

**„Windwasserstoff“**

**Sozio-ökonomische Bewertung mariner Nutzungsänderungen**

**Kombination von Off-shore Windkraft und Wasserstoffproduktion**

**Teilprojekt 4.2., 2. Projektphase**

Im Auftrag der

GKSS

In der Helmholtz Gemeinschaft

Project: Coastal Futures, Dr. Andreas Kannen

Max-Planck-Strasse 1

21502 Geesthacht

Erstellt durch

Dr. Jörg Köhn

Dipl.-Ing.oec. Antje Köhn

Kontakt:

Dr. Jörg Köhn

Umwelt- und Regionalmanagement

Büdnerreihe 20A

18239 Heiligenhafen, Germany

Tel.: 038295-70410

Fax 038295-71415

Email: [jk@dr-joerg-koehn.de](mailto:jk@dr-joerg-koehn.de)

Internet: [www.dr-joerg-koehn.de](http://www.dr-joerg-koehn.de)

**Inhaltsverzeichnis**

<b>0</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>EINORDNUNG, METHODISCHER ANSATZ UND ZIELE DES TEILPROJEKTES „WINDWASSERSTOFF“</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>STAND DER ARBEITEN MIT BEGINN DES TEILPROJEKTS „WINDWASSERSTOFF“</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>NETZWERKANALYSE WINDWASSERSTOFF</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE SZENARIEN WINDWASSERSTOFF</b>	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>TECHNISCHE SZENARIEN WINDWASSERSTOFF</b>	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>WIRTSCHAFTLICHE SZENARIEN WINDWASSERSTOFF</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>ZUKUNFTSWERKSTATT</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>BEWERTUNG DES ZWISCHENSTANDES</b>	<b>27</b>
	<b>DATENQUELLEN</b>	<b>29</b>

## 0 Zusammenfassung

Mit der Strukturierungshilfe des DPSIR – Ansatzes und der Nutzung von Storylines (semi-quantitativen Szenarien) wurden in der ersten Projektphase in dem Dreieck des Nachhaltigkeitsmodells – ökologisches, ökonomisches und soziales System – und der Steuerung des Nachhaltigkeitssystems (Governance) Zukünfte des Küstenraums entworfen, beschrieben, analysiert, mit Indikatoren bewertet und Systemantworten prognostiziert.

Die Klimaschutzpolitik einerseits und wirtschaftliche Interessen der Windenergie – Industrie/Energiewirtschaft andererseits sind „Driver“ für Veränderungen in der AWZ der Bundesrepublik Deutschland. Diese treffen auf bestehende Nutzungen im Küstenmeer („Pressures“) und werden diese verändern. Der Zustand („State AWZ“) des Systems AWZ wird sich dadurch verändern und auf die Küstenzone („State Küstenraum“) zurück wirken. Der „Impact“ (offshore – Windfarmen) auf beide Systeme lässt sich über Indikatoren, die den Systemzustand vor und nach dem „Eingriff“ beschreiben messen. Die Kompensation der durch den „Impact“ veränderten „States“ AWZ und Küstenraum ist die „Response“ der drei zu betrachtenden Systeme – ökologisches, ökonomisches und soziales System.

Der oder die „Impacts“ können mit positiven oder negativen externen Effekten die Systeme beeinflussen.

Die erste „Runde“ des DPSIR – Ansatzes wurde im ökonomischen Teilsystem über Zeitreihenanalysen und mit auf die offshore – Windindustrie bezogene Produktionsfunktionen in Input-Output – Tabellen abgebildet.

Das eher ernüchternde Ergebnis, offshore – Windfarmen werden einen Impuls für die wirtschaftliche und damit auch soziale Entwicklung im Küstenraum der Nordsee setzen, dieser wird jedoch nicht ausreichen, um die Küstenregion nachhaltig wirtschaftlich zu stabilisieren, von Transfers unabhängig zu machen oder gar zu einem Wachstumsmotor der Wirtschaft in Deutschland werden zu lassen. Ein „optimistisches“ Szenario ist umso unwahrscheinlicher, je weniger es den Flächenländern Niedersachsen und Schleswig-Holstein gelingt, möglichst viele der mit der offshore – Windkraft verbundenen Wertschöpfungsstufen in diesen Ländern zu binden.

Die Region differenziert sich stärker aus. Die Gradienten zwischen Kernstädten und ländlichem Raum verstärken sich mit zunehmender Entfernung von der Kernstadt.

Das bedeutet nicht, dass die Region deutsche Nordseeküste sich insgesamt nicht wirtschaftlich stabilisieren könnte. Die Kernstädte, v.a. Hamburg, sind regionale Treiber der Entwicklung im Bereich Seeverkehr, Industrie, Dienstleistungen und Energie und zunehmend mittelfristig wohl auch Wasserstoff.

In der ersten Projektphase konnte gezeigt werden, dass die Antworten auf den „Impact“ offshore – Windfarmen zumindest im ökonomischen und sozialen System überwiegend positive, auch positive externe Effekte zeigen. Ob und in welchem Ausmaß im Normalfall, nicht im Falle eines Risikofalls wie einer Schiffshavarie, negative externe Effekte das ökologische System betreffen werden, kann hier nicht diskutiert werden.

Was kann gemäß dem im Projekt gewählten methodischen Ansatz (DPSIR) eine „Response“ auf die Ergebnisse der ersten Projektphase sein?

Wenn also, positive Effekte eintreten werden, die jedoch noch nicht ausreichend stark für eine nachhaltige sozio-ökonomische Entwicklung im Küstenraum sind, bietet sich an, bei gleichem methodischen Ansatz im Denkmodell (und mit realem wirtschaftlichem Hintergrund), „Windwasserstoff“ als weiteren „Impact“ zu „simulieren“.

„Windwasserstoff“ meint grünen, durch Elektrolyse mithilfe von „Windstrom“ gewonnen „Wasserstoff“. Zugleich könnte „Windwasserstoff“ offene technologische, wirtschaftliche und klimapolitische Ziele erfüllen helfen, so die Grundthese. Wasserstoff wird ohnehin „die“ Rolle als Energiemedium des 21. Jahrhunderts zugeschrieben.

Mit dieser Grundidee wurde „Windwasserstoff“ als „Impact“ in die zweite „Runde“ des DPSIR – Ansatzes eingebracht.

Die Zwischenergebnisse zeigen, dass „Windwasserstoff“ zumindest mittelfristig eine reale Option für den Küstenraum und für die sichere Energiebereitstellung in Europa sein wird. Das Thema konnte auf vier weiter zu verfolgende Schwerpunkte eingeeengt werden:

1. Wasserstoffmarkt und –kunden
2. technisch-technologische Lösungen auf dem Meer und/oder an Land (Ableitung der für die Input-Output-Analyse wichtigen Produktionsfunktionen)
3. politische Rahmensetzungen und Schaffung der notwendigen Infrastruktur (Verbundsystem Wasserstoff)
4. Windwasserstoffzentren an der deutschen Nordseeküste (regionale Verteilung im Küstenraum).

„Windwasserstoff“ ist ein zusätzliches Element im Klima- und damit Küstenschutz. Es erweitert die wirtschaftlichen Optionen ohne weitere mögliche negative Effekte auf das ökologische System auszulösen.

## **1 Einordnung, methodischer Ansatz und Ziele des Teilprojektes „Windwasserstoff“**

Die Ergebnisse der sozio-ökonomischen Analyse in der ersten Phase des Forschungsverbundes „Zukunft Küste – Coastal Futures“ haben aufgezeigt,

- dass nach den Indikatoren zur sozio-ökonomischen Nachhaltigkeit die regionale Entwicklung und Sicherung der Lebensqualität im Küstenraum von einer stabilen ökonomischen Entwicklung abhängt und
- diese nicht allein durch den mit Offshore – Windparks verbundenen Investitionsschub gesichert werden können. Als Grund dafür wurde herausgestellt, dass diese nur kurz- und mittelfristig starke positive Effekte auf Kapitalstock und Arbeitsmarkt haben bzw. die erhofften regionalwirtschaftlichen Wirkungen nur dann auftreten, wenn die Wertschöpfung auch im Anlagenbau in der Küstenregion erfolgt.

Als Folge müssen aus regionalökonomischer Sicht zusätzliche Investitionen und Industrieentwicklung im Küstenraum erfolgen, was die Schaffung eines Innovationsraumes mit polykultureller Nutzung in der AWZ und im Küstenraum voraussetzt.

Zudem ist ein wichtiger Aspekt der Nutzung von Offshore-Windenergie, dass bislang keine Speichermedien für Strom in der prognostizierten Menge vorhanden sind.

Primäre erneuerbare Energieträger werden daher bislang nur als Ergänzung der fossilen oder atomaren Energieerzeugung gesehen. Wasserstoff und Strom sind sekundäre Energieträger. Die primäre Energiequelle aus der sie umgewandelt werden, ist der Schlüssel für die Bewertung der Klimaneutralität und damit Umweltfreundlichkeit, der auf diesen sekundären Energieträgern basierenden Wirtschaftsbereiche.

„Windwasserstoff“ kann eine Möglichkeit sein, langfristig von der Nutzung fossiler Brennstoffe unabhängig zu werden. Die Verbindung von „Windstrom“, Windwasserstoff“ und Klimaschutz stellt eine Option für nachhaltige Entwicklung im Küstenraum und in Deutschland bzw. Europa dar. „Windwasserstoff“ kann im 21. Jahrhundert enorme Bedeutung für die Zukunftsfähigkeit der Gesellschaft erlangen.

Die sozio-ökonomische Bewertung weiterer, neuer Nutzungen, die sich teilweise aus dem Thema „Windwasserstoff“ ableiten aber nicht darauf beschränkt sind<sup>1)</sup>, erfolgt entlang vor allem der Szenarien, die im Projekt fortgeschrieben werden. Der Fokus wird auf die Produktion von Windwasserstoff aus Windstrom gelegt. Dabei sollen jedoch die Wechselwirkungen zwischen den in den Szenarien beschriebenen anderen Handlungsoptionen beschrieben und berücksichtigt werden.

---

<sup>1)</sup> Mit diesem Thema sind auch Technologie- und Wirtschaftsbereiche, wie neue Materialien, Nano-Technologien, Brennstoffzellentechnologien, Mess-, Steuer- und Regelungstechnologien sowie der Wachstumsmarkt industriennahe Dienstleistungen verbunden.

Mit der Fokussierung auf die Wasserstoffwirtschaft soll aufgezeigt werden, wie der Übergang zu einer Gesellschaft, die auf der Nutzung erneuerbarer Energien stützt, gelingen kann. Das Augenmerk liegt dabei auf der Abschätzung der sozio-ökonomischen Effekte, die sich aus dieser Ko-Nutzung für die Küstenregion ergeben.

Ein weiteres wichtiges Ziel ist zudem, dass durch die Bereitstellung von Informationen das Thema Wasserstoffnutzung auf die Agenda gebracht wird und Dialogprozesse dadurch angeregt und um innovative Themen bereichert werden. Diesem Ziel dienen u.a. Zukunftswerkstätten.

Das in diesem Teilprojekt verfolgte methodische Ziel ist, kumulative ökonomische Effekte in Form einer ex-ante – Analyse bezogen auf (technologische) Entwicklungsprojekte mit Hilfe des in Coastal Futures entwickelten Bewertungsansatzes zu untersuchen.

Als Fallstudie dient die Produktion von Wasserstoff aus Windstrom auf dem Meer oder alternativ in der unmittelbaren Küstenregion. Ein übergreifendes und im Verbund mit Teilprojekt 1.1 (Projektkoordination und Integration) zu verfolgendes Ziel ist die Verknüpfung von Kommunikation, Entscheidungsverfahren und institutionellen Rahmenbedingungen in Steuerungsansätzen bzw. in der Governance von Raumentwicklungsprozessen und technologischen Entwicklungen.

Somit sollen basierend auf den Ergebnissen und Überlegungen in der ersten Förderphase das Szenario „Meer als Energieraum“ auf Ko-Nutzungen, z.B. Produktion von Wasserstoff aus Windstrom, evtl. auch in Kombination mit der Nachnutzung von Systemen der Erdgas- und Erdölförderung in der Nordsee erweitert werden,

- die Szenarien „Meer als Energieraum“, „Meer als Industrieraum“ und „Meer als Verkehrsraum“ werden verknüpft und hinsichtlich einer polykulturellen Nutzung optimiert, mit den in der ersten Phase entwickelten Indikatorensystemen bewertet und bilanziert,
- mögliche Nutzungskonkurrenzen zu den Szenarien „Meer als Naturraum“ und „Meer als Erholungsraum“ werden herausgestellt, bewertet und bilanziert,
- technologische sowie institutionelle Systemanforderungen werden für diese Nutzungskombinationen beschrieben und der Projekterfordernisse moderiert werden (in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten 1.1, 1.2 und 4.1),
- akteursbezogene und institutionelle Formen für Informationstransfers, Kommunikation, Konfliktlösungsstrategien und Entscheidungssysteme werden im Kontext der Raumnutzung Windwasserstoff entwickelt und begleitet (in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten 1.1, 1.2 und 4.1).

Hierzu wird mit Hilfe von Alternativkostenanalysen, Input – Output – Modellen und komparativen Verfahren sowie Expertenworkshops in Kooperation mit anderen Teilprojekten von „Zukunft Küste – Coastal Futures“ geprüft,

- inwieweit sich Offshore – Windparks eignen, Wasserstoff zu erzeugen und welche Kuppelprodukte (Sauerstoff, Meerwasserentsalzung, Bindung von Kohlendioxid in chemischen Produkten mit Hilfe von Wasserstoff) sich als weitere Optionen anbieten,
- welche technischen Konzepte sich für Erzeugung von Wasserstoff in Offshore – Windparks umsetzen lassen (Optionen für das Systemdesign),
- welche Marktchancen und Wirtschaftseffekte sich für die Küstenregionen Deutschlands durch ein Produktionskonzept für Wasserstoff in Offshore – Windenergieanlagen ergeben,
- welche wirtschaftlichen, technisch – technologischen, Arbeitsplatz- und Einkommenseffekte in der Küstenregion durch die Wasserstoffherzeugung für die Industrie in den Offshore – Windparks ausgelöst werden können,
- welche Investitionen und institutionellen Strukturen erforderlich sind, um ein tragfähiges Konzept „Windwasserstoff“ aufzubauen,
- inwieweit technisch – technologisches Know-how in Deutschland bzw. Schleswig-Holstein in der Wasserstoffindustrie vorhanden ist bzw. induziert werden kann,
- wie ein Modellprojekt mit der Industrie initiiert und vorbereitet werden kann,

Diese Untersuchungen erfolgen im Rahmen der im Projektverbund festgelegten Raumebenen und Handlungsskalen, wobei übergreifend die nationale Ebene, die Länderebene und die regionale Ebene zu betrachten sind. Die mit diesem Vorgehen angestrebte Bewertung und Bilanzierung der mit den Szenarien anzustoßenden Entwicklung erfolgt auf den Ebenen

- Technisch – technologische Machbarkeit
- Wirtschaftlichkeit und ökonomische Nachhaltigkeit (durch Input – Output – Modelle und Übertragen der durch Modellierung gewonnenen Daten in die in der ersten Förderphase entwickelten sozio-ökonomischen Indikatoren)

- Ökologische Nachhaltigkeit der Gesamtentwicklung einschließlich der Klimaschutzwirkungen
- Auswirkungen auf die soziale Infrastruktur und Entwicklung der Lebensqualität im Küstenraum
- Dynamik der Entwicklungsprozesse, Einbeziehung der Akteure und Governance.

Für diese Einzelschritte erfolgt eine Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten des Verbundes. Zugleich sind verschiedene technisch – technologische und wirtschaftliche Entwicklungspfade mit Akteuren im Küstenraum und der Zulieferindustrie in Dialogprozessen zu entwickeln.

Diese Pfade werden in verschiedenen Systemlösungen münden, die komparativ mit den im bisherigen Projektverlauf entwickelten sozialen, ökonomischen und ökologischen Indikatoren bewertet werden können.

Diese Formen der informellen und institutionellen Einbeziehung (Partizipation) sollen Entwicklungen moderieren, bewerten, synthetisieren, kommunizieren und Entscheidungen im Sinne von „extended peers“ vorbereiten. Dabei unterliegen diese Prozesse selbst einer Analyse im Rahmen des DPSIR – Ansatzes und des übergreifenden Bewertungsansatzes des Forschungsverbundes (durch die Teilprojekte 1.1 Koordination und Integration sowie 1.2 Kommunikation und Vernetzung).

Die Anwendung des übergreifenden Bewertungsansatzes mit der Szenariomethode und der DPSIR-Struktur ermöglicht dabei zu testen, ob sich dieser Ansatz methodisch auch für Entwicklungsprojekte eignet und mögliche Bewertungen und Bilanzierungen von Zukunftsprojekten erlauben.

Das Teilprojekt „Windwasserstoff“ eröffnet damit auch gleichzeitig die zweite Runde für die Anwendung des DPSIR – Ansatzes, da dieses Teilprojekt bereits „Response“ auf die Ergebnisse der ersten Projektphase ist.

Da das Angebot von Windenergie großen Schwankungen unterworfen ist, ergibt sich bei einem hohen Anteil der Windenergieproduktion die Notwendigkeit, den in Zeiten schwacher Nachfrage überschüssigen Windstrom zu speichern und in Zeiten hoher Nachfrage oder schwachen Angebots in das Netz einzuspeisen.

Während in diesem Zusammenhang die Erzeugung von Wasserstoff aus Winds allgemein als sinnvoll angesehen wird, ist die Rückwandlung von Wasserstoff in Strom mit hohen energetischen Verlusten verbunden und wird daher kontrovers diskutiert. Im Bereich der Brennstofftechnologien besteht weiterhin ein großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Da aber neben Strom auch leicht transportable Energieträger für den mobilen Einsatz im Verkehr benötigt werden, stellt sich zusätzlich die Frage, ob solche Energieträger auf der Basis von (überschüssigem) Windstrom produziert werden können. Sowohl für die Speicherung und Rückwandlung von Windenergie in Strom, als auch für die Versorgung des Transportssektors mit transportablen und CO<sub>2</sub>-freien Energieträgern stellt Wasserstoff eine wichtige Option dar.

Ebenso kann die Erzeugung von Wasserstoff aus Windstrom im Vergleich zur Erzeugung aus Erdgas nicht nur ökologisch sondern auch wirtschaftlich interessant sein. So können die Herstellungskosten für Windwasserstoff auf etwa 1/10 des Abgabepreises durch die großen Wiederverkäufer sinken, wenn die Herstellungspreise für Strom aus Offshore – Windenergieanlagen auf etwa 4 €/t fallen (alle Daten beruhen auf brancheninternen Interviews).

Da die Küstenregion der deutschen Nordsee über den größten Teil der deutschen Windenergieressource verfügt, stellt die Produktion von windenergiebasiertem Wasserstoff eine bei allen Unsicherheiten mittel- bis langfristig wichtige nachhaltige ökonomische Entwicklungsoption für Küstenregionen dar.

Zugleich trägt die Kombination von Windkraft und Wasserstoff zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Energiesystems auf einen Bruchteil der heutigen Werte bei. So kam schon die Klima-Enquete-Kommission des Bundestages 1991 zu dem Schluss, dass die Treibhausgas-

emissionen der Industrieländer bis 2005 um 20% und bis 2050 um 80% gegenüber dem Stand von 1987 reduziert werden müssen, um einen tiefgreifenden Klimawandel durch anthropogene Treibhausgasemissionen zu verhindern.

Auf Basis der regionalwirtschaftlichen Untersuchungen in der ersten Förderphase von „Zukunft Küste – Coastal Futures“ stellt die Kombination von Offshore-Windparks mit Wasserstoffproduktion somit eine sowohl ökologisch (insbesondere unter Berücksichtigung des Klimawandels) wie regionalökonomisch attraktive Erweiterung zu den bereits untersuchten Windkraftausbaustufen, die in den Szenarien des Verbundes abgebildet werden, dar.

Methodisch schließt die Integration des Themas Wasserstoff an das im Projekt entwickelte Nutzungsszenario „Das Meer als Energieproduktionsraum“ an und erweitert dieses um einen zusätzlichen Entwicklungspfad in Richtung eines Energie-/Industrieszenarios für die Meeresnutzung.

Somit werden Effekte aus den Szenarien „Meer als Energieraum“, „Meer als Industrieraum“ und teilweise auch „Meer als Verkehrsraum“ (z. B. bei Nutzung von Feederschiffen für den Transport des Wasserstoffs an Land) miteinander verknüpft.

Das Ziel hinter diesem Vorgehen ist, eine potentielle Nutzungskombination und win-win – Situation mit Hilfe des in Coastal Futures entwickelten Bewertungsansatzes zu untersuchen. Damit soll zugleich die Eignung dieser Methode für die Beschreibung und Bilanzierung kumulativer ökonomischer Effekte sowie für ex-ante – Analysen, d. h. Bewertungen und Bilanzierungen von (technologischen) Zukunftsprojekten anhand des Fallbeispiels Windwasserstoff geprüft und ein Beitrag zur methodischen Integration in Teilprojekt 1.1 geleistet werden.

Dabei werden folgende Effekte aus der Verknüpfung der Szenarien „Meer als Energieraum“, „Meer als Industrieraum“ und „Meer als Verkehrsraum“ erwartet:

- Kombination von Strom- und Wasserstoffproduktion in der AWZ und damit Verstetigung der wirtschaftlichen Effekte ausgelöst durch die offshore – Windparks
- langfristig höhere Wertschöpfung der Industrie im Küstenraum
- Konzentration von Forschung und Entwicklung im Küstenraum bzw. den deutschen Küstenländern auf Industrie und andere Produktionsbereiche maritimer Polykultur (Industrieforschung und Technologieentwicklung)
- Nachnutzung von Systemen der Erdgas- und Erdölexploration in der Nordsee bei verbesserter Ökobilanz sowie Nutzung freiwerdender Kapazitäten von Schiffen (z.B. Einhüllentanker) und deren Einbindung in Feedersysteme für Wasserstoff, Wartungs- und Produktionsplattformen
- Verknüpfung von Hafenkapazitäten (für Feederschiffe) mit industrieller Nutzung von Wasserstoff im Küstenraum oder alternativ Verknüpfung der beiden in Deutschland bereits bestehenden Versorgungsnetze für Wasserstoff mit dem Küstenraum.

## **2 Stand der Arbeiten mit Beginn des Teilprojekts „Windwasserstoff“**

Im Projektzeitraum Coastal Futures 1 wurden unter Anwendung des DPSIR – Ansatzes auf insgesamt 5 Hauptszenarien mit jeweils 3 Unterszenarien die jeweiligen Veränderungen der Zukünfte bei Vorrang eines bzw. der Kombination von Szenarien

1. qualitativ auf der Basis von Raumnutzungsdaten und –karten,
2. semiquantitativ auf der Basis von Daten der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR) und
3. quantitativ unter zu Hilfenahme von Input-Output – Tabellen (IOT)



abgeschätzt.

Die Ergebnisse haben verdeutlicht, dass die wirtschaftliche Entwicklung des Küstenraumes in der Vergangenheit von politischen Interventionen in Märkte beeinflusst wurde, z.B.

- begründet durch Sicherheitsinteressen der Bundesrepublik, z.B. Ansiedlung von Bundeswehrstandorten
- begründet durch die Aufhebung regionaler Disparitäten durch wirtschaftliche Interventionen mittels Förderung zur Ansiedlung von Betriebsstätten, z.B. VW in Emden.

Diese Maßnahmen sind im Umfeld einer Liberalisierung und Globalisierung von Märkten sowie einer EU koordinierten Außenpolitik und damit veränderten Militärdoktrin seit der Wende in Europa politisch nicht mehr zeitgemäß, durch die deutsche Wiedervereinigung und die Globalisierung der Märkte auch wirtschaftlich nicht mehr durchführbar.

Seit 1990 zeigen mehrere im Projekt auf der Basis der VGR entwickelte sozio-ökonomische Indikatoren an:

- ein immer stärkeres Wachstum der Kerne v.a. Hamburg und des Umlandes dieser Kerne
- andererseits einen immer stärkeren Abfall der Entwicklung mit zunehmender Entfernung von diesen Kernen (Verstärkung regionaler Disparitäten).

Selbst bei maximal möglicher Verlagerung von Wertschöpfungsketten für die off-shore Windindustrie in den Küstenraum, v.a. in die Hafenstandorte, mit einem Potenzial von etwa 4.000 direkten und indirekten Arbeitsplätzen (Hohmeyer, 2006) wird die regionale Wertschöpfung dadurch zwar gestärkt; sie kompensiert aber noch nicht den Entwicklungsrückgang im Küstenraum außerhalb der Kerne.

Die aktuelle Situation zeigt, dass sich auch die Ansiedlung der off-shore Windindustrie eher auf die Kerne oder kernnahen Standorte konzentriert, als auf die Landkreise Schleswig-Holsteins oder Niedersachsens, die Entwicklungsrückstände zu kompensieren haben.

Ohnehin sind nach den Ergebnissen der Szenarienbetrachtung nur die Szenarien der Verknüpfung von Industrie-, Energie- und Verkehrsraum unter der Rahmenbedingung „Sicherung der die Lebensqualität bestimmenden Bedingungen des Natur- und Umweltraums“ geeignet durch Einbindung innovativer Wirtschaftsformen und -verfahren langfristig den Küstenraum Nordsee nachhaltig ökologisch, ökonomisch und sozial zu gestalten (siehe auch Zukunftswerkstatt, Oktober 2006).

Die off-shore Windparks sollen möglichst umweltfreundlich, v.a. weitgehend CO<sub>2</sub> neutral, die Sekundärenergie Strom aus der Primärenergie Wind herstellen.

Da Wind nicht konstant in Zeit, Raum und Stärke weht und Strom nur über begrenzte Zeit im europäischen Verbundnetz gespeichert werden kann, müssen bestimmte Externalitäten in die Betrachtung der Umweltfreundlichkeit und Wirtschaftlichkeit des off-shore Windstroms einbezogen werden, die zum einen Kosten und zum anderen innovative technische Lösungen erfordern.

Mögliche Lösungen beziehen sich auf die Vergleichmäßigung des Angebotes an Windstrom und die Speicherung des Überschussstroms aus der (off-shore) Windkraft

- in Pumpspeicherwerken
- im so genannten Supergrid (einem europäischen Gleichstromverbundkabel)
- in Wasserstoffspeichersystemen, die gleichzeitig mittels Brennstoffzelle nach Flaute die Anlagen wieder „anfahen“
- in Hybridautos, die Strom zu Zeiten in ihre Batterien aufnehmen, in denen Lastüberschüsse aus dem Netz genommen werden müssen.

Wie die bereits bestehenden Speichersysteme haben auch diese Systeme Kapazitätsgrenzen, die bei Umsetzung des mittleren und maximalen Ausbauszenarios für off-shore Windkraft in der Nord- und Ostsee überschritten werden würden.

#### These 1:

Als Nahziel wurde daher im Projekt Coastal Future die These aufgestellt, dass die Kombination von off-shore Windkraft mit einer bedarfsgerechten und wirtschaftlich sinnvollen Umwandlung der Sekundärenergie Strom in die Sekundärenergie Wasserstoff

1. eine Möglichkeit der Speicherung von Windenergie geschaffen werden kann
2. die bisherige Wasserstofferzeugung aus dem Reforming von Erdgas, Begleitprozessen der chemischen Industrie oder Elektrolyse substituiert und mit Windstrom klimafreundlicher erfolgen kann.

Die Klimafreundlichkeit der industriellen Wertschöpfung ist ein besonderes Anliegen des Küstenzonenmanagements, da erwartet werden kann, dass die Substitution von fossilen Energien und damit die Verlangsamung des Meeresspiegelanstieges helfen, Maßnahmen des Küstenschutzes zu „verbilligen“.

#### These 2:

Durch die an die off-shore Windkraft „angehängte“ Wertschöpfung, so die zweite These, könne es gelingen,

1. die Wertschöpfung im Küstenraum zu steigern,
2. Wirtschaftsbereiche im Küstenraum langfristig klimafreundlich zu stabilisieren, z.B.
  - a. Raffinerien,
  - b. Lebensmittelindustrie,
  - c. Düngemittelherstellung über das Haber-Bosch-Verfahren
3. neue Wirtschaftsbereiche zu entwickeln, z.B.
  - a. Bereitstellung von Wasserstoff für Energie- und Antriebssysteme,
  - b. Reforming von CO<sub>2</sub> mit Wasserstoff in synthetische Kraftstoffe bzw. Grundstoffe der chemischen Industrie
4. damit insgesamt, die mit der off-shore Windkraft verbundene Wirtschaftlichkeit, gesellschaftliche Wahrnehmung und Akzeptanz zu verbessern.

Die Prüfung dieser beider Thesen und die Errechnung der damit verbundenen wirtschaftlichen Effekte stehen im Mittelpunkt des Teilprojektes 4.2:

*„Sozio-ökonomische Bewertung mariner Nutzungsänderungen mit Blick auf die Kombination von off-shore Windkraft und Wasserstoffproduktion“*

in der zweiten Projektphase von Coastal Futures.

### **3 Netzwerkanalyse Windwasserstoff**

Das 21. Jahrhundert wird in vielen Quellen, die sich auf die zyklisch, wellenartige Technologie und Wirtschaftsentwicklung nach Kondratieff beziehen, als das Jahrhundert des Was-

serstoffs bezeichnet. Stellvertretend sei hier die unter Beteiligung der Europäischen Union, der Automobilindustrie und der Mineralölindustrie entstandene Studie „Well-to-wheel“ (2006) genannt.

Wasserstoff wird als universale Energiequelle betrachtet. Die Frage nach der Herstellung von Wasserstoff wird dabei oft in den Hintergrund gedrängt. Derzeit wird nur ein verschwindend geringer Anteil der weltweiten Wasserstoffproduktion über Verfahren erzeugt, die als biologisch, „grün“ oder klimaneutral bezeichnet werden können.

Der Gesamtmarkt wird überwiegend gedeckt durch

- Reforming von Erdgas, Erdöl, Kohle und Biomasse
- Nebenprozesse der chemischen Industrie (z.B. im Chlor-Alkali-Verfahren)
- Elektrolyse. Quellen können hier Sonne oder Wind sein.

Wasserstoff ist danach eine Sekundärenergie mit den Vorteilen

- der Speicherefähigkeit gegenüber Strom
- der hohen Energiedichte bezogen auf die Masse
- der hohen Wirkungsgrade der Energieumwandlung aus Wasserstoff mit Brennstoffzellen gegenüber Carnotschen Prozessen (Verbrennungsmaschinen, Dampfmaschinen usw.).

Der Gesamtmarkt Wasserstoff umfasst etwa 200 Mio. t Öl-Äquivalent. Die jährliche Steigerungsrate der Produktion beträgt etwa 10%. Mehr als 95% der erzeugten Menge stammt aus Reforming- und industriellen Nebenprozessen der Chemieindustrie, etwa 4-5% werden durch Elektrolyse aus Wasser durch Strom gewonnen.

Die Jahresbedarfsmenge könnte auf mindestens das etwa Zehnfache steigen, wenn an die Stelle der Rohölverarbeitung zu Kraftstoffen für Otto- und Dieselmotoren die Herstellung synthetischer Kraftstoffe (z.B. Synfuel, Methanol, MTBE, ETBE) treten würde. Diese Verfahren können bei Bereitstellung ausreichender Mengen Wasserstoffs oder Erzeugung von Wasserstoff über Dampfreforming – Prozesse unter Nutzung von in Kraftwerken überschüssigem überhitztem Wasserdampf auch Methan oder Kohlendioxid als zweite Quelle der notwendigen Einsatzstoffe nutzen. Die Verwertung von Abgasen der Industrie oder aus Deponien könnte das Angebot an Kraftstoffen aus biologischen Einsatzstoffen wirkungsvoll ergänzen und gleichzeitig den Klimawandel verzögern helfen.

Alternativ kann Wasserstoff über Elektrolyse aus jeder Form von Elektrizität hergestellt werden, auch aus Atomstrom. Auf Atomenergie fußt die Wasserstoffstrategie u.a. der USA.

Der Konsens in der Wasserstoff – Gemeinschaft geht derzeit von folgenden Grundthesen aus:

„Die Herkunft (Erzeugungsweg) des Wasserstoffs ist eigentlich egal. Wir brauchen zunächst Anwendungen, um den Kundenmarkt zu entwickeln und Technologien zu erproben. Hierfür stellt die Industrie ausreichende Mengen an Wasserstoff zur Verfügung.“

Die Wahrnehmung in der Öffentlichkeit, weicht durch Informationsmangel davon ab, Wasserstoff ist per se gut und klimaneutral.

Die Grundthese weicht derzeit auf, da die Anwendungen von Wasserstoff zur Speicherung von Windstrom zur betriebsinternen Verwendung bei Betreibern von Windenergieanlagen eine wichtige Option für die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit geworden ist (s. z.B. Enertrag, Forschungsarbeiten des Kompetenzzentrums für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien an der FH Lüneburg).

Auf der Insel Lolland in Dänemark wurde im Mai 2007 das erste Windwasserstoffwerk in der Europäischen Union in Betrieb genommen. Die Demonstrationsanlage verbindet Wind-

stromerzeugung mit Brennstoffzellentechnologien und Blockheizkraftwerken zur lokalen Energieversorgung und „nutzt“ die lokale „Überproduktion von Windstrom“.

Die Frage nach der Erzeugung und Bereitstellung von „grünem“ Wasserstoff wird insbesondere mit der Solar- und Windindustrie in Verbindung gebracht. Verfahren zum Biomasse – Reforming zu Wasserstoff treten eher in den Hintergrund, da die Einsatzstoffe zum einen zu teuer und zum anderen für andere Verfahren der Energiebereitstellung und –speicherung, z.B. Herstellung von Erdgas aus Biogas, Bio-Strom, synthetischen Kraftstoffen der zweiten Generation, verwendet werden. Andere biologische Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff mit Bakterien, z.B. HU Berlin, wurden im Labormaßstab erfolgreich erprobt, sind aber noch mindestens zehn Jahre von der Marktreife entfernt.

Der Wasserstoffmarkt außerhalb der etablierten Industriemärkte

- Düngemittelherstellung nach dem Haber-Bosch-Verfahren über Erdgasreforming oder Elektrolyse-Wasserstoff (etwa 50% des Jahresbedarfes)
- Lebensmittelindustrie
- Raffinerien (Verwebdung insbesondere im Hydrocracking zur Herstellung leichter Kohlenwasserstoffe wie Benzin, Kerosin, Diesel)

ist ein Nischenmarkt mit einer zunehmenden Anzahl wirtschaftlicher Lösungen. Diese wirtschaftlichen Lösungen für Nischenmärkte werden in den kommenden zwei Jahrzehnten die Treiber der Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft sein und damit auch die Frage der „grünen“ Erzeugung neu stellen.

Das bestehende deutsche Netzwerk „Wasserstoff“ besteht folgerichtig aus Vertretern dieser Nischenmärkten, der diese bedienenden Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen, den im Markt tätigen Gasdienstleistern, der Mineralölindustrie, der Stromwirtschaft, der Wind- und Solarindustrie, Wasserstoff(groß)kunden und Vertretern von Spezialinteressen, wie Kommunen, Flughäfen, Vereinen und Verbänden. In Tabelle 1 sind die Mitglieder des Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband verzeichnet. Der Verband ist seinerseits Mitglied in der European Hydrogen Association.

Basierend auf der Trendeinschätzung für das Wasserstoffzeitalter 21. Jahrhundert werden den Maßnahmen zur Marktablierung von Wasserstofftechnologien sowohl in der Europäischen Union als auch in den USA Priorität in den Forschungsprogrammen eingeräumt (siehe z.B. Unterlagen zum 7. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Union).

Neben diesen Bemühungen der Staaten bestehen kooperative Netzwerke, z.B. zur Einführung von Wasserstoffantriebssystemen im öffentlichen Nahverkehr und auf Flughäfen (z.B. globales Städtenetzwerk, Hansestadt Hamburg, Flughafen München, Berliner Verkehrsbetriebe).

Tabelle 1. Mitglieder im Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellen – Verband.

Im DWV sind nach eigenen Angaben 74 Firmen oder sonstige Körperschaften organisiert:

- 3M Deutschland GmbH, Neuss
- Adam Opel GmbH, Rüsselsheim
- Air Liquide Deutschland GmbH, Düsseldorf
- Air Products GmbH, Hattingen
- Airbus Deutschland AG, Hamburg
- Bayerische Motoren Werke AG, München
- Robert Bosch GmbH, Stuttgart
- CL MAP GmbH, München
- Cryotech Refrigerant Valves Technology S.A., Lintgen (Luxemburg)
- DaimlerChrysler AG, Stuttgart
- Deutscher Verband Flüssiggas e.V. (DVFG), Kronberg/Ts.

- DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn
- Dynetek Europe GmbH, Ratingen
- EADS Space Transportation GmbH, Hardthausen
- Elektro-Ausbildungs-Zentrum Aalen e.V., Aalen
- ELT Elektrolyse Technik GmbH, Butzbach
- EnergieAgentur NRW, Düsseldorf
- ENERTRAG AG, Dauerthal
- ET Energie Technologie GmbH, Brunnthal
- Freesen & Partner GmbH, Alpen
- Flughafen Husum GmbH & Co. KG, Husum
- Ford Forschungszentrum Aachen GmbH, Aachen
- Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich
- Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
- Forum für Zukunftsenergien e.V., Berlin
- Fraunhoferinstitut für solare Energiesysteme, Freiburg
- Germanischer Lloyd AG, Hamburg
- Gesellschaft für praktische Energiekunde e.V., München
- Graf Elektronik GmbH, Dornbirn (Österreich)
- H-TEC Wasserstoff-Energie-Systeme GmbH, Lübeck
- Haus der Technik e.V., Essen
- heliocentris Energiesysteme GmbH, Berlin
- Stadt Herten
- hySOLUTIONS, Hamburg
- Infraserb Höchst GmbH & Co. KG, Frankfurt/Main
- Institut für Mikromechanik Mainz GmbH, Mainz
- ISATEC GmbH, Aachen
- Linde AG, Höllriegelskreuth
- Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn
- Magna Steyr Fahrzeugtechnik GmbH & Co. KG, Graz (Österreich)
- mcs Cylinder Systems GmbH, Dinslaken
- N2telligence GmbH, Hamburg
- NUON Energie und Service GmbH, Heinsberg
- ODB-Tec GmbH & Co. KG, Monheim am Rhein
- Peter Sauber Agentur GmbH, Gerlingen
- R. STAHL Schaltgeräte GmbH, Waldenburb/Württ.
- Sensistor Technologies GmbH, Mühlheim am Main
- Solardorf Kettmannshausen e.V. , Wipfratal / Kettmannshausen
- Süd-Chemie AG, München
- Tassa GmbH, Wolfsburg
- Technischer Überwachungs-Verein Nord e.V., Hamburg
- Technologie- und Gründerzentrum Region Kaisersesch GmbH, Kaisersesch
- Tedatex Industrie GmbH, Wiehl
- Tobias Renz FAIR-PR, München
- TOTAL Deutschland GmbH, Berlin
- TÜV Süddeutschland Holding AG, München
- UfE Umweltfreundliche Energieanlagen GmbH, Rostock
- UMICORE GmbH & Co. KG, Hanau
- UST Umweltsensortechnik GmbH, Geschwenda
- Vattenfall Europe AG, Berlin
- Volkswagen AG, Wolfsburg
- VWEW Energieverlag GmbH, Frankfurt am Main
- Wasserstoffgesellschaft Hamburg e.V., Hamburg
- Wasserstofftechnologie-Initiative Mecklenburg-Vorpommern e.V., Rostock
- Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Initiative Hessen e.V., Wiesbaden
- Weh Gas Technology GmbH, Illertissen
- Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm, Ulm

- WEKA AG, Bäretswil (Schweiz)
- WS Reformer GmbH, Renningen
- Zentrum für Brennstoffzellentechnik GmbH, Duisburg
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, Stuttgart
- Zürich Agrippina Versicherung AG, Frankfurt am Main

(Quelle: [www.dwv-info.de](http://www.dwv-info.de), aktualisiert am 26.11.2007)

Im Rahmen der Netzwerkanalyse wurden in Vorbereitung der Zukunftswerkstatt „Windwasserstoff“ in Hamburg Interviews mit 14 Unternehmen und Institutionen, davon 7 aus der Mitgliederliste des DWV, geführt:

- 1 Unternehmen Patentverwertung, Herstellung und Lieferung von Elektrolyseuren, weltweit.
- 3 Unternehmen Patentverwertung, Herstellung und Lieferung technischer Gase, weltweit.
- 1 Kleinunternehmen, das den Einsatz von Windturbinen zur Herstellung von Wasserstoff mit Elektrolyseuren auf einem Musterschiff erprobt.
- 1 in öffentlich-privater Partnerschaft getragenes Technologieinstitut: anwendungsorientierte Forschung, Herstellung von Produkten für Nischenmärkte, Gutachtertätigkeit im Wasserstoffmarkt.
- 1 Unternehmen: Umsetzung von Antriebssystemen mit Wasserstoff-Brennstoffzellen, Wasserstoffspeicherung mit Silizium.
- 1 Unternehmen: Wasserstoff – Reforming aus Biomasse zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe.
- 1 Unternehmen. Errichtung einer Pilotanlage zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe aus Biomasse.
- 1 Unternehmen: Vertriebsgesellschaft synthetische Kraftstoffe.
- 1 Unternehmen: Zulieferer von Technologien und Produkten für Wasserstoff-Pipelines.
- 1 Unternehmensverbund eingebunden in die Bundesinitiative Offshore-Windkraft. Betreiber eines kombinierten Windenergieparks mit Speicherung von Strom in Wasserstoff mit einer 500kW Elektrolyse – Anlage.
- 1 Gesellschaft zur technischen Überwachung und technischer Gutachter.
- 1 Unternehmen zur Vorbereitung des Einsatzes von Wasserstoff im ÖPNV.

Neben diesen Interviews wurden Quellen weiterer Mitgliedsunternehmen ausgewertet. Damit konnte der Markt und das Marktgeschehen relativ gut abgebildet werden.

Nach den Interviews wurden Wirtschaftlichkeitsrechnungen und Marktbetrachtungen mit dem Ergebnis durchgeführt, dass

- der Übergang zu einer Wasserstoffwirtschaft bereits jetzt prinzipiell möglich wäre
- damit kritische Klimaaspekte durch Substitution von z.B. Erdgas bei der Herstellung von Wasserstoff verringert werden können
- „schwarzer“ Wasserstoff auf dem Markt an falschen Orten und zu falschen Zeiten bereits jetzt aus z.B. industriellen Nebenprozessen in hinreichender Größenordnung zur Verfügung gestellt werden könnte

- „grüner“ Wasserstoff für Eigenbedarfe und nicht zum Verkauf bereits hergestellt wird
- Straßentransport von Wasserstoff in größeren Mengen und über größere Entfernungen ökologisch wie ökonomisch unsinnig ist
- der Markt der Anbieter sich am Markt der industriellen (Mengen)Nachfrager orientiert
- Wasserstoff – Reforming aus Erdgas, durch die Verfügbarkeit von Erdgas in ganz Deutschland die Methode der Wahl für die Herstellung von Wasserstoff – selbst für kleine Lösungen ab 1.000Nm<sup>3</sup> – ist
- zur Zeit nur „Wasserstoffversorgungsinseln“ in Deutschland bestehen
- zwei Verbundnetze in den industriellen Kernen der chemischen Industrie in Deutschland (Ruhrgebiet, Halle – Leuna) bereits seit Jahrzehnten bestehen und damit umfangreiche Betriebserfahrungen für den Betrieb von Wasserstoff – Pipelinesystemen vorliegen
- der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur die Kosten sehr stark ungünstig beeinflusst und daher eines Infrastrukturprogramms bedarf, dass
  - o sich an Alternativkosten z.B. für das Supergrid, Erdgasversorgungssysteme
  - o und an der möglichen wirtschaftlichen Unabhängigkeit von Energieimporten orientiert.

Gerade der letztgenannte Aspekt spricht für eine Orientierung von Markt und Politik hin zu einer Verknüpfung von offshore – Windindustrie, Elektrolyse und Wasserstoff – Verbundsystemen als *back-up* der Energiewirtschaft. Allerdings ist der Markt der Hersteller von Elektrolyseuren in Deutschland auf ein Unternehmen geschrumpft, das zudem sein Geld fast ausschließlich im Ausland verdient.

Der Markt der Automobilindustrie wurde in die bisherige Betrachtung nicht einbezogen. Dieser Markt setzt je nach Konsortium auf den Einsatz von Flüssigwasserstoff in Verbrennungsmotoren bzw. Antriebe mit Brennstoffzellen. Der Markt soll erst nach 2020 eine nennenswerte Verbrauchsmenge an Wasserstoff am Gesamtmarkt hervorrufen. Parallel arbeitet man verstärkt an Hybrid – Lösungen, bei denen Verrennungs- und Elektromotoren in einem Auto eingesetzt werden sollen. Die Batterien dieser Autos sollen hierbei den Überschussstrom z.B. aus der Windkraft zu Zeiten geringer Abnahme aber hoher Produktion speichern. Wenn jedes 10. Auto in Deutschland einen solchen Antrieb hätte und die Stromüberangebote nutzen würde, könnten diese Autos dieselbe Menge Strom speichern wie die deutschen Pumpspeicherwerke. Angesichts dieser teilweise widerstreitenden Interessen und Konzepte wurde der Automobilmarkt aus den Betrachtungen zunächst ausgeschlossen. Die Marktbeobachtung wird aber weiter geführt.

Die Strategie der Wasserstoffwirtschaft liest sich hinsichtlich der zeitlichen Pläne wie folgt (Tab. 1).

**Tabelle 1. Zukunftsszenario Nutzung Wasserstoff.**Übergangsphase nach 2010:

Signifikanter Beitrag durch chemischen Nebenprodukt-Wasserstoff. Zusätzliche Erzeugung durch on-site Dampfreformierung aus Erdgas sowie mit Elektrolyse. Verbrauchszentren in dicht besiedelten Gebieten entwickeln sich, und für Wasserstofftransport werden Flüssig- und Druckgas-Lastwagentransport eine wichtige Rolle spielen.

Nach 2020

wird der steigende Bedarf die verschiedenen Möglichkeiten für eine lokale und zentrale H<sub>2</sub>-Erzeugung erweitern. Eine weitere wichtiger werdende Option wird die elektrolytische Erzeugung aus erneuerbaren Energien und aus dem Netz darstellen. Abhängig von den H<sub>2</sub>-Durchdringungsraten und der Machbarkeit von CO<sub>2</sub>-Extraktion und Speicherung (CCS) können Erdgas und Kohle in zentralen Anlagen zur Erzeugung größerer Mengen CO<sub>2</sub>-neutralen Wasserstoffs beitragen. Zu diesem Zeitpunkt wird der Pipelinetransport eine wichtige Rolle zu spielen beginnen. Insbesondere in ländlichen Gebieten wird die dezentrale Erzeugung mittels Dampfreformer oder Elektrolyse wichtig sein.

Nach 2030

wird der Wasserstoff als Fahrzeugkraftstoff einen wesentlichen Beitrag leisten und eine achtbare Rolle in stationären Anwendungen spielen. Sofern sich die Abscheidung von Kohlendioxid in industriellem Maßstab etabliert hat, kann die zentrale Wasserstofferzeugung aus fossilen Energien über Dampfreformierung (Erdgas oder Kohlevergasung) die Erzeugung in Deutschland dominieren – abhängig von der langfristigen Preisentwicklung dieser Energieträger.

Obwohl der Wettbewerb in den verschiedenen Anwendungsbereichen (Verkehr, Strom, Wärme) wachsen wird, wird der Anteil von erneuerbarem Wasserstoff steigen. Der wesentlichste erneuerbare Bereitstellungspfad wird die Windenergie sein (on- und offshore). Diese wird über das Stromnetz bereitgestellt und dezentral oder zentral mittels Elektrolyse umgewandelt. Ergänzt wird dieses Angebot um Wasserstoff aus Biomassevergasung. Weitere erneuerbare Energiequellen (Geothermie) können den wachsenden Wasserstoffbedarf abzudecken helfen. Der Wasserstoffimport (z. B. aus Norwegen durch ein europäisches Pipelinenetzwerk) kann eine Option werden. Der Wasserstofftransport wird in Pipelines oder Flüssigwasserstofftrailern erfolgen, abhängig vom Bedarf und dem Ort der Endanwendung.

Quelle: Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen – Verband, [www.dwv-info.de](http://www.dwv-info.de), besucht am 19.11.2007

Damit hat sich der Fokus auf die wasserstoffmobile Zukunft in den letzten zehn Jahren um weitere zehn Jahre in die fernere Zukunft verschoben.



Der Schwerpunkt der zukünftigen Arbeiten zum Windwasserstoff in Coastal Futures liegt daher auf den Themen

1. Substitution der Wasserstoff – Herstellung über Erdgas und andere Prozesse mit CO<sub>2</sub>-Rucksack
2. Speicherung von Strom in Wasserstoff und Nutzung dieses Wasserstoffs ohne ihn in Strom rückwandeln zu müssen
3. Marktentwicklung Brennstoffzellentechnologie mit Wasserstoff (nicht Methanol usw.)
4. Wasserstoff als chemischer Grundstoff
5. Nutzung von Überkapazitäten der Wasserstoff – Produktion (z.B. Chlor-Alkaline-Verfahren) zum Aufbau eines Wasserstoff – Marktes im Küstenraum
6. Wasserstoffverbundsysteme
7. regionale, technische Lösungen und industrienähe Dienstleistungen
8. neue innovative Märkte für (Wind)Wasserstoff an der Küste.

#### **4 Technische und wirtschaftliche Szenarien Windwasserstoff**

##### **3.1 Technische Szenarien Windwasserstoff**

Der Begriff „Windwasserstoff“ steht für „grünen“ Wasserstoff.

„Grüner“ Wasserstoff wird durch ausschließliche Nutzung erneuerbarer Energieformen erzeugt bzw. der Primärenergieträger für „grünen“ Wasserstoff ist entweder Wind, Sonne oder Biomasse.

Strom wird zunehmend durch erneuerbare Quellen bereitgestellt werden (Abb. 1). Damit ergeben bzw. verschärfen sich die Grundprobleme der Nutzung erneuerbarer Energien – nicht kontinuierliche Verfügbarkeit und damit erforderliche Speicherung. Wasserstoff ist eine wichtige Option für die Speicherung.

Das „Windwasserstoff-System“ könnte sich darstellen als System bestehend aus:

- Abnahme des Windstroms durch Elektrolyse und Wasserstoffwirtschaft.
- Verwendung des Wasserstoffs im zu etablierenden Wasserstoff – Markt.
- Ersatz von back-up Systemen der Stromwirtschaft und fossilen Quellen zur Wasserstoffherstellung.
- Energieeffizienz ohne Transportverluste etwa 60%.
- Hohe Kosten für die Infrastruktur, aber multifunktionale Nutzungsoptionen.

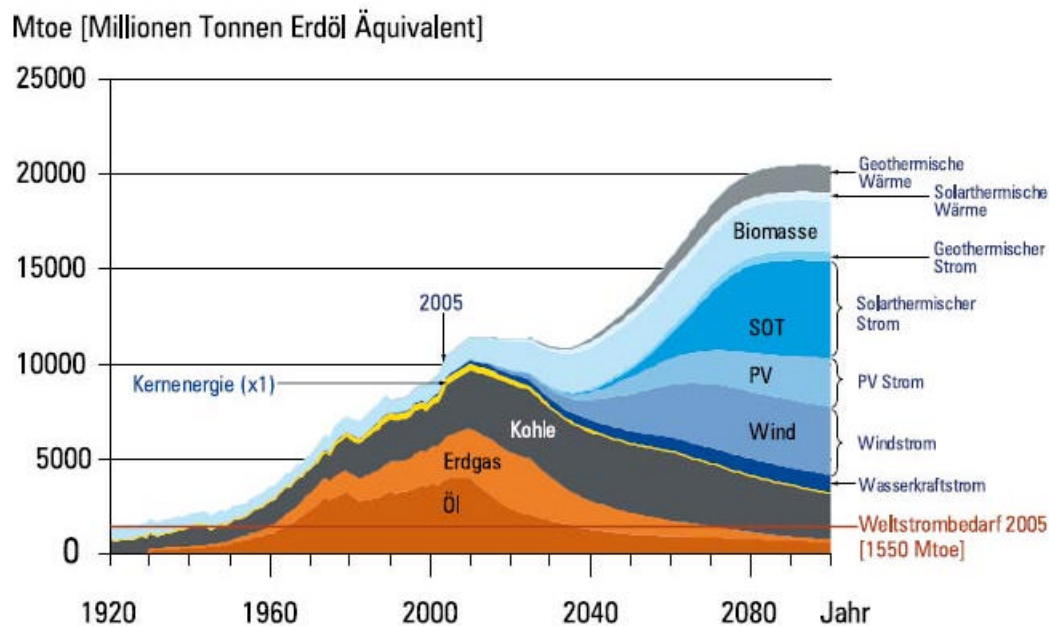
Die Alternativen zum „Windwasserstoff-System“ sind:

- unmittelbarer Verbrauch des Stroms in den Volkswirtschaften Europas über ein Verbundsystem mit Anpassungen der Bedarfskurven der Wirtschaft und Haushalte an die Gesteigungskurven von Windstrom  $\pm$  2 Stunden Zeitversatz (Netzpuffer)
  - o bereits bei 20% Einspeisung von (on-shore) Windstrom bestehen Steuerungsprobleme. Das back-up System zur Sicherung von Versorgungssicherheit und Netzstabilität muss von konventionellen Kraftwerken (Kohle, Öl, Gas, Atom) mit unterschiedlichen Lastvariabilitäts-Kennziffern erbracht werden.

- ein Supergrid basierend auf Gleichstrom kann den Netzpuffer auf etwa 6 Stunden erweitern. Das back-up System wird nur anteilig entlastet.
- Abnahme des Windstroms durch Hybridautos, ~ 90% Effizienz der Energieübertragung auf den Speicher Autobatterie bei Überangebot im Netz. Hoher Kommunikations- und Koordinationsaufwand. 1/10 der bestehenden Kraftfahrzeugsflotte in Deutschland könnte als „Puffer“ in gleicher Größe wie die bestehenden Pumpspeicherwerke dienen.
- Abnahme des Windstroms durch Pumpspeicherwerke und Rückspeisung ins Netz zu Zeiten des Spitzenbedarfs.
- Abnahme des Windstroms durch Elektrolyse und Wasserstoffspeicher sowie Rückspeisung ins Netz (z.B. durch Brennstoffzellen) zu Zeiten des Spitzenbedarfs. Energieeffizienz ohne Transportverluste etwa 40%.

Das Windwasserstoff- und Solarwasserstoffsystem sind kompatibel und ein alternatives System zum „grünen“ Strom. Beide Systeme sind sekundäre Energieträgersysteme. Die höheren Kosten und Energieverluste bei der Umwandlung der einen Sekundärenergieform „Strom“ in die andere „Wasserstoff“ kann durch die Notwendigkeit und Möglichkeit der Energiespeicherung durch Wasserstoff kompensiert werden.

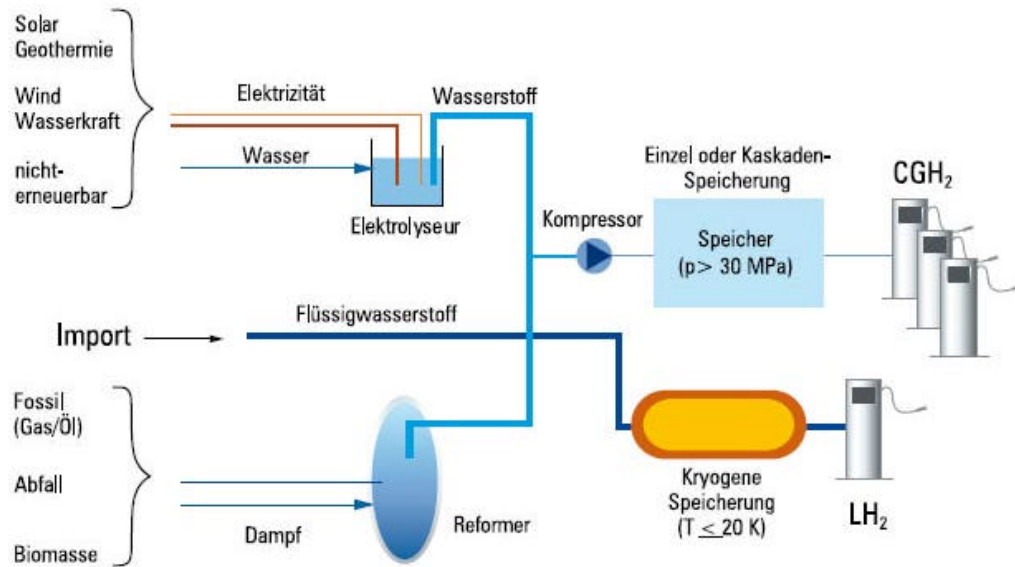
Bei Wind (und Sonne) ist der Zwischenschritt Gleichstrom und Elektrolyse erforderlich. Bei Sonne und Biomasse können auch Verfahren ohne den „Umweg“ Strom und Elektrolyse eingesetzt werden (Abb. 2).



Datenquelle: LBST Alternative World Energy Outlook 2005

**Abbildung 1. Zukünftiges „grünes“ Stromsystem.**

Quellenangabe in der Abbildung



Datenquelle: LBST 2003

**Abb. 2. Mögliches „grünes“ Wasserstoffsysteem für den Verkehrssektor.**

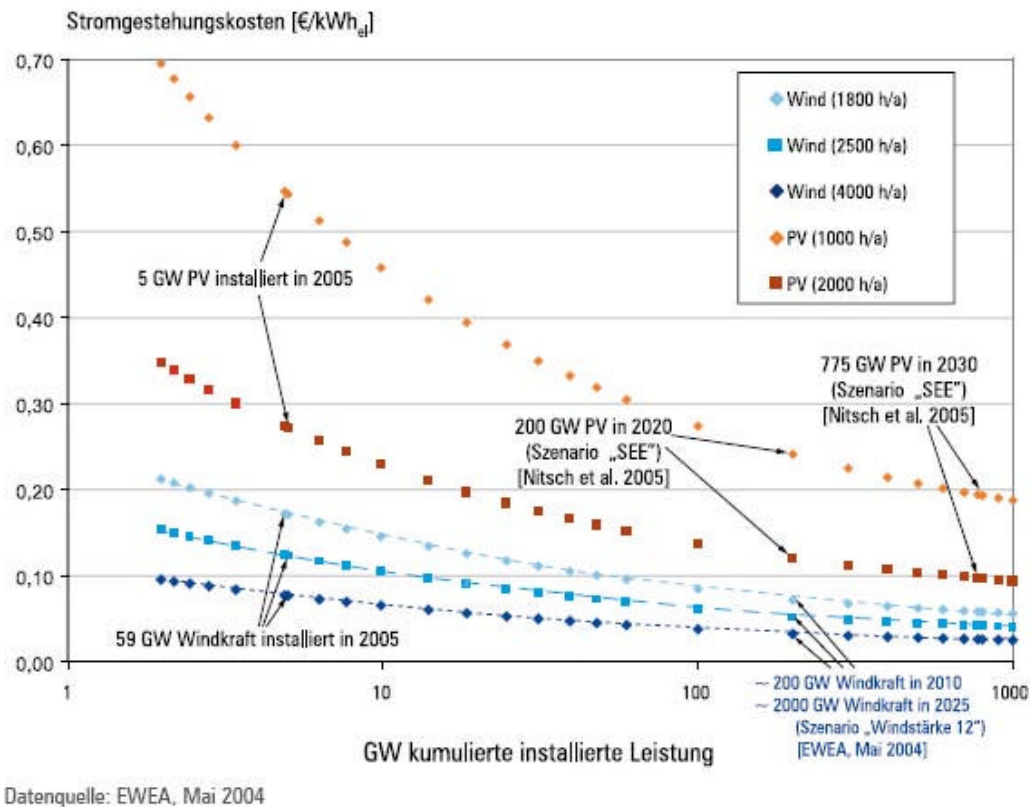
Quellenangabe in der Abbildung

Die mit bestehenden Technologien erzielbaren Herstellungspreise von Wasserstoff aus Biomasse, Wind und Sonne bezogen auf den Energiegehalt von Benzin verhalten sich wie 1:1,6:5.

Für die Herstellung von Wasserstoff über Elektrolyse werden einschließlich Speicherung in Niederdrucktanks etwa 5 kWh benötigt. Die Bereitstellung von 1 Nm<sup>3</sup> Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen ist ab Anlage für 0,45 – 0,50 € möglich (Abb. 3).

Es ist zu erwarten, dass Wasserstoff aus „grünen“ Quellen als (sekundäre) Energiequelle und Speichermedium mit weiter steigendem Preis für Rohöl ab etwa 2015 in größeren Marktbereichen wettbewerbsfähig sein wird als dies heute bereits in Nischenmärkten der Fall ist (Insellösungen und Spezialanwendungen).

Beim Einsatz von Elektrolyseuren sollte aus Sicht der Optimierung der Nutzung der Gesamtenergie immer auch die ortsnahe Nutzung des Sauerstoffs angestrebt werden.

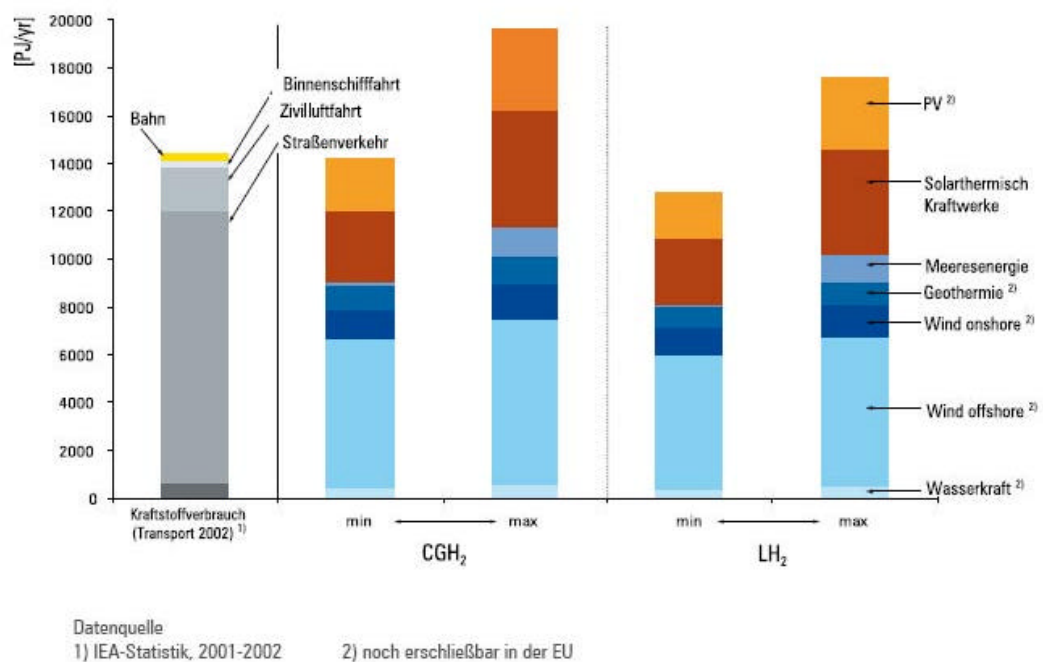


**Abb. 3. Gestehungskosten für „grünen“ Strom.**

Quellenangabe in der Abbildung

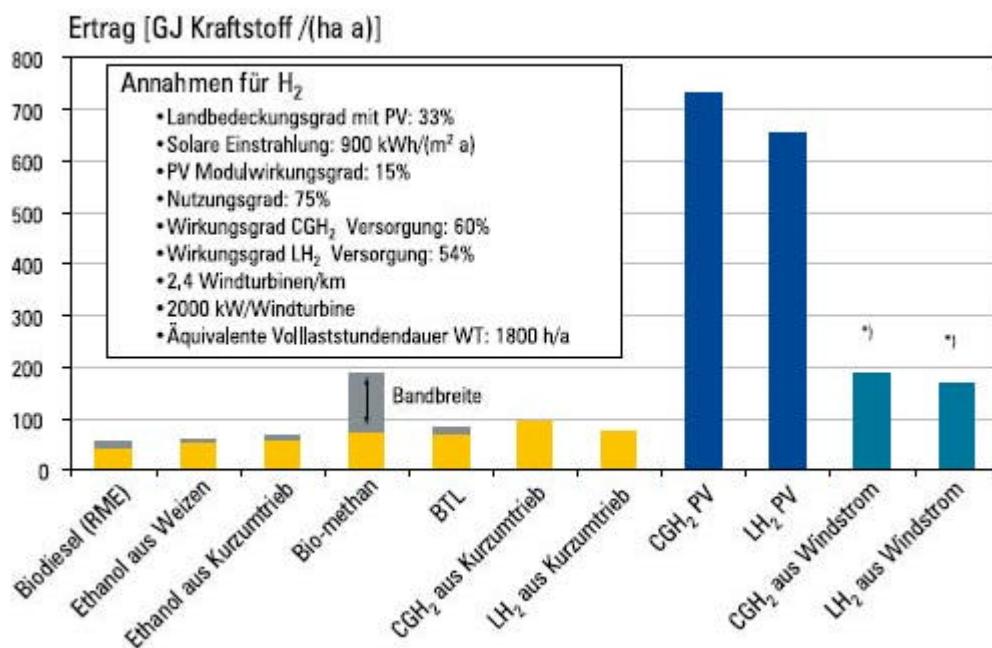
Die Potenziale für die Nutzung von „grünem“ Wasserstoff im Verkehr geben Abb. 4 und 5 wider. Off-shore Windstrom für die Umwandlung in „Windwasserstoff“ spielt mit 35 – 40% der erwarteten Gesamtverfügbarkeit dabei eine herausragende Rolle.

Wasserstoff insgesamt kann die gesamte deutsche Transportflotte – außer Seeverkehr – „antreiben“. „Grüner“ Wasserstoff in Verbindung mit der off-shore Gewinnung von Strom wird überwiegend im Zusammenhang mit Windfarmen, an Land überwiegend mit Solar gebracht.



**Abb. 4. Prognose: Durch Wasserstoff „angetriebenes“ Verkehrssystem Deutschland.**

Quellenangabe in der Abbildung



**Abb. 5. Prognose: Erträge je Hektar genutzter Landfläche für den „Antrieb“ des Verkehrssystems Deutschland.**

Quellenangabe in der Abbildung

Als wahrscheinliche **räumlich-technische** Umsetzungsszenarien für "Windwasserstoff" mit einer erhöhten Wertschöpfung in der und für die Küstenregion werden diskutiert:

### **Elektrolyse auf dem Meer**

1. Übernahme des Konzeptes der Erdölplattformen ggf. auch Nutzung von Plattformen nach deren Nutzungsende für die Erdölförderung
  - a. Abnahme des Stroms aus den benachbarten Windfarmen
  - b. Einspeisung des Wasserstoff in jetzige Knoten des Erdgasnetzes im Küstenmeer
  - c. Abtransport des Wasserstoffs per Schiff in Gasdrucktanks und „Umschlag“ an Land<sup>1)</sup>
2. Installation der Wasserstofftechnologien in der Windfarm
  - a. An den Einzelanlagen
    - i. Am Turm
    - ii. In der Gondel
    - iii. Auf einem Ponton am Turm
  - b. In Anlagengruppen (3-5)
    - i. In/an einer Anlage
    - ii. Auf Ponton zwischen Türmen
    - iii. Auf fester Plattform zwischen den Türmen
  - c. Transport in Gasdrucktanks zur Küste und „Umschlag“ an Land<sup>1)</sup>
3. Einrichtung „mobiler“ Wasserstofferzeugung
  - a. Auf Schiffen mit Windkraftanlagen auf dem Schiff (Modell: Hydrogen Challenger, Planungsmodell: Enercon)
  - b. Auf Pontons (Stromabnahme aus der Windfarm)

### **Elektrolyse an Land**

4. Übertragung des Gleichstroms an Land
  - a. Umwandlung des Gleichstroms in Wasserstoff am Übergabepunkt an der Küste (vor Umrichtung auf Wechselstrom) und Weitertransport des Wasserstoff durch Pipelinesysteme
  - b. Transport des Gleichstroms im europäischen Supergrid (s.o) und Umwandlung des Gleichstroms in Wasserstoff am Nutzungsort des Wasserstoffs.
  - c. Ggf. Nutzung von Erdgaspipeline-Systemen, wenn diese z.B. bei Ersatz oder Neubau auf die Sicherheitsstandards für Wasserstoff – Pipeline ausgelegt werden.

<sup>1)</sup> analog der Gastanktechnologien für die Erdgastanker aus dem Zukunftsfördergebiet Erdgas am Nordkap

Zu beachten ist weiterhin, dass vermutlich der Stromnutzung gegenüber der Wasserstoffumwandlung und –nutzung Vorrang eingeräumt wird und damit die Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse vorzugsweise **zeitlich** versetzt erfolgen wird. Wenn das Angebot die Nachfrage z.B. nachts übersteigt kann Strom über Wasserstoffpuffer wirtschaftlich genutzt werden. Der Was-

serstoffpuffer kann Strom aus dem Netz „auskoppeln“ und in Zeiten des Spitzenbedarfs zurück speisen bzw. andren Verwertungen zuführen.

Strom und Wasserstoff stehen technisch und wirtschaftlich als transportable Sekundärenergieträger zumindest mittelfristig miteinander im Wettbewerb.

Die technischen Optionen sollen in weiteren Projektschritten in Zukunftswerkstätten mit den Akteuren auf die drei wahrscheinlichsten Entwicklungsszenarien eingeschränkt und bewertet.

Aus den Ergebnissen der Zukunftswerkstätten sollen Produktionsfunktionen abgeleitet werden, die durch Input-Output-Tabellen analog derer für die Wertschöpfungsketten im Bereich „offshore – Windkraft“ Ergebnisse zu direkten und indirekten Wirtschaftseffekten im Küstenraum der deutschen Nordsee liefern sollen.

### **3.2 Wirtschaftliche Szenarien Windwasserstoff**

Derzeit besteht abseits von Düngemittelherstellern, Raffinerien und Chemiebetrieben noch kein Markt, der bereits größere Mengen Wasserstoff (Überschussmengen aus der Chemie) zu wirtschaftlich günstigen Konditionen aufnehmen kann.

Der Weg der Herstellung von Elektrolyse – Wasserstoff (in nennenswerten Anlagengrößen) wird in Deutschland nur in extremen Ausnahmefällen (Nischenmärkten) beschritten, was zu einer geringen Nachfrage nach Elektrolyseuren durch den deutschen Binnenmarkt führt und folglich auch kaum Investitionen z.B. in Forschung und Entwicklung bei den Anlagenherstellern ermöglicht. Elektrolyseure „Made in Germany“ werden fast ausschließlich exportiert.

Die Ökonomie eines „Mengenmarktes“ in Deutschland stellt sich etwa wie folgt dar:

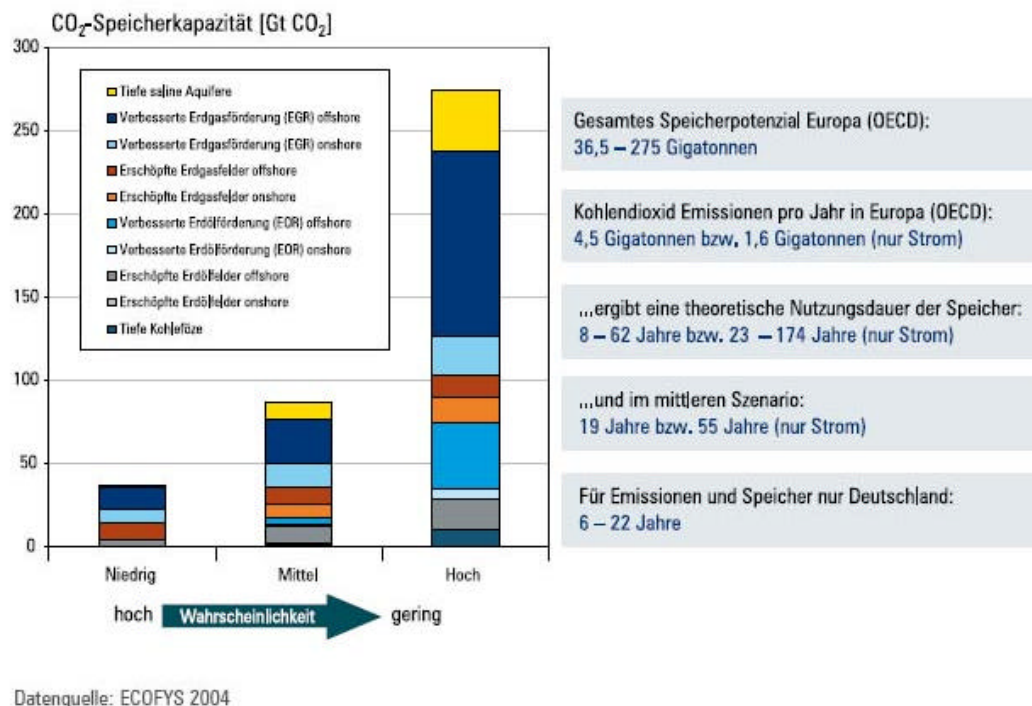
- Einerseits steht die geringe Masse des Wasserstoffs längeren Transportwegen für größere Mengen Wasserstoff entgegen.
- Zweitens verursacht ein für Wasserstoff ausgelegtes Pipelinesystem durch spezifische Sicherheits- und Materialanforderungen vermutlich höhere Kosten als das Erdgasverbundsystem (hohe Infrastrukturvorlaufkosten).
- Drittens können Insellösungen, die sowohl Elektrolyse oder Erdgas – Reforming und damit nächtlichen „Überschussstrom“ oder das bestehende Verteilungsnetz für Erdgas nutzen, für Spezialanwendungen bereits eigenwirtschaftlich betrieben werden und benötigen damit nicht den Zugang zu einem „öffentlich zugänglichen“ Wasserstoffnetz.
- Viertens wird vermutlich erst mit dem Durchbruch der Brennstoffzelle im Automobilmarkt eine mengenmäßig ausreichend große Nachfrage entstehen, die eines Verteilernetzes ähnlich von Tankstellen oder Verbundsystemen (wie Erdgas) bedarf.
- Fünftens Brennstoffzellentechnologien Motortechnologien ergänzen oder ablösen können.
- Sechstens können Technologien, die Zusatznutzen bringen, den Prozess der Verteilung von Wasserstoff in die Fläche beschleunigen, z.B. wenn anstelle der Sequestrierung von Kohlendioxid und der Verbringung des Klimagases in den Untergrund eine Verwertung des Kohlendioxids mit Wasserstoff zu z.B. synthetischen Kraftstoffen technologisch möglich und politisch akzeptiert wird. Hinzu kommt, dass die Verbringung von Kohlendioxid im Untergrund nur eine Zwischenlösung für 35 – 50 Jahre sein kann (Abb. 6).

Solange keine Verteiler-Infrastruktur analog dem Erdgasnetz in Deutschland/Europa besteht, wird

- Wasserstoff am Einsatzort (Düngemittelhersteller, Raffinerien) weiterhin vorrangig aus Erdgas erzeugt und verwertet werden.



- Wasserstoff aus chemischen Nebenprozessen nur energetisch (z.B. durch Verbrennung zur Stromherstellung) verwertet werden.
- Wasserstofftechnologien den Markt nur zeitverzögert durchdringen.
- Elektrolysetechnologien nur dort eingesetzt werden, wo keine Alternativen für z.B. Hochenergieprozesse zur Verfügung stehen (z.B. Diamantenherstellung) oder wo Strom und Wasser durch Überangebote entsprechen billig sind, um die Elektrolyse als wirtschaftliche beste Option zu ermöglichen.



**Abb. 6. Geschätztes geologisches Speicherpotenzial für Kohlendioxid in Europa und Reichweite der Speicher.**

Quellenangabe in der Abbildung

- Wasserstoff als Antriebssystem für Mobile auch oder vorrangig über Motoren eingesetzt werden. Wasserstoffmotoren und Brennstoffzellen sind alternative Systeme, in denen entweder Druckwasserstoff (CGH<sub>2</sub>) oder kalten Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>) eingesetzt wird.

Derzeit erfolgt das Wasserstoff – Reforming aus Erdgas direkt an den Wasserstofftankstellen (z.B. in Berlin und München).

Die wirtschaftlichen Entwicklungsszenarien (Wertschöpfungsszenarien) werden in Zukunftswerkstätten auf der Grundlage der technischen Szenarien auf das Machbare geprüft. Daraus werden sich konkrete Anforderungen an die technisch-wirtschaftlichen Systeme ableiten lassen.

#### 4 Zukunftswerkstatt

Die erste Zukunftswerkstatt im Rahmen des Projektes Coastal Futures zum Thema „Windwasserstoff“ hatte die Ziele,



1. mögliche Akteure in diesem Zukunftsmarkt zusammen zu führen,
2. Interessen der in diesem Zukunftsmarkt tätigen Akteure zu erfassen,
3. Ergebnisse aus der Projektphase Coastal Futures 1 durch dieses Thema zu verifizieren,
4. sich dem Zukunftsmarkt „Windwasserstoff“ hinsichtlich seiner Akzeptanz und Marktchancen anzunähern,
5. die zuvor geführten Tiefeninterviews hinsichtlich ihrer Aussagen zu prüfen bzw. zu falsifizieren,
6. diesen Zukunftsmarkt auf „Realität“ zu prüfen,
7. Chancen und Risiken für die Küstenregion der deutschen Nordsee – wenn auch noch unvollständig – zu erfassen,
8. Barrieren zu identifizieren,
9. Zukünfte der Küste mit dem Markt „Windwasserstoff“ als möglichem, integralen Bestandteil der Klimaschutzstrategie Küste zu entwerfen und zu diskutieren,
10. Handlungsfelder der Steigerung der mit dem Zukunftsmarkt „Windwasserstoff“ verbundenen Wertschöpfung im Küstenraum abzustecken.

Das Verlaufsprotokoll liegt dem Bericht an.

Die Zukunftswerkstatt führte Akteure der Bereiche Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Technologieentwicklung, Planung und Administration zusammen.

Die Akteure- bzw. Stakeholder sind in diesem Zukunftsmarkt Tätige bzw. den Markt unterstützende „Informierte“ (Promotoren). Eine positive Sensibilisierung bzw. ein positives Votum für das Thema „Windwasserstoff“ war bereits vor der Zukunftswerkstatt Grundkonsens und wurden im Verlauf der Werkstatt auch nicht in Frage gestellt. Das Thema „Windwasserstoff“ bezieht in diesem Sinne auch die positive Bewertung des Themas „offshore – Windfarmen“ ein.

Das Thema „Wasserstoff“ auch in Verbindung mit „Windwasserstoff“ ist unter Akteuren im Küstenraum Nord- und Ostsee ein etabliertes Thema. Direkt oder indirekt sind etwa 10% der im DWV organisierten Unternehmen im Küstenraum ansässig oder tätig. Hamburg bildet dabei den regionalen Schwerpunkt zum Thema Wasserstoff.

„Wasserstoffkunden“ in der Nordseeküstenregion sind vor allem die Raffinerien in den Küstenländern. Der Wasserstoffmarkt soll insbesondere im Großraum Hamburg auch durch private und politische Initiativen „angekurbelt“ werden. Die Marktnachfrage nach Wasserstoff ist derzeit geringer als das Gesamtangebot, wobei die lokalen Abnehmer großer Mengen (v.a. Raffinerien) einen stetig wachsenden Bedarf aufweisen.

Das derzeit bestehende Überangebot an Wasserstoff, der als Nebenprodukt der chemischen Industrie anfällt, wird zur Verstromung durch Verbrennung des Wasserstoffs genutzt. Dieses „Überangebot“ sucht eine wirtschaftlichere Verwertung, die auf Grund fehlender infrastruktureller Voraussetzungen (Pipeline) noch nicht möglich ist.

Es besteht regional noch kein wirtschaftlich begründeter Bedarf an Windwasserstoff.

Die Bereitstellung und Nutzung von „Windwasserstoff“ im Küstenraum der deutschen Nordsee ist ein wirtschaftliches, politisches Anliegen, dem sich Akteure, darunter international agierende Großunternehmen im Großraum Hamburg verschrieben haben. Hamburg kann und will der Motor für die Entwicklung eines Windwasserstoffmarktes sein. Hamburg sieht sich dabei in einer Rolle einer zukünftigen „Weltwasserstoffhauptstadt“. Dieses Ziel verfolgen sowohl private, öffentliche als auch politische Institutionen.

Die Zukunft ist unter den Akteuren unstrittig, auch das Potenzial einer in der Zukunft auf Windstrom basierenden Wasserstoffwirtschaft wird nicht in Frage gestellt. Im Gegenteil, es wird erwartet, dass Windstrom und Windwasserstoff sehr wichtige Beiträge, wenn nicht den entschei-

denden Beitrag zur Lösung des Klimaproblems leisten werden. Damit verbunden werden auch wirtschaftlichen Chancen eines damit verbundenen Wirtschaftssystems als realistische Option für die Küstenregion gesehen.

„Windwasserstoff“ eignet sich als mittelfristig real erreichbare Basis einer möglichen Zukunft des Küstenraums der Nordsee. Es werden keine „negativen externen Effekte“ auf Umwelt oder Wettbewerbsfähigkeit in Deutschland erwartet. Man erwartet positive Effekte auf das Klima, die Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft sowie eine hohe Sensibilität und Akzeptanz für dieses Thema bei der jungen Generation.

Allein der Weg, d.h. die wirtschaftlich-technische Umsetzung und der Zeithorizont verbunden mit dem notwendigen Übergang vom Nischenmarkt (spezifischer Anwendungen der Industrie, die Wasserstoff nutzen und verbrauchen) zu einem Mengenmarkt, der viele Wirtschafts- und Konsumbereiche durchdringt und diese sowohl energieeffizienter als auch umweltverträglicher gestalten lässt, sind Themen, die „projektiert“ und „gelöst“ werden müssen.

Dazu hat sich die erste Zukunftswerkstatt „Windwasserstoff“ auf folgende Schwerpunkte weiterer Zukunftswerkstätten verständigt (Unterthemen = erklärende Anmerkungen des Autors):

1. Wasserstoffmarkt und –kunden
  - a. Wasserstoffmarkt Norddeutschland – Angebot, Nachfrage – Quellen, Mengen und Preise
  - b. Versorgung der Märkte – Infrastruktur
  - c. Wasserstoff und Kundennutzen – technische Anwendungen, Modellvorhaben, Bedingungen zur Aufweitung des Nischenmarktes
  - d. Marktkennziffern – Zeitstrahl für Mengen und Preiserwartungen
2. technisch-technologische Lösungen
  - a. Orte der Herstellung von „Windwasserstoff“ – Offshore – versus onshore – Technologien
  - b. Wird „Windwasserstoff“ Erdgas ersetzen oder der Erdgasinfrastruktur nachfolgen können – „Technologierecycling“?
  - c. „Windwasserstoff“ – nur Puffermedium oder Wirtschaftsgut
  - d. (nord)deutsches Verbundsystem 1
3. politische Rahmensetzungen und Schaffung der notwendigen Infrastruktur
  - a. „Weltwasserstoffhauptstadt“ Hamburg
  - b. Anforderungen an die politische Rahmensetzung/Initiative
  - c. (nord)deutsches Verbundsystem 2
4. räumliche Auflösung und regionale Wertschöpfung an der deutschen Nordseeküste
  - a. „Windstrom-“ und/oder „Wasserstoffanlandung“ an den Küsten
  - b. „Fertigungstiefe“ „Windwasserstoff“
    - i. Industrie
    - ii. Industrienähe Dienstleistungen
    - iii. Wissenschafts-, Forschungs- und Entwicklungsinfrastruktur
  - c. Synergien im Küstenraum Nordsee

Diese thematischen Zukunftswerkstätten sind konzipiert, um etwa halbjährlich die Projektergebnisse zu verdichten, zu evaluieren, auf Machbarkeit zu prüfen und dieses Thema wirtschaftlichen, politischen und raumplanerischen Entscheidungen zugänglich zu machen.

## 5 Bewertung des Zwischenstandes

„Windwasserstoff“ ist mittelfristig eine reale Chance für den Wirtschaftsraum Nordseeküste. „Windwasserstoff“ kann die Wertschöpfungskette „Windstrom“ wirksam ergänzen und die Wertschöpfung im Küstenraum erhöhen. „Windstrom“ kann als Wasserstoff gespeichert oder direkt als sekundäre Energiequelle genutzt werden.

Mit der Erzeugung und Nutzung von Windstrom sind direkte und indirekte Wertschöpfungs- und Arbeitsmarktpotenziale sowie die Erreichung klimapolitischer Ziele verbunden, die auch kurzfristig bereits realisiert werden können. Voraussetzungen hierfür sind, den Wasserstoffmarkt als Chance und nicht nur als Vision zu begreifen und gezielt durch Rahmensetzungen zu unterstützen.

Wasserstoff als sekundärer Energieträger neben Strom – „Windwasserstoff“ hergestellt aus „Windstrom“ auf See oder an Land – kann die Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems Energieversorgung in Deutschland/Europa entscheidend beeinflussen und durch geeignete Wahl von Schnittstellen und Schnittmengen zeitlich und räumlich entscheidend positiv beeinflussen. Das Klimaschutzziel kann hierbei zum dreifachen Motor werden:

- Klimaproblem 2050 gelöst! Meeresspiegelanstieg gestoppt!
- Energie zu Hause produziert!
- Technologieführerschaft/Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands durch „Windwasserstoff“ gesichert!

Die technologische und wirtschaftliche Machbarkeit steht einer derzeit noch zu geringen Marktgröße auf der Nachfrageseite gegenüber.

Wasserstoff steht im Großraum Hamburg bereits jetzt aus anderen Verfahren (als Nebenprodukt der chemischen Industrie) zur Verfügung, kann aber im Sinne der im „Wasserstoffzeitalter“ angestrebten, zusätzlichen Wertschöpfung noch nicht genutzt werden.

Ein Wasserstoffmarkt muss entwickelt werden und bedarf Investitionen in ein Verbundsystem ähnlich dem für Erdgas. Der im „Überschuss“ im Großraum Hamburg zur Verfügung stehende Wasserstoff könnte Zwischenschritte für die Marktentwicklung unterstützen.

Der Übergang von diesem bestimmte Marktsegmente bedienenden Markt zum Mengenmarkt „Windwasserstoff“ kann auf diesen Markt aufbauen, ihn ergänzen oder erheblich vergrößern. Die zu überbrückende Zeit bis zum Mengenmarkt „Wasserstoff“ kann noch bis zu 20 Jahre betragen.

Wasserstoff als sekundärer Energieträger ist nur in dem Sinne umweltverträglich wie er bestehende energetische Prozesse und Nutzungen effizienter gestalten kann. Wasserstoff als grüne Energieform setzt voraus, dass er mit primären erneuerbaren Energieträgern erzeugt wird.

Neben dem Konzept „Windwasserstoff“ existieren weitere Konzepte zur Speicherung von „Windstrom“, die alternativ hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit, ihrem Anteil an der regionalen Wertschöpfung oder hinsichtlich der Verfügbarkeit zu prüfen sind.

Die Ergebnisse aus Desk – Research, Benchmark – Tests und Interviews wurden in einer Zukunftswerkstatt bestätigt bzw. in ihren Aussagen vertieft.

Für die weiteren Projektschritte wurden vier Handlungsfelder für die weiteren Zukunftswerkstätten heraus gestellt. In deren Rahmen werden die weiteren Arbeiten im Teilprojekt konzipiert:

1. Wasserstoffmarkt und –kunden
2. technisch-technologische Lösungen auf dem Meer und/oder an Land
3. politische Rahmensetzungen und Schaffung der notwendigen Infrastruktur (Verbundsystem Wasserstoff)
4. Windwasserstoffzentren an der deutschen Nordseeküste

Mit den Ergebnissen des Projektes bis zum heutigen Zeitpunkt, beweist sich, dass der DPSIR – Ansatz eine geeignete Methodik sowohl für die Strukturierung für ganzheitliche wissenschaftliche Analysen, Bewertungen und Prognosen gibt, sich aber methodisch ebenso eignet Zukunftsprozesse abzubilden, zu strukturieren, zu prognostizieren und Entscheidungsprozess zu stimulieren.

Wenn die „Idee Windwasserstoff“ die Response auf die erste Projektphase ist, werden die Impulse aus der Zukunftskonferenz zu Drivern, Impacts und beschreibende neue „zukünftige“ States. Das durch die Zukunftswerkstätten hinzutretende Element ist die der Wegbeschreibung oder die des Aufspürens von Wegen in Zukünfte. Damit schließt sich ein anderer Kreis, der zur Einbeziehung und zur Mitwirkung von Stakeholdern und neuen Formen der Governance.

## Datenquellen

- Altmann, M., Gaus, S., Landinger, H., Stiller, C., & Wurster, R., 2001. Wasserstoffherzeugung in offhore-Windparks „Killer-Kriterien“, grobe Auslegung und Kostenschätzung. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH und Gesellschaft für Energie und Ökologie mbH, 106 S.
- Bard, J., Steinberger-Wilckens, R. & Gross, U., 2004. Brennstoffzellen im Vergleich mit anderen Energiekonversionstechnologien. FVS Themen 2004, 162-166.
- Birnbaum, U., Dienhart, H., Nitsch, J., Staiß, F., & Walbeck, M., 2000. Die Marktsituation von Brennstoffzellen. Forschungsverbund Sonnenenergie „Themen 1999/2000“, 81-89.
- Breitung, W., Friedrich, H., Treffinger, P., & Schmidtchen, U., 2004. Wasserstofftechnik – Forschung für Sicherheit und Transport. FVS Themen 2004, 146-151.
- Bundesamt für Energie, 2005. Energieforschung 2005. Schweiz. 199 S.
- Bundesverband Windenergie, 2006. Wertschöpfung durch Windenergie in Schleswig-Holstein. Kurzinformation, 4 S.
- Bürger, U., Kraus, E., & Schmalschläger, T., 1998. Wasserstoff – Chance dezentraler Versorgungssysteme? Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 9 S.
- Carpetis, C., 2000. Globale Umweltvorteile bei Nutzung von Elektroantrieben mit Brennstoffzellen und/oder Batterien im Vergleich zu Antrieben mit Verbrennungsmotor. DLR, STB Bericht 22, 135 S.
- Dürschmidt, W., Paschedag, U., & Viertl, C., 2002. Ausbaustrategie des BMU zur Windenergienutzung. FVS Themen 2002, 90-98.
- Höhlein, B., Grube, T., Reijerkerk, J., Aicher, T., & Jörissen, L., 2004. Wasserstofflogistik – verteilen, speichern und betanken. FSV Themen 2004, 152-161.
- Krewitt, W., Steinborn, F., Staiß, F., Bühring, A., Hebling, C., & Feck, T., 2004. Umweltauswirkungen und Märkte des dezentralen Einsatzes von stationären Brennstoffzellen. FVS Themen 2004, 167-171.
- Leinfelder, R., 2004. Reaktionskinetische Untersuchungen zur Methan-Dampf-Reformierung und Shift-Reaktion an Anoden oxidkeramischer Brennstoffzellen. Dissertation, Universität Erlangen - Nürnberg, 108 S.
- Linkamp, H., 2004. Wasserstoffzentrum Industriepark. Die Chemieindustrie spielt eine besondere Rolle im wachsenden Wasserstoff-Markt. Energy 1, 58-59.
- Mathiak, J., Heinzl, A., & Spitta, C., 2004. Wirtschaftlichkeitsanalyse zur Wasserstoffbereitstellung. Zentrum für Brennstoffzellentechnik GmbH, Duisburg, 6S.
- Schindler, J., Wurster R., Zerta, M., Blendow, V. & Zittel, W., 2006 (?). Woher kommt die Energie für die Wasserstoffherzeugung. Status und Alternativen. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen Verband, 31 S.
- Schmieder, H., Henrich, E., & DFinjus, E., 2000. Wasserstoffgewinnung durch Wasserspaltung mit Biomasse und Kohle. FZ Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6556, 66 S.

Schmidtchen, U., 2007. Wasserstoff und Brennstoffzellen – Was war 2006 wichtig? Was wird 2007 wichtig? Jahrespressekonferenz des DWV, 22. Februar 2007.

Schmidtchen, U., 2007. Wasserstoff und Brennstoffzellen – Chancen und Grenzen. EW, 106, 1-2, 20-24.

Interviews mit 14 Akteuren und Institutionen im Wasserstoffmarkt.

Zukunftskonferenz, Hamburg, 29.10.2007.