

## Inhaltsverzeichnis

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

### Teil I Technik 1

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<i>3</i>
1.1	Technische Beschreibung	<i>5</i>
1.2	Chemische und physikalische Eigenschaften	<i>6</i>
1.3	Aktuelle Einsatzfelder und Mengengerüste	<i>8</i>
1.4	Künftige Rolle in einem Energiesystem	<i>10</i>
1.4.1	Energieversorgung 2020	<i>10</i>
1.4.2	Energiedichte und Flächeneffizienz	<i>11</i>
1.4.3	Energieversorgung 20xx	<i>13</i>
1.5	Zukünftiger Bedarf an Wasserstoff	<i>20</i>
	Literaturnachweis	<i>22</i>
<b>2</b>	<b>Herstellung</b>	<i>25</i>
2.1	Ausgangsstoffe	<i>25</i>
2.2	Herstellungsverfahren	<i>27</i>
2.2.1	Dampfreformierung und partielle Oxidation	<i>28</i>
2.2.2	Pyrolyse	<i>31</i>
2.2.3	Elektrolyse	<i>33</i>
2.2.4	Thermolyse	<i>39</i>
2.2.5	Photokatalyse und photoelektrochemische Prozesse	<i>44</i>
2.2.6	Biogene Verfahren	<i>46</i>
2.2.7	Weitere Entwicklungen	<i>51</i>

**VI** | *Inhaltsverzeichnis*

- 2.3 Nachhaltigkeit 53
  - 2.3.1 Treibhausgasemissionen 55
  - 2.3.2 CO<sub>2</sub>-Abscheidung 62
  - 2.3.3 CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>-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

**VIII** | *Inhaltsverzeichnis*

- 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<sub>2</sub>-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
<b>8</b>	<b>Politische Handlungsfelder</b>	<b>431</b>
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
<b>9</b>	<b>Ergebnis einer selbst durchgeführten kleinen Umfrage im Wasserstoffbereich</b>	<b>489</b>
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
<b>10</b>	<b>Finales Fazit und Ausblick zu den Kapiteln 4 bis 9 (Stand Ende 2021)</b>	<b>507</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>511</b>

