

Eine vollständig regenerative Energieversorgung mit Wasserstoff – Illusion oder realistische Perspektive?

Dr. Joachim Nitsch¹, Dr. Manfred Fishedick²

1. Zur Bedeutung von Wasserstoff als Energieträger

Wasserstoff ist ein wichtiger Grundstoff für die Synthese chemischer Verbindungen und bei Reduktionsreaktionen in der Metallurgie. Aus der Sicht der Energiewirtschaft ist Wasserstoff ein Sekundärenergieträger, der heute nahezu ausschließlich aus fossilen Rohstoffen hergestellt wird. Weltweit wird der derzeitige jährliche Verbrauch von Wasserstoff auf 500 Mrd. Nm³/a geschätzt, was mit 5 400 PJ/a aus energetischer Sicht einen vernachlässigbaren Beitrag darstellt. Davon werden wiederum knapp die Hälfte direkt energetisch genutzt, meist in verunreinigter Form als Abfallprodukt chemischer Prozesse. Der Haupteinsatzbereich ist die Ammoniak-Produktion, ein Drittel der Wasserstoffproduktion wird dafür eingesetzt. Der Rest findet in der Mineralölindustrie Verwendung, wird also indirekt ebenfalls energetisch genutzt. Kleinere Mengen werden in der Halbleiterindustrie, der Metallurgie, der Fetthärtung, der Direktreduktion von Eisenerz und der Pharmazie benötigt.

Etwa die Hälfte des in Deutschland hergestellten Wasserstoffs (ca. 19 Mrd. Nm³/a) wird aus Erdgas und Naphta erzeugt. Die andere Hälfte fällt als Nebenprodukt in Raffinerien an und wird dort weitgehend für die Hydrierung eingesetzt. Ein geringer Anteil (ca. 2%) ist Nebenprodukt der Chloralkalielektrolyse. Großanlagen der Wasserstoffherstellung aus fossilen Energieträgern erreichen eine Tageskapazität von über 4 Mio. Nm³/d. Sie können prinzipiell auch für die Herstellung von Wasserstoff aus biogenen Rohstoffen eingesetzt werden. Die elektrolytische Wasserspaltung wird insbesondere zur Erzeugung hochreinen Wasserstoffs eingesetzt und ist mit rund 5% Anteil an der Gesamtmenge gering. Aufgeteilt nach Primärenergieträgern stammen derzeit 45% des Wasserstoffs aus Rohöl, 33% aus Erdgas, 15% aus Kohle und 7% aus Elektrolyseverfahren. Die bei der „nichtenergetischen“ und „indirekt energetischen“ Verwendung von Wasserstoff gewonnenen Erfahrungen bei der Herstellung, dem Transport und der sicheren Handhabung großer Wasserstoffmengen sind auch für eine zukünftige Nutzung von Wasserstoff als Energieträger von großer Bedeutung. Dies gilt auch für das unter energetischen Nutzungsgesichtspunkten wichtigste Herstellungsverfahren, die Wasserelektrolyse, die seit Jahrzehnten auch in größeren Anlagen mit Anschlussleistungen bis zu 150 MW (entsprechend 33 000 Nm³/h Wasserstoff) mittels Strom aus preisgünstiger Wasserkraft betrieben werden.

In den letzten zwei Jahrzehnte wurden in zahlreichen Studien zukünftige Energiesysteme entworfen, in denen Wasserstoff eine mehr oder weniger bedeutsame Rolle spielt [Winter/Nitsch 1989; Nitsch/Luther 1990; DLR 1990; Prognos 1991; Traube 1991; Nitsch/Wendt 1992; Ogden 1993; Langniß 1994; Enquete 1995;DLR/ISE1997]. Meist waren diese Untersuchungen mit der Entwicklung regenerativer Energiequellen (REG) verknüpft. Die frühen Studien konzentrieren sich vor allem auf den Nachweis der technischen Machbarkeit und auf die strukturelle Ausgestaltung einer „solaren Energiewirtschaft“ mit Wasserstoff als wesentlichen Bestandteile. Von den Medien wurden die Ergebnisse seinerzeit relativ intensiv

¹ DLR-Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart; Abteilungsleiter „Systemanalysen und Technikbewertung.“

² Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie; Wissenschaftlicher Koordinator „Zukunftsenergien und Energieszenarien.“

aufgegriffen. Dies hatte die positive Folge, dass das Interesse an Wasserstoff stark zunahm, wichtige Entwicklungs- und Demonstrationsprojekte angestoßen wurden und die Option einer globalen solaren Energieversorgung ernster genommen wurde als dies bis dahin der Fall war. Gleichzeitig entstand jedoch vielfach der Eindruck, dass solarer Wasserstoff der zentrale Problemlöser sowohl für die Versorgungsengpässe der Energieversorgung (begrenzte fossile Vorräte) als auch für die Entsorgungsengpässe (CO₂-Emissionen und Treibhauseffekt) sei. Dabei wurde vielfach übersehen, dass in allen Untersuchungen eine sehr differenzierte, sich über Jahrzehnte erstreckende Entwicklung vorausgesetzt wurde und zahlreiche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit überhaupt ein Einstieg in eine nennenswerte regenerative Energiewirtschaft und damit verbunden in eine umfangreichere Wasserstoffnutzung erfolgen kann.

Die späteren Untersuchungen konzentrierten sich vor allem auf ökonomische Fragestellungen und Hemmnisse und untersuchten die Konsequenzen und Folgen derartiger Strategien. Wesentlich stärker wurden auch mit dem Wasserstoff konkurrierende Optionen betrachtet. Tendenziell rückte der Zeitpunkt eines großtechnischen Einsatzes von Wasserstoff mit zunehmender Aktualität der Untersuchungen nach hinten, teilweise wurde auch der Bedarf an REG-Wasserstoff generell in Frage gestellt. Andererseits wuchs das Interesse an ihm wieder, da im Zusammenhang mit der Entwicklung der Brennstoffzelle und mit Überlegungen, wie der Verkehr auf eine nachhaltigere Versorgungsbasis umgestellt werden könne, Wasserstoff von großer Bedeutung sein kann, [VES 2001; Pehnt 2002]. Auch in populäreren Darstellungen einer zukünftigen Energieversorgung spielt Wasserstoff nach wie vor eine bedeutende Rolle, [z.B. Karamanolis 2001]. Dank der o.g. Untersuchungen und weiterer aktueller Studien (z.B. [UBA 2002]) lässt sich heute relativ genau einschätzen, unter welchen Bedingungen und in welchen Zeiträumen Wasserstoff in einer zukünftigen umweltverträglichen und auf Nachhaltigkeit angelegten Energieversorgung benötigt wird, und auf welche Weise die einzelnen Einführungsschritte am zweckmäßigsten erfolgen sollten.

2. Wasserstoffherstellung – Technik und Ökologie

Zur Wasserstoffbereitstellung aus regenerativen, nicht-biogenen Primärenergien bietet sich die Wasserelektrolyse als in der Praxis bewährtes und in ihrer fortschrittlichen Version mit gutem Wirkungsgrad arbeitendes Verfahren an, [Pehnt 2002; Dreier/Wagner 2001; NRW/DLR 2001]. Alle solaren Primärenergien – also Sonnenstrahlung, Windenergie, Wasserkraft, Wellenenergie, Meereswärme, Gezeitenenergien, auch Erdwärme – können in Form von Elektrizität nutzbar gemacht werden können und sind damit auch in Wasserstoff umwandelbar, [WBGU 2002]. Ein besonderer Vorteil der Wasserelektrolyse in Verbindung mit REG-Elektrizität ist ihre Fähigkeit ein intermittierendes Stromangebot verarbeiten zu können, da die elektrochemischen Vorgänge auch bei schnellen Lastwechseln mit ausreichender Geschwindigkeit ablaufen. Die dazu erforderlichen Anpassungen und Weiterentwicklungen wurden in verschiedenen Pilotprojekten durchgeführt und in den letzten fünfzehn Jahren auch in Gesamtsystemen zusammen mit der REG-Stromerzeugung demonstriert und optimiert. Das bekannteste Projekt dieser Art war das deutsch-saudiarabische Gemeinschaftsprojekt HYSOLAR in den 80iger Jahren, bei dem u.a. eine hocheffiziente 300 kW-Elektrolyse mit Photovoltaikstrom unter realistischen Einsatzbedingungen eines potentiellen Einsatzlandes erprobt wurde [Hysolar 1989]. Ein komplette „Wasserstoffwelt“ mit den wesentlichsten Komponenten der Herstellung, Speicherung und Nutzung von REG-Wasserstoff wurde im Experimentalmaßstab im Wasserstoffprojekt „Solarer Wasserstoff Neuenburg vorm Wald“ demonstriert [SWB; Szyszka 1993]. In jüngerer Zeit wurde im Projekt PHOEBUS des FZ

Jülich die solare Vollversorgung eines Gebäudes mit Unterstützung durch Wasserstoff nachgewiesen [NRW/DLR 2001].

Als Referenz für den Vergleich mit anderen Verfahren kann die fortgeschrittene alkalische Elektrolyse betrachtet werden (**Tabelle 1**). Zukünftig kann auch die Hochtemperaturelektrolyse – insbesondere in der technologischen Wechselwirkung mit der HT-Brennstoffzelle – hinzukommen. Für die in dieser Tabelle aufgeführten wesentlichsten Wasserstoffherstellungsverfahren sind neben dem heutigen Stand der Technik auch Daten enthalten, die zum Zeitpunkt einer möglichen relevanten Markteinführung von Wasserstoff, also nach 2020, maßgebend sein dürften. Hinsichtlich ihrer energetischen Qualität sind die Verfahren mit heutigen Prozessnutzungsgraden von 73% bzw. 74% und zukünftig 76% – 78% vergleichbar. Auch unter Einschluss der Anlagenerstellung und der Rohstoffbeschaffung (Ferntransport von Erdgas und regenerativem Strom³; Einsammeln und Aufbereiten von Waldrestholz) sowie der Gasverteilung bis zu mittelgroßen Verbrauchern sind die Verfahren mit Bereitstellungsnutzungsgraden zwischen 60% und 64% (zukünftig 66% - 68%) relativ gleichwertig.

Tabelle 1: Eckdaten ausgewählter Wasserstoffherstellungsverfahren für die fossile, die biogene und die elektrolytische Wasserstoffherstellung [Pehnt 2002; Dreier/Wagner 2001; Winter/Nitsch 1989; BMBF 1995; Enquete 1989, DLR 1990]

	Dampfreformierung von Erdgas		Vergasung von Biomasse		Alkalische Wasserelektrolyse (Modul)	
	heute	> 2020	heute	> 2020	heute	> 2020
H ₂ - Produktion , Nm ³ /h	100 000	100 000	13 000	13 000	500	500
MW _{H₂}	300	300	40	40	1,5	1,5
Lieferleistung Rohstoff, MW	405	385	55 ¹⁾	53 ¹⁾	-	-
Strombedarf, MW	1,5	1,5	3,0	2,8	2,05	1,95
Prozessnutzungsgrad, %	74	78	73	76	73	77
Wasserbedarf, m ³ /h	58	58	28	28	0,43	0,43
Arbeitsdruck, bar	30	30	50	50	30	100
Bereitstellungsnutzungsgrad von GH ₂ frei mittelgroßem-Verbraucher (einschließlich Anlagenerstellung, Rohstoffbeschaffung, Hilfsenergie), %	64	68	60	66	63²⁾	67²⁾
Investitionskosten, EUR/kW _{H₂}	350	350	ca. 700	ca. 500	1 000	ca. 700

1) entspricht rund 12 t/h Holz; 2) ohne Bereitstellung des regenerativen Stroms, jedoch unter Berücksichtigung von Transportverlusten über 3 000 km mittels HGÜ

Sowohl bei den energetischen wie bei den ökonomischen Kenngrößen sind in der Zukunft keine grundsätzlichen Veränderungen zu erwarten. Unsicher sind die Kosten für marktreife Vergasungsanlagen, sie sind in Anlehnung an projektierte Kohlevergasungsanlagen abgeschätzt worden. Merkliche Kostensenkungen für Elektrolyseure sind – trotz der erhöhten technischen Anforderungen bei einem Druckniveau von 100 bar – dann zu erwarten, wenn ein ausreichend große Nachfrage eine größere Serienfertigung ermöglicht. Aus den Bereitstellungsnutzungsgraden lassen sich die Treibhausgasemissionen bei der H₂-Herstellung

³ Der regenerative Strom selbst wird – wie auch bilanztechnisch üblich – als Primärenergie definiert. Die unterschiedlichen Wirkungsgrade der Strombereitstellung aus natürlichen Energieströmen wirken sich lediglich über die Anlagengröße auf die Stromgestehungskosten aus.

ableiten (**Bild 1**) und mit herkömmlichen Kraft- bzw. Brennstoffen vergleichen. Kraftstoffe auf der Basis von Rohöl und Erdgas bewirken Klimagasemissionen Werte zwischen 65 und 100 g CO₂-Äquiv./MJ, für auf REG-Quellen basierende Energieträger liegen die Werte (bis auf Biodiesel) zwischen 10 und 25 g CO₂-Äquiv./MJ. Selbst wenn also REG-H₂ bereits in großen Mengen mit der heutigen Vorleistungsstruktur bereitgestellt würde, wäre dies aus der Sicht des Klimaschutzes unbedenklich. Dies gilt auch für Methanol und Wasserstoff aus Biomasse, wobei hier eher die geringen Potenziale von Reststoff-Biomasse den Einsatz begrenzen. Der Einsatz von Wasserstoff (oder Methanol) aus fossiler Primärenergie verursacht dagegen sogar um etwa 10- 20% höhere Emissionen als der Einsatz von Benzin, Diesel oder Erdgas. Dies ist u.a. bei der ökologischen Bilanzierung der Brennstoffzelle zu beachten. Die Wasserstoffbereitstellung aus Kohle und Schweröl ist aus ökologischer Sicht noch bedenklicher. Wasserstoff aus der Kohlevergasung verursacht Treibhausgasemissionen um 170 g CO₂-Äquiv./MJ H₂, bei Schweröl liegen sie bei 120 g CO₂-Äquiv./MJ H₂ [Dreier/Wagner 2001]. Nur unter Hinzufügung der Rückhaltung des CO₂ und seiner anschließenden Speicherung käme diese Option überhaupt infrage. Dieser zusätzliche Verfahrensschritt erhöht jedoch den Primärenergieeinsatz und steigert die Kosten erheblich. Hinzu kommt, dass die Möglichkeiten einer nennenswerten CO₂-Speicherung zumindest in Deutschland begrenzt sind [BMWi 2002],

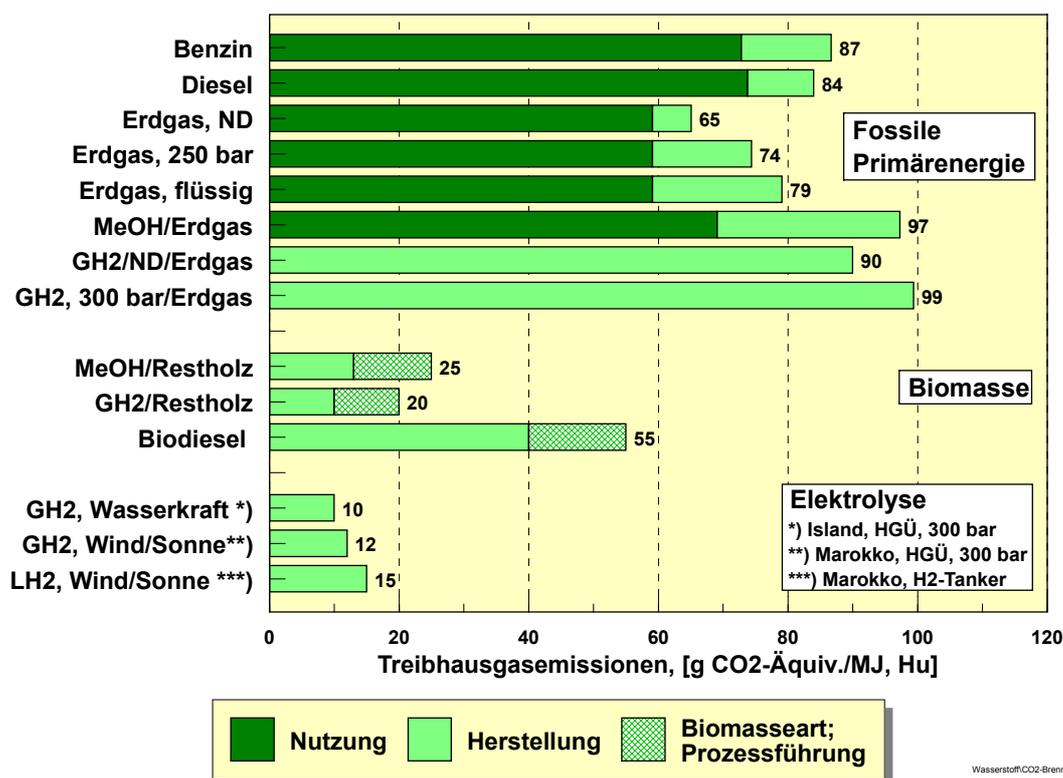


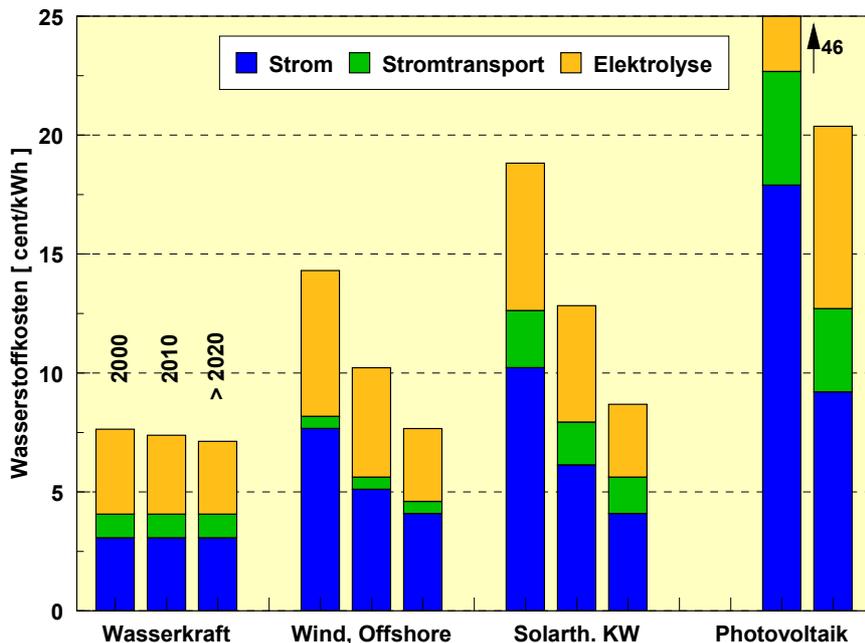
Bild 1: Treibhausgasemissionen verschiedener Brenn- und Kraftstoffe auf fossiler und regenerativer Basis frei Verbraucher bezogen auf den unteren Heizwert.

3. Kosten von regenerativem Wasserstoff

REG-Wasserstoff wird nur dann energiewirtschaftliche Einsatzchancen haben, wenn er die gleichen Nutzungsqualitäten ebenso kostengünstig bereitstellen kann wie andere Optionen oder seine ökologischen Qualitäten einen entsprechenden Preisbonus erhalten. Daher sind die für die H₂-Herstellung aus REG erreichbaren Kosten von großer Bedeutung. Dazu bedarf

es insbesondere einer Abschätzung der zukünftig möglichen Kostenentwicklung von REG-Strom, da dieser den Hauptbestandteil der Wasserstoffkosten ausmacht, [Nitsch, Rösch 2001]. Da Wasserstoff eine eher langfristige Option ist, muss dabei auch eine gewisse Unsicherheit bezüglich der erreichbaren Kostenreduktionen hingenommen werden; andererseits würde eine ausschließliche Status-Quo-Betrachtung mit Sicherheit zu kurz greifen.

In **Bild 2** sind die zukünftigen REG-Hauptquellen mit den für die H₂-Bereitstellung relevanten Kostenbestandteilen für den heutigen Status und für zukünftige Zeitpunkte gegenübergestellt, wobei nach 2020 eine breitere Einführung von Wasserstoff unterstellt wurde. Für die Referenztechniken wurde von einer H₂-Erzeugung in Deutschland ausgegangen mit Elektrolysen von jeweils einigen 10 MW_{el}, die aus dem Hochspannungsnetz mit Strom versorgt werden. Strom aus Wasserkraft und solaren Kraftwerken wird mittels HGÜ über eine Transportentfernung von 3 000 km transportiert während Windstrom aus Offshore-Anlagen in der Nordsee bereitgestellt wird. Die kurzfristig preisgünstigste Primärenergie sind größere Wasserkraftwerke mit Stromgestehungskosten um 3 ct/kWh. Diese stehen aber nur an ausgewählten Standorten (z. B. Island, Kanada) in begrenztem Umfang zur Verfügung, können also keinesfalls als Primärenergiequelle für eine energiewirtschaftlich relevante Wasserstoffwirtschaft dienen. Ihr Vorzug liegt in den bereits heute relativ geringen H₂-Gestehungskosten um 7 ct/kWh, die im Bereich heutiger Benzinpreise (einschließlich Abgaben) liegen. Damit ist dieser Wasserstoff für eine frühe Einführung in ausgewählten Einsatzfeldern (z. B. öffentliche Fuhrparks; Luftverkehr) geeignet. Mittels Windenergie aus Offshore-Kraftwerken kann bereits mittelfristig Wasserstoff um 10 ct/kWh bereitgestellt werden.



Wasserstoff/H₂-Kost.pre; 12.6.02

Bild 2: Kosten der Wasserstofferzeugung (gasförmig, ab Elektrolyse) aus REG für drei Zeitpunkte (Zinssatz 6%/a, Abschreibungsdauer 20 – 30 a; HGÜ 3000 km außer Wind-Offshore, fortschrittliche alkalische Elektrolyse mit 1000 → 670 EUR/KW_{H₂} und 73 → 77% Wirkungsgrad; Stromkosten nach [Nitsch/Rösch 2001]).

Längerfristig sind sowohl mit Windstrom (3 750 h/a) als mit Strom aus solarthermischen Kraftwerken (4 500 h/a) **Wasserstoffkosten frei Elektrolyseanlagen um 7 - 8 ct/kWh** erreichbar (bei Stromkosten frei Kraftwerk von 4 ct/kWh). Dagegen dürfte mit Photovoltaik-

strom erzeugter Wasserstoff selbst unter optimistischen Annahmen (2 000 h/a; Stromgestehungskosten in Nordafrika um 2020 von 9 –10 ct/kWh) auch auf längere Zeit deutlich teurer sein als alle anderen Optionen. Dies deutet darauf hin, dass längerfristig eine „Arbeitsteilung“ zwischen den solaren Optionen stattfinden kann, die sich an einerseits an den lokalen und regionalen Märkten und Strukturen ausrichtet (Photovoltaik), andererseits aber auch den globalen Energiemarkt mit Strom und Wasserstoff bedienen kann (Solarthermische Kraftwerke). Die solaren Optionen haben dabei generell den Vorteil, dass sie aus potenziell-erweiteter Sicht praktisch unbegrenzt sind und es prinzipiell erlauben **ein Vielfaches des globalen Energiebedarfs mittels Strom und/oder Wasserstoff bereitzustellen** [TAB 2000].

Einen Vergleich mit den auf fossiler Basis erreichbaren Wasserstoffgestehungskosten (einschließlich Verteilung bis zu Großabnehmern) stellt **Bild 3** an. Im Vergleich zu den günstigsten REG-Optionen ist aus Erdgas erzeugter Wasserstoff derzeit mit etwa 4 ct/kWh noch um den Faktor 2 günstiger. Die Kostenbarriere gegenüber heute üblichen Energiepreisen kann also selbst bei ausgereiften REG-Technologien nur schwer überwunden werden. Entscheidend dabei ist, mit welchen Kostenanstiegen bei fossilen Energien in Zukunft gerechnet wird und in welchem Ausmaß deren externe Kosten in die Marktpreise Eingang finden. Letzteres ist näherungsweise der Fall, wenn CO₂ bei einer Wasserstoffherstellung aus fossilen Rohstoffen zurückgehalten würde. Im Vergleich dazu dürfte sich REG-Wasserstoff längerfristig kostengünstiger darstellen lassen. REG-Wasserstoff ist aber aus ökonomischer Sicht mit dem zusätzlichen Handicap konfrontiert, dass er wegen seiner Herstellung aus Elektrizität rund 80 bis 100 % teurer wird als diese selbst, während heute ("chemische") fossile Energieträger deutlich billiger als Strom sind. Das herkömmliche Preisgefüge im Bereich der stationären Energienutzung ermöglicht daher eine sehr viel **raschere Konkurrenzfähigkeit von REG-Strom als von REG-Wasserstoff**. Für die REG-Primärenergien ist daher jeweils zu prüfen, ob nicht ihr Einsatz in Form von Strom zweckmäßiger ist. Für inländischen oder ins europäische Verbundnetz einspeisbaren Wasserkraft- und Windkraftstrom trifft dies in jedem Fall zu. Auch die Verbrennung oder Vergasung von Biomasse (Nutzung der gesamten Pflanze) zur direkten Strom- und Wärmeerzeugung ist energetisch, ökologisch und ökonomisch günstiger.

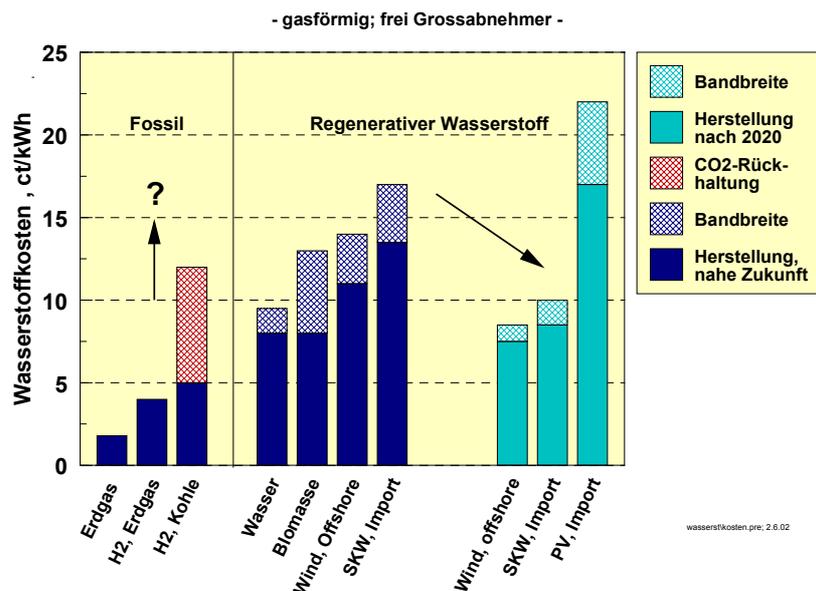


Bild 3: Wasserstoffgestehungskosten (gasförmig, frei Großabnehmer) im Vergleich fossil – regenerativ (SKW = solarthermische Kraftwerke)

Damit richtet sich das Hauptaugenmerk auf die Marktchancen von REG-Wasserstoff im Verkehrssektor, wo sich – bedingt durch die hohen Abgaben auf Benzin und Diesel – die Wettbewerbssituation in absehbarer Zeit günstiger darstellt, [VES 2001]. Wie im Strom- und Wärmebereich ist die Bereitstellung regenerativer Kraftstoffe derzeit noch teurer als für Kraftstoffe aus fossiler Primärenergie, wo Herstellungs- und Vertriebskosten zusammen lediglich 0,8 bis 0,9 ct/MJ ausmachen (Bild 4; [UBA 2002]). Nur Biogas ist in der Bereitstellung noch relativ günstig, es ist aber aus Potenzialsicht unbedeutend. Biodiesel und Ethanol erfordern für eine Halbierung der spezifischen Emissionen die etwa dreifachen Herstellungskosten. Methanol aus Restholz mit niedrigem Emissionsniveau um 20 g CO₂-Äquivalent/MJ verursacht Herstellungskosten um 4 ct/MJ (bei der Herstellung aus Energiepflanzen steigen sowohl die Kosten wie die Treibhausgasemissionen). REG-Wasserstoff kann nach Durchlaufen der möglichen Kostenreduktionen mit seinen Herstellungskosten in die Nähe der heutigen Benzinpreise (mit Abgaben) gelangen. Generell zeigt sich, dass die Kosten umgekehrt proportional zur deutliche Verringerung der spezifischen CO₂-Emissionen des Kraftstoffs ansteigen [VES 2001].

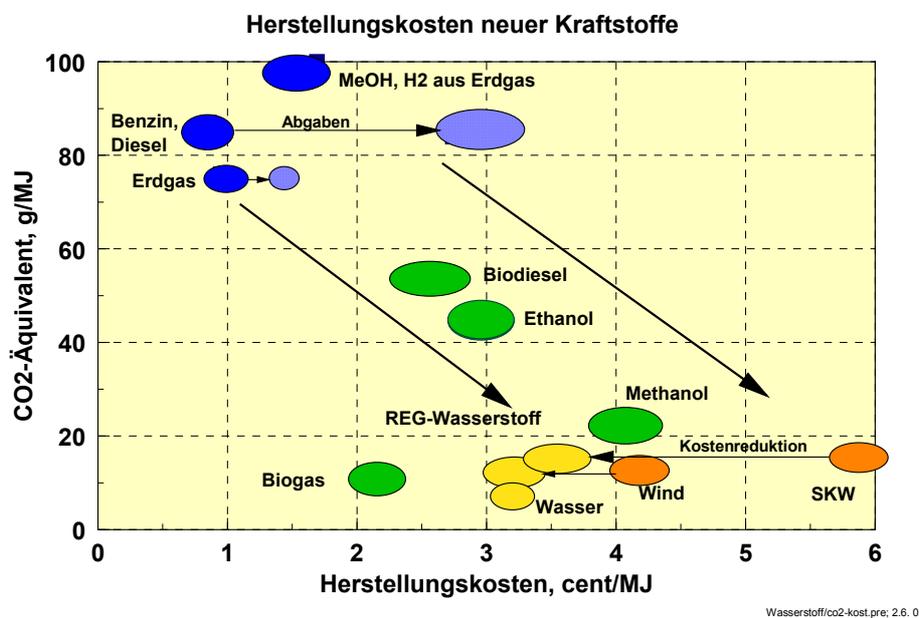


Bild 4 : Klimarelevante Emissionen und Herstellungskosten von Kraftstoffen (Herkömmliche Kraftstoffe mit und ohne Abgaben; Biodiesel = Verkaufspreise; REG-Wasserstoff derzeit und längerfristig erreichbare Herstellungskosten; gasförmig)

4. Bedingungen für die energetische Nutzung von regenerativem Wasserstoff

Grundsätzlich kann Wasserstoff in seinen Nutzungsmöglichkeiten dem Erdgas gleichgesetzt werden. Alle gängigen Energiewandler (Flammenbrenner für Heizungen, für Industrie- und Kraftwerkskessel und zum Antrieb von Turbinen, sowie motorische Verbrennung) können mit gewissen Anpassungen auch mit Wasserstoff bzw. wasserstoffreichen Gasgemischen betrieben werden, [Winter/Nitsch 1989; Nitsch /Wendt 1992]. Für den Wärmemarkt sei an die Stadtgaszeit erinnert, wo aus Kohle erzeugtes Synthesegas mit hohen Anteilen an Wasserstoff verteilt und genutzt wurde. Auf besonderes Interesse stößt die Nutzung von Wasserstoff in Verbindung mit der Brennstoffzelle, [WBGU 2002]. Wegen etablierter und sich ebenfalls noch weiterentwickelnder „konventioneller“ Energiewandler werden aber Brennstoffzellen

auch bei Erreichung ihrer Zielwerte hinsichtlich Wirkungsgraden und insbesondere Kosten nur Teilbereiche der wichtigen Märkte „Kraft-Wärme-Kopplung“ und „Fahrzeuge“ erreichen können. Sie können damit **ein wichtiger weiterer „Baustein“ einer effizienten und emissionsarmen Energieversorgung** werden, aber nicht im Sinne eines „Durchbruchs“ die anderen Wandlertechnologien ersetzen. Die Nutzungsvorteile von Brennstoffzellen gegenüber konventionellen Wandlern wachsen jedoch in dem Maße wie REG-Wasserstoff in den Energiemarkt vordringt. Sie können daher auch als eine sehr **gut geeignete „Brückentechnologie“** für den Übergang in eine regenerative Energieversorgung betrachtet werden.

Die gegenwärtigen Entwicklungstendenzen im Bereich von Energiewandlern führen zu einer wachsenden Bedeutung von effizienten Systemen kleinerer Leistung. Was im Bereich der REG-Energietechnologien schon vor gut einem Jahrzehnt begonnen hat, setzt sich derzeit im Bereich von Motor-BHKW, Mikrogasturbinen, Stirlingmotoren und Brennstoffzellen fort. Auch Kraftwerke werden als GuD-Anlagen mit deutlich kleineren Einheitsleistungen bis maximal 200 MW projektiert. Die Fortschritte in der Elektronik und Computertechnologie erlauben das Zusammenfügen einer immer größeren Anzahl kleiner Einheiten zu „virtuellen“ Kraftwerken. Der liberalisierte Energiemarkt honoriert derartige Entwicklungen, da mit diesen Anlagen sehr flexibel und mit überschaubaren Investitionsvolumina auf die Erfordernisse des Marktes reagiert werden kann. Diese Entwicklung begünstigen sowohl die weitere Ausbreitung von REG-Technologien als auch den mittelfristigen **Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft**. Da der Sekundärenergieträger REG-Wasserstoff vorwiegend aus Strom gewonnen werden muss, ist sein äußerst effizienter Einsatz beim Nutzer von eminenter Bedeutung. Als „zulässige“ Nutzungstechnologien im stationären Bereich kommen daher grundsätzlich nur Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien und hocheffiziente Wärmerzeuger (Brennwertnutzung, katalytische Brenner) mit **Gesamtnutzungsgraden um 90%** infrage. Im KWK-Bereich ist die Brennstoffzelle wegen ihrer hohen Stromkennzahlen dabei auf längere Sicht besonders gut geeignet. Auch im mobilen Bereich macht der breite Einsatz von REG-Wasserstoff nur Sinn, wenn deutlich effizientere und speziell im Individualverkehr deutlich leichtere Fahrzeuge dafür zur Verfügung stehen.

5. Die Rolle von Wasserstoff in der zukünftigen Energieversorgung

Die Effizienz- und Kostenverhältnisse zwischen REG-Strom und REG-Wasserstoff im Falle seiner Herstellung mittels Elektrolyse sind in **Tabelle 2** für fortgeschrittene Technologien zusammengefasst. Die Bandbreite der Angaben ist auf unterschiedliche Konfigurationen und Standorte der Referenzsysteme zurückzuführen. Solarer Strom kann mit rund 10 - 12 % Verlusten und 20 – 30% höheren Kosten in Mitteleuropa bereitgestellt werden, wenn die Produktionsorte in Südeuropa oder in Nordafrika liegen. GH_2 in Mitteleuropa enthält noch 65 % der Energie des solaren Stroms am Bereitstellungsort (Bezug ist der **untere** Heizwert mit 3 kWh/Nm^3) und kostet einschließlich Transport nahezu das Doppelte des erzeugten Solarstroms. Bei LH_2 stehen dem Nutzer noch etwa 50 % der ursprünglichen Energie des Solarstroms zu etwa dem Vierfachen der ursprünglichen Stromgestehungskosten zur Verfügung.

Die Dominanz der Elektrolyse als aus heutiger Sicht weitaus günstigste Wandlungstechnik für REG-Primärenergien in Wasserstoff hat aus energiewirtschaftlicher Sicht eine besondere Konsequenz: **REG-Wasserstoff als Energieträger wird weniger effizient und zudem kostspieliger als REG-Strom bereitgestellt werden können**. Er wird also nur dann in der Energiewirtschaft von Bedeutung sein, wenn er energetisch und ökonomisch sinnvolle Einsatzgebiete neben dem aus Nutzersicht universell einsetzbaren Energieträger Elektrizität

findet oder Bereiche bedienen kann, die für REG-Strom nicht oder nur sehr aufwendig zugänglich sind. Diese für Wasserstoff interessanten Einsatzfelder lassen sich aus der Tatsache ableiten, dass REG-Primärenergien aus der Sicht einer zuverlässigen Nutzung eine Reihe von Nachteilen haben. Ihre Energiedichte ist begrenzt und hängt von den geografischen Gegebenheiten ab. Ihr Angebot fluktuiert stark (Strahlung, Wind) oder ist an bestimmte Orte gebunden (Wasserkraft, Geothermie, weitgehend auch Biomasse). Die Primärenergie selbst ist - bis auf Biomasse - nicht transportierbar und nicht oder nur wenig speicherbar. REG, speziell in Form von Solarstrahlung und Wind, benötigen daher entweder die Unterstützung der konventionellen, fossilen Energieversorgung zum Ausgleich dieser Nachteile, oder aus ihnen hergestellte Sekundärenergieträger mit gleichen oder ähnlichen Eigenschaften wie die speicher- und transportierbaren fossilen Energieträger Öl, Erdgas und Kohle.

Tabelle 2: Übersicht über Effizienz- und Kostenverhältnisse zwischen REG-Strom (Erzeugung = 1,0) und REG-Wasserstoff für fortschrittliche Technologien

	Nutzungsgrade (Hu)		Kosten	
	Nur Herstellung	Einschl. Langstreckentransport	Nur Herstellung	Einschl. Langstreckentransport
Strom	1,0	0,90 (0,85 – 0,92)	1,0	1,50 (1,3 – 1,7)
H2, gasförmig	0,75 (0,70 – 0,80)	0,65 (0,62 – 0,68)	1,65 (1,5 – 1,8)	1,90 (1,7 – 2,1)
H2, flüssig	0,60 (0,57 – 0,63)	0,52 (0,50 – 0,55)	2,50 (2,3 – 2,8)	4,00 (3,7 – 4,3)

Offensichtlich ist die erstgenannte Einsatzart die sinnvollere und früher erschließbare Möglichkeit, solange die Emissionen der verbleibenden fossilen Energien, insbesondere an CO₂, tolerierbar sind. Die aus REG gewinnbaren Sekundärenergieformen Nutzwärme verschiedener Temperatur und Elektrizität, die kostengünstiger als REG-Wasserstoff sind, können gemeinsam prinzipiell alle Energiedienstleistungen (Heizung, Warmwasser, Prozesswärme, Antriebskraft, Licht und Kommunikation) erfüllen. Aus energetischen und wirtschaftlichen Gründen ist ihre **direkte Nutzung** daher vorzuziehen. Nur wenn aus technischen oder strukturellen Gründen diese direkte Nutzung von Strom und Wärme nicht möglich ist (z. B. Luftverkehr; zu hohes Momentanangebot an solarem Strom), erfordert dies einen weiteren Wandlungsschritt. Der Gewinn an Speicher- bzw. Einsatzfähigkeit muss dann gegenüber den zusätzlichen Kosten und Wandlungsverlusten abgewogen werden. Dies gilt sowohl für Einzelanwendungen (Nischenmärkte) als auch für das Energiesystem insgesamt. Die energiewirtschaftliche Bedeutung von Wasserstoff oder daraus abgeleiteten Energieträgern liegt also in der Möglichkeit, die Nutzungsgrenzen von REG zu erweitern und ihr großes Angebotspotential möglichst weitgehend zu erschließen. Dies setzt selbstverständlich zunächst eine wesentlich stärkere direkte Nutzung von REG voraus. **Die Bedeutung von Wasserstoff ist also unmittelbar mit der Intensität und Kontinuität einer Gesamtstrategie der Erschließung von REG verknüpft.**

Die Umgestaltung der Energieversorgungssysteme von industrialisierten Ländern mit dem wichtigen Ziel bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts die CO₂-Emissionen auf etwa 20 % des heutigen Werts zu senken, wird in drei aufeinander folgenden, sich überlappenden Abschnitten erfolgen [Nitsch/Rösch 2001; UBA 2002]:

- Die **Optimierung des derzeitigen Energieversorgungssystems durch effizientere**

Techniken der Energiewandlung, wie z. B. der Kraft-Wärme-Kopplung sowie durch eine wesentlich **sparsamere Energienutzung** mittels verbesserter Nutzungstechniken (speziell bei der Stromnutzung) und Vermeidung von Energieverbrauch (z. B. energetische Sanierung des Gebäudebestands). Auch strukturelle Veränderungen im Verkehr und in der Industrie spielen eine nicht geringe Rolle. Damit lassen sich bereits mittelfristig 40 - 50 % des derzeitigen Energieverbrauchs einsparen, was den Verbrauch fossiler Energieressourcen in den Industrieländern bereits merklich eindämmen würde.

- Eine **merkliche Marktausweitung aller Arten von REG** auf lokaler und regionaler Ebene und ihre konsequente Verknüpfung mit den bestehenden Versorgungsstrukturen: Auf diese Weise werden die Kosten für neue Infrastrukturen und Speichersysteme zunächst vermieden bzw. bleiben gering. Die Erschließung richtet sich nach technischem Reifegrad und Gestehungskosten der einzelnen Technologien. Am schnellsten werden die verbleibenden Wasserkraftpotenziale, die Windenergie und Restbiomassen erschlossen. Ausgehend von heute noch geringen Anteilen bzw. noch gar nicht im Markt befindlichen Technologien folgen solarthermische Kollektorsysteme, die Geothermie, die (beschränkte) Nutzung von Energiepflanzen, solarthermische Kraftwerke und das weitere Vordringen der Photovoltaik. Bei einer zielstrebigem, auf dieses Ziel ausgerichteten Energiepolitik können REG im Jahr 2030 bereits 20 – 25% unseres Energieverbrauchs decken.
- Im dritten Zeitabschnitt können **REG schließlich zur bedeutendsten Energiequelle** des nächsten Jahrhunderts ausgebaut werden. Neben der weiteren Nutzung der beträchtlichen Wind-Offshore- und Geothermie-Potenziale werden jetzt insbesondere die gewaltigen Potenziale der Solarstrahlung in einstrahlungsreichen Regionen in großem Ausmaß erschlossen und stehen sowohl den Standortländern zur Deckung des Eigenbedarfs als auch für den Export in andere Regionen zur Verfügung. In dieser Phase ist auch der Aufbau neuer Transport- und Speichersysteme erforderlich. Zur Mitte des Jahrhunderts können REG somit in der Lage sein, bis zu 50% des Energiebedarfs decken.

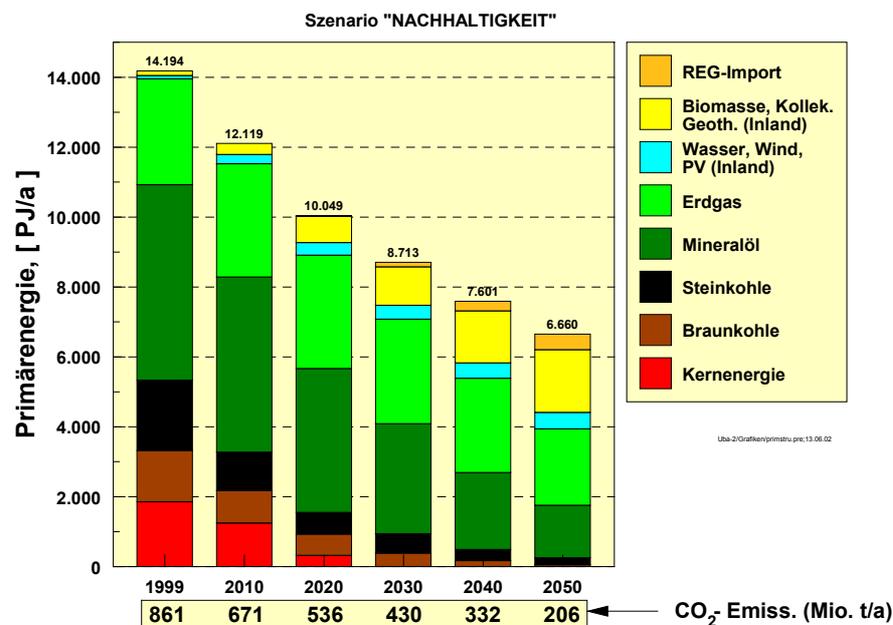


Bild 5: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland und seiner Struktur im Langfristszenario „Nachhaltigkeit“ und resultierende CO₂- Emissionen (in 2050 werden in diesem Szenario 18% der REG-Stromerzeugung zur Wasserstoffbereitstellung eingesetzt) [UBA 2002].

Die Strukturveränderungen eines Energiesystems für ein Industrieland (Beispiel Deutschland) im Verlauf von fünf Jahrzehnten, in dem diese Strategie umgesetzt werden, illustriert **Bild 5** mittels eines „**Nachhaltigkeitsszenarios**“, [UBA 2002]. REG haben im Jahr 2050 einen Deckungsanteil am Primärenergieverbrauch von 36%⁴ erreicht. Die Deckungsanteile der REG an den Bereichen Stromerzeugung (62%), an der Wärmebereitstellung (45%) und an der Kraftstoffbereitstellung (15%) sind dabei sehr unterschiedlich und spiegeln die zweckmäßigste zeitliche Staffelung der Einführungsschritte wider. In diesem Szenario wird **REG-Wasserstoff ab 2030 im Verkehrssektor** eingeführt und steigt mit einem Beitrag von 150 PJ/a im Jahr 2050 auf **3% des gesamten Endenergiebedarfs**. Dies ist aus energiewirtschaftlicher Sicht noch ein geringer Anteil.

6. Eine vollständig regenerative Energiewirtschaft mit Hilfe von Wasserstoff

Obwohl der im Szenario „Nachhaltigkeit“ erreichte Beitrag der REG im Jahr 2050 schon außerordentlich hoch ist, stellt sich die Frage, ob diese Entwicklung nicht noch schneller verlaufen und ob dazu nicht **Wasserstoff einen größeren Beitrag** leisten könnte. Denn aus der Sicht des Ressourcenverzehr ist der verbleibende Verbrauch fossiler Energierohstoffe auf Dauer (d. h. über 2050 hinaus) noch zu hoch, um als nachhaltig gelten zu können. Dies gilt insbesondere auch vor dem Hintergrund eines weltweit wachsenden Drucks auf die Energiemärkte. Wie kann aber der Anteil von REG weiter erhöht werden? Betrachtet man zunächst die direkte Nutzung von Strom aus REG, so kann bei Eintreffen besonders günstigen Rahmenbedingungen, wie eine progressive europäische und internationale Klimaschutzpolitik, verantwortungsbewusstes Handeln der Energieversorger und Verbraucher sowie weitblickende Investitionen in große Fertigungsstätten für REG, der Beitrag von REG im Jahr 2050 einen Anteil von 75% an der Strombereitstellung erreichen, wobei allerdings bereits der Einsatz eines speicherbaren Energieträgers zum Abbau überschüssiger Angebotsspitzen von Wind- und Solarstrom und für die Bereitstellung von Reserveleistung im GW-Bereich (z.B. wasserstoffversorgte GuD-Spitzenlastkraftwerke) im Rahmen eines großräumigen Stromverbund erforderlich sind. Herkömmliche Methoden des Lastmanagements reichen dann, wie noch im Fall eines rund 60%igen Anteils nicht mehr aus [UBA 2002, ET 2002].

In Analogie dazu kann auch der Wärmebereich und der Verkehrssektor betrachtet werden, wobei die heutigen Ausgangsbedingungen für einen breiten REG-Einsatz in beiden Bereichen ungünstiger sind als im Strombereich. Überprüft man hier die Möglichkeiten einer rascheren Ausweitung der Anteile, so zeigen sich im Wärmebereich enge Grenzen, da Kollektor- und Geothermiewärme lediglich Niedertemperaturwärme anbieten. Soll der Beitrag von REG deutlich weiter gesteigert werden, so müssen sie in die Lage versetzt werden, auch Hochtemperaturprozesswärme zu liefern. Für Teile davon bietet sich REG-Wasserstoff an. Geht man von obiger Kombination günstiger Rahmenbedingungen aus so kann im Wärmebereich ein maximaler Anteil von rund 60% REG- Wärme bis 2050 erreicht werden. Besonders aber der Verkehrssektor, der im Szenario „Nachhaltigkeit“ erst zu 15% mit REG-Wasserstoff versorgt ist, bietet weitere Möglichkeiten einer deutlichen Ausweitung des Beitrags von REG. Diese Ausweitung ist jedoch in größerem Ausmaß **erst ab 2030 sinnvoll**, da einerseits frü-

⁴ Unterschiede zu den Anteil an REG im Endenergieverbrauch ergeben sich insbesondere durch die statistisch übliche Bilanzierung von Strom aus Wasserkraft, Windenergie und Photovoltaik als Primärenergie, während die über thermische Energie bereitgestellten Strommengen (fossile Energien, Kernenergie, Geothermie, Biomasse) primärenergieseitig mit ihrem thermischen Energieinhalt (Heizwert) bilanziert werden. Daher fällt auch der entsprechende Primärenergiebeitrag von Wasser, Wind, PV, REG-Import in Bild 5 relativ gering aus.

hesten ab diesem Zeitpunkt von einem ausreichend effizienten Fahrzeugpark als entscheidende Grundvoraussetzung für die Einführung „teurerer“ neuer Kraftstoffe ausgegangen werden kann. Andererseits führt der Einsatz von REG zunächst in anderen Sektoren zu einer spezifisch höheren Minderung der Treibhausgasemissionen, in dem z. B. durch Windstrom direkt Kohlestrom substituiert wird. Die hier diskutierte Ausweitung des Beitrags von REG im Verkehr beruht zudem auf der Voraussetzung einer ausreichenden Verfügbarkeit preisgünstiger REG- Stromerzeugungspotenziale um 4 – 5 ct/kWh Stromerzeugungskosten, wofür hauptsächlich größere Wind-Offshore-Parks, sowie solarthermische Kraftwerke infrage kommen. Dieser zusätzliche Strom ist die Quelle für die breite Einführung von Wasserstoff als neuer Kraftstoff. In Verbindung mit einem erweiterten „Lastmanagement“ dient dabei die Elektrolyse gleichzeitig als flexibler Verbraucher. In einer „Maximalvariante“ des Szenarios Nachhaltigkeit wird der Beitrag von Wasserstoff im Verkehr auf 70% des Kraftstoffbedarfs des Jahres 2050 gesteigert.⁵

Aufsummiert über alle Sektoren könnten unter den genannten günstigen Rahmenbedingungen nahezu zwei Drittel des gesamten Endenergieverbrauchs des Szenarios „Maximalvariante“ im Jahr 2050 mittels REG gedeckt werden (**Bild 6**, obere Kurve), wobei der Hauptzuwachs gegenüber dem Szenario Nachhaltigkeit aus dem Verkehr stammt. Der fossile Energieeinsatz reduziert sich entsprechend auf 24% der heutigen Menge, der CO₂-Ausstoß mit 129 Mio. t/a auf nur noch 15% der heutigen Emissionen. Mit der „Maximalvariante“ ist diejenige Ausbaustrategie skizziert, die aus heutiger Sicht unter sehr günstigen Rahmenbedingungen bis zum Jahr 2050 erreicht werden könnte. **REG- Wasserstoffs** hat daran mit insgesamt 800 PJ/a bereits einen **Anteil von 15%** am Endenergieverbrauch. Damit ist etwa die **Obergrenze eines möglichen Beitrags von Wasserstoff im Jahr 2050** markiert.

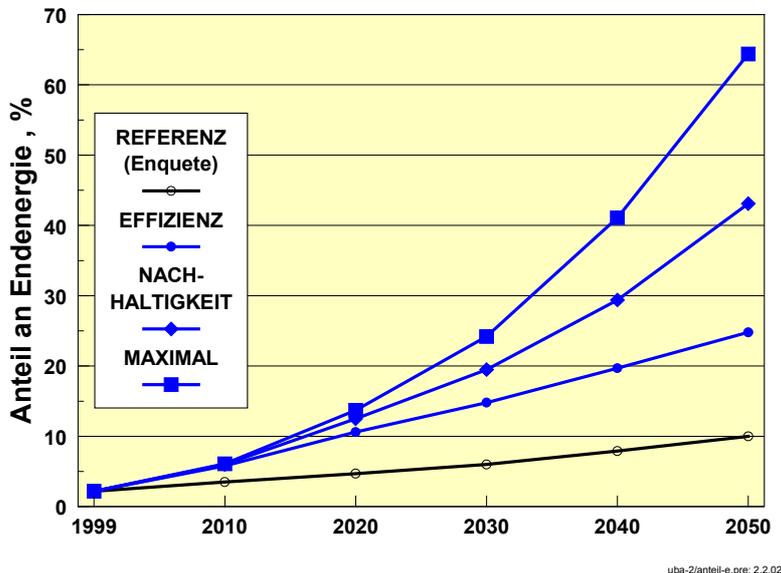


Bild 6 : Entwicklung der Anteile von REG am gesamten Endenergieverbrauch in den Szenarien „Effizienz“ und „Nachhaltigkeit“ und „Maximalvariante“ [UBA 2002] im Vergleich zum Referenzszenario der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ und Beitrag von REG-Wasserstoff.

Aus technisch-struktureller Sicht sind auch nach dem Jahr 2050 noch vielfältige Ausbaumöglichkeiten von REG vorhanden. Insbesondere sind bis dahin die technischen Potenziale der

⁵ Verglichen mit dem heutigen Kraftstoffbedarf wären es lediglich 26%, woraus die Notwendigkeit einer deutlich effizienterer Nutzung von Kraftstoffen evident wird.

Nutzung der Solarstrahlung mittels Photovoltaik und solarthermischen Kraftwerken erst zu sehr geringen Anteilen ausgeschöpft. Die in größerem Umfang verfügbare zusätzliche Quelle ist damit ausschließlich elektrische Energie. Einer Ausweitung auf dem Stromsektor sind jedoch – wie zuvor dargelegt - Grenzen gesetzt. Bei einer angestrebten REG-Stromproduktion über diese Grenzen hinaus ist daher die Umwandlung in eine speicherbare Endenergieform zwingend erforderlich. Bereits in den Szenario „Nachhaltigkeit“ und „Maximalvariante“ ist von dieser Möglichkeit Gebrauch gemacht worden.

Wasserstoff hat bei der Ausweitung des Versorgungsbeitrags von REG aus mehreren Gründen gegenüber anderen chemischen Energieträgern **wesentliche Vorteile**:

- Es wird ein Energieträger benötigt, der relativ einfach aus elektrischer Energie hergestellt werden kann, da diese längerfristig die Hauptenergieart einer intensiven Nutzung von REG-Energien sein wird und in technisch sehr großen Mengen bereitgestellt werden kann.
- Die Überschüsse einer ausgedehnten Stromerzeugung aus REG sollten verhältnismäßig leicht und in flexibler Form, d.h. in sehr unterschiedlichen Leistungen bei möglichst großer Effizienz dezentral und zentral umgewandelt werden und damit wesentliche Beiträge zum Lastmanagement leisten können.
- Der Energieträger muss multifunktional nutzbar sein, d.h. sowohl im Wärmebereich (Mittel- und Hochtemperaturbereich) wie auch als Kraftstoff eingesetzt werden können. Außerdem soll sein breiter Einsatz in fortschrittlichen Kraft-Wärme-Kopplungstechniken (Brennstoffzellen) und zur Spitzenlastdeckung (GuD-Kraftwerke) in effizienter Weise möglich sein.
- Transport und Verteilung des Energieträgers sollten auf vorhandenen Infrastrukturen aufbauen können. Er muss zudem saisonal speicherbar sein.

Diese Eigenschaften treffen nur auf REG-Wasserstoff zu. Er ist prinzipiell in der Lage, die durch die Angebotsstruktur der REG gesetzten Grenzen zu überwinden und allen Energienutzern zu jeder Zeit eine gesicherte Energieversorgung zu gewährleisten. Als weiterer Vorteil kommt hinzu, dass ein gleichfalls gasförmiger Energieträger, nämlich Erdgas, derzeit an Bedeutung gewinnt. Die gegenwärtige Ausweitung seines Anteils – die allerdings aus Ressourcengründen mittelfristig zu begrenzen ist – ist kompatibel mit einem gleichzeitig verstärkten Ausbau der REG. **Erdgas ist somit die geeignete fossile „Übergangsenergie“** bei einer Transformation des Energiesystems in Richtung REG und Wasserstoff. Dies gilt insbesondere auch für die Infrastrukturproblematik, die häufig einen limitierenden Faktor für die Einführung neuer Energieträger darstellt. Die Erdgasinfrastruktur kann in nahezu idealer Weise über die anteilige Einspeisung von Wasserstoff neben dem Aufbau und der späteren Vernetzung dezentraler, lokaler Wasserstoffnetze genutzt werden.

Sollen also die in der Maximalvariante genannten REG-Anteile nach 2050 deutlich überschritten werden, so ist dies nur mit einer weiteren Steigerung des Anteils von Wasserstoff möglich. Da jedoch Verluste bei der Wasserstoffbereitstellung unvermeidlich sind und diese zusätzliche Kosten verursachen, liegt es auf der Hand, dass zuvor alle anderen preiswerteren Verfahren der Nutzung von REG ausgeschöpft werden sollten. Eine verhältnismäßig späte Einführung von Wasserstoff, wie im Szenario Nachhaltigkeit und auch in der Maximal-

variante angenommen, ist daher naheliegend. Stellt man die Aussagen der einschlägigen Untersuchungen zum Thema „Wasserstoff“ im Hinblick auf den Beitrag von Wasserstoff bei einer sehr weitgehenden Reduktion der CO₂-Emissionen zusammen und fügt die Ergebnisse aus [UBA 2002] hinzu, so erhält man die in **Bild 7** dargelegten Zusammenhänge:

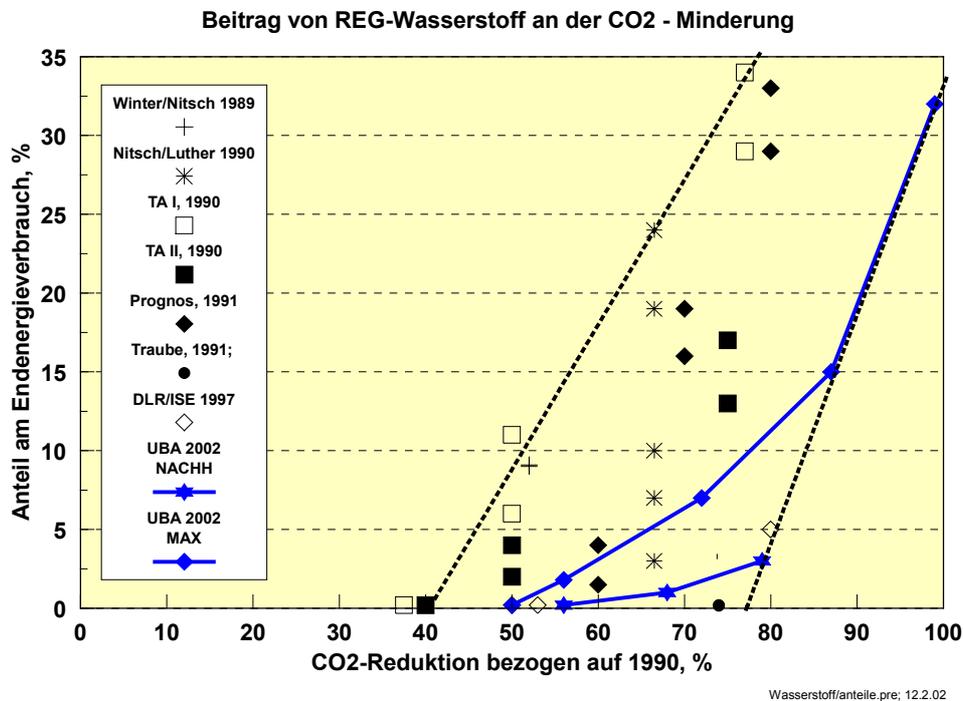


Bild 7: Bandbreite des Beitrags von Wasserstoff aus REG an der Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen im deutschen Energiesystem nach mehreren Untersuchungen zur Einführung von Wasserstoff.

- Die Bandbreite des **Eintritts von Wasserstoff** in die Energieversorgung liegt zwischen einer 50 und 80%igen Reduktion von CO₂ (bezogen auf 1990); bis dahin haben rationellere Energiewandlung und –nutzung und die direkte bzw. lokale Nutzung von REG Vorrang. Die tendenziell jüngeren Studien, die sich intensiver mit den Möglichkeiten des Lastmanagements von Strom aus REG auseinandergesetzt haben, verschieben den Eintrittszeitpunkt von Wasserstoff zu höheren CO₂-Reduktionswerten um 70 – 80%. **Bei CO₂-Reduktionsbemühungen > 80% kommt jedoch keine Untersuchung ohne Wasserstoff aus.**
- Den größten Einfluss auf die Wasserstoffeinführung haben **CO₂-Reduktionsstrategien im Verkehrssektor**. Wird die Einführung von Wasserstoff im Verkehr forciert (wie z.B. in der vorliegenden Maximalvariante), so ist er bereits bei einem CO₂-Reduktionsniveau um 60% merklich an der Endenergiebearbeitung beteiligt. Werden die direkten Nutzungsmöglichkeiten von REG stärker betont, so wird Wasserstoff erst ab einem CO₂-Reduktionsniveau von 80% relevant.
- Eine Extrapolation der Maximalvariante auf eine nahezu vollständige Vermeidung von energetisch bedingtem CO₂ führt zu einem Anteil von **REG-Wasserstoff um 30 – 35% am Endenergieverbrauch**; der Verkehrssektor ist dann zu 85%, der Wärmebereich zu rund 30% mit Wasserstoff versorgt.

- Hinterlegt man die CO₂-Reduktionswerte in Bild 7 mit einer Zeitskala, so ist eine energiewirtschaftlich relevante Einführung von REG-Wasserstoff **nicht vor 2025 erforderlich** und wegen der dann immer noch relativ hohen Kosten volkswirtschaftlich auch **nicht sinnvoll**. Andererseits sollte eine **energiewirtschaftlich relevante Einführung bis 2050** erfolgt sein, wenn eine weitere CO₂-Reduktion über 80% hinaus angestrebt wird bzw. die Ressourcenbasis längerfristig ganz auf REG-Quellen umgestellt werden soll. Eine Auseinandersetzung mit den wasserstoffspezifischen Technologien und den Übergangsmöglichkeiten von Erdgas zu Wasserstoff ist aufgrund der hohen Zeitkonstanten aber **schon heute erforderlich**.

Der lange Betrachtungszeitraum der hier vorgestellten Szenarien erlaubt es, den gesamten Prozess einer REG-Einführung – der aus energiewirtschaftlicher Sicht gerade erst beginnt – im Zusammenwirken mit einer umfassenden Strategie einer rationelleren Energienutzung mit hinreichender Genauigkeit zu beschreiben. Es können dabei mehrere Phasen des REG-Ausbaus unterschieden werden:

- Bis 2010: Energiepolitisch gestützter „**Einstieg**“ durch Zielvorgaben und wirksame Instrumentenbündel.
- 2010 – 2020: „**Stabilisierung**“ des Wachstums bei allmählichem Rückzug der energiepolitischen Instrumente.
- 2020 – 2030: Vollwertige „**Etablierung**“ aller neuen REG-Technologien mit noch unterschiedlicher Ausprägung in den einzelnen Verbrauchssektoren und Aufbau von Importstrukturen für REG-Strom; Einsatz von REG-Wasserstoffs in Nischensegmenten.
- 2030 – 2050: Beginnende „**Dominanz**“ der REG in allen Bereichen der Energieversorgung und **erste energiewirtschaftlich relevante Anwendungen für REG-Wasserstoff**
- nach 2050: Fortschreitende „**Ablösung**“ der fossilen Energieträger durch eine vollständig auf REG beruhenden Energiewirtschaft bei **sukzessiven Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft** bis etwa Ende dieses Jahrhunderts, [UBA 2002].

Als Fazit kann festgehalten werden, dass eine derartige stufenweise Einführungsstrategie der REG die derzeitigen Nachhaltigkeitsdefizite der Energieversorgung deutlich mindern kann. Dabei ist von Anfang an darauf zu achten, dass dadurch keine neuen Probleme entstehen. Primäre Aufgabe ist es demnach einen ökologisch und ökonomisch optimierten Ausbau von REG anzustreben. Eine nachhaltige Energieversorgung ist zudem nur **im Verbund von regenerativen Energien und Effizienztechnologien** zu erreichen sein. Die Entlastungseffekte der neuen REG-Technologien treten aufgrund der zum Teil noch höheren Kosten und des noch geringen Ausbaustandes anfänglich nur langsam in Erscheinung und erfordern ausreichend hohe und länger andauernde Vorleistungen. Gerade deswegen ist die Kopplung mit einer anspruchsvollen Strategie der zu weiten Teilen hoch rentablen rationelleren Energienutzung unerlässlich. Wenn REG in größerem Ausmaß selbstverständlicher Bestandteil des Energiesystems geworden sind, kann Wasserstoff dafür genutzt werden, die Deckungsanteile von REG weiter zu steigern bis hin zu einer prinzipiell CO₂-freien Energieversorgung. Die technischen Potenziale der aus REG-Primärenergien gewinnbaren Elektri-

zität reichen zur Umsetzung dieser Strategie bei weitem aus.

7. Literatur:

BMWi 2002: Workshop des BM für Wirtschaft zur CO₂-Abtrennung; 3./4.7.2002

BMBF 1995: „Wasserstoff als Energieträger – Ergebnisse der Forschung der letzten 20 Jahre und Ausblick auf die Zukunft“. Bericht zum Statusseminar. Hrsg. Projektträger BEO des BMBF, Okt. 1995.

Dienhart 1999: H. Dienhart, M. Pehnt, J. Nitsch, „Analyse von Einsatzmöglichkeiten und Rahmenbedingungen verschiedener Brennstoffzellensysteme in Industrie und öffentlicher Stromversorgung. Gutachten im Auftrag des Büros für Technikfolgenabschätzung am Dt. Bundestag. DLR Stuttgart, November 1999.

DLR 1990: „Bedingungen und Folgen von Aufbaustrategien für eine solare Wasserstoffwirtschaft“. Untersuchung für die Enquete-Kommission „Technikfolgenabschätzung und –Bewertung“ des Deutschen Bundestages, DLR Stuttgart, DIW Berlin, LBST Ottobrunn u.a., Bonn 1990

DLR/ISE 1997: O.Langniß, J. Nitsch, J. Luther, E. Wiemken, „Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung – Ein solares Langfristszenario für Deutschland.“ DLR Stuttgart, FhG-ISE Freiburg. Workshop des Forschungsverbunds Sonnenenergie, Dez. 1997.

Dreier 2001: Dreier, Th.: „Ganzheitliche Systemanalyse und Potenziale biogener Kraftstoffe“. Herrsching, E&M-Verlag, 2001

Dreier/Wagner 2001: Th. Dreier, U. Wagner: „Perspektiven einer Wasserstoffwirtschaft“, Teile 1 – 3, Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK), Bd. 52 (2000), Nr.12 und Bd.53 (2001), Nr. 3, Nr. 6

Enquete 1989: J. Nitsch, C. Voigt, R. Wurster, „Wasserstoff – Erzeugung, Transport, Speicherung, Nutzung.“ Arbeitsbericht im Rahmen des Studienprogramms für die Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Dt. Bundestages, DLR Stuttgart, LBST Ottobrunn, Oktober 1989

Enquete 1995: Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Dt. Bundestages (Hrsg.), „Mehr Zukunft für die Erde“, Economica-Verlag 1995.

ET 2002: F.Trieb, J. Nitsch, L. Brischke u.a. : „Sichere Stromversorgung mit regenerativen Energien.“ Energiewirtschaftliche Tagesfragen, September 2002.

Fischedick 2000: M. Fischedick, O. Langniß, J. Nitsch: „Nach dem Ausstieg – Zukunftskurs Erneuerbare Energien“. Hirzel-Verlag, Stuttgart, 2000.

Hysolar 1989: „HYSOLAR – Solar Hydrogen Energy“ Broschüre zum deutsch-saudi-arabischen Gemeinschaftsprojekt. DLR Stuttgart, Universität Stuttgart, King Abdulaziz City for Science and Technology (KACST), Stuttgart 1989.

Karamanolis 2001: S. Karamanolis: „Wasserstoff – Energieträger der Zukunft.“ Elektra-Verlag München, 2001.

Langniß 1994: O. Langniß, „Import von Solarstrom.“ Bericht im Rahmen des IKARUS-Projekts im Auftrag des BMFT, DLR Stuttgart, STB-Bericht, Nr.9, März 1994.

Nitsch/Luther 1990: J. Nitsch, J. Luther „Energiesysteme der Zukunft.“ Springer, Berlin, 1990.

Nitsch/Wendt 1992: J. Nitsch, H. Wendt (Hrsg.), „Bedeutung, Einsatzbereiche und technisch-ökonomische Entwicklungspotenziale von Wasserstoffnutzungstechniken“. Untersuchung im Auftrag des BMFT im Rahmen des HYSOLAR-Projekts, Bonn, Stuttgart, Darmstadt 1992

Nitsch 1997: J. Nitsch, H. Dienhart, O. Langniß: „Entwicklungsstrategien für solare Energiesysteme

und die Rolle von Wasserstoff am Beispiel der Bundesrepublik Deutschland“. In: VDI-Bericht 1321, Fortschrittliche Energiewandlung und –anwendung, Band II, 1997.

Nitsch/Rösch 2001: J. Nitsch, C.Rösch u.a.: „Schlüsseltechnologie Regenerative Energien“. Teilbericht im Rahmen des HGF-Verbundprojekts: „Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland.“ DLR Stuttgart, ITAS (FZ Karlsruhe), November 2001.

NRW/DLR 2001: „Wasserstoff – Nachhaltige Energie, stationär und mobil“. Broschüre der Landesinitiative Zukunftsenergien NRW in Zusammenarbeit mit DLR Stuttgart, 1. Auflage 2001

Ogden 1993: J.M. Ogden, J. Nitsch, „Solar Hydrogen“. In: Johannsson et.al: „Renewable Energy – Sources for Fuels and Electricity“. Island Press, Washington DC 1993

Pehnt 2002: M. Pehnt, „Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik“. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 6: Energietechnik, Nr. 476, VDI-Verlag, Düsseldorf 2002.

Prognos 1991: Prognos AG, FhG-ISI, „Konsistenzprüfung einer denkbaren zukünftigen Wasserstoffwirtschaft“. Untersuchung für das BMFT, Basel, Karlsruhe 1991

Prognos 2000: Prognos AG (Hrsg. „Energierport III – die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2000.

SWB: „Solar-Hydrogen – the Project in Neunburg vorm Wald“. Broschüre der Solar-Wasserstoff-Bayern. Neunburg vorm Wald

Szyszka 1993: A. Szyszka, J.-P. Behrmann: „The Solar-Hydrogen Project“, Int. J. of Project Management, Vol. 11, No.1, Feb. 1993

TAB 2000: J. Nitsch, F. Trieb, „Potenziale regenerativer Energiequellen“. Studie im Auftrag des Büros für Technikfolgenabschätzung am Deutschen Bundestag, DLR Stuttgart, Stuttgart, Berlin 2000

TAB 2001: D. Oertel, T. Fleischer, „Brennstoffzellen-Technologien: Hoffnungsträger für den Klimaschutz. Technische, ökonomische und ökologische Aspekte ihres Einsatzes in Verkehr und Energiewirtschaft.“ Veröffentlichung des Büros für Technikfolgenabschätzung am Dt. Bundestag. Erich Schmidt Verlag, Berlin 2001.

Technomar 2001: „Brennstoffzellen im Energiemarkt – Entwicklungsstand, Einsatzpotenziale und Auswirkungen auf die Energieerzeugung“. Technomar GmbH München, Energie & Management Herrsching, Dezember 2001

Traube 1991: K. Traube, „Perspektiven des deutschen Energiesystems hinsichtlich des CO₂-Problems“. Untersuchung im Auftrag der Wirtschaftsministerien von NRW und des Saarlands, Bremen, Düsseldorf, Saarbrücken, 1991.

UBA 2002: M. Fishedick, J. Nitsch u.a., „Langfristszenarien für eine nachhaltige Energieversorgung in Deutschland“. Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal, DLR Stuttgart, Forschungsvorhaben für das Umweltbundesamt, Berlin Juli 2002

VES 2001: Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie. Zweiter Zwischenbericht der Task-Force an das Steering Committee, 13.6.2001

Winter/Nitsch 1989: C.J. Winter, J. Nitsch, „Wasserstoff als Energieträger – Technik, Systeme, Wirtschaft“. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2. Auflage, 1989.

WBGU 2002: J. Nitsch: „Potenziale der Wasserstoffwirtschaft.“ Gutachten für den Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), Stuttgart, Juni 2002.