden. Auf diese Weise könnte die von dem Chemienobelpreisträger George Olah propagierte "Methanolökonomie" etabliert werden, die von ihm als Alternative zur Erdöl- und Wasserstoff-basierenden Technologie vorgeschlagen wurde.

Für die Hydrierung sind neben mittleren bis späten Übergangsmetallkomplexen (Burger, Prosenc, UHH) die vom AK Weller (UHH) untersuchten Metall- und Metalloxonanopartikel von Interesse. Diese besitzen insbesondere durch die Möglichkeit die Größe und

Oberflächeneigenschaften einstellen zu können, ein sehr hohes Potential, um auf die katalytischen Eigenschaften, d.h., z.B. die Selektivität und Spezifität Einfluss zu nehmen. Unterstützt werden diese Forschungsarbeiten von Herrn Heck (UHH), der über große Erfahrungen mit der Untersuchung von heterogenen Katalysereaktionen in Kapillarreaktoren verfügt.

### 3) Strukturierte Nachwuchsförderung

Im Unterschied zum sehr gut etablierten Hamburger Forschungsnetzwerk im Bereich der Wasserstoffspeicherung- und Brennstoffzellentechnologie war die Kooperation unter den Arbeitsgruppen im Bereich der H<sub>2</sub>-Produktion und Energieressourcen bislang weniger gut koordiniert. Im Zuge des Antrages für die Graduiertenschule „Future Energy Resources“<sup>13</sup> im Rahmen der zweiten Runde der Exzellenzinitiative haben sich allerdings im letzten Herbst Arbeitsgruppen der UHH, TUHH, HAW, HSU, des HWWI sowie der Bundesforschungsanstalt für Holz- und Forstwirtschaft (BFH) und Herrn Vahrenholt von der Firma Repower für eine zukünftige Zusammenarbeit zusammengefunden. Zwar ist diese Antragskizze im Januar dieses Jahres negativ beschieden worden, jedoch fühlen sich die beteiligten Arbeitsgruppen durch das insgesamt dennoch sehr positive Gutachten bestärkt, ihr Ziel weiter zu verfolgen. Hierbei wurde u.a. besonders gelobt, junge Nachwuchswissenschaftler nicht nur in ihrem naturwissenschaftlichen Hauptfach auszubilden, sondern zusätzlich auch wirtschaftswissenschaftliche Aspekte in die Promotion zu integrieren. Im Originaltext des Gutachtens lautet der Abschnitt: „Den Absolventen dürften sich sehr gute Karrierewege in anwendungsgetriebenen Berufsfeldern eröffnen, zum Beispiel im Forschungsmanagement in der Industrie oder in der (Wissenschafts-) Politik, weshalb man die Promotion hier fast als “science business degree“ bezeichnen könnte.“ Dieser von den Antragsstellern nicht unmittelbar intendierte Aspekt bietet aber in der Tat nicht nur für unsere Absolventen sondern insbesondere auch für den Wirtschaftsraum der Stadt Hamburg eine große Chance.

Hierzu wird vorgeschlagen im Rahmen des geplanten Stiftungskollegs „Hamburg - The Energyzing City“ (HTEC) die komplementären Aspekte der Energieeinsparung in der Stadt- und Bauplanung (REAP) von Arbeitsgruppen der HCU,<sup>14</sup> der zukünftigen Forschung im Bereich neuer Energieressourcen (FEYR), der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (HFCT) sowie der Systemintegration und Energieeffizienz (SIEEE) zu bündeln (Abb. 1). Über die in der Abbildung bereits gezeigte Integration der ersten Säule (REAP) in den Bereich der Stadt- und Bauplanung finden gegenwärtig Gespräche statt.

<sup>13</sup> Der Antragstext ist einsehbar unter: <http://www.chemie.uni-hamburg.de/ac/burger/energy/gsfeyr.pdf>.

<sup>14</sup> HafenCity Universität, HCU.

Die Fokussierung dieser Forschungs- und Ausbildungsaktivitäten im Bereich des Klimaschutzes und der Energieressourcen wäre ein international sichtbares Zeichen und würde nicht nur der Wissenschaft und Politik, sondern gerade auch der breiten Bevölkerung die Glaubhaftigkeit des Hanseatischen Klimaschutzkonzepts signalisieren. Längerfristig würde dies im Bereich der wissenschaftlichen Nachwuchsförderung mit Gewissheit dazu beitragen, exzellente Köpfe aus aller Welt anzulocken und sie durch die hohe Attraktivität und Lebensqualität der Hansestadt dauerhaft an Hamburg zu binden, wovon der Wissenschaftsstandort Hamburg in erheblichem Maß profitieren würde.

## Hamburg – The Energy<sup>y</sup>zing City

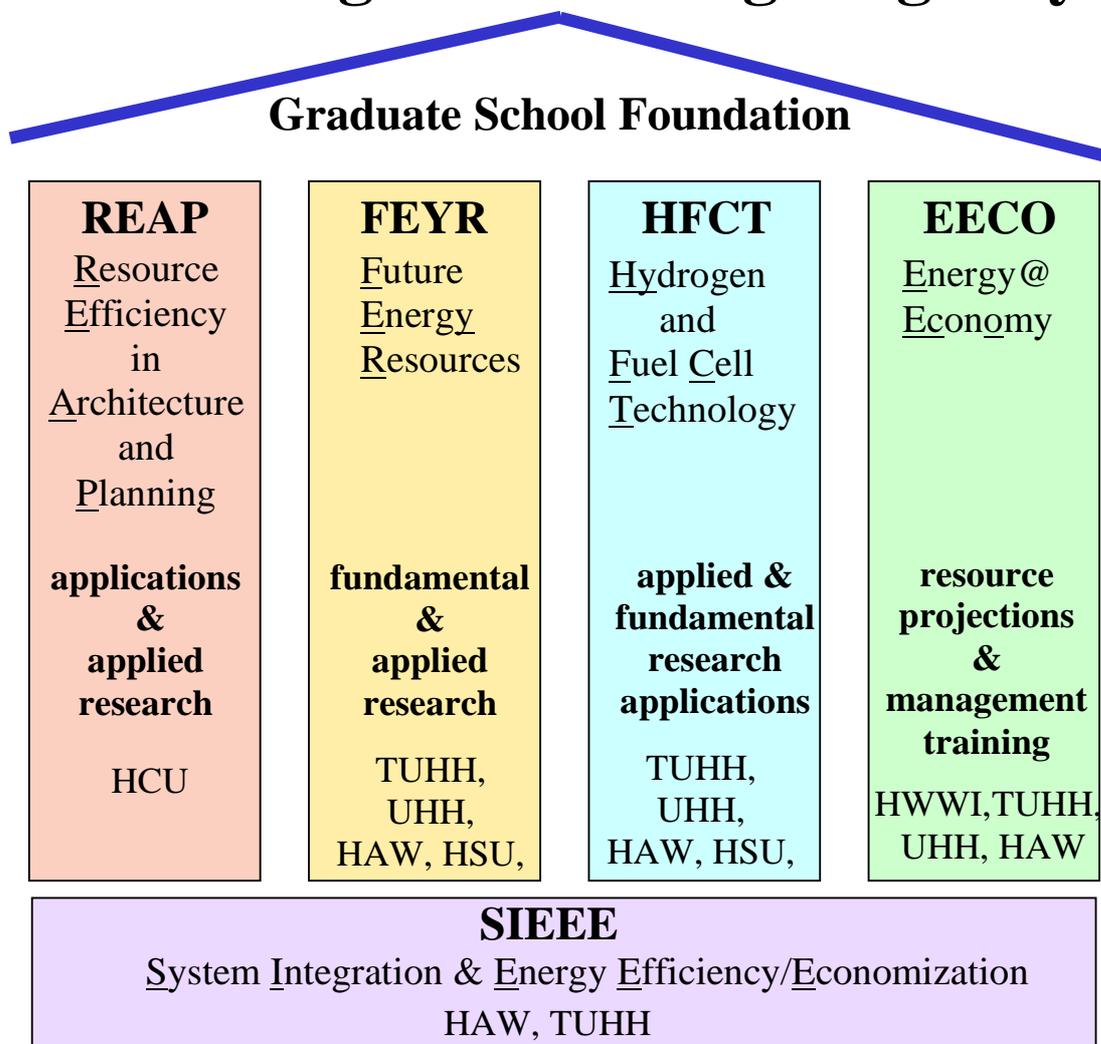


Abb. 1.: Stiftungskolleg „Hamburg – The Energy<sup>y</sup>zing City“

Es bleibt letztendlich anzumerken, dass im Unterschied zu anderen Bundesländern, z.B. Baden-Württemberg oder Nordrhein-Westfalen, bislang kein von der Stadt Hamburg finanziertes strukturiertes Landesgraduiertenkolleg (LGK) realisiert ist. Nicht nur im Anbetracht der Symbolkraft der Einrichtung des Stiftungskollegs „Hamburg - The Energyzing City“<sup>15</sup> sondern auch für die Verstärkung der Forschungs- und Ausbildungsaktivitäten wird die *finanzielle* Unterstützung durch die Hansestadt (BSU, BWF..) als äußerst wünschenswert und notwendig erachtet. Die politische Realisierung der strukturierten Landesgraduiertenförderung könnte hierdurch nachhaltig Zeichen setzen.

---

<sup>15</sup> Nähere Informationen über das geplante Stiftungskolleg „Hamburg - The Energyzing City“ sind unter <http://www.chemie.uni-hamburg.de/ac/burger/energy/htec.pdf> einsehbar.

### Beteiligte Arbeitsgruppen und –themen

Teilnehmende Arbeitsgruppen	Institut	Erzeugung	Speicherung
Prof. Antranikian, Garabed	TUHH, Institute of Technical Microbiology	X	
PD. Bings, Nicolas	UHH, Institute of Inorganic and Applied Chemistry	X	X
Prof. Broekart, José A.C.	UHH, Institute of Inorganic and Applied Chemistry	X	X
Prof. Burger, Peter	UHH, Institute of Inorganic and Applied Chemistry	X	X
Dr. Dornheim, Martin	GKSS, Institute of Materials Research		X
Prof. Fröba, Michael	UHH, Institute of Inorganic and Applied Chemistry	X	X
Prof. Gajewski, Dirk	UHH, Institute of Geophysics	X	
Prof. Heck, Jürgen	UHH, Institute of Inorganic and Applied Chemistry	X	
Prof. Hapke, Jobst	TUHH, Institute for Plant System Design		X
Dr. Hoffmann, Frank	UHH, Institute of Inorganic and Applied Chemistry	X	
Prof. Kabelac, Stephan	HSU, Process Engineering Department		X
Prof. Kaltschmitt, Martin	TUHH, Institute of Environmental Technology and Energy Economics	X	
Prof. Kaminsky, Walter	UHH, Institute of Technical and Macromolecular Chemistry	X	
Prof. Kather, Alfons	TUHH, Institute of Energy Systems	X	
Prof. Klassen, Thomas	HSU, Institute of Material Science		X
Prof. Kuchta, Kerstin	HAW, Faculty of Life Sciences	X	
Prof. Liese, Andreas	TUHH, Institute of Technical Biocatalysis	X	
PD Luinstra, Gerrit (Ruf erteilt)	UHH, Institute of Technical and Macromolecular Chemistry	X	X
Prof. Nunes, Suzana	GKSS, Institute of Material Research	X	
Prof. Müller, Jörg	TUHH, Institute of Microsystem Technology	X	X
Prof. Müller, Rudolf	TUHH, Institute of Technical Biocatalysis	X	
Prof. Prosenc, Marc-Heinrich	UHH, Institute of Inorganic and Applied Chemistry	X	X
Dr. Ranong, Chakkrit Na	TUHH, Institute for Plant System Design		X
Prof. Scherer, Paul	HAW, Research Center of Lifetec Process Engineering	X	
Prof. Stegmann, Rainer	TUHH, Institute of Waste Water Resource Management	X	
Prof. Streit, Wolfgang	UHH, Biocenter Flottbek	X	
Prof. Struckmeier, Jens	UHH, Department of Mathematics	X	
Prof. Weller, Horst	UHH, Institute of Physical Chemistry	X	
Prof. Willner, Thomas	HAW, Faculty of Life Sciences	X	
Prof. Winkler, Wolfgang	HAW, Research Group Fuel Cells and Efficient Use of Energy	X	

UHH: Universität Hamburg; TUHH :Technische Universität Hamburg-Harburg; HAW: Hochschule für Angewandte Wissenschaften; GKSS: GKSS Forschungszentrum, Geesthacht.