

Grundlegende Aspekte einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft

Th. Jordan, IKET

Einleitung

Energie und Ökonomie

Zugang zu günstiger Energie ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor für jede Volkswirtschaft. Deutliche Belege hierfür sind der insgesamt zunehmende Energieumsatz bei einem allgemeinen Wohlstandszuwachs und, im speziellen, die Abhängigkeit des Bruttosozialprodukts vom Pro-Kopf-Energieverbrauch.

Haben sich die Gesellschaften noch bis ins 19. Jahrhundert noch auf lokale Ressourcen wie tierische Fette, Holz oder Stroh, Wind und Wasser gestützt, wurde durch die Erfindung der Dampfmaschine und deren Befuerung mit Kohle das neue Zeitalter der Industrialisierung eingeläutet. Gleichzeitig begann damit erst-

mals der „Verbrauch“ natürlicher Energiespeicher. Im zwanzigsten Jahrhundert fand dann ein Übergang von den festen Energieträgern, bzw. Brennstoffen, zu flüssigen Brennstoffen, insbesondere Öl, und neuerdings zu gasförmigen Energieträgern, z. B. Erdgas und zukünftig Wasserstoff (H₂), statt. Diese Übergänge waren durch einfachere Handhabung und durch Technologie-Schübe zur Einsparung und Reduzierung der schädlichen Endprodukte motiviert.

Der Phasenübergang der Hauptenergieträger von fest über flüssig zu gasförmig, siehe Abb. 1, ist begleitet von einer stetigen Reduktion des Umsatzes von Kohlenstoff, d.h. einer Zunahme der Wasserstoffatome je Kohlenstoffatom von 0 (reiner Kohlenstoff) auf ∞ (für H₂). Beim gegenwärtigen „Energimix“ sind ca. 2/3 der

„verbrannten“ Atome Wasserstoffatome, Winter [1] und Dunn [2]. Da beim Verbrennen von Kohle CO₂, beim Verbrennen von Wasserstoff nur Wasser entsteht wird bei diesem Übergang der antropogene Ausstoß des Klimagases CO₂ stetig reduziert.

Die oft zitierte „Nachhaltigkeit“ impliziert eine Abkehr von dem wenig vorsorglichen Verbrennen fossiler Energieträger, fordert stattdessen eine weitere Steigerung der Effizienz der Energiewandlungsprozesse und die stärkere Nutzung von regenerativen „Quellen“ (hierzu sollen die Sonnenenergie, Erdwärme und brütende Kernspaltung zählen).

Für eine intensivere Nutzung insbesondere der Sonnenenergie und direkt aus ihr abgeleitete Formen, wie Wind und Wasser, ist wegen der zeitlichen Inkohärenz

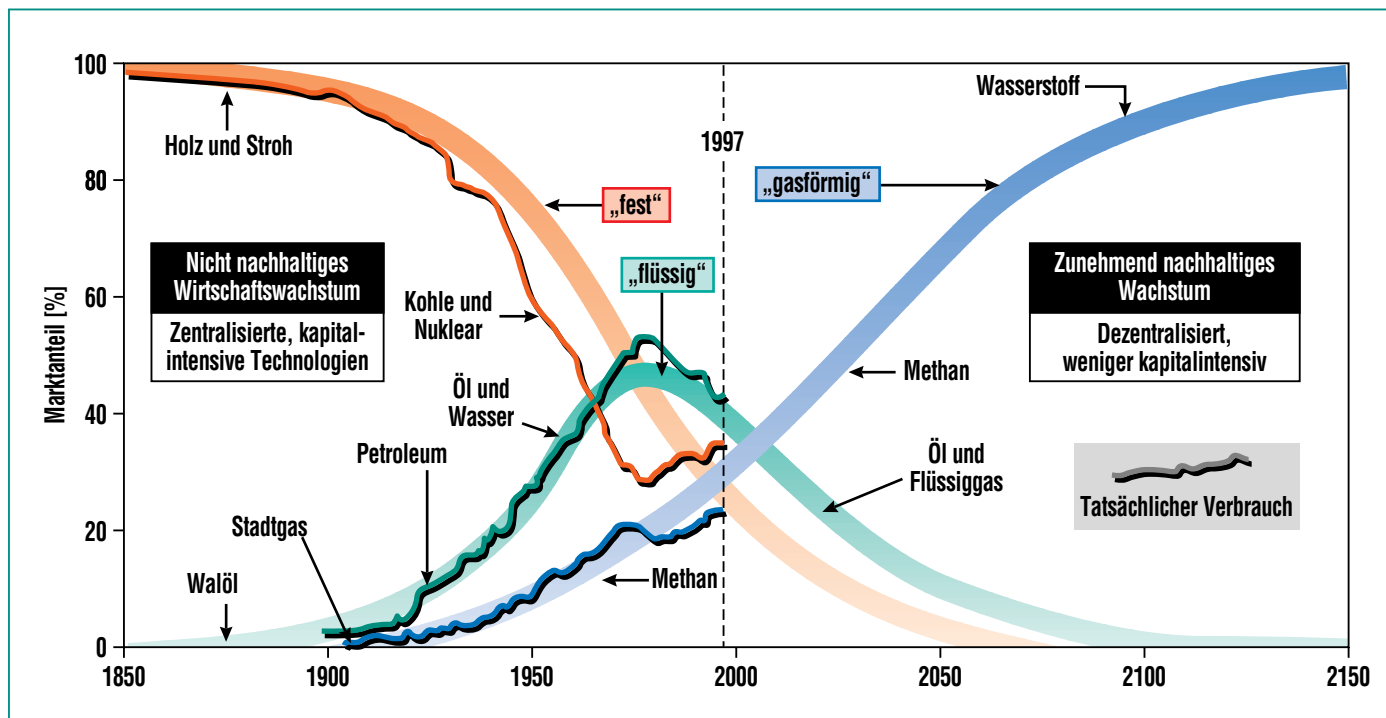


Abb. 1: Globaler Wandel der Energieträger, 1850-2150 [2].

von Verfügbarkeit und Bedarf ein Energiespeicher notwendig.

Durch einen Energiespeicher sind nicht nur Versorgungslücken in der Zeit überbrückbar, auch die durch geographisch ungleiche Ressourcenverteilung bedingte wirtschaftspolitische Spannungen könnten durch einen flexibleren Energiemarkt, bei dem die Produktion und Verbrauch stärker entkoppelt und dezentralisiert sind, gemildert werden.

Wasserstoff ist ...

... 1766 vom englischen Chemiker Henry Cavendish entdeckt worden. Benannt wurde er von Antoine Lavoisier im Jahr 1787 als hydro-gène (hydro = Wasser, griechisch; genes = erzeugend), sinngemäß: „Wasser-Bildner“.

... mit nur einem Proton und einem Elektron das leichteste der chemischen Elemente. Unter Normalbedingungen liegt er nicht in atomarem, sondern im molekularem Zustand als H_2 vor.

... das weitest verbreitete Element im Universum und auf der Erde. Dort kommt es im wesentlichen nur in chemisch gebundener Form, z. B. im Wasser oder in allen organischen Verbindungen vor.

... ungiftig, farb- und geruchlos und verbrennt mit Sauerstoff zu reinem Wasser.

... nicht gefährlicher als alle anderen Energieträger, wenn seine besonderen Eigenschaften berücksichtigt werden.

... keine „Energiequelle“ sondern ein Energieträger, und als solcher eher dem Strom vergleichbar.

... einfach aus nahezu allen anderen Energieträgern bzw. -formen erzeugbar. Mit Elektrolyseuren lässt sich relativ effizient Strom in Wasserstoff und mit Brennstoffzellen Wasserstoff in Strom wandeln.

... ein Energiespeicher und ergänzt daher den breit genutzten Energieträger Strom.

Diese Eigenschaften projiziert auf den zuvor geschilderten Zusammenhang machen die Attraktivität von H_2 deutlich. Die Notwendigkeit für eine nachhaltige, faire Energiepolitik und die zunehmende Verknappung, d.h. Verteuerung der fossilen Energieträger **induzieren die Vision einer Wasserstoffwirtschaft, als ein System der Energieversorgung, das als handelbaren Energieträger Wasserstoff verwendet** [3] (Abb. 2).

Die Bestandteile einer Wasserstoffwirtschaft

Produktion

Wasserstoff wird schon heute kommerziell in einem erheblichen Umfang erzeugt (500 Mrd Nm^3 pro Jahr). Ein wesentlicher Anteil hat dabei die Petrochemie, wo jedoch der erzeugte Wasserstoff unmittelbar wieder zur Raffinerie verbraucht wird. Geringere Mengen werden für die Raumfahrt, für chemische Produktionsverfahren wie zur Düngerherstellung und für die Halbleiterindustrie produziert.

In der Wasserstoffwirtschaft wird, ähnlich wie beim Strom, unterschieden zwischen „grünem“ H_2 ,

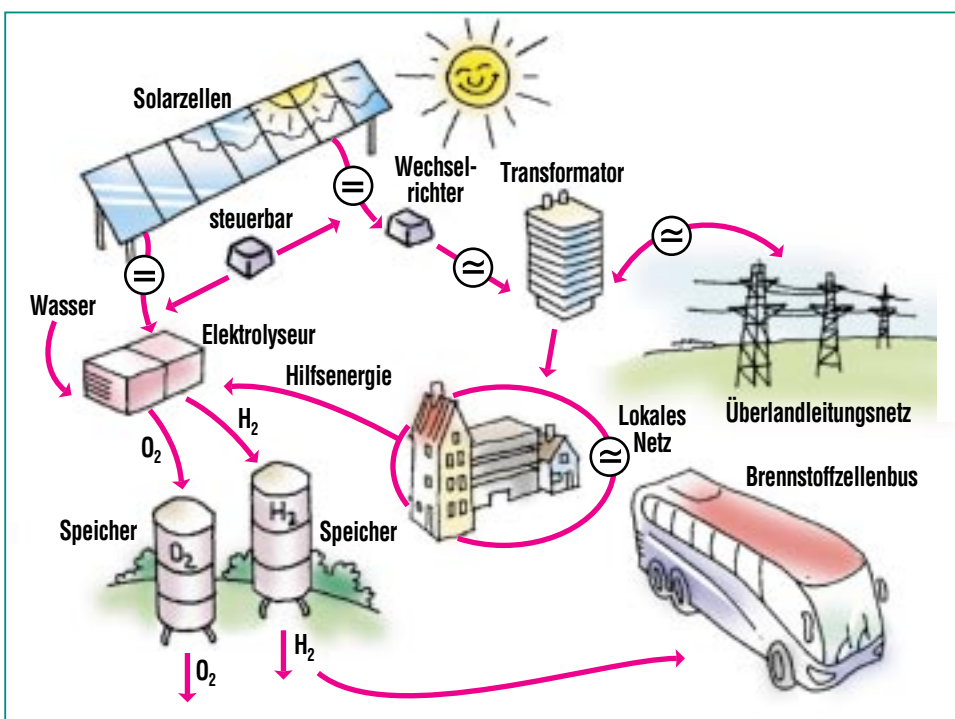


Abb. 2: Skizze einer Wasserstoffwirtschaft [9].

der aus erneuerbaren Quellen wie Sonne („solarer Wasserstoff“), Biomasse (Schmieder et al [4]) oder Wind stammt, „schwarzem“ H₂ aus fossilen Rohstoffen und kerntechnisch produzierten Wasserstoff.

Der zunehmend grüne Anteil fördert eine Dezentralisierung der Versorgungsstruktur, da die erneuerbaren Energieströme stark verteilt auftreten. Diese Dezentralisierung hat mehrere Vorteile:

- Reduzierung der notwendigen Transporte vom Produktionsstandort hin zum Verbraucher,
- Identifizierung der Verbraucher mit der Technologie und
- Stabilisierung der Versorgung durch weniger singuläre Einträge ins Netz.

Der „schwarze“ H₂ wird vorrangig zentral mit einer CO₂-Sequestrierung erzeugt. Für eine absehbare Zeit, zumindest 20 Jahre, wird die zentrale Erzeugung über die Dampfreformierung von Erdgas die günstigste Form der Wasserstoffherzeugung bleiben, Winter [1] und Lovins [5].

In einigen Ländern, insbesondere USA, Japan und Frankreich, werden Verfahren zur H₂-Erzeugung mit chemischen Verfahren (Jod-Schwefel-Zyklus) oder Hoch-Temperatur-Elektrolyse gekoppelt an Spaltreaktoren der neuesten Generation vorangetrieben, siehe IAEA [6, 7]. Auch dieser Pfad reduziert CO₂ Emissionen.

Speicherung

Aufgrund der bisherigen Nutzung sind großskalige H₂-Speicher in öffentlicher Umgebung selten anzutreffen, werden aber für die Verteilung, z.B. über Tankstellen, benötigt. Kleinskalige Speicherung findet bereits heute im wesentlichen in Druckbehältern (200-350 bar) statt.

Aufgrund der geringen Dichte braucht H₂ relativ viel Raum. Insbesondere für mobile Anwendungen muss der Wasserstoff komprimiert, verflüssigt oder in Festkörpern (nanostrukturierte Metallhydride, Kohlenstoffverbindungen,...) gespeichert werden. Hier ergeben sich zur Zeit die größten Herausforderungen an Forschung und Entwicklung.

Verteilung, Infrastruktur, Handel

Momentan findet keine nennenswerte Verteilung von Wasserstoff an private Endkunden statt.

Wasserstoff kann jedoch jetzt schon über moderne Pipelines, Gasnetze, entweder rein oder gemischt mit anderen Brenngasen verteilt werden. Ein historisches Beispiel ist die Verteilung von Stadtgas im Ruhrgebiet zur Straßenbeleuchtung und Hausheizung.

Tankstellen werden mit Wasserstoff-Zapfsäulen ausgestattet sein. Dort wird komprimierter und/oder verflüssigter Wasserstoff für Fahrzeuge angeboten. Die Tankstellen werden mit Tankfahrzeugen versorgt oder haben lokale Reformer oder Elektrolyseure, welche die lokalem Zwischenspeicher füllen.

Da der physische Transport von H₂ aufgrund der geringen Dichte immer ineffizient ist, sollte eher bestehende Infrastruktur z.B. Stromnetze zur Verteilung und die einfache Umwandlung Strom/H₂ genutzt werden.

Verbrauch

Wie zuvor beschrieben wird der größte Teil des Wasserstoffs heute direkt vor Ort produziert und verbraucht. Dies geschieht in einer industriellen, professionellen Umgebung mit geschultem Personal. In einer Wasserstoffwirtschaft kommt erstmals der technische Laie in Kontakt mit H₂. An der Tankstelle wird das H₂-getriebene Fahrzeug betankt, ein Reformer oder Elektrolyseur erzeugt zu Hause den Wasserstoff, der über eine Kraft-Wärme-Kopplung Strom und Wärme für den heimischen Bedarf bereitstellt und ggf. Überschüsse zu Strom gewandelt zu den attraktivsten Zeiten ins Stromnetz einspeist. Batterien könnten durch wieder befüllbare, kleinste H₂-Speicher und Brennstoffzellen ersetzt werden.

Ob zuerst eine breite Anwendung des Wasserstoffs zur Substitution von fossilen Brennstoffen in Fahrzeugen stattfindet, oder ob zunächst stationäre, große Brennstoffzellen zur Kraft-Wärme-Kopplung wesentliche Marktanteile gewinnen, hängt stark davon ab, ob zunächst der Preis für Brennstoffzellen gesenkt oder ob die Lebensdauer für die stationäre Anwendung wesentlich erhöht werden kann.

Wesentliche Aspekte einer Wasserstoffwirtschaft

Das vorige Kapitel lässt sich facettenartig zusammenfassen, wobei die vermittelnde Funktion von H_2 in Abb. 3 wiedergegeben wird.

Wasserstoff ist universell in der Herstellung

Wasserstoff bietet eine praktisch unbegrenzte Vielfalt an Erzeugungsoptionen. Dies erlaubt einen flexibleren, freien und damit stabileren Energiemarkt und reduziert somit die Abhängigkeit von stark ungleich verteilten Primärenergieträgern wie dem Öl,

steigert die Versorgungssicherheit.

Wasserstoff speichert Energie

Für die regenerativen Energiequellen, insbesondere Sonne und Wind mit ihren ausgezeichneten Produktionsspitzen, ist der Wasserstoff ein brauchbarer Speicher, der über Brennstoffzellen oder Kraft-Wärme-Kopplung bei Bedarf Strom in das Netz einspeisen kann. Ein solches Speicherkraftwerk basierend auf einer Brennstoffzelle ist bereits bei Preisverhältnis Spitzenlast-/Grundlast für Strom von über 30 wirtschaftlich attraktiv, siehe Lovins [5].

Wasserstoff transportiert Energie

Für Inselösungen ist der Transport von Wasserstoff kostengünstiger als die Installation und Wartung einer Stromleitung.

Wasserstoff nutzt vorhandene Infrastruktur

Moderne Pipelines bzw. Erdgasverteilungsnetze können auch Wasserstoff, zumindest Gasmischungen mit großen Wasserstoffanteilen transportieren. Die Gasindustrie transportiert auch schon heute gasförmigen Wasserstoff in Druckflaschen oder verflüssigten Wasserstoff in Tanklastzügen. Die einfache Wandlung in Strom und zurück, lässt eine

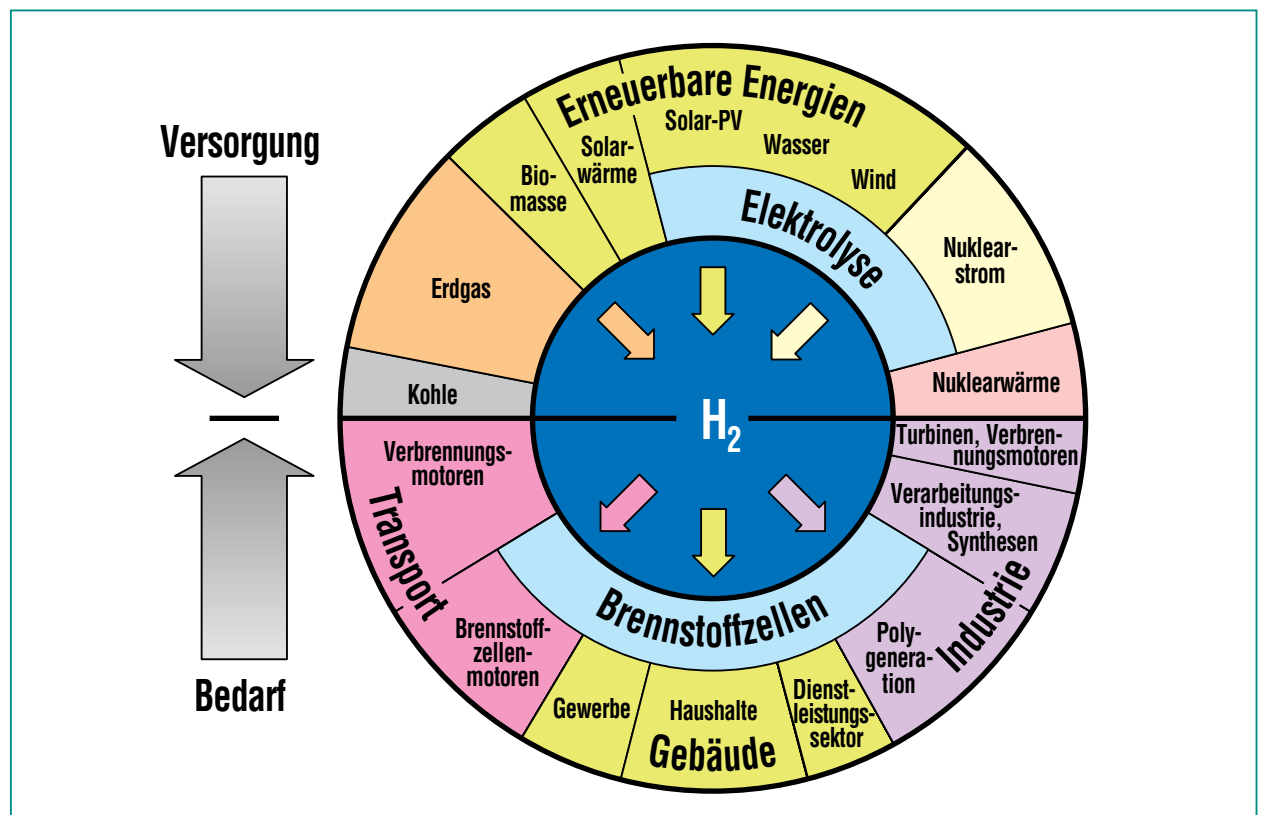


Abb. 3: Wasserstoff: Primärenergiequellen, Energiewandler und -anwendungen [8].

Wasserstoff-Verteilung quasi über das vorhandene Stromnetz zu.

Wasserstoff ist universell in der Anwendung

Wasserstoff kann gut für Transportanwendungen, stationäre Anwendungen und auch für portable Anwendungen genutzt werden.

Bezüglich des Antrieb von Landfahrzeugen belegen die Prototypen aller namhaften Automobilhersteller und insbesondere die Kleinflotten für Demonstrationsvorhaben, z. B. die Brennstoffzellenbusse in CUTE, STEP und ECTOS [10], dass auch heute schon akzeptable Reichweiten und Zuverlässigkeit erreichbar sind.

Wasserstoff bringt Nachhaltigkeit

Brennstoffzellen arbeiten vollständig emissionsfrei, Wasserstoff-betriebene Verbrennungsmotoren und katalytische Brenner emittieren vergleichbar geringe Mengen an Stickoxiden.

Die elektrochemische Umsetzung von H₂ aber auch die einfache Verbrennung erlauben höhere Wirkungsgrade als die heute üblichen Umwandlungsprozesse.

Durch das Nicht-Freisetzen von CO₂ und durch die etwas geringere Emission von Wasserdampf werden die anthropogenen Klimagasfreisetzungen reduziert.

Die Zuverlässigkeit von Brennstoffzellensystemen (keine bewegliche Teile, ...) führt dazu, dass diese bereits erste Notstromgeneratoren in Telekommu-

nikationsfirmen, Krankenhäuser etc. ersetzen.

Ähnliche Qualitäten können auch die H₂-Erzeugungsprozesse für sich in Anspruch nehmen, insbesondere wenn diese auf regenerativen Quellen basieren.

Wasserstoff ist Innovation

Wasserstoff induziert technologische Entwicklungsschübe. Brennstoffzellensysteme kommen neu auf den Markt, neue Infrastrukturen werden geschaffen. Dies stützt wachstumsorientierte Ökonomien in ihrem Bestreben den Wohlstand zu sichern.

Eine ähnliche Wirkung haben die Windenergie-Konvertoren in Dänemark bereits gezeigt [9]. Andererseits haben Innovationen auch gewisse Schwellen zu überwinden. Dies gilt insbesondere für die Akzeptanz.

Wasserstoff braucht Akzeptanz

Die Verwirklichung von Visionen ist nicht nur von technischen und ökonomischen Faktoren abhängig, sie braucht auch die öffentliche Akzeptanz, Schulte et al [11]. Für den Wasserstoff muss ein offensichtlich besseres Sicherheitsniveau gegenüber den konventionellen Energieträgern demonstriert werden und es muss schon früh über den individuellen als auch gesellschaftlichen Nutzen informiert werden. Nur eine offene Informationspolitik, eine profunde Ausbildung bereits in Schulen als auch im technischen Bereich kann die Akzeptanz, u. U. sogar eine Identifizierung mit solch innovativen Technologien positiv beeinflussen.

Kritiker führen oft die Umwandlungsverluste und die dadurch erzeugten Ineffizienzen bei der Benutzung von Wasserstoff als Energieträger ins Feld. Insbesondere die teuren regenerativen Energiequellen würden die Nutzung von Wasserstoff daher verbieten. Diese Argumentation ignoriert jedoch die in den noch jungen Wasserstofftechnologien steckenden Potenziale zur Effizienzsteigerung, den notwendigen Preis für jegliche Art von Energiespeicher und die Vielseitigkeit des Wasserstoffs. Ohne Zweifel werden auch andere „Energievektoren“ in Abhängigkeit von vielen Einflussgrößen, wie z.B. physikalische und ökonomische Effizienz, Ökologie, Sicherheit, etc. Anteil am weiten Spektrum der Energieträger haben. Eine „Energiemonokultur“ ist sicherlich nur unter speziellen Randbedingungen erstrebenswert.

Aussichten

Der zunehmenden Energiebedarf einer wachsenden Weltbevölkerung kann nur fair, flexibel und kooperativ befriedigt werden, d.h. die Energiemärkte wachsen zusammen und der Wasserstoff wird seinen Platz finden. Zur strategischen Planung dieses Prozesses sind internationale Kooperationen notwendig, in denen Forschung, Standardisierung, Entwicklung und Demonstration in praktischen Anwendungen gemeinschaftlich organisiert werden, siehe IPHE [12].

Die notwendigen Strategien werden mit Hilfe von „Road Maps“ detailliert und abgeglichen. Europäische Roadmaps sind in [8]

(siehe Abb. 4) und HyNet [13] dargelegt, die technologische Planung wird in den Dokumenten SRA und DA der HFP [14] entwickelt. Die grundlegenden, gesellschaftlichen Bedingungen wurden in HySociety [15] erörtert.

Der erste Schritt zu einer Wasserstoffwirtschaft wird immer auf etablierten Prozessen und vor-

handenen Technologien aufbauen. Erfahrungsgemäss gibt es bei solchen Strukturänderungen keine revolutionären Veränderungen.

Simultan werden die Technologien zum Erzeugen, Speichern und Nutzen von H₂ weiter entwickelt. Mit steigenden Preisen für Öl und CO₂-Emissionen wird der Über-

gang zu einer Wasserstoffwirtschaft vorangetrieben.

Obwohl alle Überlegungen einen visionären Zeitrahmen von 20-50 Jahren betrachten, gilt es nach Winter [1] zu schliessen: „Visionen brauchen Taten, sonst verkommen sie zu Illusionen“.

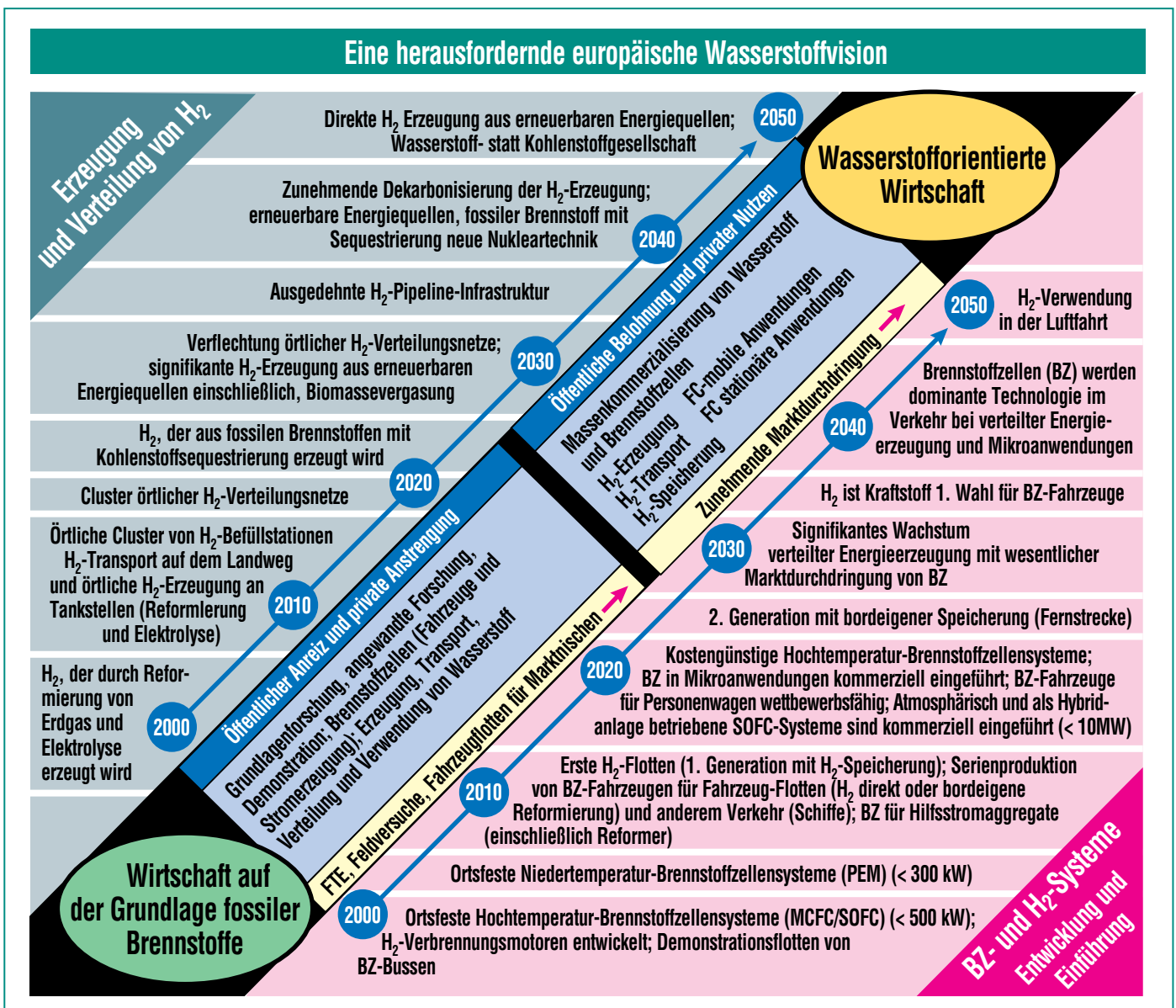


Abb. 4: Vorschlag für eine Europäische Roadmap [8].

Links und Literatur

- [1] C.-J. Winter,
The hydrogen energy economy,
Int Journal of Hydrogen Energy 29
(2004) S. 1095-1097
- [2] S. Dunn,
*Hydrogen Futures: Towards a
Sustainable Energy System*,
Worldwatch Paper 157, August 2001,
ISBN 1-878071-59-9
- [3] [de.wikipedia.org/wiki/
Wasserstoffwirtschaft](http://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstoffwirtschaft)
- [4] H. Schmieder, E. Henrich, E. Dinjus,
*Wasserstoffgewinnung durch
Wasserspaltung mit Biomasse und
Kohle*, Forschungszentrum Karlsruhe,
Wissenschaftliche Berichte
FZKA 6556, 2000
- [5] A. Lovins,
Twenty Hydrogen Myths,
#E03-05, Rocky Mountain Inst, 2003,
(www.rmi.org)
- [6] *Hydrogen as an Energy Carrier and its
production by Nuclear Power*,
IAEA-TECDOC-1085,
ISSN 1011-4289, IAEA, Mai 1999
- [7] *Generation IV Nuclear Reactors*
(www.uic.com.au/nip77.htm)
- [8] *Wasserstoffenergie und
Brennstoffzellen Eine Zukunftsvision*,
EUR 20719 DE Abschlussbericht der
High Level Group, Sonderbericht der
EC, ISBN 92-894-5589-6
([europa.eu.int/comm/research/
energy/nn/nn_pu/
article_1078_en.htm](http://europa.eu.int/comm/research/
energy/nn/nn_pu/
article_1078_en.htm))
- [9] *Hydrogen and its competitors*,
Risø Energy Report 3,
Risø National Laboratory,
Herausgeber Hans Larsen, Robert
Feidenhans'l and Leif Sønderberg
Petersen, Risø-R-1469(EN),
ISBN 87-550-3349-0,
ISBN 87-550-3350-4 (Internet),
ISSN 0106-2840, November 2004
- [10] Fuel Cell Bus Club
(www.fuel-cell-bus-club.com/)
- [11] I. Schulte, D. Hart, R. van der Vorst,
*Issues affecting the acceptance of
hydrogen fuel*,
Int Journal of Hydrogen Energy 29
(2004) S. 677-685
- [12] International Partnership for the
Hydrogen Economy
(www.iphe.net)
- [13] HyNet (2004):
*Towards a European Hydrogen
Energy Roadmap*,
prepared by the HyNet partners
(www.HyNet.info).
- [14] Hydrogen and Fuel Cell Technology
Platform
(www.hfp europe.org)
- [15] HySociety
(www.hysociety.net)