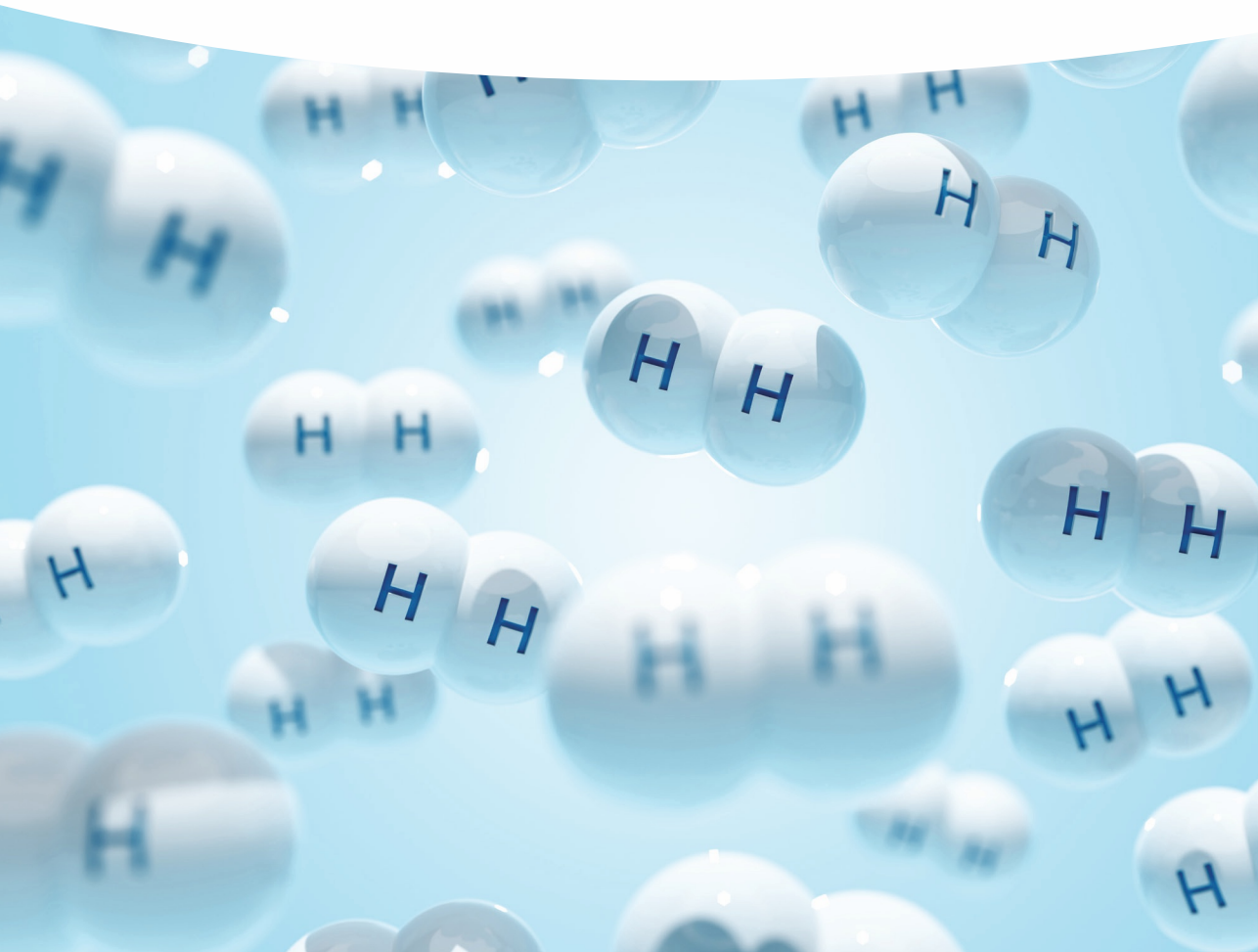
WILEY-VCH

Christian Synwoldt und David Novak

Wasserstoff

Technik - Projekte - Politik



Wasserstoff

Wasserstoff

Technik – Projekte – Politik

Christian Synwoldt und David Novak

WILEY-VCH

Autoren

Christian Synwoldt
Ingenieurbüro Synwoldt
Birkenweg 2
54426 Malborn
Deutschland

Dr. David Novak
Engerode 56
30880 Laatzen
Deutschland

Titelbild
Unter Verwendung eines Bilds von Getty Images, © Jorg Greuel/Getty Images.

Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

© 2023 WILEY-VCH GmbH, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig
Druck und Bindung

Print ISBN 978-3-527-34988-3
ePDF ISBN 978-3-527-83618-5
ePub ISBN 978-3-527-83619-2

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort Werner Diwald *XI*
Geleitwort Folker Hellmeyer *XIII*
Geleitwort Volker Angres *XV*
Geleitwort Manfred Weber *XVII*
Geleitwort Mathis Wackernagel *XIX*
Abkürzungen *XXI*
Chemische Formelzeichen *XXIII*
Physikalische und chemische Größen und Einheiten *XXV*
Präfixe für Einheiten *XXVII*

Teil I Technik *1*

1 Einleitung *3*
1.1 Technische Beschreibung *5*
1.2 Chemische und physikalische Eigenschaften *6*
1.3 Aktuelle Einsatzfelder und Mengengerüste *8*
1.4 Künftige Rolle in einem Energiesystem *10*
1.4.1 Energieversorgung 2020 *10*
1.4.2 Energiedichte und Flächeneffizienz *11*
1.4.3 Energieversorgung 20xx *13*
1.5 Zukünftiger Bedarf an Wasserstoff *20*
Literaturnachweis *22*

2 Herstellung *25*
2.1 Ausgangsstoffe *25*
2.2 Herstellungsverfahren *27*
2.2.1 Dampfreformierung und partielle Oxidation *28*
2.2.2 Pyrolyse *31*
2.2.3 Elektrolyse *33*
2.2.4 Thermolyse *39*
2.2.5 Photokatalyse und photoelektrochemische Prozesse *44*
2.2.6 Biogene Verfahren *46*
2.2.7 Weitere Entwicklungen *51*

2.3 Nachhaltigkeit *53*
2.3.1 Treibhausgasemissionen *55*
2.3.2 CO_2-Abscheidung *62*
2.3.3 CO_2 als Rohstoff *67*
2.3.4 Wärmequellen *69*
2.3.5 Flächenbedarf *70*
2.3.6 Farben des Wasserstoffs *72*
2.3.7 Lebenszyklusanalyse *80*
Literaturnachweis *82*

3 Transport und Speicherung *93*
3.1 Speicher ≠ Speicher *96*
3.2 Speichertechnologien *100*
3.2.1 Kompression *103*
3.2.2 Kryokühlung, Verflüssigung *108*
3.2.3 Sorption (physikalische Bindung) *110*
3.2.4 Einbetten in Kohlenwasserstoffe (chemische Bindung) *114*
3.2.5 Einbetten in Stickstoffverbindungen *122*
3.2.6 Synthetische Kohlenwasserstoffe *126*
3.2.7 Weitere Entwicklungen *139*
3.3 Transport *141*
3.3.1 Gas- und Flüssigkeitsrohrnetze *143*
3.3.2 Druckbehälter *145*
3.3.3 Kryotank *146*
3.3.4 Feste und flüssige Wasserstoffträger *146*
3.4 Fazit *147*
Literaturnachweis *152*

Teil II Projekte – Politik *163*

4 Staatliche Aktivitäten und Grundlagen beim Wasserstoff *165*
4.1 Staatliche und private Institutionen die beim Thema Wasserstoff aktiv agieren *165*
4.1.1 UNO zu Wasserstoff *165*
4.1.2 IPCC zu Wasserstoff *167*
4.1.3 World Energy Council zu Wasserstoff *168*
4.1.4 Hydrogen Council zu ECH2A *170*
4.1.5 Internationale Energieagentur IEA zu Wasserstoff *174*
4.1.6 InnoEnergy-Team zu Wasserstoff *175*
4.1.7 EGHAC *175*
4.1.8 Umweltbundesamt (UBA), BMU und BMVI zu Wasserstoff *177*
4.1.9 Nationaler Wasserstoffrat, Umweltrat, Nationale Wasserstoffstrategie und Bundesregierung zu Wasserstoff und Wasserstoffimporten *178*
4.2 Öffentliche Haltung zu Wasserstoff durch Politik und NGOs auf EU- und deutscher Ebene *185*

4.3 Randthema CO_2-Ausgleichsmechanismen: Wie die EU größere Gerechtigkeit bei Klimaschutzmaßnahmen erreichen will 189
4.4 Agenda 21, Lokale Agenda 21 und das Abkommen von Paris 2015 – was bedeutet es tatsächlich für die Staaten und die Umsetzung? 191
4.5 Staatliche Wasserstoffstrategien im In- und Ausland – einzeln, zusammen und gegeneinander 194
4.6 Diese deutschen Bundesländer und Kommunen sind aktuell, auch mit Konzernen, im Wasserstoffbereich aktiv 196
4.7 Diese Staaten sind aktuell im Wasserstoffbereich aktiv, auch gegeneinander 212
4.8 Diese Beiträge zu den Klimazielen erhoffen sich die Staaten 222
4.9 Diese Beiträge zur Energieversorgung durch Wasserstoff insgesamt oder nach Branchen sind kurz- bis mittelfristig realistisch 224
4.10 Wasserstoff-Importe aus dem Ausland – das ehemalige Solarprojekt Desertec und die Notwendigkeit grünen Wasserstoff 225
4.11 Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase II (NIP) – Maßnahmen der Forschung, Entwicklung und Innovation – Schwerpunkt Nachhaltige Mobilität 232
4.12 Positive und negative staatliche Beiträge zur weiteren technischen und ökonomischen Entwicklung und logistischen Verbreitung (Leitungsnetze/Pipelines) von Wasserstoff in der EU 233
4.13 Beispielhafte Wasserstoffprojekte inklusive Zulieferindustrie und ihre Ziele 242
4.13.1 Die 13 größten Wasserstoffprojekte weltweit 242
4.13.2 Wasserstoffprojekte in Deutschland 247
4.13.3 Wasserstoffprojekte im europäischen Ausland 253
4.13.4 Wasserstoffprojekte im außereuropäischen Ausland 260
4.14 Fazit 267
Literaturnachweis 273

5 Anwendungsbereich Mobilität 291
5.1 Anwendungsbereiche Verkehr: Nutzung und Erwartungshaltung der Hersteller und Käufer 291
5.1.1 Nutzung Wasserstoff bei Lkw, Bussen und Sonderfahrzeugen aller Art 295
5.1.2 Unterschiedlichste Nutzung Wasserstoff bei Pkw und Kfz-Zulieferern, auch im Verbrennungsmotor 301
5.1.3 Nutzung bei Zügen/Schienenverkehr 306
5.1.4 Nutzung von Wasserstoff bei Schiffen 310
5.1.5 Nutzung bei Flugzeugen 314
5.1.6 Sonstige Kooperationen und Entwicklungsprojekte zwischen Konzernen auf internationaler Ebene 316
5.1.7 Schwächen durch technische Nachteile und hohe direkte Kosten 320
5.2 Leistungsfähigkeit/Projekte der einzelnen Hersteller im Kfz-Bereich, Zukunftsausblick Mobilität für Hersteller und Anwender 320
5.3 Die Brennstoffzelle aus Marktsicht: ihre Hersteller, Kosten und Marktchancen 325
5.4 Wasserstofftankstelleninfrastruktur in der EU und in D für Kfz, Züge und andere Anwender 330

5.5 Eine Betrachtung der E-Fuels *333*
5.6 Vermutete oder bekannte volks- und betriebswirtschaftliche Vorteile und Erträge (Problematik lokale und externe Effekte) *335*
5.7 Vermutete oder bekannte volks- und betriebswirtschaftliche Nachteile und Kosten (Problematik externe Kosten) *336*
5.8 Fazit *338*
Literaturnachweis *343*

6 Ökonomischer Rahmen rund um Wasserstoff *353*
6.1 Entwicklungspfade für Kosten und Preise zur Herstellung und Lieferung/Logistik von Wasserstoff *354*
6.2 Einflussfaktoren wie nationale CO_2-Bepreisung, EEG-Umlage, europäischer Emissionshandel, Rohstoffpreise und weitere Parameter wie Standortfaktoren *361*
6.3 Generelle Problematik der externen Effekte bezogen auf den anthropogenen Klimawandel und deren Auswirkungen auf Kosten und damit Preise *362*
6.4 Markt für Wasserstoff in Deutschland, der EU und der Welt *364*
6.5 Wasserstoff an den Börsen *368*
6.5.1 Wasserstoff aus Sicht von Investmentfirmen *369*
6.5.2 Wasserstoff aus Sicht der Zulieferindustrie *372*
6.6 Evolution und Disruption von Geschäftsmodellen (verschiedener Branchen) durch den Einsatz von Wasserstoff *373*
6.7 Herstellung und Vertrieb von Wasserstoff in geografisch „abgelegenen“ Staaten *380*
6.8 Anwendung von Wasserstoff außerhalb der Mobilität wie Heizungen, Stahl- und Zementindustrie, chemische Industrie, Raffinerien, Energiespeicherung sowie Kombipakete *385*
6.9 Fazit *394*
Literaturnachweis *398*

7 Regulatorischer Rahmen, die Situation aus juristischer Sicht *405*
7.1 Fehlanreize und Hemmnisse bei Vorgaben und Normen durch rechtlichen Rahmen *406*
7.2 Aktuelle/optimierte rechtliche Rahmenbedingungen für Wasserstoffhersteller, um wirtschaftlich nachhaltig erfolgreich zu sein *408*
7.3 Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen auf EU-Ebene, europäischer Rechtsrahmen inklusive RED II *409*
7.4 Recht, Gesetze und Verordnungen zum Wasserstoff auf Bundesebene, EnWG und EEG 2017 *410*
7.5 Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen zur Förderung von Pilot- und Demonstrationsvorhaben der Wasserstoffwirtschaft (Wasserstoffrichtlinie) am Beispiel des Bundeslands Niedersachsen, VORIS 28010 (niedersächsisches Vorschrifteninformationssystem) *416*
7.6 Rechtliche Rahmenbedingungen für Hersteller und Anwender von wasserstoffbasierten Produkten *418*
7.7 Abänderung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) Richtung Wasserstoff, Umbau des EEG zu einem einheitlich genutzten europäischen Instrument *421*

7.8 Ausweitung der Besonderen Ausgleichsregelung (BesAR) des EEG *425*
7.9 Fazit *426*
Literaturnachweis *428*

8 Politische Handlungsfelder *431*
8.1 Hintergrundwissen zum Thema Wasserstoff bei Politik, Umweltorganisationen und Medien *431*
8.2 Internationale Denk- und Handlungsansätze bei Wasserstoff *433*
8.2.1 Umsetzung von Wasserstoffdenken und -handeln in der Zweiten, Dritten und Vierten Welt *434*
8.2.2 Umsetzung von Wasserstoffdenken und -handeln in Russland und China *435*
8.2.3 Umsetzung von Wasserstoffdenken und -handeln in den Industrieländern (maßgeblich G7 und EU) *439*
8.2.4 Nationale Wasserstoffstrategie (NWS): 38 (staatliche) Maßnahmen zur Begleitung und Unterstützung des Aufbaus einer Wasserstoffwirtschaft in Deutschland *447*
8.3 BMVI und BMWi bringen 62 Wasserstoffgroßprojekte auf den Weg *455*
8.4 Politisch angestrebte Klimaneutralität in Deutschland 2045/EU bis spätestens 2050 *457*
8.5 Nationale Strategieansätze u. a. Stiftung H2Global, internationaler Klimaclub und vom BMWi „20 konkrete Vorschläge zur Stärkung von Klimaschutz und Wirtschaftskraft“ *460*
8.5.1 Wettbewerbsposition von Deutschland im Vergleich zu anderen vergleichbaren Staaten *464*
8.5.2 EU-Förderprogramme JIVE, MEHRLIN und Interreg A und ihre Schwerpunkte *467*
8.5.3 Hydrogen Roadmap Europe *468*
8.5.4 Lösungsansatz: Technologie-Offenheit bei der Verfolgung und Erreichung von Klimaschutzzielen *470*
8.6 Beispiele für Forderungen an den Staat bezüglich Wasserstoff *475*
8.7 Realistisch beurteilte Situation 2021/2022 als Fragen und Antworten (Q & A) *478*
8.8 Fazit *479*
Literaturnachweis *483*

9 Ergebnis einer selbst durchgeführten kleinen Umfrage im Wasserstoffbereich *489*
9.1 Art und Vorgehensweise der Umfrage *489*
9.2 Antworten in schriftlicher/verbaler und numerischer Form der befragten Fachleute *490*
9.3 Kernaussagen des Wasserstoffunternehmers Jens Asmuth der Firma JAG *503*
9.4 Fazit der eigenen empirischen Untersuchung *504*

10 Finales Fazit und Ausblick zu den Kapiteln 4 bis 9 (Stand Ende 2021) *507*

Stichwortverzeichnis *511*

Geleitwort Werner Diwald

Aufbruch in eine grüne Wasserstoff-Marktwirtschaft

Grüner Wasserstoff ist in der öffentlichen Debatte nicht mehr wegzudenken. Bis 2030 gilt es nun die Klimaemissionen in allen Sektoren um mindestens 55 % zu senken. Grüner Wasserstoff wird hierbei eine Schlüsselfunktion einnehmen müssen, um die erneuerbare Energieversorgung wirtschaftlich und nachhaltig zu jedem Zeitpunkt und in jeglicher Anwendung zu gewährleisten.

Mit der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) hat die Bundesregierung 2020 sicherlich einen lobenswerten und wichtigen Schritt in die richtige Richtung gemacht. Nun ist die Industrie auf Rahmenbedingungen angewiesen, die einen nachhaltigen wirtschaftlichen Betrieb erlauben. Die Bundesregierung hat die Aufgabe, bis spätestens 2024 die regulatorischen Rahmenbedingungen für eine prosperierende Wasserstoff-Marktwirtschaft zielstrebig und konsequent zu schaffen. Sie hat es in der Hand, ob Deutschland sich in der zukünftigen Wasserstoffindustrie und -wirtschaft an die Spitze eines globalen Marktes mit enormem Potenzial setzen kann.

Eine Vielzahl von Experten gehen davon aus, dass allein Deutschland bis 2045 einen Mindestbedarf an grünem Wasserstoff von 700 TWh/a (EU 2000 TWh/a) für eine nachhaltige, wirtschaftliche und versorgungssichere Energiewirtschaft haben wird. Zur Deckung dieser Nachfrage ist neben dem dringenden Aufbau einer heimischen Produktionskapazität bis 2030 von mindestens 10 GW und bis 2045 von mindestens 40 GW der Import von mindestens 600 TWh/a grünem Wasserstoff erforderlich. Global steht ein jährliches Energie-Markthandelspotenzial von über 2000 Mrd. Euro zur neuen Umverteilung an. Damit verbunden ist ein Investitionsvolumen von mehr als 6000 Mrd. Euro bzw. einem jährlichen Umsatz im Maschinen- und Anlagenbau von 300 Mrd. Euro. Deutschland braucht jetzt den politischen Aufbruch in das Zeitalter einer grünen Wasserstoff-Marktwirtschaft. Diese gilt es konsequent politisch einzuleiten und zu begleiten.

Die grüne Wasserstoff-Marktwirtschaft bietet aber nicht nur für Deutschland enorme Chancen, sondern ebenso für die Europäische Union. Das gemeinsame Ziel muss es sein, eine europäische Wasserstoff-Wirtschaftsunion aufzubauen. Der innereuropäische Handel von grünem Wasserstoff eröffnet gerade unseren südosteuropäischen und südlichen Mitgliedsstaaten eine Chance der wirtschaftlichen Stabilisierung. Aber leider fehlt es auch der EU-Wasserstoffstrategie an der erforderlichen Dimension, die der zukünftigen globalen

Rolle des grünen Wasserstoffs gerecht wird. Deutschland sollte hier mehr Verantwortung und Gestaltungswillen übernehmen.

Sicherlich stellen uns die globalen Klimaziele vor große Herausforderungen und verlangen uns einen der größten industriellen Revolutionsprozesse ab. Es ist Zeit für den gemeinsamen Aufbruch in die Ära der grünen Wasserstoff-Marktwirtschaft.

Werner Diwald

Vorstandsvorsitzender, Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband, Berlin

Geleitwort Folker Hellmeyer

Wasserstoff mit starkem Zukunftspotenzial

Die Welt befindet sich in einer ökonomischen Zeitenwende, die im Hinblick auf Breite, Tiefe und Tempo einmalig ist. Die heutige Zeitenwende bedient den Produktionsfaktor Boden im Kontext mit Umwelt und wirkt sich auf die Produktionsfaktoren Kapital und Arbeit aus. Das Umweltthema bewegt die Welt seit Jahrzehnten. Aber erst in den letzten Jahren wurde sukzessive ein neues globales Bewusstsein etabliert. Der Druck auf die Politik nahm latent zu und die internationale Politik reagierte losgelöst davon, welche Regierungsformen dominierten oder dominieren.

Diese Entwicklung pro ESG (Umwelt-, Sozial- und Unternehmensführungskriterien) ist zunächst einem Top-down-Ansatz geschuldet, der aber immer stärker von einem „Bottom-up"-Prozess begleitet wird. Das Thema der Finanzierung der „grünen Wende" findet sich in allen bedeutenden westlichen Zentralbanken.

In der Folge sind wir heute mit eklatanten Neuausrichtungen konfrontiert. An den Finanzmärkten wurden ESG-Kriterien verankert, die eine immer prominentere Rolle in der internationalen Kapitalallokation einnehmen. Die großen Kapitalsammelstellen steuern die Portfolios immer verstärkter nach diesen Standards, da die Kunden es ihnen abverlangen. Laut einer Untersuchung von PwC Luxemburg werden die europäischen ESG-Vermögen bis 2025 auf 5,5–7,6 Billionen Euro steigen. Das entspräche einem Anteil von 41 bis 57 % des gesamten Fondsvermögens Europas. Der Kapitalmarkt wird perspektivisch „grün".

Wirtschaft und Gesellschaft mit ihren Prozessen hängen an dem Thema Energie. Es ist bezüglich der als dringend definierten Klimafragen das im Vordergrund stehende Thema. Der Abschied von fossilen Brennstoffen wird forciert. Derzeit findet eine primäre Neuausrichtung in Richtung Elektromobilität statt. Bezüglich der infrastrukturellen Anforderungen auf globaler Ebene kann das Thema Elektromobilität jedoch nicht ausschließlich als Lösungsweg definiert werden. Das gilt auch bezüglich des mit Elektromobilität verbundenen Verbrauchs endlicher Ressourcen.

Das Thema Wasserstoff bietet als Alternative mannigfaltige Lösungsansätze als Mobilitätsanker, aber auch als Speichermedium. Auch stellt sich bei Wasserstoff nicht die Frage hinsichtlich endlicher Ressourcen. Damit liegt hier als Alternativtechnologie ein völlig anderes Grundprofil als bei der Elektromobilität vor. Bei der Bahn wird Wasserstoff bereits genutzt. Vor Helgoland wird bis 2026 das Demonstrationsprojekt „H2Mare" errichtet.

Die Unternehmen Siemens Energy, RWE und Salzgitter-Mannesmann sind mit weiteren 33 Partnern verantwortlich.

International ist beim Thema Wasserstoff eine hohe Dynamik erkennbar. Unternehmen wie Ballard Power, Plug Power oder Siemens Energy stehen heute im Fokus der Finanzmärkte. Die globalen Wirtschaftsstrukturprogramme, unter ihnen das 750 Mrd.-Euro-Paket der EU und das mindestens 1,5 Billionen US-Dollar schwere US-Infrastrukturpaket, bedienen alle auch das Thema der Energiewende.

Ich wünsche diesem Buch eine breite Leserschaft, denn das Thema verdient eine hohe Aufmerksamkeit und eine weite Verbreitung. Wasserstoff hat eine gute Zukunft!

Folker Hellmeyer

Langjähriger Chefvolkswirt und -analyst
bei führenden deutschen Bankhäusern

Geleitwort Volker Angres

Gesucht: Die Wasserstoff-Visionäre

Nichts ist schwerer vorhersagbar als die Zukunft. Sagt man. Anhaltspunkte in der Gegenwart allerdings können schon eine grobe Richtung skizzieren. Aus einzelnen Ereignissen werden mitunter perspektivische Entwicklungen, dann gefestigte Trends. Für die sogenannten erneuerbaren Energien kann man das wohl so annehmen. Doch wie genau wird er aussehen, der verlässliche Weg hinein in eine wirklich nachhaltige Energiezukunft? Wasserstoff, egal ob grau, blau oder gar grün, komme da schon überhaupt nicht infrage, lassen sich nicht wenige Kritiker vernehmen. Wo sollen, bitte schön, die Unmengen Ökostrom für die Elektrolyse des grünen, also klimaneutralen Wasserstoffs herkommen? Gemeint ist das physikalisch-chemische Verfahren, um Wasser in seine Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff zu zerlegen. Außerdem seien bei der Wasserstoffherstellung hohe Umwandlungsverluste zu beklagen und es sei zudem viel zu teuer. Deutschland würde es außerdem nie schaffen, Wasserstoff auch nur annährend zur Deckung des Eigenbedarfs herzustellen.

So. Wasserstoff ist demnach also raus aus dem Rennen. Wenn man dieser Sichtweise folgt. Schauen wir einfach mal genauer hin: Deutschland ist alles andere als energieautark. Die Energieimporte sind deutlich angestiegen: 2002 mussten wir 60 % unserer Primärenergieträger importieren, 2020 waren es schon knapp 70 % (Quelle: Umweltbundesamt). Heißt: Warum nicht auch eines Tages Wasserstoff importieren? Ungewöhnlich wäre das nicht.

Dann die Elektrolyse: schlechter Wirkungsgrad und alles viel zu teuer. Mit heutigen Maßstäben die Zukunft erobern – das wird kaum gelingen. Wieder hilft der genauere Blick. Diesmal schauen wir in die Großlabore des Forschungszentrums Jülich. In einem 14 m hohen Raum steht dort die größte künstliche Sonne der Welt. Mit den 149 Strahlern schafft sie punktuell das 10 000-Fache von dem, was an Sonnenlicht auf der Erde ankommt – und Temperaturen bis 3000 °C. Die künstliche Sonne ist das Herzstück eines völlig neuen Verfahrens, um Wasserstoff herzustellen: nur mit Licht, ohne Strom und im Moment allerdings noch mit Speziallampen. Weil es für die Forschungsarbeit praktischer ist, mit der künstlichen Sonne zu arbeiten. Sie lässt sich nach Belieben ein- und ausschalten. Später soll dann die „echte" Sonne als Lichtquelle dienen. Im Labor funktioniert dieses revolutionäre Verfahren schon. Jetzt wird in industriell nutzbare Größenordnungen hochskaliert.

Was „Politik" jetzt erkennen muss: Derartige Projekte verdienen die bestmögliche Unterstützung, ohne Wenn und Aber. Denn Wasserstoff ist ein universeller Energieträger, er kann Motoren und Flugzeugturbinen antreiben, er kann zu Strom werden und man kann

mit ihm heizen. Und er „passt“ unter bestimmten Umständen auch in das vorhandene Erdgasnetz, eine Infrastruktur ist also schon angelegt. Der Nationale Wasserstoffrat (NWR) fordert folgerichtig konkrete Ausbauziele für die Jahre 2025 und 2035. Denn vor allem der Schwerlastverkehr könnte in naher Zukunft mit Wasserstoff fahren. Auch ein klimaverträglicher Luftverkehr ist ohne grünen Wassersoff und daraus abgeleitete CO_2-neutrale Kraftstoffe nicht denkbar. So gab es Rückenwind für Wasserstoff als ein Kernelement des künftigen Energiemix im November 2020. Glasgow, Schottland: Das Schlussdokument der 26. UN-Klimakonferenz, der „Glasgow Climate Pact“, fordert alle Länder auf, den Ausbau der erneuerbaren Energien drastisch zu steigern. Ein universeller Energiespeicher wie Wasserstoff hilft, z. B. eine 24/7-Strom-Rundumversorgung per Windkraft und Photovoltaik überhaupt erst zu ermöglichen. Und Glasgow machte den Weg auch frei für den Start internationaler Kooperationen zum Klimaschutz. Eine Steilvorlage: Wasserstoffkooperationen mit den Ländern, die viel mehr Sonne haben als wir. Sicher bringen dann die Jülicher Forscher sehr gerne ihr Know-how mit. Neue Geschäftsfelder tun sich auf.

Man muss kein Hellseher sein: Das Kohlezeitalter neigt sich – langsam, aber sicher – dem Ende zu. Dass es so kommen würde, hat der visionäre Schriftsteller Jules Verne bereits 1874 seinen Helden im Roman *Die geheimnisvolle Insel* sagen lassen. Der Ingenieur Cyrus Smith erklärt seinen Gefährten die Energieversorgung der Zukunft: „Ich bin davon überzeugt, meine Freunde, dass das Wasser dereinst als Brennstoff Verwendung findet, dass Wasserstoff und Sauerstoff, seine Bestandteile, zur unerschöpflichen und bezüglich ihrer Intensität ganz ungeahnten Quelle der Wärme und des Lichts werden. (…) Ich glaube also, dass man, wenn unsere jetzigen Kohlenschächte einmal erschöpft sein werden, mit Wasser heizen wird. Das Wasser ist die Kohle der Zukunft.“

Christian Synwoldt und David Novak haben das erkannt. Ohne Zweifel gehören sie heute zu den Wasserstoff-Visionären. Ich wünsche ihrem Buch den größtmöglichen Erfolg. Und ich hoffe auf intensive Impulse für eine nachhaltige Energiezukunft.

Volker Angres

Leiter ZDF-Umweltredaktion, Mainz

Geleitwort Manfred Weber

Die Europäische Union hat sich ein ambitioniertes Ziel gesetzt: Im Jahr 2050 soll Europa der erste klimaneutrale Kontinent werden. Deutschland möchte dieses Ziel noch früher erreichen.

Die Ziele sind also definiert – allein der Weg dahin ist offen. Und das ist auch richtig so: Nicht Politik soll den Menschen vorschreiben, welche CO_2-freie Technologie sie nutzen möchten, sondern die Verbraucher und der Markt sollen dies entscheiden. Politik hat für technikneutrale Rahmenbedingungen zu sorgen.

Eine der eingesetzten Lösungen ist hier die Wasserstofftechnologie, deren Schwächen und Stärken in vorliegendem Werk analysiert und Lösungen zu einem flächendeckenden Einsatz aufgezeigt werden. Neben E-Mobilität, (Bio-)Gas und synthetischen Kraftstoffen ist Wasserstoff eine Säule im Zeitalter der Dekarbonisierung. Und sie ist vielleicht die zentrale Antwort auf die Frage, wie künftig energieintensive Industriebereiche mit Energie versorgt werden.

Wir erleben zurzeit eine enorme Dynamik in Forschung und Entwicklung rund um das Thema Wasserstoff. Die breite Dynamik ist auch dringend notwendig: heute werden in der EU rund 7,8 Mio. t Wasserstoff verbraucht. Bis zum Jahr 2050 soll sich der Bedarf verzehnfachen.

Nur sogenannter grüner Wasserstoff wird uns helfen, die CO_2-Neutraltität zu erreichen. Hierzu bedarf es des Einsatzes effizienter Elektrolyseure, eines sicheren Versorgungs- und Vertriebsnetzes und gleichzeitig international wettbewerbsfähiger Preise.

Letztlich werden wir uns auch mit der Frage beschäftigen müssen, ob wir innerhalb der EU in der Lage sind, uns mit Wasserstoff ausreichend selbst zu versorgen. Oder ob wir uns Partner suchen, beispielsweise in Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung, um dort grünen Wasserstoff zu produzieren und nach Europa zu liefern. Dies wäre auch eine große Chance für die EU, beispielsweise afrikanische Länder und Regionen an sich zu binden und dort im Gegenzug einen Beitrag zum Wohlstand zu leisten und Fluchtursachen zu bekämpfen.

Nutzen wir die Chancen, die Wasserstofftechnologie bietet, um den weltweiten Energiebedarf ökologisch zu bedienen. Und haben wir den Mut, dieses Thema auch groß zu denken!

Manfred Weber

Physikingenieur (Technischer Umweltschutz), seit 2004
Mitglied des Europäischen Parlaments und seit 2014
Vorsitzender der Fraktion der Europäischen Volkspartei (EVP),
Brüssel

Geleitwort Mathis Wackernagel

Green Hydrogen: A Second Chance for Humanity

If green hydrogen replaced **1/3** of airplane fuel and **1/2** of industrial fossil fuel demand, Earth Overshoot Day (www.overshootday.org) would move by 18 days. This is massive and shows that green hydrogen can play a significant role in the much needed sustainability transition. What's promising about green hydrogen is not only that it gets produced from renewable sources, but it also enables economic progress, wealth, jobs, and health. Hydrogen is primarily an energy carrier, like electricity. Electricity is a versatile energy carrier that allows to shift our energy demand to renewable resources while also allowing for high flexibility in use. But this may also be delivered by green hydrogen, also made from renewables, thereby avoiding greenhouse gas emissions. Therefore, parallel to electricity, green hydrogen may well be a second complementary energy carrier. In fact, for many applications hydrogen is even better suited than electricity, as David Novak points out in this important book.

But a successful future will most likely include green hydrogen because it enables us to store excess energy from sources like wind, water, and sun, and can be used regardless of when or where it was produced. This is essential, as electricity production by wind, water, and sun naturally varies with daytime, weather, and season. Since electricity needs to be used instantaneously, hydrogen is not only a carrier, but also energy storage, more like electric batteries or pumped-storage hydroelectricity.

In this regard, hydrogen is especially relevant in sectors such as transportation and logistics, as well as in specialty processes requiring high temperatures and high energy densities. In some domains, hydrogen is clearly the more effective choice than electric batteries, for instance in long-distance applications such as intercontinental flights or shipping. The key reason is that stored hydrogen has a significant weight advantage over electric batteries. For this very reason, Scotland is experimenting with hydrogen ferries. Whether hydrogen is overall a more effective energy carrier than electric batteries is still to be determined, but it is wise to create competition between technologies, given what is at stake. Most likely both will be needed because of their complementary characteristics.

Where can we expect the fastest transformation?

The simplest transformation is in industry: the number of users is limited (perhaps to just several hundred per country), and hydrogen works wherever coal or natural gas has been used prior.

The most popular application for green hydrogen though is mobility: it is simple to explain, the investments are focused (although sometimes technologically challenging such as planes, which have complex safety procedures). Public acceptance might be high, and it is a media-friendly subject, particularly because exhaust from any well-designed hydrogen machine is merely water vapor.

When it comes to widespread implementation, the cost of green hydrogen and the lack of ample renewable energy continue to be limiting factors. While prices have been dropping, green hydrogen still is about twice as expensive to produce per unit of energy as gasoline for cars, even including taxes. But technological advances could cut those costs significantly. Clearly, green hydrogen needs more attention, and this book is a welcome addition to the much required public discussion.

Dr. Mathis Wackernagel

Physikingenieur (co-creator of Ecological Footprint accounting,
President of Global Footprint Network (Earth Overshoot Day),
Oakland, CA 94612, USA

Abkürzungen

Abkürzung	Langtext (international)	Langtext/Beschreibung (deutsch)
aFRR	automatic frequency restoration reserve	Sekundärregelleistung
AER	absorption-enhanced reforming	absorptionsgestützte Reformierung
APR	aqueous phase reforming	Wasserphasen-Reforming
ADR	agreement concerning the international carriage of dangerous goods by road	Gefahrstoffverordnung für den Straßenverkehr
ATR	autothermal reforming	autotherme Reformierung
ADN	accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voie de navigation intérieure	Gefahrstoffverordnung für die Binnenschifffahrt
BtL	biomass to liquid	Verfahren zur Herstellung von flüssigen Energieträgern aus Biomasse
CAPEX	capital expenditures	Investition
CDA	carbon direct avoidance	Verfahren zur Vermeidung von CO_2-Emissionen
CNG	compressed natural gas	komprimiertes Erdgas (Methan)
CCS	carbon dioxide capture and storage	CO_2-Abtrennung und Speicherung
CCU	carbon dioxide capture and utilization	CO_2-Abtrennung und Nutzung
CANDU	Canada Deuterium Uranium	Reaktortyp für Natururan
CtL	coal to liquid	Verfahren zur Herstellung von flüssigen Energieträgern aus Kohle
DALY	disability adjusted life years	verlorene gesunde Lebensjahre
DME	dimethyl ether	Dimethylether
DMFC	direct methanol fuel cell	Direktmethanolbrennstoffzelle
ETBE	ethyl-*tert*-butylether	Ethyl-*tert*-Butylether
EUA	European Emission Allowance	Erlaubnis zur Emission einer 1 t CO_2, CO_2-Zertifkat
FCR	frequency containment reserve	Primärregelleistung
GEMIS		Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme; Software zur Ökobilanzierung
GtL	gas to liquid	Verfahren zur Herstellung von flüssigen Energieträgern aus Gasen (Erdgas)
GWP	global warming potential	Treibhauspotenzial
HTC	hydrothermal carbonization	hydrothermale Vergasung

Abkürzung	Langtext (international)	Langtext/Beschreibung (deutsch)
HT-PEMFC	high-temperature polymer electrolyte membrane fuel cell	Hochtemperatur-Polymermembran-Brennstoffzelle
IBU	inorganic building units	anorganische Verbindung aus Übergangsmetallen
IMDG	international maritime dangerous goods code	Gefahrstoffverordnung für den internationalen Schiffverkehr
LCA	life cycle analysis	Lebenszyklusanalyse
LOHC	liliquid organic hydrogen carrier	flüssiger organischer Wasserstoffträger
LNG	liquified natural gas	verflüssigtes Erdgas (Methan)
LPG	liquid petrol gas	Gemisch aus Propan, Butan
mFFR	manual frequency restoration reserve	Minutenregelleistung
MCFC	molten carbonate fuel cell	Schmelzkarbonatbrennstoffzelle
MOF	metal-organic framework	Metallorganische Gerüstverbindung
MTA	methanol to aromatics	Verfahren zur Herstellung von Aromaten aus Methanol
MTBE	methyl-*tert*-butylether	Methyl-*tert*-Butylether
MTO	methanol to olefines	Verfahren zur Herstellung von Olefinen aus Methanol
MTP	methanol to propylen	Verfahren zur Herstellung von Polypropylen aus Methanol
OPEX	operational expenditures	Betriebskosten
PEM	proton exchange membrane	Protonen-Austausch-Membran
POX	partial oxidation	partielle Oxidation
CPOX	catalytical partial oxidation	…mit Katalysator
TPOX	thermal partial oxidation	…ohne Katalysator
ppm	parts per million; $1:10^6$	1 : 1 Million
ppb	parts per billion; $1:10^9$	1 : 1 Milliarde
PtC	power to chemicals	Verfahren zur Herstellung von Chemikalien mit Strom
PtF	power to fuel	Verfahren zur Herstellung eines flüssigen Energieträgers mit Strom
PtG	power to gas	Verfahren zur Herstellung eines gasförmigen Stoffes mit Strom
PtH	power to heat	Verfahren zur Wärmeerzeugung aus Strom
PtL	power to liquid	Verfahren zur Herstellung eines flüssigen Stoffes mit Strom
RID	règlement concernant le transport international ferroviaire de marchandises dangereuses	Gefahrstoffverordnung für den Schienenverkehr
SOEC	solid oxide electrolyzer cell	Feststoffelektrolysezelle
SOFC	solid oxide fuel cell	Feststoffbrennstoffzelle
SCR	selective catalytical reduction	selektive katalytische Reduktion
SMR	steam methane reforming	Dampfreformierung
TRBS		Technische Regeln für Betriebssicherheit
VOC	volatile organic compounds	flüchtige organische Verbindungen
ZIF	zeolitic imidazolate framework	Zeolitic Imidazolate Framework

Chemische Formelzeichen

Symbol	Name	Ordnungszahl	Atommasse
H (^{1}H)	Wasserstoff, Protium	1	1,0
D (^{2}H)	Deuterium	1	2,0
T (^{3}H)	Tritium	1	3,0
Li	Lithium	3	6,9
B	Bor	5	10,8
C	Kohlenstoff	6	12,0
N	Stickstoff	7	14,0
O	Sauerstoff	8	16,0
F	Fluor	9	19,0
Na	Natrium	11	23,0
Mg	Magnesium	12	24,3
Al	Aluminium	13	27,0
Si	Silicium	14	24,0
P	Phosphor	15	31,0
S	Schwefel	16	32,1
Cl	Chlor	17	35,5
K	Kalium	19	39,1
Ca	Calcium	20	40,1
Ti	Titan	22	47,9
V	Vanadium	23	50,9
Cr	Chrom	24	52,0
Mn	Mangan	25	54,9
Fe	Eisen	26	55,8
Co	Cobalt	27	58,9
Ni	Nickel	28	58,7
Cu	Kupfer	29	63,5
Zn	Zink	30	65,4
Sr	Strontium	38	87,6
Zr	Zirkonium	40	91,2
Nb	Niob	41	92,9
Ru	Ruthenium	44	101,1

Symbol	Name	Ordnungszahl	Atommasse
Rh	Rhodium	45	102,9
Pd	Palladium	46	106,4
Cd	Cadmium	48	112,4
In	Indium	49	114,8
Sn	Zinn	50	118,7
I	Iod	53	126,9
La	Lanthan	57	138,9
Ce	Cer	58	140,1
W	Wolfram	74	183,8
Re	Rhenium	75	186,2
Ir	Iridium	77	192,2
Pt	Platin	78	195,1
Hg	Quecksilber	80	200,6
Th	Thorium	90	232,0
U	Uran	92	238,0
Pu	Plutonium	94	244,0

Physikalische und chemische Größen und Einheiten

Formelzeichen	Größe	Einheit		
A	Fläche	m^2	Quadratmeter	
c_p	spezifische Wärmekapazität	kJ/(kg K)		
C	optischer Konzentrationsfaktor	[–]		
d	Druck	Pa	Pascal	
		bar	Bar	1 bar = 1013 hPa
e^-	Elektron	e	Elementarladung	$1\,e = -1{,}6 \times 10^{-19}$ C
E	Energie	J	Joule	
		kWh	Kilowattstunde	1 kWh = 3,6 MJ
		eV	Elektronenvolt	$1\,eV = 1{,}6 \times 10^{-19}$ J
E_{th}	thermische Energie	kWh_{th}		
E_{el}	elektrische Energie	kWh_{el}		
$E_{sp,v}$	volumetrische Energiedichte	kWh/l, kWh/m^3		
$E_{sp,m}$	gravimetrische Energiedichte	kWh/kg		
h	Planksches Wirkungsquantum	$6{,}6 \times 10^{-34}$ Js		
h^+	Loch (Defektelektron)	$1{,}6 \times 10^{-19}$ C		−1 e
ΔH^0	Standardbildungsenthalpie	kJ/mol		
ΔH^0_g	Standardbildungsenthalpie, gasförmige Phase	kJ/mol		
ΔH^0_l	Standardbildungsenthalpie, flüssige Phase	kJ/mol		
I	Stromstärke	A	Ampere	
l	Länge	m	Meter	
m	Masse	kg	Kilogramm	
		t	Tonne	1 t = 1000 kg
n	Stoffmenge	mol	Mol	$1\,mol = 6{,}022 \times 10^{23}$ Teilchen
P	Leistung	W	Watt	
	Wirkleistung (Wechselstrom)	VA	Voltampere	

Formelzeichen	Größe	Einheit		
t	Zeit	s	Sekunde	
		d	Tag	
		a	Jahr	
T	absolute Temperatur	K	Kelvin	0 K = −273,15 °C
U	Spannung	V	Volt	
V	Volumen	m^3	Kubikmeter	
ϑ	Temperatur	°C	Grad Celsius	
η	Wirkungsgrad	%		
λ	Wellenlänge	m		
ν	Frequenz	1/s		
ρ	Dichte	kg/m^3		

Präfixe für Einheiten

Präfix für Einheit	Name	Wert
E	Exa	10^{18}
P	Peta	10^{15}
T	Tera	10^{12}
G	Giga	10^{9}
M	Mega	10^{6}
k	Kilo	10^{3}
h	Hekto	10^{2}
da	Deka	10^{1}
		10^{0}
d	Dezi	10^{-1}
c	Zenti	10^{-2}
m	Milli	10^{-3}
µ	Mikro	10^{-6}
n	Nano	10^{-9}
p	Piko	10^{-12}
f	Femto	10^{-15}
a	Atto	10^{-18}