# Wasserstoff

## Nationale und internationale Entwicklung



Baden-Württemberg

# Impressum

## Herausgeber:

Dieter Bouse*
Diplom-Ingenieur
Werner-Messmer-Str. 6, 78315 Radolfzell am Bodensee
Tel.: 07732 / 8 23 62 30
E-Mail: dieter.bouse@gmx.de
Internet: www.dieter-bouse.de
**„Infoportal Energie- und Klimawende Baden-Württemberg plus weltweit“**

## Kontaktempfehlung:

### Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM)

Kernerplatz 9; 70182 Stuttgart
Tel.: 0711/ 126 – 0; Fax: 0711/ 126 - 2881
Internet: www.um.baden-wuerttemberg.de;
E-Mail: poststelle@um.bwl.de
***Besucheradresse:***
Hauptstätter Str. 67 (Argon-Haus), 70178 Stuttgart

**Abteilung 6: Energiewirtschaft**
Leitung: Mdgt. Dominik Bernauer
Sekretariat: Telefon 0711 / 126-1201

Referat 66: Wasserstoff
Leitung: LMR Reuter
Tel.: 0711/ 126 …..; Fax: 0711 / 126-1258
E-Mail: …… …… @um.bwl.de
Tel.: 0711 / 126-….; Fax: 0711 / 126-1258

* Energiereferent a.D., Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg (WM)

Letzte Aktualisierung: 3. November 2026

# Ministerium für Wirtschaft, Handwerk und Tourismus Baden-Württemberg (WM), Stand Mai 2026




**Hausanschrift**

**WM-Neues Schloss**
Schlossplatz 4; 70173 Stuttgart
www.wm.baden-wuerttemberg.de
Tel.: 0711/123-0; Fax: 0711/123-2121
E-Mail: poststelle@wm.bwl.de
**Amtsleitung, Abt. 1, Ref. 51-54,56,57**

**WM-Dienststelle**
Theodor-Heuss-Str. 4/Kienestr. 27
70174 Stuttgart
**Abt. 2, Abt. 4; Abt. 5, Ref. 55**

**WM-Haus der Wirtschaft**
Willi-Bleicher-Straße 19
70174 Stuttgart
**Abt. 3, Ref.16 (Haus der Wirtschaft)**
**Kongress-, Ausstellungs- und Dienstleistungszentrum**







Quelle: WM BW aus www.wirtschaftsministerium.baden-wuerttemberg.de, Stand 15.05.2026

# Inhalt

**Einleitung und Ausgangslage**

**Grundlagen und Rahmenbedingungen**

**Wasserstoffwirtschaft**
- Baden-Württemberg
- Deutschland
- Europa, EU-27
- Welt

**Beispiele aus der Praxis**
Das kann die Brennstoffzelle

**Fazit und Ausblick**

**Anhang**

# Folienübersicht (1)


FO 1: Titelseite

FO 2: Impressum

FO 3: Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg (WM), Stand Mai 2021

FO 4: Inhalt

FO 5: Folienübersicht (1,2)


## Einführung und Ausgangslage


FO 08: Einleitung und Ausgangslage: Wasserstoff in Deutschland und weltweit 2022, Stand 2/2024 nach BGR Bund

FO 09 Warum reden alle über Wasserstoff ? Stand Juni 2021 (1,2)


## Grundlagen und Rahmenbedingungen


FO 12: Grundlagen Wasserstoff nach BGR Bund, Stand 02/2022 (1-4)

FO 16: Wasserstoff (1-18)

FO 34: Herstellung und Transport von Wasserstoff zur Anwendung

FO 35: Anwendungen für Wasserstoff (1,2) Ein Schlüssel für eine saubere und sichere Energiezukunft

FO 37: Wasserstoff – was kann er wirklich? Stand Mai 2022 (1-3)

FO 40: Brennstoffzellen (1-17)

FO 57: Vielfalt der Antriebsarten des Verkehrssektors für den Klimaschutz notwendig


## Wasserstoffmärkte - Wasserstoffwirtschaft in Baden-Württemberg

### Landesregierung, Auszug Klimaschutz, Energiepolitik, Wasserstoff


FO 60: Koalitionsvertrag der Landesregierung Baden-Württemberg 2021-2026 Auszug Klimaschutz, Energiepolitik, Wasserstoff, Stand 12. Mai 2021


### Einleitung und Ausgangslage


FO 62: Baden-Württemberg stärkt Wasserstoff-Strategie, Gemeinsame Erklärung Juni 2023 (1,2)

FO 64: Finanzierung zukunftsweisende europäische Wasserstoff-Projekte durch die Landesregierung Baden-Württemberg bis 2026

FO 65: Wasserstoffherstellung in Baden-Württemberg, Stand 2012 (1,2)

FO 67: Bestand und Neuzulassungen der PKW-Flotte nach Kraftstoffarten in Baden-Württemberg und Deutschland, Stand 01/2019 (1,2)

FO 69: Wasserstoffladeinfrastruktur in Baden-Württemberg, Stand 07/2019

FO 70: Öffentliche Stromladeinfrastruktur in den Bundesländern Deutschland, Stand 05/2019

FO 71: Beispiel SUV von Mercedes GLC mit Wasserstoff, Neuer Dienstwagen für OB Dr. Würzner, Stadt Heidelberg 2019

FO 72: Beispiel Erzeugung grüner Wasserstoff durch Elektrolyse-Anlage beim Wasserkraftwerk in Grenzach-Wyhlen, Stand 5. August 2021 (1,2)

FO 74: EFRE-Förderprogramm „Modellregion Grüner Wasserstoff“ – Modellregionen stehen fest in Baden-Württemberg (1,2)

FO 76: Entwicklung Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland mit Baden-Württemberg bis 2030 (1-3)


## Wasserstoffmärkte – Wasserstoffwirtschaft in Deutschland


FO 80: Energiesituation in Deutschland: Wasserstoff 2022 nach BGR Bund

FO 81: Wasserstoffstrategie NRW 2023 in Deutschland, Stand 7/2023 (1-3)

FO 84: Was ist Wasserstoff?

FO 85: Wofür wird Wasserstoff verwendet?

FO 86: Welches Potenzial hat Wasserstoff?

FO 87: Speicherbedarf und Speicherung von erneuerbaren Strom D, Stand 2017

FO 88: Wasserstoff als Speicher für elektrischen Strom Deutschland, Stand 2017

FO 89: Wasserstoff als Kraftstoff in Deutschland, Stand 2017

FO 90: Wirtschaftliche Aspekte zum Umbau unseres Energiesystems in Deutschland, Stand 5/2017

FO 91: Öffentliche Stromladeinfrastruktur in D nach Bundesländer, Stand 05/2019

FO 92: Wasserstoff u. Brennstoffzellen - Starke Partner erneuerbarer Energien (1-4)

FO 96: Ausgewählte aktuelle Nutzerfragen zum Wasserstoff

FO 97: Wasserstoff-Zentrum Bayern in Nürnberg

FO 98: Wasserstoff direkt an der Tankstelle erzeugen – Deutschland 2030 (1-3)

FO101:Wasserstoff-Tankstellen in Deutschland, Stand 6/2021

FO102: Entwicklung Anzahl Wasserstofftankstellen in Deutschland 2018-6/2021

FO103: Fazit und Ausblick: Wasserstoff: Schlüsselelement für die Energiewende in Deutschland (1-3)

# Folienübersicht (2)

## Wasserstoffmärkte - Wasserstoffwirtschaft in der EU-27 ab 2020

FO107: Europäische und deutsche Energiepolitik (1,2)
FO109: Erste Märkte in Europa – die Rolle von Nebenprodukt-Wasserstoff
FO110: Aufbau einer Wasserstoffladeinfrastruktur in der EU-27 + Deutschland, Stand 5/2017 (1,2)
FO112: Förderverein H2-Mobilität Schweiz
FO113: Regionaler Ausstieg von Braunkohlekraftwerke auf Grüne Wasserstoff-produktion in Griechenland-West Makedonien bis 2025

## Wasserstoffmärkte - Wasserstoffwirtschaft in der Welt

### Energiesituation Wasserstoff

FO116: Globale Energiesituation Wasserstoff 2022 nach BGR Bund (1-3)
FO119: Globale Elektrolysekapazitäten für Wasserstoffherstellung Jahr 2022 in Betrieb und im Bau nach BGR Bund (1-3)
FO122: Globale Entwicklung der Wasserstofftechnologie hin zu emissionsarmen Lösungen wie der Elektrolyse, Stand Januar 2023
FO123: Globaler Wasserstoff H2 (1,2)
FO125: Die Zukunft für sauberen Wasserstoff hat bereits begonnen (1-3)

### Globale Fakten

FO129: Globale Treiber für den Wandel, Endlichkeit der fossilen Energieressource (1-7)
FO136: Wasserstoff, Ein Schlüssel für eine saubere und sichere Energiezukunft (1-6)
FO142: Globale Übersicht zum Zeitalter des Wasserstoffs bis 2050 (1-3)
FO145: Fazit und Ausblick: Globaler Grüner Wasserstoff

## Beispiele aus der Praxis

### Das kann die Brennstoffzelle

Bilderreihe der Stuttgarter Zeitung von Manfred Zapletal 12/2019
FO147: Das kann die Brennstoffzelle (1-9)

### FfE-Beitragsreihe Wasserstoff

FO156: FfE-Beitragsreihe Wasserstoff, Stand ab 17.05.2021 (1-4)

## Anhang zum Foliensatz

FO161: Glossar Wasserstoff
FO162: Ausgewählte Internetportale (1-3)
FO165: Ausgewählte Informationsstellen (1-4)
FO169: Ausgewähltes Informationsmaterial (1-4)
FO173: Übersicht Foliensätze zu den Energiethemen Märkte, Versorgung,

# Einleitung und Ausgangslage

**Ausgewählte Informationen über die Wasserstoffproduktion und -nutzung in Baden-Württemberg, Deutschland, der EU-27 und weltweit.**

**Baden-Württemberg:**
Das Land hat eine Wasserstoff-Roadmap veröffentlicht, die den Weg für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft im Land aufzeigt [1]. Das Umweltministerium unterstützt die Produktion und Nutzung von grünem Wasserstoff, der klimaneutral aus erneuerbarem Strom erzeugt wird, mit verschiedenen Forschungs- und Demonstrationsprojekten [1].
Die Plattform H2BW soll die vielen Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten im Land vernetzen und fördern [1].

**Deutschland:**
Das Bundesministerium für Bildung und Forschung hat eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland erarbeitet, die die Potenziale, Herausforderungen und Handlungsempfehlungen für die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien darstellt2. Die Roadmap sieht vor, dass Deutschland bis 2050 eine führende Rolle bei der Entwicklung und Anwendung dieser Technologien einnimmt und einen Beitrag zum Klimaschutz leistet [2]. Die Produktionskosten von grünem Wasserstoff sollen bis 2050 auf 2,5 bis 3,5 Euro pro Kilogramm sinken [3].

**EU-27:**
Die Europäische Kommission hat eine europäische Wasserstoffstrategie vorgeschlagen, die darauf abzielt, Wasserstoff zu einem integralen Bestandteil des europäischen Energiesystems zu machen [4]. Die Strategie sieht vor, dass die EU bis 2024 eine installierte Elektrolysekapazität von mindestens 6 Gigawatt und bis 2030 von mindestens 40 Gigawatt erreicht [4]. Die Strategie betont auch die Bedeutung der Ressourceneffizienz und des Umweltschutzes bei der Wasserstofferzeugung und –nutzung [4].

**Weltweit:**
Die globale Wasserstoffproduktion lag im Jahr 2020 bei etwa 70 Millionen Tonnen, wovon etwa 76 % aus Erdgas, 23 % aus Kohle und weniger als 1 % aus erneuerbaren Energien stammten [3]. Die Produktionsziele für grünen Wasserstoff liegen je nach Szenario zwischen 25 und 160 Millionen Tonnen bis 2050 [3]. Die wichtigsten Anwendungsbereiche für Wasserstoff sind derzeit die Raffinerien, die Düngemittelproduktion, die Chemieindustrie, die Stahl- und Metallindustrie und der Verkehrssektor.

Quelle: Microsoft BING Chat (KI), 11/2023 aus 1. um.baden-wuerttemberg.de, 2. ise.fraunhofer.de , 3. de.statista.com, 4. eurostat.

# Einleitung und Ausgangslage

## Wasserstoff in Deutschland und weltweit 2022, Stand 2/2024 nach BGR Bund

Alternativen zu konventionellen Energieträgern spielen für das Erreichen der Klimaziele eine entscheidende Rolle. Wasserstoff als vielfältig einsetzbarer Energieträger eignet sich zur Unterstützung einer auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung, als Energieträger für Mobilität und die Industrie, als transportabler Energiespeicher und als Grundstoff für chemische Prozesse. Durch die Möglichkeit, dieses Gas durch regenerative Energien zu erzeugen, kann Wasserstoff zu einem zentralen Baustein auf dem Weg zu einer klimaneutralen Energieversorgung werden.

Aktuell trägt die BGR mit folgenden geowissenschaftlichen Untersuchungen zur Umsetzung der nationalen Wasserstoffstrategie bei:

**Erhebung der regionalen untertägigen Speicherpotenziale in Deutschland**
Regionale untertägige Speichermöglichkeiten werden absehbar ein Teil der Wasserstoffinfrastruktur sein. Neben Kavernen in Salzgestein sind Porenspeicher ein möglicher Speicherraum für Wasserstoff. Zusätzlich zu Potenzialabschätzungen von Wasserstoffspeichern werden an der BGR Nutzungskonkurrenzen und –synergien für den untertägigen Speicherraum untersucht. Ein Überblick zum Stand der untertätigen Speicherung von Wasserstoff findet sich hier

**Kriterien zur Eignungsbestimmung von untertägigen Speichern für Wasserstoff**
Im Rahmen von Drittmittelprojekten (H2_ReacT) und BGR-Projekten (BiMiAb_H2) wird für verschiedene mögliche untertägige Speicherformationen untersucht, welche mikrobiellen oder geochemischen Prozesse die Nutzung als Wasserstoff-Speicher nachteilig beeinflussen könnten und welche besonderen Anforderungen an Deckschichten in Hinblick auf Minimierung von Gasverlusten durch Migration zu stellen sind. Darauf aufbauend werden Kriterien zur Bewertung und Auswahl für mögliche neue Speicherstrukturen erhoben.

**Natürliche Vorkommen von erhöhten Konzentrationen an Wasserstoff und Abschätzung von natürlichen Stoffflüssen**
Neben der technischen Erzeugung von Wasserstoff kommt dieser auch natürlich vor – er wird durch geochemische Prozesse in verschiedenen geologischen Umgebungen gebildet (Commodity TopNews 63) und abgebaut. Da der Kenntnisstand zu natürlich auftretenden Konzentrationen und Stoffflüssen noch gering ist, diese aber sowohl für eine mögliche Nutzung als Wasserstoff-Quelle als auch für das genauere Verständnis des globalen Wasserstoff-Kreislaufs im Vorfeld der Nutzung mit der dabei zu erwartenden Freisetzung von geringen Anteilen grundlegend ist, führt die BGR zu diesem Themenfeld Forschungsarbeiten in Zusammenarbeit mit universitären Partnern durch (BiMiAb_H2). Daneben entwickelt die BGR Ansätze zur Aufsuchung von besonders vielversprechenden geologischen Strukturen für die Gewinnung von geogenem Wasserstoff.

**Marktverfügbarkeit von Wasserstoff**
Für die rohtoffwirtschaftliche Beratung der Bundesregierung und der deutschen Wirtschaft werden zukünftig von der BGR Informationen und Entwicklungen zum Thema Wasserstoff analysiert und bewertet. Die BGR hat Wasserstoff als Energieträger insbesondere mit Blick auf die heimische Wasserstofferzeugung sowie weiterer Erzeugerländer in die Energierohstoffdatenbank und in die Energiestudie der BGR aufgenommen.

**Rohstoffe für die Wasserstofftechnologie**
Im Rahmen des Rohstoffmonitorings und des Projektes „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ analysiert die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in Zusammenarbeit mit Partnern aus dem Bereich der Zukunfts- und Innovationsforschung Rohstoffbedarfe von Schlüssel- und Zukunftstechnologien in einem zeitlichen Horizont von ca. 20 Jahren. Relevante Rohstoffe zur Wasserelektrolyse sind Seltene Erden Elemente (SEE) und Elemente der Platingruppenmetalle (PGM). Die Höhe des globalen Bedarfs an mineralischen Rohstoffen wird mittels Hochrechnung ermittelt. Kontakt DERA

**Publikationen (Auswahl):**
- Commodity TopNews 69 (2022): Klimabilanzierung der Wasserstoffherstellung (PDF, 615 KB)
- BGR Energiestudie 2021 - Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung (PDF, 6 MB)
- Commodity TopNews 63 (2020): Wasserstoffvorkommen im geologischen Untergrund (PDF, 2 MB)

BGR Bund: BGR Energiestudie 2023, Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung, 02.2024; PM Wasserstoff im Internet
Kontakt: E-Mail: energierohstoffe@bgr.de

# Warum reden alle über Wasserstoff?, Stand Juni 2021 (1)

## Warum reden alle über Wasserstoff?

### Kleines Element ganz groß: Wasserstoff ist das kleinste chemische Element. Beim Erreichen der Klimaziele soll der Energieträger aber eine große Rolle spielen. Warum?
### Das erklärt Professor Ulrich Wagner von der Forschungsstelle für Energiewirtschaft im Interview.

**Herr Wagner, wer sich über unsere zukünftige Energieversorgung informiert, hört viel über Wasserstoff als Zukunftstechnologie oder Schlüsselmolekül der Energiewende. Regierungen weltweit investieren Milliardenbeträge in die Forschung und Entwicklung von Wasserstofftechnologien. Warum ist Wasserstoff so wichtig?**
Wasserstoff ist auf der Erde das am häufigsten vorkommende Element - immer gebunden etwa in Wasser oder mit Kohlenstoff. Mit Sauerstoff verbrennt das Gas nahezu rückstandsfrei, ohne Asche oder klimaschädliche Abgase zu Wasserdampf. Wasserstoff kann sehr flexibel, insbesondere aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt und vielfältig genutzt werden, zum Beispiel als Treibstoff für Fahrzeuge, als Brennstoff für Heizungen oder als Rohstofflieferant für industrielle Prozesse.

## Wie kann Wasserstoff dazu beitragen, dass Deutschland seine Klimaziele erreicht?
Wichtig für die Energiewende ist, dass wir energieintensive Verfahren effizienter machen. Das geht über zwei Wege: Fossile Energieträger werden durch elektrische Energie ersetzt. Nicht alle Bereiche lassen sich aber sinnvoll elektrifizieren, wie manche Industrieprozesse, Schwerlast- oder Flugverkehr. In solchen Fällen kommt Wasserstoff ins Spiel: Mit Wasserstoff haben wir weiterhin einen Verbrennungsprozess, aber auf Basis von Wasserstoff, nicht von Erdgas, Benzin oder Kohle. Wasserstoff ist somit ein wichtiger Hebel, um den Ausstoß von Kohlenstoffdioxid ($CO_2$) zu senken – wenn er aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt wird.
Wasserstoff kann zudem grünen Strom für längere Zeit speichern. Energiespeicher brauchen wir zwingend, um Angebot und Nachfrage von Wind- und Solarenergie auszugleichen. Ziel Deutschlands für 2050 ist es, dass unser gesamter Strom treibhausgasneutral erzeugt wird. Doch schon jetzt, bei einem Anteil der erneuerbaren Energiequellen am Stromverbrauch von etwa 50 Prozent, stoßen wir an Grenzen. Denn Sonne und Wind ist es egal, wann und wo wir Strom brauchen. Deshalb sind Energiespeicher wie Wasserstoff so wichtig.

## Wie wird Wasserstoff hergestellt?
Heute stellen wir Wasserstoff hauptsächlich aus Kohlenwasserstoffen her. Dabei wird Wasserstoff bei hohen Temperaturen vom Kohlenstoff abgespalten und es wird viel $CO_2$ freigesetzt. Die Industrie nutzt fast ausschließlich Erdgas, Öl oder Kohle als Kohlenstoffquelle. Wir sprechen hier von grauem Wasserstoff. Wir können Wasserstoff auch mithilfe von Elektrolyseuren herstellen: Diese Geräte nutzen elektrischen Strom, um Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten. Wird Strom aus erneuerbaren Energien genutzt, sprechen wir von grünem, $CO_2$ -neutralem Wasserstoff.
Wasserstoff kann somit Brücken zwischen der fossilen und der erneuerbaren Energiewelt bauen. Wir können heute schon Technologien wie Elektrolyseure oder Brennstoffzellen, die Wasserstoff zu Strom und Wärme umwandeln, einführen. Diese können wir zunächst noch mit fossilen Energieträgern betreiben. So kommen Wasserstofftechnologien in die Praxis, wir bauen einen Markt auf und können schrittweise auf grünen Wasserstoff umstellen.

## Schon vor 150 Jahren sagte Jules Verne, Wasserstoff sei „die Kohle der Zukunft“. Warum gibt es nicht bereits eine Wasserstoffwirtschaft?
Wasserstoff muss man erzeugen. Demgegenüber war es viel praktischer Biomasse wie Holz, das einfach zu gewinnen ist, sowie Kohle, Öl und Gas zu nutzen. Diese Energieträger sind günstiger und speichern mehr Energie pro Volumen. Man wusste zwar immer um die Vorteile von Wasserstoff als Energieträger und Energiespeicher. Es stellte sich aber jedes Mal heraus, dass es preiswertere Methoden gab, das Energiesystem zu verbessern.
Damals war der Anteil der erneuerbaren Energien noch gering. Jetzt haben wir einen Punkt erreicht, an dem Wasserstoff seinen Platz im System findet. Wenn wir die Klimaziele weiterhin ernst nehmen, muss mehr elektrischer Strom in den Sektoren Verkehr, Industrie und Wärmeerzeugung genutzt und das Energiesystem flexibler gestaltet werden. Grüner Wasserstoff ist neben Strom ein Hoffnungsträger für diese Aufgaben.

# Warum reden alle über Wasserstoff?, Stand Juni 2021 (2)

## Wie steht es um die Energiebilanz bei der Erzeugung von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten?

Um Wasserstoff zu erzeugen, brauchen wir mehr Energie als für die reine Stromerzeugung. Denn für die nachgeschaltete Wasserstofferzeugung fließt der Strom in den Elektrolyseur. Dieser hat Wirkungsgradverluste von 25 Prozent. Das heißt, nur drei Viertel des zugeführten Stroms stecken im erzeugten Wasserstoff. Das Gas muss dann noch für Speicherung, Transport oder Nutzung aufbereitet werden. Wasserstoff wird hierfür entweder stark komprimiert oder verflüssigt. In beiden Fällen kostet das weitere 30 Prozent Energie. Am Ende der Bereitstellung von Wasserstoff kann somit nur die Hälfte der ursprünglich zugeführten Energie genutzt werden. Jetzt kommt es entscheidend darauf an, wofür der Wasserstoff genutzt werden soll. Am effizientesten wäre es, den Wasserstoff direkt zu nutzen, zum Beispiel in einer Brennstoffzelle für die Mobilität oder als Ersatz von Kohlekoks bei der Stahlerzeugung.

## Batteriebetriebene Autos benötigen doch viel weniger Energie als solche mit Brennstoffzellen?

Eine Brennstoffzelle kann aktuell nur 40 Prozent des Wasserstoffs in elektrische Energie umwandeln. Autos mit Batterie liegen hingegen bei 80 Prozent. Aber wir müssen weitere Kriterien einbeziehen: Brennstoffzellen-Fahrzeuge schaffen – anders als Batteriefahrzeuge – Reichweiten von bis zu 800 Kilometern und können in wenigen Minuten geladen werden. Worauf ich hinaus will: Beide Varianten der Elektromobilität haben ihren Platz im Energiesystem.

## Welche Rolle spielt die Energieforschung beim Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft?

Wir müssen es schaffen, dass grüner Wasserstoff energieeffizienter hergestellt, transportiert und gespeichert wird. Es geht in der Forschung wesentlich darum, den Wirkungsgrad von Systemen zu steigern. Zudem müssen die Kosten für die Herstellung von grünem Wasserstoff weiter sinken. Der Bedarf an Wasserstoff wird in den kommenden Jahren weltweit steigen. Deutschland wird einen Großteil des Wasserstoffs importieren. Forschung und Entwicklung können Deutschland seinen Rang als Technologieexporteur sichern.
*Herr Wagner, ich danke Ihnen für das Gespräch. Das Interview führte Eva Mühle.*
Ulrich Wagner forschte 25 Jahre am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik an der Technischen Universität München und war gleichzeitig Wissenschaftlicher Leiter der Forschungsstelle für Energiewirtschaft. Von 1996 bis 2009 leitete er die Koordinationsstelle der Wasserstoff-Initiative Bayern. 2010 bis 2015 war er Vorstand für Energie und Verkehr im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Seit Kurzem ist er Sprecher der Transferforschung für die Reallabore der Energiewende zu Sektorkopplung und Wasserstofftechnologien - ein BMWi-Förderinstrument, um Wasserstofftechnologien im echten Betrieb zu testen.

**Weiterführende Informationen:**

- Weitere Informationen zur Wasserstoffforschung
- BMWi-Publikation: „Die Nationale Wasserstoffstrategie“
- Informationen zur Person von Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner von der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München
- BMWi-Artikel: „Wasserstoff: Schlüsselelement für die Energiewende“

Quelle: FfE Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V, München, Auszug aus aktuelle Informationen, Auszug Wasserstoff, Juni 2021

# Grundlagen und Rahmenbedingungen

## Wasserstoff als Energieträger

*Wasserstoff ist ein chemisches Element mit dem Symbol H und der Ordnungszahl 1. Es ist das häufigste Element im Universum und kommt in vielen Verbindungen vor, wie z.B. Wasser, Kohlenwasserstoffen und organischen Molekülen. Wasserstoff hat drei natürliche Isotope: Protium (1H), Deuterium (2H oder D) und Tritium (3H oder T). Protium ist das häufigste Isotop und besteht aus einem Proton und einem Elektron. Deuterium hat ein zusätzliches Neutron und Tritium hat zwei zusätzliche Neutronen. Tritium ist radioaktiv und zerfällt mit einer Halbwertszeit von etwa 12 Jahren zu Helium-3* [1]

*Wasserstoff hat viele Anwendungen in der Industrie, der Energieerzeugung, der Mobilität und der Forschung. Wasserstoff kann aus verschiedenen Quellen gewonnen werden, wie z.B. Erdgas, Biomasse, Wasser oder erneuerbaren Energien. Die Art der Wasserstoffproduktion bestimmt die Klimabilanz des Wasserstoffs. Grüner Wasserstoff wird aus erneuerbaren Energien durch Elektrolyse von Wasser hergestellt und gilt als klimaneutral, da bei seiner Herstellung und Nutzung kein CO2 freigesetzt wird* [2]

*Wasserstoff kann als Energieträger genutzt werden, indem er in Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren umgewandelt wird. Wasserstoff kann auch zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe verwendet werden, die in bestehenden Fahrzeugen und Infrastrukturen eingesetzt werden können. Wasserstoff kann außerdem in der Stahlindustrie, der Chemieindustrie und anderen Sektoren eingesetzt werden, um fossile Brennstoffe zu ersetzen und die CO2-Emissionen zu reduzieren* [2, 3]

*Wasserstoff ist ein spannender und vielseitiger Energieträger, der eine wichtige Rolle für die Energiewende und den Klimaschutz spielen kann. Die Bundesregierung hat eine Nationale Wasserstoffstrategie verabschiedet, um die Entwicklung und Nutzung von Wasserstofftechnologien in Deutschland und international zu fördern* [2]

Quelle: Microsoft BING Chat (KI), 11/2023 aus 1. de.wikipedia.org, 2. tuev-nord.de, 3. iwr.de. 4. studyflix.de, 5. adac.de

# Wasserstoff in Deutschland

## Wasserstoff

Alternativen zu fossilen Energieträgern spielen für das Erreichen der Klimaziele eine entscheidende Rolle. Wasserstoff als vielfältig einsetzbarer Energieträger eignet sich zur Unterstützung einer auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung. Molekularer Wasserstoff ($H_2$) kann industriell mit unterschiedlichen Verfahren hergestellt werden und kommt auch in der Natur vor.

## Aktuelle Themen und Entwicklungen

Die BGR analysiert und bewertet den **Wasserstoffmarkt** mit seinen globalen und nationalen Entwicklungen sowie die Rolle des Wasserstoffs unter den Energierohstoffen im Zuge der Energiewende. Außerdem erforscht die BGR **natürlich im Untergrund vorkommenden Wasserstoff** sowie für die **Wasserstoffspeicherung** im Untergrund typische Gesteinsformationen und relevante Gestein-Fluid-Kombinationen.

## FAQ - Häufig gestellte Fragen

### Welche Bedeutung hat Wasserstoff für die Energiewende in Deutschland?

- Deutschland strebt laut seiner **nationalen Wasserstoffstrategie** den Ausbau einer robusten Wasserstoffwirtschaft an, um seine Klimaziele zu unterstützen und die Energiesicherheit zu stärken.
- Wasserstoff gilt als vielseitig einsetzbarer Energieträger und Energiespeicher. Wasserstoff kann mittels Elektrolyse auf Basis **erneuerbarer Energien** hergestellt werden und somit helfen, Treibhausgasmissionen zu reduzieren.
- Woher stammt der Wasserstoff in Deutschland und wozu wird er verwendet?

Der in Deutschland verwendete Wasserstoff wird derzeit zum Großteil mittels Dampfreformierung aus **Erdgas** im Inland hergestellt, ohne die dabei anfallenden Klimagase abzuscheiden. Wasserstoff wird vor allem in der chemischen Industrie benötigt, insbesondere in Raffinerien und zur Herstellung von Ammoniak und Methanol. Im Energiesystem spielt der Wasserstoff bisher eine untergeordnete Rolle. Dies wird sich jedoch voraussichtlich ändern, da Deutschland in die Herstellung von emissionsarmem Wasserstoff aus erneuerbarem Quellen intensiviert (siehe auch **BGR Energiestudie**).

Quelle: BGR – Wasserstoff, Stand 11/2026

# Wasserstoffwirtschaft Baden-Württemberg (1)

Wasserstoff und Brennstoffzellen sind Schlüsseltechnologien für die Energiezukunft. „Grüner“ Wasserstoff bietet großes Potenzial für Baden-Württemberg. Das Umweltministerium fördert dies mit Projekten und der Wasserstoff-Roadmap.




Quelle: UM BW 10/2026

# Wasserstoffwirtschaft Baden-Württemberg (2)




Das Umweltministerium hat einen Fahrplan für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in Baden-Württemberg erarbeitet.

# Grundlagen Wasserstoff nach BGR Bund, Stand 02/2022 (4)

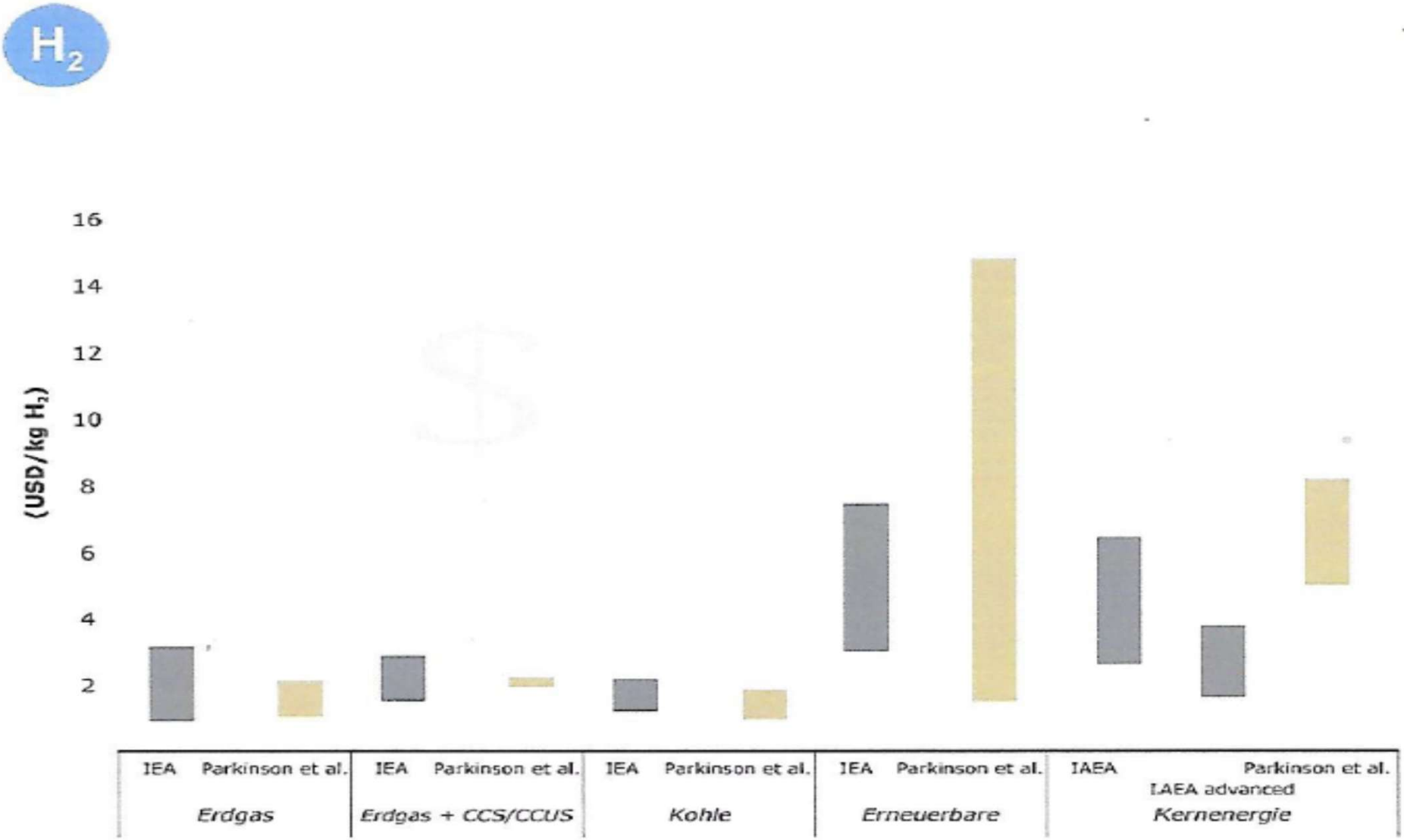



**Abbildung A-48:** Preisspannen der Herstellungskosten von Wasserstoff nach IEA, IAEA (grau) und Parkinson et al. (grün) für Dampfreformierung (Erdgas mit und ohne CCS), Kohlevergasung und Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien oder Kernenergie (IEA 2018, IEA 2019, IAEA 2018, Parkinson et al 2019).

Quelle: BGR Bund – BGR Energiestudie 2021, Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung, S. 153-156, Ausgabe 02/2022

# Wasserstoff (1)

## Einführung

Wasserstoff ist das leichteste und am häufigsten vorkommende Element in unserem Universum. Der englische Privatgelehrte Henry Cavendish entdeckte 1766 als Erster das Element Wasserstoff bei seinen Forschungsarbeiten mit Metallen und Sauren. Der französische Chemiker Antoine Laurent de Lavoisier, der parallel und unabhängig von Cavendish experimentierte und nachweisen wollte, dass es bei chemischen Reaktionen keine Masseverlust gibt, gab dem Element Wasserstoff aufgrund des Ergebnisses eines Experiments, das heute jeder unter dem Namen Knallgasprobe kennt, seinen Namen. Im Periodensystem steht das Element Wasserstoff an erster Stelle in der ersten Periode der ersten Elementgruppe. Sein Kürzel ist der Buchstabe H, abgekürzt von der lateinischen Bezeichnung „hydrogenium“ (zu Deutsch „Wasser-erzeuger“) bzw. abgekürzt von der altgriechischen Bezeichnung „hydor gignomai“ (zu Deutsch „Wasser werden/entstehen“). Das am häufigsten vorkommende Isotop des Wasserstoffs hat nur ein Proton im Kern, das von einem Elektron umkreist wird. Aufgrund der positiven Ladung des Atoms Wasserstoff kommt es unter Normalbedingungen praktisch nicht in atomarer Form als H sondern nur in molekularer Form als H2-Molekul vor. Wasserstoff in molekularer Form ist das leichteste Gas und ist in dieser Form farb- und geruchlos. Bei vielen chemischen Reaktionen kann man kurzzeitig Wasserstoff in atomarer Form erzeugen. Dann ist er hochreaktiv und bildet sehr gerne chemische Verbindungen mit anderen Elementen. Das Vorkommen als molekulares Gas ist in der Natur sehr selten. Überwiegend kommt Wasserstoff in gebundener Form vor, zumeist als Wasser, d.h. er kommt in allen irdischen Organismen vor, die Wasser als Lebensgrundlage enthalten. Weitere wichtige wasserstoffhaltige Verbindungen sind die sog. Kohlen- Wasserstoffe, z.B. Methan als leichtestes Gas oder Erdöl. Auch fast alle auf der Erde vorkommenden Mineralien enthalten Wasserstoff. Auf der Erde betragt der Masseanteil des Wasserstoffs nur etwa 0,12 %. Trotzdem ist der Wasservorrat auf der Erde mit ca. 1,386 Mrd. Kubikkilometern gigantisch. Seine hohe Reaktivität macht Wasserstoff unter Normalbedingungen zu einem brennbaren Gas, das als hochentzündlich eingestuft ist. Sein Siedepunkt liegt mit 20,27 Kelvin also -252,88°C extrem niedrig. Bei Raumtemperatur hat Wasserstoff das höchste Diffusionsvermögen, die höchste Wärmeleitfähigkeit und die höchste Effusions-geschwindigkeit (Wanderungsgeschwindigkeit durch Molekülgitter) von allen Gasen.

Aufgrund seines extrem häufigen Vorkommens in Wasser, Kohlenwasserstoffen, fast allen organischen Verbindungen und vielen anderen chemischen Verbindungen sowie seiner physikalischen und chemischen Eigenschaften, wie gerade beispielhaft genannt, ist Wasserstoff ein begehrter Chemierohstoff in Industrie und Technik, von dem im Jahr weltweit ca. 600 Mrd. Kubikmeter, also ca. 54 Mio. Tonnen hergestellt und verbraucht werden. In Deutschland alleine liegt der Jahresverbrauch an Wasserstoff derzeit bei ca. 20 Mrd. Kubikmetern entsprechend 1,8 Mio. Tonnen. **Abbildung 3.1** zeigt die Zusammenstellung wichtiger großtechnischer Syntheseverfahren, bei denen Wasserstoff derzeit in großem Umfang zur Produktherstellung eingesetzt wird. Auf der rechten Seite in der Abbildung sind nicht-energetische Produkte aufgelistet, die aus oder mit Wasserstoff hergestellt werden. Auf der linken Seite in dieser Abbildung sind Energieprodukte, bei denen der Wasserstoff indirekt energetisch genutzt wird, um einem Roh-Treibstoff/-Brennstoff durch Hydrierung bestimmte Eigenschaften zu verleihen. Im Rahmen der Rohöl-Raffination wird gasförmiger Wasserstoff aus bestimmten Prozessschritten an anderer Stelle aufbereitet wieder eingesetzt. Der Umgang mit Wasserstoff ist also auch in der Energietechnik seit Jahrzehnten Stand der Technik.

Eine weitere wichtige Eigenschaft macht den Wasserstoff aber auch zu einem begehrten Rohstoff in der Energiewirtschaft: der hohe spezifischer Energieinhalt pro Normkubikmeter Gas (1.000l Gas unter Normalbedingungen, 1 bar, 20°C), mit einem Heizwert von 3,0 kWh/Nm³ und einem Brennwert von 3,55 kWh/Nm³. Aufgrund seines niedrigen spezifischen Gewichts von knapp 90 g/Nm³ Gas hat er im Vergleich zu allen anderen chemischen Energieträgern **(siehe Abbildung 3.2)** den höchsten gravimetrischen oder massenspezifischen Energieinhalt. Im Vergleich mit gängigen chemischen Energieträgern hat Wasserstoff bezogen auf sein Gasvolumen unter Normalbedingungen den kleinsten Energieinhalt **(siehe Abbildung 3.2).** Kommt es nicht auf das Volumen des Speicherbehälters an, kann man also bei gleichem Energieträgergewicht fast zweieinhalb Mal mehr Energie speichern als beispielsweise mit Erdgas. Kommt es allerdings auf das Tankvolumen an, kann man unter gleichen Druck- und Volumenbedingungen nur 30 % des Energieinhalts von Erdgas speichern. Auch im flüssigen Zustand bei Tiefsttemperatur von knapp -253°C kann man im Vergleich zu Heizöl bei Raumtemperatur nur knapp 22 % des Energieinhalts im selben Volumen unterbringen. Da Wasserstoff auf der Erde praktisch nur in gebundener Form, z.B. als Wasser, vorkommt und als Energieträger erst mit einer anderen Energieform, z.B. elektrische Energie für den Elektrolyseprozess, aus der Verbindung herausgelöst werden muss, bezeichnet man ihn als sog. Sekundärenergieträger. Der enorm hohe massenspezifische Energieinhalt, die praktisch unbegrenzte Verfügbarkeit in Form von Wasser und die relativ leichte Gewinnbarkeit aus Wasser mit verschiedenen Verfahren, die aus erneuerbaren Energien schadstofffrei und CO2 neutral energetisch versorgt werden können, machen Wasserstoff zu einem sehr interessanten Energieträger zur Speicherung erneuerbarer Energie und zur Verwendung als Brennstoff für neue hoch-effiziente Energiewandler wie z.B. Brennstoffzellen.

Quelle: e-mobil BW GmbH - Energieträger der Zukunft - Potenziale der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg, S. 18/19, Ausgabe 2012

# Wasserstoff (2)

## Verfahren zur Wasserstoffherstellung

Prinzipiell kann man alle Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff in zwei Gruppen einteilen:
Gruppe 1: „Herstellung von Wasserstoff mit fossilen Brennstoffen“
Gruppe 2: „Nicht-fossile Herstellung von Wasserstoff“.
Es gibt eine Reihe von Verfahren zur Wasserstoffherstellung, die funktionell zu beiden Gruppen gehören können. Dazu zahlt einerseits die elektrolytische Wasserstoff-erzeugung, bei der der Elektrolyseprozess sowohl mit elektrischer Energie aus fossilen Kraftwerken als auch aus erneuerbaren Energiequellen betrieben werden kann, andererseits aber auch eine Reihe von großtechnischen Reformierungs-, Vergasungs-, und Oxidationsverfahren, die sowohl mit fossilen Kohlenwasserstoffen als auch mit Biomasse als Rohstoff versorgt werden können.

## Fossile Wasserstoffherstellung

Im Moment ist die Verwendung von Wasserstoff als chemischer Rohstoff absolut dominierend und sein Einsatz als Energieträger noch von untergeordneter Bedeutung. Als chemischer Rohstoff wird er heute hauptsachlich mit fossiler Energie und Wasser erzeugt. Herstellungsverfahren, die Wasser und Kohlenstoff, z.B. aus Kohle, als Rohstoffe nutzen, erzeugen im ersten Prozessschritt aus Wasser Wasserstoffgas und gleichzeitig mit dem abgetrennten Sauerstoff und dem Kohlenstoff Kohlen-monoxidgas. In einem zweiten Schritt wird das giftige Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid weiterverarbeitet. Die Prozesse, die direkt Kohlenwasserstoffe, z.B. Methan oder Erdgas und Wasser als Rohstoffe nutzen, erzeugen gleich im ersten Prozessschritt Wasserstoff und größtenteils Kohlendioxid. Wesentlich weniger Aufwand muss dann betrieben werden, um in einem nachfolgenden Reinigungsschritt Reste von Kohlenmonoxid ebenfalls in Kohlendioxid umzuwandeln. Aktuell werden etwa 48 % Mineralölfraktionen, 30 % Erdgas und max. 16 % Kohle zur fossilen Wasserstoffherstellung genutzt. Die restlichen 6 % werden aus verschiedenen anderen chemischen Verfahren und Herstellungsmethoden, z.B. auch als Abfallprodukt der Chlor- Alkali-Elektrolyse und auch aus der alkalischen Wasser-elektrolyse beigesteuert. Einen Überblick über technische Verfahren zur Wasserstoffherstellung aus Wasser mit Kohlenstoff und Kohlenwasserstoffen auf fossiler Basis gibt die Vergleichstabelle in **Abbildung 3.3.** Alle Verfahren, die dort aufgelistet sind, stellen großtechnische Verfahren zur chemischen Wasserdampfspaltung bei mittleren bis hohen Betriebs-temperaturen zwischen 300 und max. 2.000°C dar. Bei allen Verfahren, ausgenommen das der Plasma-Reformierung, wird die notwendige Wärme für das Erreichen der notwendigen hohen Reaktionstemperaturen aus der teilweisen Verbrennung der fossilen Rohstoffe gewonnen. Knapp zwei Drittel des eingesetzten Energieinhalts der fossilen Rohstoffe bleiben als chemische Energie im Wasserstoff erhalten.

**Nachfolgend wird eine kurze Beschreibung der Verfahren im Einzelnen gegeben.**
Die **Dampfreformierung** ist ein zwei-stufiger Prozess für die Herstellung von Wasserstoff ($H_2$) aus Methan ($CH_4$), Biomasse und langkettigen Kohlenwasserstoffen. In einer ersten Vor-Reformierungsstufe wird bei einem Druck um 25 bar und einer Temperatur zwischen 450°C und 500°C der Kohlenwasserstoff unter Wasserzugabe in Wasserstoff, Methan, Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid ($CO_2$) aufgespalten. Vor der zweiten Reformierungsstufe muss zum Schutz des Katalysators das Kohlen-monoxid abgetrennt werden. Im zweiten Reformer wird das Methan wieder unter Wasserzugabe ($H_2O$) an einem Nickelkatalysator knapp oberhalb von 25 bar Druck bei 800°C bis 900°C zu Wasserstoff und Kohlendioxid umgesetzt. Aus dem Reformer-Zwischenprodukt Kohlenmonoxid kann am Ausgang durch eine sog. Wassergas-Shift-Reaktion an einem einfachen Eisen(III)-Oxid-Katalysator ebenfalls mit Wasserdampf Wasserstoff und Kohlendioxid erzeugt werden. Für die Bereitstellung von Reinst-Wasserstoff mit geringsten Verunreinigungen können dann alle Restanteile von $H_2O$, CO, $CO_2$ und $CH_4$ in einer letzten Reinigungsstufe z.B. durch eine sog. Druckwechsel-Adsorptionsanlage bis auf Spuren herausgefiltert werden.

Die **Plasmareformierung** ist ein Verfahren, bei dem eine Mischung aus Kohlenwasserstoffen und Wasserdampf in einem Lichtbogen zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid direkt umgesetzt wird. Dabei wird die Energie für den Plasmabrenner nicht aus dem fossilen Rohstoff genommen, sondern extern z.B. als elektrische Energie zugeführt. Ein wichtiges technisches Plasmareformier-Verfahren ist das Kvaerner-Verfahren, bei dem Methan und Wasser zur internen Verfahrenskühlung im Lichtbogen bei etwa 1600°C direkt zu Wasserstoff und Kohlenstoff (Aktivkohle) sowie Heißwasserdampfumgesetzt werden. Energetisch ist dieser Prozess sehr effektiv, da 48 % Energieanteil im Wasserstoff, etwa 40 % in der Aktivkohle und nur ca. 10 % im Heißdampf verbleiben.

# Wasserstoff (3)

Die **partielle Oxidation** von Kohlenwasserstoffen setzt Methan und langkettige flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe bei hohen Temperaturen bis 1400°C und hohem Druck bis 100 bar unterstöchiometrisch, also mit Sauerstoffmangel, zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid um. Unter nachfolgender Zugabe von Wasser und Sauerstoff muss Kohlenmonoxid zu Wasserstoff und Kohlendioxid ausreagiert werden. Dies kann wieder mit einer Wassergas-Shift- Reaktion erfolgen. Eine nachfolgende Reinigungsstufe kann ebenfalls abhängig von der gewünschten Wasserstoffreinheit notwendig sein.

Die **Kohlevergasung** ist bereits seit Anfang des 19. Jahrhunderts bekannt und das älteste großtechnisch eingesetzte Verfahren zur Wasserstoffherstellung. Dabei werden zwei Verfahrensschritte eingesetzt. Im ersten Schritt wird Kohle (hauptsächlich sog. Fettkohle, Braun- oder Steinkohle) unter Sauerstoffabschluss im Ofen auf über 1.000°C erhitzt. Dadurch bleibt der Kohlenstoff unverbrannt erhalten (Koks) und aus der Kohle werden die flüchtigen Kohlebestandteile gasförmig aus dem Ofen abgezogen. Dieses Kokerei-Rohgas wird von Teeren, Benzolen, Säuren und Restbestandteilen gereinigt, wodurch das sog. Stadtgas entsteht, das energetisch direkt weiter verwendet werden kann. Die Kohle selbst als Koks oder Reinkohle kann im zweiten Schritt mit Sauerstoff verbrannt und im richtigen Mischungsverhältnis im heißen Zustand mit Wasserdampf gemischt werden, so dass in einer Gleichgewichtsreaktion ein Gemisch aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid, das sog. Wassergas oder auch Synthesegas, entsteht. Speziell für die Erzeugung von Synthesegas aus Kohle wurden eine ganze Reihe technischer Verfahren entwickelt, die dieselbe Gleichgewichtsreaktion mit unterschiedlicher Prozessführung nutzen.

Das letzte in Abbildung 3.3 genannte Verfahren, das in zwei Prozessschritten und Temperaturbereichen (Hochtemperatur (HT) bei 350°C - 500°C und Tieftemperatur (TT) bei 200°C – 250°C) abläuft, wird als **Konvertierung von Kohlenmonoxid** bezeichnet. Prinzipiell ist es kein Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff sondern zur Oxidation von Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid an zwei verschiedenen Katalysatoren in aufeinanderfolgenden Prozessschritten. Im HT-Bereich wird ein Eisen-Chromoxid-Katalysator verwendet. Im TT-Bereich wird mit einem Kupfer-Zinkoxid-Katalysator gearbeitet. Beide Konvertierungen nacheinander sind integrale Verfahrensschritte des Dampfreformierungs- und anderer Reformierungsprozesse, bei denen große Mengen von Kohlenmonoxid-Gas entstehen, die nicht weitergenutzt werden können. Durch die Zugabe von Wasser oder Wasserdampf wird das Wassergas-Gleichgewicht eingestellt und durch Zugabe von Sauerstoff wird der giftige Kohlenmonoxidanteil zu ungiftigem Kohlendioxid oxidiert und anschließend ausgewaschen.

Die Chemieindustrie ist innovativ in der Nutzung von Zwischenprodukten und Restenergien. Das lasst sich am Beispiel des Mischgases aus der Tieftemperatur-konvertierung gut darstellen. Wird der Konvertierungsprozess mit Luft anstelle von Sauerstoff durchgeführt und ist die Mischung stöchiometrisch richtig eingestellt, kann das Wasserstoff/Stickstoff-Gemisch nach CO2-Wasche auch direkt zur Ammoniaksynthese eingesetzt werden. Da der Konvertierungsprozess etwa 70 % der Kosten der Ammoniaksynthese ausmacht, ist in diesem Fall eine saubere gleichmassige Prozessführung essentiell wichtig.

Alle oben genannten Verfahren sind Prozesse zur großtechnischen Erzeugung von Wasserstoff in einer enormen Mengenspreizung von wenigen Tonnen bis zu mehreren tausend Tonnen pro Tag und Anlage.

### Nicht-fossile Wasserstoffherstellung

Die Entwicklung von Methoden zur nicht-fossilen Wasserstofferzeugung wird von unterschiedlichen Seiten betrieben. Die chemische Industrie mit ihrem enormen Grundverbrauch als chemischer Rohstoff für viele Produkte oder Produktionsverfahren hat ein großes Interesse an der gesicherten Bereitstellung von Wasserstoff, selbst wenn eine Erzeugung über und aus fossilen Rohstoffen aus Umwelt-, Kosten- oder Verfügbarkeits-Gesichtspunkten schwierig wird oder nicht mehr möglich ist. **Abbildung 3.4** fasst die derzeitig bekannten Verfahren zur nicht-fossilen Wasserstoffherstellung zusammen. Darin werden die Abhängigkeiten verschiedener Verfahren von unterschiedlichen „Energie-Rohformen“ wie Biomasse, elektrischer oder thermischer Energie grafisch verdeutlicht, da es Verfahren gibt, die mehrere Energieformen für die Wasserstofferzeugung benötigen. Direkt oder indirekt ist die energetische Ausgangsbasis immer die Solarstrahlung. Das Diagramm gibt allerdings keine Hinweise auf den Reifegrad der verschiedenen Energiewandler- und Wasserstofferzeugungs-Technologien. Dieser Reifegrad wird deshalb bei der nachfolgenden Erläuterung der einzelnen Technologien benannt.

# Wasserstoff (4)

Die Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse kann entweder biologisch oder mit technischen Prozessen erfolgen. Dabei sind mindestens zwei Arten von Biomasse zu unterscheiden. Zum einen Biomasse in Form von Kohlehydraten, Fetten, Proteinen u. ä. wird biologisch durch vergärende Bakterien zu CO2, neuen biologischen Verbindungen und eben Wasserstoff umgesetzt. Bakterien wandeln diese Biomasse anaerob (ohne Luft, Sauerstoff) um, d.h. dass sie ohne Oxidationsmittel nur einen kleinen Teil der Energie erschließen können. Deshalb bleibt ein großer Teil der in der Biomasse gespeicherten Energie tatsächlich im Wasserstoff verfügbar.

Auf der anderen Seite kann Biomasse genutzt werden, die in industriellen Prozessen (Grasschnitt, Holz, Stroh, usw.) mit einem thermochemischen Verfahren (Vergasung oder Pyrolyse in einem Chemiereaktor) aufgeschlossen wird (Zwischenprodukt Synthesegas). Das erzeugte Zwischenprodukt wird durch eine integrierte oder nachfolgende Reformierung (Dampfreformierung) zu Wasserstoff umgesetzt. Die verfahrenstechnischen Prozesse und Reinigungsstufen für Biomasse sind weitgehend identisch mit denen der Nutzung fossiler Rohstoffe. Bei optimierter gleichmäßiger Prozessführung kann der Wirkungsgrad für die Wasserstofferzeugung aus Biomasse bis zu 78 % betragen. Es entsteht dabei zusätzlich nur Kohlendioxid und mineralische Asche. Eine solche Anlage kann bei Betriebsstart mit dem selbst erzeugten Synthesegas und eigener Aufrechterhaltung des Betriebs durch die exotherme (Wärme abgebende) Reaktion im Reaktor CO2-neutral betrieben werden.

Es ist auch möglich, z.B. mit Hilfe des sog. AER-Verfahrens (engl.: Absorption Enhance Reforming), Biomasse bei Temperaturen knapp unter 800°C mit Wasserdampf direkt zu vergasen und noch im Reaktor mit einem Absorptionsmittel aus gebranntem Kalk einen großen Teil des Kohlendioxids abzutrennen, so dass am Vergaser-ausgang direkt ein stark wasserstoffhaltiges Produktgasgemisch abgegeben wird. Das Absorptionsmittel kann in einer dem Reaktor direkt angeschlossenen Brennkammer mit Luftzufuhr im Kreislauf regeneriert werden, so dass ein CO2-angereicherter Rauchgasstrom separat abgegeben wird. Das Produktgasgemisch wird anschließend in mehreren aufeinanderfolgenden Reinigungsstufen zum Rein-Wasserstoff gereinigt. **Abbildung 3.5** zeigt das Prinzip einer AER-Anlage zur energetischen Verarbeitung von Biomasse mit angeschlossener Wärme-Kraft-Kopplung und Reingasaufbereitung für Wasserstoff.

Der technische Prozess mit dem derzeit höchsten Potenzial zur effizienten großtechnischen Wasserstofferzeugung mit regenerativ erzeugter elektrischer Energie ist die **Wasserelektrolyse**. Die Wasserelektrolyse ist ein seit langem bekanntes Verfahren, bei dem in einer Elektrolysezelle an zwei Elektroden (negativ geladene Kathode und positiv geladene Anode) Wasser durch elektrische Energie in seine gasförmigen Bestandteile Wasserstoff (Kathodenseite) und Sauerstoff (Anodenseite) zersetzt wird. Zwischen den Elektroden befindet sich eine Membran (Diaphragma), die eine direkte Mischung der beiden Gase verhindert. Es gibt zwei Arten der Wasserelektrolyse. Erstens die sogenannte wässrige, alkalische Elektrolyse (AEL), die eine Mischung aus elektrisch leitfähiger Kalilauge und Wasser bei unter 100°C Betriebstemperatur als flüssiges Betriebsmedium nutzt. Zweitens die Polymer-Elektrolyt- Membran-Elektrolyse (PEMEL), bei der das Elektrolysewasser auf der Anodenseite zugeführt wird, aber als elektrisch leitfähiges Betriebsmedium eine Polymer-Elektrolyt-Membran zwischen Anode und Kathode dient. Aufgrund der Nutzung dieser Membran in der Zelle wird dieses Verfahren als trockene Elektrolyse bezeichnet. Auch die Betriebstemperatur der PEM-Elektrolyse liegt bei max. 100°C. Beide Elektrolysearten werden mit Gleichstrom betrieben. **Abbildung 3.6** zeigt das Prinzipbild einer einzelnen alkalischen Elektrolysezelle, anhand dessen die Funktion nachfolgend erläutert werden kann. Eine Stromquelle wird an den Minuspol (Kathode) der Elektrolysezelle und an den Pluspol (Anode) der Zelle angeschlossen. Die Zelle ist mit einem Gemisch aus Wasser und Kalilauge, dem sog. Elektrolyten, gefüllt. Wenn die Spannung der Stromquelle höher ist als das sog. elektrochemische Zersetzungspotenzial zuzüglich einer Überspannung zur Überwindung aller elektrischen Anschlusswiderstände des Stromkreises, fließt ein elektrischer Strom zur Elektrolysezelle. Auf der Kathodenseite wird in einer Teilreaktion aus Wassermolekülen unter Bildung eines Hydroxidions (OH--Ion) ein Wasserstoffmolekül gebildet. Viele Gasmoleküle zusammen bilden Gasblasen und -perlen ausproduziert. Chemisch wird dieser Prozess als Gesamtreaktion folgendermaßen ausgedrückt.

Zellenreaktion: $2\,H_2O\,(l) \xrightarrow[\text{Elektrolyse}]{} 2\,H_2\,(g) + O_2\,(g)$

An den Elektroden werden die Produktgase auf der Vorderseite, die zum Diaphragma gerichtet ist, produziert. Damit die elektrischen Verlustwiderstände so klein wie möglich sind, werden die Elektroden möglichst nahe aneinander gebracht. Der geringste Abstand der Elektroden könnte der Dicke des gastrennenden Diaphragmas entsprechen. Damit die Gase nicht direkt in das Diaphragma hinein produziert werden und sich vielleicht bei dünnen Diaphragmen doch mischen, werden als Elektroden Lochbleche benutzt, die die Gase auf beiden Seiten in kleinen Gasblasen direkt hinter den Elektroden in den Gassammelraum abziehen lassen. Beide Gase steigen nach

# Wasserstoff (5)

oben und werden in getrennten Gasabscheidern, die auch teilweise mit Kühlern versehen sein können, von der Flüssigkeit abgetrennt. Reiner, gekühlter und nur noch wasserdampfgesättigter Wasserstoff bzw. Sauerstoff verlässt die Zelle. Sind viele Zellen hintereinander geschaltet, werden die Gase in Sammelkanälen gesammelt und verlassen den Elektrolyseblock über gemeinsame Produktgasausgänge. Es gibt dieses Elektrolyseprinzip sowohl für den drucklosen als auch für den Druck-Betrieb bei knapp über 30 bar. Versuchsweise wurden auch Elektrolyseure für den Druckbetrieb bei 120 bar bzw. 200 bar im unteren Leistungsbereich realisiert und erfolgreich betrieben. Das Wasser muss auf der Kathodenseite nachgespeist werden, da der elektrochemische Prozess kathodenseitig mit der Zerlegung von Wassermolekülen in H+- und OH--Ionen beginnt. Alkalische Wasserelektrolyseure sind als großtechnische Apparate für den Konstantbetrieb seit Jahrzehnten industriell verfügbar und können derzeit in einem Leistungsbereich zwischen 1 kW und ca. 3.000 kW pro Elektrolyseur gebaut werden. **Abbildung 3.7** zeigt einen solar betriebenen Druck-elektrolyseur mit 350 kW Leistung. Eine weitere aussichtsreiche Wasserelektrolyse-Technologie ist die schon erwähnte Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEMEL). Mit der Verfügbarkeit von ionen-leitfähigen Kunststoffmembranen auf der Basis von Polytetrafluorethylen (PTFE) zur Wasseraufbereitung begann die Suche nach anderen Einsatzmöglichkeiten. Eine davon ist der Einsatz in der PEM-Elektrolyse. Obwohl auch in dieser Elektrolyseform Wasser mit elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespaltet wird, unterscheidet sich das Funktionsprinzip deutlich. In **Abbildung 3.8** sind der prinzipielle Aufbau und die Funktion einer PEM-Elektrolysezelle dargestellt.

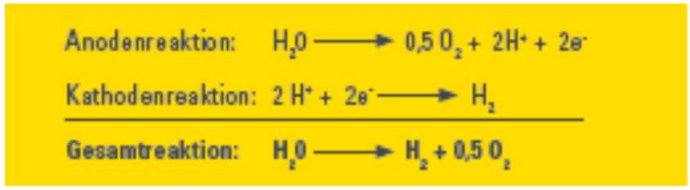



Abbildung 3.9: Elektrochemische Teil- und Gesamtreaktionen der Wasserelektrolyse.
Eigene Darstellung.

Energetisch bedeutet dies, dass der Mindest-Energieaufwand um ein Gramm Wasserstoffgas aus Wasser zu erzeugen 145 kJ (0,04 kWh) betragt. Im Fall der Wasser-elektrolyse wird diese Energie als elektrische Energie zugeführt. Die chemische Wasserspaltungsreaktion kann auch mit anderen Energieformen wie thermischer, chemischer oder Photonenenergie betrieben werden. In der **Abbildung 3.4** ist einer dieser elektrochemischen Energiewandler, der sowohl elektrische als auch gleichzeitig thermische Energie zur Wasserspaltung nutzen kann, als **Wasserdampfelektrolyse** in das Diagramm aufgenommen. Die elektrochemische Reaktion ist identisch mit derjenigen der Wasserelektrolyse. Ein Teil der benötigten Energie wird zur Verdampfung des Flüssigwassers in der Elektrolysezelle benutzt. Diese Verdampfungswarme des Wassers kann als thermische Energie in den Elektrolyseprozess eingekoppelt werden. Das verringert den elektrischen Mindestenergieaufwand oberhalb von 100°C sprunghaft. Bei der zusätzlichen Einkopplung von Hochtemperaturwarme weit über 100°C bis heran an 1.000°C kann man den elektrischen Energieanteil zur Wasser-spaltung weiter drastisch senken bis an ca. 2 kWh/Nm3 H2 heran. 1 Nm3 Wasserstoff unter Normalbedingungen hat einen Heizwert von 3 kWh. Als sogenanntes Hot-Elly-Prinzip (engl.: HOT ELectroLYser) wurde die Hochtemperatur-Dampfelektrolyse vor etwa 25 Jahren auf der Basis eines Zirkonoxid-Keramikmaterials bis zum Versuchs-elektrolyseur im unteren Kilowatt-Maßstab entwickelt und demonstriert. Damit lies sich eine Einsparung an elektrischer Energie von 30 - 40 % durch den Einsatz von Hochtemperaturwarme zeigen. Aufgrund von Materialproblemen und mangelnden Möglichkeiten der technischen Skalierbarkeit wurde die Entwicklung eingestellt. Heutzutage, betrieben mit hoch konzentrierenden Solarsystemen zur Bereitstellung von elektrischer Energie und Hochtemperaturwarme sowie aufgrund der erfolg-reichen Entwicklungsschritte der Hochtemperatur-Brennstoffzellentechnik mit vergleichbaren Materialen, ist die Thematik wieder hoch aktuell. Die thermische Zersetzung von Wasser läuft erst bei Temperaturen oberhalb von 2.200°C ab. Nur wenige großtechnische chemische Prozesse und auch Energiewandlungsverfahren erreichen dieses Temperaturniveau. Bei konzentrierenden Solarsystemen, beispielsweise hoch konzentrierende Parabolspiegel oder Solarturmanlagen mit nachgeführten Spiegelfeldern, können diese Temperaturniveaus an klaren Sommertagen über einige Stunden am Tag erreicht werden. Aber für die effiziente und kostengünstige Herstellung von Wasserstoff ist dieses Verfahren ungeeignet.

# Wasserstoff (6)

Damit man trotzdem direkt thermische Energie auf einem wesentlich geringeren Temperaturniveau nutzen kann und damit den Prozess wieder apparativ beherrschbar macht, benutzt man thermochemische Kreisprozesse, bei denen die Wasserdissoziation in mehreren Schritten abläuft und entstehende Zwischenprodukte in anderen Kreisprozess-Schritten genutzt werden. Die Summe aller Kreisprozessschritte ist die komplette Zersetzung von Wasser ohne weitere Nebenprodukte. Je mehr aufeinanderfolgende Schritte ein Kreisprozess hat, desto geringer ist sein Kreislauf-Wirkungsgrad, aber desto geringer kann auch die Temperatur der eingekoppelten thermischen Energie sein. Aussichtsreiche Kreisprozesse zur Wasserstofferzeugung arbeiten im Temperaturbereich von etwa 800°C (mit Katalysator) und 1200°C (ohne Katalysator). Die benötigte Wärmeenergie lässt sich über den Weg der konzentrierenden Solarstrahlung beispielsweise eines Solarturmkraftwerks direkt in den Prozess einkoppeln. Von den vielen tausend bekannten Kreisprozessen sind allerdings nur wenige für den direkten oder indirekten Betrieb mit Solarenergie technisch interessant. Der Schwefelsäure-Hybrid-Prozess (Westinghouse-Prozess), der Schwefel-Jod-Prozess und mehrere Metall-Metalloxid- Kreisprozesse auf der Basis verschiedener Materialpaarungen sind vielversprechend und in der Entwicklung befindlich.

Der Schwefelsäure-Hybrid-Prozess ist ein zweistufiger Prozess mit einem solar direkt bestrahlten Reaktor, in dem im ersten Schritt bei ca. 850°C Schwefelsäure verdampft und an einem Katalysator in Schwefeldioxid, Wasserdampf und Sauerstoff umgewandelt wird. Dazu wird ein keramischer, hoch poröser Solarstrahlungsempfänger benutzt, der katalytisch beschichtet ist. Im zweiten Prozessschritt wird bei ungefähr 85°C in einer Schwefelsäure-Elektrolyse mit Wasserdampf und Schwefeldioxidgas wiederum Schwefelsäure unter Abgabe von Wasserstoffgas an der Kathode erzeugt. Dem Kreisprozess wird nur Wasser als Edukt und elektrische sowie thermische Energie zugeführt. Als Produkte entstehen Sauerstoff und Wasserstoff.

Der Schwefel-Jod-Kreisprozess ist ein dreistufiger Prozess, bei dem als erster Schritt die Schwefelsäureverdampfung und Schwefeldioxid-Wasserdampf-Gemischerzeugung mit Sauerstoff- Abgabe und Einkopplung von thermischer Hochtemperatur-Prozesswärme mit 850°C erfolgt. Der mittlere Prozessschritt ist die so genannte Bunsen Reaktion. Bei dieser exothermen Reaktion (120°C) entsteht aus Schwefeldioxid, Wasser und Jod eine wässrige Schwefelsäurelösung und Jod-Wasserstoffsäure. Im dritten Prozessschritt wird bei etwa 350°C aus Jod-Wasserstoffsäure wieder Jod und Wasserstoffgas gebildet. Der Vorteil des Prozesses ist, dass bei keinem der Einzelprozesse elektrische Energie eingekoppelt werden muss. Nachteilig ist die energieintensive Trennung von Schwefelsäure und Jod-Wasserstoffsäure im Bunsen-Reaktionsschritt. Die technische Nutzung dieses rein thermischen Wasserstoff-Erzeugungsverfahrens befindet sich noch im Forschungsstadium, da Basisdaten über die Säuretrennung, z.B. mit Membranverfahren, das Flüssig-Dampf-Gleichgewicht und die Energieeinkopplung zunächst gewonnen werden müssen.

Ein dritter sehr aussichtsreicher Wasserstoff-Kreisprozess beruht auf der Oxidation und Reduktion von Metallkombinationen auf verschiedenen Temperaturniveaus zwischen 400°C und 1800°C mit Wasserdampf. Das derzeit aussichtsreichste System basiert auf der Nutzung von Eisenmischoxiden, sog. Ferriten, in einem zweistufigen Kreisprozess. Im ersten Schritt bei ca. 850°C wird ein reduziertes Mischmetall bei gleichzeitiger Wasserspaltung an derselben Metalloberfläche oxidiert. Dabei wird das Wasserstoffgas freigesetzt. Im zweiten Schritt auf dem Temperaturniveau von 1.200°C wird das Mischmetall unter Sauerstoffgasabgabe wieder regeneriert, also reduziert. Damit dieser Kreisprozess mit thermischer Energie aus konzentrierter Solarstrahlung betrieben werden kann, wird das Redox-Mischmetallsystem auf die bestrahlbare Oberfläche einer keramischen temperaturstabilen Trägerstrukturaufgebracht, die als Strahlungsabsorber dient. Dieser Kreisprozess läuft diskontinuierlich auf verschiedenen Temperaturniveaus ab. Zuerst wird bei niedriger Temperatur Wasser gespaltet und bis zur Sättigung unter Wasserstoffabgabe das Mischmetall oxidiert. Im zweiten Schritt bei höherer Temperatur wird das Mischmetall wieder unter Stickstoffzugabe und Sauerstoffabgabe reduziert. **Abbildung 3.10** zeigt die prinzipielle Funktionsweise des oben beschriebenen thermochemischen Kreisprozesses mit den beiden Temperaturniveaus für die separate Abgabe von Wasserstoff bei ca. 850°C und Sauerstoff bei 1200°C von der Katalysatoroberfläche. Derzeit wird an einem Doppelreaktorkonzept für den quasikontinuierlichen Mehrkammerbetrieb gearbeitet. Beide Betriebskonzepte wurden bereits im Maßstab einiger Kilowatt Strahlungsleistung an einer Solarturm-Testanlage erprobt. Auch dieser Kreisprozess hat den Vorteil, dass für den Prozessbetrieb nur thermische Energie auf technisch beherrschbaren Temperaturniveaus für den Betrieb eines Reaktors benötigt wird.

# Wasserstoff (7)

Im Anfangsstadium der Grundlagen- und Verfahrensforschung befinden sich die in **Abbildung 3.4** genannten photolytischen Wasserstofferzeugungsverfahren, die biologisch oder technisch genutzt werden können. Unter Photolyse versteht man zusammengefasst alle Verfahren, bei denen die Bestrahlung mit Licht zur Spaltung von Molekülen genutzt wird. Die Wellenlänge des Lichts, die den Energieinhalt bestimmt, muss auf die Stärke der zu lösenden chemischen Bindung genau abgestimmt sein.

Die biologische Herstellung von Wasserstoff wird **Biophotolyse** genannt. Dabei wird der Wasserstoff bei bestimmten Stoffwechselprozessen (Photosynthese oder Stickstofffixierung) mithilfe von Biomasse erzeugt. Es können nur bestimmte biologische Organismen wie z.B. Cyanobakterien oder Grünalgen zum Einsatz kommen. Grundlage ist die oxygene Photosynthese in den Pflanzen zur Energieerzeugung, bei der aus Kohlendioxid und Wasser unter Einwirkung von Sonnenlicht Zucker, Sauerstoff und Wasser entstehen. In einem Zwischenschritt der Photosynthese vor der Bildung von Wasser gibt es freie Wasserstoffatome und Elektronen in den Pflanzenzellen. Daraus können Cyanobakterien unter bestimmten Umgebungsbedingungen parallel zur Photosynthese in den Zellen mit Stickstoff auch Ammoniak bilden.. Dabei wird in den Zellen mit Stickstoff auch Ammoniak bilden. Dabei wird zusätzlich Wasserstoffgas frei. Es entsteht in den Pflanzen also sowohl Sauerstoff als auch Wasserstoff. Grünalgen können ebenfalls direkt Wasserstoffgas erzeugen, obwohl sie normalerweise ebenfalls Photosynthese zur eigenen Energieerzeugung betreiben. Unter bestimmten Umweltbedingungen und bei Sauerstoffmangel werden in den Algen aufgrund bestimmter Enzyme (Hydrogenasen) die freien Wasserstoff-atome und Elektronen aus einer Photosynthese-Teilreaktion zur Wasserstoffbildung und nicht zur Reduktion von Kohlendioxid genutzt. Für die beiden genannten biologischen Prozesse gilt also, dass Wasserstoff mit Sonnenenergie direkt gebildet und sofort abgegeben aber nicht in der Biomasse gespeichert wird. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben versuchen derzeit, die beiden biologischen Prozesse in Wasserstoff- Bioreaktoren nutzbar zu machen. Andere Bakterienstämme, wie z.B. Schwefelbakterien, betreiben die sog. anoxygene Photosynthese zur Energiebeschaffung unter Wasserstoffabgabe, bei der kein Sauerstoff entsteht. Diese Bakterien können aus organischen Stoffen und reduzierten Schwefelverbindungen mit Sonnenlicht als externe Energiequelle Wasserstoff und $CO_2$ in einer Sauerstoffumgebung oder Wasserstoff und oxidierte Schwefelverbindungen unter Sauerstoffabschluss erzeugen. Alle genannten biologischen Prozesse sind nur im Labor nachgewiesen. Es ist noch nicht absehbar, ob sich die Laborprozesse auch tatsächlich auf industrielle Produktionsbedingungen umsetzen lassen, da z.B. die Einstellung günstiger Umweltbedingungen für die Wasserstoffproduktion eine Stresssituation für die beteiligten Organismen darstellt.

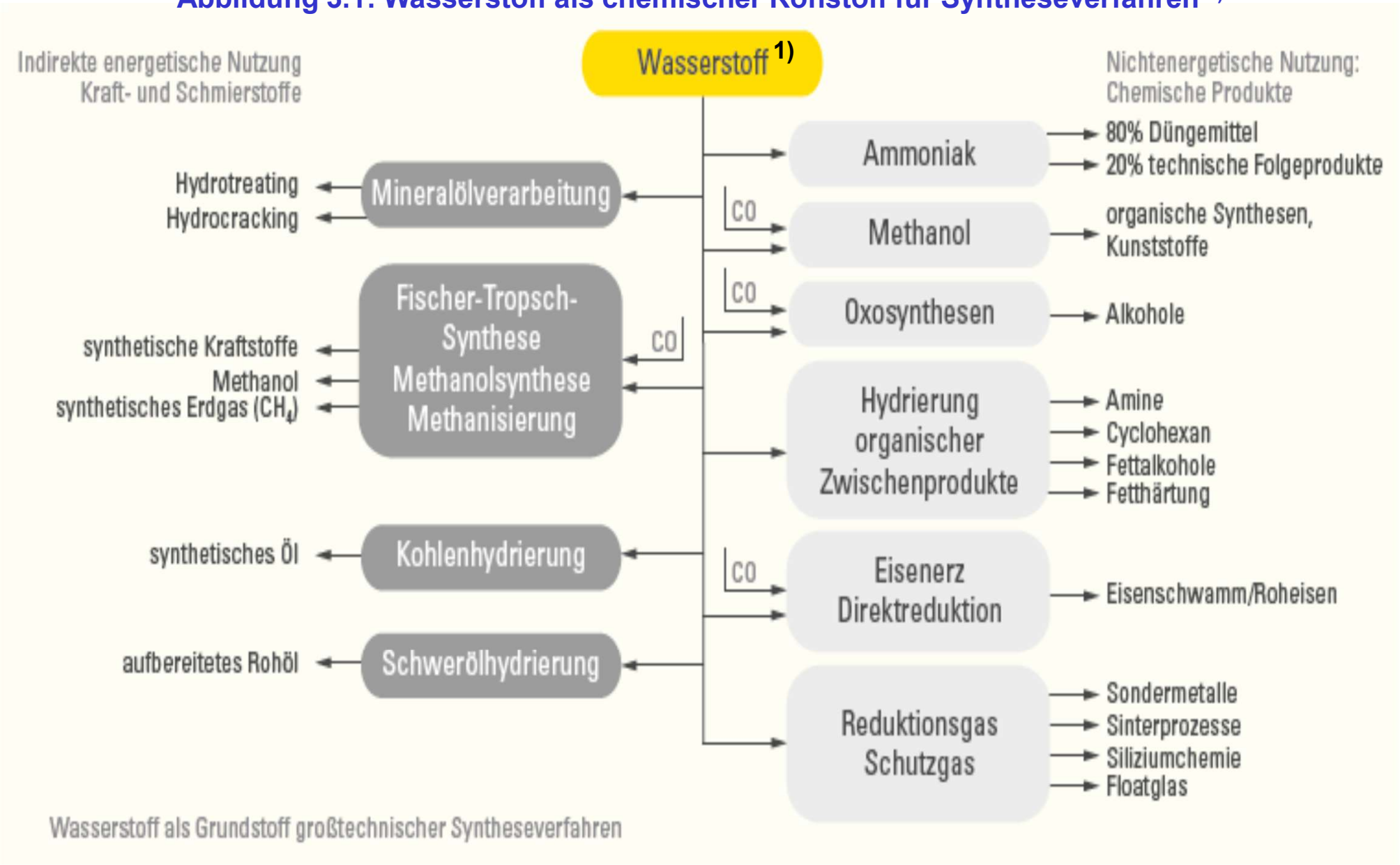
Zur technischen Nutzung der biologischen Prozesse zur Wasserstoffherstellung wird auch versucht, ob man die wasserstoffproduzierenden Teilprozesse nicht herauslösen und technisch nachahmen kann. Dies wird mit dem Fachbegriff katalytische Photolyse bezeichnet. Einem australischen Forscherteam ist es bereits vor einigen Jahren gelungen, im Labor einen Teil der oxygenen Biophotolyse, der freie Wasserstoff-Ionen und Elektronen kurzzeitig erzeugt, mit Hilfe eines Mangan-Cluster-Katalysators nachzuahmen. Der photolytisch aktive Katalysator hat sein Vorbild in dem manganhaltigen Enzym, das Pflanzen zur Photosynthese nutzen. Mittels einer katalytischen Beschichtung in einer Elektrolysezelle, die mit Sonnenlicht bestrahlt wird, kann bei Anlegen eines elektrochemischen Potenzials von ca. 1,2 V in dieser abgewandelten Elektrolysezelle sehr einfach Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt werden. Dieser Prozess entspricht also einer Elektrolysezelle, bei der ein großer Teil der Energie direkt durch Solarstrahlung aufgebracht wird.

Ein weiteres technisches Forschungsthema seit vielen Jahren ist die sog. **Photoelektrolyse**. Bei diesem technischen Prinzip, das die Schritte der Erzeugung elektrischer Energie und der nachfolgenden Wasserspaltung in einem technischen System zusammenfasst, wird die Spannungsdifferenz, die an einem photoaktiven Elektrodenpaar (Solarzelle) bei Bestrahlung mit Licht entsteht, direkt zur Dissoziation (Zersetzung) von Wasser genutzt. Eine Materialpaarung aus speziell verarbeitetem Titandioxid und Platin oder Indiumphosphid-Rhodium in Verbindung mit Platin kann eine solche photoelektrochemisch aktive Zelle bilden. Die beiden Elektroden werden Rücken an Rücken elektrisch flächig durchkontaktiert in ein Elektrolytbad, z.B. aus wässriger Lauge oder Säure eingesetzt. Bei Bestrahlung der Titan- oder Indium-Elektrode mit Licht wird an der bestrahlten Seite Sauerstoffgas und an der Platinelektrode Wasserstoffgas gebildet. Die Arbeit mit verschiedenen Elektrodensystemen, Elektrolyten und Schichtherstellmethoden befindet sich noch im Stadium der Grundlagenforschung, hat aber mit dem funktionellen Nachweis gezeigt, dass man hinsichtlich des Wirkungsgrades das zweistufige Photovoltaikzellen-Elektrolysesystem übertreffen kann.

Quelle: e-mobil BW GmbH - Energieträger der Zukunft - Potenziale der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg, S. 20-29, Ausgabe 2012

# Wasserstoff (8)

## Abbildung 3.1: Wasserstoff als chemischer Rohstoff für Syntheseverfahren [1)]

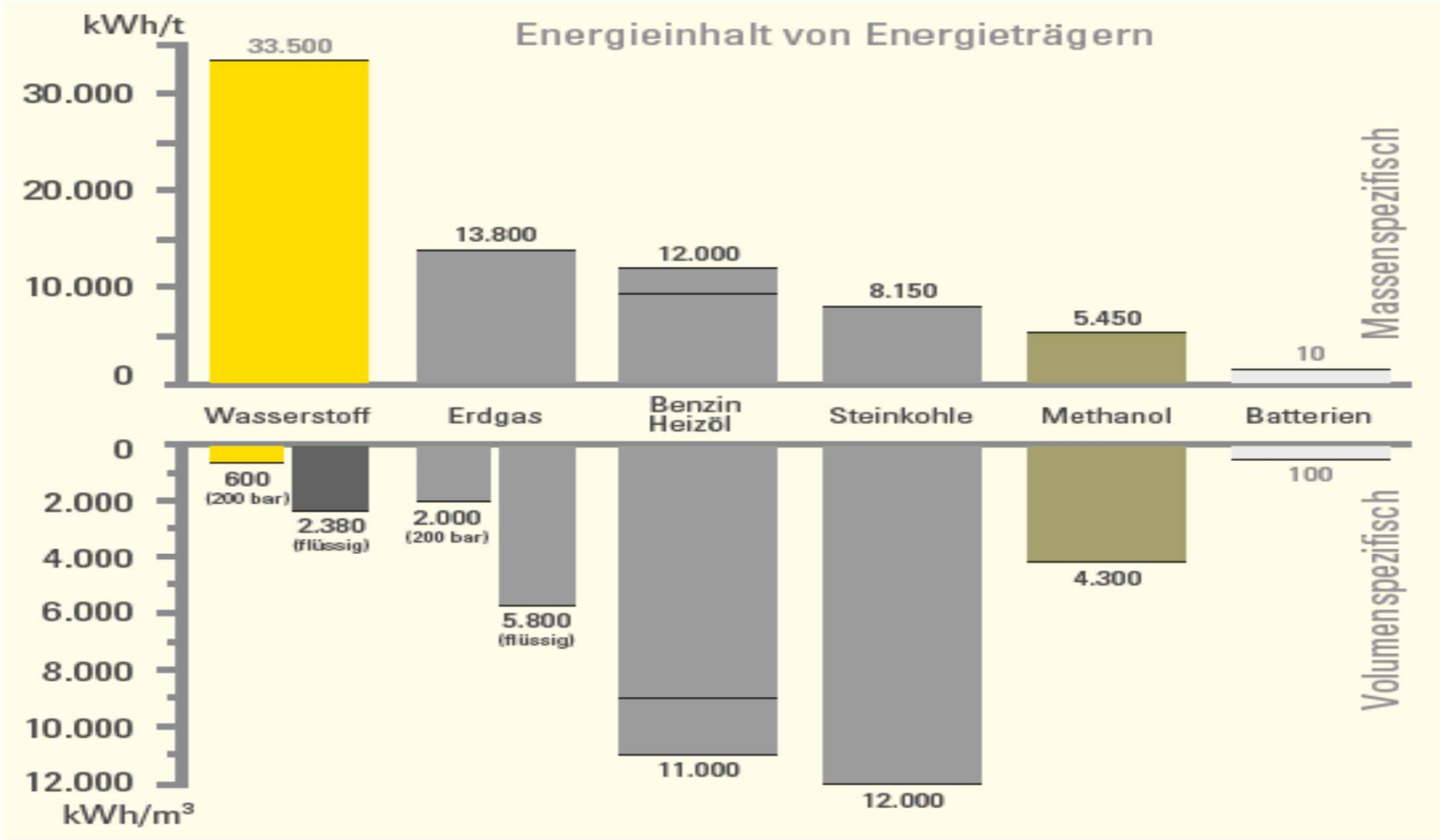



1) Eigene Darstellung nach DLR et al. 2002

Quelle: e-mobil BW GmbH - Energieträger der Zukunft - Potenziale der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg, S. 19, Ausgabe 2012

# Wasserstoff (9)

## Abbildung 3.2: Energieinhalt verschiedener Energieträger 1)




1) Eigene Darstellung nach DLR et al. 2002

Quelle: e-mobil BW GmbH - Energieträger der Zukunft - Potenziale der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg, S. 19, Ausgabe 2012

# Wasserstoff (10)

## Abbildung 3.3: Vergleichende Zusammenstellung technischer Verfahren zur Wasserstoffherstellung [1)]

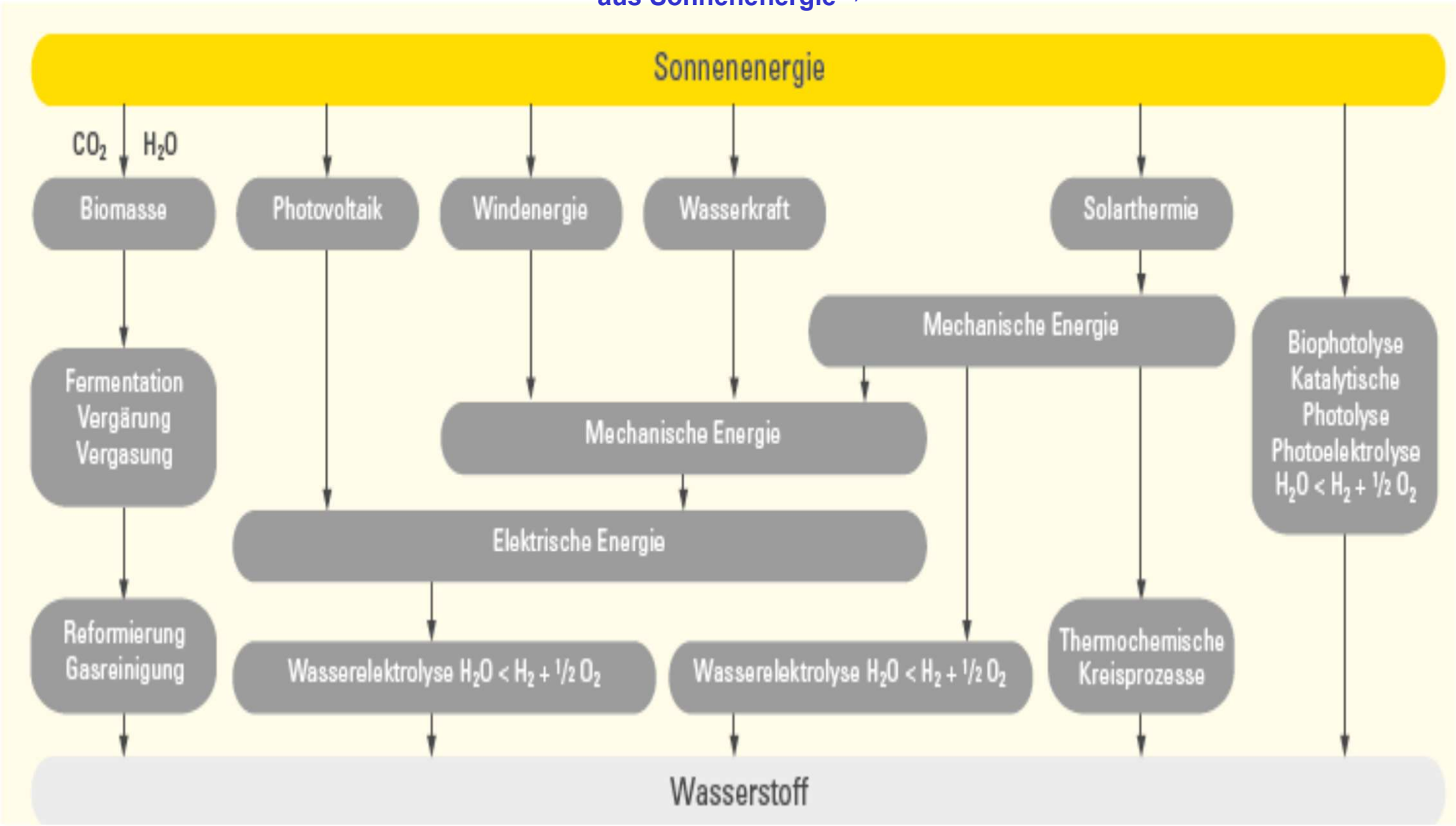
| Verfahren | Dampfreforming | | Plasmareforming | | Partielle Oxidation | | Kohlevergasung | | Konvertierung von Kohlenmonoxid | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Beispiele | Verschiedene | | Hüls-Verfahren | | Shell-Verfahren, Texaco-Verfahren | | Winkler-, Lurgi-, Koppers-Totzek-, Texaco-Verfahren u.a. | | HT-Konvertierung TT-Konvertierung | |
| Rohstoff | gasförmig, flüssig Kohlenwasserstoffe | | gasförmige Kohlenwasserstoffe | | gasförmige, flüssige, feste Kohlenwasserst. | | Kohle | | Kohlenmonoxid | |
| Temperatur °C | > 850 | | >1.300 | | >1.200 - 1.400 | | >800 - 200 | | 350 - 500 (HT) 200 - 250 (TT) | |
| Druck bar | 25 | | 3 | | 10 - 100 | | 1 - 40 | | | |
| Reaktionsmittel | $H_2O$ | | $H_2O$ | | $H_2O$, $O_2$ | | $H_2O$, $O_2$ | | $H_2O$ | |
| Katalysator | Nickeloxid | | - | | - | | - | | $Fe_2O_3/Cr_2O_3$ | |
| Prozessenergie | fossil | | elektrisch | | fossil | | fossil | | fossil | |
| Gaskomponenten | $H_2$ | CO | $H_2$ | CO | $H_2$ | CO | $H_2$ | CO | $H_2$ | $CO_2$ |
| Volumen-% | 52 | 11 | 75 | 25 | 50 | 50 | 25 - 40 | 65 - 15 | 70 - 90 | 30 - 10 |

1) Eigene Darstellung nach DLR et al. 2002

Quelle: e-mobil BW GmbH - Energieträger der Zukunft - Potenziale der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg, S. 21, Ausgabe 2012

# Wasserstoff (11)

## Abbildung 3.4: Energiewandlungs- und Wasserstoff-Erzeugungsprozesse der nicht-fossilen Wasserstoffherstellung aus Sonnenenergie [1)]

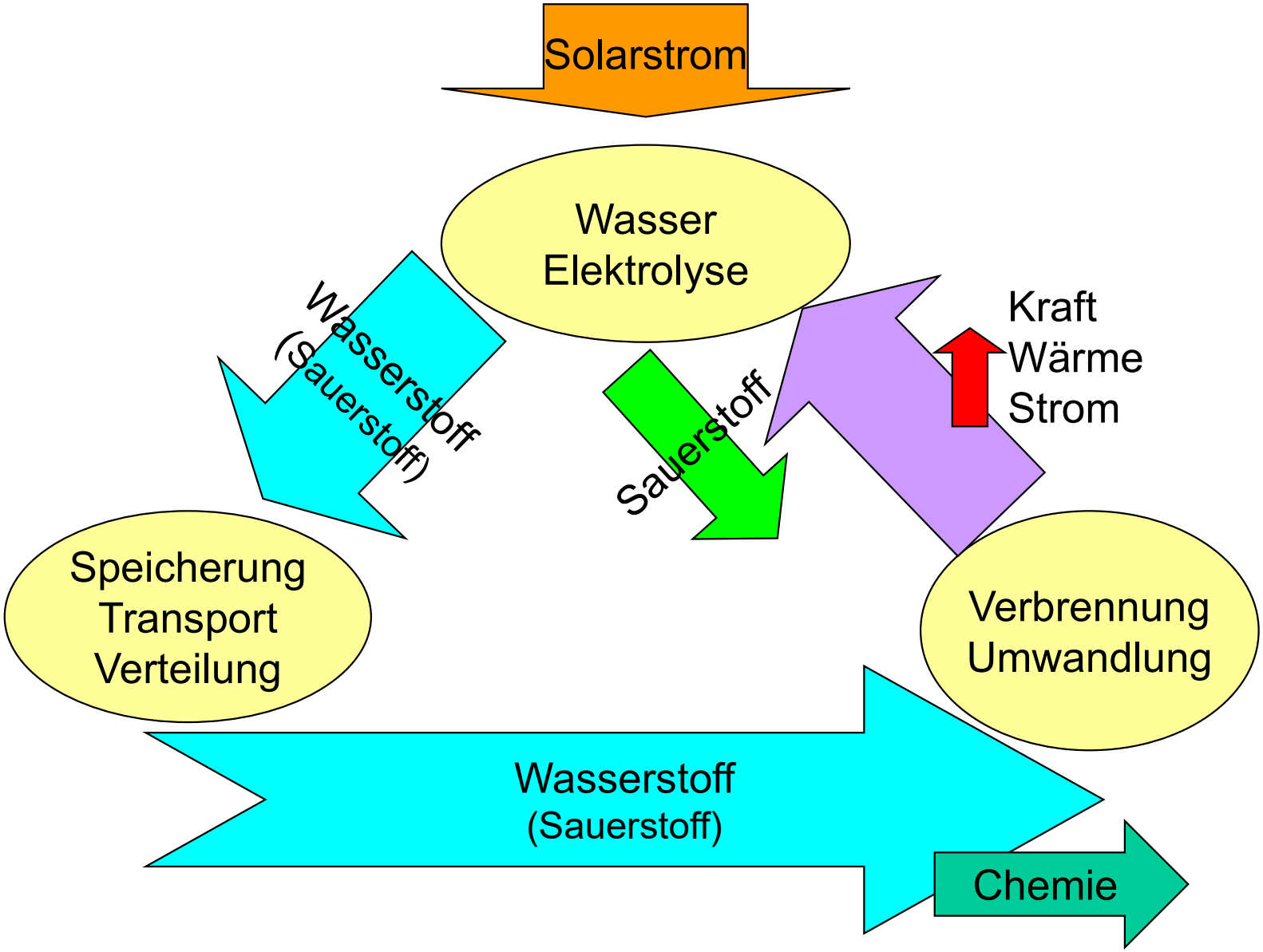



1) Eigene Darstellung nach DLR et al. 2002

Quelle: e-mobil BW GmbH - Energieträger der Zukunft - Potenziale der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg, S. 23, Ausgabe 2012

# Wasserstoff (12)

## Wasserstoff-Kreislauf durch erneuerbare Energien – Solarstrom, Windstrom




Quelle: BMWi – Erneuerbare Energien nutzen, Bonn 1999/12

# Wasserstoff (13)

Abbildung 3.5: AER-Prinzipbild zur energetischen Biomassenutzung und Wasserstofferzeugung [1)]

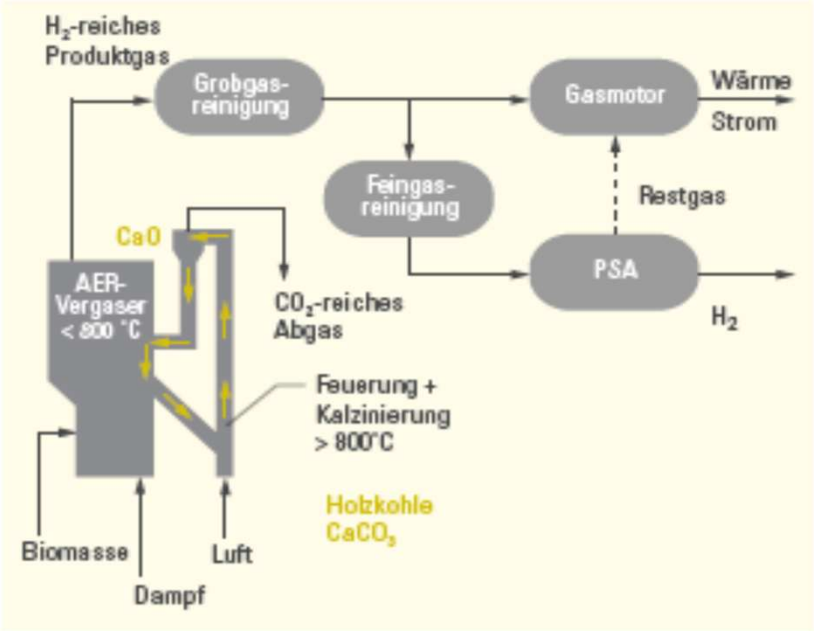



Abbildung 3.6: Funktionsprinzip einer einzelnen alkalischen Elektrolysezelle [1)]

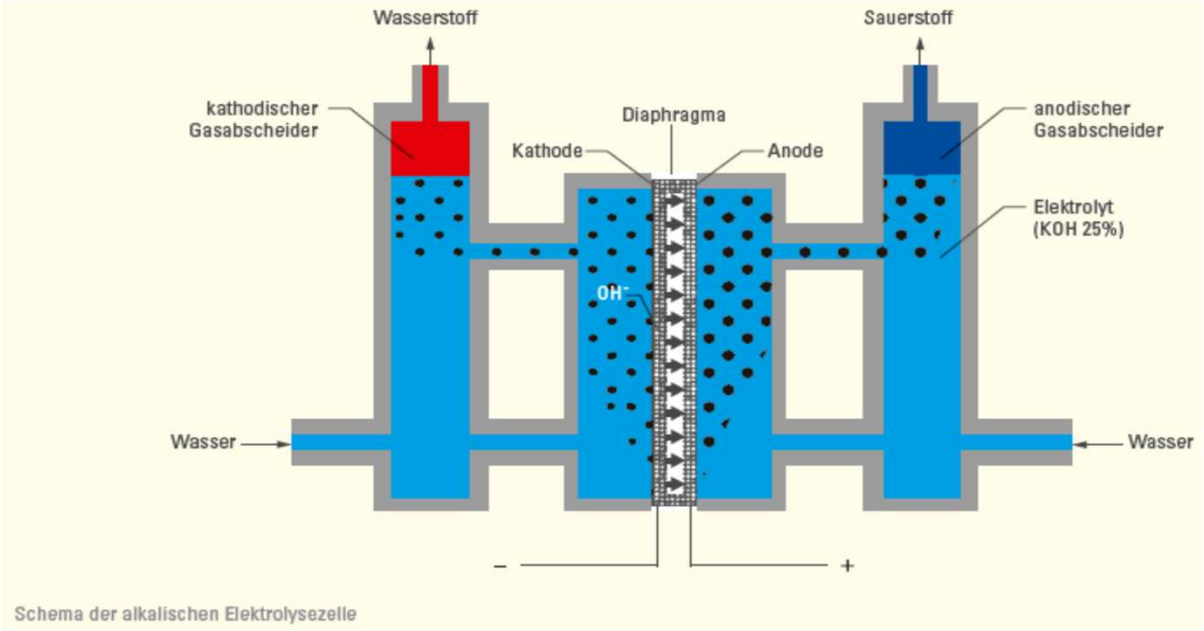





Abbildung 3.7: 350 kW Druckelektrolyseur des Hysolar-Projektes in Riyadh [1)]

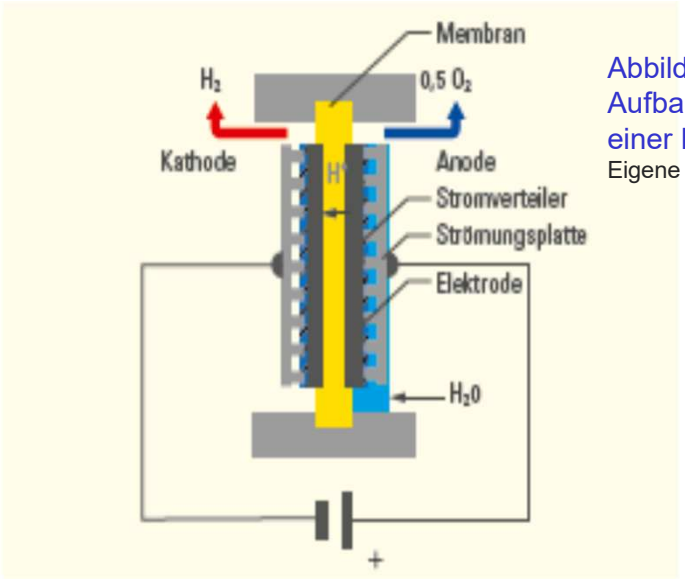


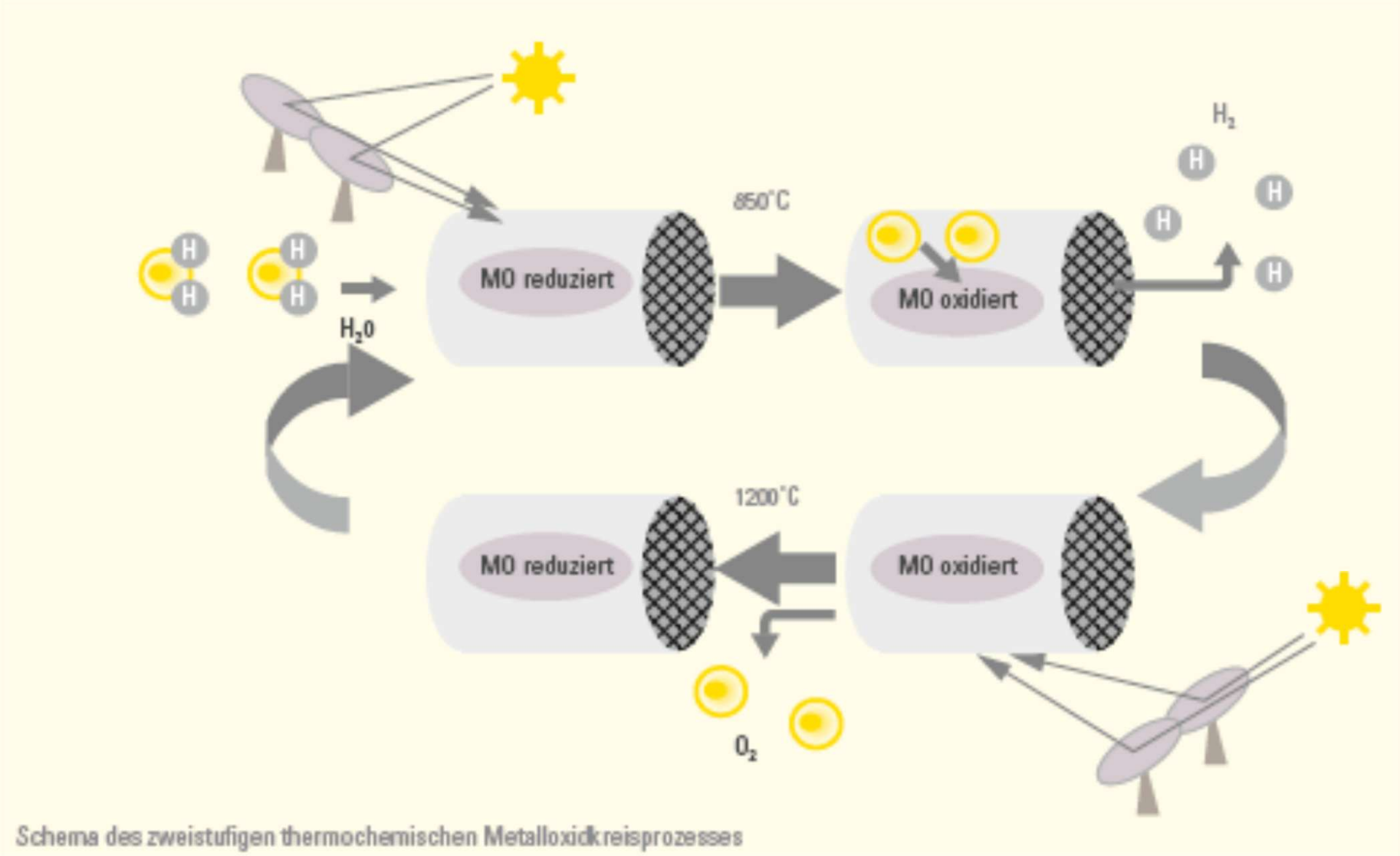

Abbildung 3.8: Vereinfachter Aufbau und Funktionsweise einer PEM-Elektrolysezelle.
Eigene Darstellung nach [Smolinka 2008].

1) Eigene Darstellung nach DLR et al. 2002

Quelle: e-mobil BW GmbH - Energieträger der Zukunft - Potenziale der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg, S. 23-25, Ausgabe 2012

# Wasserstoff (14)

Abbildung 3.10: Funktions-Prinzipbild des zweistufigen thermochemischen Kreisprozesses zur Wasserstoff- und Sauerstoffabgabe




1) Eigene Darstellung nach [Pregger 2008].

Quelle: e-mobil BW GmbH - Energieträger der Zukunft - Potenziale der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg, S. 27, Ausgabe 2012

# Physikalische Eigenschaften von Wasserstoff (15)

## Physikalische Eigenschaften

Wasserstoff in einer Entladungsröhre

Wasserstoff ist das Element mit der geringsten Dichte. Molekularer Wasserstoff ($H_2$) ist etwa 14,4-mal weniger dicht als Luft. Flüssiger Wasserstoff wiegt 70,8 Gramm pro Liter. Sein Schmelzpunkt liegt bei 14,02 K (−259 °C), der Siedepunkt bei 21,15 K (−252 °C).

Wasserstoff ist in Wasser und anderen Lösungsmitteln schlecht löslich. Für Wasser beträgt die Löslichkeit 18,2 mL/L bei 20 °C und Normaldruck. Dagegen ist die Löslichkeit (genauer maximale Volumenkonzentration) in Metallen deutlich höher.
Einige thermodynamische Eigenschaften (Transportphänomene) sind aufgrund der geringen Molekülmasse und der daraus resultierenden hohen mittleren Geschwindigkeit der Wasserstoffmoleküle (1.770 m/s bei 25 °C) von besonderer Bedeutung, (wie z. B. beim Oberth-Effekt-Raketentreibstoff). Wasserstoff besitzt bei Raumtemperatur das höchste Diffusionsvermögen, die höchste Wärmeleitfähigkeit und die höchste Effusionsgeschwindigkeit aller Gase. Eine geringere Viskosität weisen nur drei- oder mehratomige reale Gase wie zum Beispiel *n*-Butan auf.
Die Mobilität des Wasserstoffs in einer festen Matrix ist, bedingt durch den geringen Molekülquerschnitt, ebenfalls sehr hoch. So diffundiert Wasserstoff durch Materialien wie Polyethylen und glühendes Quarzglas. Ein sehr wichtiges Phänomen ist die außerordentlich hohe Diffusionsgeschwindigkeit in Eisen, Platin und einigen anderen Übergangsmetallen, da es dort dann zur Wasserstoffversprödung kommt.
In Kombination mit einer hohen Löslichkeit treten bei einigen Werkstoffen extrem hohe Permeationsraten auf. Hieraus ergeben sich technische Nutzungen zur Wasserstoffanreicherung, aber auch technische Probleme beim Transportieren, Lagern und Verarbeiten von Wasserstoff und Wasserstoffgemischen, da nur Wasserstoff diese räumlichen Begrenzungen durchwandert (siehe Sicherheitshinweise).

| Physikalisch [2] | |
|---|---|
| Aggregatzustand | gasförmig ($H_2$) |
| Dichte | 0,0899 kg · $m^{-3}$[5] bei 273 K |
| Magnetismus | diamagnetisch ($X_m = -2{,}2 \cdot 10^{-9}$)[6] |
| Schmelzpunkt | 14,01 K (−259,14 °C) |
| Siedepunkt | 21,15 K[7] (−252 °C) |
| Molares Volumen | (fest) 11,42 · $10^{-6}$ $m^3 \cdot mol^{-1}$ |
| Verdampfungswärme | 0,90 kJ/mol[7] |
| Schmelzwärme | 0,558 kJ·$mol^{-1}$ |
| Schallgeschwindigkeit | 1270 m·$s^{-1}$ bei 298,15 K |
| Spezifische Wärmekapazität | 14304 J·$kg^{-1}$·$K^{-1}$ |
| Wärmeleitfähigkeit | 0,1805 W·$m^{-1}$·$K^{-1}$ |

Wasserstoff hat ein Linienspektrum und je nach Temperatur des Gases im sichtbaren Bereich ein mehr oder weniger ausgeprägtes kontinuierliches Spektrum. Letzteres ist beim Sonnenspektrum besonders ausgeprägt. Die ersten Spektrallinien im sichtbaren Bereich, zusammengefasst in der so genannten Balmer-Serie, liegen bei 656 nm, 486 nm, 434 nm und 410 nm. Daneben gibt es weitere Serien von Spektrallinien im Infrarot- (Paschen-Serie, Brackett-Serie und Pfund-Serie) und eine im Ultraviolettbereich (Lyman-Serie) des elektromagnetischen Spektrums. Eine besondere Bedeutung in der Radioastronomie hat die 21-Zentimeter-Linie (HI-Linie) in der Hyperfeinstruktur.

In einem magnetischen Feld verhält sich H2 sehr schwach diamagnetisch. Das bedeutet, die Dichte der Feldlinien eines extern angelegten Magnetfeldes nimmt in der Probe ab. Die magnetische Suszeptibilität ist bei Normdruck {\displaystyle \chi _{m}} \chi _{m} = −2,2 · 10−9 und typischerweise einige Größenordnungen unter der von diamagnetischen Festkörpern. Gegenüber elektrischem Strom ist H2 ein Isolator. In einem elektrischen Feld hat er eine Durchschlagsfestigkeit von mehreren Millionen Volt pro Meter.
Wasserstoffgas hat ein Treibhauspotential von 6 nach 15

Quellen:
5) Hochspringen nach: a b c Eintrag zu Wasserstoff in der GESTIS-Stoffdatenbank des IFA, abgerufen am 3. Mai 2017.
6) Robert C. Weast (Hrsg.): CRC Handbook of Chemistry and Physics. CRC (Chemical Rubber Publishing Company), Boca Raton 1990, ISBN 0-8493-0470-9, S. E-129 bis E-145. Die Werte dort sind auf g/mol bezogen und in cgs-Einheiten angegeben. Der hier angegebene Wert ist der daraus berechnete maßeinheitslose SI-Wert.
7) Hochspringen nach:a b Yiming Zhang, Julian R. G. Evans, Shoufeng Yang: Corrected Values for Boiling Points and Enthalpies of Vaporization of Elements in Handbooks. In: Journal of Chemical & Engineering Data. 56, 2011, S. 328–337, doi:10.1021/je1011086.
15) Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP) ausgewählter Verbindungen und deren Gemische gemäß Viertem Sachstandsbericht des IPCC bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren: Umweltbundesamt.de. Abgerufen am 18. September 2018

aus Wikipedia – Internet Thema Wasserstoff, 9/2019

# Verwendung von Wasserstoff (16)

**Jedes Jahr werden weltweit mehr als 600 Milliarden Kubikmeter Wasserstoff (rd. 30 Mio. t) für zahllose Anwendungen in Industrie und Technik gewonnen.**
**Wichtige Einsatzgebiete sind:**

- *Energieträger*: Beim Schweißen, als Raketentreibstoff. Von seiner Verwendung als Kraftstoff für Strahltriebwerke, in Wasserstoffverbrennungsmotoren oder über Brennstoffzellen verspricht man sich, in absehbarer Zeit die Nutzung von Erdölprodukten ablösen zu können (siehe Wasserstoffantrieb), weil bei der Verbrennung vor allem Wasser entsteht, doch kein Ruß und kein Kohlenstoffdioxid. Wasserstoff ist jedoch im Gegensatz zu Erdöl keine Primärenergie.
- *Kohlehydrierung*: Durch verschiedene chemische Reaktionen wird Kohle mit $H_2$ in flüssige Kohlenwasserstoffe überführt. So lassen sich Benzin, Diesel und Heizöl künstlich herstellen.
- Momentan haben beide vorgenannten Verfahren wegen höherer Kosten noch keine wirtschaftliche Bedeutung. Das könnte sich aber drastisch ändern, sobald die Ölvorräte der Erde zur Neige gehen.
- *Reduktionsmittel*: $H_2$ kann mit Metalloxiden reagieren und ihnen dabei den Sauerstoff entziehen. Es entsteht Wasser und das reduzierte Metall. Das Verfahren wird bei der Verhüttung von metallischen Erzen angewandt, insbesondere um Metalle möglichst rein zu gewinnen.
- Mit dem Haber-Bosch-Verfahren wird aus Stickstoff und Wasserstoff Ammoniak hergestellt und daraus wichtige Düngemittel und Sprengstoffe.
- *Fetthärtung*: Gehärtete Fette werden aus Pflanzenöl mittels Hydrierung gewonnen. Dabei werden die Doppelbindungen in ungesättigten Fettsäure-Resten der Glyceride mit Wasserstoff abgesättigt. Die entstehenden Fette haben einen höheren Schmelzpunkt, wodurch das Produkt fest wird. Auf diese Weise stellt man Margarine her. Dabei können als Nebenprodukt auch gesundheitlich bedenkliche *trans*-Fette entstehen.
- *Lebensmittelzusatzstoff*: Wasserstoff ist als E 949 zugelassen und wird als Treibgas, Packgas u. ä. verwendet.[21]
- *Kühlmittel*: Aufgrund seiner hohen Wärmekapazität benutzt man (gasförmigen) Wasserstoff in Kraftwerken und den dort eingesetzten Turbogeneratoren als Kühlmittel. Insbesondere setzt man $H_2$ dort ein, wo eine Flüssigkeitskühlung problematisch werden kann. Die Wärmekapazität kommt dort zum Tragen, wo das Gas nicht oder nur langsam zirkulieren kann. Weil die Wärmeleitfähigkeit ebenfalls hoch ist, verwendet man strömendes $H_2$ auch zum Abtransport von thermischer Energie in große Reservoire (z. B. Flüsse). In diesen Anwendungen schützt Wasserstoff die Anlagen vor Überhitzung und erhöht die Effizienz. Von Vorteil ist dabei, dass Wasserstoff durch seine geringe Dichte, die in die Reynoldszahl eingeht, bis zu höheren Geschwindigkeiten widerstandsarm laminar strömt als andere Gase.
- *Kryogen*: Wegen der hohen Wärmekapazität und niedrigem Siedepunkt eignet sich flüssiger Wasserstoff als Kryogen, also als Kühlmittel für extrem tiefe Temperaturen. Auch größere Wärmemengen können von flüssigem Wasserstoff gut absorbiert werden, bevor eine merkliche Erhöhung in seiner Temperatur auftritt. So wird die tiefe Temperatur auch bei äußeren Schwankungen aufrechterhalten.
- *Traggas*: In Ballons und Luftschiffen fand Wasserstoff eine seiner ersten Verwendungen. Wegen der leichten Entzündlichkeit von $H_2$-Luft-Gemischen führte dies jedoch wiederholt zu Unfällen. Die größte Katastrophe in diesem Zusammenhang ist wohl das Unglück der „Dixmud“ 1923, am bekanntesten wurde sicherlich die „Hindenburg-Katastrophe“ im Jahr 1937. Wasserstoff als Traggas wurde mittlerweile durch Helium ersetzt und erfüllt diesen Zweck nur noch in sehr speziellen Anwendungen.

Die beiden natürlichen Isotope haben spezielle Einsatzgebiete.
**Deuterium** findet (in Form von schwerem Wasser) in Schwerwasserreaktoren als Moderator Verwendung, d. h. zum Abbremsen der bei der Kernspaltung entstehenden schnellen Neutronen auf thermische Geschwindigkeit.
Deuterierte Lösungsmittel werden in der magnetische Kernresonanzspektroskopie benutzt, da Deuterium einen Kernspin von Eins besitzt und im NMR-Spektrum des normalen Wasserstoff-Isotops nicht sichtbar ist.
In der Chemie und Biologie helfen Deuteriumverbindungen bei der Untersuchung von Reaktionsabläufen und Stoffwechselwegen (Isotopenmarkierung), da sich Verbindungen mit Deuterium chemisch und biochemisch meist nahezu identisch verhalten wie die entsprechenden Verbindungen mit Wasserstoff. Die Reaktionen werden von der Markierung nicht gestört, der Verbleib des Deuteriums ist in den Endprodukten dennoch feststellbar.
Ferner sorgt der erhebliche Massenunterschied zwischen Wasserstoff und Deuterium für einen deutlichen Isotopeneffekt bei den massenabhängigen Eigenschaften.
So hat das schwere Wasser einen messbar höheren Siedepunkt als Wasser.
Das radioaktive Isotop **Tritium** wird in Kernreaktoren in industriell verwertbaren Mengen hergestellt. Außerdem ist es neben Deuterium ein Ausgangsstoff bei der Kernfusion zu Helium. In der zivilen Nutzung dient es in Biologie und Medizin als radioaktiver Marker. So lassen sich beispielsweise Tumorzellen aufspüren. In der Physik ist es einerseits selbst Forschungsgegenstand, andererseits untersucht man mit hochbeschleunigten Tritiumkernen schwere Kerne oder stellt künstliche Isotope her.
Mit Hilfe der Tritiummethode lassen sich Wasserproben sehr genau datieren. Mit einer Halbwertszeit von etwa zwölf Jahren eignet es sich besonders für die Messung relativ kurzer Zeiträume (bis zu einigen hundert Jahren). Unter anderem lässt sich so das Alter eines Weines feststellen.
Es findet Verwendung als langlebige, zuverlässige Energiequelle für Leuchtfarben (im Gemisch mit einem Fluoreszenzfarbstoff), vor allem in militärischen Anwendungen, aber auch in Armbanduhren. Weitere militärische Verwendung findet das Isotop in der Wasserstoffbombe und gewissen Ausführungen von Kernwaffen, deren Wirkung auf Spaltung beruht.

Quelle: Wikipedia – Internet Thema Wasserstoff, 9/2019

# Wasserstoff als Energiespeicher (17)

## Wasserstoff gilt als ein Energieträger der Zukunft

### Herstellung von Wasserstoff

Als Energieträger ist Wasserstoff – wie auch elektrische Energie – keine Primärenergie, sondern muss wie Strom aus Primärenergie hergestellt werden. (→ *Siehe auch Hauptartikel: Wasserstoffherstellung*)
Wasserstoff als Energieträger verursacht keine schädlichen Emissionen, insbesondere kein Kohlendioxid, wenn er mit erneuerbare Energien wie Wind, Sonne oder Biomasse gewonnen wird. Derzeit (2019) erfolgt die Wasserstoff-Herstellung aber fast ausschließlich aus fossiler Primärenergie, überwiegend durch Erdgas-Reformierung.
Die unter dem Schlagwort "Power-to-Gas" oft favorisierte Gewinnung durch Wasser-Elektrolyse mit überschüssigem erneuerbaren Strom gilt bei typischen Wirkungsgraden von kaum über 70 % als relativ ineffizient und wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig gegenüber Reformierung von Erdgas, weil ausreichend billiger Strom-Überschuss tatsächlich nur für einige Stunden im Jahr genutzt werden kann und sich bei so meist geringer Auslastung die erforderliche Anlagen-Technik nur mit hohen Subventionen in Forschungs- und Pilot-Anlagen finanzieren lässt. Das kann sich erst ändern, falls eine künftig überwiegend regenerativ umgestellte Strom-Versorgung noch wesentlich mehr und nicht anderweitig verwertbare Überschüsse abwirft oder aber Erdgas als Rohstoff teurer als regenerative Stromerzeugung werden sollte bzw. mit einer entsprechend hohen $CO_2$-Abgabe belegt wird.[23]
(→ *Siehe auch Abschnitt: Technologien der Wasserstoffherstellung)*

### Speicherung von Wasserstoff

(→ *Siehe auch Hauptartikel: Wasserstoffspeicherung*)
Wasserstoffgas enthält mehr Energie pro Gewichtseinheit als jeder andere chemische Brennstoff: 141,8 MJ/kg ≈ 39,39 kWh/kg Brennwert[24 entspricht dem von 4,4 Litern oder 3,3 kg Benzin. Umgekehrt ist der Energiegehalt von Wasserstoff pro Volumen relativ gering und erreicht selbst komprimiert in flüssigem Zustand nur 10 MJ/L ≈ 2,79 kWh/L, was gerade 31 % der Energie je Liter Benzin ausmacht, so dass Wasserstoff entsprechend große Tanks erfordert.
Die technischen Probleme bei der Speicherung von Wasserstoff gelten heute als gelöst. Verfahren wie Druck- und Flüssigwasserstoffspeicherung und die Speicherung in Metallhydriden befinden sich im kommerziellen Einsatz. Daneben existieren weitere Verfahren, die sich noch im Stadium der Entwicklung oder in der Grundlagenforschung befinden.
(→ *Siehe auch Abschnitt: Technologien der Wasserstoffspeicherung)*
Die verschiedenen Speichermethoden werden nach ihren Eigenschaften und den spezifischen Anforderungen der Fahrzeuge (z. B. PKW, Bus, Bahn, Schiff, Flugzeug) eingesetzt:
•Speicherung von tiefkaltem, flüssigem Wasserstoff in vakuumisolierten Behältern (14,12 L/kg bei 20 K ≈ −253 °C) bietet höchstmögliche Speicherdichte, die Verflüssigung ist allerdings relativ energieintensiv. Eine mögliche Anwendung könnten mit leicht gebauten Tanks Wasserstofflugzeuge sein.
•Speicherung von gasförmigem Wasserstoff in Hochdruck-Behältern (55 L/kg bei 200 bar bis 25 L/kg bei 700 bar, 15 °C) benötigt keine kontinuierliche Energieversorgung zur Kühlung, auch Diffusions-Verluste können mit modernen Materialien (s. u.) minimiert werden.
•Einlagerung von Wasserstoff bei geringerem Druck gebunden in Metallhydriden, Kohlenstoffnanoröhren oder flüssigen organischen Wasserstoff-Trägern (LOHC) kann bei optimaler Sicherheit die Handhabung sehr vereinfachen. Dafür haben bisherige System bei hohem Leergewicht meist nur recht beschränkte Kapazität, so dass ein 200 kg schwerer Tank nur etwa 2 kg Wasserstoff speichern kann (entsprechend ca. 9 Litern Benzin). Auch muss der Wasserstoff meist erst durch Wärmezufuhr wieder aktiv aus der Bindung gelöst werden, um die volle Kapazität nutzen zu können.
Neue Hochdruck-Tanks für FCHV aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff für bis zu 800 bar fassen in 125 Litern Volumen bei 700 bar Nenndruck gerade 5 kg Wasserstoff (Brennwert entsprechend 22 Litern Benzin) und wiegen ungefähr 125 kg, um allen Sicherheitsanforderungen der Fahrzeughersteller zu entsprechen[25]und TÜV Abnahmen zu bestehen.[26]

### Brandlast & Explosionsgefahr

Reiner Wasserstoff im Tank ist ohne Sauerstoff nicht explosiv. Bei Überdruck durch Überhitzung wird Wasserstoff notfalls über Sicherheitsventile am Tank dosiert abgeblasen und verflüchtigt sich schnell. Eine Zündquelle kann so austretenden Wasserstoff entflammen, der dann rasch aufsteigend abfackelt, ohne dass es zur Explosion kommt. Die hohe Flüchtigkeit von Wasserstoff macht eine Explosion im Freien sehr unwahrscheinlich. Bei einem Austritt von größeren Mengen in geschlossenen Räumen (z. B. beim Brand in einer Garage) ist jedoch die Bildung eines explosionsfähigen Luftgemisches ab 4 Volumenprozent denkbar. Bei einer für FCHV Pkw typischen, geringen Speicherkapazität von maximal 5 kg Wasserstoff mit ca. 600 MJoule Heizwert bleibt die Brandlast allerdings stets geringer als der Heizwert von 20 Litern Benzin[27], das zudem viel gefährlicher ist, wenn es durch einen Aufprall verspritzt oder sich flächenhaft über den Boden ausbreitet, statt wie Wasserstoff-Gas sofort nach oben zu entweichen.

Quellen:
23↑ https://www.energie-lexikon.info/power_to_gas__ein_hype.html
24↑ https://www.energie-lexikon.info/wasserstoff.html
25↑ Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband: DWV Wasserstoff-Sicherheits-Kompendium (Memento des Originals vom 17. März 2014 im Internet Archive)
aus Wikipedia – Internet  Thema Wasserstoff, 9/2019

# Energiedichten von Brennstoffen im Vergleich mit Wasserstoff (18)

## Brennwerte bezogen auf die Masse:

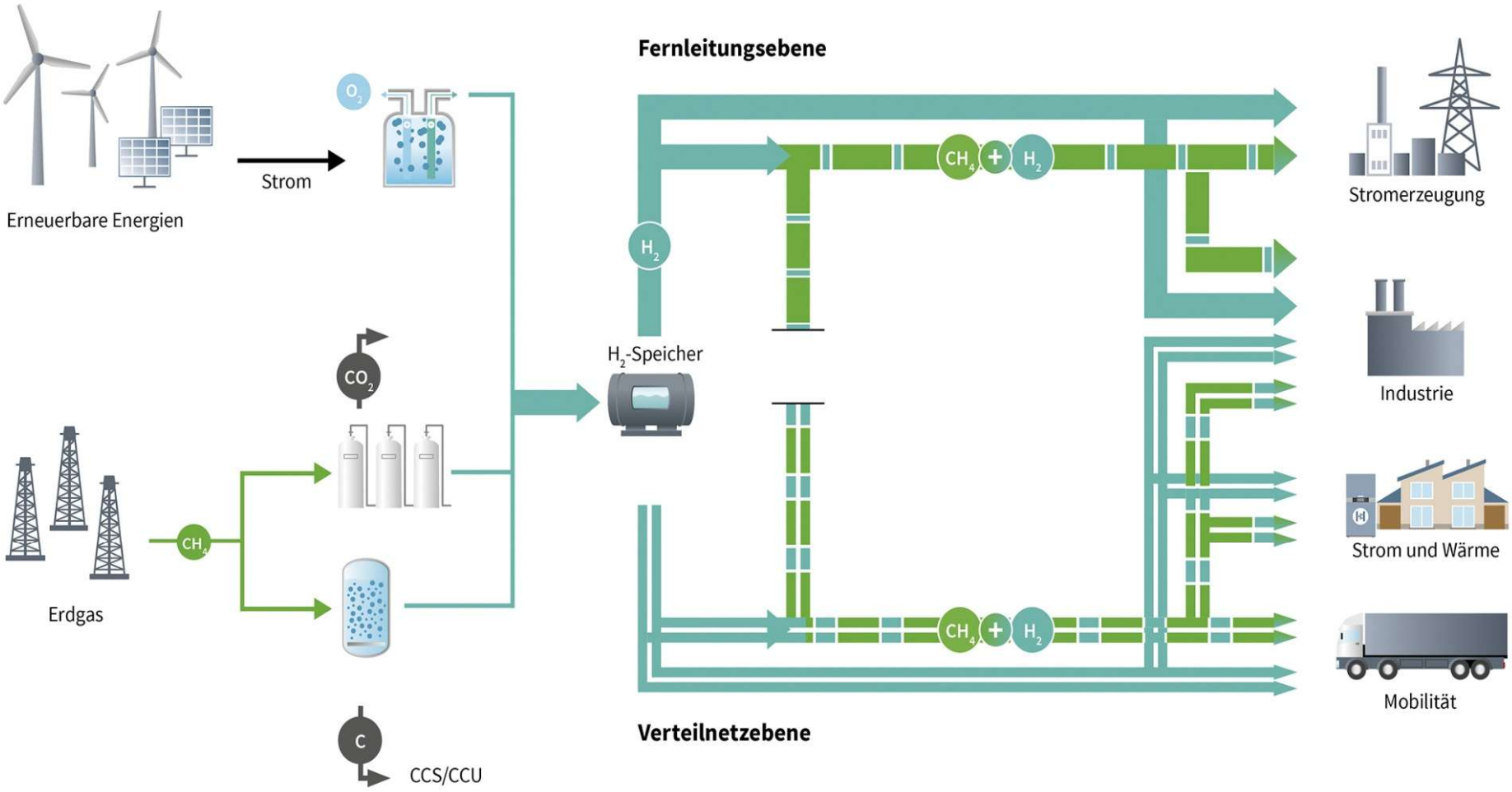
| Brennstoff | Brennwert / kg | Dichte | Brennwert / Vol | Heizwert |
|---|---|---|---|---|
| Wasserstoff[28] | 39,39 kWh/kg = 141,8 MJ/kg | 0,090 kg/m³ | 3,54 kWh/m³ = 12,7 MJ/m³ | ~85% ≈ 33,33 kWh/kg = 120,0 MJ/kg |
| Methan $CH_4$[29] | 13,9 kWh/kg = 50 MJ/kg | 0,72 kg/m³ | 10 kWh/m³ = 36 MJ/m³ | ~90% ≈ 9 kWh/m³ = 32 MJ/m³ |
| Erdgas "H"[30] | 13,9 kWh/kg = 50 MJ/kg | 0,80 kg/m³ | 11,1 kWh/m³ = 40 MJ/m³ | ~90% ≈ 10 kWh/m³ = 36 MJ/m³ |
| Diesel[31] | 12,5 kWh/kg = 45 MJ/kg | 0,83 kg/l | 10,5 kWh/L = 37,8 MJ/l | ~94% ≈ 9,8 kWh/L = 35 MJ/l |
| Benzin[32] | 12,0 kWh/kg = 43 MJ/kg | 0,75 kg/l | 9,0 kWh/L = 32,4 MJ/l | ~94% ≈ 8,5 kWh/L = 31 MJ/l |

**Auf das Volumen bezogen:**

- Wasserstoff (flüssig): 2.360 kWh/m³
- Benzin: 8.760 kWh/m³
- Erdgas (20 MPa): 2.580 kWh/m³
- Wasserstoffgas (20 MPa): 530 kWh/m³
- Wasserstoffgas (Normaldruck): 3 kWh/m³

Quellen:
28) https://www.energie-lexikon.info/wasserstoff.html
29) https://www.energie-lexikon.info/methan.html
30) https://www.energie-lexikon.info/erdgas.html
31) https://www.energie-lexikon.info/dieselkraftstoff.html
32) https://www.energie-lexikon.info/benzin.html
aus Wikipedia – Internet Thema Wasserstoff, 9/2019

# Herstellung und Transport von Wasserstoff zur Anwendung (1)




Quelle TÜV Nord 2022

# Verschiedene Anwendungen von Wasserstoff (1)

Ein Schlüssel für eine saubere und sichere Energiezukunft

## Wasserstoff – Schlüssel im künftigen Energiesystem




**Wasserstoff – zentraler Baustein im zukünftigen Energiesystem**
Quelle: Umweltbundesamt

**„Die Energie von morgen ist Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist.“, schrieb Jules Verne 1870 in „Die geheimnisvolle Insel“. Wasserstoff wird eine wichtige Rolle in der zukünftigen Energieversorgung einnehmen. Er wird als direkt genutzter Endenergieträger benötigt, z.B. in der Stahlindustrie, oder als Sekundärenergieträger, um Kohlenwasserstoffe für Flugzeuge herzustellen.**

Quelle: UBA – 4/2023

# Verschiedene Anwendungen für Wasserstoff (2)

Ein Schlüssel für eine saubere und sichere Energiezukunft

## Verschiedene Anwendungen für Wasserstoff










Der Wasserstoffverbrauch wird heute von der **Industrie** dominiert , und zwar von der Ölraffination, der Ammoniakproduktion, der Methanolproduktion und der Stahl-produktion.
Nahezu der gesamte Wasserstoff wird mit fossilen Brennstoffen geliefert, sodass ein erhebliches Potenzial für Emissionsredu-zierungen durch sauberen Wasserstoff besteht.

Im **Verkehr** hängt die Wettbewerbsfähigkeit von Wasserstoff-Brennstoffzellenautos von den Brennstoffzellenkosten und den Tankstellen ab, während bei Lastkraftwagen die Senkung des Lieferpreises für Wasserstoff Vorrang hat.
Schifffahrt und Luftfahrt verfügen nur über begrenzte Optionen für kohlenstoffarme Kraftstoffe und bieten eine Chance für wasserstoffbasierte Kraftstoffe

In **Gebäuden** könnte Wasserstoff in bestehende Erdgasnetze eingemischt werden, wobei das größte Potenzial in Mehrfamilien- und Geschäfts-gebäuden, insbesondere in dichten Städten, besteht. Langfristige Perspektiven könnten die direkte Verwendung von Wasserstoff in Wasserstoffkesseln oder Brennstoffzellen sein.

Bei der **Stromerzeugung** ist Wasserstoff eine der führenden Optionen für die Speicherung erneuerbarer Energien. Wasserstoff und Ammoniak können in Gasturbinen eingesetzt werden, um die Flexibilität des Stromnetzes zu erhöhen. Ammoniak könnte auch in Kohlekraftwerken zur Emissions-minderung eingesetzt werden.

Quelle: IEA – Zukunft Wasserstoff aus www.iea.de 8/2019

# Wasserstoff – was kann er wirklich? Stand Mai 2022 (1)

**Das leichteste aller Elemente spielt eine wichtige Rolle in Energiewende-Szenarien. Was man über Produktion, Nutzung und Klimabilanz wissen sollte.**

*Von Werner Ludwig*

Wenn es um das Thema Wasserstoff geht, bekommen Spitzenkräfte aus Politik und Wirtschaft oft leuchtende Augen. Jüngst verkündete der Stuttgarter Bosch-Konzern, massiv in das Geschäft mit diesem Energieträger einsteigen zu wollen – hauptsächlich mit der Produktion von Komponenten für Elektrolyseanlagen zur Wasserstoffgewinnung. Dass auf diesem Gebiet in Zukunft gute Geschäfte winken, steht außer Zweifel. Denn für einen klimafreundlichen Umbau des Energiesystems spielt Wasserstoff eine wichtige Rolle.

Die Begeisterung für das Gas rührt daher, dass bei seiner Verbrennung oder bei der Nutzung in Brennstoffzellen nur Wasser entsteht – und keine Treibhausgase oder sonstige Luftschadstoffe. Allerdings kommt reiner Wasserstoff nicht in nennenswerten Mengen auf der Erde vor. Bevor man ihn nutzen kann, muss er aus anderen chemischen Verbindungen gewonnen werden. Und hier fangen die Probleme an. Denn klimaneutral ist Wasserstoff nur, wenn er in Elektrolyseanlagen hergestellt wird, die mit Ökostrom betrieben werden. Sogenannter grüner Wasserstoff spielt aber bislang kaum eine Rolle. Das Gas wird aktuell zu 96 Prozent aus Öl, Erdgas und Kohle gewonnen, was wiederum mit $CO_2$-Emissionen verbunden ist.



Foto: IW

**„Jeder verplant jetzt schon den Wasserstoff, der noch gar nicht verfügbar ist."**

**Thilo Schaefer,** IW-Energieexperte

Für die Energiewende ist Wasserstoff auch deshalb interessant, weil er Strom, der aktuell nicht benötigt wird, in Form chemischer Energie speichern kann. Der so gewonnene Wasserstoff ist ein wahrer Alleskönner. Er kann als klimaneutrale Alternative zu Erdgas Gebäude heizen, in Gaskraftwerken zum Ausgleich der unsteten Ökostromerzeugung wieder in Strom verwandelt werden oder in Brennstoffzellen genutzt werden, die zum Beispiel Lastwagen und Schiffe antreiben oder als Blockheizkraftwerke dienen.

Das größte Potenzial für den Einsatz von grünem Wasserstoff sehen Energieexperten aber in der Industrie, die ihren gewaltigen Wärmebedarf bis jetzt zum allergrößten Teil über fossile Energiequellen deckt. „Durch die Transformation industrieller Produktionsverfahren können große Mengen an Treibhausgasemissionen eingespart werden", sagt auch Thilo Schaefer, Leiter des Kompetenzfelds Umwelt, Energie, Infrastruktur beim Institut der Deutschen Wirtschaft (IW) in Köln.

Um wichtige Industriebranchen klimafreundlicher zu machen, werden enorme Mengen an grünem Wasserstoff benötigt. Eine Schlüsselrolle soll das Gas künftig unter anderem in der Stahlproduktion spielen, wo er die bislang eingesetzte klimaschädliche Kohle ersetzen soll. Auch die Treibhausgasemissionen der Zementproduktion und der Chemieindustrie könnten durch den konsequenten Einsatz von Wasserstoff drastisch verringert werden. Für Chemiekonzerne ist das Gas zudem nicht nur als Energiequelle interessant, sondern auch als Rohstoff für chemische Synthesen. An potenziellen Anwendungen herrscht also kein Mangel – dafür aber an grünem Wasserstoff. „Jeder verplant jetzt schon den Wasserstoff, der noch gar nicht verfügbar ist", sagt Schaefer. Der künftige Bedarf übersteigt die vorhandene Elektrolysekapazität um ein Vielfaches.

Für den Ausbau der grünen Wasserstoffproduktion werden zudem gewaltige Mengen an Ökostrom benötigt. Die Bundesregierung hat die Ausbauziele bei Wind und Fotovoltaik zwar nach oben gesetzt, doch der Zubau läuft immer noch viel zu langsam. Hinzu kommt, dass auch in anderen Bereichen die Nachfrage nach Ökostrom wächst – etwa für E-Autos, Wärmepumpen oder die Elektrifizierung industrieller Prozesse. Die direkte Nutzung von Ökostrom hat den Vorteil, dass dabei keine Energie bei der Elektrolyse und nachgelagerten Prozessen verloren geht.

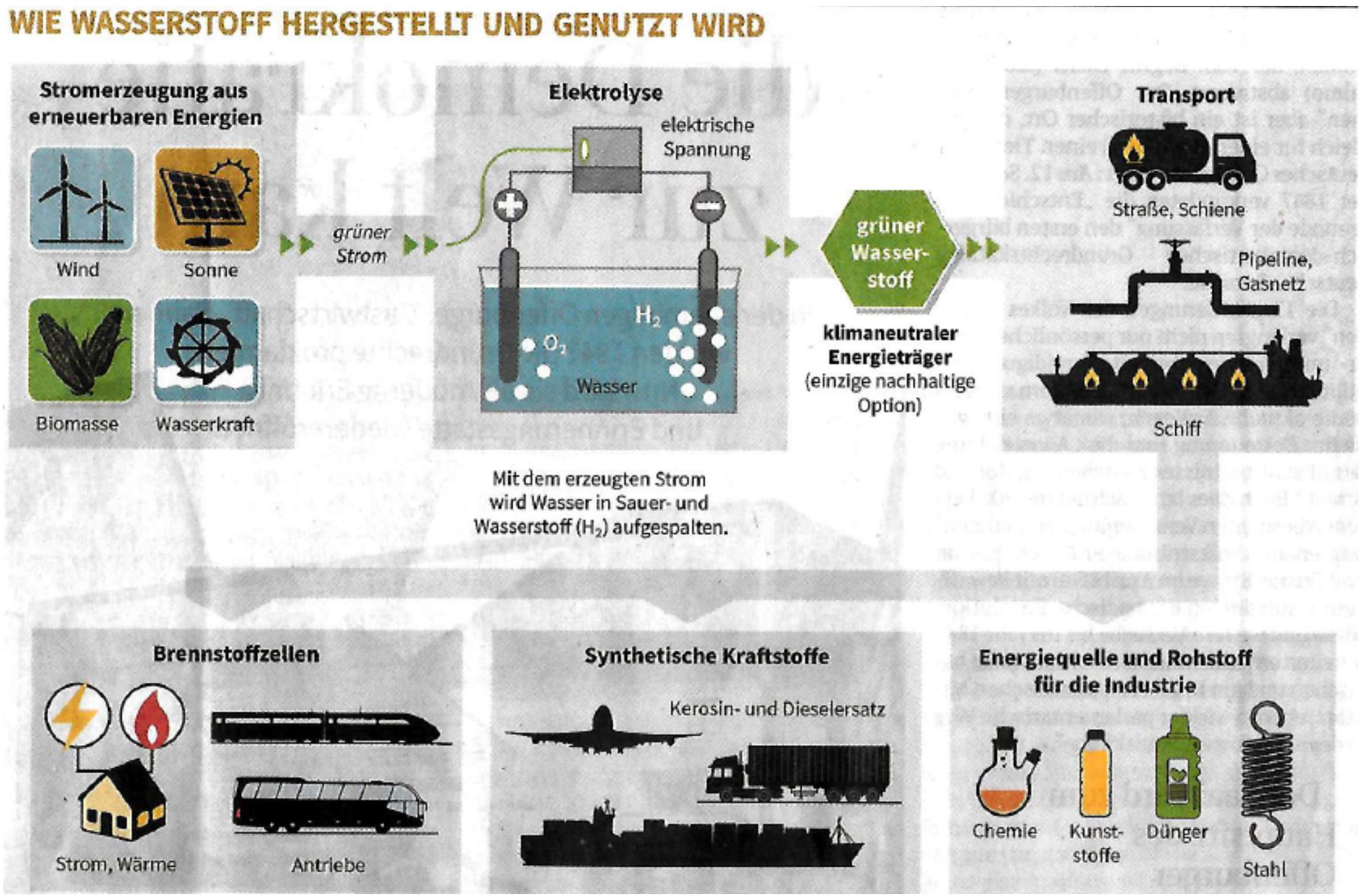
Einschlägige Zukunftsszenarien gehen davon aus, dass der größte Teil des grünen Wasserstoffs importiert werden muss. So nimmt die Bundesregierung in ihrer Nationalen Wasserstoffstrategie an, dass bis zum Jahr 2030 weniger als ein Sechstel des hiesigen Bedarfs durch nationale Erzeugung gedeckt werden kann. Der Rest soll aus sonnenreichen Regionen wie Nordafrika oder auch Chile importiert werden, wo es mehr Platz für die Ökostromerzeugung gibt und die Produktionskosten niedriger sind.

Doch der Aufbau der dafür erforderlichen Infrastruktur gehe viel zu langsam voran, kritisiert Schaefer. „Wasserstoffstrategie: Bundesregierung verschätzt sich bei Importen bis 2030" lautet die Überschrift über einem Beitrag auf der IW-Homepage zu einer Studie, an der Schaefer beteiligt war. „Es fehlen Elektrolyseanlagen und Transportkapazitäten", sagt der Experte und fügt hinzu: „Wenn wir die Potenziale von Wasserstoff in absehbarer Zeit nutzen wollen, muss die Politik mächtig aufs Tempo drücken."

Zudem müsse es für Unternehmen attraktiver werden, Wasserstoff zu nutzen. Damit die Industrie jetzt schon in wasserstoffbasierte Produktionsanlagen investieren könne, müsse übergangsweise auch grauer und blauer Wasserstoff aus fossilen Quellen eingesetzt werden, so Schaefer.

Quelle: Stuttgarter Zeitung, Werner Ludwig, Ausgabe 12. Mai 2022

# Wasserstoff – was kann er wirklich? Stand Mai 2022 (2)

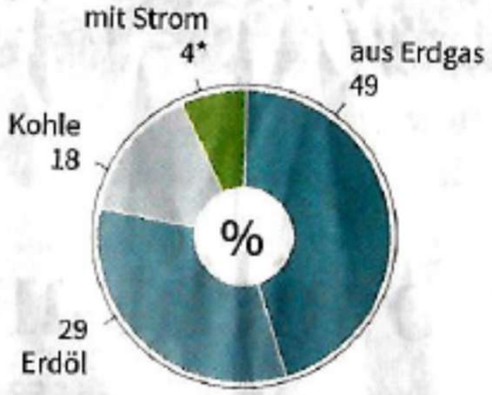



Quelle: Stuttgarter Zeitung, Werner Ludwig, Ausgabe 12. Mai 2022

# Wasserstoff – was kann er wirklich? Stand Mai 2022 (3)

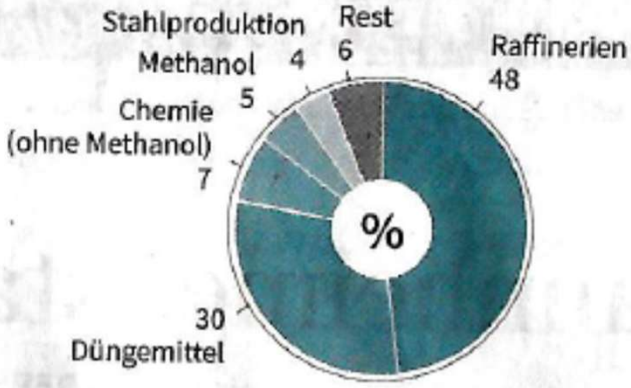



**Wasserstoffherstellung in Deutschland**
nach Primärenergieträger in Prozent, 2018



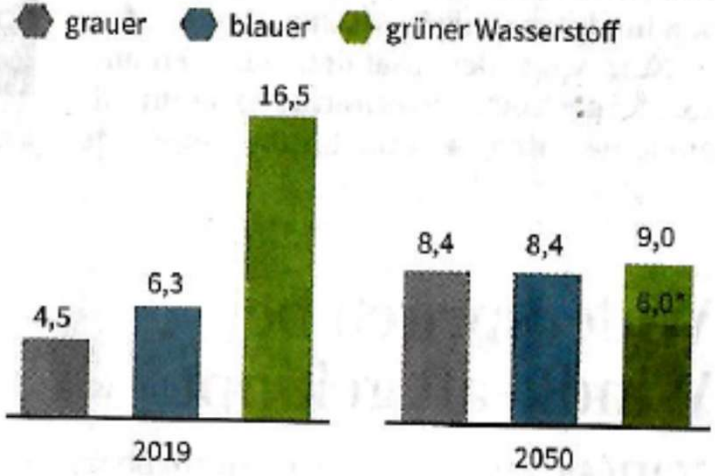

*zum Teil aus fossilen Brennstoffen erzeugt (Strommix)
Grafik: Zapletal Quelle: Internationale Energieagentur

**Nutzung von Wasserstoff in Europa**
nach Anwendungsbereich, in Prozent, 2020




Quelle: Europäische Kommission

**Wasserstoffproduktionskosten in Deutschland**
in Cent je Kilowattstunde




*bei Preissturz der Elektrolyseanlagen
Quelle: Greenpeace

Quelle: Stuttgarter Zeitung, Werner Ludwig, Ausgabe 12. Mai 2022

# Brennstoffzellen (1)

## EINFÜHRUNG

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, die die in Brennstoffen gespeicherte chemische Energie direkt in elektrische Energie und Wärme umwandeln. Im Vergleich zu Verbrennungsprozessen mit anschließender Umwandlung von Wärme in mechanische oder elektrische Energie können mit direkter Umwandlung deutlich höhere Wirkungsgrade erreicht werden, vor allem im Teillastbereich.

**Beispiel:**
- Der maximale Wirkungsgrad eines PKW mit Benzinmotor liegt im Fahrzyklus bei 15 - 20 % (Tank auf Rad)
- Der Wirkungsgrad eines PKW mit Brennstoffzellensystem und Elektromotor liegt bei 30 - 40 % (Tank auf Rad)
- Der Wirkungsgrad eines PKW mit Lithium-Ionen-Batterien und Elektromotor liegt bei 80 % (Batterie auf Rad).

Im Gegensatz zu Akkumulatoren (Batterien), die nach der Entladung des aktiven Materials wieder aufgeladen werden müssen, können Brennstoffzellen bei kontinuierlicher Brennstoffzufuhr unterbrechungsfrei betrieben werden. **Tabelle 3-1** zeigt einen qualitativen Vergleich von Verbrennungsmotor, Brennstoffzellen und Batterien für Fahrzeuge.

## GESCHICHTE

Die folgende Auflistung soll die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie an Beispielen aufzeigen. Sie ist weder vollständig, noch erhebt sie den Anspruch repräsentativ zu sein.

**1838/39** führten Christian Friedrich Schönbein und William Robert Grove unabhängig voneinander erste Versuche mit "galvanischen Gasbatterien" (einfachste Brennstoffzellen) durch, die mit Wasserstoff/ Sauerstoff und Schwefelsäure als Elektrolyten betrieben wurden **(Abbildung 3.12)**.

**1889** wurde von Charles Langer und Ludwig Mond erstmals das Wort "Brennstoffzelle" verwendet. Langer und Mond benutzen alkalische Elektrolyte und Kohlegas als Brennstoff.

**1889 - 1910** entwickelte Walter Nernst unter anderem mit der nach ihm benannten Nernst- Gleichung die Grundlagen der Beschreibung der elektrochemischen Vorgänge in galvanischen Zellen (Brennstoffzellen, Batterien).

**1897** erhielt William W. Jacques ein kanadisches Patent auf eine Kohlenstoff/Sauerstoff-Brennstoff-zelle mit Natronlauge als Elektrolyten.

**1937** Aufbauend auf den Arbeiten von Walter Nernst und Walther Schottky demonstrierten Emil Preis und Hans Baur die erste Brennstoffzelle mit einem Festoxid-Elektrolyten.

**1952** zeigte Francis Thomas Bacon ein 5 kW Wasserstoff/Sauerstoff- Brennstoffzellensystem mit alkalischem Elektrolyten (AFC, Alkaline Fuel Cell). Das System wurde vom Luft- und Raumfahrtunternehmen Pratt & Whitney für die Energieversorgung der Apollo Missionen lizenziert.

**1955** begann Willard Thomas Grubb bei General Electric mit der Entwicklung von Brennstoffzellen mit sulfoniertem-Polystyrol- Elektrolyten. 1958 führte dessen Kollege Leonard Niedrach die Arbeiten fort und baute die erste Brennstoffzelle mit einer Polymerelektrolytmembran (PEM). 1965 - 66 wurden Weiterentwicklungen dieser Brennstoffzellen in den Gemini 5 bis 11 Missionen der NASA eingesetzt. Abbildung 3.13 zeigt Roy Mushrush von General Electrics bei der Vorführung einer solchen 1 kW PEM-Brennstoffzelle.

**1959** präsentierte der amerikanische Traktorenhersteller Allis- Chalmers Manufacturing Company einen Traktor mit einem 15 kW AFC-Brennstoffzellensystem und baute danach unter anderem einen mit Brennstoffzellen betriebenen Gabelstapler, ein Golf-Caddy und ein U-Boot.

**1967** baute Karl Kordesch (Union Carbide) ein Motorrad mit AFC Brennstoffzellensystem, 1970 integrierte er ein AFC-System in einen

PKW der Austin Motor Company (Abbildung 3.14).

**1967 - 75** wurden AFC-Brennstoffzellen in den Apollo Missionen der NASA eingesetzt. Die Brennstoffzellensysteme wurden von Pratt & Whitney auf Basis der von F. T. Bacon lizenzierten Zellen hergestellt. Weiterentwicklungen dieser Systeme durch UTC kamen 1975-2011 in den Space Shuttles zum Einsatz.

# Brennstoffzellen (2)

## Antrieb von Unterseebooten

**1980** begannen HDW (Howaldtswerke Deutsche Werft), Ferrostaal und IKL (Ingenieurkontor Lübeck) mit Forschungen zu ausenluftunabhängigen Antrieben für U-Boote auf Brennstoffzellenbasis,

**1986** wurde ein Versuchssystem mit alkalischen Brennstoffzellen in ein U-Boot eingebaut und ab 1988 erprobt.

**1998** starteten HDW und Nordseewerke den Bau der brennstoffzellenbetriebenen U-Boot-Klasse 212A. Das erste dieser U-Boote (U31) wurde 2002 in Betrieb genommen. Seit 2003 werden U-Boote mit Brennstoffzellenantrieb in Serie gebaut.

## Stationäre Systeme

**1983** wurde in Tokio ein 11 MW Brennstoffzellenkraftwerk errichtet, das bis 1997 in Betrieb war. Die Brennstoffzellen hatten einen Elektrolyten aus Phosphorsaure (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell).

**1990** begann MTU mit der Entwicklung des „HotModule“, eines modularen 250 kW Brennstoffzellen-Kraftwerkes mit einem Schmelzkarbonat-Elektrolyten (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell).

**1997** wurde die erste Versuchsanlage in Betrieb genommen, bis Ende **2004** weitere 25 dieser Systeme.

**2005** wurde MTU an EQT/Tognum verkauft, eine Kapitalbeteiligungsgesellschaft, die die für 2010 geplante Serienfertigung des „HotModule“ erst verschob und 2011 alle Aktivitäten auf dem Gebiet der stationären Stromerzeugung durch Brennstoffzellen mit der Erklärung beendete, dass sich dieses Geschäft „mittelfristig unter den zur Zeit weltweit erkennbaren Markt- und Förderbedingungen nicht kommerziell gestalten lasst“.

**1991** brachte UTC mit dem 200 kW PAFC-Kraftwerk ONSI PC 25 das erste kommerziell erhältliche Brennstoffzellensystem auf den Markt, das bis heute vertrieben wird (seit 2004 unter dem Namen PureCell 200, seit 2008 als PureCell 400 mit 400 kW elektrischerLeistung).

**1999** wurde in den Niederlanden das mit 100 kW damals größte SOFC-Brennstoffzellenkraftwerk in Betrieb genommen. Hersteller war Siemens Westinghouse.

**2001** wurde das Kraftwerk nach 16.000 Betriebsstunden zur RWE nach Essen verlegt und dort weiter betrieben.

**2000** wurde das erste PEM-Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk in Berlin aufgestellt. Hersteller waren Alstom/Ballard, die elektrische Leistung betrug 212 kW.

**2002** begann in Japan die Entwicklung stationärer Brennstoffzellensysteme für die Hausenergieversorgung.

**2005 - 2008** wurden 3307 Feldtestsysteme in Betrieb genommen. Seit **2009** werden unter dem Markennamen Ene-Farm 750 W Systemen von verschiedenen Herstellern (Panasonic, Toshiba und Eneos Celltech) kommerziell vertrieben. Der Verkauf wird von der japanischen Regierung über Zuschüsse gefordert. Bis Anfang 2012 wurden mehr als 22.000 Systeme verkauft.

**2008** startete das vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) geforderte Callux-Projekt. Ziel des Projektes ist ein mehrjähriger Praxistest von ca. 800 Brennstoffzellen-KWK-Anlagen (Kraft-Warme-Kopplung) in Privathaushalten. Anfang 2012 waren es bereits ca. 200 Anlagen. Am Projekt sind mehrere Gerätehersteller und Energieversorger beteiligt.

# Brennstoffzellen (3)

## Antrieb von Kraftfahrzeugen

**1994** stellte Daimler den NECAR 1 vor, einen Kleinbus mit einer 50 kW PEM-Brennstoffzelle.

**1997** baute Daimler den NECAR 3, das erste Brennstoffzellenfahrzeug mit vorgeschaltetem Methanol-Reformer, 1999 den NECAR 4, der mit Flüssigwasserstoff betrieben wurde.

**1997** präsentierte Daimler den NEBUS, einen Stadtbus mit Brennstoffzellenantrieb.

**2000** wurde der im bayerischen Brennstoffzellen-Bus-Projekt entwickelte Bus im regulären Linieneinsatz der Verkehrs-AG Nürnberg eingesetzt **(Abbildung 3.16).** Projektpartner waren MAN, Siemens und die Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. Ein durch MAN und Ballard Power Systems weiterentwickelter Bus wurde 2004 auf dem Flughafen München in Betrieb genommen.

**1999 - 2003** präsentierten neben Daimler (NECAR 4, NECAR 5, JEEP Commander, F-CELL auf Basis der A-Klasse) auch viele andere Automobilhersteller Brennstoffzellen-Testfahrzeuge: unter anderem Fiat (Elettra H2 Fuel Cell), Ford (P2000 FC EV, Focus FC5, Focus FCV), Honda (FCX-V3, FCX-V4), Mazda (Premacy FC-EV, RX-8 Hydrogen RE), Nissan (X-Trail FCV), Opel (HydroGen1, HydroGen3), Peugeot (Partner TAXI PAC), Suzuki (MR Wagon FCV), Toyota (FCHV-1,

FCHV-2, FCHV-3), Volkswagen (Bora HyMotion).

**2003 - 2005** baute Daimler eine Kleinserie mit 36 Brennstoffzellenbussen Citaro BZ, die bis 2006/2007 in zehn europäischen Städten und in Perth und Peking im regulären Fahrgastbetrieb eingesetzt wurden. (Vergleiche **Abbildung auf Seite 17**).

**2004** stellte Audi das Brennstoffzellenfahrzeug A2H2 vor, mit 66 kWmax Brennstoffzelle, 38 kW NiMH-Akku und 350 bar Wasserstofftanks. Seit 2009 arbeitet Audi am Q5 HFC mit 89 kWmax Brennstoffzelle und 700 bar Wasserstofftanks.

**2004** zeigte VW den ersten Touran HyMotion 66 kWmax Brennstoffzelle und 350 bar Wasserstofftanks. 2008 folgte der Tiguan HyMotion mit 80 kWmax Brennstoffzelle und 700 bar Wasserstofftanks. Toyota baut seit **2008** den FCHV-adv auf Basis des Highlander in kleinen Stuckzahlen und testet ihn über Leasingnehmer. Der Geländewagen hat eine Brennstoffzelle mit ca. 90 kWmax und 700 bar Wasserstofftanks.

**2008** startete Honda eine Kleinserienproduktion des FCX Clarity mit 86 kWmax Brennstoffzelle und 350 bar Wasserstofftanks. Seit **2008** liefert Opel / GM eine Kleinserie des HydroGen4 / Chevrolet Equinox Fuel Cell mit 93 kWmax Brennstoffzelle und 700 bar Wasserstofftanks aus.

**2009** begann Daimler mit einer Kleinserienproduktion des F-Cell auf Basis der B-Klasse mit 100 kWmax-Brennstoffzelle und 700 bar-Wasserstofftanks. 2011 beendeten drei dieser Fahrzeuge eine Weltumrundung mit jeweils ca. 30.000 km.

# Brennstoffzellen (4)

### 3.2.3 FUNKTION UND PRINZIPIELLER AUFBAU

Eine Verbrennungsreaktion wird in der Chemie als Redoxreaktion bezeichnet. Jede Redoxreaktion besteht aus zwei Teilreaktionen: der Oxidation des Reduktionsmittels (des Brennstoffes) und der Reduktion des Oxidationsmittels (bei Verbrennungen ist das Oxidationsmittel im Allgemeinen Sauerstoff).

- Bei der Oxidation gibt das Reduktionsmittel (der Brennstoff) Elektronen ab und bildet positiv geladene Ionen.
- Bei der Reduktion nimmt das Oxidationsmittel (Sauerstoff) Elektronen auf und bildet negativ geladene Ionen.

Positive und negative Ionen vereinigen sich zum Verbrennungsprodukt.

**Beispiel Verbrennungsreaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff zum Produkt Wasser**

| | |
|---|---|
| **Reduktionsmittel:** | Wasserstoff |
| **Oxidationsmittel:** | Sauerstoff |
| **Oxidationsreaktion:** | $H_2 \longrightarrow 2\,H^+ + 2e^-$ |
| **Reduktionsreaktion:** | $\frac{1}{2}\,O_2 + H_2O + 2e^- \longrightarrow 2\,OH^-$ |
| **Gesamtreaktion:** | $H_2 + \frac{1}{2}\,O_2 \longrightarrow H_2O$ |

Bei chemischen **Verbrennungsprozessen** laufen beide Teilreaktionen zusammen ab und die Reaktionsenergie wird in Form von Wärme frei. Die Wärme kann danach mittels einer Wärme-Kraft-Maschine in elektrisch oder mechanisch nutzbare Energie umgewandelt werden. Der Wirkungsgrad dieser Umwandlung wird durch den Carnot-Wirkungsgrad begrenzt.

In **Brennstoffzellen** laufen die Teilreaktionen in getrennten Reaktionsräumen ab, ein Teil der Reaktionsenergie wird direkt in elektrische Energie umgewandelt („kalte Verbrennung"), der Rest in Wärme. Der elektrische Wirkungsgrad (der Anteil der in elektrische Energie umgewandelten chemischen Energie des Brennstoffes) ist deutlich höher als bei Verbrennungsprozessen mit anschließender Umwandlung von Wärme in elektrische oder mechanische Energie.

- Die Oxidation des Brennstoffes geschieht im Anodenraum, dabei werden Elektronen und Protonen bzw. Wasser gebildet.
- Die Reduktion des (Luft-)Sauerstoffes geschieht im Kathodenraum, dabei werden Elektronen aufgenommen und dadurch negativ geladene Ionen bzw. Wasser gebildet.

Abbildung 3.17 zeigt den prinzipiellen Aufbau und die Funktionsweise einer Brennstoffzelle.

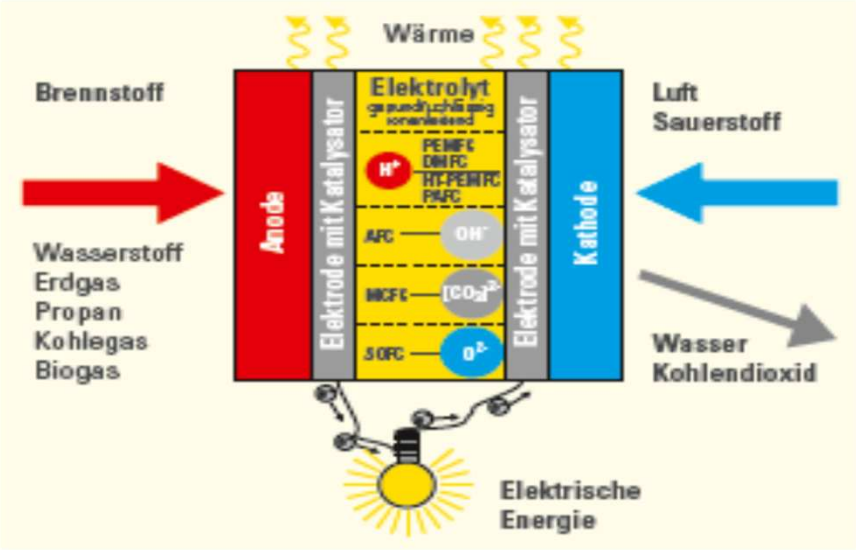



**Abbildung 3.17: Funktion und prinzipieller Aufbau einer Brennstoffzelle. Eigene Darstellung.**

# Brennstoffzellen (5)

In der Mitte ist in gelb der Elektrolyt dargestellt, dessen Dicke z.B. bei PEM-Brennstoffzellen im µm-Bereich liegt. Auf der Kathoden- und Anodenseite des Elektrolyten befinden sich Elektroden (mit einer Dicke ebenfalls im µm-Bereich).
An die Elektroden schließen sich der Anoden- bzw. Kathodenraum an (Dicke im mm-Bereich). Der Elektrolyt trennt die Reaktionsräume und ist für Elektronen und Gase annähernd undurchlässig. Er transportiert entweder die auf der Anode entstehenden Protonen oder die auf der Kathode entstehenden negativen Ionen auf die jeweils andere Seite.

Die Elektroden sind gasdurchlässig, elektronenleitend und mit Katalysatoren versetzt. Katalysatoren beschleunigen bzw. ermöglichen chemische Reaktionen durch Herabsetzen der Aktivierungsenergie der Reaktion. Sie werden selbst nicht verbraucht.
Die chemischen Reaktionen und damit die entscheidenden Vorgänge in Brennstoffzellen spielen sich an der Oberfläche der Katalysatoren an den Grenzen von Elektroden und Elektrolyt ab. Die Elektroden sind Elektronenleiter, der Elektrolyt ist ein Ionenleiter.

Im Anodenraum wird der Brennstoff, im Kathodenraum wird Luft oder Sauerstoff zugeführt und über die aktive Fläche der Brennstoffzelle verteilt. Die bei der Reaktion entstehenden Produkte Wasser und in Abhängigkeit vom Brennstoff auch $CO_2$ werden abgeführt. Die bei der Anodenreaktion (Oxidation) frei werdenden Elektronen gelangen über einen äußeren Stromleiter zur Kathode und geben dabei elektrische Energie ab.

- Je nach Brennstoffzellentyp (die verschiedenen Brennstoffzellentypen AFC, PEMFC, DMFC, HT-PEMFC, PAFC, MCFC und SOFC werden in Kapitel 3.2.4 beschrieben) wandern entweder die auf der Anode durch Elektronenabgabe entstandenen Protonen durch den Elektrolyten zur Kathode und bilden mit den dort durch Elektronenaufnahme entstandenen negativen Sauerstoff-Ionen das Endprodukt (im Allgemeinen Wasser), oder
- die auf der Kathode durch Elektronenaufnahme entstandenen negativen Ionen durch den Elektrolyten zur Anode und bilden mit den dort durch Elektronenabgabe entstandenen positiven Brennstoff-Ionen (Protonen) das Endprodukt (im Allgemeinen Wasser).

### 3.2.4 BRENNSTOFFZELLENTYPEN

Es gibt verschiedene Typen von Brennstoffzellen, die sich im verwendeten Elektrolyten, in der Betriebstemperatur, in den verwendbaren Brennstoffen und im Leistungsbereich und damit den Einsatzgebieten unterscheiden. Tabelle 3-2 gibt einen Überblick über die Brennstoffzellentypen, auf die sich Forschung und Entwicklung in der Vergangenheit und der Gegenwart konzentrier(t)en.
Alkalische Brennstoffzellen (Alkaline Fuel Cells, AFC) haben einen alkalischen Elektrolyten, z.B. 30 – 40 %ige Kalilauge (die AFC in den Apollo-Missionen wurden allerdings bei 200°C mit 80 %iger Kalilauge betrieben). Bereits bei niedrigen Betriebstemperaturen reicht normalerweise die Verwendung günstiger Katalysatoren wie Nickel. AFCs reagieren empfindlich auf $CO_2$-Verunreinigungen und werden deshalb oft mit Wasserstoff und reinem Sauerstoff betrieben. AFC gehören zu den am frühesten erforschten Brennstoffzellentypen und wurden und werden vor allem in der Raumfahrt eingesetzt. Wirkungsgrad im Betrieb: ca. 60 % Brennstoffzelle, ca. 50 % Brennstoffzellensystem.

| Typ | Elektrolyt | Betriebstemperatur | Brennstoffe | Leistungsbereich (pro Modul) |
|---|---|---|---|---|
| AFC | Alkalisch | 60 – 130°C | $H_2$ (Wasserstoff) | < 20 kW |
| PEMFC | Polymerelektrolytmembran | 60 – 90°C | $H_2$, gereinigtes Reformat | 1 W – 250 kW |
| DMFC | Polymerelektrolytmembran | 60 – 130°C | $CH_3OH$ (Methanol) | < 500 W |
| HT-PEMFC | Phosphorsäure (in Nafion®- oder PBI-Membran) | 120 – 180°C | Reformat | < 20 kW |
| PAFC | Phosphorsäure | 120 – 220°C | $H_2$, Reformat | 50 – 800 kW |
| MCFC | Karbonatschmelzen | 600 – 700°C | Erdgas, Kohlegas, Biogas | MW-Bereich |
| SOFC | Oxidkeramik | 750 – 1.000°C | Erdgas, Propan, Kohlegas, Biogas | 1 W – 250 kW |

Tabelle 3-2: Brennstoffzellentypen.

# Brennstoffzellen (6)

Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen oder auch Proton exchange membrane fuel cells (**PEMFC**) benutzen einen festen Elektrolyten aus saurer, in Wasser gequollener Membranfolie und Elektroden mit Platin-basierten Katalysatoren. Durch die niedrigen Betriebstemperaturen haben sie Startzeiten im Sekundenbereich. Die Pt-Katalysatoren sind empfindlich gegen CO (CO-Konzentration muss < 10 ppm sein) und andere Spurenverunreinigungen, sie werden deshalb nur mit $H_2$ oder fein gereinigtem Reformat aus einfachen Kohlenwasserstoffen wie Erdgas, Flüssiggas oder Alkoholen betrieben. Versuche mit Benzin- und Kerosinreformat laufen. Die Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen beschränkt sich momentan fast ausschließlich auf die PEMFC-Technik. Auch im Bereich von Hausenergieversorgungen, Kraftwerken, U-Booten und der Luft- und Raumfahrt wird sukzessive in PEMFC-Technologie investiert.
**Wirkungsgrad im Betrieb: Brennstoffzelle 50 %, System ca. 40 % ($H_2$) bzw. 30 % (Reformat).**

Direktmethanol-Brennstoffzellen (Direct methanol fuel cells, **DMFC**) werden mit flüssigem Methanol betrieben und benutzen ebenfalls einen festen Elektrolyten aus saurer Membranfolie, aber auf der Anode (Brennstoffseite) eine Elektrode mit Platin-Ruthenium-Katalysator. Vorteil ist der Wegfall der beim Betrieb von PEMFC mit Methanol nötigen Reformierung, Nachteil ist die geringe Leistungsdichte, die mit diesen Zellen erzielt wird. DMFC-Systeme werden hauptsächlich als Ladegeräte für Batterien entwickelt. Der Leistungsbereich beschränkt sich meist auf unter 200 Watt.
**Wirkungsgrad im Betrieb: ca. 40 % Brennstoffzelle, ca. 30 % Brennstoffzellensystem.**

Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzellen (**HT-PEMFC**) benutzen ebenfalls einen festen Elektrolyten aus einer Polymerfolie (typischerweise Polybenzimidazol, PBI), die aber nicht mit Wasser sondern mit Phosphorsäure getränkt ist und dadurch bei höheren Temperaturen betrieben werden kann. Vorteil ist eine größere CO-Toleranz bis in den Prozentbereich, wodurch auf eine Feinreinigung des als Brennstoff verwendeten Reformats verzichtet werden kann. Entwicklungsarbeiten mit HT-PEMFC-Technik gibt es vor allem im Bereich Hausenergieversorgung (kleine KWK-Blockheizkraftwerke).
**Wirkungsgrad im Betrieb: Brennstoffzelle ca. 50 %, System mit Reformer ca. 35 %.**

Phosphorsäure-Brennstoffzellen (Phosphoric acid fuel cells, **PAFC**) verwenden konzentrierte Phosphorsäure in einer Siliziumcarbid-Teflon-Schicht (Vlies) als Elektrolyt und Elektroden mit Platin-Katalysatoren (bei Verwendung von Reformat als Brennstoff evtl. auch Platin-Ruthenium). Durch die Betriebstemperaturen von rund 200°C sind sie ebenso wie HT-PEMFC relativ CO-tolerant. PAFC-Systeme werden als kleine bis mittlere Kraftwerke und in der Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt, früher auch für Busantriebe. Das bisher meistgebaute Brennstoffzellensystem ist vermutlich immer noch das ONSI PC 25 (s. Kapitel 3.2.2). PAFC-Systeme bekommen zunehmend Konkurrenz durch PEFC-Systeme.
**Wirkungsgrad im Betrieb: Brennstoffzelle ca. 50 %, System mit Reformer ca. 35 %.**

Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen (Molten carbonate fuel cells, **MCFC**) haben einen Schmelzkarbonat-Elektrolyten (geschmolzene Kohlensäure-Salze, z.B. Lithium-/Kaliumkarbonat oder Lithium-/Natriumkarbonat), der in einer porösen Keramik-Matrix (z.B. Lithium-Aluminat) gehalten wird. Aufgrund der Betriebstemperatur von ca. 650°C und der daraus resultierenden hohen Reaktionsgeschwindigkeiten werden keine teuren Edelmetallkatalysatoren benötigt. Gewöhnlich werden Nickelverbindungen als Katalysatoren eingesetzt. Durch die hohen Temperaturen sind MCFC außerdem unempfindlich gegenüber Kohlenmonoxid und können mit einem so genannten Vorreformer zur Zersetzung höherer Kohlenwasserstoffe mit entschwefeltem Erd- und Kohlegas oder mit entsprechend gereinigtem Biogas betrieben werden. Die interne Methanreformierung ist Teil des Kühlkonzeptes. Die hohen Temperaturen bedingen lange Start- und Abschaltzeiten und stellen mit dem stark korrosiven Salzelektrolyten hohe Anforderungen an die eingesetzten Materialien. MCFC-Systeme werden für den Kraftwerksbereich von 200 kW bis zu mehreren MW entwickelt.
**Wirkungsgrad im Betrieb: ca. 60 % Brennstoffzelle, ca. 50 % Brennstoffzellensystem.** Mit nachgeschaltetem Dampfgenerator und mit Abwärmenutzung erreichen MCFC-Systeme Systemwirkungsgrade bis 80 % und sind damit konventionellen Gas- oder Kohlekraftwerken überlegen. Die erzielbaren Leistungsdichten sind jedoch begrenzt.

Festoxid-Brennstoffzellen (Solid oxide fuel cells, **SOFC**) arbeiten mit einem festen keramischen Metalloxid als Elektrolyt (z.B. ytt-

# Brennstoffzellen (7)

riumstabilisiertes Zirkonoxid). Ebenso wie MCFC benötigen SOFC aufgrund der hohen Betriebstemperaturen keine Edelmetallkatalysatoren, verwendet werden meist nickel- oder kobaltbasierte Keramiken auf der Anode (Brenngasseite) und lanthanbasierte Oxide auf der Kathode. Auch SOFC können ohne vorgeschalteten Reformer mit fossilen Gasen oder Biogas betrieben werden. Temperaturbedingte Nachteile sind die hohen Anforderungen an die eingesetzten Materialien, vor allem an die Dichtungen, und die langen Zeiten zum Starten und Herunterfahren. SOFC-Systeme werden entwickelt im Leistungsbereich von 1 kW (Kraft-Wärme gekoppelte Hausenergieversorgungen) bis 200 kW (Kleinkraftwerke). Sie erreichen ebenso wie MCFC-Systeme Wirkungsgrade bis 50 %, mit Abwärmenutzung bis 80 %.[11]
**Wirkungsgrad im Betrieb bei Kraftwerken: ca. 60 % Brennstoffzelle, ca. 50 % Brennstoffzellensystem, mit nachgeschaltetem Dampfgenerator und mit Abwärmenutzung bis 80 %.** Bei kleinen SOFC-Hausenergieversorgungen liegt der Systemwirkungsgrad bei rund 35 %.

### 3.2.5 TECHNISCHER AUFBAU

Abbildung 3.18 zeigt stellvertretend für alle Brennstoffzellentypen den Aufbau einer PEMFC.

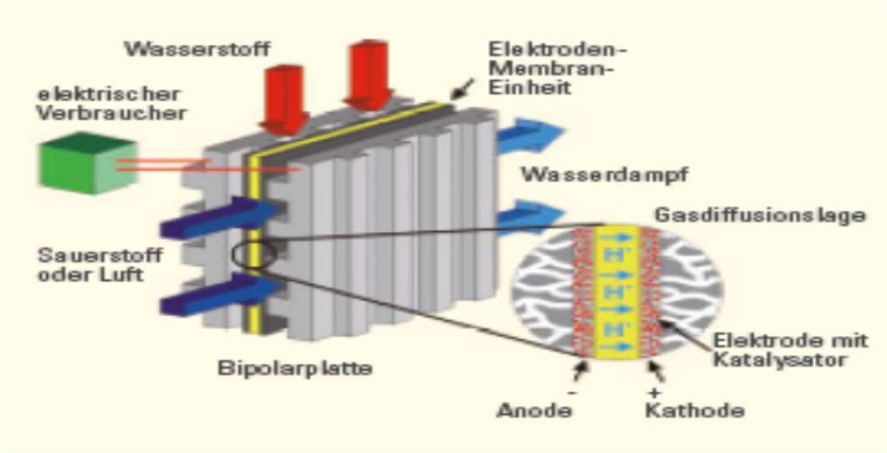



**Abbildung 3.18: Technischer Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle (PEMFC). Eigene Darstellung.[12]**

Als **Elektrolyt** (in der Zeichnung gelb) wird eine Polymermembran verwendet. Die Membran ist gasdicht, im mit Wasser gequollenen Zustand leitend für Protonen und andere positiv geladene Ionen und nicht leitend für Elektronen und negativ geladene Ionen. Wasser und Alkohole können durch die Membran diffundieren. Auf beiden Seiten der Membran werden dünne Elektroden aufgesprüht oder anderweitig aufgetragen und mit der Membran verpresst und/oder verbacken.

Die **Elektroden** bestehen aus mit Elektrolyt und Katalysatorpartikeln vermischtem Kohlenstoff (Ruß). Sie sind porös (und damit gas- und flüssigkeitsdurchlässig) und elektrisch leitfähig. Als Katalysatoren werden bei PEMFC meist Platin oder Pt-haltige Legierungen eingesetzt, auf der Anode auch Platin/Ruthenium (vor allem im Betrieb mit Reformat).

Die Membran mit den verpressten und/oder verbackenen Elektroden wird als EME (Elektroden-Membran-Einheit) oder MEA (**Membrane-Electrode-Assembly**) bezeichnet. Die in PEMFC verwendeten MEAs sind typabhängig 5 - 200 µm dünn.

Die Funktionen von Elektrolytmembran, Elektroden und Katalysator wurden in Kapitel 3.2.3 beschrieben.

An beide Seiten der MEA wird eine **GDL** (**Gas Diffusion Layer**, Gas-Diffusionslage, in der Zeichnung dunkelgrau) gepresst. GDLs sind meist hochporöse papier- oder vliesähnliche Kohlefasergewebe mit einer Dicke (unverpresst) von etwa 0,1 - 0,4 mm. Auf der aktiven (der Elektrode zugewandten) Seite wird zur Verringerung des elektrischen Übergangswiderstandes zwischen GDL und MEA teilweise eine mikroporöse Schicht (MPL, Microporous Layer) aufgebracht.

**GDLs erfüllen folgende Funktionen:**

- Sie dienen der Feinverteilung der zugeführten Gase auf die gesamte MEA-Fläche.
- Sie müssen elektrisch leitfähig sein, um die in der Anodenelektrode erzeugten und in der Kathodenelektrode benötigten Elektronen nach außen bzw. nach innen leiten zu können. Zur Verringerung von Übergangswiderständen ist dafür unter anderem eine große Kontaktfläche zur MEA nötig.

11 Seit kurzem werden auch Mikro-SOFC mit el. Leistungen ab 1 W angeboten http://www.ezelleron.eu
12 Mit freundlicher Genehmigung von Dr. Alexander Kabza, ZSW. http://home.arcor.de/kabza/pemfcde/pemfc.html

# Brennstoffzellen (8)

- Sie müssen die MEA feucht halten (die Ionenleitfähigkeit einer trockenen Polymermembran fällt drastisch ab) und gleichzeitig das produzierte Wasser (Wasserdampf) nach außen leiten, wobei sich ihre Poren nicht mit Flüssigwasser zusetzen dürfen (und dadurch den Gastransport blockieren). Das Feuchtemanagement kann durch Hydrophobierung (z.B. Teflonierung) der GDLs beeinflusst werden. Kommerzielle GDLs enthalten 0 - 40 % Gewichtsprozent Teflon.

Auf den GDLs sitzen die Gasverteilerplatten (in der Zeichnung hellgrau) aus Graphitkomposit oder Metall. Sie sind je nach Anwendung 0,8 - 5 mm dick und mit einer Kanalstruktur versehen (**Abbildung 3.19**).

Üblicherweise werden mehrere Brennstoffzellen in Reihe zu einem Brennstoffzellenstack verbaut (s. Kapitel 3.2.6). Die Gasverteilerplatten trennen dann die Anode (den Minuspol) der einen Zelle von der Kathode (dem Pluspol) der nächsten Zelle und heißen deshalb auch **Bipolarplatten** (BPP). BPP enthalten oft auf der einen Seite Kanäle für das Anodengas und auf der anderen Seite Kanäle für das Kathodengas (wie in Abbildung 3.18). Zur Temperaturregulierung sind zwischen Anoden- und Kathodenseite oft Kühlkanäle angebracht.

**BPP erfüllen die folgenden Funktionen:**

- Sie dienen der Verteilung der zugeführten Gase auf die GDLs.
- Sie trennen Anode und Kathode benachbarter Zellen und müssen deshalb gasdicht sein.
- Sie müssen elektrisch leitfähig sein. Zur Verringerung von Übergangswiderständen ist dafür unter anderem eine große Kontaktfläche zur GDL nötig.
- Sie müssen das produzierte Wasser (Wasserdampf und kondensiertes Flüssigwasser) nach außen leiten und dürfen ihre Kanäle nicht mit Flüssigwasser zusetzen (und dadurch den Gastransport blockieren).
- Sie müssen mechanisch stabil sein, denn mit ihrer Hilfe wird die gesamte Brennstoffzelle verpresst.
- Sie tragen zum Wärmehaushalt des Brennstoffzellenstapels bei.

In Abbildung 3.18 nicht gezeigt, aber in Brennstoffzellen unabdingbar, sind temperatur- und medienbeständige **Dichtungen** für die Gas- und Flüssigkeitsdichtheit der Brennstoffzelle, die meist auf den BPP aufgebracht sind. Für die Dichtigkeit und zur Verringerung der elektrischen Übergangswiderstände an den Materialgrenzen müssen Brennstoffzellen verpresst werden.

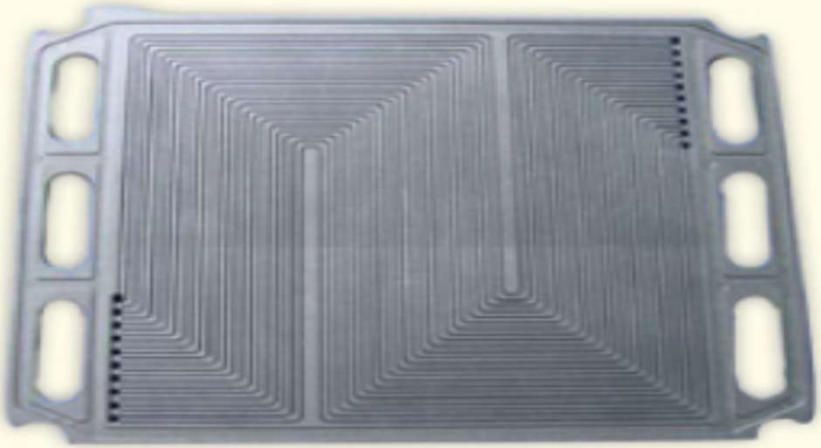


Abbildung 3.19: Bipolarplatte mit mäanderförmigen Gaskanälen (Kathodenseite). Eigene Darstellung.

### 3.2.6 BRENNSTOFFZELLENSTACKS

Eine einzelne Brennstoffzelle liefert im Betrieb eine elektrische Spannung von 0,55 - 0,75 V. Um technisch besser nutzbare höhere Spannungen zu erzielen, werden mehrere Brennstoffzellen gestapelt und dadurch elektrisch in Reihe geschaltet (Anode der einen an Kathode der nächsten Brennstoffzelle). Ein solcher Stapel aus Brennstoffzellen wird als Brennstoffzellenstack bezeichnet.

Um eine homogene Temperaturverteilung im Stack und über die aktive Fläche der einzelnen Zellen zu erreichen, sind zwischen den Einzelzellen Kühlzonen mit Kanälen für den Durchfluss eines flüssigen oder gasförmigen Kühlmittels eingebracht, entweder als separate Platten ähnlich den Bipolarplatten (s. Kapitel 3.2.5) oder

# Brennstoffzellen (9)

unmittelbar in die Bipolarplatten integriert.

Abbildung 3.20 zeigt einen PEM-Brennstoffzellenstack mit rund 20 einzelnen Zellen mit BPP aus einem Graphitkompositmaterial (schwarz). Der Stack wird begrenzt und verpresst durch zwei mechanisch stabile Endplatten aus eloxiertem Aluminium. Zur einfacheren Orientierung wurde bei diesem Stack die Anodenendplatte rot, die Kathodenendplatte blau eloxiert. Die Anodenseiten der einzelnen Zellen des Stack zeigen zur Anodenendplatte, die Kathodenseiten der Zellen zur Kathodenendplatte. Die Verpressung des Stacks und damit der einzelnen Zellen erfolgt über vier Zuganker, die im Bild an den Ecken der Endplatten zu sehen sind. Zwischen den Endplatten und den Zellen befinden sich die Stromabnehmer (stehen im Bild nach links heraus), an die die elektrischen Verbraucher angeschlossen werden. Der Stromabnehmer vor der Kathodenendplatte ist der Pluspol, der Stromabnehmer vor der Anodenendplatte der Minuspol des Stacks. Die Zu- und Abfuhr der Reaktionsgase und des Kühlmittels erfolgt bei diesem Stack über Schraubverbinder auf der Anodenendplatte. Die Medien werden durch die Endplatte in Verteilschächte geleitet, die in die Bipolarplatten der einzelnen Zellen integriert sind und von dort in die Gas- und Kühlmittelkanäle der Bipolarplatten. Die Verteilzone der Bipolarplatte in Abbildung 3.19 sind die sechs großen Durchgänge am rechten und linken Rand der Platte. Unten links und oben rechts im Bild befinden sich die Schächte für die Luftzu- und -abfuhr, in der Mitte Kühlwasserzu- und abfuhr, links oben und rechts unten Brenngaszu- und -abfuhr.

Die Leistung eines Brennstoffzellen-Stacks hängt von den Betriebsbedingungen ab. Temperatur-, Feuchte-, Medien- und Druckverteilung im Stack sollten für einen optimalen Betrieb möglichst homogen sein. Sie werden bestimmt von den verwendeten Materialien (z.B. Porosität, Katalysatoren und weiteres), vom Design und Aufbau der einzelnen Zellen (z.B. Zelldimensionen, Kanalstrukturen und weiteres) und vom Aufbau des Brennstoffzellenstacks (z.B. Anzahl der Kühlplatten, Verpressung und weiteres). Diese Verteilungen können von außen nur bedingt beeinflusst werden, die Feuchteverteilung z.B. dadurch, dass Feuchtigkeit an den Eingängen zu- und an den Ausgängen abgeführt wird.
Die Betriebsparameter eines Stacks sind Temperaturen, Taupunkte (Feuchten), Drücke und Stöchiometrien[13] der zugeführten Medien, die Kühlmitteltemperaturen am Stackein- und -ausgang und die klimatischen Bedingungen am Betriebsort. Diese Parameter(felder) werden vom Stackhersteller vorgegeben und müssen im Betrieb eingehalten werden.



Abbildung 3.20: PEM-Brennstoffzellenstack. Eigene Darstellung.

### 3.2.7 BRENNSTOFFZELLENSYSTEME

Für den Betrieb eines Brennstoffzellenstacks werden Nebenaggregate bzw. ein Brennstoffzellensystem benötigt. Aufgaben dieses Systems sind:

- Brennstoffzu- und abfuhr (Anode).
- Befeuchtung des zugeführten Brennstoffes.
- Luft- oder Sauerstoffzu- und abfuhr (Kathode).
- Befeuchtung der zugeführten Luft bzw. des zugeführten Sauerstoffs.
- Abfuhr des Produktwassers.
- Zu- und Abfuhr sonstiger Prozessgase/-flüssigkeiten.
- Temperaturregelung, normalerweise über Kühlkreisläufe.
- Druckregelung.
- Abgabe von elektrischer und thermischer Leistung an den Anwender.
- Überwachung.

13 Als Stöchiometrie bezeichnet man das Verhältnis von zugeführter zu verbrauchter Menge.

# Brennstoffzellen (10)

Ein Brennstoffzellensystem besteht aus Bauteilen oder Baugruppen für die Medienver- und entsorgung und für die Temperatur-, Druck- und Feuchteregelung, aus dem(n) Brennstoffzellenstack(s) und aus einer Systemsteuerung, die das System so regelt, dass die von einem Anwender geforderte elektrische und thermische Leistung abgegeben werden kann. Abbildung 3.21 zeigt ein Schema eines einfachen PEM-Brennstoffzellensystems. Der BZ-Stack wird bei diesem System mit Wasserstoff und Umgebungsluft betrieben.

**ANODE**

Der Brennstoff des Systems in Abbildung 3.21 (hier Wasserstoff) kommt aus einem Wasserstofftank. Der Tank wird im Fehlerfall durch ein stromlos geschlossenes Hauptventil gesperrt. Nach dem Hauptventil mindert ein Druckregler den Tankdruck auf den vom Stack benötigten Anodeneingangsdruck. Hinter dem Druckregler sitzt ein Überdruckventil, das den Stack vor zu hohem Druck schützt. Der zugeführte Wasserstoff wird nicht separat befeuchtet, stattdessen wird mehr Wasserstoff in den Stack geführt als verbraucht wird. Der nicht verbrauchte Teil wird über eine Pumpe rezirkuliert. Der rezirkulierte Wasserstoff führt Produktwasser in kondensierter Form und als Dampf mit sich. Das Kondensat wird über einen Kondensatabscheider abgetrennt, der Wasserdampf passiert den Abscheider und befeuchtet den Wasserstoff am Anodeneingang. Das Produktwasser wird zwar auf der Kathodenseite der Zellen erzeugt (s. Reaktionsgleichungen in Kapitel 3.2.4, Absatz PEMFC), ein Teil des Wassers diffundiert aber durch die Polymermembran auf die Anodenseite. Flüssigwasser würde in den Brennstoffzellen Poren und Kanäle zusetzen und damit den Gasfluss behindern und wird deshalb entfernt.

In dem abgebildeten System wird der Stack anodenseitig geschlossen (im Fachjargon „dead ended"), aber mit kurzen Spülstößen (im Fachjargon „purge") betrieben. Ziel des dead ended Betriebs ist ein möglichst 100 %iger Verbrauch des zugeführten Wasserstoffs. Da sich im Betrieb aber Flüssigwasser und Stickstoff in den Zellen ansammeln, wird in regelmäßigen Abständen das sogenannte Purgeventil für ein paar Millisekunden geöffnet. Dabei werden Flüssigwasser und Stickstoff zusammen mit etwas Wasserstoff aus den Zellen gespült. Die mit solchen Systemen erreichbaren Wasserstoffumsätze liegen bei > 95 %. Industriewasserstoff enthält je nach Qualität 0,001 - 0,00001 % Stickstoff. Da der Wasserstoff im Stack verbraucht wird, der Stickstoff nicht, führt dieser geringe Anteil in Verbindung mit $N_2$-Diffusion (von der Kathode durch die Membran) bei dead ended Betrieb aber bereits nach 1 Minute zu Stickstoffanteilen von bis zu 30 % in den Zellen des Stacks.

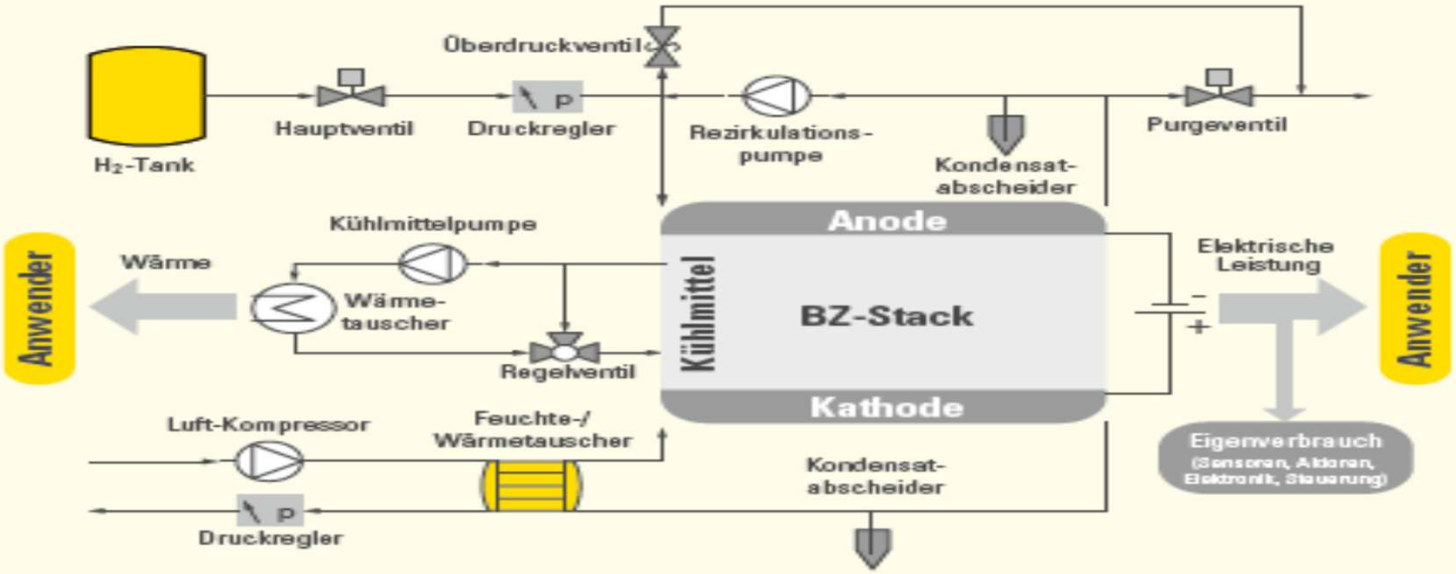



Abbildung 3.21: Schema PEM-Brennstoffzellensystem (vereinfacht). Eigene Darstellung.

# Brennstoffzellen (11)

**KATHODE**

Im System in Abbildung 3.21 wird mit einem Kompressor Außenluft zuerst durch eine Seite eines Feuchte-/Wärmetauschers (wo sie Feuchtigkeit aufnimmt) und anschließend durch die Kathodenseiten der Zellen des Stacks gedrückt und liefert dadurch den für die Reaktion nötigen Sauerstoff.
Das bei der Reaktion erzeugte Wasser (abzüglich des kleinen Teils, der auf die Anode diffundiert) wird von der Restluft ausgetragen. Flüssigwasser wird in einem Kondensatabscheider abgetrennt, Restluft und Wasserdampf gehen durch die andere Seite des Feuchte-/Wärmetauschers (wo ein Teil der Feuchtigkeit auf die trockene Zuluft übertragen wird) und zum Schluss durch einen Druckregler, der den Druck auf dem vom Stack benötigten Wert hält.[14]

**KÜHLSYSTEM**

In Abbildung 3.21 wird die Eintrittstemperatur des Kühlmittels in den Stack über das Regelventil eingestellt, die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt über den Durchsatz der Kühlmittelpumpe. Die bei der Reaktion anfallende Wärme wird über einen Wärmetauscher zur Verfügung gestellt.

**BRENNSTOFFZELLENSTACK**

Entscheidend für den Betrieb eines Brennstoffzellenstacks in einem Brennstoffzellensystem sind seine Betriebskennlinien, die in die Systemsteuerung einfließen:

- Stackleistung in Abhängigkeit von der Temperatur an den Stackeingängen und der Temperatur im und der Temperaturdifferenz über den Stack.
- Stackleistung in Abhängigkeit von den Taupunkten (Feuchten) der zugeführten Gase.
- Durchfluss-Druck-Kennlinien von Anodengas, Kathodengas und Kühlmittel.
- Stackleistung in Abhängigkeit der Stöchiometrien von Brennstoff und Sauerstoff.

**SYSTEMSTEUERUNG**

Die Systemsteuerung verarbeitet die Daten der Systemsensoren (nicht in Abbildung 3.21 eingezeichnet: Temperatur-, Druck-, Feuchte-, Fluss- und Levelsensoren) und steuert anhand dieser Daten und der Stackkennlinien die Systemaktoren (in Abbildung 3.21 Ventile, Druckregler, Pumpen und Kompressor) so, dass die vom Anwender angeforderte Leistung abgegeben werden kann. In die Steuerung sind verschiedene Überwachungsroutinen implementiert, die Warnungen und Fehlermeldungen ausgeben und das System im Fall von Problemen abschalten.

**SYSTEMAUSLEGUNG**

Brennstoffzellenstacks und -systeme werden speziell für vorgesehene Anwendungen gebaut. System und Stack für ein Kraftfahrzeug, in dem Gewicht und Größe entscheidend sind, werden völlig anders entwickelt als für ein Kleinkraftwerk gleicher Leistung, bei dem Gewicht und Raumbedarf weniger wichtig sind als z.B. eine lange Lebensdauer.

Entscheidend für die Eignung eines Systems für den vorgesehenen Einsatz sind die Betrachtung der Gesamtleistung und das aufeinander Abstimmen von Stack und Systemkomponenten. Beispielsweise erfordert eine hohe Leistungsdichte des Stacks meist einen Betrieb unter erhöhtem Druck. Während auf der Anodenseite bei mit Wasserstoff betriebenen Systemen der Druck durch die $H_2$-Tanks ohnehin zur Verfügung steht, muss er auf der Kathodenseite bei mit Umgebungsluft betriebenen Systemen durch einen Kompressor erzeugt werden. Dieser Kompressor verbraucht dafür aber einen erheblichen Teil der vom Stack erzeugten elektrischen Leistung, trägt einiges zu Gewicht, Größe und Kosten des Gesamtsystems bei und ist unter Umständen laut und muss in das Kühlsystem eingebunden werden. Je nach Anwendung kann deshalb der Einsatz eines größeren Stacks, der annähernd drucklos betrieben werden kann, und eines Lüfters statt eines Kompressors vorteilhafter sein.

Die Systemauslegung wird deshalb oft durch eine Systemsimulation unterstützt, in der alle Medien- und Energieströme im geplanten System mit den technischen Daten verschiedener Bauteilevarianten statisch und bei Bedarf auch dynamisch durchgerechnet werden.

14 In einem Feuchte-/Wärmetauscher strömen Zu- und Abluft in durch Membranen getrennten Raume. Uber die Membranen werden Wasser und Warme ausgetauscht, aber keine Luft. Meist werden Polymermembranen verwendet, unter anderem auch dieselben Membranen wie in PEM-Brennstoffzellen.

# Brennstoffzellen (12)

### 3.2.8 ENTWICKLUNGSSTAND

Die im Folgenden genannten Beispiele haben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit und dienen nur der Erläuterung.
Es gibt nur wenige kommerziell erhältliche und in Serie gefertigte Brennstoffzellensysteme, z.B. kleine DMFC-Batterieladegeräte bis 100 W von der SFC Energy AG bei München[15], Ene-Farm Hausenergieversorgungsanlagen von Panasonic, Toshiba und EOS Celltech in Japan, Gabelstapler mit Brennstoffzellenantrieb von PlugPower[16], PAFC-Kraftwerke im Bereich 200 kW - 400 kW von UTC Power[17] oder MCFC-Kraftwerke im Megawatt-Bereich von der US-amerikanischen Firma Fuel Cell Energy[18]. Die SFC Energy AG hat in elf Firmenjahren rund 25.000 Systeme verkauft; seit 2009 wurden über 22.000 Ene-Farm Systeme in Japan installiert; PlugPower verkaufte 2010 rund 550 Gabelstapler.

### MINIBRENNSTOFFZELLEN BIS 20 W

Völlig oder fast peripheriefrei arbeitende Minibrennstoffzellen wurden zwischen 2000 und 2006 von vielen Firmen (darunter zum Beispiel Canon, Casio, Fujitsu, Hitachi, NEC, Nokia, Sanjo, Toshiba) vorgestellt, die baldige Markteinführung von mehreren der Firmen angekündigt, aber bislang nicht realisiert. Nur Toshiba bot 2009 das 2,5 Watt DMFC-System Dynario als Ladegerät mit USB-Anschluss (z.B. für Mobiltelefone) in einer auf 3.000 Stück begrenzten Zahl für rund 250 € ausschließlich in Japan an.

Durch die noch immer hohen Herstellungskosten und wegen der zunehmenden Energiedichte von Li-Ionen-Akkus dürfte die Kommerzialisierung von Minibrennstoffzellen inzwischen weniger interessant sein. In Baden-Württemberg wurden Minibrennstoffzellen am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg und am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) in Ulm entwickelt und vorgestellt, die sächsische eZelleron GmbH bietet 1 W, 25 W und 75 W Mini-SOFC an.

### BRENNSTOFFZELLEN-BATTERIELADEGERÄTE VON 20 - 200 W

Bis etwa 200 W elektrischer Leistung können Brennstoffzellensysteme als netzunabhängige Ladegeräte eine sinnvolle Ergänzung zu Batterien sein, diese aber nicht vollständig ersetzen. DMFC-Systeme von 40 - 100 W als Batterieladegeräte wurden zum Beispiel von der bayerischen SFC Energy AG bereits in den Markt eingeführt und sind über ein breites Händlernetz erhältlich. Der Verkaufspreis liegt gegenwärtig bei ca. 4.500 € für ein 90 W System[19] (Abbildung 3.22). Brennstoff ist hochreines Methanol, Energiekosten ca. 3 €/kWh. Mit Wasserstoff betriebene PEMFC-Systeme bis 200 W wurden in den vergangenen zehn Jahren von verschiedenen Forschungseinrichtungen weltweit vorgestellt, in Baden-Württemberg z.B. vom FhG ISE in Freiburg und vom ZSW in Ulm.

Nachteile von PEMFC-Kleinsystemen gegenüber DMFC-Systemen sind Schwierigkeiten bei der Zulassung von Wasserstoffspeichern sowie der größere Platzbedarf und das größere Gewicht von Wasserstofftanks im Vergleich zu Methanolkanistern. Vorteil ist die höhere Leistungsdichte des Stacks.

Die Herstellungskosten von BZ-Kleinsystemen (die sich auch in den Verkaufspreisen der Systeme der SFC Energy AG widerspiegeln) sind noch immer enorm.




Abbildung 3.22: DMFC-System EFOY. Eigene Darstellung nach [SFC Energy AG].

15 http://www.sfc.com – Jahresbericht; 16 http://www.plugpower.com – Jahresbericht ;17 http://utcpower.com ;18 http://www.fuelcellenergy.com – Jahresbericht
19 http://www.steinhaus-shop.de

# Brennstoffzellen (13)

## KLEIN-BRENNSTOFFZELLENSYSTEME VON 200 W - 3 KW

werden als mobile netzunabhängige Stromversorgungen (Auxiliary Power Unit, APU), als unterbrechungsfreie oder Notstromversorgungen (USV), als Bordstromversorgungen, als Hausenergieanlagen und als Energieversorgung von Elektro-Leichtfahrzeugen (Fahrräder, Scooter, Golfcarts, Rollstühle) entwickelt.

Brennstoffzellensysteme müssen in diesem Leistungsbereich mit Benzin-, Diesel- und Gasgeneratoren und mit Batterien konkurrieren. Der Vorteil von Brennstoffzellensystemen gegenüber Generatoren ist ihr deutlich höherer elektrischer Wirkungsgrad von 30 - 40 % (Benzin und Diesel ca. 15 %; Gas ca. 25 %) und ihr (fast) emissionsloser und leiser Betrieb. Der Vorteil gegenüber Batterien ist ihre nur durch den Brennstoffvorrat (und die Lebensdauer) begrenzte Laufzeit. Der Nachteil von Brennstoffzellensystemen sind die noch sehr hohen Herstellungskosten der Stacks von etwa 3.000 € pro kW elektrischer Leistung, das aufwändige System und im Vergleich zu Batterien die deutlich höheren Kosten des Brennstoffes im Vergleich zu den Kosten für elektrischen Strom.

Erst mit fallenden Stack- und Systemkosten können Brennstoffzellen Verbrennungsgeneratoren aus dem Markt drängen. Da die Anforderungen an Leistung und Einsatzdauer von netzunabhängigen und unterbrechungsfreien Stromversorgungen in vielen Bereichen steigen (z.B. Telekommunikation, Ampelanlagen, Baustellenabsicherungen, Wohnmobile und weiteren), werden Brennstoffzellensysteme oder Brennstoffzellen/Batterie-Hybridsysteme teilweise auch Batterien ersetzen.

Von 200 W bis 1 kW werden hauptsächlich PEMFC-Systeme entwickelt (eingesetzt werden können auch DMFC-Systeme, die aus mehreren kleinen Modulen bestehen), von 1 kW bis 2 kW anwendungsabhängig auch HT-PEMFC- und SOFC-Systeme. Die Verwendung von AFC-Systemen beschränkt sich auf Nischenanwendungen wie z.B. die Raumfahrt. HT-PEMFC- und SOFC-Systeme brauchen mehr als 20 Minuten bzw. mehrere Stunden Vorwärmzeit bis zur Betriebsbereitschaft. Diese Systeme werden deshalb meist nur für Einsätze im Dauerbetrieb geeignet, z.B. für Hausenergieversorgungsanlagen mit permanenter Einspeisung ins öffentliche Stromnetz oder für USV mit angeschlossenem Speicher als Stromsenke für Zeiten mit




Abbildung 3.23: Messwagen der Stadtwerke Ulm mit BZ-Energieversorgung. Eigene Darstellung nach [UBZM].

geringem Strombedarf. PEMFC-Systeme sind in wenigen Sekunden betriebsbereit, reagieren auf Lastwechsel innerhalb von Millisekunden und haben deshalb einen breiteren Anwendungsbereich.

Systeme im Leistungsbereich 200 W – 3 kW wurden und werden weltweit von zahlreichen Firmen und Forschungseinrichtungen entwickelt. In Großserie gefertigte kommerziell erhältliche Systeme gibt es außer in Japan und ansatzweise in den USA noch nicht, aber viele sind bereits im Feldtest, einige Systeme haben die Serienreife erreicht. Ihre Chancen auf dem freien Markt sind aber sehr gering, solange die Preise der für Brennstoffzellenstacks benötigten Komponenten nicht deutlich fallen.

Für Deutschland hervorzuheben wäre das vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung geförderte Callux-Projekt, der bundesweit größte Praxistest von 1 kW Brennstoffzellenheizgeräten für Einfamilienhäuser, an dem fünf Energieversorgungsunternehmen (darunter die EnBW) und drei Gerätehersteller (Vaillant, Baxi Innotech und die Schweizer Hexis AG mit Geschäftsstelle in Konstanz) beteiligt sind.

# Brennstoffzellen (14)

In Baden-Württemberg werden Systeme in diesem Leistungsbereich vom ZSW in Ulm, vom FhG ISE in Freiburg, von der Heilbronner Firma Enymotion, EPH-Elektronik in Ottmarsheim und von FutureE in Nürtingen entwickelt.

Das FhG ISE präsentierte z.B. ein brennstoffzellenbetriebenes Lastfahrrad. Das ZSW baut u.a die von der Firma UBZM (Ulmer Brennstoffzellenmanufaktur) vertriebene Ulmer Stromschachtel (in Abbildung 3.23 als Energieversorgung eines mobilen Messwagens der Stadtwerke Ulm), eine mit Wasserstoff betriebene netzunabhängige PEMFC-Stromversorgung mit 0,5 - 2 kW elektrischer und 0,8 - 3,2 kW Wärmeleistung, integrierte ein 500 W Brennstoffzellensystem in einen Airport Scooter der Firma Tünkers und entwickelt einen 1 kW Methanol-Kleinstreformer, eine tragbare 1 kW PEMFC-Stromversorgung, die mit Ethanol betrieben werden kann, und eine erdgasbetriebene 1 kW HT-PEMFC-KWKHausenergieversorgung.

Enymotion bietet netzunabhängige Batterieladegeräte an: ein mit LPG (Campinggas) zu betreibendes 200 W Brennstoffzellen/Reformer-System und ein 500 W System für Ethanol.
EPH-Elektronik bietet das PEM-Brennstoffzellensystem G-E-O-S als mobile Energieversorgung in verschiedenen Leistungsklassen bis 1,2 kW an. Die Stacks kommen von der Schunk GmbH aus Hessen.
FutureE baut modulare Systeme von 0,5 - 2 kW mit einem BZ-Stack der kanadischen Firma Ballard.

Erwähnt werden sollte hier noch ein Projekt für Studenten der Hochschule Esslingen, in dem ein Smart in ein Elektrofahrzeug umgebaut und mit einer 2,5 kW Brennstoffzelle als Range Extender ausgestattet wurde.

**BRENNSTOFFZELLENSYSTEME VON 3 - 30 KW**

werden ebenfalls als mobile Stromversorgungen, als USV und als Bordstromversorgungen entwickelt, außerdem als kleine Blockheizkraftwerke und als Energieversorgung von Klein- und Industriefahrzeugen (z.B. Gabelstapler). Vielversprechend, aber zumindest in Deutschland noch nicht realisiert, wäre die Entwicklung von 15 — 30 kW BZ-Range-Extendern für Elektro-PKW.

Auch in diesem Leistungsbereich müssen Brennstoffzellensysteme mit Benzin-, Diesel- und Gasgeneratoren und mit Batterien konkurrieren. Entwickelt werden großteils PEMFC- und SOFC-Systeme (evtl. HT-PEFC-Systeme im Bereich bis 5 kW) und AFC-Systeme für die Raumfahrt. SOFC-Systeme brauchen mehrere Stunden Aufwärmzeit und kommen deshalb nur für den Dauerbetrieb (z.B. Kraftwerke) in Frage. PEMFC-Systeme reagieren hochdynamisch und sind für alle Anwendungen geeignet. Viele der entwickelten Systeme sind im Praxistest oder bereits serienreif, einige wenige werden in Serie gefertigt und auf dem Markt angeboten, allerdings noch unter finanziellen Verlusten für die Anbieter.

Eine besondere Herausforderung in diesem Leistungsbereich ist die Luftversorgung von Brennstoffzellenstacks, die einen hohen Eingangsdruck auf der Kathode benötigen, weil auf dem Markt angebotene Kompressoren im Allgemeinen zu schwer und zu ineffizient sind.

Entwickler von Systemen in diesem Bereich weichen deshalb oft auf Stacks mit sehr geringen Kathoden-Druckabfällen aus (die aber leistungsschwächer sind) und mit Lüftern statt Kompressoren betrieben werden können.
Systementwickler in Baden-Württemberg sind das ZSW in Ulm, das DLR in Stuttgart, FutureE in Nürtingen und die ElringKlinger AG in Dettingen. Das ZSW hat unter anderem ein erdgasbetriebenes 4 kW PEMFC-BHKW, zwei 10 kW PEMFC-Systeme zur Erzeugung von elektrischer Energie, Wärme, Wasser und sauerstoffabgereicherter Luft und ein 30 kW PEMFC-Notstromaggregat gebaut. Das DLR hat z.B. das Brennstoffzellenflugzeug Antares entwickelt. Das 25 kW Brennstoffzellensystem des Flugzeugs stammt von der dänischen Firma Serenergy. FutureE bietet die oben erwähnten modularen 2 kW Systeme bis 50 kW Gesamtleistung an. ElringKlinger entwickelt SOFC-Stacks für Bordstromversorgungen von LKW.

**BRENNSTOFFZELLENSYSTEME VON 30 - 400 KW**

werden weltweit als Kleinkraftwerke und als Fahrzeug- und U-Bootantriebe entwickelt. Im Kraftwerksbereich müssen sie mit Verbrennungs-, Stirling- und Dampfschraubenmotoren und mit Mikrogasturbinen konkurrieren.

Gaskraftwerke mit Verbrennungsmotor erreichen in diesem Leistungsbereich mit 35 - 40 % gleiche oder sogar bessere elektrische

# Brennstoffzellen (15)

Wirkungsgrade als PEMFC- und PAFC-Kraftwerke mit Erdgasbetrieb. SOFC- und MCFC-Kraftwerke haben deutlich höhere elektrische Wirkungsgrade (40 - 50 %), sind wegen ihrer langen Aufwärmzeiten aber nur für den Dauerbetrieb mit moderaten Lastwechseln geeignet.

Fahrzeugantriebe aus mit Wasserstoff betriebenen PEMFC-Systemen haben mit 30 - 35 % deutlich bessere Wirkungsgrade als Fahrzeugantriebe mit Benzin- oder Dieselmotoren mit 15 % bzw. 25 % und verursachen keine lokalen Emissionen.

**Aktueller Stand:**

- Die Fahrdynamik und die Betankungszeiten von Fahrzeugen mit PEMFC-Systemen sind vergleichbar denen mit Verbrennungsmotoren.
- Die Kraftstoffkosten dieses Systems sind aktuell noch höher als bei Verbrennungsmotoren, werden sich diesen aber vermutlich zukünftig annähern (abhängig von internationalen Preisentwicklungen und Besteuerungen).
- Die Reichweite einer Tankfüllung z.B. mit einem 700 bar Wasserstoffspeicher liegt bei etwa 400 km und ist damit für Kunden akzeptabel.
- Die Lebensdauer von Brennstoffzellensystemen in Fahrzeugen ist schon heute annähernd vergleichbar mit der Lebensdauer von Verbrennungsmotoren.
- Die Herstellungskosten von Brennstoffzellensystemen für Fahrzeuge sind zurzeit auf Grund geringer Stückzahlen noch zu hoch für die Kommerzialisierung.

Problematisch ist auch in diesem Leistungsbereich die Luftversorgung der Brennstoffzellenstacks, weil auf dem Markt keine geeigneten Kompressoren angeboten werden. Automobilhersteller, die Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb bauen, haben deshalb eigene Kompressoren entwickeln lassen, die aber auf dem freien Markt nicht erhältlich sind.

Die Entwicklung von Brennstoffzellenkraftwerken in Deutschland hat unter anderem Siemens betrieben, dass mehrere SOFC-Anlagen im Leistungsbereich 100 - 300 kW in Betrieb nahm (z.B. das in Kapitel 3.2.2 erwähnte System in den Niederlanden und in Essen). Von der MTU in München wurde das modulare 250 kW MCFC-Kraftwerk HotModule zur Serienreife entwickelt. 2005 wurde MTU an eine

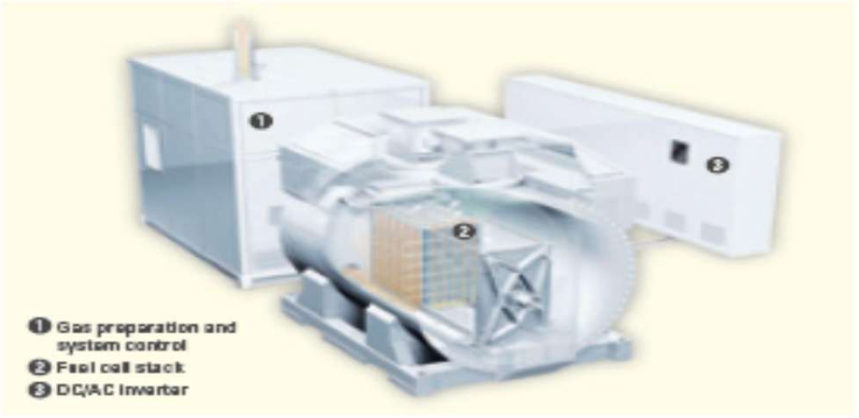



Abbildung 3.24: Schnitt durch das MTU HotModule.

Kapitalbeteiligungsgesellschaft verkauft, 2011 wurden alle Brennstoffzellenaktivitäten eingestellt (s. auch Kapitel 3.2.2).

Fast alle Automobilhersteller weltweit investieren in die Entwicklung von Brennstoffzellenantrieben. In Baden-Württemberg produziert Daimler seit 2009 eine Kleinserie von 200 B-Klasse F-Cell (Brennstoffzellen-PKW der aktuellen Generation). Die ersten dieser Fahrzeuge wurden 2010 ausgeliefert (s. Kapitel Kapitel 3.2.2). Der Stack des F-Cell kommt von der kanadischen AFCC (an der Daimler 50,1 % Anteile hält).

Das Brennstoffzellensystem wird von der Daimler Tochtergesellschaft NuCellSys in Kirchheim entwickelt und gebaut. Abbildung 3.25 zeigt einen vereinfachten Schnitt durch die B-Klasse F-Cell: Unter dem Kofferraum befindet sich der Li-Ionen-Akku, davor drei Wasserstoff-Tanks, davor (unter den Vordersitzen) der Brennstoffzellenstack, im Motorraum sind das Brennstoffzellensystem und der Elektromotor untergebracht.



Abbildung 3.25: Schnitt durch die B-Klasse F-Cell [Daimler]

# Brennstoffzellen (16)

Außer Daimler sind in Baden-Württemberg im Bereich Brennstoffzellenfahrzeuge noch Audi in Neckarsulm aktiv und das ZSW, das ein ursprünglich von Daimler gebautes 50 kW Brennstoffzellensystem mit Methanol-Reformer (NECAR 5-Technologie) für einen Busantrieb weiterentwickelte und ein 100 kW Brennstoffzellengrundsystem für automobile Anwendungen als Komponententestplattform betreibt.

Der Einsatz von Brennstoffzellenantrieben in U-Booten (die in diesen Leistungsbereich fallen) bietet neben der Außenluftunabhängigkeit (ermöglicht deutlich längere Tauchzeiten als bei konventionellen Antrieben) weitere Vorteile wie geringe Wärme- und Schallemissionen. Brennstoffzellen für U-Bootantriebe werden z.B. von UTC und Siemens hergestellt. Siemens baut die für Wasserstoff/Sauerstoff-Betrieb ausgelegten PEMFC-Systeme Sinavy BZM mit 34 und 120 kW elektischer Leistung, die in den U-Boot-Klassen 212A (die derzeit modernsten U-Boote der deutschen und der italienischen Marine), 209PN und 214 modular eingebaut werden (in die Klasse 212A sind neun BZM 34 eingebaut, die 300 kW elektrische Leistung liefern).

**BRENNSTOFFZELLENSYSTEME > 400 KW**

werden bisher hauptsächlich aus Modulen ≤ 400 kW aufgebaut. MCFC- und SOFC-Module haben hier elektrische Wirkungsgrade von 45 - 50 % (im Betrieb mit Erdgas) und sind damit herkömmlichen Gaskraftwerken (Wirkungsgrad 35 - 40 %) deutlich, Kohlekraftwerken (Wirkungsgrad ca. 45 %) dagegen kaum überlegen. Mit nachgeschaltetem Dampfgenerator kann der elektrische Wirkungsgrad der BZ-Systeme um ca. 10 % erhöht werden. Eine andere Möglichkeit zur Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades von SOFC- und MCFC-Systemen sind Hybride aus Brennstoffzellensystem und Gasturbine. Die Turbine verbrennt dabei das „Anoden-Off-Gas" (das im Brennstoffzellenstack nicht umgesetzte Brenngas) und erzeugt daraus elektrische Energie. Außerdem presst sie erhitzte Luft unter Hochdruck in die Kathodenseite der Brennstoffzellen und steigert dadurch den Wirkungsgrad der Zellen).

Fuel Cell Energy (FCE) in Danbury, Connecticut, USA vertreibt MCFC-Kraftwerke von 300 kW - 3 MW elektrischer Leistung. Der elektrische Wirkungsgrad liegt bei 47 %. Siemens lieferte 2000 ein Test-Hybridsystem aus einer 200 kW SOFC und einer 20 kW Gasturbine an das National Fuel Cell Research Center in Kalifornien. Das System erreichte im Betrieb über ca. 3500 Stunden einen elektrischen Wirkungsgrad von 53 %. Ab 2006 entwickelten Siemens, EnBW und DLR ein SOFC-Gasturbinen-Hybridkraftwerk mit 2 - 4 MW elektrischer Leistung. Der erhoffte elektrische Wirkungsgrad von 70 % wäre bereits in diesem „kleinen" dezentral einsetzbaren Leistungsbereich weit höher als der Wirkungsgrad der größten (400 MW) und modernsten GuD-Kombikraftwerke (Gas und Dampf), die 60 % erreichen. Die Arbeiten wurden mittlerweile eingestellt. Die kanadische Firma Ballard vertreibt die CLEARgen Systeme, mit Wasserstoff betriebene PEMFC-Kraftwerke mit 1 MW elektrischer Leistung und einem elektrischen Wirkungsgrad von 48 %.

Quelle: e-mobil BW GmbH - Energieträger der Zukunft - Potenziale der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg, S. 31-46, Ausgabe 2012

# Brennstoffzellen (17)

## Tabelle 3-1: Qualitativer Vergleich von Verbrennungsmotor, Brennstoffzellen und Batterien

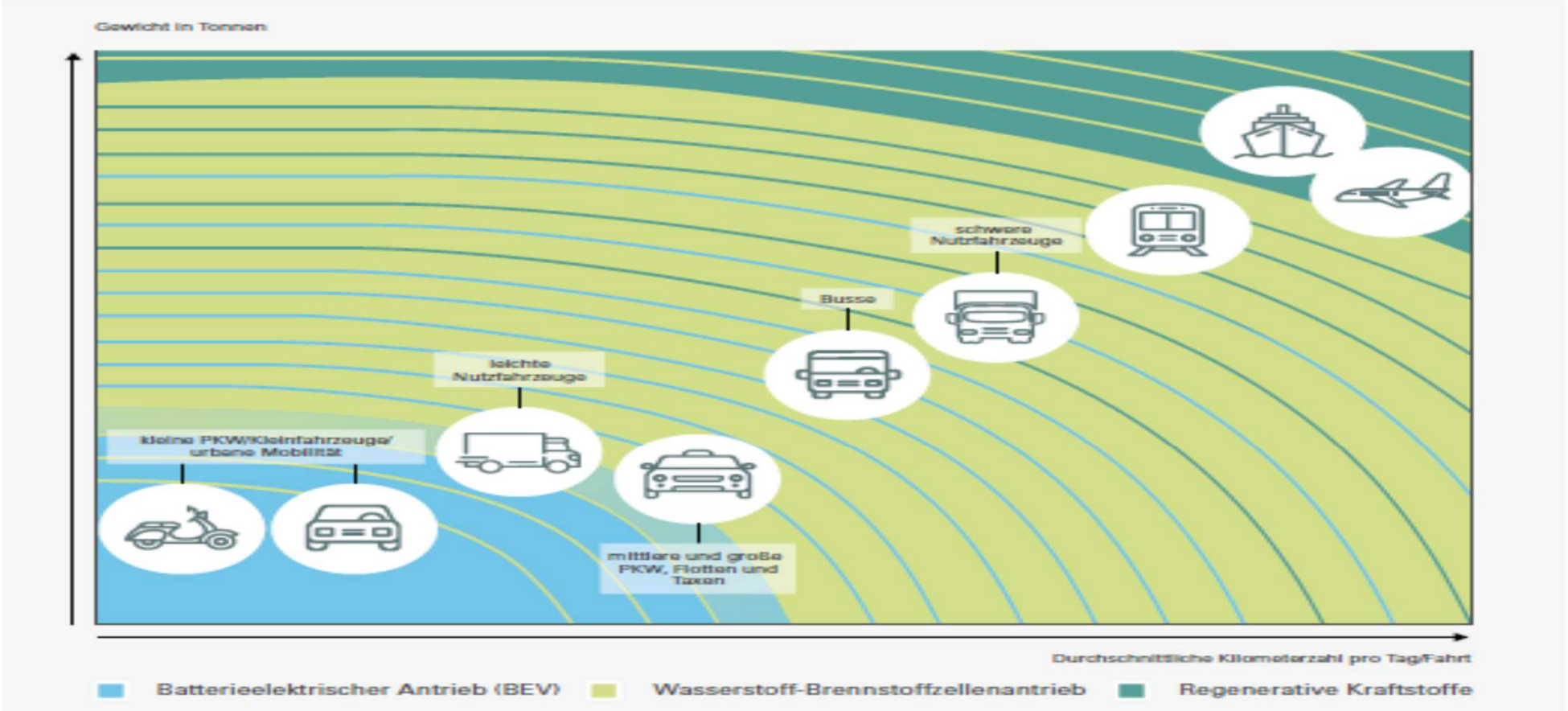
| | Verbrennungsmotor | Brennstoffzellensystem | Batterieelektrisch |
|---|---|---|---|
| Wirkungsgrad | Niedrig | Mittel | Hoch |
| Lade-/ Tankzeit | < 5 min | < 5 min | > 1 h |
| Emissionen im Betrieb | Lärm, Schadstoffe | Systemabhängig keine bis geringe Lärm- und Schadstoffemissionen | Keine Lärm- oder Schadstoffemissionen |
| Entwicklungsstand | Massenproduktion | Feldtests | Markteinführung für Fahrzeuge |
| Herstellungskosten | Gering | Noch hoch, bei Massenproduktion nur etwas höher als Verbrennungsmotor | Mittel, abhängig von Reichweite |
| Verbrauchskosten | Hoch | Mittel | Gering |
| Platzbedarf | Klein | Mittel | Klein |
| Gewicht | Mittel | Höher als Verbrennungsmotor | Abhängig von Reichweite |

Quelle: e-mobil BW GmbH - Energieträger der Zukunft - Potenziale der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg, S. 30, Ausgabe 2012

# Vielfalt der Antriebsarten des Verkehrssektors für den Klimaschutz notwendig

## Für jeden Fahrzeugtyp und Einsatzzweck die effizienteste Technologie wählen

Zur Erreichung der Klimaziele des Verkehrssektors in Deutschland und Baden-Württemberg ist die Nutzung aller verfügbaren Effizienz- und Zero-Emission-Technologien notwendig. Für den Verkehrssektor bedeutet dies, die Emissionen bis zum Jahr 2030 um 40 bis 42 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren. Batterien haben große Vorteile und Potenziale für kleine Fahrzeuge mit geringen Reichweiten, wohingegen die Brennstoffzelle vor allem auf längeren Strecken und bei größeren Fahrzeugen Treibhausgasemissionen einsparen kann. Zusätzlich gilt es auch, weiter an regenerativen Kraftstoffen aus Biomasse (zweite Generation) und erneuerbarem Strom zu forschen und eine großflächige Produktion in Angriff zu nehmen, da diese ebenfalls die Treibhausgasemissionen im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen reduzieren können. Diese Kraftstoffe sind insbesondere für die Verkehrsträger Flugzeug und Schiff, die auf absehbare Zeit nicht elektrifiziert oder mit einem Brennstoffzellenantrieb betrieben werden können, von zentraler Bedeutung. Zwar gibt es bereits erste vollelektrische Kleinflugzeuge, doch wann ein Mittelstreckenflugzeug per Elektromotor fliegen kann, ist heute nicht absehbar. Die Grafik gibt einen schematischen Überblick welche Technologien (batterieelektrischer Antrieb, Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb, regenerative Kraftstoffe) in Abhängigkeit von Fahrzeugtyp und Reichweite geeignet sind.




Quelle: e-mobil BW GmbH - Datenmonitor e-mobil BW, Ausgabe Juli 2019

# Wasserstoffwirtschaft
# Baden-Württemberg

# Koalitionsvertrag Bündnis 90/Die Grünen und der CDU in Baden-Württemberg 2026-2031, Auszug Wasserwirtschaft

Der Koalitionsvertrag zwischen Bündnis 90/Die Grünen und der CDU für die Legislaturperiode 2026–2031 in Baden-Württemberg trägt den Titel „Aus Verantwortung fürs Land – Gemeinsam stark in stürmischen Zeiten“.

## Auszug Wasserstoffwirtschaft im Energiebereich

Baden-Württemberg soll Wasserstoffland werden. Dies gilt für die technische Entwicklung, die Erzeugung, die Speicherung und den Transport von Wasserstoff und seinen Derivaten und für die Nutzung in Industrie, Energiewirtschaft und Verkehr. Wir wollen den Beirat Wasserstoff-Roadmap BW fortführen und seine Sichtbarkeit erhöhen. Wir fördern weiterhin den system- und netzdienlichen Aufbau von Elektrolyseuren im Land, setzen uns für internationale Wasserstoffpartnerschaften ein und unterstützen Abschlüsse von Abnahmeverträgen. Der Wasserstoff-Hochlauf wird jedoch nur gelingen, wenn das bundesweit genehmigte Kernnetz umgesetzt wird und H2-ready Kraftwerke zeitnah als Ankerkunden für den Wasserstoff in Baden-Württemberg errichtet werden. Wir setzen uns für eine Anpassung der EU-Wasserstoffstrategie und eine pragmatische, weniger restriktive Ausgestaltung der regulatorischen Rahmenbedingungen auf EU-Ebene ein.

Quelle: Koalitionsvertrag Bündnis 90/Die Grünen und der CDU in Baden-Württemberg 2026-2031, Seite 63

# Wasserstoffwirtschaft Baden-Württemberg

## Landesaktivitäten (1)

Wasserstoff und Brennstoffzellen sind Schlüsseltechnologien für die Energiezukunft. „Grüner“ Wasserstoff bietet großes Potenzial für Baden-Württemberg. Das Umweltministerium fördert dies mit Projekten und der Wasserstoff-Roadmap.



# Wasserstoffwirtschaft Baden-Württemberg

Landesaktivitäten (2)

## Strategien und Konzepte für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft

Das Umweltministerium hat einen Fahrplan für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in Baden-Württemberg erarbeitet.




Baden-Württemberg soll gemäß Paragraf 10 Klimagesetz Baden-Württemberg bis 2040 netto-treibhausgasneutral werden. Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, sind ein tiefgreifender Umbau unseres Energiesystems und eine weitreichende Umstellung auf innovative und emissionsfreie Technologien in allen Sektoren notwendig.

Neben der Elektrifizierung durch erneuerbare Energien und der Energieeffizienz spielt der Auf- und Ausbau einer erneuerbaren Wasserstoffwirtschaft eine entscheidende Rolle. Erneuerbarer Wasserstoff und seine Derivate eignen sich insbesondere zur Kopplung der Sektoren Energie, Verkehr und Industrie. Durch die Sektorenkopplung mit Wasserstoff und seinen Derivaten (zum Beispiel Ammoniak und Methanol) können Erneuerbare Energien flexibler genutzt, etwaige Netzengpässe kompensiert und die notwendigen Ausbauziele unterstützt werden.

Durch die Umwandlung von erneuerbar erzeugtem Strom durch Elektrolyse in Wasserstoff können Erneuerbare Energien auch an schwachen elektrischen Netzknoten zugebaut und saisonübergreifend gespeichert werden. Es gilt, das gesamte Energiesystem – also Elektronen und Moleküle – zu optimieren und resilienter zu gestalten. Ein vernetztes, diversifiziertes Energiesystem wird mittel- bis langfristig eine entscheidende Bedeutung in der Energiewende spielen.

### Strategischer Fahrplan für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft

Das Land Baden-Württemberg unterstützt den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft. Am 15. Dezember 2020 wurde vom Kabinett des Landes die Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg beschlossen. Sie bildet die Grundlage für die Aktivitäten der Landesregierung im Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft. Mit dem ersten Fortschrittsbericht 2023 wird die Roadmap weiterentwickelt und um relevante Handlungsfelder ergänzt.

Das 2026 veröffentlichte Wasserstoff-Versorgungskonzept ergänzt und erweitert die Wasserstoff-Roadmap, indem es verschiedene Wasserstoff-Versorgungsoptionen und -wege aufzeigt. Die Strategien und Konzepte bilden den Rahmen der Maßnahmen und Aktivitäten der Landesregierung Baden-Württemberg im Bereich Wasserstoff.

### Wo ist Wasserstoff sinnvoll?

Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI hat mit Förderung des Landes Baden-Württemberg und aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) einen Faktencheck zu Wasserstoff erstellt. Dieser ist auch online als interaktive Anwendung mit Flip-Karten verfügbar und ordnet auf Basis einer systematischen Auswertung verbreitete Aussagen zu Wasserstoff ein. Die Auswertung von 100 Faktenchecks zeigt die wichtige, aber anwendungsabhängige Rolle von Wasserstoff in der Energiewende.

# Wasserstoffwirtschaft Baden-Württemberg
Landesaktivitäten (3)

## Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI: Wasserstoff-Fakten
## Strategien und Konzepte

### Wasserstoffstrategie

### Wasserstoff-Versorgungskonzept
Das Umweltministerium zeigt im Wasserstoff-Versorgungskonzept, wie Baden-Württemberg künftig mit Wasserstoff versorgt werden kann.

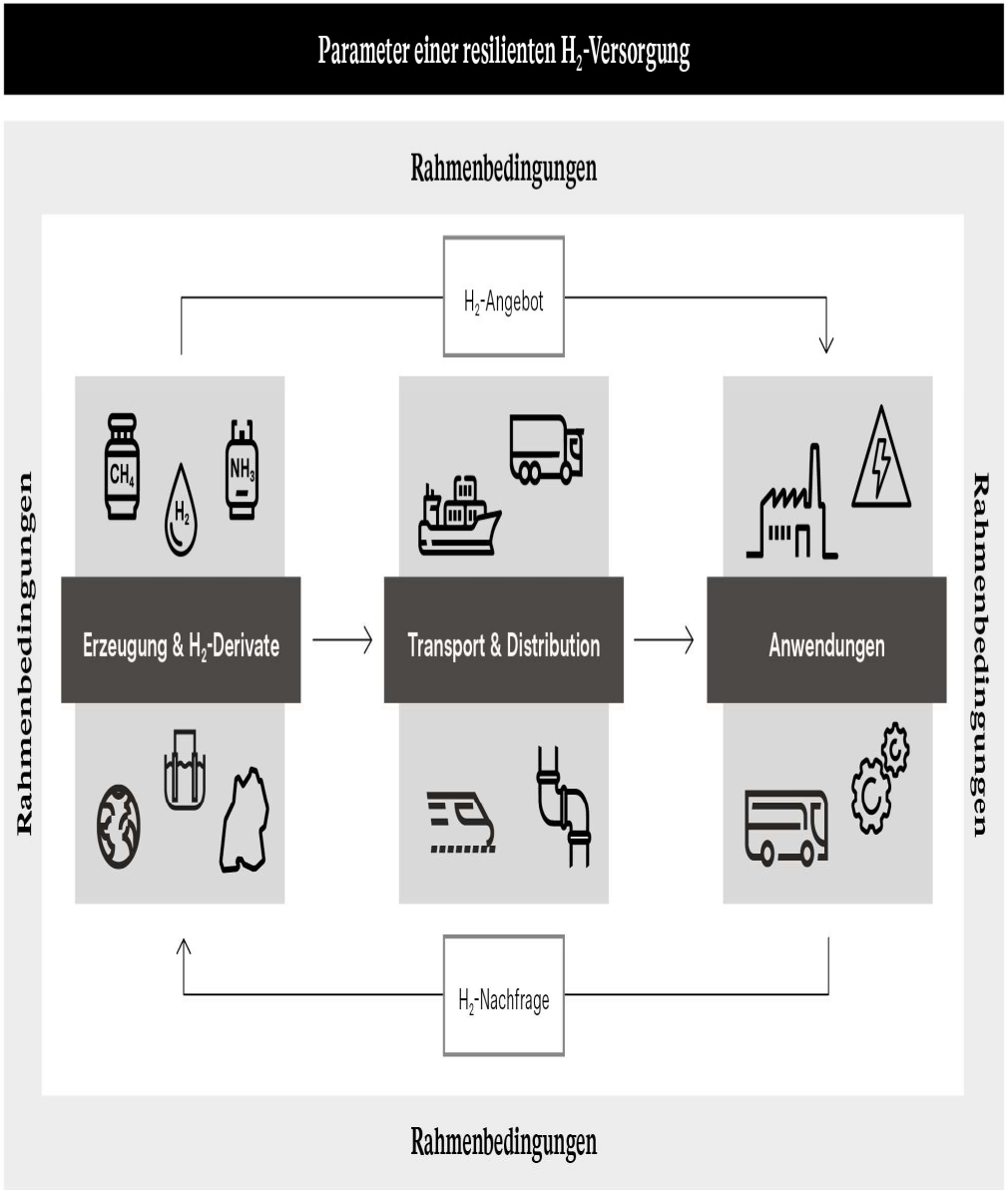
Baden-Württemberg hat sich zum Ziel gesetzt, gemäß Paragraf 10 Klimagesetz Baden-Württemberg bis 2040 netto-treibhausgasneutral zu werden. Dazu sind ein tiefgreifender Umbau unseres Energiesystems und eine weitreichende Umstellung auf innovative und emissionsfreie Technologien in allen Sektoren notwendig.

Neben der Elektrifizierung durch erneuerbare Energien und der Energieeffizienz spielt der Auf- und Ausbau einer erneuerbaren Wasserstoffwirtschaft eine entscheidende Rolle. Eine diversifizierte und zuverlässige sektorenübergreifende Versorgung mit erneuerbarem Wasserstoff wird daher ein wichtiger Bestandteil zur Erreichung der Klimaneutralitätsziele und zur Standortsicherung des Landes Baden-Württemberg sein.

Als strategischen Fahrplan verabschiedete das Kabinett des Landes 2020 die Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg. Im Jahr 2023 wurde die Roadmap um einen ersten Fortschrittsbericht ergänzt. Zentrale Schwerpunkte des Fortschrittsberichtes sind die Bereitstellung von Wasserstoff und der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur.

Die Umsetzung und Weiterentwicklung der Konzepte und Strategien wird durch die Plattform H2BW unterstützt, die bei der Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg e-mobil BW GmbH eingerichtet wurde.

Wasserstoff-Versorgungskonzept als Erweiterung der Wasserstoff-Roadmap
Das Wasserstoff-Versorgungskonzept (PDF, 2026) zeigt verschiedene Versorgungsoptionen und -wege auf und soll dadurch den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in Baden-Württemberg unterstützen. Es bietet einen Einblick in den momentanen Stand des Wasserstoffmarkthochlaufs, in die voraussichtlichen Wasserstoffbedarfe, in den Aufbau eines Wasserstoffnetzes, in die lokale Wasserstofferzeugung sowie in internationale Erzeugungspotenziale und Wasserstofftransportoptionen.



# Wasserstoffwirtschaft Baden-Württemberg

Landesaktivitäten (4)

## Beirat Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg

Der Beirat Wasserstoff-Roadmap BW hat die Aufgabe, die Landesregierung bei der Umsetzung der Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg zu beraten und Empfehlungen zu erarbeiten.

Wasserstoff ist nicht nur eine wichtige Option, um die Wirtschaft im Land möglichst klimaneutral zu machen, sondern kann als sektorenübergreifende und innovative Technologie den Wirtschafts- und Innovationsstandort Baden-Württemberg stärken.

Die Landesregierung hat einen Beirat Wasserstoff-Roadmap BW ins Leben gerufen. Dieser Beirat hat die Aufgabe, die Landesregierung bei der Umsetzung der Wasserstoff-Roadmap für Baden-Württemberg zu beraten und Empfehlungen zu erarbeiten. Das Gremium besteht in der Regel aus 25 Mitgliedern (aktuell: 23 Mitglieder) und setzt sich aus Vertreterinnen und Vertretern aus Wirtschaft, Wissenschaft, Zivilgesellschaft und Kommunen zusammen.

### Die Mitglieder des Beirats Wasserstoff-Roadmap BW

- Professor Dr. Markus Hölzle, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg (ZSW), Vorsitzender des Beirats
Katrin Flinspach, Terranets bw GmbH, stellvertretende Vorsitzende des Beirats
Joachim Kugler, Unternehmer Baden-Württemberg e. V. (UMBW)
Dr. Frank Graf, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) – Landesgruppe BW
Markus Baumgärtner, EnBW Energie Baden-Württemberg AG
Dr. Tobias Bringmann, Verband kommunaler Unternehmen (VKU) - Landesgruppe BW
Dr. Elias Frei, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE)
Thorsten Höck, Verband für Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (VfEW)
Professor Dr. Thomas Jordan, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) – Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit (ITES)
Andrea Engelen, Cellcentric GmbH & Co. KG
Gerd-Dieter Krieger, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e. V. (VDMA)
Bettina Lisbach, Stadt Karlsruhe
Dr. Raphael Menez, IG Metall-BW
Sylvia Pilarsky-Grosch, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) BW e.V.
Professor Dr. Karsten Pinkwart, Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT)
Dr. Jörg Reichert, Netze BW GmbH
Dr. Jan Stefan Roell, Baden-Württembergischer Industrie- und Handelskammertag (BWIHK)
Johannes Daum, Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH (NOW)
Dr. Stefan Dwenger, EKPO Fuel Cell Technologies GmbH
Jeanette Uhlig, Deutsche Energie Agentur GmbH (dena)
Dr. Silke Wagener, Freudenberg Technology Innovation SE & Co. KG
Kai Weeber, Robert Bosch GmbH
André Olveira-Lenz, Verband der Chemischen Industrie e. V. Baden-Württemberg

Die 2021 gegründete Plattform H2BW, bei der Landesagentur e-mobil BW GmbH angesiedelt, ist zentrale Anlaufstelle für Unternehmen, Kommunen und Forschungseinrichtungen im Land, die bei den Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien aktiv sind oder es werden wollen.
Die Plattform H2BW unterstützt den Beirat, nimmt dessen Empfehlungen zur Umsetzung der Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg auf und organisiert die Sitzungen des Fachgremiums.

### Handlungsempfehlungen für die Politik

In seinem sogenannten „Sieben-Punkte-Plan“ legt der Beirat konkrete Handlungsempfehlungen für die anstehende Fortschreibung der Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg vor.

Der Wasserstoff Beirat BW geht davon aus, dass die Wasserstoffnachfrage gegenüber früheren Prognosen signifikant höher ausfallen und auch deutlich früher ansteigen wird. Drei der sieben Punkte zielen darauf ab, die ungünstige Ausgangslage des Landes Baden-Württemberg für den Bezug und die Herstellung von grünem Wasserstoff strukturell zu verbessern. Insbesondere die Binnenlage des Bundeslands und die aktuell nutzbaren Kapazitäten bei Erneuerbaren Energien machen ein schnelles Handeln notwendig. Hierzu gehört der beschleunigte Ausbau der Grünstromerzeugung, eine schnelle Schaffung der notwendigen Wasserstofftransportinfrastruktur sowie die Förderung von Wasserstofftechnologien, die von der Industrie im Land später auch exportiert werden sollen.

### Zum Herunterladen

Plattform H2BW: Impulspapier des Wasserstoff Beirats Baden-Württemberg [PDF]
Immer auf dem neuesten Stand
Abonnieren Sie den Newsletter der Landesregierung.

# Wasserstoffwirtschaft Baden-Württemberg

## Landesaktivitäten (5)

### Netzwerk

### Wasserstoff-Plattform H2BW

Die Plattform H2BW soll den vielen Wasserstoff- und Brennstoffaktivitäten Baden-Württembergs ein sichtbares und sektorenübergreifendes Dach geben.



Im Mittelpunkt der Aufgaben der Plattform H2BW steht die Umsetzung von Maßnahmen der Wasserstoff-Roadmap, die den Weg des Landes zu einem führenden Standort für Wasserstoff- und Brennstofftechnologien beschreibt. Die Plattform soll aber auch die Planung, Koordinierung und Umsetzung ergänzender Programme und Projekte übernehmen.

Die Plattform H2BW soll an der Schnittstelle zwischen Forschung, Entwicklung und Vermarktung neuer Technologien und neuer Geschäftsmodelle eine zentrale Rolle spielen. Sie ist somit Partner für Forschungseinrichtungen, Kommunen und Unternehmen und treibt die Entwicklung einer klimafreundlichen, zukunftsfähigen Wasserstoffwirtschaft in Baden-Württemberg voran. Es gilt, das Umsatzpotenzial der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien in Baden-Württemberg von etwa neun Milliarden Euro rasch zu erschließen.

Angesiedelt ist die neue Plattform in Form einer Geschäftsstelle bei der Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg e-mobil BW GmbH.
Um die H2BW-Plattform aufzubauen und zu betreiben, stehen bis 2024 3,5 Millionen Euro zur Verfügung. Das Geld kommt aus der Rücklage „Zukunftsland BW – Stärker aus der Krise“.

**Weitere Informationen**

- Wasserstoff-Plattform H2BW
- Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg
- Wasserstoff-Roadmap für Baden-Württemberg

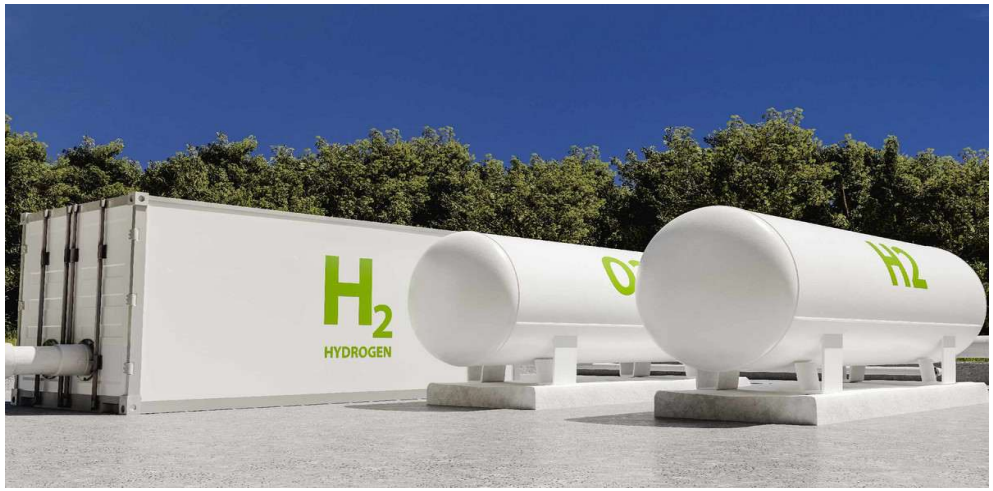
# Wasserwirtschaft Baden-Württemberg
## Landesaktivitäten (6)

### Fördermöglichkeiten

Die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien werden beim weiteren Umbau der Energiesysteme und einer weitreichenden Umstellung auf innovative und emissionsarme Technologien eine Schlüsselrolle einnehmen. Mit den Förderprogrammen „Zukunftsprogramm Wasserstoff BW“ und „Modellregion Grüner Wasserstoff“ unterstützt das Land dabei, eine zukunftsfähige Wasserstoffwirtschaft in Baden-Württemberg aufzubauen.

Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien spielen beim Umbau der Energiesysteme eine Schlüsselrolle. Baden-Württemberg fördert den Zubau einer Wasserstoffwirtschaft mit Förderprogrammen.






#### Förderprogramm Elektrolyseure (ELY)

Mit ELY fördert das Land die Neuerrichtung lokaler Elektrolyseure für erneuerbaren Wasserstoff. Nach dem ersten Förderaufruf im Jahr 2025 wird das Förderprogramm 2026 mit einer zweiten Runde fortgeführt.

#### Förderaufruf 2026

Zweite Förderrunde für regionale Wasserstofferzeugung
Für den zweiten Förderaufruf stehen erneut mehr als 50 Millionen Euro zur Verfügung. Stichtag für die Einreichung von Anträgen ist der 18. Mai 2026.

Ablauf des Förderaufrufs 2026

Im ersten Förderaufruf 2025 des Landesförderprogramms Elektrolyseure erhielten acht Projekte mit einer Elektrolyse-Kapazität von insgesamt 55 Megawatt eine Förderung. Dafür bewilligte das Land insgesamt 50,7 Millionen Euro.

#### Zweiter Förderaufruf 2026

Die heutige Vertragsübergabe markiert den offiziellen Startschuss für den Ausbau einer dezentralen, nachhaltigen Wasserstoffinfrastruktur in Baden-Württemberg. Diese ist zentraler Baustein der Fortschreibung der Wasserstoff-Roadmap [PDF]
Die Landesregierung wird 2026 einen weiteren Förderaufruf im Förderprogramm Elektrolyseure starten.

#### Förderprogramm Elektrolyseure (ELY)

Das Förderprogramm Elektrolyseure (ELY) unterstützt die Neuerrichtung lokaler Elektrolyseure mit integrierten Konzepten zur Herstellung von erneuerbarem Wasserstoff für die regionale Versorgung.

Für das Förderprogramm stellt das Land Baden-Württemberg 100 Millionen Euro zur Verfügung, verteilt auf zwei Förderaufrufe.

Im ersten Schritt wurden 50,7 Millionen Euro Fördermittel an acht Projekte verteilt. Dadurch entsteht eine zusätzliche Elektrolysekapazität von 55 MW (Verdopplung der bisherigen Elektrolysekapazität; aktuell 40MW)

# Wasserwirtschaft Baden-Württemberg
## Landesaktivitäten (7)

### Förderung

### IPCEI Wasserstoff

IPCEI Wasserstoff ist ein wichtiger Hebel für das Land, um die Entwicklung von Wasserstofftechnologien entscheidend voranzutreiben und vom Markthochlauf langfristig zu profitieren.



Important Projects of Common European Interest – kurz: IPCEI – ist ein von der Europäischen Kommission entwickeltes Instrument zur Förderung von innovativen und strategisch wichtigen Schlüsseltechnologien. Die paneuropäisch koordinierten und verbundenen Einzelprojekte leisten dank ihrer positiven Spill-over-Effekte auf den Binnenmarkt und die europäische Gesellschaft einen sehr wichtigen Beitrag zu Wachstum, Beschäftigung und Wettbewerbsfähigkeit in Europa.

Die Europäische Kommission (KOM) erteilt bei einem IPCEI eine Ausnahme vom Beihilfeverbot, wenn aufgrund signifikanter Risiken bei einem Vorhaben von europäischem Interesse keine ausreichende private Innovationsförderung stattfindet. Die Fördermittel kommen jeweils von den Mitgliedsstaaten, in Deutschland vom Bund (70 Prozent) und von den Ländern (30 Prozent).

Anfang 2021 wurde das IPCEI Wasserstoff ins Leben gerufen, um den Markthochlauf von grünem Wasserstoff zu unterstützen. Die zahlreichen Projekte von Unternehmen aus 23 europäischen Ländern wurden nach thematischen Schwerpunkten in vier sogenannten Wellen gebündelt, die von der Europäischen Kommission notifiziert werden: Technologie (Hy2Tech), Industrie (Hy2Use), Infrastruktur (Hy2Infra) und Mobilität & Transport (Hy2Move). Diese adressieren die gesamte Wertschöpfungskette im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.

#### IPCEI Wasserstoffvorhaben in Baden-Württemberg

IPCEI Wasserstoff ist ein wichtiger Hebel für das Land, um die Entwicklung von Wasserstofftechnologien entscheidend voranzutreiben und vom Markthochlauf langfristig zu profitieren.

Für die ausgewählten Unternehmen in Baden-Württemberg bietet IPCEI Wasserstoff die einmalige Gelegenheit, Fördermittel in einem enormen Umfang einsetzen zu können, um Entwicklungen zu forcieren und sich im künftigen Markt erfolgreich zu positionieren. Positive Effekte für die gesamte Wertschöpfungskette sind zu erwarten – Unternehmen und Forschungseinrichtungen werden profitieren, Kompetenzen können ausgebaut und neue Arbeitsplätze im Land geschaffen werden.

Bei drei ausgewählten Projekten baden-württembergischer Unternehmen (Robert Bosch GmbH, Daimler Truck AG und EKPO Fuel Cell Technologies) geht es um die Fertigung von Brennstoffzellensystemen für stationäre Anwendungen sowie die Entwicklung und Produktion von Brennstoffzellen-Stacks und emissionsfreien Schwerlast-Brennstoffzellen-LKWs.

Das IPCEI Wasserstoffprojekt „BoschPowerUnits“ hat als erstes Vorhaben in Deutschland eine Förderzusage vom Bund erhalten. Am 10. Juli 2023 fand die offizielle Übergabe durch Bundesminister Habeck im Hause Bosch statt.

# Wasserwirtschaft Baden-Württemberg

Landesaktivitäten (8)

## Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts

## Wasserstoff – Energieträger der Zukunft

Als kohlenstofffreier Energieträger kann Wasserstoff wesentlich dazu beitragen, die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen zu senken und somit das Klima zu schützen. Erfahren Sie mehr über den „grünen“ – mit erneuerbaren Energien erzeugten – Wasserstoff.

## Klimaschutzziele mittels Wasserstofftechnologien erreichen

Wasserstofftechnologien können mittel- bis langfristig wesentlich dazu beitragen, die Klimaschutzziele erfolgreich umzusetzen. Wasserstoff als Energieträger ist dabei in den Sektoren Energie, Industrie, Verkehr und Wärme einsatzbar – direkt oder in Form von auf Wasserstoff basierenden synthetischen Kraftstoffen, die mit erneuerbarem Strom erzeugt wurden (reFuels). Somit eignet sich Wasserstoff zur Sektorkopplung, die zwar kurzfristig noch eine untergeordnete Rolle einnimmt, aber mittel- bis langfristig große Potenziale für die Umsetzung der Energiewende birgt. Die technologischen Grundlagen hierfür müssen gelegt werden.

Angesichts der Wirkungsgradverluste bei der Herstellung von Wasserstoff gegenüber der unmittelbaren Nutzung von erneuerbarem Strom ist die Verwendung von Wasserstoff vor allem in den Sektoren zielführend, in denen die Klimaschutzziele nicht durch andere Maßnahmen wie Effizienzsteigerung oder Elektrifizierung erreicht werden können. Perspektivisch könnte dies insbesondere bei industriellen Anwendungen – beispielsweise in der Chemie- und Stahlindustrie –, bei Bussen, im Nutzfahrzeugbereich und im Bereich des Luft- und Schiffsverkehrs der Fall sein.

**Fazit:**

Als kohlenstofffreier Energieträger kann Wasserstoff wesentlich dazu beitragen, die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen zu senken und somit das Klima zu schützen. Wasserstoff und Brennstoffzellen haben ein großes Potenzial, die Abhängigkeit von Importen fossiler Energieträger zu reduzieren, Energie bedarfsgerecht zu speichern und gleichzeitig Wertschöpfung und Arbeitsplätze im Land zu sichern.




## Studie

## Potentiale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie

Die Studie stellt die Potentiale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg dar. Die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts ist mit entscheidend für die Zukunftsfähigkeit des Technologiestandorts Baden-Württemberg.

Das Umweltministerium hatte die Roland Berger GmbH Mitte 2019 beauftragt, eine Studie über die Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg zu erstellen. Die Studie wurde im Februar 2020 veröffentlicht. Sie hat die Zukunftspotenziale für die regionale Wirtschaft vor dem Hintergrund der sich wandelnden Energiesysteme, aktueller Markthochlaufprognosen und der derzeitigen Positionierung wesentlicher Akteure aus dem Land bewertet. Außerdem hat sie einen aktuellen Überblick über die Situation im Land geliefert. Dabei hat die Roland Berger GmbH die Einschätzungen der lokalen Akteure in einer Online-Umfrage und zahlreichen Interviews miteinbezogen.

**Fazit: Wichtige Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts**

Laut der Studie stellen Wasserstoff- und Brennstoffzellen eine wichtige Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts dar. Sie spielen eine bedeutende Rolle für die Zukunftsfähigkeit des Technologiestandorts Baden-Württemberg, insbesondere vor dem Hintergrund des Strukturwandels in der Automobilindustrie.
Eine klare Positionierung der Akteure in Baden-Württemberg in den nächsten Jahren ist deshalb entscheidend für deren zukünftige Wettbewerbsfähigkeit auf dem entstehenden Weltmarkt für Wasserstoff- und Brennstoffzellen an. In der Studie finden sich entsprechende Handlungsempfehlungen.

Insbesondere drei Empfehlungen gibt die Berger-Studie dem Land:

- Entwicklung einer Wasserstoff Roadmap für Baden-Württemberg
- Förderung lokaler Wasserstoff-Champions für den Weltmarkt
- Förderung lokaler Wasserstoff-Projekte als Schaufenster für die Welt



Quelle: UM BW – Internet Landesaktivitäten Wasserstoffwirtschaft 10/2026

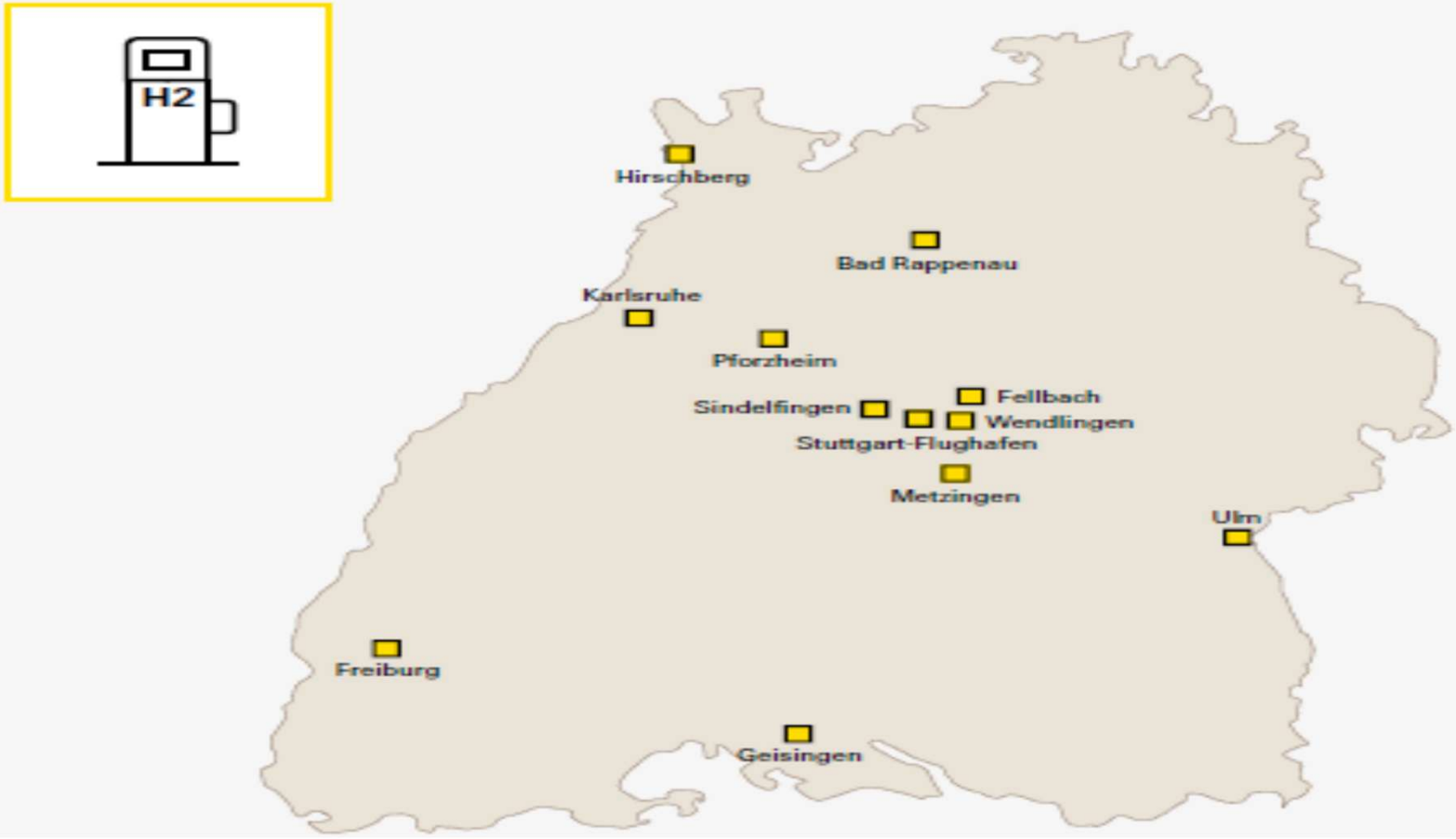
# Wasserstoffladeinfrastruktur in Baden-Württemberg, Stand 07/2019

## Wasserstoffladeinfrastruktur – Ausbau geht voran

Derzeit gibt es bundesweit 71 Wasserstofftankstellen. Somit hat Deutschland die zweitbeste Versorgung mit Wasserstofftankstellen weltweit. In Baden-Württemberg besteht an zwölf Orten die Möglichkeit, Wasserstoff zu tanken. Drei weitere Tankstellen sind derzeit in der Realisierung.

**Anzahl der Wasserstofftankstellen in Baden-Württemberg**
(Stand: 07/2019)[4]

**12 Wasserstofftankstellen in BW von gesamt 71 in D**




Quelle: H2 Mobility: https://h2.live/ aus e-mobil BW GmbH - Datenmonitor e-mobil BW, Ausgabe Juli 2019

# Beispiel SUV von Mercedes GLC mit Wasserstoff*

Neuer Dienstwagen für OB Dr. Würzner, Stadt Heidelberg 2019/2026







**Oberbürgermeister**

Seit dem 14. Dezember 2006 ist Prof. Dr. Eckart Würzner Oberbürgermeister der Stadt Heidelberg. Nach seiner ersten Amtszeit wurde er am 19. Oktober 2014 für weitere acht Jahre wiedergewählt. Am 27.11 2022 wurde er für weitere Jahre zum Oberbürgermeister gewählt.

Der Oberbürgermeister leitet die Verwaltung und ist gleichzeitig Vorsitzender des Gemeinderates.

* Derzeit einziges deutschen Fabrikat mit Brennstoffzelle, Betankung mit Wasserstoff

Quellen: Stadt Heidelberg, Internet www.heidelberg.de 9/2019; Stuttgarter Zeitung vom 31/08-01/09.2019; Mercedes Internet www.mercdes.com, 10/2026

# Beispiel Erzeugung grüner Wasserstoff durch Elektrolyse-Anlage beim Wasserkraftwerk in Grenzach-Wyhlen, Stand 5. August 2021 (1)

## Sommertour 2021: Umweltministerin Thekla Walker besucht Wasserstoff-Reallabor in Grenzach-Wyhlen

**Die Elektrolyse-Anlage ist ein gelungenes Beispiel dafür, wie wir gemeinsam mit den Unternehmen und Forschungseinrichtungen die Energiewende im Land zu einem Erfolgsmodell machen wollen“**

Ihre Sommertour hat Umweltministerin Thekla Walker heute in den Landkreis Lörrach nach Grenzach-Wyhlen geführt. **Genauer in das Wasserstoff-Reallabor**. Dort wird lebensnah erprobt, wie man den grünen Wasserstoff und die Nebenprodukte wie Abwärme so nutzen kann, dass sie sich ökologisch und ökonomisch zu einem lohnenswerten Geschäftsmodell entwickeln können.

„Das ist ein faszinierender Ort, um sich im Hier und Jetzt schon die Zukunft der Energiewende anzusehen“, sagte Ministerin Walker bei ihrem Rundgang über das Gelände des Wasserkraftwerks.

**Grenzach-Wyhlen ist eine von wenigen Elektrolyse-Anlagen in Baden-Württemberg, die grünen Wasserstoff im größeren Maßstab (1 MW und mehr) erzeugt.**

### Grüner Wasserstoff soll Schlüssel-Energieträger in Deutschland werden

Ziel des durch Bund und Land geförderten Forschungsvorhabens des Unternehmens Energiedienst Holding AG – mit dem Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg als Projektkoordinator – ist es aufzuzeigen, wie grüner Wasserstoff in der Mobilität, Industrie und bei der Wärmeversorgung so intelligent vernetzt und günstiger als bisher produziert werden kann, damit er hohe Wirkungsgrade erzielen und so für viele rentabel wird.

„Wenn es uns gelingt, grünen Wasserstoff für die Allgemeinheit wettbewerbsfähig zu machen, dann kann er zu einem der Schlüssel-Energieträger bei der Energiewende hin zu regenerativem Strom werden“, betonte Walker.

Grüner Wasserstoff als Energieträger und die Brennstoffzelle als moderne und klimafreundliche Technologie seien von enormer Bedeutung für eine Zukunft, in der wir im Strom-, im Wärme- und im Verkehrssektor auf fossile Energieträger und -treibstoffe verzichten wollen. „Der Klimaschutz spielt in der Landesregierung eine herausragende Rolle und deshalb investieren wir auch schon länger in den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft im Land“, hob die Umweltministerin hervor. Dazu habe das Umweltministerium als feder-führendes Ressort eine Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg auf den Weg gebracht.

### Land investiert sehr viel in Wasserstoff- und Brennstofftechnologien

Von der Erzeugung grünen Wasserstoffs über den Aufbau einer leistungsfähigen Infrastruktur bis hin zur industriellen und energiewirtschaftlichen Anwendung setze die Landesregierung alles daran, die nötigen Rahmenbedingungen zu schaffen: „Baden-Württemberg soll deshalb auch weltweit ein Spitzenstandort für die Wasserstoffwirtschaft werden. Daran arbeiten wir gemeinsam mit der Wissenschaft und der Wirtschaft. Das Reallabor hier in Grenzach-Wyhlen ist dafür ein gelungenes Beispiel“, betonte Walker.

Außerdem sei Baden-Württemberg bereit, sich großzügig an der Finanzierung innovativer Projekte zur Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie und zum Aufbau einer industriellen Produktion zu beteiligen. Erst Anfang Juli habe der Ministerrat deshalb beschlossen, erläuterte die Klimaschutzministerin, dass wir in den kommenden fünf Jahren einen dreistelligen Millionenbetrag bereitstellen, um europaweit bedeutsame Projekte im Wasserstoff- und Brennstoffzellenbereich mitzufinanzieren. „Wir wollen gemeinsam mit den Unternehmen beim Klimaschutz vorankommen. Wir wollen den Klimaschutz auch zu einem wirtschaftlichen Erfolgsmodell machen, mit dem sich Geld verdienen lässt und neue Arbeitsplätze entstehen können.“

Quelle: UM BW – PM „Sommertour 2021 - Umweltministerin Thekla Walker“ vom 5. August 2021

# Beispiel Erzeugung grüner Wasserstoff durch Elektrolyse-Anlage beim Wasserkraftwerk in Grenzach-Wyhlen, Stand 5. August 2021 (2)



Bild: Energiedienst Holding AG aus UM BW- PM vom 5. August 2021

Quelle: UM BW – PM „Sommertour 2021 - Umweltministerin Thekla Walker“ vom 5. August 2021

# EFRE-Förderprogramm „Modellregion Grüner Wasserstoff“ – Modellregionen stehen fest in Baden-Württemberg (1)

## WASSERSTOFFWIRTSCHAFT

### Umweltministerin Thekla Walker: „Modellregionen zeigen die Potenziale von grünem Wasserstoff konkret auf und machen den Energieträger erlebbar“

Das Umweltministerium hat gemeinsam mit einer Fachjury entschieden, welche Modellregionen im Rahmen des EFRE-Programms „Modellregion Grüner Wasserstoff“ einen Antrag auf Förderung stellen dürfen. Insgesamt stehen bis zu 47 Millionen Euro aus dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) und an Landesmitteln zur Verfügung, um zwei Modellregionen auf deren Weg einer Wasserstoffwirtschaft zu fördern. Zudem werden die beiden ausgewählten Modellregionen wissenschaftlich begleitet.

„Als Landesregierung setzen wir uns für einen ehrgeizigen Klimaschutz ein. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen wir aus der Nutzung fossiler Energieträger aussteigen. Das bedeutet aber auch, dass wir in eine neue regenerative Energiewelt einsteigen müssen. Grüner Wasserstoff kann hierbei zu einem der Schlüssel-Energieträger werden“, sagte Umweltministerin Thekla Walker heute in Stuttgart. In den Modellregionen können nun die Potenziale von grünem Wasserstoff in Baden-Württemberg konkret aufgezeigt werden.

Insgesamt neun Projektskizzen habe das Umweltministerium auf seinen EFRE Förderaufruf erhalten. Durchgesetzt haben sich die Konsortien der Projektskizzen „Hy-FIVE“, die die Stadt Ulm, der Landkreis Reutlingen und der Alb-Donau-Kreis eingereicht haben, sowie „H2 GeNeSiS“, die durch die Wirtschaftsförderung Region Stuttgart koordiniert wird. „Die beiden Modellregionen haben die Fachjury überzeugt und können nun einen Vollantrag stellen“, freute sich die Umweltministerin für die beiden Modellregionen. Die wissenschaftliche Begleitung übernehme das Konsortium „H2 Companion“ unter Konsortialführung des Fraunhofer IAO.

### HyFiVE – Wasserstoffwirtschat im ländlichen und städtischen Raum

**Die Modellregion „HyFiVE“ umfasst die Region Mittlere Alb-Donau mit den Landkreisen Reutlingen, Alb- Donau-Kreis und die Stadt Ulm sowie die angrenzenden Landkreise Ostalbkreis, mit der Stadt Schwäbisch Gmünd, Heidenheim und Tübingen.**

Als Antragssteller tritt die Stadt Ulm gemeinsam mit dem Landkreis Reutlingen und dem Alb-Donau-Kreis auf. In dieser Modellregion soll die Wasserstoffwirtschaft sowohl im ländlichen als auch im städtischen Raum erprobt werden. Dabei konzentrieren sich die Aktivitäten um vier Leuchtturmprojekte, die die gesamte Wasserstoff-Wertschöpfungskette von unterschiedlichen Arten von Elektrolyseuren zur Wasserstofferzeugung bis hin zur Nutzung von Wasserstoff in Industrie, Verkehr und Quartierslösungen abbildet.

Quelle: UM BW – PM vom 16.08.2021

### GeNeSiS – Wasserstoffpipeline entlang des Neckars

Die geplante Modellregion „GeNeSiS“ in der Region Stuttgart setzt auf ein ausgedehntes Verteilernetz – dem sogenannten „H2-Marktplatz“. Herzstück soll eine reine Wasserstoff-Pipeline entlang des Neckars werden. Dabei reihen sich Erzeuger und Anwender perlenkettenartig entlang dieses linearen Pipelinenetzes auf. Das stark industriell geprägte Gebiet bietet vielerlei Möglichkeiten für die Anwendung von Wasserstoff zum Beispiel für Quartiere, industrienahe Unternehmen und die Mobilität.

### Wissenschaftliche Begleitung durch H2 Companion

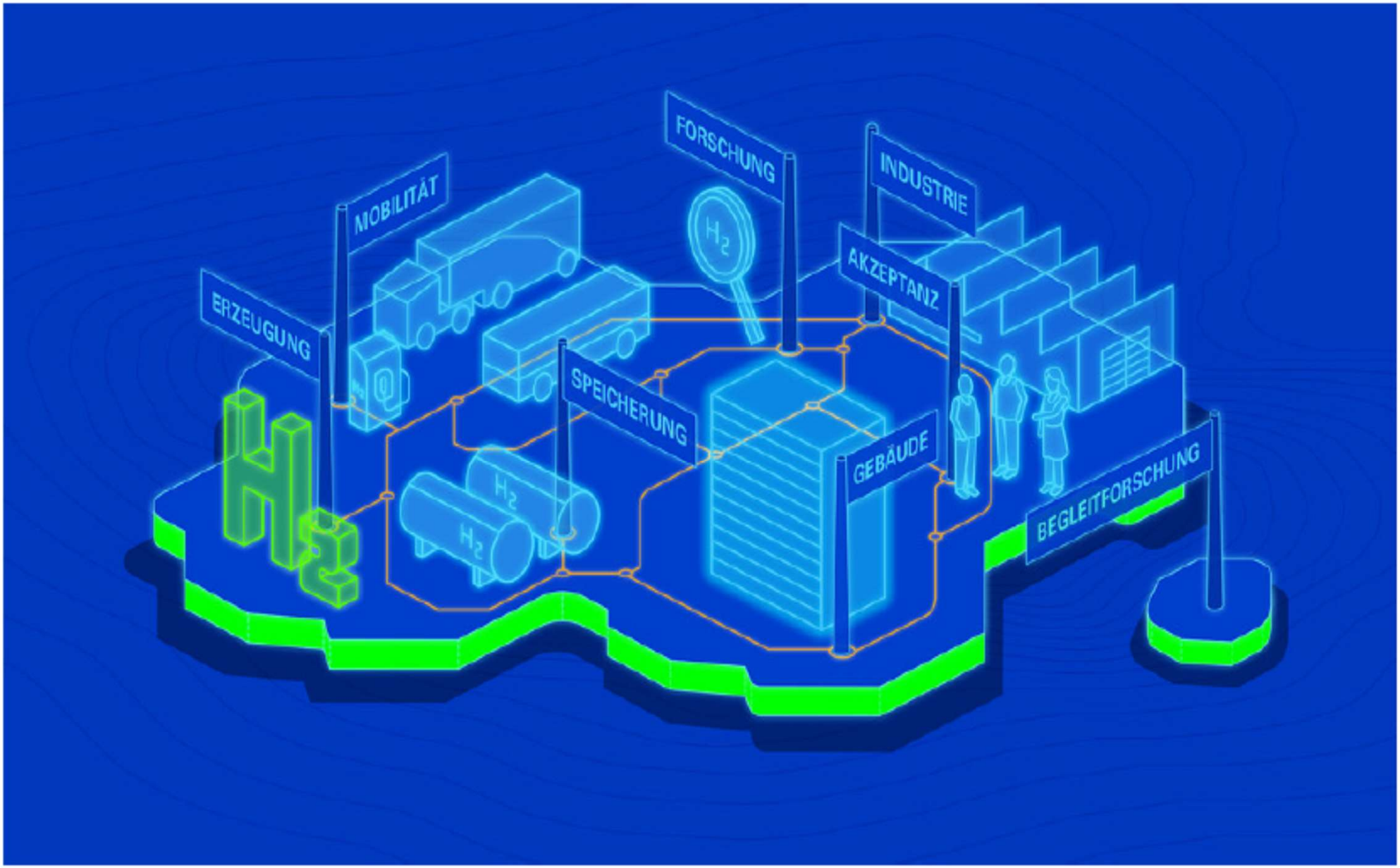
Die Begleitforschung „H2 Companion“ unterstützt die beiden Modellregionen unter anderem bei der Definition von langfristigen Entwicklungsszenarien und ökonomisch wie ökologisch nachhaltigen Geschäftsmodellen sowie mit und bei der Bilanzierung von CO2-Einsparungen. Zudem sollen wirkungsvolle Konzepte für Bürgerbeteiligung und Öffentlichkeitsarbeit mitentwickelt werden. Die Begleitforschung wird sich auch explizit eigenen Forschungsfragen widmen, die über die Modellregionen hinausgehen. So sollen unter anderem potenzielle Wasserstoffwertschöpfungs- und Lieferketten bezüglich ihrer Wirkung für die Region analysiert werden.

### Ergänzende Informationen

Mit dem EFRE-Förderprogramm ‚Modellregion Grüner Wasserstoff‘ unterstützt das Umweltministerium den Aufbau von zwei Modellregionen, die „grünen“ Wasserstoff erzeugen und vor Ort in verschiedenen Anwendungen einsetzen. Dabei sollen die Modellregionen in Demonstrationsprojekten die wirtschaftliche Umsetzung einer Wasserstoffwirtschaft in der Realität erproben und helfen, die gesellschaftliche Akzeptanz für Wasserstoff als Energieträger zu erhöhen. Langfristig sollen sich die Modellregionen wirtschaftlich tragen, damit sie auch nach Abschluss der Projektlaufzeit weiterbestehen können.
Darüber hinaus werden die Modellregionen im Rahmen eines Forschungsprojekts anhand übergeordneter technischer, gesellschaftlicher, sozioökonomischer sowie ökologischer und wirtschaftlicher Fragestellungen wissenschaftlich begleitet. Die von der Fachjury ausgewählten Vorhaben können nun einen Antrag auf Förderung bei der Landeskreditbank (L-Bank) einreichen.
Geplante Laufzeit der Projekte ist von 2022 bis 2027. Es stehen Fördermittel in Höhe von bis zu 27 Millionen Euro aus dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) und weitere Landesmittel in Höhe von bis zu 20 Millionen Euro zur Verfügung.

**Weitere Informationen zur neuen EFRE-Förderperiode 2021-2027.**

# EFRE-Förderprogramm „Modellregion Grüner Wasserstoff“ – Modellregionen stehen fest in Baden-Württemberg (2)




© Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

# Entwicklung Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland mit Baden-Württemberg bis 2030 (1)

# Der Stoff, aus dem die Zukunft ist

**Europa will bis zum Jahr 2050 klimaneutral sein, Deutschland peilt 2045 an, und der Möchtegern-Primus Baden-Württemberg nimmt das Jahr 2040 in den Blick. Ohne Wasserstoff wird das nicht gehen. Worin liegt seine Bedeutung für die Energiewende?**

*Von Reiner Ruf*

Wasserstoff hat Konjunktur. Ökonomen nennen ihn den „Champagner der Energiewende". Politiker wie Ministerpräsident Winfried Kretschmann predigen hoffnungsfroh den „Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft". Es muss sich also um ein wertvolles Gut handeln. Dabei ist Wasserstoff das am häufigsten vorkommende Element überhaupt. Es kommt in Molekülen wie Ammoniak vor. Oder im Wasser: Zwei Wasserstoffatome verbinden sich mit einem Sauerstoffatom. Damit lässt sich zweierlei tun, was für die neue Wasserstoffwelt grundlegend wichtig ist:

1. Unter Zufuhr von Energie kann man Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegen. Diesen Vorgang nennt man Elektrolyse.

2. Bringt man Wasser und Sauerstoff wieder zusammen, macht es „puff": Energie wird frei. Im Chemieunterricht demonstriert der Lehrer diesen Effekt mit dem Knallgas-Puff. Ein tragisches Beispiel ist die Explosion des Luftschiffes Hindenburg im Jahr 1939 auf dem Flugfeld von Lakehurst in New Jersey.

## Farbenlehre des Wasserstoffs

Daraus erhellt sich: Wasserstoff ist ein Energieträger. Er kann Kohle, Öl, Sonne oder Wind nicht ersetzen, doch lässt sich mit ihm Energie speichern und von einem Ort zum anderen transportieren. Für die Elektrolyse, also die Herstellung von Wasserstoff, wird stets eine externe Stromquelle benötigt. Beim grünen Wasserstoff ist das zum Beispiel das Windrad, das in der Nordsee Strom produziert. Grüner Wasserstoff ist klimaneutral. Sein Gegenteil ist der graue Wasserstoff, der mittels eines Verfahrens namens Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen wird. Er ist klimaschädlich. Auf eine Tonne Wasserstoff kommen zehn Tonnen Kohlendioxid.

Es gibt dann noch ein Mittelding, den blauen Wasserstoff. Er unterscheidet sich vom grauen, aus Erdgas gewonnenen Wasserstoff dadurch, dass das Kohlendioxid abgefangen und vergraben wird. In Baden-Württemberg könnte dies im Großraum Mannheim geschehen, daneben gibt es die Möglichkeit, das Kohlendioxid über Pipelines abzutransportieren und – zum Beispiel – im Meeresboden vor der norwegischen Küste einzulagern. Man spricht von Carbon Capture and Storage (CCS).

2040 soll Baden-Württemberg, so sagt es die grün-schwarze Landesregierung, klimaneutral sein. Wasserstoff wird dann benötigt, um über die Brennstoffzelle schwere Lastwagen anzutreiben oder Flugzeuge in die Luft zu bringen. Er wird in der Industrie das Erdgas ersetzen. Für Prozesswärme, aber auch für die Produktion: Stahl, Chemie, Zement, Papier – diese Branchen lechzen nach Wasserstoff. Aber auch zur Rückverstromung in Gaskraftwerken ist Wasserstoff notwendig, sagt Christoph Luschnat. Er ist Wasserstoffkoordinator beim baden-württembergischen Gastransportnetz Terranets BW. Das Unternehmen gehört zum EnBW-Imperium. Dazu muss man sich Folgendes vor Augen halten: Der Endenergieverbrauch Deutschlands liegt bei etwa 2500 Terawattstunden (eine Terawattstunde entspricht einer Milliarde Kilowattstunden). Davon werden etwa 20 Prozent durch Strom abgedeckt, 80 Prozent aber entfallen auf gasförmige und flüssige Energieträger, die dem Ziel der Klimaneutralität nicht entsprechen (Kohle, Öl, Erdgas). Sie müssen durch Elektrizität oder Wasserstoff ersetzt werden.

Wasserstoff ist nach Ansicht des Terranets-Experten Luschnat nötig, weil die Stromnetze bis in die Verteilnetze hinein den kommenden Aufgaben noch nicht gewachsen sind. Die großen Stromtrassen für den Windstrom von den deutschen Küsten kommen nicht schnell genug voran. Das liegt daran, dass es sehr lange braucht, bis solche Fernleitungen genehmigt sind. Die fehlende Verfügbarkeit von klimaneutraler Energie in großen Mengen aber wird zum Standortproblem, das Unternehmensansiedlungen entgegensteht.

„Wir müssen aufpassen, dass wir beim Aufbau einer klimaneutralen Energieversorgung nicht abgehängt werden", sagt Luschnat. Mit Wasserstoffpipelines, die billiger sind als die Stromferntrassen, kann zusätzlich Energie in den Südwesten gebracht wer-

Quelle: Stuttgarter Zeitung , 14. Juni 2023

# Entwicklung Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland mit Baden-Württemberg bis 2030 (2)

den. Die Pipelines speisen Kohlekraftwerke, die wie jenes in Altbach bei Plochingen erst auf Erdgas und dann auf Wasserstoff umgerüstet werden.

Das Ziel, bis 2040 klimaneutral zu sein, bedeutet: Dann wird kein Erdgas mehr durch das aktuell 2750 Kilometer lange Hochdruckleitungsnetz von Terranets fließen. 63 nachgelagerte Netzbetreiber und 23 Industriekunden hängen an diesen Pipelines. Die gute Nachricht lautet: Die Leitungen sind laut Luschnat gut für den Transport von Wasserstoff geeignet. Nächstes Jahr beginnt das Unternehmen den Bau der Süddeutschen Erdgasleitung, die vom Jahr 2030 an die Region Rhein-Neckar und den Großraum Stuttgart mit Wasserstoff versorgt. Für die Übergangszeit wird Terranets Erdgas und Wasserstoff parallel anbieten. Gegenwärtig läuft in Baden-Württemberg eine breit angelegte Abfrage für den künftigen Wasserstoffbedarf. Ab dem Jahr 2030 wird mit einer steil ansteigenden Nachfrage gerechnet. Für das Jahr 2040, dem Jahr der vollen Klimaneutralität, geht die Landesregierung bisher von einem Endenergieverbrauch von knapp 200 Terawattstunden aus. Den Anteil des Wasserstoffs schätzt sie dabei auf 30 Terawattstunden, also 15 Prozent.

## Fünf Fernrouten nach Deutschland

Vermutlich wird ein eher kleiner Teil des Wasserstoffs in Baden-Württemberg via Elektrolyse gewonnen werden. Er werde dort von Bedeutung sein, sagt Terranets-Experte Luschnat, wo die Pipelines nicht hinkommen oder – in der Übergangszeit der Umstellung der Leitungen von Wasserstoff auf Erdgas – noch nicht ankommen. Die externen Herkunftsquellen des Wasserstoffs muten bisweilen abenteuerlich an. Nordafrika gehört dazu, wo mit Sonnenstrom Wasserstoff gewonnen werden kann. Auch die Scheichs und Emirs am Golf feilen an Wasserstoffkonzepten.

Über mehrere Fernrouten gewinnt Baden-Württemberg Anschluss an die Wasserstoffversorgung der Zukunft (siehe Grafik). Im Jahr 2028 erfolgt nahe Freiburg der Anschluss an Frankreich. Von dort soll ab 2030 Wasserstoff anlanden, der via Marseille aus Spanien fließt, wo der Photovoltaik eine große Zukunft zugesprochen wird. Die Nordwestroute (H2ercules) ist von der Nordsee her (Offshore- und Onshore-Wind) geplant und verläuft über das Ruhrgebiet. Die Nordostroute von der Ostsee und den baltischen Staaten führt via Rostock und Lubmin in den Süden (Route Flow) – und zwar über Berlin, Leipzig und Frankfurt.

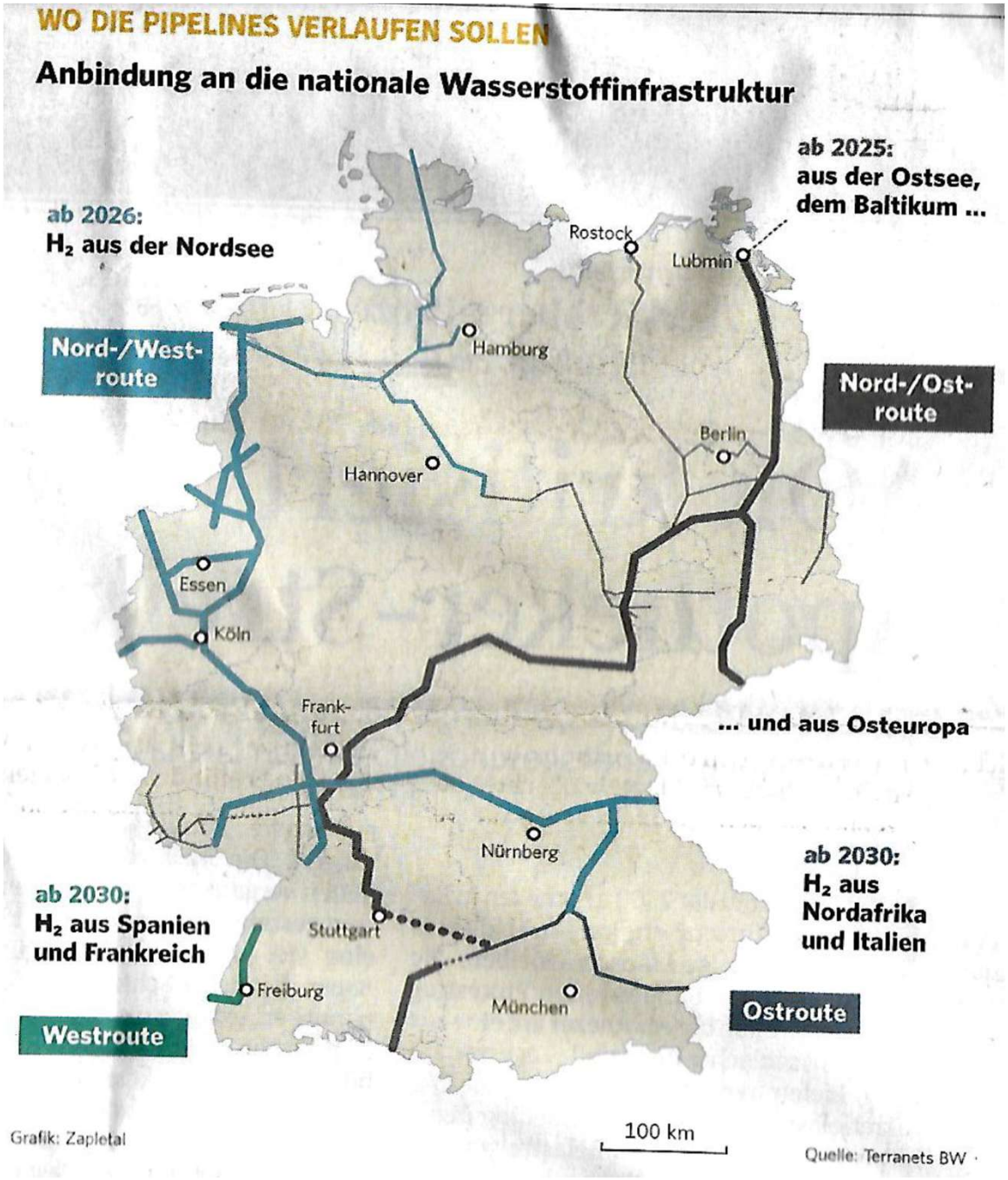
Die Anschlüsse beider Routen – Nordwest und Nordost – an Baden-Württemberg sollen 2030 erfolgen. Zwei Jahre später stößt die (Süd-)Osteuropa-Route via München hinzu. Eine fünfte Wasserstoffroute könnte aus Nordafrika über Italien und Österreich führen. Baden-Württemberg hat also über mehrere Pipelines Zugriff auf das europäische Wasserstoff-Backbone-Netz. „Wir sind gut aufgestellt", sagt Luschnat. „Das ist ein europäisches Netz, das funktioniert nur gemeinsam."

Quelle: Stuttgarter Zeitung , 14. Juni 2023

# Entwicklung Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland mit Baden-Württemberg bis 2030 (3)




*Mithilfe von Wasserstoffpipelines, die billiger sind als die Stromferntrassen, soll zusätzlich Energie in den Südwesten gebracht werden.* Foto: imago




Quelle: Stuttgarter Zeitung , 14. Juni 2023

# Wasserstoffwirtschaft in Deutschland

## Wasserstoffmarkt in Deutschland

Deutschland hat eine ambitionierte Wasserstoffstrategie und strebt an, eine führende Rolle in diesem aufstrebenden Markt zu übernehmen [4].
Die Nationale Wasserstoffstrategie hat die Grundlage dafür geschaffen und ein Update hat noch ehrgeizigere Ziele gesetzt [4]. Einige der wichtigsten Punkte sind:

**1.Verfügbarkeit von Wasserstoff**: Die Bundesregierung plant, bis 2030 zehn Gigawatt Elektrolysekapazität aufzubauen, was ausreichen könnte, um 30 bis 50 Prozent des deutschen Wasserstoffbedarfs zu decken [4].

**2.Import von Wasserstoff**: Deutschland wird auch große Mengen an Wasserstoff importieren müssen. Details dazu werden in einer Importstrategie geklärt, die noch 2023 veröffentlicht werden soll [4.]

**1.Wasserstoff-Partnerschaften**: Deutschland baut umfassende Wasserstoff-Partnerschaften auf und testet beispielsweise die Wasserstoffkooperation mit Australien und prüft den Wasserstoff-Import über den Hafen von Rotterdam [4].
Laut einer Prognose von Aurora Energy Research könnte sich die Nachfrage nach Wasserstoff bis 2050 auf 2.500 TWh pro Jahr verachtfachten, was einem Umsatz von mehr als 120 Milliarden Euro entspricht [2]. Im Europavergleich entwickelt sich Deutschland damit zum attraktivsten Markt für Investitionen, vor allem in „grünen Wasserstoff“ [2].

## Wasserstoffwirtschaft

Eine Wasserstoffwirtschaft ist das Konzept einer Energiewirtschaft, deren Zielsetzung es ist, fossile Energieträger weitestgehend durch Wasserstoff zu ersetzen 1. Wasserstoff muss zur industriellen Nutzbarmachung mit Hilfe anderer Energiequellen (fossile Energie, Kernenergie oder erneuerbare Energien) gewonnen werden und ist damit ein Sekundärenergieträger 1.

Derzeit geschieht die Gewinnung von Wasserstoff hauptsächlich auf Basis fossiler Energieträger wie Methan. Konzepte für eine zukünftige Wasserstoffwirtschaft sehen zumeist die Gewinnung aus erneuerbaren Energien (grüner Wasserstoff) vor, womit die Bilanz einer solchen Wasserstoffwirtschaft emissionsarm sein könnte 1.

Die Bundesregierung hat mit der Nationalen Wasserstoffstrategie 2020 die Grundlagen für eine Wasserstoff-Wirtschaft gelegt. Das Update der Wasserstoffstrategie vom Juli 2023 erhöht das Ambitionsniveau beim Einstieg in die Wasserstoff-Wirtschaft noch einmal und konkretisiert dessen Umsetzung 2.

Die Nutzung von Wasserstoff bietet enormes Potenzial, Industriezweige zu dekarbonisieren und Klimaneutralität zu erreichen 3. Durch den Einsatz von Wasserstoff und Power-to-X (P2X) entstehen neue Wertschöpfungsketten von den Erneuerbaren-Energien-Anlagen über Verfahrenstechnik und Komponenten bis zu den Anwendungen 3.

Quellen: Microsoft KI 9/2023 aus 1. de. wikipedia.org; 2. bmbf.de; 3.vdma.org, 4. industrie.com

# Grundlagen Wasserstoff in Deutschland

## Wasserstoff

Alternativen zu fossilen Energieträgern spielen für das Erreichen der Klimaziele eine entscheidende Rolle. Wasserstoff als vielfältig einsetzbarer Energieträger eignet sich zur Unterstützung einer auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung. Molekularer Wasserstoff ($H_2$) kann industriell mit unterschiedlichen Verfahren hergestellt werden und kommt auch in der Natur vor.

## Aktuelle Themen und Entwicklungen

Die BGR analysiert und bewertet den **Wasserstoffmarkt** mit seinen globalen und nationalen Entwicklungen sowie die Rolle des Wasserstoffs unter den Energierohstoffen im Zuge der Energiewende. Außerdem erforscht die BGR **natürlich im Untergrund vorkommenden Wasserstoff** sowie für die **Wasserstoffspeicherung** im Untergrund typische Gesteinsformationen und relevante Gestein-Fluid-Kombinationen.

## FAQ - Häufig gestellte Fragen

### Welche Bedeutung hat Wasserstoff für die Energiewende in Deutschland?

- Deutschland strebt laut seiner **nationalen Wasserstoffstrategie** den Ausbau einer robusten Wasserstoffwirtschaft an, um seine Klimaziele zu unterstützen und die Energiesicherheit zu stärken.
- Wasserstoff gilt als vielseitig einsetzbarer Energieträger und Energiespeicher. Wasserstoff kann mittels Elektrolyse auf Basis **erneuerbarer Energien** hergestellt werden und somit helfen, Treibhausgasmissionen zu reduzieren.
- Woher stammt der Wasserstoff in Deutschland und wozu wird er verwendet?

Der in Deutschland verwendete Wasserstoff wird derzeit zum Großteil mittels Dampfreformierung aus **Erdgas** im Inland hergestellt, ohne die dabei anfallenden Klimagase abzuscheiden. Wasserstoff wird vor allem in der chemischen Industrie benötigt, insbesondere in Raffinerien und zur Herstellung von Ammoniak und Methanol. Im Energiesystem spielt der Wasserstoff bisher eine untergeordnete Rolle. Dies wird sich jedoch voraussichtlich ändern, da Deutschland in die Herstellung von emissionsarmem Wasserstoff aus erneuerbarem Quellen intensiviert (siehe auch **BGR Energiestudie**).

Quelle: BGR – Wasserstoff, Stand 11/2026

# Wasserstoff in Deutschland

## 2.7 Wasserstoff

Wasserstoff wird derzeit vor allem in der chemischen Industrie sowie in Raffinerien eingesetzt. Im Jahr 2024 belief sich die Wasserstoffproduktion in Deutschland auf rund 3,2 Mrd. $m^3$, was einem Zuwachs von rund 6 % gegenüber dem Vorjahr entspricht (Abb. 2-11; Destatis 2025c). Der Wasserstoff wurde überwiegend aus Erdgas durch Dampfreformierung hergestellt (BMWK 2023). Der Außenhandel spielt bislang nur eine untergeordnete Rolle. Im Jahr 2024 wurden 6,7 Mio. $m^3$ importiert und 19,2 Mio. $m^3$ exportiert (Destatis 2025d).

| | | | |
|---|---|---|---|
| $H_2$ | Produktion | 3.216 Mio. $m^3$ | +5,9 % ↗ |
| | Exporte | 19 Mio. $m^3$ | +41,5 % ↑ |
| | Importe | 7 Mio. $m^3$ | +5,3 % ↗ |

*Abbildung 2-11: Kennziffern des deutschen Wasserstoffsektors im Jahr 2024 sowie Veränderungen zum Vorjahr (Destatis 2025d).*

Zukünftig soll Wasserstoff eine bedeutende Rolle bei der Dekarbonisierung des Energie- und Wirtschaftssystems spielen (Industrie, Fernverkehr, Energiespeicherung) und fossile Energieträger ersetzen. Die Bundesregierung hat in der Nationalen Wasserstoffstrategie (BMWi 2020) und deren Fortschreibung (BMWK 2023) Leitlinien und ein Zielbild für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft formuliert. Demnach wird im Jahr 2030 ein Wasserstoffbedarf inkl. Derivaten von 95 TWh bis 130 TWh prognostiziert, und die heimische Elektrolysekapazität soll bis dahin mindestens 10 GW betragen (BMWK 2023). Auf Grundlage des Monitorberichts zum Start der 21. Legislaturperiode (EWI & BET 2025) wurden 2025 Schlüsselmaßnahmen erarbeitet (BMWE 2025), die die aktuellen Elektrolyseur-Ausbauziele durch flexible Ziele ersetzen sollen, die sich an konkreten Projekten auf Nachfrageseite in Deutschland orientieren sollen. Mit 10 GW Elektrolyseleistung könnten je nach Annahmen für die Umrechnung (4.000 Vollaststunden, 70 % Wirkungsgrad) pro Jahr 28 TWh Wasserstoff hergestellt werden, was den prognostizierten Bedarf nicht decken kann.

***Die heimische Wasserstoffproduktion erfolgt derzeit fast ausschließlich aus Erdgas durch Dampfreformierung.***

***Die deutsche Elektrolysekapazität ist noch weit von ihren Ausbauzielen entfernt.***

Nach Einschätzung der Bundesregierung werden rund 50 % bis 70 % des für 2030 prognostizierten Bedarfes durch Importe aus dem Ausland gedeckt werden müssen (BMWK 2023). Entsprechend hat die Bundesregierung 2024 eine Importstrategie veröffentlicht (BMWK 2024). Wasserstoffabkommen wurden u. a. mit Norwegen, Kanada und Australien geschlossen. Parallel dazu verfolgt die Bundesregierung den Aufbau von entsprechender Importinfrastrukturen einschließlich des Wasserstoffkernnetzes, welches von der Bundesnetzagentur im Oktober 2024 genehmigt wurde. Das Netz soll eine Leitungslänge von 9.040 km umfassen und die wichtigsten Erzeugungs- und Importzentren mit den Verbrauchsregionen verbinden (BNetzA 2025c).

In Deutschland soll der Fokus zukünftig auf der Produktion von Wasserstoff liegen, der durch Wasserelektrolyse unter Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt wird. Im Jahr 2023 wurden allerdings mit sieben Anlagen nur 3,3 GWh Wasserstoff mittels Elektrolyse und nachweislich weit überwiegend aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt (BNetzA 2025d).

Mit einer installierten Leistung von 0,1 GW im Jahr 2024 (IEA 2025d) spielt die Elektrolyse für die Wasserstoffproduktion bisher eine untergeordnete Rolle. Aktuell sind bis zum Jahr 2030 Elektrolyseprojekte im Umfang von rund 18 GW angekündigt; es ist jedoch unsicher, ob diese auch realisiert werden. Von den angekündigten Projekten befinden sich nur 1,3 GW im Bau bzw. haben die finale Investitionsentscheidung. Für 3,8 GW laufen Machbarkeitsstudien, und für 12,7 GW liegt lediglich ein Konzept vor (IEA 2025d). Um die für das Jahr 2030 formulierten Ziele zu erreichen, ist ein massiver Ausbau notwendig.

Quelle: BGR_BRG Energiestudie 2025, Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung , S. 30/31, Stand 09.2026

# Energiesituation in Deutschland:
# Wasserstoff 2022 nach BGR Bund

## 2.8 Wasserstoff

Wasserstoff wird derzeit vor allem in der chemischen Industrie zur Herstellung von Ammoniak und Methanol verwendet, die wiederrum zu Kunststoffen, Düngemitteln und Lacken weiterverarbeitet werden. Im Jahr 2022 belief sich der Wasserstoffbedarf in Deutschland auf rund 1,4 Mt (47 TWh) (BMWK 2023), der überwiegend aus Erdgas durch Dampfreformierung gewonnen wurde (BGR 2022).

Zukünftig wird Wasserstoff eine bedeutende Rolle bei der Dekarbonisierung des Energie- und Wirtschaftssystems spielen und fossile Energieträger u. a. in Industrie sowie im Verkehrssektor ersetzen. Die Bundesregierung hat in der Nationalen Wasserstoffstrategie (BMWK 2020) und deren Fortschreibung (BMWK 2023) Leitlinien und ein Zielbild für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft formuliert. Bis zum Jahr 2030 wird ein Wasserstoffbedarf inklusive Derivaten von 95 – 130 TWh prognostiziert. Dies bedeutet einen zusätzlichen Anstieg von 50 – 85 TWh zusätzlich zum derzeitigen Wasserstoffbedarf von 47 TWh. Nach Einschätzung der Bundesregierung auf Basis aktueller Szenarien werden ca. 50 – 70 % (45 bis 90 TWh) des für 2030 prognostizierten Bedarfes durch Importe aus dem Ausland gedeckt werden (BMWK 2023d). Wasserstoff-Partnerschaften wurden bereits u. a. mit Australien, Kanada und Neuseeland geschlossen, die ein hohes Potenzial an erneuerbaren Energien aufweisen, welches zur Wasserstoffgewinnung genutzt werden könnte.

In Deutschland liegt der Fokus zukünftig auf der Produktion von Wasserstoff, der durch Wasserelektrolyse unter Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt wird. Die Elektrolysekapazität soll bis zum Jahr 2030 mindestens 10 GW betragen (entspricht rund 40 TWh* (1 Mio. t) Wasserstoff). Die Elektrolysekapazität in Deutschland betrug im Jahr 2022 rund 0,063 GWe (IEA 2022a), auch wenn die tatsächliche Elektrolysekapazität höher sein dürfte (Kleinanlagen werden nicht erfasst). Um die für das Jahr 2030 formulierten Ziele zu erreichen, ist ein massiver Ausbau der erneuerbaren Energien notwendig.

** Annahme: 4000 Volllaststunden pro Jahr, 40 kWh zur Herstellung von 1 kg Wasserstoff.*

Quelle: BGR Bund: BGR Energiestudie 2023, Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung, S. 33; 2/2024

# Wasserstoffstrategie NRW 2023 in Deutschland, Stand 7/2023 (1)

## 1. Hintergrund

Die Bundesregierung hat im Juni 2020 mit der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) erstmals eine Strategie zu den Zielen ihrer Wasserstoffpolitik vorgestellt. Die NWS setzt einen kohärenten Handlungsrahmen für die künftige Erzeugung, den Transport und die Nutzung von Wasserstoff und seinen Derivaten, einschließlich entsprechender Forschung, Innovationen und Investitionen. Die in der NWS beschriebene Phase 1, der Beginn des Markthochlaufs, wurde seither mit den vorgesehenen Maßnahmen erfolgreich umgesetzt. Der Nationale Wasserstoffrat hat die Arbeit der Bundesregierung dabei beratend unterstützt. Mit dem Sachstandsbericht (September 2021) und dem Fortschrittsbericht (Mai 2022) (https://www.nationale-wasserstoffstrategie.de) hat die Bundesregierung das bislang Erreichte detailliert beschrieben.

Die NWS von 2020 hat grds. weiter Bestand. In der NWS hatte sich die Bundesregierung dazu verpflichtet, diese nach drei Jahren zu evaluieren und weiterzuentwickeln. Zudem sieht der Koalitionsvertrag vom 10.12.2021 ein ambitioniertes Update der NWS vor, das angesichts der inzwischen grundlegend geänderten Rahmenbedingungen auf den Energiemärkten nochmals an Bedeutung gewonnen hat.

Überdeutlich haben der völkerrechtswidrige russische Angriffskrieg gegen die Ukraine und seine Auswirkungen auf den globalen Energiemärkten die Problematik übermäßiger Abhängigkeiten bei Energieimporten von einzelnen Ländern für die deutsche Energieversorgungssicherheit dokumentiert. Die Ziele der NWS 2020, eine hohe Versorgungssicherheit durch eine wettbewerbsfähige innereuropäische Erzeugung von Wasserstoff sowie eine Diversifizierung und Sicherung internationaler Importe zu erreichen, gewinnen vor diesem Hinte Hintergrund neben Klimaschutzgründen auch sicherheitspolitisch an Bedeutung. Daher stellen die Fortschreibung der NWS sowie die darauf aufbauende geplante Importstrategie für Wasserstoff und seine Derivate im Verbund mit der Umsetzung der Nationalen Sicherheitsstrategie, der Zukunftsstrategie Forschung und Innovation sowie der Klimaaußenpolitik-Strategie wichtige Bausteine für die Sicherheit und Zukunftsfestigkeit Deutschlands dar.

Zudem setzt die Fortschreibung der NWS ein wichtiges industriepolitisches Zeichen: Der Industrie- und Wirtschaftsstandort Deutschland wird gestärkt und die Grundlage für zukunftsfähige Arbeitsplätze geschaffen. Der Koalitionsvertrag sieht neben der Verdopplung des nationalen Ausbauziels der Elektrolyseleistung von 5 auf mindestens 10 GW bis zum Jahr 2030 vor, dass der Infrastrukturaufbau beschleunigt und Deutschland bis 2030 Leitmarkt für Wasserstofftechnologien wird.

Für das Erreichen der ambitionierten gesetzlichen Klimaziele sind eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz sowie ein starker und beschleunigter Ausbau der erneuerbaren Energien unabdingbar. Hierzu müssen alle Sektoren einen anspruchsvollen Beitrag leisten. Die direkte Nutzung von Strom (z. B. Elektromobilität, Wärmepumpen) ist im Vergleich zur Nutzung von Wasserstoff mit geringeren Umwandlungsverlusten verbunden und sollte nach Möglichkeit zum Einsatz kommen, wenn sie mit Blick auf die Gesamtsystemeffizienz und Versorgungssicherheit sowie, volkswirtschaftlich und aus Umweltgesichtspunkten betrachtet, die wirtschaftliche Variante ist. Im Zuge der Transformation wird die sogenannte Sektorenkopplung, durch die zunehmend erneuerbarer Strom in den Bereichen Gebäude, Verkehr und Industrie zur Verfügung stehen wird, wachsende Bedeutung erfahren. Grüner Wasserstoff1 und dessen Derivate werden hierbei die wichtige Rolle übernehmen, erneuerbare Energie zu speichern und zu transportieren. Die vorliegende Fortschreibung der NWS zeigt, wie der benötigte Markthochlauf von Wasserstoff durch konkrete und nachgeschärfte Maßnahmen weiter beschleunigt werden kann, um zur Transformation Deutschlands zur klimaneutralen Volkswirtschaft 2045 beizutragen.

## 2. Fortschreibung der NWS und Zielbild 2030

Insbesondere für die bis 2030 anstehenden Transformationen in der Energiewirtschaft, im Verkehrssektor und in der Industrie wird die Nutzung von Wasserstoff und seiner Derivaten eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung einnehmen. Hierfür müssen – angesichts oftmals langjähriger Investitionszyklen – bereits heute und in dieser Legislaturperiode die Weichen für richtungsweisende Investitionsentscheidungen gestellt werden.

Mit der Fortschreibung der NWS sollen verlässliche Leitplanken für private Investitionen in nachhaltige, insbesondere wirtschaftliche, ökologische und soziale Erzeugung, Transport und Nutzung von Wasserstoff, dessen Derivaten und Wasserstoffanwendungstechnologien etabliert werden. Die notwendige Einbindung in das gesamte deutsche Energiesystem muss im Einklang mit internationalen Menschenrechts-, Arbeits- und Umweltstandards stehen (z. B. OECD-Leitsätze für Multinationale Unternehmen, VN-Leitprinzipien für Wirtschaft und Menschenrechte) sowie Standards zu unternehmerischen Sorgfaltspflichten erfüllen.
Im Gesamtzusammenhang der UN-Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung soll die NWS auch dazu beitragen, insbesondere das Ziel 7 „Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und moderner Energie für alle sichern“ und das Ziel 13 „Umgehend Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen ergreifen“ rechtzeitig zu erreichen.

Unterteilt in kurzfristige Maßnahmen für das Jahr 2023, mittelfristige Maßnahmen für die Jahre 2024/ 2025 und teilweise bereits langfristige Maßnahmen bis 2030 legt die NWS-Fortschreibung das Arbeitsprogramm fest, mit dem das nachstehende NWS-Zielbild 2030 erfolgreich umgesetzt werden soll:

# Wasserstoffstrategie NWS 2023 in Deutschland, Stand 7/2023 (2)

**Beschleunigter Markthochlauf von Wasserstoff:** Der Markthochlauf von Wasserstoff, seinen Derivaten und Wasserstoffanwendungstechnologien wird deutlich beschleunigt und das Ambitionsniveau entlang der gesamten Wertschöpfungskette massiv gesteigert.
**Sicherstellung ausreichender Verfügbarkeit von Wasserstoff und seiner Derivate:** Das Ziel für heimische Elektrolysekapazität in 2030 wird von 5 GW auf mind. 10 GW erhöht. Der restliche Bedarf wird durch Importe gedeckt. Eine gesonderte Importstrategie wird entwickelt.

**Aufbau einer leistungsfähigen Wasserstoffinfrastruktur:** Bis 2027/2028 wird über die IPCEI-Förderung ein Wasserstoffstartnetz mit mehr als 1.800 km umgestellten und neu gebauten Wasserstoffleitungen in Deutschland aufgebaut; europaweit kommen ca. 4.500 km hinzu (European Hydrogen Backbone). Mittels Erweiterung werden bis 2030 alle großen Erzeugungs-, Import- und Speicherzentren mit den relevanten Abnehmern verbunden.

**Etablierung von Wasserstoffanwendungen in den Sektoren:** Bis 2030 werden Wasserstoff und seine Derivate insbesondere bei Anwendungen in der Industrie, bei schweren Nutzfahrzeugen2 sowie zunehmend im Luft- und Schiffsverkehr eingesetzt. Im Stromsektor trägt Wasserstoff zur Energieversorgungssicherheit bei; durch auf klimaneutrale Gase umrüstbare Gaskraftwerke (H2-ready) und durch systemdienliche Elektrolyseure, insbesondere als variable und systemdienliche Stabilisatoren bzw. flexible Lasten. Zur perspektivischen Nutzung von Wasserstoff bei der zentralen und dezentralen Wärmeversorgung werden die Rahmenbedingungen aktuell im GEG, in der Wärmeplanung sowie im europäischen Gasmarktpaket weiterentwickelt.

- **Deutschland wird bis 2030 Leitanbieter für Wasserstofftechnologien:** Deutsche Anbieter bauen ihre Technologieführerschaft aus und bieten die gesamte Wertschöpfungskette von Wasserstofftechnologien von der Produktion (z. B. Elektrolyseure) bis hin zu den unterschiedlichen Anwendungen (z. B. Brennstoffzellentechnologie) an.

- **Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen:** Kohärente rechtliche Voraussetzungen auf nationaler, europäischer und möglichst auch internationaler Ebene unterstützen den Markthochlauf. Dies umfasst insbesondere effiziente Planungs- und Genehmigungsverfahren, einheitliche Standards und Zertifizierungssysteme, ausreichend ausgestattete und auf allen Ebenen koordinierte Verwaltung.

Quelle: Fortschreibung der nationalen Wasserstoffstrategie – NWS 2023, Stand Juli 2023

Um dieses Zielbild gesichert zu erreichen, wird die NWS auch in den nächsten Jahren kontinuierlich weiterentwickelt und bei Bedarf an aktuelle Erfordernisse angepasst.

Die Bundesregierung hat sich gesetzlich verpflichtet, bis 2045 Klimaneutralität zu erreichen und bis dahin einen ambitionierten Minderungspfad zu beschreiten. Zur Zielerreichung ist die Versorgung mit sicherem, nachhaltigem und klimaneutralem Wasserstoff unabdingbar, wofür die Bundesregierung geeignete Rahmenbedingungen schaffen wird. Ziel der Bundesregierung ist es, eine zuverlässige Versorgung Deutschlands mit grünem, auf Dauer nachhaltigem Wasserstoff zu erreichen. Eine direkte finanzielle Förderung der Wasserstofferzeugung ist auf die Erzeugung von grünem Wasserstoff begrenzt. Um einen schnellen Aufbau und Hochlauf des Wasserstoffmarktes sicherzustellen und die erwarteten Bedarfe, insbesondere in der Transformationsphase, zu decken und so die technologische Umstellung auf Wasserstoff zu ermöglichen, werden, zumindest bis ausreichend grüner Wasserstoff zur Verfügung steht, auch andere Farben von Wasserstoff genutzt werden, insbesondere kohlenstoffarmer Wasserstoff aus Abfällen oder Erdgas in Verbindung mit CCS. Die Nutzung von grünem und, soweit in der Markthochlaufphase notwendig, kohlenstoffarmem blauem3, türkisem4 und orangem5 Wasserstoff wollen wir auf der Anwendungsseite in begrenztem Umfang unter Berücksichtigung von ambitionierten THG-Grenzwerten, einschließlich der Emissionen der Vorkette sowie der Erhaltung des gesetzlichen Ziels der Klimaneutralität, auch fördern.6

1 Auf Basis erneuerbarer Energien erzeugter Wasserstoff.
2 Den größten Hebel bei der CO2-Reduktion bieten dabei Fahrzeuge der Klasse N3.
3 Aus Erdgas in Verbindung mit CCS erzeugter Wasserstoff.
4 Durch Methanpyrolyse erzeugter Wasserstoff.
5 Auf Basis von Abfall- und Reststoffen erzeugter Wasserstoff.
6 Dies kann zum Beispiel über die Klimaschutzverträge (sog. Carbon Contracts for Difference – CCfD) geschehen. Dieser Wasserstoff muss einen ambitionierten CO2-Grenzwert für die Treibhausgasemissionen unter Beachtung der Lebenszyklusanalyse (LCA-Ansatz) erfüllen, angelehnt an eine gegenüber dem Vergleichswert für fossile Brennstoffe ausgerichtete Einsparung (25 Gramm CO2-äq./MJ H2, analog EU Taxonomie). Soweit die EU in einem anderen verbindlichen Rechtsakt strengere Nachhaltigkeitsanforderungen vorgibt, finden diese Anwendung.

# Wasserstoffstrategie NWS 2023 in Deutschland, Stand 7/2023 (3)

## II. Handlungsfelder, Zielbilder und Maßnahmen

In Phase 2 der NWS-Umsetzung nimmt die Bundesregierung insbesondere vier große Themenblöcke in den Blick. Hierfür werden im Folgenden die notwendigen Handlungsfelder und zugehörigen Zielbilder für das Jahr 2030 definiert und diese mit Maßnahmen hinterlegt. Viele grundlegende Maßnahmen wurden bereits parallel zur Erarbeitung dieser Fortschreibung begonnen oder sind kurzfristig für das Jahr 2023 geplant. Die Bundesregierung hat bereits substanzielle Mittel für den Wasserstoffhochlauf zur Verfügung gestellt und wird dies auch künftig tun. Alle hier genannten Maßnahmen stehen jedoch unter dem Vorbehalt der Finanzierung und sind daher nur umsetzbar, soweit sie im jeweiligen Einzelplan bzw. Sondervermögen im Rahmen der geltenden Haushalts- und Finanzplanung finanziert bzw. gegenfinanziert werden können.

Quelle: Fortschreibung der nationalen Wasserstoffstrategie – NWS 2023, Auszug Stand Juli 2023

# Was ist Wasserstoff?

## Von grünem, blauem und grauem Wasserstoff

Um die Energiewende weiter voranzubringen, sind innovative Technologien gefragt – die Wasserstofftechnologie ist dabei ein wichtiger Baustein. Die großen Vorteile von Wasserstoff liegen darin, dass man mit ihm Energie leicht speichern und transportieren kann. Dies ermöglicht eine deutlich größere Flexibilität in der Energieversorgung.

Wasserstoff ist ein Gas und auf der Erde reichlich vorhanden, allerdings fast ausschließlich in chemischen Verbindungen (Wasser, Säuren, Kohlenwasserstoffen, etc.). Wasserstoff wird gewonnen, indem man Wasser (H2O) in Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H2) aufspaltet. Allerdings braucht es viel Energie, um das Molekül H2 abzuspalten. Geschieht dies mit Hilfe elektrischen Stroms, spricht man von Elektrolyse.

## Elektrolyse mit Strom aus Erneuerbaren

Für die Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse kann Strom aus erneuerbaren Energien wie Wind und Sonne verwendet werden. Dann spricht man von „grünem“ Wasserstoff. Das Verfahren wird auch als Power-to-Gas bezeichnet – es ist eine der Power-to-X-Technologien (PtX-Technologien), bei denen Strom genutzt wird, um zum Beispiel Gase (Power-to-Gas), Wärme (Power-to-Heat) oder flüssige Energieträger (Power-to-Liquid) herzustellen. PtX-Technologien gelten als wichtige Lösung, um die Klimaziele einzuhalten und den Ausstoß von Treibhausgasen zu verringern.

Aber auch der durch CO2-Abscheidung und -Speicherung (sogenannte Carbon-Capture-and-Storage, CCS) produzierte „blaue“ Wasserstoff kann mindestens für eine Übergangszeit einen wichtigen Beitrag zur CO2-Reduzierung leisten. Der blaue Wasserstoff gilt als CO2-frei, wenn bei der Herstellung kein CO2 in die Atmosphäre entweicht. „Grauer“ Wasserstoff hingegen ist nicht CO2-neutral: Bei der Herstellung fällt in jedem Fall CO2 an, da er aus fossilen Energiequellen wie beispielsweise Erdgas gewonnen wird oder in der Industrie entsteht.

## Sektorkopplung bringt große Vorteile

Ein wichtiges Element in der Wasserstoffstrategie ist die sogenannte Sektorkopplung. Sie dient der engeren Verzahnung beziehungsweise Vernetzung von Strom und Wärme, Verkehrssektor und Industrie. Die Sektorkopplung bringt gleich mehrere große Vorteile. Durch sie kann auch in vielen Bereichen der Industrie, die sich schlecht elektrifizieren lassen, Strom aus erneuerbaren Energien indirekt zum Einsatz kommen. Auf diese Weise ermöglicht sie es, dass mithilfe erneuerbarer Energien alle Sektoren ihre CO2-Emissionen verringern können. Ein weiterer Vorteil ist, dass durch Effizienzgewinne der Energieverbrauch insgesamt gesenkt werden kann. Das alles führt zu einer Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen und dient somit dem Klimaschutz. Zudem kann die Nachfrage nach elektrischer Energie deutlich flexibler gestaltet werden und so ein Ausgleich zu den Angebotsschwankungen bei erneuerbaren Energien (Wind, Sonne, Biomasse) geschaffen werden.

Quelle: BMWI – Themenfeld Energie, Wasserstoffstrategie aus www.bmwi.de vom 10. Juni 2020

# Wofür wird Wasserstoff verwendet?

## Chemie, Stahl, Verkehr – vielfältige Einsatzmöglichkeiten

Wasserstoff wird heute vor allem in der chemischen Industrie, zum Beispiel zur Herstellung von Stickstoffdünger, in Erdölraffinerien zur Raffinierung von Mineralöl oder bei der Herstellung von synthetischen Kraftstoffen verwendet. Künftig soll er aber noch in viel mehr Bereichen eingesetzt werden: In der Industrie oder auch im Bereich Mobilität - Stichwort emissionsfreie Antriebstechnik – soll er einen wesentlichen Beitrag zur CO2-Reduzierung leisten.

Aber: Noch ist die Erzeugung von CO-freiem (grünem) Wasserstoff teuer, und die Produktionsumstellung auf wasserstoff-basierte Anlagen erfordert hohe Investitionen. Ziel muss sein, durch große Nachfragemengen an „grünem“ Wasserstoff Skaleneffekte in der Produktion zu realisieren, um kostengünstig zu produzieren. Das geht nicht von heute auf morgen und benötigt internationale Kooperationen sowie einen großen Absatzmarkt.

## Geplante Verwendungsbereiche:

1.Im Verkehrssektor: insbesondere im Fern- und Schwerlastverkehr, in der Schiff- und Luftfahrt (Stichwort „mobile Brennstoffzelle“).
2.Als Grundstoff für weitere gasförmige und flüssige synthetische Energieträger und Grundchemikalien (unter anderem im Raffinerie- und Chemiebereich).
3.Für emissionsarme Fertigungsprozesse in der Industrie (Stahl, Metallverarbeitung).
4.In der Zement-, Glas- und Keramikherstellung in Kombination mit Kohlenstoffquellen (Carbon Capture and Usage CCU).

## Flächendeckendes Tankstellen- und Leitungsnetz notwendig

Im Verkehr ist Wasserstoff vor allem in den Bereichen eine Alternative, in denen voraussichtlich batteriebetriebene Antriebslösungen technisch nicht sinnvoll sind und daher auch zukünftig auf gasförmige oder flüssige Kraftstoffe angewiesen sind. Die Einführung von Brennstoffzellenfahrzeugen kann unter anderem im ÖPNV (Busse, Züge), im Straßenschwerlastverkehr (Lkw) oder in der Logistik (Gabelstapler, Flurförderzeuge) die Elektromobilität ergänzen und den Ausstoß von CO2 und anderen Luftschadstoffen massiv senken. Im Pkw-Bereich hat die Brennstoffzelle gute Perspektiven im Einsatz auf langen Strecken. Wichtig bei alldem ist ein massiver Ausbau des Wasserstoff-Tankstellen- und Leitungsnetzes. Auch im Luftverkehr und in der Schifffahrt wird sich langfristig eine große Nachfrage nach CO2-freien Treibstoffen entwickeln.

## „Grauen“ durch „grünen“ Wasserstoff in der Industrie ersetzen

In der Industrie sollen künftig bei vielen Prozessen CO2-frei erzeugter Wasserstoff oder Folgeprodukte wie zum Beispiel Ammoniak oder Methanol zum Einsatz kommen. In Raffinerien wird Wasserstoff - derzeit aber meist aus fossilen Quellen erzeugt - beispielsweise bei der Entschwefelung der Vorprodukte von Benzin und Diesel eingesetzt. Dieser „graue Wasserstoff“ kann dort ohne aufwendige Anpassungen zumindest teilweise durch „grünen Wasserstoff“ ersetzt werden. CO2-frei erzeugter Wasserstoff wird künftig verstärkt auch in der Stahlherstellung und der Metallverarbeitung eingesetzt werden. Dies geschieht bereits in Pilotprojekten in der Stahlindustrie zur Direktreduktion von Eisenerz anstelle des Treibhausgas-intensiven Hochofenprozesses.

Insgesamt Priorität haben kurz- bis mittelfristig Anwendungsbereiche, in denen der Einsatz von Wasserstoff schon heute nahe an der Wirtschaftlichkeit ist, die relativ unabhängig von anderen Voraussetzungen sind oder in denen keine sinnvollen alternativen Optionen zur massiven CO2-Minderung bestehen. Langfristig kann „grüner“ Wasserstoff auch bei der Umstellung auf CO2-neutrale Herstellung beispielsweise in der Zement- sowie in der Glas- und Keramikindustrie in Kombination mit einer Kohlenstoffquelle (CCU) eine wichtige Rolle spielen.

## Dialog und Forschungstransfer fördern

Gemeinsam mit wichtigen Beteiligten – insbesondere energieintensive Industriebereiche wie Chemie und Stahl – sollen in branchenspezifischen Dialogformaten langfristige Dekarbonisierungsstrategien auf Basis von CO2-freiem Wasserstoff entwickelt werden. Die Bundesregierung unterstützt die Zusammenarbeit von Wissenschaft und innovativen Unternehmen – mit Vorbildern wie zum Beispiel Carbon2Chem und die Kopernikus-Projekte. Diese Erfahrungen kann Deutschland nutzen, um international sichtbare „Showcase“-Initiativen mit Exportpotenzial zum „grünen“ Wasserstoff aufzulegen.

Die BMWi-Förderung von Forschung und Entwicklung der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologien ist in das „Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien“ (NIP) eingebettet. Ziel des bis 2025 laufenden Programms NIP2 ist, Innovationen beim Markteintritt zu unterstützen und die derzeit noch nicht marktfähigen Innovationen für künftige Anwendungen weiterzuentwickeln.

## Innovationen im Wärmemarkt

Zudem fördert das BMWi Innovationen im Wärmemarkt wie die Brennstoffzellenheizung. Dieses Programm wurde bereits 2017 vom Einbau solcher Heizungen in privaten Wohngebäuden auf Nichtwohngebäude erweitert. Damit können auch kleine und mittlere Unternehmen sowie kommunale Gebietskörperschaften Förderzuschüsse erhalten.

Eine weitere Initiative sind die „Reallabore der Energiewende“, wo neue Ideen zum Einsatz von Wasserstoff erprobt und umgesetzt werden. Diese innovativen Verfahren sollen dazu beitragen, durch CO2-freien Wasserstoff die Dekarbonisierung der Industrie und des Verkehrssektors breitflächig voranzutreiben (PDF, 1 MB).

Wichtig ist aber zum jetzigen Zeitpunkt die Pilotverfahren in die marktliche Anwendung zu überführen. Anlagen im Industriemaßstab sind notwendig um Skaleneffekte zu erreichen und Märkte zu schaffen.

Quelle: BMWI – Themenfeld Energie, Wasserstoffstrategie vom 10. Juni 2020

# Welches Potenzial hat Wasserstoff?

## Mit großen Erzeugungsanlagen die Kosten senken

Die deutsche Industrie verfügt bei der Erzeugung und Weiterverarbeitung von Wasserstoff bereits über ein breites Know-how. Allerdings ist die Erzeugung von CO2-freiem Wasserstoff - das heißt aus erneuerbaren Energien - noch nicht wirtschaftlich. Um die Entwicklung voranzutreiben und eine Kostendegression zu erreichen, müssen Erzeugungsanlagen im industriellen Maßstab aufgebaut und eine entsprechende Größenordnung in der Herstellung von CO2-freiem Wasserstoff mit einem deutlich wachsenden Absatzmarkt erreicht werden.

## Mehr als fünf Millionen Arbeitsplätze

Das alles ist nicht nur energiepolitisch und zur Erreichung der Klimaziele von großer Bedeutung. Es geht mittel- bis langfristig um einen Milliardenmarkt, um neue Wertschöpfungspotenziale und viele zukunftsfähige Arbeitsplätze.
Eine europäische Studie schätzt, dass bis 2050 in der Wasserstoff-Industrie europaweit über 5,4 Millionen Arbeitsplätze und ein Jahresumsatz von 800 Milliarden Euro entstehen können.

Allein mit nationaler Produktion lässt sich der Bedarf an grünem Wasserstoff nicht decken. Deutschland ist heute ein großer Importeur von Energie und wird dies auch in Zukunft bleiben. Deshalb sind grenzüberschreitende Lieferketten auch für Wasserstoff von großer Bedeutung. Hierzu wird Deutschland unter anderen die bestehenden bilateralen Energiepartnerschaften und -dialoge nutzen und sich an dem EU-Forum zur Förderung von „Important Projects of Common European Interest (IPCEI)“ im Bereich Wasserstoff beteiligen. Zudem verbessert das „Pentalaterale Energieforum“ die regionale Zusammenarbeit zwischen Belgien, Deutschland, Frankreich, Luxemburg, Niederlande, Österreich und der Schweiz.

## Zahlen & Fakten zu Wasserstoff

5,4 Millionen Arbeitsplätze
in der Wasserstoff-Industrie bis 2050 in Europa (Prognose)

800 Milliarden Euro Jahresumsatz
bis 2050 in Europa (Prognose)

100 Millionen Euro Fördermittel
jährlich für Reallabore der Energiewende bis 2022

Zielmarken der nationalen Produktionskapazitäten für die Elektrolyse aus erneuerbaren Energien bis 2030
(5 GW oder 10 GW)

Quelle: BMWI – Themenfeld Energie, Wasserstoffstrategie aus www.bmwi.de vom 10. Juni 2020

# **Speicherung von erneuerbaren Strom Deutschland,** Stand 2017

Mit wachsenden Anteilen von erneuerbarem Strom wird unser künftiges Energiesystem großmaßstäbliche Stromspeichersysteme benötigen. Derzeit sind Pumpspeicherkraftwerke die einzige weitverbreitete Technik, Strom in industriellem Maßstab zu speichern. Heute können in Deutschland Pumpspeicherkraftwerke ca. 40 GWh Strom speichern. Aufgrund von topografischen Gegebenheiten ist das Potenzial für einen weiteren Zubau jedoch sehr begrenzt. Andere Speichertechnologien wie Batteriesysteme und Druckluftspeicher (CAES) sind entweder erst in der schrittweisen Markteinführung oder technisch noch nicht reif bzw. gegenwärtig nicht wirtschaftlich zu betreiben. Auch Pumpspeicherkraftwerke können im Stromgroßhandelsmarkt gegenwärtig kaum mehr wirtschaftlich betrieben werden.

Die nach heutigem Wissen einzige Technologie, die das wirtschaftliche Potenzial für Speicher ab dem 100–1.000 GWh-Bereich über mehrere Tage hinaus hat, ist die Speicherung von Wasserstoff in unterirdischen Salzkavernen. Zukünftig wird der Speicherbedarf von EE-Strom, mit dem Ausbau der EE-Anlagen, vor allem von Windkraftanlagen und PV-System, weiter steigen. Bei einem vollständigen Umstieg von fossilen und nuklearen Brennstoffen auf EE-Strom wird der EE-Stromspeicher-bedarf auf mehrere 100 TWh ansteigen. Wasserstoff kann hier eine wichtige Rolle und Funktion als Energiespeicher übernehmen.




**Stromspeicherbedarf**

Quelle: DMV- Wasserstoff- und Brennstoffzellen 2017, Ausgabe Mai 2017

# **Wasserstoff als Speicher für elektrischen Strom Deutschland,** Stand 2017

Wasserstoff kann aus elektrischem Strom in Hochdruck-elektrolyseuren erzeugt werden (z.B. bei einem Druck von 3 MPa). Daneben gibt es verschiedene weitere Technologien zur Erzeugung von Wasserstoff aus Strom, die hier nicht betrachtet werden.

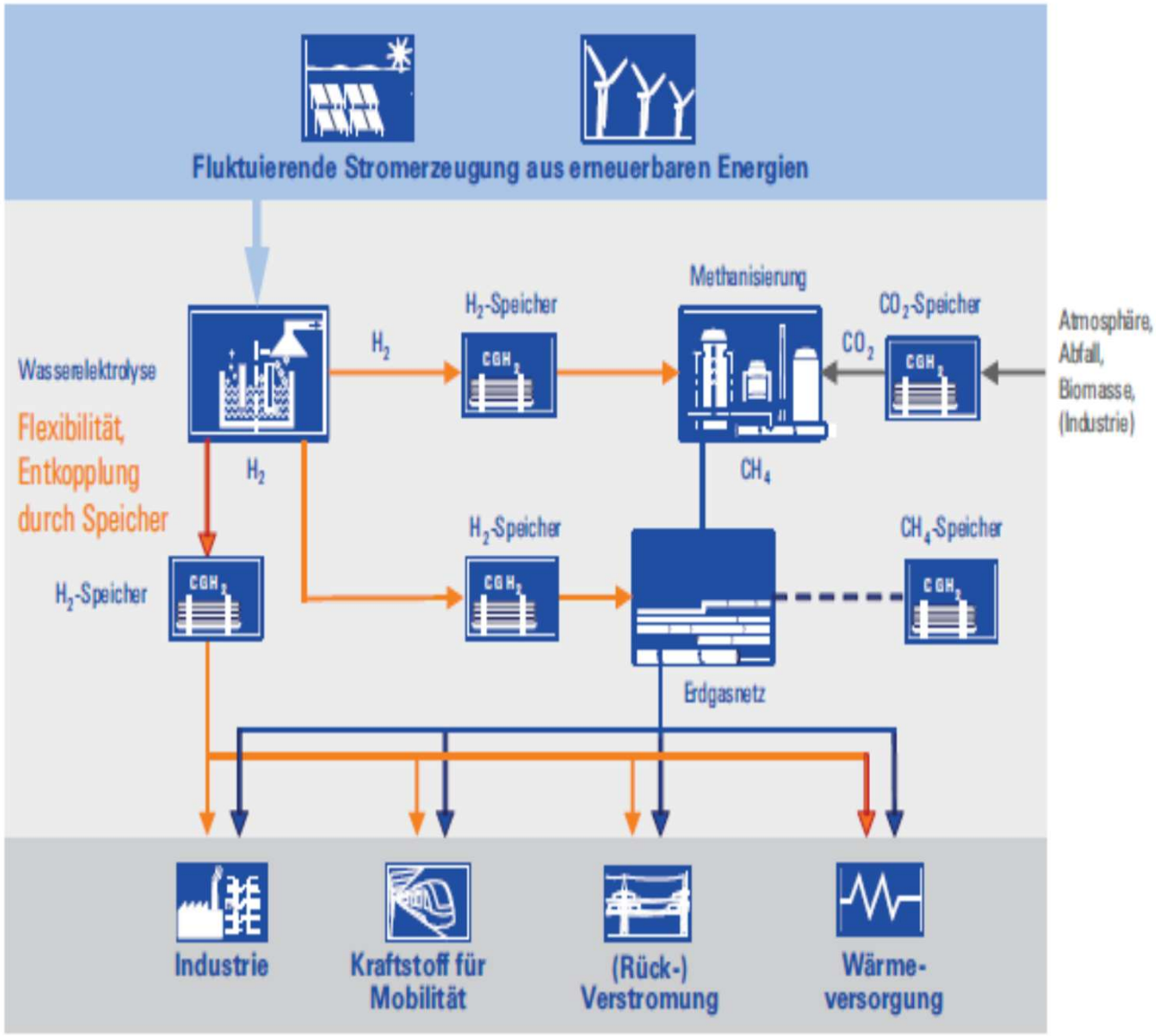
Für eine effiziente Speicherung muss Wasserstoff vor einer Speicherung in Salzkavernen auf maximal 18 MPa nachverdichtet werden. Für hohe Leistungen ist die Rückverstromung in GuD-Kraftwerken am effizientesten.

Im niedrigen Leistungsspektrum können Brennstoffzellen eingesetzt werden. Es werden Wirkungsgrade im Bereich von 35–40% erwartet für die Wandlungskette Strom – Wasserstoff – Strom.

Die erreichbare Energiedichte von Druckwasserstoff ist mehr als eine Größenordnung höher als bei der Druckluftspeicherung.

Die Speicherung von Druckwasserstoff in Salzkavernen ist vergleichsweise billig. Diese Technologie eignet sich insbesondere für die Langzeitspeicherung von großen Energiemengen. Geeignete Salzformationen für Untertagekavernen existieren in Norddeutschland und südlich bis nach Nordhessen.

Energetisch und bezogen auf das Potenzial zur Klimagasreduktion zu bevorzugen ist die Nutzung des gespeicherten Wasserstoffs als Fahrzeugkraftstoff zum Ersatz von konventionellen Fahrzeugen und Kraftstoffen.




Wasserstoff als Speicher für elektrischen Strom

Quelle: DMV- Wasserstoff- und Brennstoffzellen 2017, Ausgabe Mai 2017

# **Wasserstoff als Kraftstoff in Deutschland,** Stand 2017

## Wasserstoff als Kraftstoff

Einer der effizientesten Pfade für die Nutzung von nachhaltig erzeugtem Wasserstoff ist der Einsatz als Kraftstoff im Verkehr.
Kurzfristig kann bereits Wasserstoff erzeugt aus Erdgas als mit weniger Kohlenstoff behaftet den Übergang von fossilem zu erneuerbarem Wasserstoff unterstützen.

## Einsatz von Wasserstoff in Raffinerien

Die direkte Verwendung des mit erneuerbarem Strom erzeugten Wasserstoffs bei der Kraftstoffproduktion in den Raffinerien eröffnet eine kosteneffiziente sofort verfügbare Möglichkeit der Sektorkopplung, Reduzierung von Rohstoffimporten und Treibhausgasemissionen. Erneuerbarer Strom zur Versorgung der Elektrolyseure, welcher nicht mehr über das EEG-System vergütet werden muss, trägt zur Reduzierung der EEG Umlage bei. Gleichzeitig können die Anlagen zur Reduzierung der Redispatch-Kosten, die in 2015 bereits mehr als 1 Mrd. Euro betrugen, beitragen.

Nicht nur, dass durch die Sektorkopplung die Kosten für die Energiewende geringer ausfallen werden, sondern es wird zudem die Versorgungssicherheit und der Klimaschutz gestärkt. So können z.B. durch die Wasserstoffproduktion mit erneuerbaren Strom die Treibhausgasminderung für die in den Verkehr gebrachte Kraftstoffe um ca. 105 g–CO2eq/MJ reduziert werden. Insgesamt könnten damit jährlich kurzfristig ca. 1 Mio. t. CO2-Emissionen in Deutschland vermieden. Im Raffineriesektor würde sich bei dem sich abzeichnenden Absatzmarkt für strombasierte Kraftstoffe bis 2020 ein Potential von ca. 1.500 MW Elektrolyseleistung bzw. über 2 Mrd. Euro Umsatz für den deutschen Maschinenbau ergeben. Der Raffineriesektor kann seine Abhängigkeit vom Erdgas und (importierten) Biokraftstoffen erheblich reduzieren, was sich einerseits auf die Standortsicherung deutscher Raffinerien und anderseits positiv auf die deutsche Außenhandelsquote auswirkt.

Mittelfristig werden Wasserstoffautos aus unterschiedlichen Gründen einen festen Platz im Mobilitätsmix der Zukunft einnehmen. Dieses insbesondere vor dem Hintergrund der gegenwärtigen Diskussionen hinsichtlich der geforderten CO2-Reduktionen im Verkehrssektor um 40% bis 2030 sowie der Notwendigkeit, in städtischen Verdichtungsräumen Partikel- und NOx-Emissionen schnell und drastisch zu mindern, führen dazu, dass die Fahrzeugindustrie ihre Anstrengungen beschleunigen muss, Nullemissionsfahrzeuge (Batterie- und Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeuge) zu entwickeln. Es wird erwartet, dass eine breite Kommerzialisierung beider Fahrzeugtypen um oder kurz nach 2020 einsetzen wird.

Diese Entwicklung stellt einen grundlegenden Technologiewechsel im Fahrzeugsektor dar. Dies eröffnet völlig neue Chancen für die Strombranche, nämlich auch zum Anbieter von Kraftstoff zu werden. Die intelligente Integration dieses zusätzlichen Energiepfades verbessert die ökonomische Machbarkeit von Wasserstoffspeichern und vermindert gleichzeitig die insgesamt erforderliche Speicherkapazität.

Mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellen-PKW haben einen fast doppelt so hohen Wirkungsgrad (1,7 x) wie der direkt einspritzende Dieselantrieb oder der hybridisierte Benzinantrieb. Der Ersatz von konventionellen Kraftstoffen durch Wasserstoff ist effizienter als die Wasserstoffnutzung in stationären Energiewandlern (GuD-Kraftwerke oder Brennstoffzellensysteme), wo er gegenwärtig mit den ähnlich effizienten erdgasbasierten Technologien konkurriert.

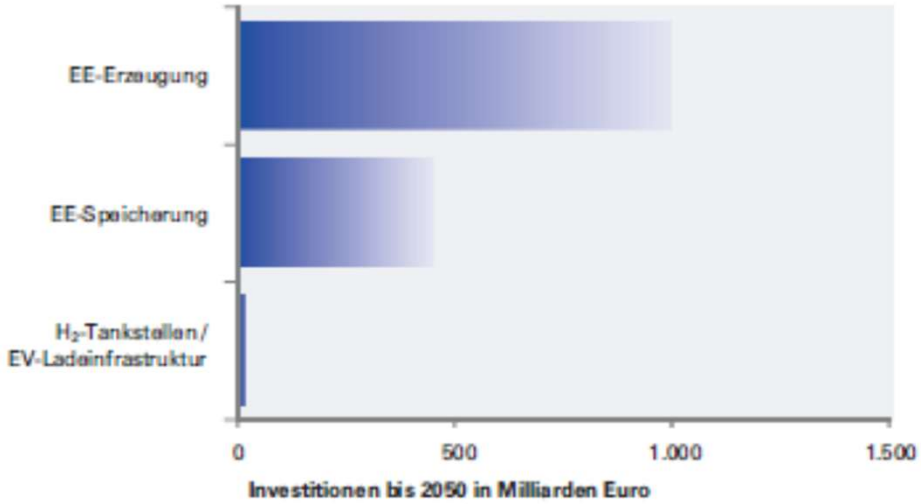
Der Wirkungsgradvorteil von H2-Brennstoffzellenantrieben ist im Schwerlast-Lkw deutlich weniger gegeben, wegen der effizienteren großen Dieselmotoren und des anderen Fahrprofils. Dennoch bietet er im Vergleich zu Batterien oder oberleitungsgebundenen Varianten die einzige Nullemissionsantriebsvariante mit heute gewohnter Kundenflexibilität, was Routenwahl und Reichweite angeht. Heute sind knapp 400 km möglich, künftig etwa das Doppelte.

Quelle: DMV- Wasserstoff- und Brennstoffzellen 2017, Ausgabe Mai 2017

# **Wirtschaftliche Aspekte zum Umbau unseres Energiesystems in Deutschland,** Stand 5/2017

Der erfolgreiche Umbau unseres Energiesystems hin zu einer erneuerbaren Energieversorgung stellt neben technischen und gesellschaftlichen vor allem auch wirtschaftliche Herausforderungen dar. Fossile und nukleare Kraftwerke müssen durch EE-Anlagen ersetzt werden und zusätzliche EE-Speicher die Funktion von beispielsweise Erdöl, Erdgas und Kohle ersetzen, die einerseits große Mengen Energie speichern und andererseits weltweit in großen Mengen transportiert werden können. Neben dem stationären Sektor muss insbesondere im Verkehrssektor, der nahezu vollständig von Erdöl abhängig ist, auf erneuerbaren Strom als Kraftstoff umgestellt werden. Hierfür muss beispielsweise der Aufbau einer Infrastruktur für ein Stromladesystem von Batteriefahrzeugen sowie Wasserstofftankstellen für Brennstoffzellen-fahrzeuge ebenfalls berücksichtigt werden.

Im Rahmen einer Studie für die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV) wurde die Umstellung des Verkehrssektors auf 100% erneuerbaren Strom untersucht. Die folgende Grafik fasst die aus volkswirtschaftlicher Sicht benötigten kumulierten Investitionen zusammen. Berücksichtig sind der Aufbau erneuerbarer Energiequellen zur Stromerzeugung (vor allem Windkraftanlagen und PV-Systeme), der Zubau erneuerbarer Stromspeicheranlagen (Wasserstoff, PtCH4, PtL und Batterien) und der Aufbau von entsprechenden Infrastrukturen zu Betankung bzw. Beladung von Fahrzeugen: Bis 2050 werden für eine 100% Umstellung des Verkehrs in Deutschland die kumulierten Investitionen auf insgesamt 650 bis ca. 1.500 Milliarden Euro abgeschätzt.




**Kumulierte Investitionen bis 2050 für EE-Erzeugung, Speicherung und Infrastruktur**
[Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2017]

Wie in der obigen Grafik zusammengefasst, entfällt der größte Anteil der Investitionen auf den Aufbau der EE-Stromerzeugungslagen selbst (ca. 450 bis 1.000 Milliarden Euro bis 2050). Weitere ca. 200 bis 450 Milliarden Euro werden für die benötige EE-Stromspeicherung veranschlagt. Eine wichtige Erkenntnis aus dieser Untersuchung ist, dass gegenüber den Gesamtinvestitionen der Anteil der Infrastrukturkosten (für die Betankung von Fahrzeugen) mit 0,2 bis max. 7 Milliarden Euro (bis 2050) nur einen sehr geringen Anteil ausmacht (0,01 bis 1% der Gesamtkosten).

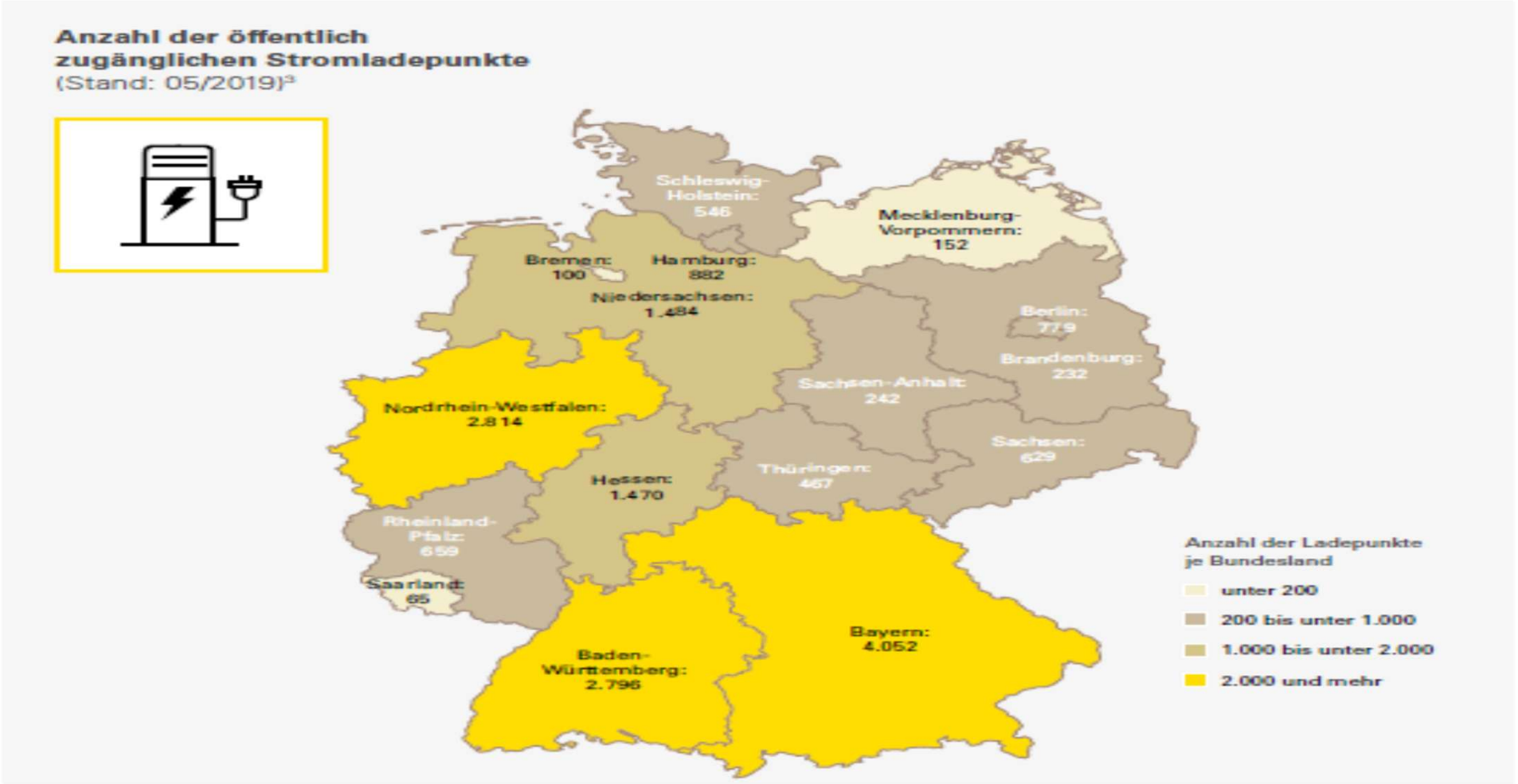
Quelle: DMV- Wasserstoff- und Brennstoffzellen 2017, Ausgabe Mai 2017

# Öffentliche Stromladeinfrastruktur in Deutschland nach Bundesländer, Stand 05/2019

## Deutschland rund 17.400, davon BW 2.796 (16,1%)

**Stromladeinfrastruktur – Baden-Württemberg mit dichtem Netz**

Laut dem Ladesäulenregister des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) bestehen deutschlandweit rund 17.400 öffentliche und teilöffentliche Ladepunkte. Davon sind 2.796 Ladepunkte in Baden-Württemberg.

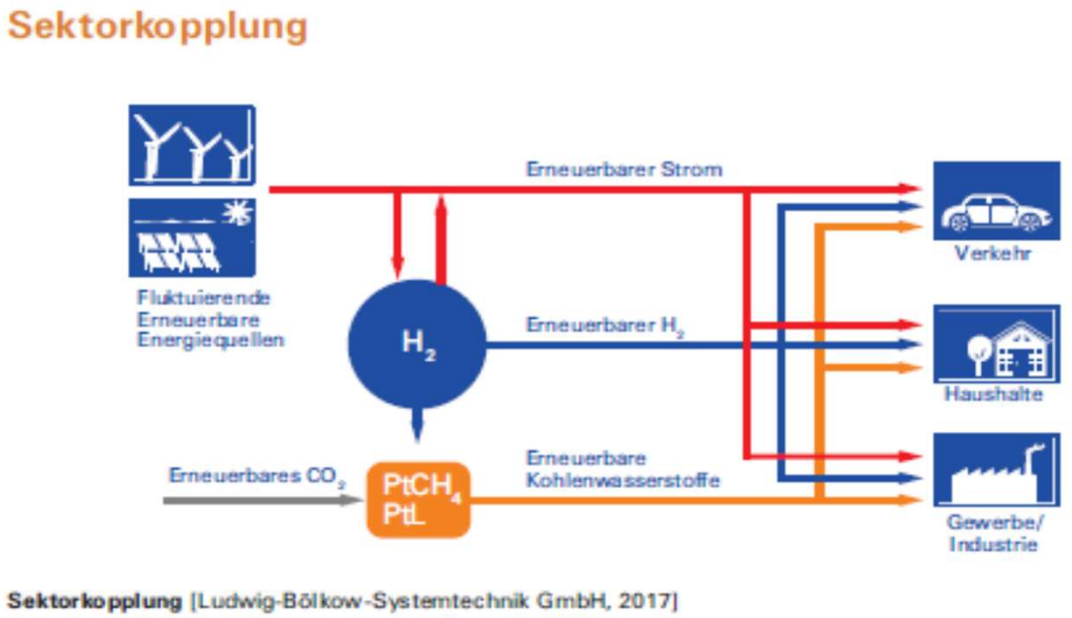



3) BDEW: https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/hamburg-bleibt-hauptstadt-der-ladepunkte/

Quelle: e-mobil BW GmbH - Datenmonitor e-mobil BW, Ausgabe Juli 2019

# Wasserstoff und Brennstoffzellen

## Starke Partner erneuerbarer Energien (1)




**Sektorkopplung** [Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2017]

Wasserstoff ermöglicht es, Strom aus fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen, der in Anwendungen weder zeitgleich noch lokal direkt genutzt werden kann, zu speichern. Zudem kann EE-Strom in Form von Wasserstoff zum Beispiel als Gas in Rohrleitungen oder ortsbeweglichen Behältern über weitere Distanzen sehr gut transportiert werden. Dabei kann der gespeicherte EE-Strom in Form von Wasserstoff über lange Zeit und in großen Mengen „gelagert“ und bei Bedarf auch direkt den Verbrauchern / Anwendungen zugeführt werden, z.B. Brennstoffzellenfahrzeugen (Pkw, Lkw, Zügen, Schiffen, Flugzeugen), stationären Kraftwärmekopplungsanlagen und industriellen Prozessen (Power-to-Chemicals).

Alternativ kann der sogenannte „EE-Wasserstoff“ auch in weiteren Prozessschritten unter Zuführung von Kohlendioxid (CO2) zu Methan (Power-to-Methane, PtCH4) oder synthetischer Kraftstoff (Power-to-Liquids, PtL) weiter genutzt werden.

Mit der Speicherung von großen Mengen erneuerbaren Stroms aus PV- und Windkraftanlagen übernimmt Wasserstoff eine zentrale Aufgabe in der Energiewende, um fossile und nukleare Brennstoffe in unserem Energiesystem abzulösen. Wasserstoff ermöglicht es, in großen Mengen und übergreifend erneuerbaren Strom aus stationären Anlagen auch mobilen Anwendungen zuzuführen und Erdöl basierte Kraftstoffe zu ersetzen. Man bezeichnet diese sektorübergreifende Eigenschaft auch als „Sektorkopplung“.

### Wasserstoff in stationären Anwendungen

Für stationäre Anwendungen ist der effizienteste Pfad die direkte Nutzung von Wind- oder Solarstrom. Kohlenstoffbasierte Energiequellen (z.B. Erdgas oder Biomasse) erreichen im stationären Einsatz in kombinierter Wärme- und Stromerzeugung (KWK) den höchsten Wirkungsgrad.

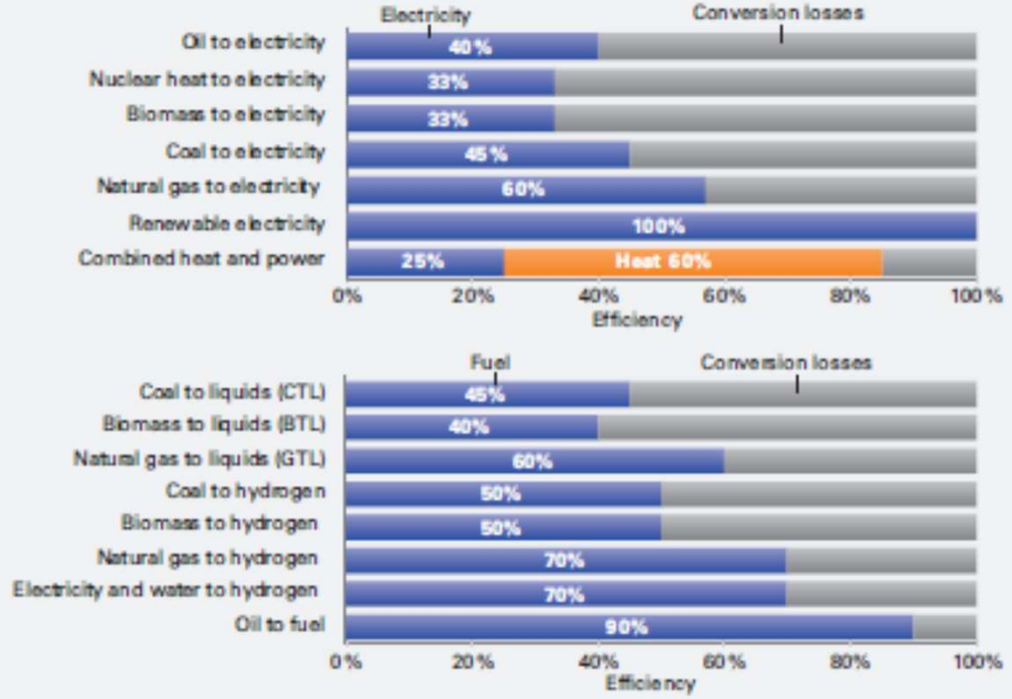
Wasserstoff, der eine Sekundärenergie und ein Energieträger ist, sollte im stationären Bereich nur eingesetzt werden, wo die Speicherfähigkeit gebraucht wird. Dies kann in kleinen separaten Stromnetzen der Fall sein („Inseln“) oder als Energiespeicher für große fluktuierende erneuerbare Stromquellen. Die Bereitstellung von Leistungsreserven für konventionelle Kraftwerke (z.B. für die Telekommunikation oder sensible Produktionsprozesse in der Industrie) könnte ein weiterer vielversprechender Anwendungsfall sein.

# Wasserstoff und Brennstoffzellen
## Starke Partner erneuerbarer Energien (2)

Wasserstoff in großen Mengen in Salzkavernen gespeichert kann langfristig die Rolle der Strategischen Energie- und Kraftstoffreserve übernehmen wie heute Rohöl und Erdgas. Die Erzeugung von Wasserstoff als Kraftstoff aus erneuerbarem (Überschuss)Strom ist die erfolgversprechendste Option, da sie heutige Kraftstoffe am effizientesten und emissionsfrei ersetzt.

**Energieumwandlungssektor**

Der direkte Einsatz von Regenerativstrom ist am effizientesten. Im Hinblick auf den Primärenergieeinsatz hat Wasserstoff den höchsten Wandlungswirkungsgrad aller alternativen Transportkraftstoffe.




**Energiewandlungswirkungsgrade**; oben **Stromerzeugung**; unten **Transportkraftstofferzeugung**
[Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2017]

Quelle: DMV- Wasserstoff- und Brennstoffzellen 2017, Ausgabe Mai 2017

# Wasserstoff und Brennstoffzellen
## Starke Partner erneuerbarer Energien (3)

### Wasserstoff im Verkehr

Der beste alternative Kraftstoff im Hinblick auf den höchsten Wandlungswirkungsgrad und die niedrigsten Treibhausgasemissionen im Straßenverkehr wäre Strom direkt in leitungsgebundenen Fahrzeuge oder Batteriefahrzeugen eingesetzt. Batteriefahrzeuge auch mit Schnellladestationen können keine dem Wasserstoff vergleichbare Netzdienlichkeit gewährleisten und nur Ausgleichseffekte im Minuten- bis wenige Stunden-Bereich ermöglichen. Auch und insbesondere, wenn teure Schnellladestationen wieder schnell „geräumt“, d.h. für weitere Fahrzeuge verfügbar gemacht werden müssen, um die Infrastruktur möglichst kosteneffizient nutzen zu können. Der Vorteil von Wasserstoff als Kraftstoff ist hier, dass das Stromangebot zu seiner Herstellung und seine Betankung ins Fahrzeug zeitlich sehr gut entkoppelt werden können. Daher wird aus erneuerbarem Strom erzeugter Wasserstoff möglicherweise die beste alternative Kraftstoffoption der Zukunft darstellen, insbesondere in Kombination mit Brennstoffzellen in Straßenfahrzeugen für mittlere bis lange Fahrstrecken und für Vielfahrer sowie für flexibel einzusetzende schwerere Nutzfahrzeuge wie LKW und Busse. Nicht oberleitungsbetriebene Regionalzüge sind ein weiteres interessantes Einsatzgebiet für Wasserstoff und hybridisierte Brennstoffzellenantriebe. Die Firma Alstom beginnt beispielsweise jetzt mit der Erprobung erster H2-BZ-Triebwagen und wird diese ab 2020 in mehreren Bundesländern für den Regelbetrieb liefern.




**Coradia iLint, Brennstoffzellen-Triebwagen** [Alstom/Michael Wittwer]

Quelle: DMV- Wasserstoff- und Brennstoffzellen 2017, Ausgabe Mai 2017

# Wasserstoff und Brennstoffzellen
## Starke Partner erneuerbarer Energien (4)

### Künftige Herausforderungen und die Rolle von Wasserstoff

Die Bedrohung der Menschheit und der Biosphäre durch den Klimawandel sowie die langfristig begrenzte Verfügbarkeit fossiler Energiequellen haben zur Formulierung politischer Ziele geführt im Hinblick auf die Minderung der Treibhausgasemissionen und der Sicherheit der Energieversorgung. Die Umstellung unserer Energieversorgung auf erneuerbare Energiequellen ist die zentrale Aufgabe der nächsten Jahre und Jahrzehnte. Wasserstoff kann und muss die Schlüsselfunktion für die Speicherung von erneuerbarem Strom übernehmen, sozusagen eine Art „Rückgrat" für das zukünftige EE-Strom- und Gasnetz, das fossile und nukleare Energieträger und -speicher vollständig ersetzen muss.

Die zugrunde liegenden Herausforderungen der „Energiewende" können effizient und nachhaltig beantwortet werden durch Energieeinsparung, verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien und Einsatz von Wasserstoff und Brennstoffzellen.

Wasserstoff weist die höchste Flexibilität aller Energieträger bezüglich der Primärenergiequellen auf. Wasserstoff ist nutzbar als ein sauberes Speichermedium und kann den Übergang von der fossilen Energiewelt in eine postfossile erneuerbare Energiewelt erleichtern.

Wasserstoff erlaubt insbesondere eine nennenswerte Ausweitung der Nutzung erneuerbarer Energiequellen im Verkehr.

Wasserstoff als Kraftstoff für hybridisierte Brennstoffzellenfahrzeuge ist deutlich effizienter als heutige Kraftstoffe und reduziert damit den Primärenergieverbrauch und die Treibhausgasemissionen.

Zusätzlich eröffnet Wasserstoff das Potenzial, Fahrzeuge mit Fahrleistungen zu realisieren (z. B. bezüglich Reichweite, Schnellbetankung, etc.), die mit reinen Batteriefahrzeugen in absehbarer Zukunft mit vertretbarem Aufwand nicht erzielbar sind.

In einigen Jahrzehnten wird erneuerbarer Strom die vorherrschende Primärenergiequelle werden.

Aus Effizienzgründen sollte dieser Strom wo immer möglich direkt in Endanwendungen eingesetzt werden, seien es stationäre oder mobile Anwendungen.

Wie es aussieht, werden Schwerlastverkehr, Langstrecken-PKW, der Flugverkehr und die Schifffahrt auf absehbare Zeit nicht mit Strom direkt betrieben werden können.

Auch die großmaßstäbliche Speicherung von Strom kann mit hoher Wahrscheinlichkeit wirtschaftlich nur durch Wasserstoff bzw. durch mit daraus erzeugten synthetischen Kraftstoffen (PtX) erfolgen. Letztere können nur mit zusätzlichen Wirkungsgradverlusten erzeugt (Synthese) und genutzt (Verbrennungskraftmaschinen) werden.

Ein zentraler Baustein der Energiewende ist zweifelsfrei die Umwandlung von erneuerbar erzeugtem Strom zu Wasserstoff. Nur so kann der Bedarf an Kraft-, Brenn- und Rohstoffen in den Sektoren Industrie und Verkehr sowie dem Wärmesektor unter Einhaltung der verabschiedeten Klimaziele volkswirtschaftlich akzeptabel gedeckt werden.

Quelle: DMV- Wasserstoff- und Brennstoffzellen 2017, Ausgabe Mai 2017

# Ausgewählte aktuelle Nutzerfragen zum Wasserstoff

## Wie lässt sich Wasserstoff herstellen?

Heute wird Wasserstoff meist mittels Dampfreformierung hergestellt. Als Rohstoff dient Erdgas. Die Gewinnung von Wasserstoff durch Elektrolyse ist dagegen umweltfreundlich, aber teuer. Wasser wird dabei durch Zuführung von Strom in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten.

## Wie viel kostet 1 kg Wasserstoff?

Gemeinsam haben sich die Partner der H2 Mobility auf 9,50 Euro pro **Kilo**verständigt.
Soviel **kostet** der **Wasserstoff** an jeder Zapfsäule in Deutschland.
Mit einem geschätzten Verbrauch von einem **Kilo** auf 100 Kilometer ist ein Wasserstoffauto im Betrieb kaum günstiger als ein normaler Verbrenner.

## Wer erzeugt Wasserstoff?

Die am weitesten entwickelten Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff sind das Reformierungsverfahren und die Wasser-Elektrolyse. Unter Einsatz von Strom wird Wasser in die Bestandteile Wasserstoff (H2) und Sauerstoff (O2) zerlegt.

## Für was wird Wasserstoff verwendet?

Elementarer (molekularer) Wasserstoff dient als Ausgangsstoff zur Herstellung von Ammoniak, Salzsäure, Methanol, Anilin und vieler anderer Stoffe.
Wasserstoff wird als Treibstoff eingesetzt und gewinnt zunehmend Bedeutung bei der Energiegewinnung.
In Brennstoffzellen wird Wasserstoff als Brennstoff benutzt.

Quelle: Energiedienst.de 9/2019

# Wasserstoff-Zentrum Bayern in Nürnberg

## Wasserstoff-Zentrum in Nürnberg soll Energiewende voranbringen

Das neue Wasserstoff-Zentrum in Nürnberg soll wichtige Impulse für die Energiewende im Freistaat bringen. Zur Gründung kamen heute neben Ministerpräsident Söder (CSU) auch zwei seiner Minister. Das Ziel: Klimaschutz und Konjunktur voranzubringen.

Ministerpräsident Markus Söder (CSU), Wirtschaftsminister Hubert Aiwanger (Freie Wähler) und Wissenschaftsminister Bernd Sibler (CSU) haben heute das neue Wasserstoff-Zentrum Nürnberg gegründet. Neben dieser Forschungseinrichtung im Energiecampus Nürnberg haben sie außerdem mit Vertretern aus Wissenschaft und Wirtschaft das Wasserstoffbündnis Bayern ins Leben gerufen.

## Klimaschutz und Konjunktur verbinden

Mit beiden Institutionen sollen die Forschungen zum Energieträger Wasserstoff koordiniert und intensiviert werden. Es gehe darum, Klimaschutz und Konjunktur, Wirtschaft und Ökologie zu verbinden, sagte Söder. Er setze darauf, dass vor allem Autos künftig mit Wasserstofftechnik angetrieben werden. Auch bei Lastwagen sei Wasserstoff eine Alternative zu Batterien.

## Hundert Wasserstofftankstellen in Bayern

Wirtschaftsminister Aiwanger will erreichen, dass in den nächsten drei bis vier Jahren ein Netz mit hundert Wasserstofftankstellen im Freistaat aufgebaut wird. Derzeit gibt es lediglich rund eine Handvoll. Das Netz sei Voraussetzung, dass die bayerischen Autohersteller Modelle mit Wasserstoffantrieb auf den Markt bringen. Aiwanger erwartet, dass dann auch das erste bayerische Wasserstoffauto vorgestellt wird.

## 300 Millionen für die Uni Erlangen

Ministerpräsident Söder hat zudem auf der Pressekonferenz angekündigt, dass die Universität Erlangen 300 Millionen Euro bekommen soll, um das Chemikum auszubauen, wo zum Beispiel zum sicheren Transport von Wasserstoff geforscht wird.

## Fünf Mitarbeiter in der Anfangsphase

Das Wasserstoff-Zentrum Bayern hat zunächst fünf Mitarbeiter, die die Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen und der Wirtschaft koordinieren. Dafür stellt der Freistaat in der Anfangsphase zehn Millionen Euro zur Verfügung, sagte Söder.

Quelle: BR Nachrichten vom 05.09.2019

# Wasserstoff direkt an der Tankstelle erzeugen – Deutschland 2030 (1)

**Die Diskussion über Nachhaltigkeit, Ressourcenknappheit und Umweltverträglichkeit im Transportsektor führt im automobilen Bereich zu stets neuen Herausforderungen für die Antriebstechnik.**
Für Prof. Dr. Thomas von Unwerth, Leiter der Professur Alternative Fahrzeugantriebe an der TU Chemnitz und Mitglied im VDI-Fachbereich Antrieb und Energiemanagement, ist Wasserstoff der Kraftstoff und Energiespeicher der Zukunft.

**Das Thema „E-Fuels auf Wasserstoffbasis" gewinnt langsam an Fahrt. Dennoch gibt es immer noch genug Zweifler. Warum?**
**Professor Thomas von Unwerth:** Es gibt Leute, die halten bereits die Gewinnung von Wasserstoff für Energieverschwendung. Wasserstoff ist Grundlage für jedes E-Fuel. Wird er zusammen mit Kohlendioxid, das energieaufwendig aus der Atmosphäre gewonnen werden muss, im Sabatierprozess und weiteren chemischen Prozessen zu Synthetikkraftstoff, dann hat dieses E-Fuel einen schlechteren Wirkungsgrad als reiner Wasserstoff. Leute, die Wasserstoff für Energieverschwendung halten, für die sind E-Fuels es dann ganz gewiss.

**Also könnte man die Forschung an E-Fuels doch eigentlich einstellen?**
**von Unwerth:** Ganz und gar nicht. E-Fuels haben beispielsweise ein Riesenpotenzial in Anwendungen, in denen hohe Leistungsdichten gefordert sind, etwa dem Flugverkehr. In allen Bereichen also, wo auch auf lange Sicht der Einsatz rein batterieelektrischer Antriebe und Wasserstoff eher nicht realistisch ist. Wann zum Beispiel E-Kerosin zum Einsatz kommen könnte, hängt davon ab, wie sich die Marktsituation entwickelt. Der Herstellungsprozess von E-Fuels ist nun mal aufwendig und damit teuer.

**Sie sprachen vom Einsatz von E-Fuels im Flugverkehr, bei der Hochseeschifffahrt und vielleicht auch beim Lkw-Fernverkehr. Sehen Sie keine Anwendungsmöglichkeit für den Individualverkehr?**
**von Unwerth:** Derzeit ganz klar nein. E-Fuels in Diesel- oder Benzin-Pkw machen keinen Sinn und sind nicht zielführend. Es ist teuer und vor allem: Es bietet keine lokale Emissionsfreiheit etwa in den Innenstädten, aus denen wir das $CO_2$ und andere Emissionen wie Stickoxide ja möglichst raushalten wollen. Es macht schlicht keinen Sinn, der Luft irgendwo auf dem Lande $CO_2$ zu entziehen, um es dann mit den Pkw in die Städte zu bringen.

**Wie sieht denn dann der Individualverkehr von morgen aus?**
**von Unwerth:** Die Elektromobilität ist ja schon ein sehr guter Weg, wenn auch nicht in allen Bereichen und Anwendungen. Der nächste logische und konsequente Schritt für die Optimierung der E-Mobilität ist Wasserstoff in Verbindung mit einer Brennstoffzelle. Man kann die Batterien kleiner machen und hätte alle Komfortmerkmale, die wir heute kennen: Große Reichweiten, kurze Betankungszeiten und das gute Gefühl, emissionsfrei unterwegs zu sein.

**Aber wie sieht es mit Tankstellen beim Wasserstoff aus?**
**von Unwerth:** Man kann die bestehende Tankstelleninfrastruktur nutzen und dort Lager aufbauen. Man kann sie dann dezentral versorgen, es besteht jedoch auch in einigen Gegenden, wo erneuerbare Energien vor Ort erzeugt werden, die Möglichkeit, den Wasserstoff direkt an der Tankstelle zu erzeugen. Eine solche Anlage wird derzeit gerade in Chemnitz geplant.

**Wasserstoff hat jedoch die Eigenart zu diffundieren. Wäre so ein Verlust Autofahrern zu vermitteln?**
**von Unwerth:** Diese Angst kann ich Ihnen nehmen, denn es kommt darauf an, in welchem Aggregatzustand man ihn lagert. Wenn man den Wasserstoff gasförmig in Tanks lagert, diffundiert da fast nichts. Gasförmig ist Wasserstoff lange und nahezu verlustfrei speicherbar. Auch in den Fahrzeugen befinden sich Wasserstoffdrucktanks und die sind ebenfalls technisch dicht.

## „Es gibt nun mal eine Obergrenze für die physikalische Speicherfähigkeit von Batterien"

# Wasserstoff direkt an der Tankstelle erzeugen – Deutschland 2030 (2)

**Warum fördert der Bund nicht E-Fuels?**

**von Unwerth:** Alle Energieträger neben der Batterie wurden in den vergangenen Jahren stiefmütterlich behandelt. Nach den Signalen aus der Autoindustrie, dass man auf die Batterietechnik setzt, zog die Politik mit. Vor zehn Jahren sah es ja tatsächlich so aus, dass wir uns auf einem steilen Entwicklungsgradienten bewegen und viele gingen davon aus, dass sich die Batterietechnik genauso rasant weiterentwickelt wie beispielsweise die Chiptechnik. Manche behaupteten, auch die Batterien werden alle zwei Jahre eine doppelte Energiedichte haben.

**Und wie sieht es jetzt aus?**

**von Unwerth:** Jetzt stellt man fest, dass man an physikalische Grenzen stößt. Lithium gibt eben nur ein Elektron ab, da beißt die Maus keinen Faden ab. Dilithium und Trilithium kenne ich nur aus der Science-Fiction-Serie *Star Trek*, das kommt in der Natur nicht vor. Es gibt nun mal eine Obergrenze für die physikalische Speicherfähigkeit von Batterien. An der sind wir zwar noch nicht, aber ein Ende ist absehbar. Aber ich bin zuversichtlich, dass die Erkenntnis gewachsen ist, dass man neben einer rein batterieelektrischen Strategie auch eine für Wasserstoff und E-Fuels braucht. Wir müssen auf einen gesunden Mix setzen und nicht nur auf ein Pferd. Es war in meinen Augen ein fataler Fehler, die Forschung der letzten Jahre sehr einseitig in eine Richtung zu fördern.

**Sind alle Autohersteller zu stark in eine Richtung marschiert und haben in anderen Bereichen den Technologieanschluss verloren?**

**von Unwerth:** Nein, ganz und gar nicht. Audi forscht sehr intensiv an der Brennstoffzelle und wird mit Neuheiten auf diesem Sektor aufwarten. Von BMW-Chef Oliver Zipse weiß ich, dass er ein Verfechter der Brennstoffzelle ist. Gerade Premiumhersteller – sehr lange vor allem Daimler – beschäftigen sich intensiv mit dem Thema. Ihre Fahrzeuge sind in der Regel groß und schwer, und genau hier macht die Brennstoffzelle gegenüber rein batterieelektrischen Fahrzeugen sehr viel mehr Sinn, allein schon aus Gewichts- und Reichweitengründen. Und die heute noch hohen Kosten bei der Fertigung von Brennstoffzellen werden sich mit steigenden Stückzahlen denen von Verbrennungsmotoren annähern und sich damit später auch ins untere Segment einführen.

**Was müsste passieren, damit wir bald viele Brennstoffzellenfahrzeuge auf den Straßen sehen?**

**von Unwerth:** Infrastruktur – alles steht und fällt mit der Infrastruktur. Ich bin mir sicher, dass wir alle heute noch keine Handys hätten, wenn nicht vorher jemand ein Netz aufgebaut hätte. Aber es ist unrealistisch, dass ein Unternehmen heute Milliarden in die Hand nimmt, auf die Brennstoffzelle setzt und sich sagt: „Mal sehen, was passiert“. China ist da schon einen Schritt weiter, indem es die Wasserstofftechnik mit 80 Prozent subventioniert. Da schießen plötzlich Firmen und Fahrzeuge aus dem Boden – und mit ihnen die Infrastruktur. Re-Fire etwa, ein Unternehmen, dass es vor drei Jahren noch gar nicht gab, produziert in Serie Brennstoffzellen. Und das würden sie nicht, wenn es keine Abnehmer dafür gäbe. Und je mehr Autos mit Brennstoffzellen produziert und verkauft werden, umso mehr wird die Infrastruktur ausgebaut. Dies macht die Technologie wiederum für andere potenzielle Käufer umso interessanter.

## „Die Brennstoffzelle hat zwei Nachteile …“

**Wozu brauche ich eigentlich noch eine Batterie im Auto, wenn allein die Brennstoffzelle für den Antrieb sorgen könnte?**

**von Unwerth:** Brennstoffzellenfahrzeuge werden auch auf lange Sicht immer Hybridfahrzeuge sein. Die Brennstoffzelle hat zwei Nachteile: Sie ist nicht so dynamisch wie eine Batterie, das heißt sie stellt die Energie nicht ganz so schnell zur Verfügung. Das ist vielleicht vergleichbar mit dem Turboloch zu Anfang der Turbo-Ära. Um ein dynamisches Ansprechverhalten zu gewährleisten, braucht man noch die Batterie. Die braucht dann auch nicht groß sein, vielleicht zwei Kilowattstunden. Und eine Batterie kann rekuperieren, eine Brennstoffzelle nicht.

**Experten zufolge machen E-Fuels nur Sinn, wenn Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt wird.**

**von Unwerth:** Das sehe ich ganz genau so. Das Gleiche gilt jedoch auch für die E-Mobilität. Solange man Energie nutzt, die aus primären Energieträgern wie Kohle oder Gas kommt, hat man gar nichts gewonnen, denn die Emissionen entstehen dann eben woanders. So kann man höchstens lokale Emissionen wie in Städten vermeiden. Aus Klimaperspektive werden die Emissionen jedoch einfach nur verlagert.

# Wasserstoff direkt von der Tankstelle (3)

**Hätten wir denn genug erneuerbare Energien für eine sauberere Mobilität von morgen?**

**von Unwerth:** Ja, die Sonne liefert uns erheblich mehr Energie als wir aktuell weltweit verbrauchen. Und es gibt in gewissen Zeiten zwar einen Unterstand, oft jedoch auch einen Überstand. Statt also Windräder abzuschalten, weil schlicht zu viel Energie zur Verfügung steht, sollte man nach Möglichkeiten suchen, die überschüssige Energie zu speichern, um sie zu den Zeiten nutzen zu können, wenn sie benötigt wird. Und das kann man wunderbar mit Wasserstoff. Wasserstoff ist schließlich die Ausgangsbasis für synthetischen Kraftstoff aller Art – man könnte also aus dem Überschuss an erneuerbaren Energien bei Bedarf dann eben auch E-Fuels herstellen.

**Wie traurig sind Sie, dass die Olympischen Spiele in Tokio in diesem Jahr ausfallen? Toyota wollte dort die Praxistauglichkeit der Brennstoffzelle ausgiebig demonstrieren.**

**von Unwerth:** Darüber bin ich wirklich sehr traurig, zumal ich bereits dabei war, als die erste große Flotte Brennstoffzellenfahrzeuge schon zu den Olympischen Spielen 2008 in Peking demonstriert wurde. Es geht dabei ja nicht nur um Fahrzeuge, die die gesamten Shuttledienste übernehmen sollten, sondern auch darum, die ganze Bandbreite an Anwendungsmöglichkeiten des Wasserstoffs zu demonstrieren. Dazu gehört auch, das Olympische Dorf nach den Spielen in über 5.000 Wohnungen umzuwandeln und sie mit Wasserstoff zu versorgen. Es ist in der Öffentlichkeit kaum bekannt, was außer in Autos mit Wasserstoff alles möglich ist. Wasserstoff spielt eine enorm wichtige Rolle für die Energieversorgung der Zukunft. Wasserstoff kann für alle Art der Energiewandlung, die wir heute vornehmen, verwendet werden – Kraftwerke, Haushalte, Ladegeräte. Prinzipiell kann man überall Wasserstoff in Verbindung mit einer Brennstoffzelle einsetzen – das Thema „Sektorenkopplung“ wäre damit vollständig erledigt. Es ist eine Technologie, die uns enorm viele Vorteile bringt.

**Interview:** Peter Kellerhoff
**Ansprechpartner im VDI:**
Dipl.-Ing. Simon Jäckel
VDI-Fachbereich Antrieb und Energiemanagement
E-Mail-Adresse: jaeckel@vdi.de

Quelle: VDI-Update-Team vom 30.06.2020





Bild von Steve Conrad
**Prof. Dr. Thomas von Unwerth,** Leiter der Professur Alternative Fahrzeugantriebe an der TU Chemnitz

# Wasserstoff-Tankstellen in Deutschland, Stand 6/2021

## Wasserstoff-Tankstellen in Deutschland

Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle können dann in ganz Deutschland auftanken. Besonders viele Wasserstoff-Stationen gibt es in den Regionen Hamburg, Berlin, Rhein/Ruhr, Rhein/Main, München, Stuttgart und Nürnberg sowie entlang der Autobahnen und Verbindungsstraßen.




## Tanken von Brennstoffzellen-Fahrzeugen

**Tanken** kann man das Brennstoffzellen-Fahrzeug einfach an der nächsten Tankstelle – vorausgesetzt, sie ist eine der wenigen **Wasserstoff**-Tankstellen, die es bislang in Deutschland gibt.

Das Volltanken eines Pkw mit **Wasserstoff** dauert in der Regel drei bis fünf Minuten.

## Was kostet 1 kg Wasserstoff?

Die **Kosten** beim Tanken von **Wasserstoff** sind vergleichbar mit denen für Benzin:
Ein **Kilogramm kostet** an der Tankstelle 9,50 Euro und bringt die meisten Fahrzeuge rund 100 Kilometer weit.

Der Tank der meisten Pkw-Wasserstoffautos fasst etwa vier bis fünf **Kilogramm**.

Quelle: www.mobile.de, Stand Juni 2021

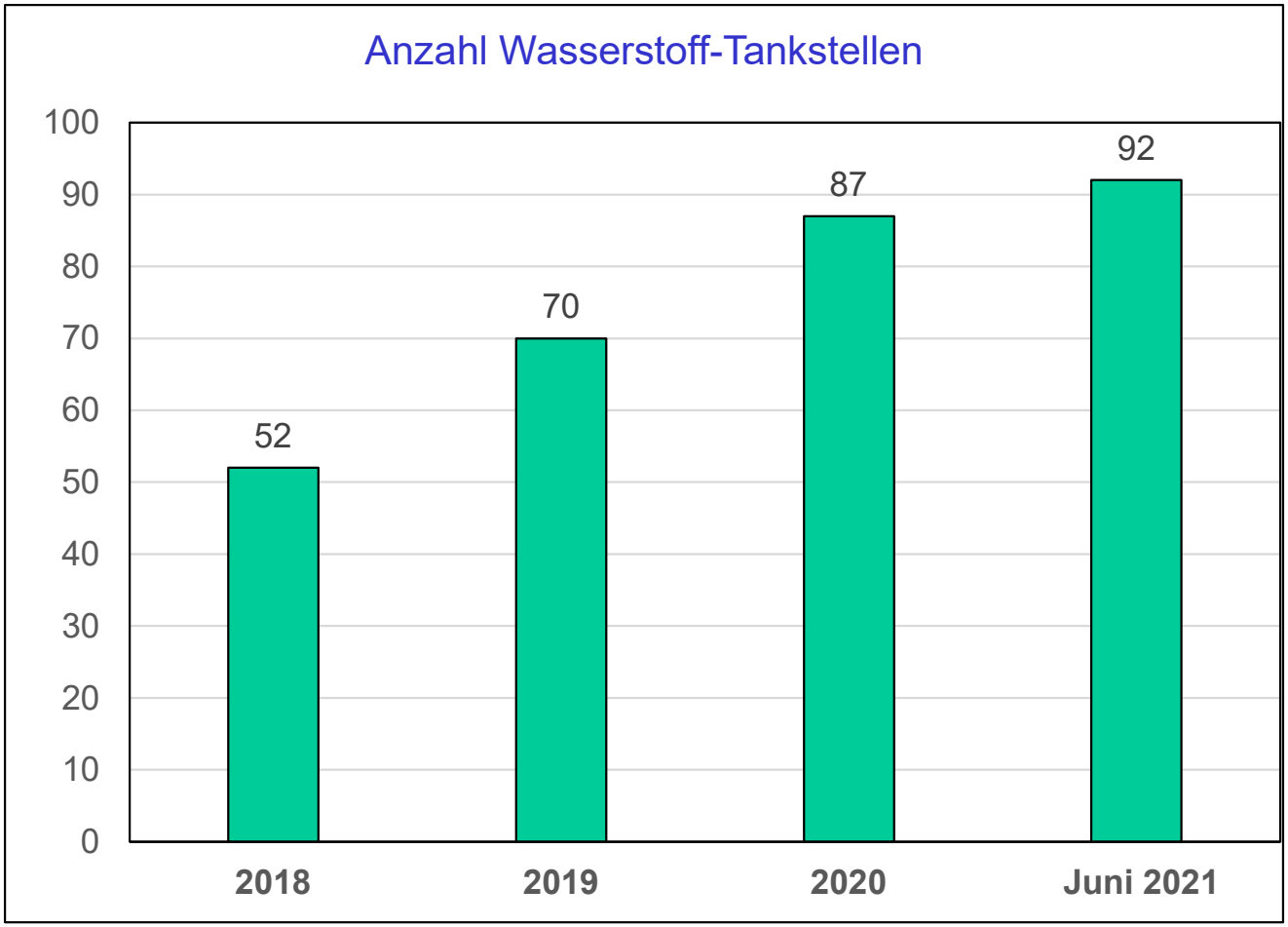
# Entwicklung Anzahl Wasserstofftankstellen in Deutschland 2018-6/2021

## Wasserstofftankstellen

Die Statistik zeigt die Anzahl der Wasserstofftankstellen in Deutschland in den Jahren 2018 bis 2021 (Stand: Juni).

Bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellen-antrieb wird elektrische Energie aus dem Energieträger Wasserstoff gewonnen, welcher an dafür vorgesehenen Tankstellen getankt werden kann.

Zum Zeitpunkt Juni 2021 lag die Anzahl der Wasserstofftankstellen in Deutschland bei 92.




Quelle: Statista 2021, Stand Juni 2021

# Fazit und Ausblick

## Wasserstoff: Schlüsselelement für die Energiewende in Deutschland (1)

### 2.7 Wasserstoff

Wasserstoff ist ein farb- und geruchloses Gas, das gegenwärtig vor allem einen Grundstoff der chemischen Industrie darstellt. Zukünftig wird dieser Energieträger auch in weiteren Industrieanwendungen sowie im Verkehrssektor und Wärmemarkt eine bedeutende Rolle bei der Dekarbonisierung der Energie- und Wirtschaftssysteme einnehmen.

>> *Elektrolysekapazität Deutschlands soll bis 2030 auf 5 GW ausgebaut werden.*

Die **nationale Wasserstoffstrategie** (BMWi 2020) sieht vor, bis 2030 in Deutschland rund 5 GW Elektrolysekapazität zu installieren, um etwa 0,4 Mio. t (4 Mrd. $m^3$, 14 TWh) Wasserstoff zu erzeugen (BMWi 2020). Der Nationale Wasserstoffrat rät eine noch deutlich höhere Elektrolyseleistung anzustreben, abgesichert durch den Ausbau zusätzlicher erneuerbarer Energien (NWR 2021). Neben dem massiven Ausbau der erneuerbaren Energien, um die benötigten Energiemengen bereitstellen zu können, ergibt sich voraussichtlich ein erheblicher Importbedarf an Wasserstoff, da bis 2030 ein Wasserstoffbedarf von 2,7 bis 3,3 Mio. t (30 bis 37 Mrd. $m^3$, 90 bis 110 TWh) erwartet wird (BMWi 2020). Die Höhe des Importbedarfs wird nicht zuletzt davon abhängen, wieviel Wasserstoff in Deutschland hergestellt werden wird. Der Wasserstoffbedarf Deutschlands liegt gegenwärtig bei etwa 1,65 Mio. t (18 Mrd. $m^3$, 55 TWh) und wird überwiegend aus Erdgas gewonnen (siehe „Wasserstoff: Grundlagen" im Anhang).

Die deutsche Elektrolysekapazität betrug nach IEA (2020) in 2019 46 $MW_e$ (Tab. 4). Die tatsächliche Elektrolysekapazität dürfte allerdings höher liegen, da nicht alle Kleinanlagen erfasst wurden. Der Anteil der Gewinnung aus Elektrolyseverfahren (vor allem durch Chlor-Alkali-Elektrolyse, ALK) an der Gesamtproduktion ist in Deutschland im internationalen Vergleich überdurchschnittlich hoch.

In Planung sind mehr als 62 Wasserstoff-Großprojekte sowie einige hundert kleinere Projekte in Deutschland (BMWi 2021). Das aktuell größte Wasserstoffprojekt ist die AquaVentus-Initiative, welche zukünftig in großem Stil Offshore-Windstrom aus der deutschen Nordsee zur Herstellung von grünen Wasserstoff nutzen will. Der Plan für das Projekt vor Helgoland sieht bis zum Jahr 2035 Elektrolyseanlagen von rund 10 GW vor.

>> *Hoher zukünftiger Wasserstoffimportbedarf*

Eines der Instrumente der Bundesregierung zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland sind die Reallabore, die durch Partner aus Wissenschaft und Industrie betrieben werden. Dies sind meist zeitlich und örtlich begrenzte Testräume in denen innovative Technologien, Produkte, Dienstleistungen oder Ansätze unter realen Bedingungen erprobt werden. Von den 20 ausgelobten Gewinnern des Reallabor-Wettbewerbs in Deutschland haben aktuell etwa die Hälfte die Erprobung von Wasserstofftechnologien und Sektorkopplung aufgenommen.

**Tabelle 4:** Installierte Elektrolysekapazität 2019 zur Wasserstoffherstellung (IEA 2020) sowie Ausbauziele u. a. nach Wietschel et al. (2021) [GW]

| | Installierte Elektrolysekapazität | Elektrolysekapazität bis 2030 | Ausbauziele installierter Elektrolysekapazität 2030 | 2040 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|
| Deutschland | 0,046 | 5 | 1,7-10 | bis zu 35 | 43-63 |

Quelle: BGR Bund – BGR Energiestudie 2021, Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung, S. 29-31, Ausgabe 02/2022

# Fazit und Ausblick

## Wasserstoff: Schlüsselelement für die Energiewende in Deutschland (2)

**Wasserstoffproduktion aus abgeregeltem Strom**

Ist das deutsche Stromnetz ausgelastet und lassen sich Wind- und Solarstrom nicht einspeisen, wird dieser Strom zur Erhaltung der Netzstabilität abgeregelt. Die nicht erzeugte Energie wird als „Ausfallarbeit", seltener „Ausfallenergie" bezeichnet. Auch wenn sich die Menge der Ausfallarbeit mit fortschreitendem Netzausbau absehbar verringern wird, stellt sich die Frage, inwieweit Ausfallarbeit zur Herstellung von Wasserstoff verwendet werden könnte und um welche Wasserstoff-Mengen es sich dabei handeln würde.

In Deutschland wurden 2020 rund 6.146 GWh Strom (1 % der Gesamterzeugung, vornehmlich Windstrom an Land) abgeregelt (Bundesnetzagentur 2021; Abb. 2-7). Aus dieser Strommenge ließen sich, unter Annahme eines Strombedarfs von 55 kWh zur Elektrolyse von 1 kg $H_2$, theoretisch 112 kt Wasserstoff gewinnen. Die derzeit installierten Elektrolysekapazitäten reichen jedoch nicht aus, um diese Wasserstoffmengen herzustellen.

Mit der derzeit in Deutschland installierten Elektrolysekapazität von rund 46 $MW_e$ (davon rund 26 $MW_e$ in Betrieb) (IEA 2020) ließen sich bei 4.000 Vollaststunden aus Ausfallarbeit theoretisch rund 3,3 kt Wasserstoff erzeugen. Diese Berechnungen basieren auf den Daten zu realisierten Strom- und Abregelungsmengen (Ausfallarbeit) (Bundesnetzagentur 2021). Nicht berücksichtigt sind Wartungszeiten oder sonstige Ausfälle an Elektrolyseanlagen, saisonale Schwankungen, in denen Ausfallarbeit theoretisch genutzt werden könnte, sowie Energieverluste bei Verarbeitung, Verflüssigung, Transport und Stromaustausch mit den Nachbarländern.

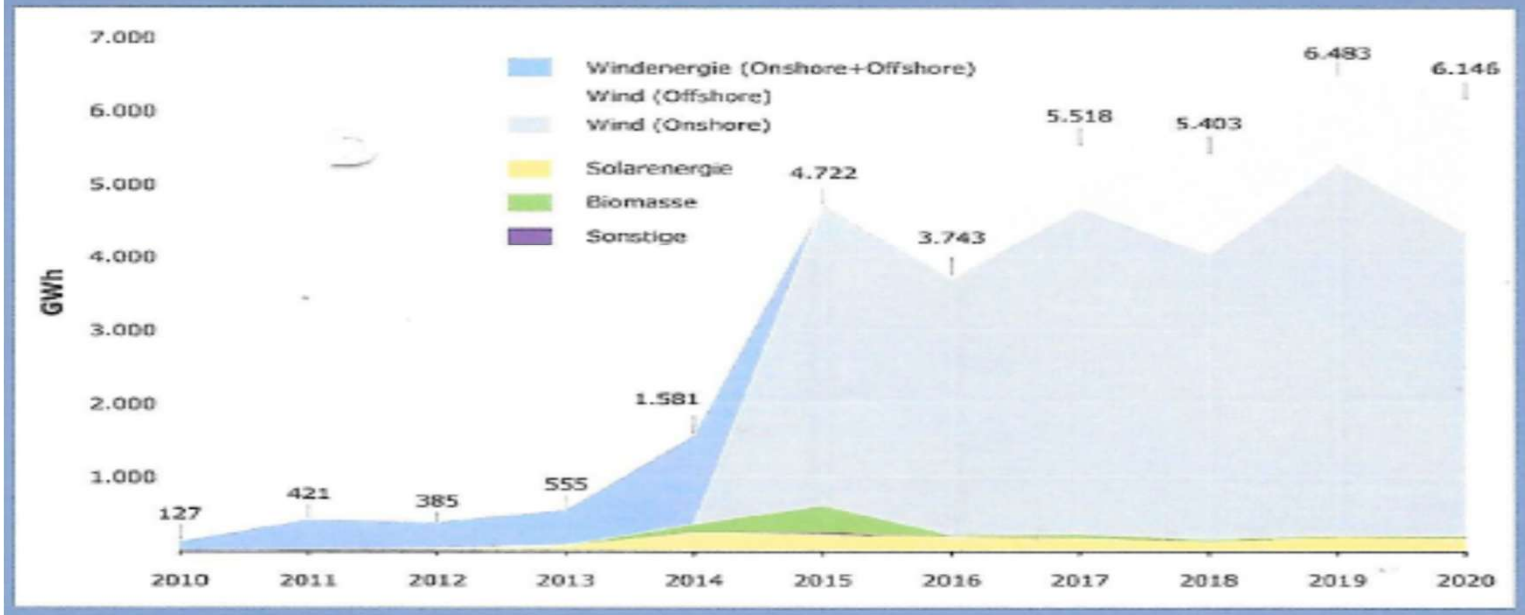



**Abbildung 2-7:** Entwicklung der Ausfallarbeit, verursacht durch Einspeisemanagementmaßnahmen von 2010 bis 2020 (nach Bundesnetzagentur/Bundeskartellamt 2021).

Quelle: BGR Bund – BGR Energiestudie 2021, Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung, S. 29-31, Ausgabe 02/2022

# Fazit und Ausblick

## Wasserstoff: Schlüsselelement für die Energiewende in Deutschland (3)

**Wasserstoffspeicherung im Untergrund**

Im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie werden in verschiedenen Szenarien zukünftig große Speichervolumen für Wasserstoff angenommen. Analog zur bewährten Speicherung von Erdgas kann auch Wasserstoff in geologischen Strukturen gespeichert werden. Für die Erdgasspeicherung werden in Deutschland zwei Speichertypen genutzt, die im Betrieb zyklisch befüllt und teilentleert werden: 1. ausgeförderte Erdgaslagerstätten in Gesteinen mit freiem Porenraum (Porenspeicher), 2. speziell für die Speicherung geschaffene Hohlräume in Salzgestein (Kavernenspeicher). Das Ende des Jahres 2020 nutzbare Arbeitsgas-Speichervolumen der Erdgasspeicher lag bei 23,7 Milliarden m³, davon etwa ein Drittel in Porenspeichern und zwei Drittel in Salzkavernen (LBEG 2021). Für diese untertägigen Erdgasspeicher bestehen in Deutschland und weltweit langjährige positive Erfahrungen.

Der Wissenstand zur Wasserstoffspeicherung in bestehenden oder neu zu erschließenden Untertagespeichern ist dagegen begrenzt. In den USA und im Vereinigten Königsreich gibt es langjährige Erfahrung zur Speicherung geringer Wasserstoffmengen in Kavernen (Warnecke & Röhling 2021). In Deutschland werden im Rahmen der Errichtung von Reallaboren der Energiewende seit kurzem Pilotprojekte zur Speicherung in bestehenden Salzkavernen durchgeführt, so in der Salzkaverne bei Bad Lauchstatt. Weitere Kavernen werden in den nächsten Jahren umgerüstet, wie die Kaverne Huntorf und Teile des Kavernenspeichers Gronau. Die Nutzung von Porenspeichern zur Wasserstoffspeicherung wurde in Österreich bislang erfolgreich erprobt und weitere Projekte finden momentan am selben Standort statt. Der Kenntnisstand zu Porenspeichern ist, verglichen mit Salzkavernen, jedoch geringer.

Deswegen werden weltweit ausgewählte Aspekte zur Wasserstoffspeicherung in Untertagespeichern erforscht (Heinemann et al. 2021). Die BGR untersucht derzeit in Zusammenarbeit mit weiteren Forschungseinrichtungen mögliche Umsetzungen von Wasserstoff durch Mikroorganismen oder auf Mineraloberflächen in Speichern und den Transport von Wasserstoff in Porenspeichern. Daneben werden Speichervolumen für Wasserstoff in Abwägung mit Nutzungskonkurrenzen auch für mögliche, neu zu schaffende Untergrundspeicher ermittelt. Generell scheint auch eine Speicherung großer Wasserstoff-Volumen im Untergrund möglich, allerdings werden Aspekte zur Eignung einzelner Strukturen noch im Detail untersucht (Forschungsnetzwerk Wasserstoff 2021).

Quelle: BGR Bund – BGR Energiestudie 2021, Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung, S. 29-31, Ausgabe 02/2022

# Wasserstoffwirtschaft

## EU-27 plus

# Geplante Europäische Projekte zur Wasserstoffgewinnung aus Elektrolyse und aus Erdgas bis 2030, Stand 2022 nach IEA

**Jahr 2030: EU 38.282 kt = 38,3 Mio. t**

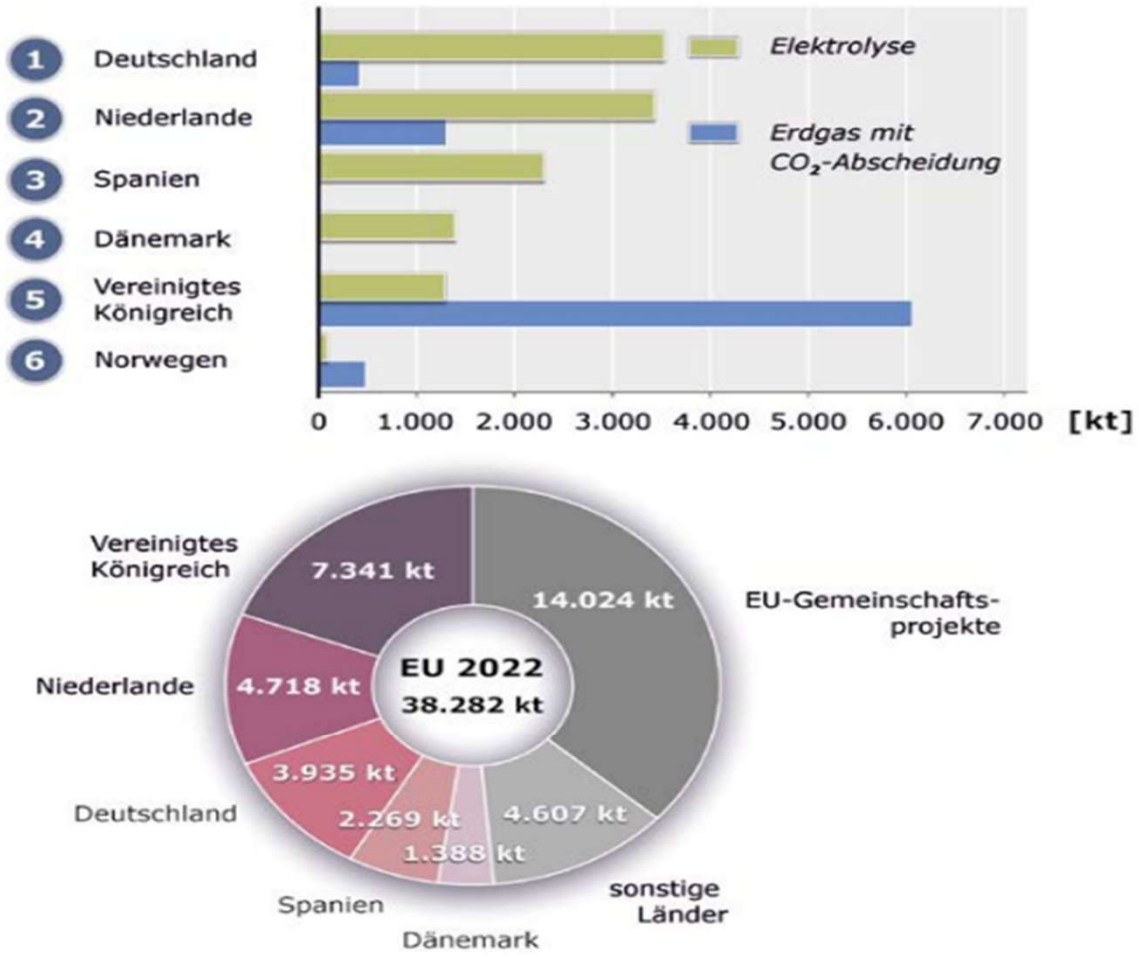



*Abbildung 3-20: Geplante Europäische Projekte zur Wasserstoffgewinnung aus Elektrolyse und aus Erdgas (mit $CO_2$-Abscheidung) (IEA 2022a).*

Quelle: BGR: Energiestudie 2023, Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen, Wasserstoff, S. 57-58, 2/2024

# Europäische und deutsche Energiepolitik (1)

Europa hat ehrgeizige Ziele für einen nachhaltigen, wettbewerbsfähigen und sicheren Energiemarkt.
Die Verminderung von Klimagasemissionen und die Einführung von erneuerbaren Energien sind wichtige Zielsetzungen der europäischen Energiepolitik.

Heute ist die Europäische Union in der Umweltpolitik die treibende Kraft für die Gestaltung der nationalen Gesetzgebungen. Das zeigt sich in einer ganzen Reihe von Initiativen, Rahmenprogrammen und Direktiven, zu nennen sind insbesondere: Das europäische Emissionshandelssystem (ETS), die Zielsetzungen für erneuerbare Energien, Ziele für die Qualität der Luft und für die Lärmverminderung in Städten. Konkretisiert wurden diese Ziele unter anderem in der Verordnung für erneuerbaren Strom von 2001, der Verordnung zum Emissionshandelssystem von 2003, der Strategie für saubere Luft von 2005, der städtischen Umweltstrategie von 2005, dem Aktionsplan für Energieeffizienz von 2006, der Verordnung zur Kraftstoffqualität von 2007, der Verordnung über CCS von 2008, oder der Verordnung über erneuerbare Energien von 2008 sowie der Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe von 2014. Der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung fordert bis zum Jahr 2030 über alle Sektoren ein Klimagasreduktionsziel von mindestens –55%. Der Verkehrssektor muss 40–42% Klimagasreduktion erzielen – ohne erneuerbar erzeugte Kraftstoffe und elektrifizierte Antriebe ein nicht erreichbares Ziel. Die erste Phase des europäischen Emissionshandelssystems (2005–2007) war auf große Energieerzeuger und -nutzer begrenzt. Ausgeklammert war der Verkehrssektor, obwohl er ein wesentlicher Teil der europäischen Wirtschaft ist – steht er doch für fast 20% des gesamten Primärenergieverbrauchs. Der Verkehr wird auch weiterhin der am schnellsten wachsende Energieverbrauchssektor sein und ist daher von strategischer Bedeutung.

Da nahezu die gesamte Energie für den Verkehr aus fossilen Quellen stammt, wird der Verkehr auch die am schnellsten wachsende Quelle für Klimagasemissionen sein.

Konsequenterweise wurde die Einbindung des Verkehrssektors in das ETS bereits von Anfang an diskutiert. Man hat sich im Jahre 2016 bei der ICAO verständigt, ein separates globales Emissionshandelssystem (CORSIA) für die Luftfahrt einzuführen, in welchem die Luftfahrtbetreiber ihre Klimagasemissionen kompensieren müssen und das auch erst ab 2027 verpflichtend. Eine Einbeziehung des internationalen Luftverkehrs in das EU-ETS war an Widerständen der nicht europäischen Länder gescheitert.

Die Einbeziehung des Straßenverkehrs in das Emissionshandelssystem wird, im Vergleich zu anderen Steuerungsinstrumenten, gegenwärtig als weniger effizient angesehen. Daher wurden von der Europäischen Kommission weitere Maßnahmen ergriffen, um sicherzustellen, dass die ursprüngliche Selbstverpflichtung der Automobilindustrie für das Jahr 2012 bis 2015 eingehalten wurden. Eine erste Verschärfung bis zum Jahr 2021 auf 95g-CO2/km ist gesetzlich vorgeschrieben. Um diese Ziele zu unterstützen, haben verschiedene EU-Mitgliedsstaaten bereits eine CO2-basierte Fahrzeugbesteuerung eingeführt. Eine weitere Verschärfung der CO2-Grenzwerte in Richtung auf 68 bis 78g-CO2/km (ca. 2025) und auf 40g-CO2/km (ca. 2030) wird seit Jahren in Europa diskutiert.

### Einführung alternativer Kraftstoffe

Die Europäische Kommission schreibt in der RED vor, dass jedes Mitgliedsland im Jahr 2020 einen verbindlichen Anteil von 10% erneuerbaren Energien als Antriebs-energie (Endenergie) im Transportsektor bereitstellen muss. Die FQD fordert bis 2020 eine Reduzierung der Klimagasemissionen von 6 % für alle Fahrzeuge und Binnen-schiffe nach einem vorgegebenen Berechnungsverfahren. Dies reflektiert seit 2015 die in Deutschland praktizierte Umsetzung von Klimagasreduktionszielen anstatt von Energiezielen geregelt durch §37a BImSchG. Sofern diese Emissionsreduktionsziele verfehlt werden, sieht §37C des BImSchG eine Strafzahlung von 470€/t-CO2 vor.

Die Produktion von Wasserstoff als Kraftstoff kann die großen Potenziale der erneuerbaren Stromerzeugung nutzen, dabei als Energiespeicher fungieren sowie auch erneuerbaren Fahrzeugkraftstoff bereitstellen.

In einem ersten Schritt könnte regenerativ erzeugter Wasserstoff in der Raffinerie aus Erdgas reformierten Wasserstoff ersetzen und mit der Vermeidung von 105 g-CO2/MJ einen ersten Beitrag leisten, sobald die Anrechnung auf die Klimagasreduktionsquote rechtlich erfolgen kann.

# Europäische und deutsche Energiepolitik (2)

Ebenso kann der Wasserstoff, der mit erneuerbarem Strom produziert worden ist, mit zunehmendem Anteil an Brennstoffzellenfahrzeugen in diesen genutzt werden. Auf diese Weise ist gewährleistet, dass über den gesamten Nutzungspfad (Well-to-Wheel) keine schädlichen Klimagase in die Umwelt gelangen.

### Verminderung lokaler Schadstoffemissionen

Fast 75% aller Europäer leben in urbanen Räumen. Der Straßenverkehr in Städten trägt 40% zu den CO2-Emissionen des gesamten Straßenverkehrs bei und bis zu 70% zu allen anderen verkehrsbedingten Emissionen (z.B. NOx, Partikel und Feinstaub, Lärm). Diese Emissionen gilt es entscheidend zu reduzieren. Seit Jahrzehnten gefährden Stickstoffdioxid (NO2) und Feinstaub die Gesundheit von Millionen Stadtbewohnern in Deutschland und weltweit. Auch Deutschland verletzt seit 2010 regelmäßig die Emissionsgrenzwerte in vielen seiner Städte. Die WHO sieht in NO2 eines der schädlichsten Umweltgifte und ein erhebliches Gesundheitsrisiko.

Fahrzeuge mit Nullemissionsantrieben (Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge, stromleitungsgebundene Fahrzeuge) können hier eine wesentliche Entlastung bringen. Brennstoffzellenfahrzeuge zeichnen sich zusätzlich durch ihre hohe Routenflexibilität und ihre große Reichweite von 500 km sowie ihre sehr schnelle Betankungszeiten von 3–4 Minuten an bekannten Tankstellenstandorten aus, was sie als Vielnutzerflottenfahrzeuge auch im städtischen Umfeld prädestiniert.

Quelle: DMV- Wasserstoff- und Brennstoffzellen 2017, Ausgabe Mai 2017

# Erste Märkte in Europa – die Rolle von Nebenprodukt-Wasserstoff




Heutzutage sind in einigen Regionen Europas große Wasserstoffmengen aus chemischer Koppelproduktion verfügbar. In den meisten Fällen wird Wasserstoff als Nebenprodukt in chemischen Prozessen erzeugt. Wasserstoff aus diesen Quellen eröffnet eine interessante Möglichkeit für erste Anwendungen im Verkehr und im stationären Einsatz. Sofern der Wasserstoff in der Nähe des Herstellungs-ortes genutzt wird, kann er ein wirtschaftlicher Kraftstoff für Fahrzeugflotten in ersten großmaßstäblichen Pilotflotten und Schritten in die Kommerzialisierung sein.
Auch der Einsatz in effizienten Brennstoffzellen-BHKWs ist prinzipiell machbar und wirtschaftlich.

Da diese Quellen begrenzt und nicht überall verfügbar sind, muss die Versorgung mit der Zeit durch andere Wasserstoffquellen ergänzt werden. Nichtsdestoweniger können diese Nebenproduktquellendabei helfen, kostengünstigen Wasserstoff effizient bereit zu stellen, da sie Energieverluste und die damit verbundenen CO2-Emissionen in Höhe von mindesten 20% einsparen, die
ansonsten bei der Erzeugung aus Erdgas mittels Reformierung oder durch andere Umwandlungsprozesse entstehen würden.

In einer detaillierten Abschätzung von 1997 wurde von LBST identifiziert, dass 800 Millionen $Nm^3$ pro Jahr Nebenproduktwasserstoff als Kraftstoff in Deutschland verfügbar gemacht werden können. Mit dieser Wasserstoffmenge lassen sich etwa 1/2 Million effiziente Brennstoffzellenfahrzeuge betreiben [1)] In Europa existieren vergleichbare Nebenproduktquellen auch in Frankreich, Belgien, Italien, den Niederlanden und Norwegen. In Deutschland, Frankreich, Belgien und den Niederlanden ist Wasserstoff sogar über umfassende industrielle Pipeline-Systeme verfügbar.

Im Rahmen des HyWays-Projektes [**www.hyways.de**] wurden 2007 für Europa die größten Mengen an Nebenproduktwasserstoff in Deutschland (~850 Mio. $Nm^3$ / Jahr), Norwegen (~650 Mio. $Nm^3$ / Jahr), Frankreich (~300 Mio. $Nm^3$ / Jahr) und den Niederlande (~100 Mio. $Nm^3$ / Jahr) identifiziert.

1) Es werden ein Energieverbrauch von 0,3 kWh / Fahrzeug-km und eine jährliche Fahrstrecke von 15.000 km angenommen.

Quelle: DMV- Wasserstoff- und Brennstoffzellen 2017, Ausgabe Mai 2017

# **Aufbau einer Wasserstoffladeinfrastruktur in Europa mit Deutschland,** Stand 5/2017 **(1)**

### Einführungsphase

Transport, Verteilung und Betankung sind Bereiche, in denen nennenswerte Investitionen in die Infrastruktur erfolgen. Insbesondere muss sichergestellt werden, dass die anfänglich niedrige Auslastung der Infrastruktur begrenzt und der Aufbau der Infrastruktur möglichst gut mit der wachsenden Zahl der Fahrzeuge synchronisiert wird. Flottenfahrzeuge würden die Auslastung und den kostendeckenden Betrieb von HRSs deutlich besser planbar machen als individuell genutzte Pkw, weshalb Bestrebungen auch in diese Richtung gehen. In welchem Umfang BZ-Lkw und -Busse im Einsatz sein werden ist gegenwärtig noch nicht konkret absehbar. Erste Kommunen setzen neben Batteriebussen auch bereits BZ-Busse ein.

### Erste Wasserstoffquellen

Nebenproduktwasserstoff aus der chemischen Industrie kann zu einem frühen Zeitpunkt eine der billigsten Wasserstoffquellen sein. Er ist an entsprechenden Standorten praktisch umgehend verfügbar und leicht verteilbar. Dieser Wasserstoff kann frühe Fahrzeugmärkte lokal versorgen, kann jedoch später den Markt nicht vollständige abdecken. H2 aus Erdgas ist heute die meistgenutzte Bereitstellungsvariante und kann bei optimierter Nutzung der Infrastruktur und Auslastung der HRSs bereits heute wirtschaftlich sein.

### Unterstützung durch europäische und deutsche Technologieinitiativen

Zur Vorbereitung der Markteinführung und Kommerzialisierung von Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologien wurde 2007 eine Public-Private-Partnership (PPP) in Form einer gemeinsamen Technologieinitiative für Brennstoffzellen und Wasserstoff (FCH JTI) gegründet. Die Initiative zielte auf die europaweite Bündelung industrieller, lokaler und nationaler Kräfte zur Entwicklung und Einführung wettbewerbsfähiger Energiesysteme auf der Basis von Wasserstoff und Brennstoffzellen.
Aber auch die Entwicklung von technologischen Komponenten für mobile, stationäre und portable Energieanwendungen auf höchstem Qualitätsniveau soll ermöglicht und beschleunigt werden. Die FCH JU ist, um Kontinuität sicherzustellen, seit 2015 in ihrer 2. Phase in Europa aktiv.

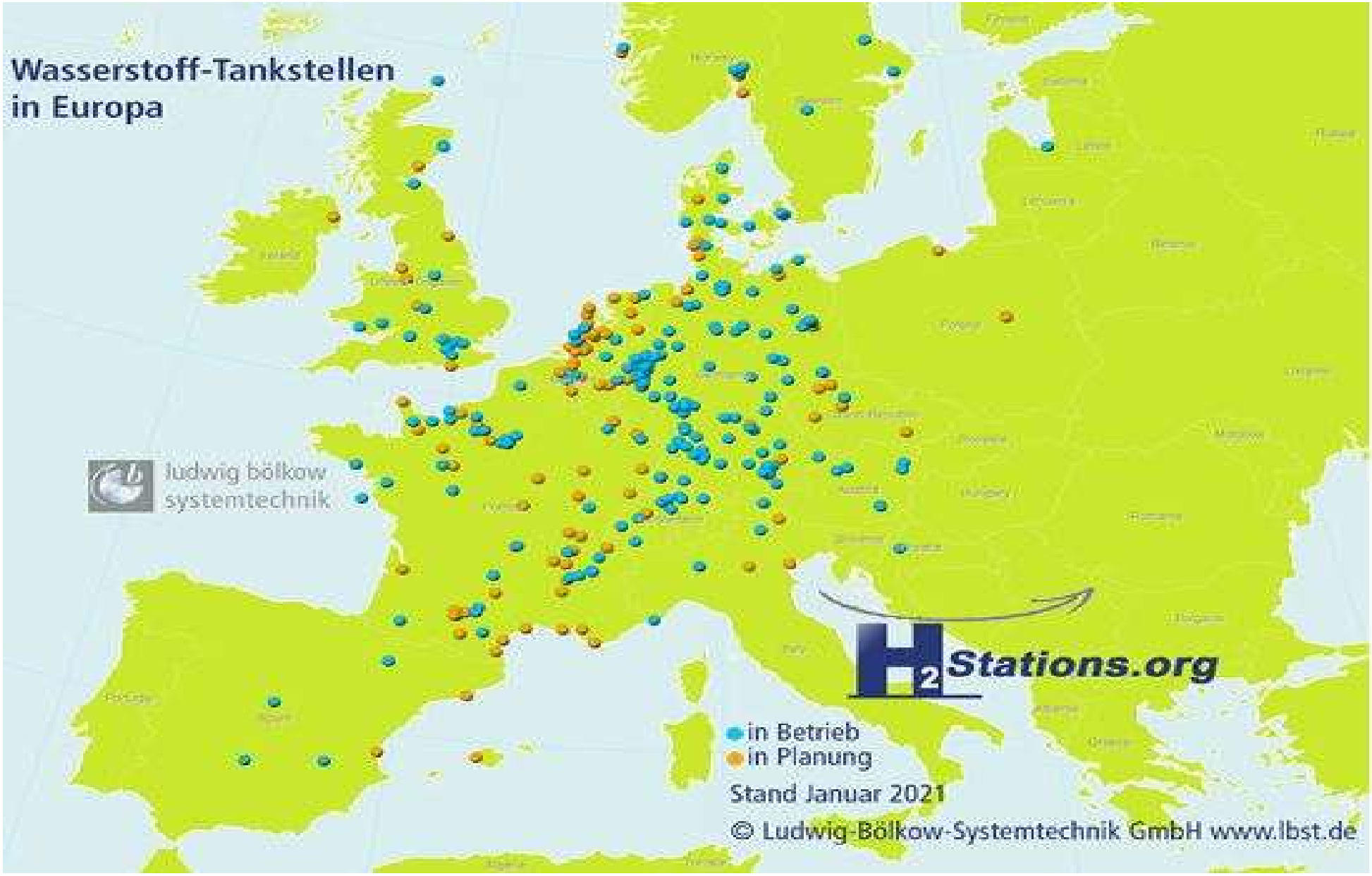
FCH | FUEL CELLS AND HYDROGEN JOINT UNDERTAKING

Parallel zu und in thematisch-inhaltlicher Abstimmung mit dem FCH JU wurde in Deutschland im Februar 2008 das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) ebenfalls als PPP ins Leben gerufen. Dieses wurde Ende 2016 in seine zweite Phase überführt, die sich bis 2026 neben den bisherigen Zielen zusätzlich um Marktaktivierung von H2&BZ-Technologien kümmern soll. Die Koordination und Umsetzung des NIP liegt in den Händen der NOW GmbH (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie).

NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Quelle: DMV- Wasserstoff- und Brennstoffzellen 2017, Ausgabe Mai 2017

**Wasserstoffladeinfrastruktur in Europa,** Stand 1/2021 **(2)**



# Förderverein H2-Mobilität Schweiz

## Der Förderverein H2 Mobilität Schweiz setzt sich zum Ziel, in der Schweiz ein flächendeckendes Netz an Wasserstofftankstellen aufzubauen.

Agrola AG, AVIA Vereinigung, Coop, Coop Mineraloel AG, fenaco Genossenschaft, Migrol AG und der Migros-Genossenschafts-Bund gründeten im Mai 2018 den Verein als gemeinsame Plattform, um den Aufbau der Wasserstoffmobilität in der Schweiz konkret zu fördern und zu beschleunigen. Durch die Unterstützung dieser nachhaltigen Form der Elektromobilität leisten sie einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der $CO_2$-Ziele im Strassenverkehr. SOCAR Energy Switzerland GmbH schloss sich im Juni 2018 dem Verein an. Im Oktober 2018 haben sich die Emil Frey Group und Shell dem Verein angeschlossen, Galliker Transport & Logistics im März 2019, Camion Transport, G. Leclerc Transport, F. Murpf und Tamoil im Mai 2019. Im August 2019 schlossen sich Chr. Cavegn AG und Emmi Schweiz AG an und im 2020 die Schöni Transport AG, die Gebrüder Weiss AG, die Streck Transport AG und von Bergen SA.

### H2 MOBILITÄT SCHWEIZ

Die Wasserstoffmobilität bietet alle Voraussetzungen, um die $CO_2$-Emissionen im Strassenverkehr nachhaltig zu reduzieren und die Absichten der Energiewende zu unterstützen. In der Schweiz funktioniert die Mobilität im geschlossenen Wasserkreislauf seit November 2016 erfolgreich als weltweit beachtete Lösung.
Der nächste Schritt liegt nun in der landesweiten Ausbreitung der Technologie, die alle Vorteile des emissionsfreien Elektrofahrzeugs mit den Annehmlichkeiten der heutigen Mobilität im Strassenverkehr vereint.

### VEREIN

Die Schweiz verfügt über Tankstellenbetreiber, Transport- und Logistikunternehmen, Unternehmen mit Fahrzeugflotten, über erneuerbare Ressourcen, über die Kaufkraft, über den Spirit der Start-Ups und notabene auch über den Pioniergeist, um die Wasserstoffmobilität auf privatwirtschaftlicher Basis einzuführen.
Der Förderverein H2 Mobilität Schweiz bietet und organisiert die Plattform, um diese überzeugende Technologie in der Schweiz aktiv und zeitnah auf die Strasse zu bringen.

### ZUKUNFT

Die Elektroantriebe basierend auf Wasserstoff haben einen substantiellen Marktanteil in verschiedensten Ländern erreicht. Der Wasserstoff wird aus erneuerbarer Energie gewonnen und trägt zur Dekarbonisierung des Verkehrs bei. Die Anwendungen umfassen

Personenwagen, Nutzfahrzeuge und Busse. Wasserstoff ist ein weitverbreiteter Treibstoff und soll an der Mehrheit der Tankstellen angeboten werden.
Diese Zukunft hat schon begonnen. Lassen Sie sich in die Wasserstoffmobilität von morgen und übermorgen entführen.

**- Bis 2050 will die Schweiz klimaneutral sein**
**- Mindestens 1.600 Brennstoffzellen-LKW sollen bis 2025 in der Schweiz fahren**
**- Mit gut 90 Schweizer Franken – Abgabe pro 100 km Fahrleistung wird ein schwerer Dieseltruck (Euro 6) in der Schweiz belastet**

Quellen: Südkurier – die Schweiz schaltet auf Wasserstoff um, PM vom 10. Juli 2020
Förderverein H2-Mobilität Schweiz , Spitalgasse 5, CH-8001 Zürich, Tel.: +41 44 218 50 28, Mail: info@h2mobilitaet.ch, www.h2mobilitaet.ch

# Regionaler Ausstieg von Braunkohlekraftwerke auf grüne Wasserstoffproduktion in Griechenland-West Makedonien bis 2025

# Griechenland will grünen Wasserstoff statt Kohlekraftwerke

Die griechische Regierung hat sich eine ambitionierte Klima-Agenda gegeben. Die Weichen dafür sind bereits gestellt



VON GERD HÖHLER
wirtschaft@suedkurier.de

**Athen** – Die Schlote rauchen nicht mehr im nordgriechischen Kardiá. Im Mai ging das älteste Braunkohlekraftwerk des Landes für immer vom Netz. Mit der Abschaltung kommt Griechenland dem Kohleausstieg einen Schritt näher.

Ursprünglich wollte sich die staatliche Public Power Corp. (PPC), Griechenlands größtes Energieunternehmen, 2028 von der Kohleverstromung verabschieden. Ende April gab Ministerpräsident Kyriakos Mitsotakis dann bekannt, dass der Ausstieg auf 2025 vorgezogen wird.

Der beschleunigte Abschied von der Braunkohle ist Teil einer ambitionierten „Grünen Agenda" im Rahmen des Post-Pandemie-Aufbauprogramms „Greece 2.0". Mit einem Pilotprojekt will eine Gruppe von Unternehmen und Forschungseinrichtungen in Griechenlands größtem Braunkohlerevier West-Makedonien demonstrieren, wie ein Übergang von der Kohleverstromung zur klimaneutralen Wasserstoffproduktion aussehen kann. Das Vorhaben, das unter dem Namen White Dragon läuft, soll zwischen 2022 und 2029 umgesetzt werden und 8,1 Milliarden Euro kosten. Die Initiatoren haben ihre Pläne bereits der EU-Kommission vorgelegt. Sie hoffen, dass die EU White Dragon als Vorhaben von gemeinsamem Interesse (PCI) einstuft und finanziell fördert.



Arbeiter im Braunkohlekraftwerk Kardiá bei Ptolemaida in West-Makedonien vor dessen Abschaltung. BILD: DPA

Grüner Wasserstoff soll eine wichtige Rolle bei der Umsetzung der Klimaziele der EU spielen. Griechenland ist wegen seines großen Potenzials an Solar- und Windenergie ein idealer Standort für die klimaneutrale Wasserstoffproduktion. „Wasserstoff ist der Schlüssel zur Dekarbonisierung", sagt Kostas Skrekas, der griechische Minister für Umwelt und Energie.

Die Umsetzung der EU-Klimaziele ist für das Land allerdings eine große Herausforderung. Vor 20 Jahren war Griechenland noch Europas viertgrößter Braunkohleförderer. Damals kamen 70 Prozent des griechischen Stroms aus Kohlekraftwerken. 2019 steuerte die Braunkohle 23 Prozent zur Elektrizitätsproduktion bei. Aktuell sind es nur noch 13 Prozent. Der Stromkonzern PPC will die Braunkohlekraftwerke wegen der rasant steigenden Preise der CO2-Zertifikate möglichst schnell vom Netz nehmen. Bis Ende 2022 will PPC seinen CO2-Ausstoß um 40 Prozent reduzieren.

Eine der politischen Herausforderungen ist es, den Kohleausstieg ökonomisch und sozial abzufedern. In der Region West-Makedonien hängen ein Fünftel der Wirtschaftsleistung und 10 000 Jobs an der Braunkohle. Das Projekt White Dragon kann nach Berechnungen der Planer direkt 18 000 und mittelbar weitere 29 500 Arbeitsplätze schaffen. So soll es dafür sorgen, dass West-Makedonien auch künftig seine Rolle als Kernregion der griechischen Energieversorgung behält.

Die Produktionskapazität des Projekts veranschlagen die Planer auf bis zu 320 000 Tonnen jährlich. Über die bestehende Trans Adriatic Pipeline (TAP) könnte der Wasserstoff als Beimischung zu Erdgas nach Italien gepumpt und dort in das europäische Leitungsnetz eingespeist werden.

## Zusammenfassung der Energiewende und Klimaziele

1. Kohleverstromung wird in der Region West Makedonien 2022 beendet
2. Vorhandenes großes Potenzial an Solar- und Windenergie wird zur Produktion von Grünen Wasserstoff genutzt
3. Über die bestehende Trans Adriatic Pipeline soll Wasserstoff als Beimischung zu Erdgas nach Italien gepumpt und dort in das europäischen Leitungsnetz eingespeiste werden

Quelle: Südkurier vom 8. Juni 2021

# Wasserstoffwirtschaft
# Global

# Einleitung und Ausgangslage Wasserstoff

# Globaler Wasserstoff (1)

## 3.7 Wasserstoff

Im Jahr 2024 stieg der weltweite Verbrauch von Wasserstoff im Vergleich zum Vorjahr um gut 2 % auf fast 100 Mt (IEA 2025i). Dieser Anstieg wurde durch den verstärkten Einsatz in den traditionellen Sektoren (Raffinerien, Industrie), die Wasserstoff als Rohstoff verwenden, vorangetrieben. Die Wasserstoffproduktion wurde weiterhin von fossilen Brennstoffen (Erdgas, Kohle) dominiert, ohne dabei das anfallende Kohlendioxid abzuscheiden und untertägig zu speichern. Die Produktion von emissionsarmem Wasserstoff stieg im Jahr 2024 um 10 %, macht aber immer noch weniger als 1 % der weltweiten Wasserstoffproduktion aus aufgrund hoher Kosten, geringer Nachfrage, zurückhaltender politischer Unterstützung und regulatorischer Rahmenbedingungen sowie einer langsamen Infrastrukturentwicklung (IEA 2025i).

Die im Jahr 2024 installierte Elektrolysekapazität lag weltweit bei 1,7 GW. Austral-Asien hatte hierbei die größte Kapazität von 917 MW, gefolgt von Europa mit 450 MW und Nordamerika mit 193 MW (Abb. 3-23). Die EU-27 hatte eine Kapazität von 361 MW. Der Hauptteil der Kapazität in Austral-Asien ist auf China zurückzuführen, das mit 805 MW die weltweit größte installierte Elektrolysekapazität hatte. China ist das einzige Land mit Großanlagen über 100 MW Kapazität. Die größte Anlage, die im Jahr 2024 in Betrieb war, ist ein Alkali-Elektrolyseur mit einer Kapazität von 260 MW. Die Vereinigten Staaten standen an zweiter Stelle mit 169 MW installierter Elektrolyseleistung, was 10 % der weltweit installierten Kapazität entspricht. Die im Jahr 2024 größte Anlage in den Vereinigten Staaten ist ein Elektrolyseur mit 40 MW Kapazität. Weitere 8 % der weltweit installierten Kapazität kommen aus Deutschland mit 131 MW. Die größte Anlage in Deutschland namens "Trailblazer" wurde 2024 von Air Liquide betrieben, steht in Oberhausen (Nordrhein-Westfalen) und hat eine Kapazität von 20 MW mit einer Produktionskapazität von bis zu 2.900 t erneuerbarem Wasserstoff pro Jahr (Air Liquide 2024). Südafrika weist 4 % der weltweit installierten Kapazität auf, wobei die gesamte Kapazität von 64 MW fast vollständig durch eine Anlage mit 60 MW gedeckt ist. Die größte Anlage Europas in 2024 war eine Anlage mit 24 MW in Norwegen, welches mit insgesamt 47 MW 3 % der weltweiten Kapazität ausmacht (IEA 2025j).

Den größten absoluten Zuwachs der installierten Kapazität im Vergleich zum Vorjahr erreichte China mit einem Zubau von 113 MW Elektrolysekapazität, gefolgt von den Vereinigten Staaten mit 87 MW, Südafrika mit 60 MW, Deutschland mit 45 MW und Norwegen mit 37 MW (IEA 2025j).

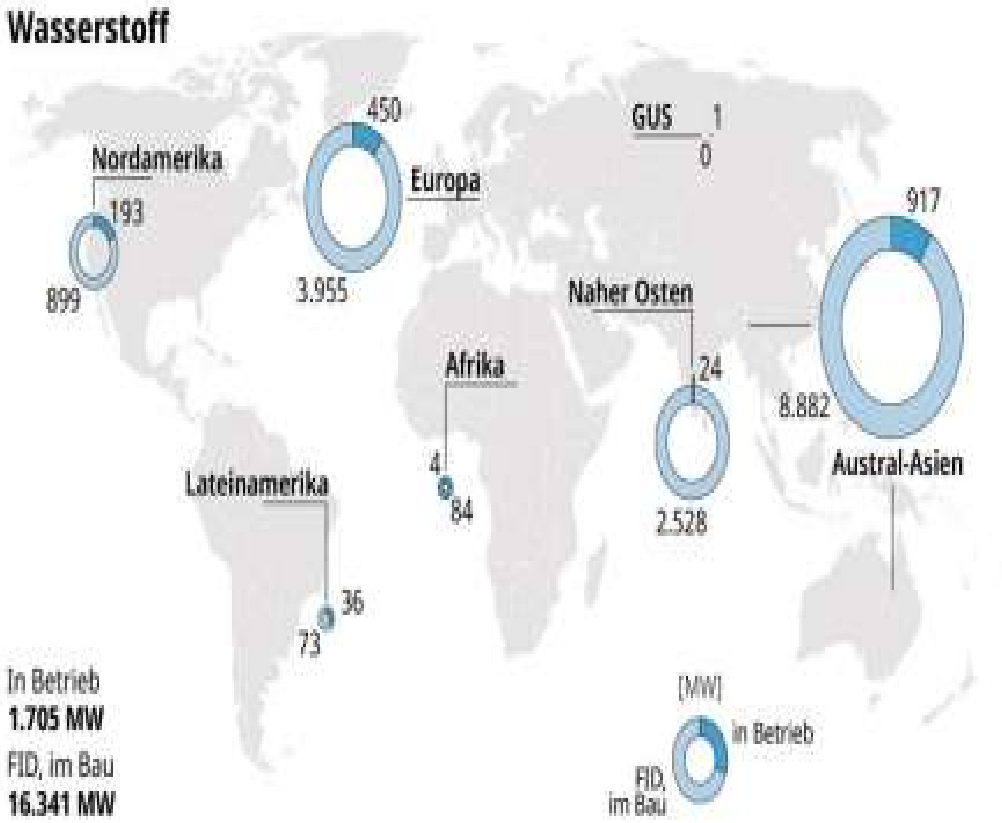



*Abbildung 3-23: Regionale Verteilung der Elektrolysekapazität in Betrieb sowie in Bau oder mit finaler Investitionsentscheidung (FID) (IEA 2025j).*

Quelle: BGR_BRG Energiestudie 2025, Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung , S. 57-59, Stand 09.2026

# Globaler Wasserstoff (2)

Das Gesamtvolumen der geplanten Elektrolyseanlagen, die sich im Jahr 2024 im Bau befanden oder eine finale Investitionsentscheidung (FID) hatten, lag weltweit bei 16,3 GW (Abb. 3-24); Austral-Asien hatte hierbei mit 8,9 GW den größten Anteil. Den zweitgrößten Anteil mit knapp halb so viel geplanter Kapazität hatte Europa mit rund 4 GW, gefolgt von dem Nahen Osten mit 2,5 GW und Nordamerika mit 0,9 GW. China liegt auch bei den geplanten Anlagen vorn mit 7 GW, was 43 % aller weltweit der Kapazität im Bau befindlichen Anlagen oder denen mit FID ausmacht. Saudi-Arabien hat 14 % (2,2 GW) aller weltweiten Anlagen im Bau oder mit einer FID, Indien 9 % (1,5 GW), Deutschland 8 % (1,3 GW) und Schweden ebenfalls 8 % (1,2 GW) (IEA 2025j).

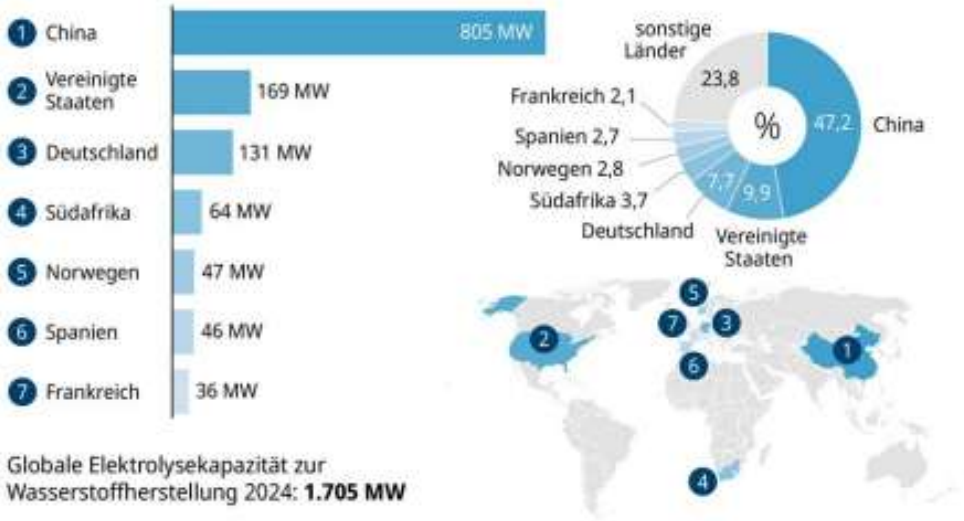


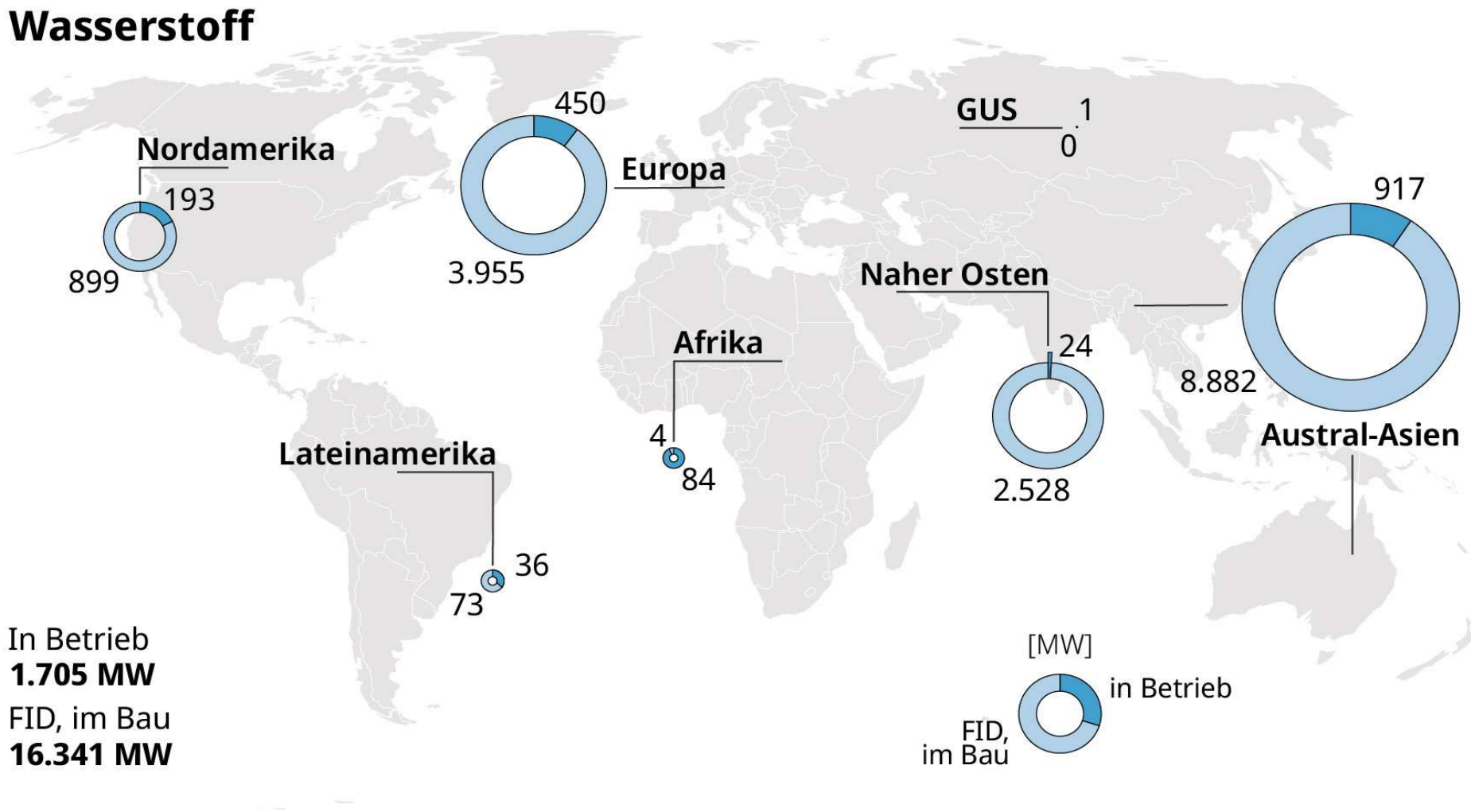

*Abbildung 3-24: Länder mit den größten Elektrolysekapazitäten in Betrieb (IEA 2025j).*

Quelle: BGR_BRG Energiestudie 2025, Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung , S. 57-59, Stand 09.2026

# Globaler Wasserstoff (3)

**Jahr 2024: In Betrieb: 1.705 MW; FID, im Bau 16.341 MW**

***Abbildung 3-23:*** *Regionale Verteilung der Elektrolysekapazität in Betrieb sowie in Bau oder mit finaler Investitionsentscheidung (FID) (IEA 2025i).*

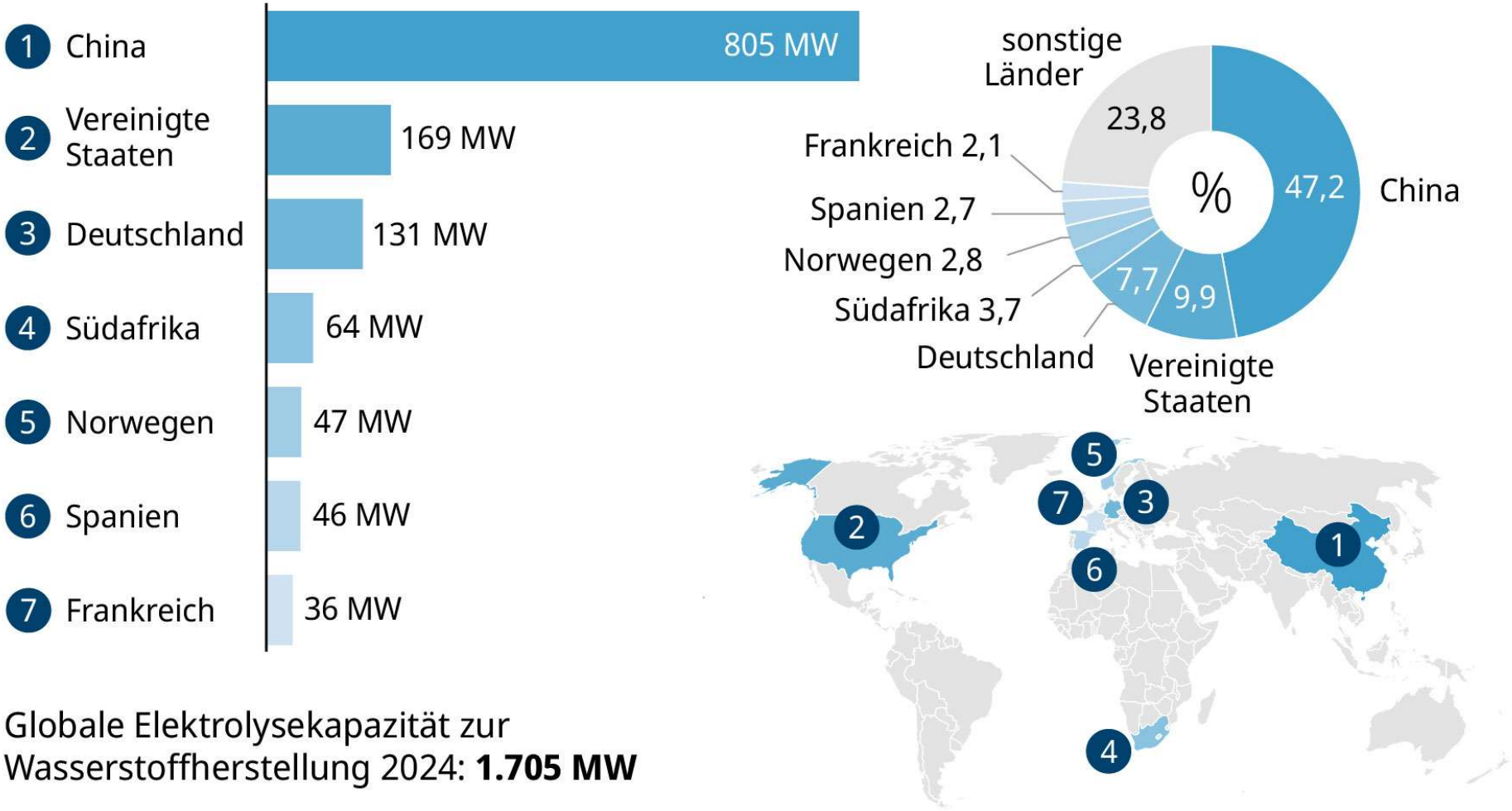



Quelle: BGR - BRG Abbildungen zu Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung , S. 39-40, Stand 05.2026

# Globaler Wasserstoff (4)

## Jahr 2024: Globale Elektrolysekapazität zur Wasserstoffherstellung 1.705 MW

***Abbildung 3-24: Länder mit den größten Elektrolysekapazitäten in Betrieb (IEA 2025i).***




Quelle: BGR - BRG Abbildungen zu Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung , S. 39-40, Stand 05.2026

# Globale Wasserstoffdaten (1)

## Elektrolysekapazität für Wasserstoffherstellung bis 2024

**A-46: Elektrolysekapazität für Wasserstoffherstellung [MW]**

| | Land/Region | Kapazität in Betrieb | Kapazität im Bau |
|---|---|---|---|
| Europa | Belgien | 1,3 | 27,5 |
| | Dänemark | 12,1 | 240,0 |
| | Deutschland | 85,6 | 1.316,7 |
| | Estland | 1,9 | - |
| | Finnland | 9,9 | 56,5 |
| | Frankreich | 29,5 | 284,5 |
| | Griechenland | 1,4 | - |
| | Irland | - | 48,2 |
| | Island | 7,0 | - |
| | Italien | 3,0 | 15,7 |
| | Niederlande | 9,5 | 234,5 |
| | Norwegen | 10,3 | 349,3 |
| | Österreich | 19,7 | 39,1 |
| | Polen | 2,1 | 10,0 |
| | Portugal | 1,7 | 187,3 |
| | Rumänien | - | 55,0 |
| | Schweden | 22,9 | 1.302,0 |
| | Schweiz | 8,4 | 2,3 |
| | Slowenien | 0,6 | 34,0 |
| | Spanien | 46,1 | 200,9 |
| | Tschechien | - | 30,0 |
| | Türkei | 0,3 | - |
| | Ungarn | 2,0 | 1,0 |
| | Vereinigtes Königreich | 9,6 | 423,4 |
| GUS | Russische Föderation | 1,0 | - |
| | Usbekistan | - | 20,0 |
| Afrika | Ägypten | 15,0 | - |
| | Marokko | - | < 0,05 |
| | Namibia | - | 16,3 |
| | Südafrika | 3,5 | 60,0 |
| Naher Osten | Iran | 0,2 | - |
| | Libanon | 0,1 | - |
| | Oman | - | 320,0 |
| | Saudi-Arabien | - | 2.200,0 |
| | V. Arab. Emirate | 1,3 | 5,8 |
| Austral-Asien | Australien | 4,0 | 425,5 |
| | China | 692,6 | 9.756,3 |
| | Cookinseln | 0,1 | - |
| | Indien | 5,5 | 1.341,5 |
| | Indonesien | 0,3 | 0,5 |
| | Japan | 17,7 | - |
| | Korea, Rep. | 0,1 | 4,3 |
| | Malaysia | 0,4 | 60,0 |
| | Neuseeland | 2,5 | 4,2 |
| | Singapur | 0,1 | - |
| | Taiwan | 25,0 | - |
| | Thailand | 1,0 | - |
| Nordam. | Kanada | 24,0 | 167,1 |
| | Vereinigte Staaten | 82,1 | 1.137,6 |
| Latein-amerika | Argentinien | 0,8 | - |
| | Brasilien | 4,5 | 65,0 |
| | Chile | 1,8 | 21,0 |
| | Costa Rica | < 0,05 | - |
| | Kolumbien | 0,2 | 53,0 |
| | Peru | 25,0 | - |
| | Welt | 1.193,4 | 20.515,9 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | Welt | 1.193,4 | 20.515,9 |
| | Europa | 284,8 | 4.857,9 |
| | GUS (+ GEO, UKR) | 1,0 | 20,0 |
| | Afrika | 18,5 | 76,3 |
| | Naher Osten | 1,6 | 2.525,8 |
| | Austral-Asien | 749,0 | 11.592,2 |
| | Nordamerika | 106,1 | 1.304,7 |
| | Lateinamerika | 32,4 | 139,0 |
| | OECD 2021 | 417,2 | 6.615,6 |
| | EU p. B. | 249,3 | 4.082,9 |
| | EU-28 | 258,9 | 4.506,3 |
| | G7 | 251,5 | 3.345,0 |
| | BRICS_2024 | 723,5 | 11.228,5 |

Quelle: BGR_BRG-Energiedaten 2025, Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung , Wasserstoff, Stand 05/2026

# Globale Wasserstoffdaten (2)

## Elektrolysekapazität zur Wasserstoffherstellung in Betrieb 2020-2024

**A-47: Elektrolysekapazität zur Wasserstoffherstellung, in Betrieb 2020 bis 2024 [MW]**

| Rang | Land/Region | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | Anteil [%] | Kumuliert | Veränderung 2023/2024 | Veränderung [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | China | 4,1 | 17,3 | 204,5 | 692,6 | 805,3 | 47,2 | 47,2 | 112,7 | 16,3 |
| 2 | Vereinigte Staaten | 1,6 | 13,4 | 20,8 | 82,1 | 169,2 | 9,9 | 57,2 | 87,1 | 106,2 |
| 3 | Deutschland | 26,3 | 47,1 | 68,6 | 85,6 | 131,0 | 7,7 | 64,8 | 45,4 | 53,0 |
| 4 | Südafrika | – | – | 3,5 | 3,5 | 63,5 | 3,7 | 68,6 | 60,0 | 1714,3 |
| 5 | Norwegen | 1,3 | 1,4 | 6,3 | 10,3 | 47,4 | 2,8 | 71,4 | 37,1 | 359,4 |
| 6 | Spanien | 0,4 | 0,1 | 28,1 | 46,1 | 46,1 | 2,7 | 74,1 | 0,0 | 0,0 |
| 7 | Frankreich | 1,0 | 2,9 | 11,1 | 29,5 | 35,7 | 2,1 | 76,2 | 6,2 | 20,8 |
| 8 | Dänemark | 3,7 | 4,1 | 9,9 | 12,1 | 31,1 | 1,8 | 78,0 | 19,0 | 156,7 |
| 9 | Schweden | < 0,05 | 4,8 | 5,8 | 22,9 | 29,9 | 1,8 | 79,7 | 7,0 | 30,5 |
| 10 | Peru | – | – | 19,4 | 25,0 | 25,0 | 1,5 | 81,2 | 0,0 | 0,0 |
| 11 | Taiwan | – | – | – | 25,0 | 25,0 | 1,5 | 82,7 | 0,0 | 0,0 |
| 12 | Indien | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,5 | 24,4 | 1,4 | 84,1 | 18,9 | 346,0 |
| 13 | Österreich | 6,0 | 6,0 | 10,7 | 19,7 | 24,0 | 1,4 | 85,5 | 4,3 | 22,1 |
| 14 | Kanada | 3,7 | 23,7 | 24,0 | 24,0 | 23,9 | 1,4 | 86,9 | -0,1 | -0,5 |
| 15 | Japan | 10,0 | 11,6 | 12,6 | 17,7 | 22,9 | 1,3 | 88,3 | 5,2 | 29,4 |
| 16 | Malaysia | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 21,1 | 1,2 | 89,5 | 20,7 | 5175,0 |
| 17 | Saudi-Arabien | – | – | – | – | 20,0 | 1,2 | 90,7 | – | – |
| 18 | Polen | < 0,05 | - | 2,1 | 2,1 | 19,7 | 1,2 | 91,8 | 17,6 | 836,7 |
| 19 | Schweiz | < 0,05 | 2,0 | 3,4 | 8,4 | 17,9 | 1,0 | 92,9 | 9,5 | 113,7 |
| 20 | Vereinigtes Königreich | 1,5 | 3,5 | 12,2 | 9,6 | 17,0 | 1,0 | 93,9 | 7,4 | 76,9 |
| – | sonstige Länder [30] | 11,9 | 24,4 | 40,6 | 71,3 | 104,6 | 6,1 | 100,0 | 33,3 | 46,7 |
| – | Welt | 77,1 | 167,8 | 489,4 | 1.193,4 | 1.704,7 | 100,0 | – | 511,3 | 42,8 |
| – | Europa | 47,6 | 90,1 | 189,5 | 284,8 | 450,4 | 26,4 | – | 165,6 | 58,1 |
| – | GUS (+ GEO) | – | – | 0,2 | 1,0 | 1,0 | 0,1 | – | 0,0 | 0,0 |
| – | Afrika | – | – | 3,5 | 18,5 | 83,5 | 4,9 | – | 65,0 | 351,4 |
| – | Naher Osten | 0,3 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 23,7 | 1,4 | – | 22,1 | 1381.3 |
| – | Austral-Asien | 21,9 | 38,1 | 229,5 | 749,0 | 917,0 | 53,8 | – | 167,9 | 22,4 |
| – | Nordamerika | 5,4 | 37,1 | 44,9 | 106,1 | 193,1 | 11,3 | – | 87,0 | 82,0 |
| – | Lateinamerika | 1,9 | 0,9 | 20,3 | 32,4 | 36,0 | 2,1 | – | 3,6 | 11,2 |
| – | OECD | 64,2 | 141,6 | 252,6 | 417,2 | 678,6 | 39,8 | – | 261,4 | 62,7 |
| – | EU-27 | 44,8 | 83,0 | 161,0 | 249,3 | 360,9 | 21,2 | – | 111,6 | 44,8 |
| – | EU-28 | 46,2 | 86,5 | 173,2 | 258,9 | 378,0 | 22,2 | – | 119,0 | 46,0 |
| – | G7 | 45,2 | 104,4 | 151,8 | 251,5 | 402,6 | 23,6 | – | 151,2 | 60,1 |
| – | BRICS-Staaten | 9,6 | 24,0 | 214,9 | 723,5 | 917,2 | 53,8 | – | 193,8 | K36A7:K36A1A |

Quelle: BGR_BRG-Energiedaten 2025, Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung , Wasserstoff, Stand 05/2026

# Globale Wasserstoffdaten (3)

## Elektrolysekapazität zur Wasserstoffherstellung im Bau 2024

**A-48: Elektrolysekapazität zur Wasserstoffherstellung, im Bau 2024 [MW]**

| Rang | Land/Region | MW | Anteil [%] | Kumuliert |
|---|---|---|---|---|
| 1 | China | 6.958,2 | 42,6 | 42,6 |
| 2 | Saudi-Arabien | 2.200,0 | 13,5 | 56,0 |
| 3 | Indien | 1.533,3 | 9,4 | 65,4 |
| 4 | Deutschland | 1.318,2 | 8,1 | 73,5 |
| 5 | Schweden | 1.244,0 | 7,6 | 81,1 |
| 6 | Vereinigte Staaten | 771,5 | 4,7 | 85,8 |
| 7 | Niederlande | 413,5 | 2,5 | 88,4 |
| 8 | Oman | 320,0 | 2,0 | 90,3 |
| 9 | Frankreich | 268,0 | 1,6 | 92,0 |
| 10 | Vietnam | 240,0 | 1,5 | 93,4 |
| 11 | Österreich | 146,0 | 0,9 | 94,3 |
| 12 | Kanada | 127,1 | 0,8 | 95,1 |
| 13 | Norwegen | 111,0 | 0,7 | 95,8 |
| 14 | Portugal | 104,0 | 0,6 | 96,4 |
| 15 | Vereinigtes Königreich | 90,5 | 0,6 | 97,0 |
| 16 | Brasilien | 67,0 | 0,4 | 97,4 |
| 17 | Malaysia | 60,0 | 0,4 | 97,7 |
| 18 | Rumänien | 55,0 | 0,3 | 98,1 |
| 19 | Australien | 53,4 | 0,3 | 98,4 |
| 20 | Spanien | 50,5 | 0,3 | 98,7 |
| – | sonstige Länder [16] | 209,8 | 1,3 | 100,0 |
| – | Welt | 16.340,9 | 100,0 | – |
| – | Europa | 3.954,7 | 24,2 | – |
| – | Afrika | 4,3 | < 0,05 | – |
| – | Naher Osten | 2.528,3 | 15,5 | – |
| – | Austral-Asien | 8.882,4 | 54,4 | – |
| – | Nordamerika | 898,6 | 5,5 | – |
| – | Lateinamerika | 72,7 | 0,4 | – |
| – | OECD | 4.894,4 | 30,0 | – |
| – | EU-27 | 3.751,2 | 23,0 | – |
| – | EU-28 | 3.841,7 | 23,5 | – |
| – | G7 | 2.629,0 | 16,1 | – |
| – | BRICS-Staaten | 8.566,8 | 52,4 | – |

Quelle: BGR_BRG-Energiedaten 2025, Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung , Wasserstoff, Stand 05/2026

# Globale Entwicklung der Wasserstofftechnologie hin zu emissionsarmen Lösungen wie der Elektrolyse, Stand Januar 2023

**Laut einer gemeinsamen Patentstudie des Europäischen Patentamts (EPA) und der Internationalen Energieagentur (IEA) verlagert sich die Entwicklung der Wasserstofftechnologie hin zu emissionsarmen Lösungen wie der Elektrolyse.**

Der Bericht ist der erste seiner Art und verwendet globale Patentdaten, um eine umfassende aktuelle Analyse der Innovation in allen Wasserstofftechnologien bereitzustellen. Es deckt die gesamte Bandbreite an Technologien ab, von der Wasserstoffversorgung über die Speicherung, Verteilung und Umwandlung bis hin zu Endverbrauchsanwendungen.
„Wasserstoff aus emissionsarmen Quellen kann eine wichtige Rolle bei der Umstellung auf saubere Energie spielen und das Potenzial haben, fossile Brennstoffe in Industrien zu ersetzen, in denen es nur wenige saubere Alternativen gibt, wie z. B. Langstreckentransport und Düngemittelproduktion“, sagte IEA-Exekutivdirektor Fatih Birol. „Diese Studie zeigt, dass Innovatoren auf die Notwendigkeit wettbewerbsfähiger Wasserstoffversorgungsketten reagieren, identifiziert aber auch Bereiche – insbesondere bei den Endverbrauchern –, in denen mehr Anstrengungen erforderlich sind. Wir werden Regierungen weiterhin dabei unterstützen, Innovationen für sichere, widerstandsfähige und nachhaltige saubere Energietechnologien voranzutreiben.“

„Die Nutzung des Potenzials von Wasserstoff ist ein Schlüsselelement der europäischen Strategie, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen“, sagte EPA-Präsident António Campinos. „Aber wenn Wasserstoff eine wichtige Rolle bei der Reduzierung von CO2-Emissionen spielen soll, sind Innovationen in einer Reihe von Technologien dringend erforderlich. Dieser Bericht zeigt einige ermutigende Übergangsmuster in Ländern und Industriezweigen auf, einschließlich des großen Beitrags Europas zur Entstehung neuer Wasserstofftechnologien. Es unterstreicht auch den Beitrag von Start-ups zur Wasserstoffinnovation und ihre Abhängigkeit von Patenten, um ihre Erfindungen auf den Markt zu bringen.“

Die Studie stellt die wichtigsten Trends in Wasserstofftechnologien von 2011 bis 2020 dar, gemessen an internationalen Patentfamilien (IPFs), von denen jede eine hochwertige Erfindung darstellt, die bei zwei oder mehr Patentämtern weltweit zum Patent angemeldet wurde. Der Bericht stellt fest, dass die weltweite Patentierung von Wasserstoff von der Europäischen Union und Japan angeführt wird, die 28 % bzw. 24 % aller in diesem Zeitraum eingereichten IPFs ausmachen, mit einem erheblichen Wachstum in den letzten zehn Jahren. Die führenden Länder in Europa sind Deutschland (11 % der weltweiten Gesamtzahl), Frankreich (6 %) und die Niederlande (3 %).

Die Vereinigten Staaten sind mit 20 % aller wasserstoffbezogenen Patente das einzige große Innovationszentrum, in dem die internationalen Wasserstoffpatentanmeldungen in den letzten zehn Jahren zurückgegangen sind. Die internationale Patentaktivität bei Wasserstofftechnologien blieb in Südkorea und China bescheiden, nimmt aber zu. Neben diesen fünf Hauptinnovationszentren sind das Vereinigte Königreich, die Schweiz und Kanada weitere Länder, die erhebliche Mengen an Wasserstoffpatenten generieren.

Technologien zur Wasserstofferzeugung machten im Zeitraum 2011-2020 die größte Anzahl von Wasserstoffpatenten aus. Während die weltweite Wasserstoffproduktion derzeit fast vollständig auf fossilen Brennstoffen basiert, zeigen die Patentierungsdaten, dass emissionsarme Innovationen in allen Segmenten der Wasserstoff-Wertschöpfungskette mehr als doppelt so viele internationale Patente generierten wie etablierte Technologien.
Durch Klimabedenken motivierte Technologien machten im Jahr 2020 fast 80 % aller Patente im Zusammenhang mit der Wasserstoffproduktion aus, wobei das Wachstum hauptsächlich durch einen starken Anstieg der Innovation in der Elektrolyse getrieben wurde. Die innovativsten Regionen konkurrieren nun um die Ausrichtung der ersten industriellen Einführungsphase, wobei die Daten darauf hindeuten, dass Europa als Standort für Investitionen in neue Produktionskapazitäten für Elektrolyseure einen Vorteil gewinnt.
Unter den vielen potenziellen Endverbrauchsanwendungen von Wasserstoff steht der Automobilsektor seit langem im Mittelpunkt der Innovation, und die Patentierung in diesem Sektor nimmt weiter zu, hauptsächlich angeführt von Japan. Eine ähnliche Dynamik ist in anderen Endverbrauchsanwendungen noch nicht sichtbar, trotz konzertierter politischer und medialer Aufmerksamkeit in den letzten Jahren auf das Potenzial von Wasserstoff zur Dekarbonisierung des Fernverkehrs, der Luftfahrt, der Stromerzeugung und der Heizung. Nationale Netto-Null-Emissionsverpflichtungen können nicht erreicht werden, ohne die unverminderte Nutzung fossiler Brennstoffe in diesen Sektoren anzugehen. Ein Lichtblick ist ein jüngster Anstieg bei der Patentierung der Verwendung von Wasserstoff zur Dekarbonisierung der Stahlproduktion – möglicherweise als Reaktion auf den Konsens nach dem Pariser Abkommen, dass der Sektor radikale Lösungen braucht, um die Emissionen schnell zu senken.

Bei den etablierten Wasserstofftechnologien wird die Innovation von der europäischen chemischen Industrie dominiert, die sich mit ihrer Expertise in diesem Sektor auch einen Vorsprung bei klimamotivierten Technologien wie Elektrolyse und Brennstoffzellen verschafft hat. Auch Automobilunternehmen sind aktiv, nicht nur für Fahrzeugtechnik. Dahinter generierten Universitäten und öffentliche Forschungsinstitute 13,5 % aller wasserstoffbezogenen internationalen Patente in den Jahren 2011-2020, angeführt von französischen und koreanischen Institutionen, mit einem Schwerpunkt auf emissionsarmen Wasserstoffproduktionsmethoden wie der Elektrolyse.

Die Studie stellt fest, dass mehr als die Hälfte der 10 Mrd. USD an Risikokapitalinvestitionen in Wasserstoffunternehmen im Zeitraum 2011-2020 an Start-ups mit Patenten gingen, obwohl sie weniger als ein Drittel der Start-ups im Datensatz des Berichts ausmachten. Der Besitz eines Patents ist ein guter Indikator dafür, ob ein Start-up weiterhin Finanzmittel anzieht: Mehr als 80 % der Spätphaseninvestitionen in Wasserstoff-Start-ups im Zeitraum 2011-2020 gingen an Unternehmen, die bereits eine Patentanmeldung in Bereichen wie eingereicht hatten Elektrolyse, Brennstoffzellen oder emissionsarme Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff aus Gas.

Quelle: IEA – Hydrogen Patents For a Clean Energy future, Januar 2023

# Globaler Wasserstoff $H_2$ (1)

**Laut dem neuen IEA-Bericht „*Die Zukunft des Wasserstoffs: Die Chancen von heute nutzen*“ kann durch internationale Maßnahmen Wasserstoff zu einem Schlüsselelement für eine saubere und sichere Energiezukunft ausgebaut werden.**

KARUIZAWA, Japan - Die Welt hat eine wichtige Gelegenheit, das enorme Potenzial von Wasserstoff zu nutzen, um ein entscheidender Bestandteil einer nachhaltigeren und sichereren Energiezukunft zu werden, sagte die Internationale Energieagentur heute in einem wichtigen neuen Bericht.

Die eingehende Studie, die den aktuellen Stand von Wasserstoff analysiert und Hinweise auf seine künftige Entwicklung gibt, wird von Dr. Fatih Birol, dem Exekutivdirektor der IEA, zusammen mit Herrn Hiroshige Seko, Japans Minister für Wirtschaft, Handel und Industrie, über das Projekt in Auftrag gegeben anlässlich des Treffens der G20-Minister für Energie und Umwelt in Karuizawa, in Japan. Der Bericht - *Die Zukunft des Wasserstoffs: Die Chancen von heute nutzen* - *stellt* fest, dass sauberer Wasserstoff derzeit von Regierungen und Unternehmen auf der ganzen Welt nachdrücklich unterstützt wird und die Zahl der politischen Maßnahmen und Projekte rapide zunimmt.

Wasserstoff kann bei der Bewältigung verschiedener kritischer Energieprobleme helfen, einschließlich der Speicherung der variablen Leistung von erneuerbaren Energien wie Solar-PV und Wind, um die Nachfrage besser zu decken. Es bietet Möglichkeiten zur Dekarbonisierung einer Reihe von Sektoren - einschließlich des Fernverkehrs, der Chemie sowie der Eisen- und Stahlindustrie -, in denen es schwierig ist, die Emissionen sinnvoll zu senken. Es kann auch dazu beitragen, die Luftqualität zu verbessern und die Energiesicherheit zu verbessern.

Eine Vielzahl von Brennstoffen kann Wasserstoff produzieren, einschließlich erneuerbarer Energien, Kernkraft, Erdgas, Kohle und Öl. Wasserstoff kann wie Flüssigerdgas (LNG) in Pipelines als Gas oder in flüssiger Form auf Schiffen transportiert werden. Es kann auch in Elektrizität und Methan umgewandelt werden, um Haushalte und die Futtermittelindustrie anzutreiben, sowie in Kraftstoffe für Autos, Lastwagen, Schiffe und Flugzeuge.

"Wasserstoff erfreut sich heute einer beispiellosen Dynamik, die von Regierungen angetrieben wird, die sowohl Energie importieren als auch exportieren, sowie von der Industrie für erneuerbare Energien, Strom- und Gasversorgungsunternehmen, Autoherstellern, Öl- und Gasunternehmen, großen Technologieunternehmen und Großstädten", sagte Dr. Birol. "Die Welt sollte diese einmalige Chance nicht verpassen, Wasserstoff zu einem wichtigen Bestandteil unserer sauberen und sicheren Energiezukunft zu machen.„

Um auf dieser Dynamik aufzubauen, enthält der IEA-Bericht sieben wichtige Empfehlungen, die Regierungen, Unternehmen und anderen Interessenträgern dabei helfen sollen, Wasserstoffprojekte auf der ganzen Welt zu vergrößern. Dazu gehören vier Bereiche, in denen Maßnahmen heute dazu beitragen können, die Grundlage für das Wachstum einer globalen Industrie für sauberen Wasserstoff in den kommenden Jahren zu legen:

1. Industriehäfen zu Nervenzentren für den verstärkten Einsatz von sauberem Wasserstoff machen;
2. Aufbau auf bestehender Infrastruktur wie Erdgaspipelines;
3. Ausweitung der Nutzung von Wasserstoff im Verkehr durch den Antrieb von Pkw, Lkw und Bussen, die auf Schlüsselrouten verkehren;
4. Start der ersten internationalen Schifffahrtsrouten des Wasserstoffhandels.

# Globaler Wasserstoff $H_2$ (2)

Der Bericht stellt fest, dass Wasserstoff immer noch vor großen Herausforderungen steht. Die Erzeugung von Wasserstoff aus kohlenstoffarmer Energie ist derzeit kostspielig, die Entwicklung der Wasserstoffinfrastruktur verläuft schleppend und hält die breite Akzeptanz zurück, und einige Vorschriften schränken derzeit die Entwicklung einer sauberen Wasserstoffbranche ein.

Wasserstoff wird bereits heute industriell genutzt, aber fast ausschließlich aus Erdgas und Kohle. Seine Produktion, hauptsächlich für die chemische Industrie und die Raffinerieindustrie, ist für 830 Millionen Tonnen $CO_2$ -Emissionen pro Jahr verantwortlich. Dies entspricht den jährlichen CO2-Emissionen des Vereinigten Königreichs und Indonesiens zusammen.

**Die Reduzierung der Emissionen aus der bestehenden Wasserstoffproduktion ist eine Herausforderung, aber auch eine Chance, den Umfang von sauberem Wasserstoff weltweit zu erhöhen.**

- Ein Ansatz besteht darin, das $CO_2$ aus der Wasserstofferzeugung aus fossilen Brennstoffen einzufangen und zu speichern oder zu nutzen .Es gibt derzeit mehrere Industrieanlagen auf der ganzen Welt, die dieses Verfahren anwenden, und weitere sind in der Pipeline, aber eine viel größere Anzahl ist erforderlich, um signifikante Auswirkungen zu erzielen.
- Ein weiterer Ansatz besteht darin, dass die Industrie eine größere Versorgung mit Wasserstoff aus sauberem Strom sicherstellt. In den letzten zwei Jahrzehnten wurden mehr als 200 Projekte in Betrieb genommen, um Strom und Wasser in Wasserstoff umzuwandeln, um Emissionen aus den Bereichen Verkehr, Erdgasverbrauch und Industrie zu reduzieren oder um die Integration erneuerbarer Energien in das Energiesystem zu unterstützen.
- Die Ausweitung des Einsatzes von sauberem Wasserstoff in anderen Sektoren wie Autos, Lastwagen, Stahl und Heizgebäuden ist eine weitere wichtige Herausforderung. Derzeit sind weltweit rund 11.200 Autos mit Wasserstoffantrieb unterwegs. Bestehende Regierungsziele fordern, dass diese Zahl bis 2030 dramatisch auf 2,5 Millionen ansteigt.
- Die politischen Entscheidungsträger müssen sicherstellen, dass die Marktbedingungen für die Erreichung dieser ehrgeizigen Ziele gut geeignet sind. Die jüngsten Erfolge bei Photovoltaik-, Wind-, Batterie- und Elektrofahrzeugen haben gezeigt, dass politische und technologische Innovationen die Kraft haben, eine globale saubere Energieindustrie aufzubauen.
- Als weltweit führende Energiebehörde, die alle Brennstoffe und Technologien abdeckt, ist die IEA ideal positioniert, um die globale Politik für Wasserstoff mitzugestalten.
- "Wir sind sehr stolz darauf, die Breite und Tiefe der Energiekompetenz der IEA nutzen zu können, um die strengen Analysen für diese Studie in Zusammenarbeit mit Regierungen, Industrie und akademischen Forschern durchzuführen", sagte Dr. Birol. "Wir sind Japan dankbar, dass es während seiner Präsidentschaft der G20 darum gebeten hat, diesen Bericht zu erstellen, in dem pragmatische Sofortmaßnahmen zur Förderung der Wasserstoffentwicklung empfohlen werden."
- Über diesen Bericht hinaus wird sich die IEA weiterhin auf Wasserstoff konzentrieren und ihr Fachwissen weiter ausbauen, um Fortschritte zu überwachen und Leitlinien zu Technologien, Strategien und Marktdesign bereitzustellen. Die IEA wird weiterhin eng mit den Regierungen und allen anderen Interessengruppen zusammenarbeiten, um die Bemühungen zu unterstützen, das große Potenzial von Wasserstoff optimal auszuschöpfen.

Quelle: IEA – PM 14. Juni 2019

# Die Zukunft für sauberen Wasserstoff hat bereits begonnen (1)

*Herr van Hulst, der Wasserstoffbeauftragte des niederländischen Ministeriums für Wirtschaft und Klimapolitik, war zuvor Vorsitzender des IEA-Verwaltungsrats (2017-2018). Er leitet auch das hochrangige Beratungsgremium für die bevorstehende Wasserstoffstudie der IEA. Der Bericht soll die japanische Präsidentschaft der G20 unterstützen und wird im Juni veröffentlicht.*

Es besteht ein wachsender internationaler Konsens darüber, dass sauberer Wasserstoff eine Schlüsselrolle beim weltweiten Übergang zu einer nachhaltigen Energiezukunft spielen wird. Es ist von entscheidender Bedeutung, dazu beizutragen, die Kohlenstoffemissionen der Industrie und des Schwertransports zu verringern und langfristige Energiespeicher in großem Maßstab bereitzustellen.

Wasserstoff ist ein vielseitiger Energieträger, der aus einer Vielzahl von Quellen hergestellt und im gesamten Energiesektor vielfältig eingesetzt werden kann. Es könnte sich in seiner kohlenstoffarmen Form zu einem Wegbereiter entwickeln, doch seine weitverbreitete Akzeptanz steht vor Herausforderungen.

Die Internationale Energieagentur bereitet eine umfassende neue Studie vor, um den Stand des Wasserstoffs, seine Wirtschaftlichkeit und sein Potenzial zu bewerten. Der Bericht soll Mitte Juni veröffentlicht werden und ist ein wichtiger Beitrag zur japanischen G20-Präsidentschaft im Jahr 2019.

Forscher haben herausgefunden, dass sauberer Wasserstoff immer noch zu viel kostet, um weit verbreitet werden zu können. Nach Schätzungen könnten die Preise bis in die 2030er Jahre nicht ausreichend gesunken sein. Trotz der Unsicherheit über die Zukunft von sauberem Wasserstoff gibt es vielversprechende Anzeichen dafür, dass er früher als erwartet erschwinglicher werden könnte.

**Woher der Wasserstoff kommt, ist wichtig. Derzeit wird es hauptsächlich industriell aus Erdgas hergestellt, das erhebliche CO2-Emissionen verursacht. Dieser Typ ist als "grauer" Wasserstoff bekannt.**

**Eine sauberere Version ist „blauer“ Wasserstoff**, für den die Kohlenstoffemissionen erfasst und gespeichert oder wiederverwendet werden.
**Der sauberste von allen ist „grüner“ Wasserstoff,** der aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen wird, ohne dass überhaupt Kohlendioxidemissionen entstehen.
**CO2-Emissionen können grauen Wasserstoff verteuern.**

Derzeit ist **grauer Wasserstoff** billiger als die beiden anderen. Der Preis wird auf ca. 1,50 € pro Kilo geschätzt. Haupttreiber ist der weltweit unterschiedliche Erdgaspreis.
Zu oft wird angenommen, dass der Preis für grauen Wasserstoff auf absehbare Zeit auf diesem relativ niedrigen Niveau bleiben wird. Dies ignoriert die von der IEA prognostizierte strukturelle Erhöhung der Erdgaspreise aufgrund der Marktkräfte. Und noch wichtiger ist, dass die potenzielle Volatilität der Gaspreise nicht berücksichtigt wird, wie in Europa gezeigt wurde, wo sie stärker an die Spotmärkte gebunden sind.
Darüber hinaus verursachen die CO2-Emissionen von grauem Wasserstoff in immer mehr Ländern weltweit Kosten. Im Emissionshandelssystem der Europäischen Union liegt der CO2-Preis zwischen 20 und 25 Euro pro Tonne.

**Eine wachsende Zahl von EU-Ländern möchte einen CO2-Mindestpreis festlegen, der in den nächsten 10 Jahren schrittweise auf etwa 30 bis 40 EUR pro Tonne ansteigt. Das heißt, die CO2-Kosten könnten den Preis für ein Kilo grauen Wasserstoff in Europa irgendwann um fast 0,50 Euro erhöhen und den Gesamtpreis auf rund 2 Euro bringen.**

In einer zunehmend kohlenstoffarmen Welt sollten wir auch die nachlassende gesellschaftliche Akzeptanz der fortgesetzten CO2-Emission bei der Herstellung und Verwendung von grauem Wasserstoff in der Industrie nicht aus den Augen verlieren.
Blauer Wasserstoff kann die Lücke schließen.

# Die Zukunft für sauberen Wasserstoff hat bereits begonnen (2)

Der Preis für blauen Wasserstoff wird auch hauptsächlich von den Erdgaspreisen beeinflusst. Der zweitwichtigste Treiber sind jedoch die Kosten für die Erfassung und Wiederverwendung oder Speicherung der Kohlenstoffemissionen.
Aktuelle Schätzungen gehen davon aus, dass der Preis für die Abscheidung, Nutzung und Speicherung von Kohlenstoff (CCUS) zwischen 50 und 70 EUR pro Tonne CO2 liegt. Der Preis ist in bestimmten Fällen wie der Ammoniakproduktion niedriger.
Damit liegt der derzeitige Preis für blauen Wasserstoff in Europa etwas über dem Preis für grauen Wasserstoff. Dieser Abstand wird sich jedoch verringern, wenn der Preis für CO2-Emissionen in den kommenden Jahren weiter steigt.
Sobald der CCUS-Prozess in Anlagen mit blauem Wasserstoff skaliert und standardisiert ist, dürften die Kosten sinken.
Innovationen sollten letztendlich mehr Möglichkeiten für die Nutzung von CO2 in der Industrie eröffnen, was die Kosten von CCUS weiter senken könnte. Diese Entwicklungen könnten den Preis für blauen Wasserstoff früher an den Preis für grauen Wasserstoff annähern, als oft angenommen wird.

## Der Preis für grünen Wasserstoff hängt von erneuerbaren Energien ab

Für den Preis für grünen Wasserstoff, der derzeit zwischen 3,50 und 5 Euro pro Kilo liegt, spielen verschiedene Faktoren eine Rolle.
Das erste sind die Kosten der Elektrolyse, der Prozess, bei dem Wasserstoff aus Wasser unter Verwendung erneuerbarer Energien hergestellt wird. Die Gesamtkapazität der globalen Elektrolyse ist derzeit begrenzt und kostspielig. Die meisten Branchenexperten gehen davon aus, dass eine deutliche Erhöhung der Elektrolysekapazität die Kosten in den nächsten 10 Jahren um rund 70% senken wird.

Der kritischste Faktor für die Kosten von grünem Wasserstoff ist jedoch der Preis des im Elektrolyseprozess verwendeten grünen Stroms.
Die Kosten für die Erzeugung von Solar- und Windenergie sind im letzten Jahrzehnt spektakulär gesunken. Dies sollte zu Vorsicht darüber führen, was in Zukunft mit den Kosten für grünen Wasserstoff geschehen wird. Ähnlich wie bei Wind und Sonne kann es viel schneller sinken, als Experten jetzt erwarten.
In sonnen- und windreichen Ländern und Regionen wie dem Nahen Osten, Nordafrika und Lateinamerika sind die Ökostrompreise auf rund 2 Cent pro kWh gesunken. Experten gehen davon aus, dass sie in naher Zukunft noch weiter sinken werden. Der frühere US-Energieminister Steven Chu schlug kürzlich vor, die Preise könnten bald auf 1,5 US-Cent (1,3 Euro-Cent) pro kWh sinken.
In diesen Ländern und Regionen besteht eine echte Aussicht auf die Massenproduktion von Ökostrom für den Hausgebrauch - und auch von Ökowasserstoff für den Hausgebrauch und für den Export.

## Auf dem Weg zu einem globalen Markt für sauberen Wasserstoff?

Grüner Wasserstoff kann prinzipiell in die ganze Welt verschifft werden, an Orte, die mit billigen erneuerbaren Energiequellen weniger gut ausgestattet sind.
In Japan laufen mehrere wichtige Pilotprojekte - mit Ländern wie Australien, Saudi-Arabien und Brunei -, um herauszufinden, wie grüner oder blauer Wasserstoff über große Entfernungen mit dem Schiff am besten transportiert werden kann.
Es ist noch zu früh, um zu sagen, wie sich die Transportkosten entwickeln werden und wie schnell sich dieser globale Wasserstoffmarkt entwickeln könnte. Je nach technologischem Fortschritt könnte in den kommenden Jahrzehnten ein Markt ähnlich dem für Flüssigerdgas das Licht der Welt erblicken.

## Was bedeutet das alles für die Kosten für grünen Wasserstoff in Europa?

Erstens, dass es in der Tat mehr Zeit in Anspruch nehmen kann, bis die Kosten für grünen Wasserstoff annähernd die Kosten für grauen und blauen Wasserstoff erreichen. Das Scale-up der Elektrolyse muss die Kosten senken. Noch kritischer wird die Massenproduktion große Mengen billigen Ökostroms erfordern.
Die geplante Ausweitung der Offshore-Windproduktion in Nordwesteuropa wird voraussichtlich in den nächsten 10 bis 15 Jahren einsetzen. In den frühen 2030er Jahren könnte in diesem Teil der Welt mit der Massenentfaltung von grünem Wasserstoff begonnen worden sein.
Einige große Industrieunternehmen wie Engie haben sich ein explizites Kostenziel für grünen Wasserstoff gesetzt, um bis 2030 die Netzparität mit grauem Wasserstoff zu erreichen. Die japanische Regierung hat auch strenge Kostenziele für sauberen Wasserstoff bis 2040 formuliert.

# Die Zukunft für sauberen Wasserstoff hat bereits begonnen (3)

Diese Ambitionen sind langfristig, schließen jedoch eine signifikante Verwendung von grünem Wasserstoff in den nächsten Jahren nicht aus. Europaweit geschieht dies bereits vor Ort, wo Wind- oder Solarkraftwerke vor Ort grünen Wasserstoff für Anwendungen in Industrie, Verkehr oder Energiespeicherung erzeugen.

In einigen Fällen haben kreative Unternehmen nachhaltige Business Cases gefunden. Das schwedische Energieunternehmen Vattenfall hat berechnet, dass die Herstellung eines Autos aus CO2-freiem Stahl (unter Verwendung von grünem Wasserstoff) für 20.000 € anstelle von normalem Stahl den Preis nur um 200 € erhöhen würde. Dies deutet darauf hin, dass Premiummärkte für Verbraucher entwickelt werden könnten, die bereit sind, für Produkte, die mit grünem Wasserstoff hergestellt werden, 1% bis 3% mehr zu zahlen.

Das dänische Energieunternehmen Orsted gab kürzlich bekannt, dass sein Angebot für eine Offshore-Windauktion in den Niederlanden die Produktion von grünem Wasserstoff für industrielle Zwecke umfasst. Das zeigt, dass gerade neue Geschäftsmodelle erfunden werden und positive Überraschungen in Sicht sind.

## Die Zukunft von Wasserstoff durch Politik gestalten

Die Energiepolitik kann durch Maßnahmen wie Mindest-CO2-Preise eindeutig einen großen Unterschied ausmachen. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Art und Weise, wie die Behörden die Energiewende fördern können.

Die niederländische Regierung hat die Ausweitung ihres kohlenstoffarmen Programms angekündigt. Derzeit ist es auf Subventionen für die Erzeugung erneuerbarer Energien beschränkt, wird jedoch in Kürze um alle möglichen kostengünstigen Möglichkeiten zur CO2-Reduzierung, einschließlich CCUS, erweitert. Dies wird die marktorientierte Aktivierung von Projekten für blauen Wasserstoff und, abhängig von der Entwicklung der Kosten, hoffentlich die von Projekten für grünen Wasserstoff in naher Zukunft unterstützen.

Frankreichs Wasserstoffstrategie enthält vorläufige Ziele zur Ökologisierung der derzeitigen Verwendung von grauem Wasserstoff in der Industrie. Die französische Regierung hat sich zum Ziel gesetzt, 2022 10% grünen Wasserstoff in der Industrie und 2027 20% bis 40% in der Industrie zu verbrauchen.
Ein Vorschlag einiger Akteure der deutschen Industrie (Shell, Siemens, Tennet) zielt darauf ab, kombinierte Auktionen von Offshore-Windfeldern für die Elektrolyse zu organisieren, bei denen die Wertschöpfungskette in einer einzigen Ausschreibung verbunden wäre.

Emissionsfreie Standards für Fahrzeuge werden in vielen Städten und Ländern immer beliebter. Sie sind ein starker Treiber für Anwendungen mit sauberem Wasserstoff im Transportwesen, bei denen Diesel und Benzin rasch an Akzeptanz verlieren. Dies kann dazu beitragen, die Elektrolysekosten noch schneller zu senken.
Viele aktuelle Diskussionen in Europa beinhalten auch Vorschläge wie die Verpflichtung, sauberes Gas (einschließlich Wasserstoff) in die Gasnetze einzumischen. Dies würde dazu beitragen, den Markt für sauberen Wasserstoff in Europa anzukurbeln, selbst wenn wir auf niedrigem Niveau beginnen.

Weitere wichtige politische Instrumente sind die in der Mission Innovation-Initiative vereinbarte Verdoppelung von FuE in sauberem Wasserstoff ; Abschaffung der Subventionen für fossile Brennstoffe; Herkunftsnachweise für blauen und grünen Wasserstoff; günstige Umsetzung der europäischen Richtlinie über erneuerbare Energien (REDII); gemeinsame Qualitäts- und Sicherheitsstandards; und abgestimmte regulatorische Ansätze, welche Rollen verschiedene Marktteilnehmer in diesem neuen Markt spielen können.

Wir können erwarten, dass wir in den kommenden Monaten viel mehr über politische Maßnahmen erfahren, die die Schaffung eines einheitlichen Marktes für sauberen Wasserstoff in Europa fördern. Die Zukunft für sauberen Wasserstoff hat bereits begonnen.

Quelle: IEA – Zukunft Wasserstoff aus www.iea.de Juni 2019

# Globale Fakten

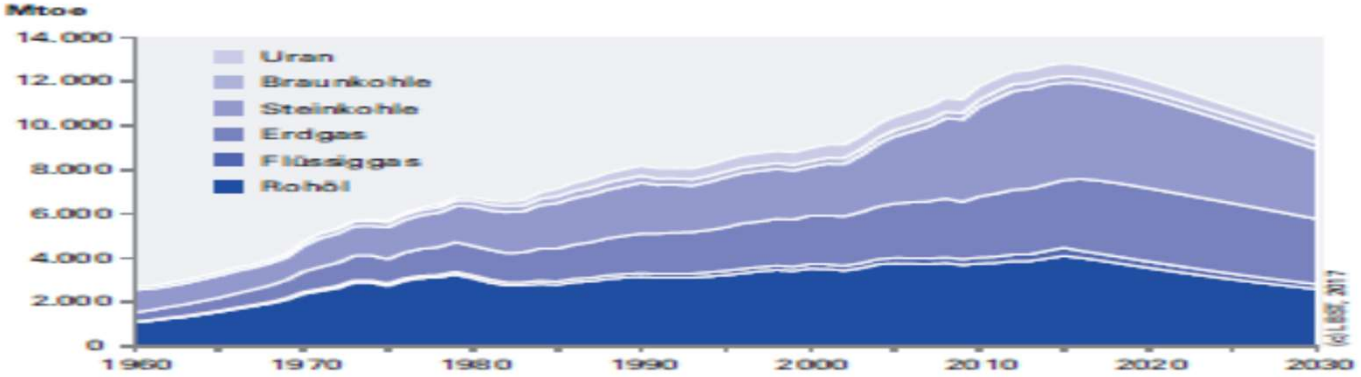
# Globale Treiber für den Wandel

Endlichkeit der fossilen Energieressourcen **(1)**

## Endlichkeit der fossilen Energieressourcen – Künftige Energieversorgung

Das weltweite Angebot bzw. die Nachfrage nach fossiler und nuklearer Energie werden zusammengenommen in den nächsten Jahren den Höhepunkt erreichen.

Nach dem Überschreiten des Fördermaximums des konventionellen Erdöls[1] um das Jahr 2008 kann für die weltweite Versorgung mit Erdgas, Kohle[2] und Nuklearbrennstoff[3] und auch der erneuerbaren Energien ein gemeinsames Fördermaximum um das Jahr 2020 erwartet werden, wenn nicht der zügige Ausbau von Wind- und Solarstromkapazitäten dies ausgleichen kann. Mit dem Überschreiten des globalen Fördermaximums beim Erdöl – auch als Peak Oil bekannt – muss spätestens konsequent der Übergang zum post-fossilen Zeitalter eingeleitet werden.




**Entwicklung der globalen fossilen Primärenergieversorgung**

Mit der Ratifizierung des Paris-Abkommens am 4. November 2016 hat die Weltgemeinschaft sich erstmals völkerrechtlich verbindlich verpflichtet, bis zur Mitte des Jahrhunderts weitgehend auf fossile Energieträger zu verzichten. Die Dynamik der Bereitstellungskosten – neue fossile Vorkommen werden teurer und neue regenerative Energieerzeugung wird wettbewerbsfähiger – wird diese Entwicklung unterstützen. Die Ziele können effizient und nachhaltig durch *Energieeinsparung, verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien und den Einsatz von Wasserstoff und Brennstoffzellen erreicht werden.*

Langfristig haben erneuerbare Energien das Potenzial, mehr Energie bereitstellen zu können als alle fossilen und nuklearen Brennstoffe dies an ihrem Höhepunkt konnten. Von der Entwicklung der Bevölkerung und der Wirtschaft in den verschiedenen Weltregionen wird es abhängen, wie hoch der mögliche spezifische Energieverbrauch pro Person sein kann.

[1] Energy Watch Group, Crude Oil – The Supply Outlook, October 2007, EWG-Series No 3/2007, http://www.energywatchgroup.org
[2] Energy Watch Group, Coal: Resources and Future Production, March 2007, EWG-Series No 1/2007, http://www.energywatchgroup.org
[3] Energy Watch Group, Uranium Resources and Nuclear Energy, December 2006, EWG-Series No 1/2006, http://www.energywatchgroup.org

# Globale Treiber für den Wandel

## Endlichkeit der fossilen Energieressourcen **(2)**

Global werden Solar- und Windenergie die Hauptsäulen des Energiesystems werden.

Der Übergang von fossilen und nuklearen Energiequellen (Erdöl, Erdgas, Kohle, Uran) zu erneuerbaren Energien (wie z. B. Photovoltaik, solarthermische Kraftwerke, Wind- und Wasserkraft) macht Strom – anders als heute – zunehmend zu einer Primärenergie. Dies wird neue Möglichkeiten und Chancen für die Energieversorgung eröffnen, aber auch zu neuen Herausforderungen führen.

Die Primärenergie für den Verkehr wird zu einem großen Teil Elektrizität aus regenerativ erzeugtem Strom aus Wind und Solarenergie sein. Die Markteinführung von weitgehend elektrifizierten Fahrzeugen hat bereits begonnen. In diesem Kontext wird Wasserstoff als Kraftstoff zukünftig ein wichtiger Partner im Verkehr werden: Strom ist in größeren Mengen (> 0,5 TWh) und über längere Zeit (> 48h) gegenüber allen anderen bekannten Speichermedien mit Wasserstoff leicht und kostengünstig zu speichern. Wasserstoff ist damit in der Lage Angebot und Nachfrage zu entkoppeln, so dass unabhängig vom aktuellen erneuerbaren Energieangebot der Energiebedarf des Verkehrs sicher gedeckt werden kann. Diese Fähigkeit ist für Industrienationen zur Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit von grundlegender Bedeutung.

Quelle: DMV- Wasserstoff- und Brennstoffzellen 2017, Ausgabe Mai 2017

# Globale Treiber für den Wandel

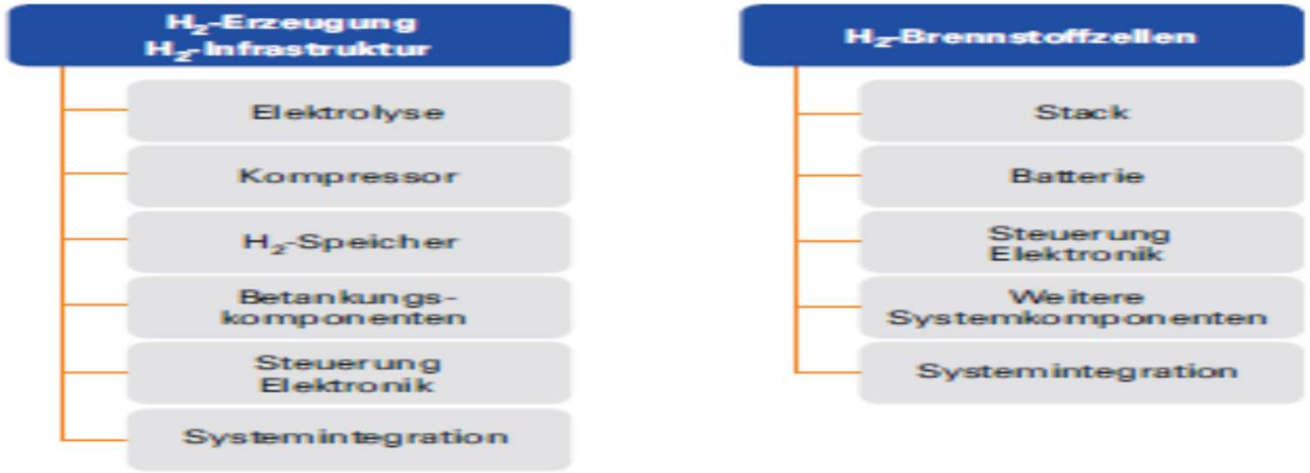
Etablierung von lokaler Wertschöpfung **(3)**

Brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge werden mit Wasserstoff betrieben. Sie haben neben dem Batteriesystem, dem Elektromotor und der erforderlichen Regelungstechnik zusätzlich noch ein Brennstoffzellensystem sowie ein Wasserstoffspeichersystem und eine etwas anspruchsvollere Regelungstechnik an Bord. Dies erfordert mehr Ingenieurs- und Fertigungskapazitäten und schafft dadurch mehr Arbeitsplätze und Kompetenzen.

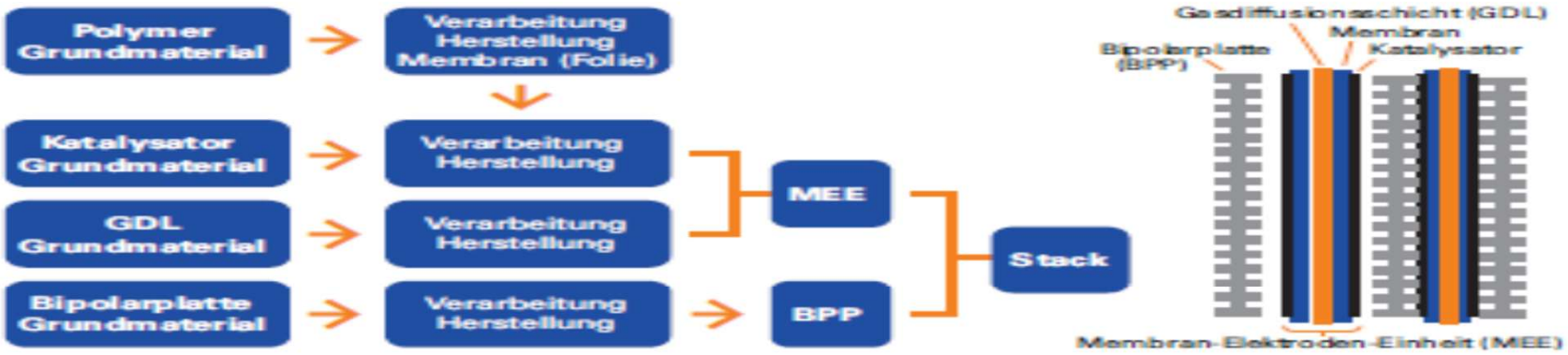
Die weitgehendere Sektorkopplungsfähigkeit von Wasserstoff und Brennstoffzellen in einem Energie- und Verkehrswendeland wie Deutschland schafft auch hier Möglichkeiten, neben der reinen regenerativen Stromerzeugung und -weiterleitung sowie gegebenenfalls dezentralen Stromspeicherung deutlich integrativere Systemkomponenten wie z.B. Wasserstoffspeichersysteme verschiedenster Leistungsklassen (von der dezentralen Speicherung an Tankstellen und Einspeiseknoten bis zu Kavernenspeicher für Wochenspeicherung großer Strommengen) und verschiedenste Wasserstoffanwendungen. Diese umfassen: Fahrzeugkraftstoff, chemischer Grundstoff und Wiederverstromung. Wasserstoff sichert damit eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende mit heimischen und lokalen Anwendungsfällen sowie dadurch geschaffenen Arbeitsplätzen, wie auch der Substitution zumindest eines Teils der heute importierten Energieträger durch lokale Erzeugung und damit heimischer Wertschöpfung.

# Globale Treiber für den Wandel

Etablierung von lokaler Wertschöpfung **(4)**




**Beispiele für zukünftige Fertigungsprozesse und neue Arbeitsplätze in Deutschland zur Herstellung von Schlüsselkomponenten für die $H_2$-Erzeugung / Infrastruktur und $H_2$-Brennstoffzellen**




**BPP = Bipolarplatte**
**GDL = Gas-Diffusionsschicht (engl.: gas diffusion layer)**
**MEE = Membran-Elektroden-Einheit bei PEM-Elektrolyseuren und PEM-Brennstoffzellen**

**Beispiel: Übersicht – grundsätzliche Fertigungsstufen bei der Herstellung von PEM-Stacks für Brennstoffzellen und Elektrolyseure**

Quelle: DMV- Wasserstoff- und Brennstoffzellen 2017, Ausgabe Mai 2017

# Globale Treiber für den Wandel

Einführung von Wasserstoff – gesetzliche und politische Bedingungen **(5)**

## Die größten Herausforderungen bei der Einführung von Wasserstoff

Für den Einsatz von Wasserstoff müssen wesentliche Voraussetzungen erfüllt sein: Hilfen für die Realisierung erster konkreter Anwendungen und eine deutliche Senkung der Kosten der Technologien, insbesondere für den Antriebsstrang der Wasserstofffahrzeuge. Eine schwierige Hürde bildet auch die Sicherstellung der Liquidität („Cash Flow") während der ersten Phase des Infrastrukturaufbaus, in der große Anfangsinvestitionen getätigt werden müssen, um später den langfristigen Bedarf abdecken zu können.

## Verschiedene Formen politischer Unterstützung für Wasserstoff

Die Einführung von Wasserstoff in das Energiesystem kann durch finanzielle Anreize wie z. B. Steuern (oder Befreiungen von Letztverbraucherabgaben und Entgelten bzw. Umlagen) und Subventionen unterstützt werden. Andere wichtige Instrumente bilden generelle Grenzwerte für die Emissionen von Fahrzeugen bzw. Fahrzeug-/Kraftstoff-Kombinationen oder spezifische Grenzwerte für Fahrzeuge, die in die Innenstädte fahren dürfen. Schließlich können auch Informationen (z. B. Kennzeichnungssysteme) und Öffentlichkeitsarbeit sowie Bildungsmaßnahmen hilfreich sein.

## Änderung gesetzlicher und politischer Rahmenbedingungen zur Schaffung eines Marktes

Zugangsregelungen für Innenstadtbereiche können einen starken Anreiz für den Einsatz von Nullemissionsfahrzeugen, also Wasserstoff- und Batteriefahrzeugen darstellen. Dadurch können erste Märkte geschaffen werden, in denen höhere Kosten akzeptiert werden. Es muss jedoch eine gute Balance gefunden werden zwischen der kommerziellen Verfügbarkeit der Technologie und dem Zeitpunkt der Einführung derartiger Regeln.

Die vorgeschlagene Strategie zur Unterstützung der Einführung von Wasserstofftechnologien durch F&E und Einführungshilfen in der Frühphase entspricht der allgemeinen Innovationsstrategie für die Unterstützung von innovativen Technologien in Europa[23]. Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen ist gegenwärtig von der Energiesteuer[24] befreit. Langfristig wird dieses mit zunehmender Anzahl von Wasserstofffahrzeugen sicherlich nicht aufrecht zu halten sein. Aber auf jeden Fall kann die Besteuerung aufgrund der vollständigen Wertschöpfung bei der Wasserstoffproduktion in Deutschland niedriger ausfallen als bei fossilen Kraftstoffen.

Quelle: DMV- Wasserstoff- und Brennstoffzellen 2017, Ausgabe Mai 2017

# Globale Treiber für den Wandel

## Einführung von Wasserstoff – gesetzliche und politische Bedingungen **(6)**

Mittelfristig (bereits bis 2030) können Nullemissionsfahrzeuge im Pkw-, Lieferfahrzeug- und Schwerlast-Lkw-Nahlogistik-Sektor ein wesentliches Element zur Erreichung der Klimagasreduktionsziele sowie der Emissionsminderungsziele in städtischen Ballungsräumen (Partikel, $NO_x$, Lärm) darstellen. Die Technologien werden ab 2020 zunehmend technisch und kommerziell wettbewerbsfähig verfügbar. Damit sind die Voraussetzungen für eine tiefgreifende und beschleunigte Verkehrswende unter Nutzung der Sektorkopplung geschaffen und die Erfüllung der anspruchsvollen Klimagasreduktionsziele ist effizient realisierbar.

**Null-Emissions-Fahrzeug (ZEV) Forderung**

**Beispiel Europa**

Während in vielen europäischen Städten bereits sogenannte Umweltzonen grundsätzlich eingerichtet werden, gibt es noch keine gesetzlich verbindliche Zufahrbeschränkung für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Jedoch bereiten bereits erste europäische Städte die Umstellung des kommunalen Busverkehrs auf ZEV vor, z. B. London, Paris, Madrid, Hamburg, Berlin.

Link: http://urbanaccessregulations.eu/
Link: https://www.transportenvironment.org/

**Beispiel Kalifornien, USA**

Kraftstoffe, die in einem ZEV genutzt werden können, sind Strom und Wasserstoff. Das ZEV-Programm wurde seit seiner Einführung mehrmals modifiziert. Das ZEV Mandat fordert, dass ein gewisser Prozentsatz der jährlichen Neufahrzeuge ZEVs sind.

Bis 2025 soll 1,5 Millionen ZEV auf den Straßen Kaliforniens unterwegs sein.

Quelle: ZEV Action Plan 2016, An updated roadmap toward 1.5 million zero-emission vehicles on California roadways by 2025, Governor's Interagency Working Group on Zero-Emission Vehicles, Governor Edmund G. Brown Jr. October 2016

Link: ZEV California https://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevprog.htm

**Beispiel China**

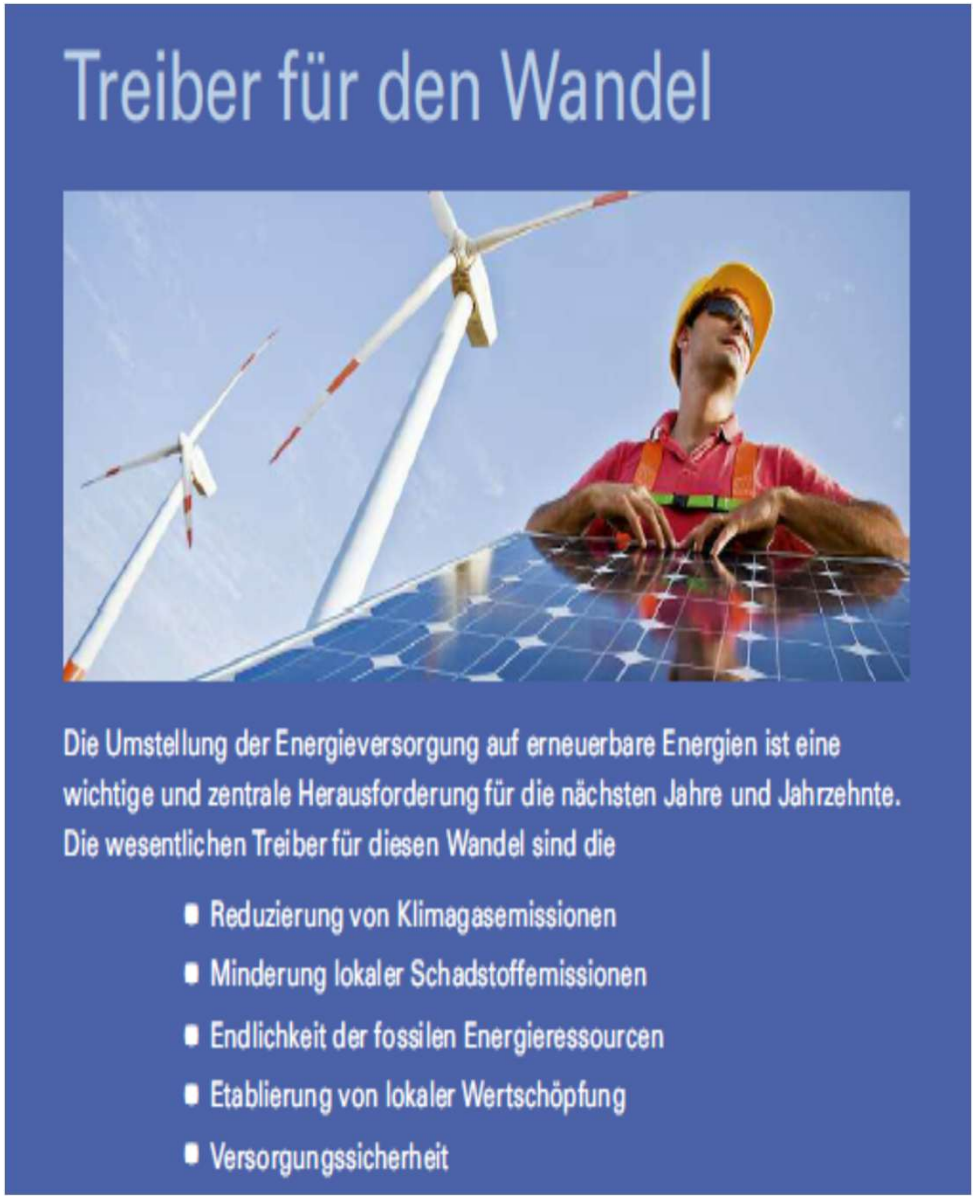
Automobilhersteller, die ab 2018 noch Fahrzeuge in China verkaufen wollen, müssen eine Quote für Nullemissionsfahrzeuge (BEVs, FCEVs) erfüllen. Ab voraussichtlich 2018 sollen 8 % aller verkauften Fahrzeuge sogenannte Kreditpunkte sammeln, 2019 sollten es 10 % und 2020 bereits 12 % sein. Noch ist nicht kommuniziert, welche Multiplikatoren bzw. nach welchen Kriterien diese Punkte gesammelt werden. Das System scheint Ähnlichkeiten mit dem kalifornischen aufzuweisen, wo die Höhe der gesammelten credits u.a. von der Reichweite je Batterieladung/Tankfüllung und von der Beladungs-/Betankungsgeschwindigkeit abhängig sind.

Quelle: Süddeutsche Zeitung, 31.10.2016

aus DMV- Wasserstoff- und Brennstoffzellen 2017, Ausgabe Mai 2017

# Globale Treiber für den Wandel

## Verminderung von Klimagasemissionen **(7)**




**Motivation und Handlungsdruck:**
Der Ausstoß von Klimagasen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe führt zu einer globalen Temperaturerhöhung, die wiederum zu einer Verstärkung physikalischer Effekte mit direkten und indirekten Folgen führt.

Beispiele für mögliche physikalische Effekte und Folgen durch den Klimawandel sind:

**Territoriale Hitzeperioden**
Austrocknung, Entwaldung, Wüstenbildung
**Polkappen- und Gletscherschmelze**
Meeresspiegelanstieg und Überschwemmungen, Trinkwasserverlust
**Zunahme von (Wirbel-)Stürmen**
Schäden in der Landwirtschaft und an Siedlungen/Städten
**Verschiebung der Jahreszeiten, Klimazonen**
Veränderung der Biomasseproduktion, Verlust an Biodiversität
**Auftauen von Permafrostböden und von Methanhydraten im Ozean**
Verstärkte Emission des Treibhausgases Methan
damit Beschleunigung des Klimawandels

Diese zuvor beschriebenen Veränderungen können wiederum mögliche gesellschaftliche, politische und wirtschaftliche Konsequenzen mit sich bringen, wie zum Beispiel:

- **Umweltflucht aus vertrockneten und überschwemmten Regionen (drastische Verschärfung der Flüchtlingssituation)**
- **Beeinträchtigung von Landwirtschaft und Nahrungsmittelproduktion**
- **Anstieg von Versicherungsschäden**
- **Gesundheitsbeeinträchtigungen**
- **Politische und wirtschaftliche Instabilität in den betroffenen Staaten**

Quelle: Entnommen aus J. Schwarz, H.-J. Fell, Deutsche Klimapolitik – vom Vorreiter zum Bremser, Energy Watch Group, Nov. 2016
aus DMV- Wasserstoff- und Brennstoffzellen 2017, Ausgabe Mai 2017

# Wasserstoff

## Ein Schlüssel für eine saubere und sichere Energiezukunft **(1)**

"Wasserstoff erfreut sich heute einer beispiellosen Dynamik. Die Welt sollte diese einmalige Chance nicht verpassen, Wasserstoff zu einem wichtigen Bestandteil unserer sauberen und sicheren Energiezukunft zu machen ." Fatih Birol, Geschäftsführer, IEA

Wasserstoff und Energie haben eine lange gemeinsame Geschichte: Die ersten Verbrennungsmotoren wurden vor über 200 Jahren zu einem festen Bestandteil der modernen Raffinerieindustrie. Es ist leicht, lagerfähig, energiedicht und verursacht keine direkten Emissionen von Schadstoffen oder Treibhausgasen.

Damit Wasserstoff jedoch einen wesentlichen Beitrag zu einer sauberen Energiewende leistet, muss er in Bereichen wie Verkehr, Gebäude und Energieerzeugung eingesetzt werden, in denen er fast völlig fehlt.

Die Zukunft des Wasserstoffs bietet eine umfassende und unabhängige Übersicht über Wasserstoff, in der der aktuelle Stand der Dinge dargestellt wird. die Möglichkeiten, wie Wasserstoff zu einer sauberen, sicheren und erschwinglichen Energiezukunft beitragen kann; und wie wir sein Potenzial ausschöpfen können.

Wasserstoff kann bei der Bewältigung verschiedener kritischer Energieprobleme helfen, einschließlich der Speicherung der variablen Leistung aus erneuerbaren Energiequellen wie Sonne und Wind, um die Nachfrage besser zu decken. Es bietet Möglichkeiten zur Dekarbonisierung einer Reihe von Sektoren - einschließlich des Fernverkehrs, der Chemie sowie der Eisen- und Stahlindustrie -, in denen es schwierig ist, die Emissionen sinnvoll zu senken. Es kann auch dazu beitragen, die Luftqualität zu verbessern und die Energiesicherheit zu erhöhen.

### Nachfrage nach Wasserstoff

Die Versorgung von industriellen Anwendern mit Wasserstoff ist mittlerweile ein weltweit bedeutendes Geschäft. Die Nachfrage nach Wasserstoff, der seit 1975 mehr als verdreifacht wurde, steigt weiter - fast ausschließlich aus fossilen Brennstoffen, wobei 6% des globalen Erdgases und 2% der globalen Kohle für die Wasserstoffproduktion verwendet werden.

Infolgedessen ist die Wasserstoffproduktion für die $CO_2$ -Emissionen von rund 830 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr verantwortlich. Dies entspricht den $CO_2$ -Emissionen des Vereinigten Königreichs und Indonesiens zusammen.

### Wachsende Unterstützung

Die Anzahl der Länder, deren Politik Investitionen in Wasserstofftechnologien direkt unterstützt, nimmt mit der Anzahl der Sektoren, auf die sie abzielen, zu.
Derzeit gibt es rund 50 Ziele, Mandate und politische Anreize, die Wasserstoff direkt fördern, wobei sich der Großteil auf den Verkehr konzentriert.
In den letzten Jahren sind die weltweiten Ausgaben für Forschung, Entwicklung und Demonstration im Bereich der Wasserstoffenergie durch die nationalen Regierungen gestiegen, obwohl sie nach wie vor unter dem Höchststand von 2008 liegen.

### Wasserstoffproduktion

Wasserstoff kann aus fossilen Brennstoffen und Biomasse, aus Wasser oder aus einer Mischung von beiden gewonnen werden. Derzeit ist Erdgas die Hauptquelle für die Wasserstoffproduktion, auf die rund drei Viertel der jährlichen weltweiten Wasserstoffproduktion von rund 70 Millionen Tonnen entfallen. Dies entspricht etwa 6% des weltweiten Erdgasverbrauchs. Auf Gas folgt Kohle, da es in China eine dominierende Rolle spielt, und ein kleiner Teil wird aus der Verwendung von Öl und Strom gewonnen.

Die Produktionskosten von Wasserstoff aus Erdgas werden von einer Reihe technischer und wirtschaftlicher Faktoren beeinflusst, wobei die Gaspreise und die Investitionsausgaben die beiden wichtigsten sind.

# Wasserstoff

## Ein Schlüssel für eine saubere und sichere Energiezukunft **(2)**

Die Kraftstoffkosten stellen die größte Kostenkomponente dar und machen zwischen 45% und 75% der Produktionskosten aus. Niedrige Gaspreise im Nahen Osten, in Russland und in Nordamerika führen zu den niedrigsten Kosten für die Wasserstoffproduktion. Gasimporteure wie Japan, Korea, China und Indien haben mit höheren Gasimportpreisen zu kämpfen, was zu höheren Wasserstoffproduktionskosten führt.

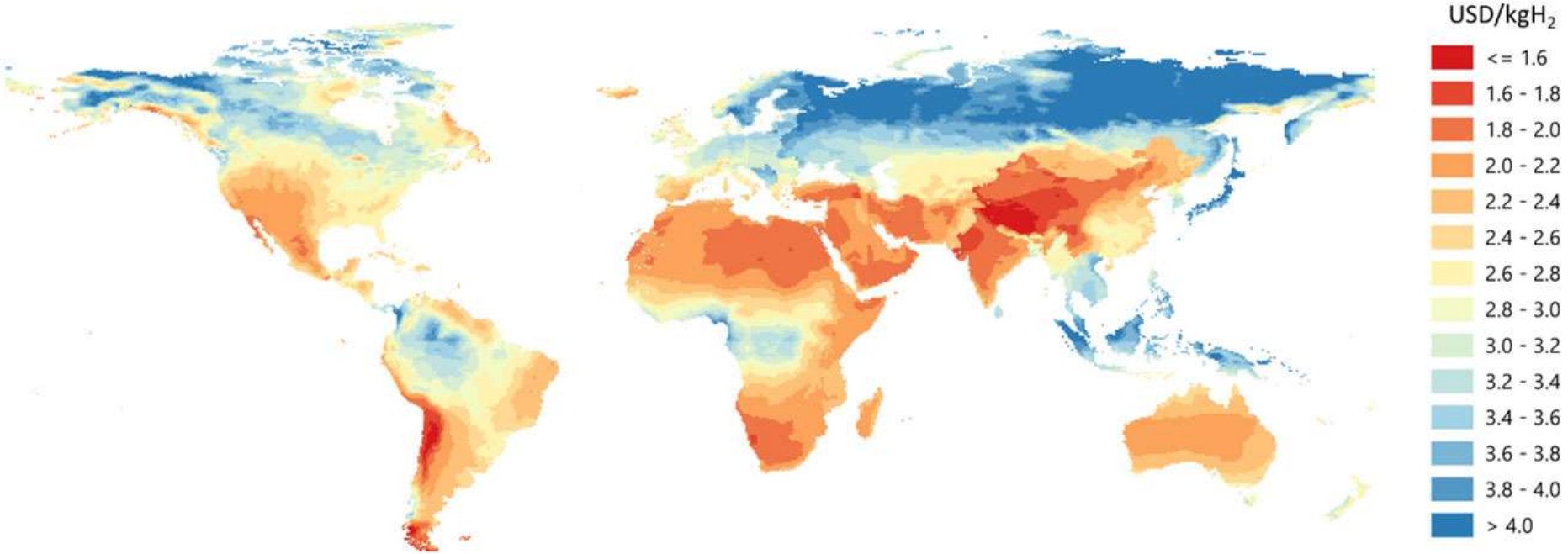
Während heute weniger als 0,1% der weltweiten Wasserstoffproduktion aus der Wasserelektrolyse stammt und die Kosten für erneuerbaren Strom sinken, insbesondere für Photovoltaik und Windkraft, steigt das Interesse an elektrolytischem Wasserstoff.

### Kosten im Auge behalten

Die dedizierte Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien oder Kernkraft bietet eine Alternative zur Nutzung von Netzstrom für die Wasserstoffproduktion. Angesichts sinkender Kosten für erneuerbaren Strom, insbesondere durch Solar-PV und Windkraft, steigt das Interesse an elektrolytischem Wasserstoff, und in den letzten Jahren wurden mehrere Demonstrationsprojekte durchgeführt. Die gesamte heutige Wasserstoffproduktion aus Strom zu erzeugen, würde einen Strombedarf von 3 600 TWh zur Folge haben, mehr als die gesamte jährliche Stromerzeugung der Europäischen Union.

Angesichts sinkender Kosten für die Erzeugung von Photovoltaik- und Windkraftanlagen könnte der Bau von Elektrolyseuren an Standorten mit hervorragenden Bedingungen für erneuerbare Ressourcen zu einer kostengünstigen Option für die Wasserstofflieferung werden, auch wenn die Übertragungs- und Verteilungskosten für den Transport von Wasserstoff aus (häufig abgelegenen) Standorten für erneuerbare Energien berücksichtigt werden an die Endbenutzer.

Langfristig Wasserstoffkosten aus hybriden Solar-PV- und Onshore-Windsystemen




Quelle: IEA – Zukunft Wasserstoff aus www.iea.de 8/2019

# Wasserstoff

## Ein Schlüssel für eine saubere und sichere Energiezukunft **(3)**

## Verschiedene Anwendungen für Wasserstoff



Der Wasserstoffverbrauch wird heute von der **Industrie** dominiert , und zwar von der Ölraffination, der Ammoniakproduktion, der Methanolproduktion und der Stahl-produktion.
Nahezu der gesamte Wasserstoff wird mit fossilen Brennstoffen geliefert, sodass ein erhebliches Potenzial für Emissionsredu-zierungen durch sauberen Wasserstoff besteht.




Im **Verkehr** hängt die Wettbewerbsfähigkeit von Wasserstoff-Brennstoffzellenautos von den Brennstoffzellenkosten und den Tankstellen ab, während bei Lastkraftwagen die Senkung des Lieferpreises für Wasserstoff Vorrang hat.
Schifffahrt und Luftfahrt verfügen nur über begrenzte Optionen für kohlenstoffarme Kraftstoffe und bieten eine Chance für wasserstoffbasierte Kraftstoffe



In **Gebäuden** könnte Wasserstoff in bestehende Erdgasnetze eingemischt werden, wobei das größte Potenzial in Mehrfamilien- und Geschäfts-gebäuden, insbesondere in dichten Städten, besteht. Langfristige Perspektiven könnten die direkte Verwendung von Wasserstoff in Wasserstoffkesseln oder Brennstoffzellen sein.



Bei der **Stromerzeugung** ist Wasserstoff eine der führenden Optionen für die Speicherung erneuerbarer Energien. Wasserstoff und Ammoniak können in Gasturbinen eingesetzt werden, um die Flexibilität des Stromnetzes zu erhöhen. Ammoniak könnte auch in Kohlekraftwerken zur Emissions-minderung eingesetzt werden.

Quelle: IEA – Zukunft Wasserstoff aus www.iea.de 8/2019

# Wasserstoff

## Ein Schlüssel für eine saubere und sichere Energiezukunft **(4)**

### Überblick

Wasserstoff kann bei der Bewältigung verschiedener kritischer Energieprobleme helfen, einschließlich der Speicherung der variablen Leistung aus erneuerbaren Energiequellen wie Sonne und Wind, um die Nachfrage besser zu decken. Es bietet Möglichkeiten zur Dekarbonisierung einer Reihe von Sektoren - einschließlich des Fernverkehrs, der Chemie sowie der Eisen- und Stahlindustrie -, in denen es schwierig ist, die Emissionen sinnvoll zu senken. Es kann auch dazu beitragen, die Luftqualität zu verbessern und die Energiesicherheit zu erhöhen.

### Warum Wasserstoff?

Wasserstoff ist keine Energiequelle, sondern ein **Energieträger** , was bedeutet, dass seine potenzielle Rolle Ähnlichkeiten mit der von Elektrizität aufweist. Sowohl Wasserstoff als auch Strom können mit verschiedenen Energiequellen und -technologien erzeugt werden. Beide sind vielseitig und können in vielen verschiedenen Anwendungen eingesetzt werden.

Bei der Verwendung von Wasserstoff oder Elektrizität entstehen keine Treibhausgase, Partikel, Schwefeloxide oder bodennahes Ozon. Wird der Wasserstoff in einer Brennstoffzelle eingesetzt, stößt er nur Wasser aus. Sowohl Wasserstoff als auch Strom können jedoch stromaufwärts eine hohe $CO_2$ -Intensität aufweisen, wenn sie aus fossilen Brennstoffen wie Kohle, Öl oder Erdgas hergestellt werden.

Der entscheidende Unterschied zwischen Wasserstoff und Elektrizität besteht darin, dass Wasserstoff ein chemischer Energieträger ist, was bedeutet, dass er stabil gespeichert und transportiert werden kann, wie dies heute bei Öl, Kohle, Biomasse und Erdgas der Fall ist. Wasserstoff kann auch mit anderen Elementen wie Kohlenstoff und Stickstoff kombiniert werden, um wasserstoffbasierte Kraftstoffe herzustellen, die einfacher zu handhaben sind, und kann als Rohstoff in der Industrie verwendet werden, um die Emissionen zu reduzieren.

Ohne Wasserstoff wäre ein auf Strom basierendes System mit entkohlter Energie viel *strömungsbasierter* . Flussbasierte Energiesysteme müssen Angebot und Nachfrage in Echtzeit über weite Entfernungen hinweg decken und können für Versorgungsstörungen anfällig sein. Chemische Energie kann der Energiewirtschaft ein *aktienbasiertes* Element hinzufügen und somit erheblich zur Widerstandsfähigkeit des Energiesystems beitragen.

### Wofür verwenden wir es?

Die Produktion von Wasserstoff für industrielle Zwecke ist weltweit ein bedeutendes Geschäft. Die Nachfrage nach Wasserstoff, die sich seit 1975 mehr als verdreifacht hat, steigt weiter. Heutzutage wird Wasserstoff hauptsächlich zur Ölraffination und zur Herstellung von Düngemitteln verwendet.

### Wasserstoffproduktion heute

Heute werden rund 70 Mt Wasserstoff produziert, 76% aus Erdgas und fast der ganze Rest aus Kohle.

Die jährliche Wasserstoffproduktion verbraucht rund 205 Mrd. $m^3$ Erdgas (6% des weltweiten Erdgasverbrauchs) und 107 Mio. t Kohle (2% des weltweiten Kohleverbrauchs), wobei sich der Kohleverbrauch auf China konzentriert. Infolgedessen ist die globale Wasserstoffproduktion heute für 830 Mt $CO_2$ pro Jahr verantwortlich - entsprechend den jährlichen $CO_2$ -Emissionen von Indonesien und Großbritannien zusammen.

Diese Emissionen können vermieden werden, indem in diesen Anwendungen kohlenstoffärmerer Wasserstoff verwendet wird, d.h. Wasserstoff, der entweder durch die Abscheidung von $CO_2$ aus der Wasserstofferzeugung aus fossilen Brennstoffen oder durch die Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser und sauberem Strom erzeugt wird. Beide Ansätze können auch zur Ausweitung des kohlenstoffarmen Wasserstoffverbrauchs auf andere Sektoren zur Bekämpfung von Emissionen eingesetzt werden.

# Wasserstoff

## Ein Schlüssel für eine saubere und sichere Energiezukunft **(5)**

### Speicherung, Übertragung und Verteilung von Wasserstoff

Transport- und Lagerkosten werden eine wichtige Rolle für die Wettbewerbsfähigkeit von Wasserstoff spielen. Wenn Wasserstoff nahe am Herstellungsort eingesetzt werden kann, können diese Kosten nahe Null liegen. Wenn der Wasserstoff jedoch einen langen Weg zurücklegen muss, bevor er genutzt werden kann, können die Kosten für Übertragung und Verteilung bis zu dreimal so hoch sein wie die Kosten für die Wasserstoffproduktion.

Der reibungslose Betrieb großer und interkontinentaler Wasserstoff-Wertschöpfungsketten hängt von der Verfügbarkeit angemessener Speicherkapazität und Funktionalität ab. Heutzutage stehen verschiedene Speichermöglichkeiten zur Verfügung: Gas- oder Flüssigkeitstanks, in denen normalerweise Wasserstoff für Stunden bis Tage gespeichert wird, und unterirdische Anlagen, in denen Zehntausende Tonnen Wasserstoff bereits in Betrieb sind.

Weitere Forschungsarbeiten sind erforderlich, um verschiedene Optionen für die unterirdische Lagerung zu bewerten, um ihre Eignung zu bestimmen, einschließlich des Speichervolumens, der Dauer, des Preises, der Geschwindigkeit der Einleitung und möglicher Kontaminationsaspekte, um ihre Entwicklung zu fördern und ihre Nutzung zu unterstützen.

Die Fernübertragung und lokale Verteilung von gasförmigem Wasserstoff ist aufgrund der geringen Energiedichte kostspielig. Kompression, Verflüssigung oder Einbau des Wasserstoffs in größere Moleküle sind mögliche Optionen, um diese Hürde zu überwinden. Jede Option hat Vor- und Nachteile. Die günstigste Option hängt von der geografischen Lage, der Entfernung, dem Maßstab und dem gewünschten Verwendungszweck ab.

### Derzeitige und mögliche industrielle Nutzung von Wasserstoff

Die Wasserstoffnutzung wird heute von industriellen Anwendungen dominiert. Die vier wichtigsten Verwendungen von Wasserstoff sind heute: Erdölraffination (33%), Ammoniakproduktion (27%), Methanolproduktion (11%) und Stahlproduktion durch direkte Reduktion von Eisenerz (3%). Nahezu der gesamte Wasserstoff wird mit fossilen Brennstoffen geliefert. Diese bestehenden Wasserstoffverwendungen untermauern viele Aspekte der Weltwirtschaft und unseres täglichen Lebens. Ihr zukünftiges Wachstum hängt von der Entwicklung der Nachfrage nach nachgelagerten Produkten ab, insbesondere raffinierten Kraftstoffen für den Transport, Düngemitteln für die Lebensmittelherstellung und Baustoffen für Gebäude.

Mehr als 60% des heute in Raffinerien verwendeten Wasserstoffs wird mit Erdgas erzeugt. Verschärfte Luftschadstoffnormen könnten den Wasserstoffverbrauch bei der Raffination bis 2030 um 7% auf 41 $MtH_2$/ Jahr erhöhen. Weitere politische Änderungen zur Eindämmung des Anstiegs der Ölnachfrage könnten das Wachstumstempo des Wasserstoffbedarfs für Öl dämpfen oder sogar umkehren Die Raffination wird voraussichtlich im nächsten Jahrzehnt bedeutend bleiben.

### Kurzfristige praktische Möglichkeiten für politische Maßnahmen

Wasserstoff ist in einigen Branchen bereits weit verbreitet, hat jedoch sein Potenzial zur Unterstützung sauberer Energiewende noch nicht ausgeschöpft.

Ehrgeizige, gezielte und kurzfristige Maßnahmen sind erforderlich, um Hindernisse weiter zu überwinden und Kosten zu senken. Der Zeithorizont bis 2030 wird entscheidend für den längerfristigen Einsatz von Wasserstoff sein. Es besteht die Möglichkeit, auf der derzeitigen Nutzung von Wasserstoff aufzubauen, indem die CO2-arme Produktion erhöht und Innovationen gefördert werden. Parallel dazu kann die Nachfrage nach Wasserstoff in neuen Sektoren und Anwendungen geschaffen und Märkte verbunden werden.

# Wasserstoff

## Ein Schlüssel für eine saubere und sichere Energiezukunft **(6)**

Bis 2030 sind fünf intelligente politische Maßnahmen erforderlich:

- Setzen Sie langfristige Signale, um das Vertrauen der Anleger zu stärken
- Stimulierung der kommerziellen Nachfrage nach Wasserstoff in zahlreichen Anwendungen
- Reduzieren Sie wichtige Risiken wie die Komplexität der Wertschöpfungskette
- Förderung von F & E und Wissensaustausch
- Normen harmonisieren und Barrieren beseitigen

Die IEA hat vier Wertschöpfungsketten identifiziert, die sich als Sprungbrett für die Skalierung von Wasserstoffangebot und -nachfrage erweisen und auf bestehenden Branchen, Infrastrukturen und politischen Maßnahmen aufbauen. Regierungen und andere Interessengruppen können ermitteln, welche davon das kurzfristigste Potenzial in ihrem geografischen, industriellen und Energiesystemkontext bieten.

Unabhängig davon, welche dieser vier Schlüsselchancen verfolgt werden - oder welche anderen Wertschöpfungsketten hier nicht aufgeführt sind - wird das gesamte Maßnahmenpaket von fünf oben aufgeführten Aktionsbereichen benötigt. Darüber hinaus werden Regierungen - auf regionaler, nationaler oder kommunaler Ebene - von der internationalen Zusammenarbeit mit anderen profitieren, die daran arbeiten, ähnliche Wasserstoffmärkte voranzutreiben.

### Datensätze und Annahmen

Im Anhang zu den Annahmen werden die verschiedenen Annahmen zusammengefasst, die der Analyse der IEA zu Wasserstoff zugrunde liegen. Für Technologien werden globale Durchschnitte dargestellt. Einige Analysen in der Zukunft des Wasserstoffs präsentieren jedoch regionale Beispiele, bei denen die Kosten je nach Material- und Arbeitseinsatz variieren und vom globalen Durchschnitt abweichen. Diese Eingabeparameter spiegeln die von der IEA im Lichte des begrenzten Raums getroffenen Entscheidungen für die Darstellung mehrerer Sensitivitätsanalysen wider.

Der Projektdatensatz umfasst alle Projekte weltweit, die seit dem Jahr 2000 zur Erzeugung von Wasserstoff für Energiezwecke oder zur Eindämmung des Klimawandels in Auftrag gegeben wurden, d.h. deren Ziel ist es, entweder die mit der Erzeugung von Wasserstoff für bestehende Anwendungen verbundenen Emissionen zu verringern oder Wasserstoff einzuführen als Energieträger oder industrielles Ausgangsmaterial in neuen Anwendungen, in denen es derzeit nicht weit verbreitet ist. und hat das Potenzial, eine kohlenstoffarme Technologieoption zu sein. Projekte in Planung oder Bau sind ebenfalls enthalten.

Der Zweck des Policy-Datensatzes besteht darin, der Regierung und anderen Interessengruppen einen Überblick über die bestehenden Policies und Regierungsaktivitäten auf der ganzen Welt zur Unterstützung von Wasserstoff zu geben. Es wurde von der IEA mit der unschätzbaren Unterstützung des IEA Hydrogen Technology Collaboration Programm und der Internationalen Partnerschaft für Wasserstoff- und Brennstoffzellen in der Wirtschaft erstellt. Es wurde unternommen, um die Arbeit der IEA für die G20 im Jahr 2019 zu unterstützen, aber es ist zu hoffen, dass die kooperierenden Organisationen es als fortlaufende Ressource hosten können.

Quelle: IEA – Zukunft Wasserstoff aus www.iea.de 8/2019

# Globale Übersicht zum Zeitalter des Wasserstoffs bis 2050 (1)

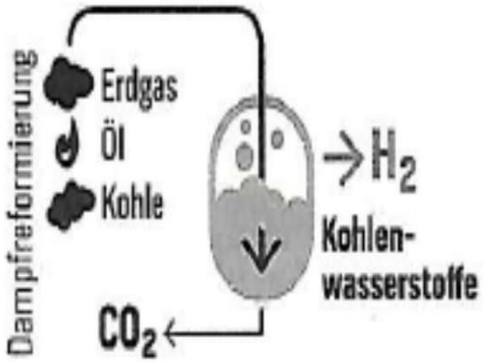
## Das Zeitalter des Wasserstoffs

Wenn sich Industrie und Politik dafür entscheiden, könnte das Gas den **globalen Energiehunger** stillen. Es müssten komplett neue Lieferketten entstehen

### Die Wasserstoff-Farbenlehre

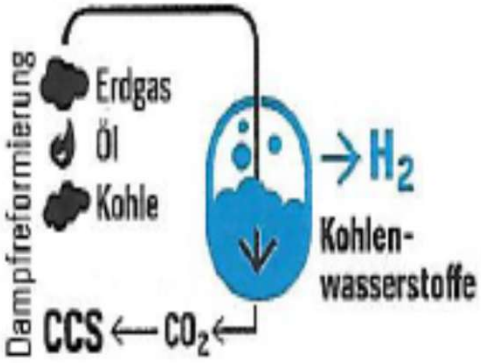
**Differenzierung zwischen Wasserstoffproduktionsarten**

**Grauer Wasserstoff**



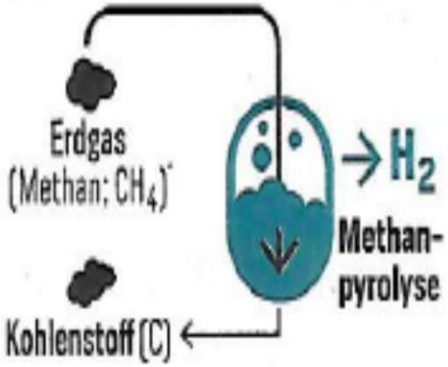

**Klimaschädlich** Das $CO_2$-intensive Verfahren arbeitet mit der Dampfreformierung fossiler Brennstoffe

**Blauer Wasserstoff**



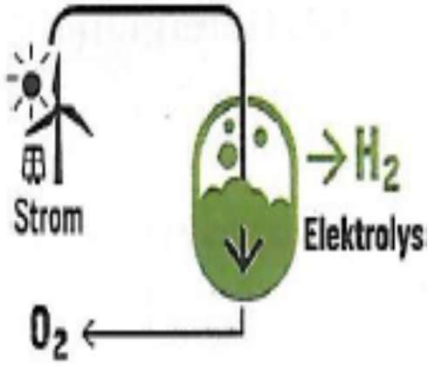

**Umstritten** Energiemultis investieren viel in die Technologie, bei der $CO_2$ aufgefangen und gespeichert wird

**Türkiser Wasserstoff**




**Wirtschaftlich** Methanpyrolyse ist relativ kostengünstig, braucht aber Erdgas und belastet die Atmosphäre

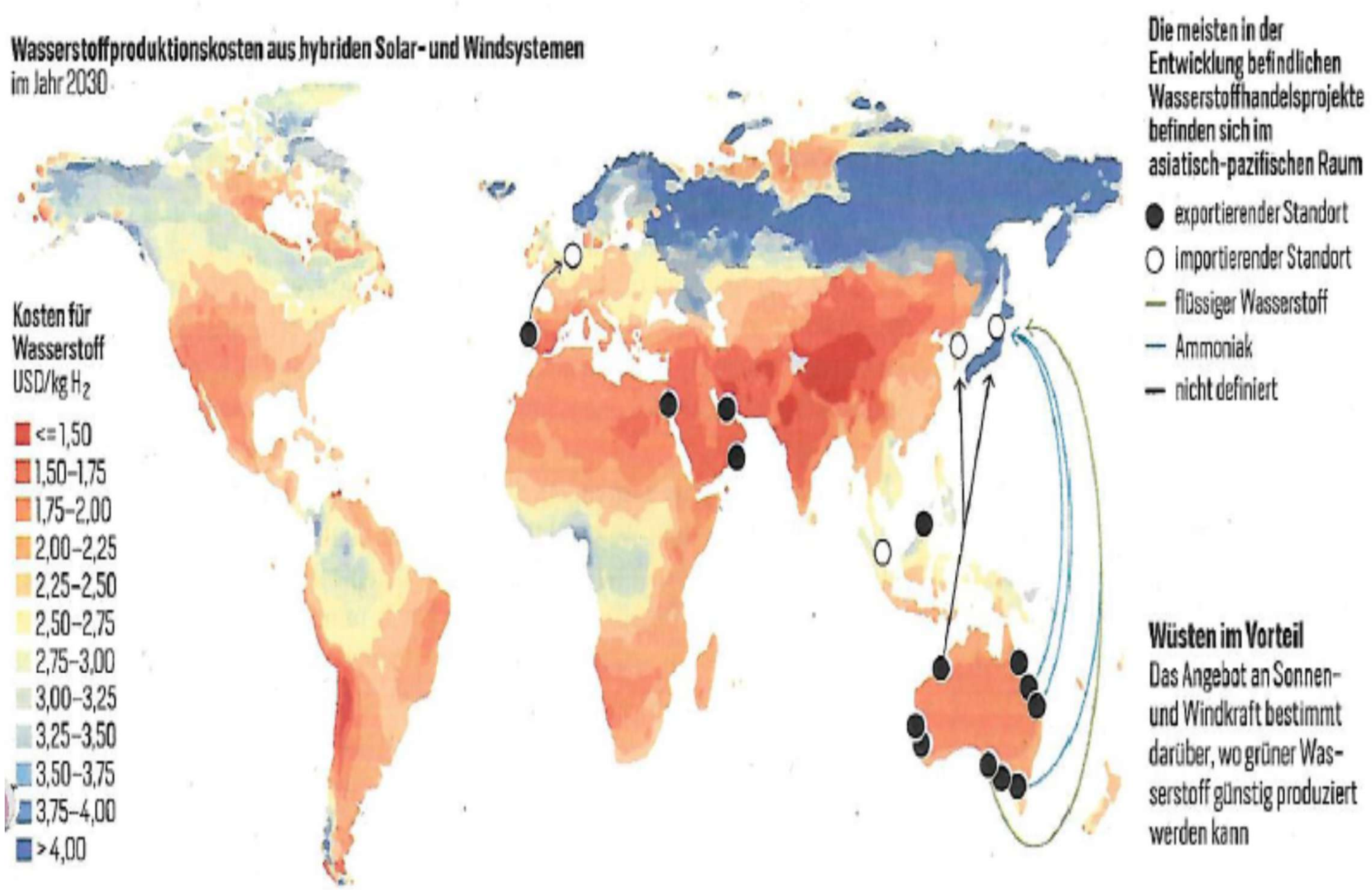
**Grüner Wasserstoff**




**Umweltfreundlich** Mit Ökostrom produzierter Wasserstoff ist für das Klima unbedenklich

Quelle: Deutsche-Energie-Agentur Dena, EnBW, Internationale Energieagentur IEA, Bellona aus Focus – Der Stoff, aus dem die Zukunft ist, S. 66-75, 34/2022

# Globale Übersicht zum Zeitalter des Wasserstoffs bis 2050 (2)

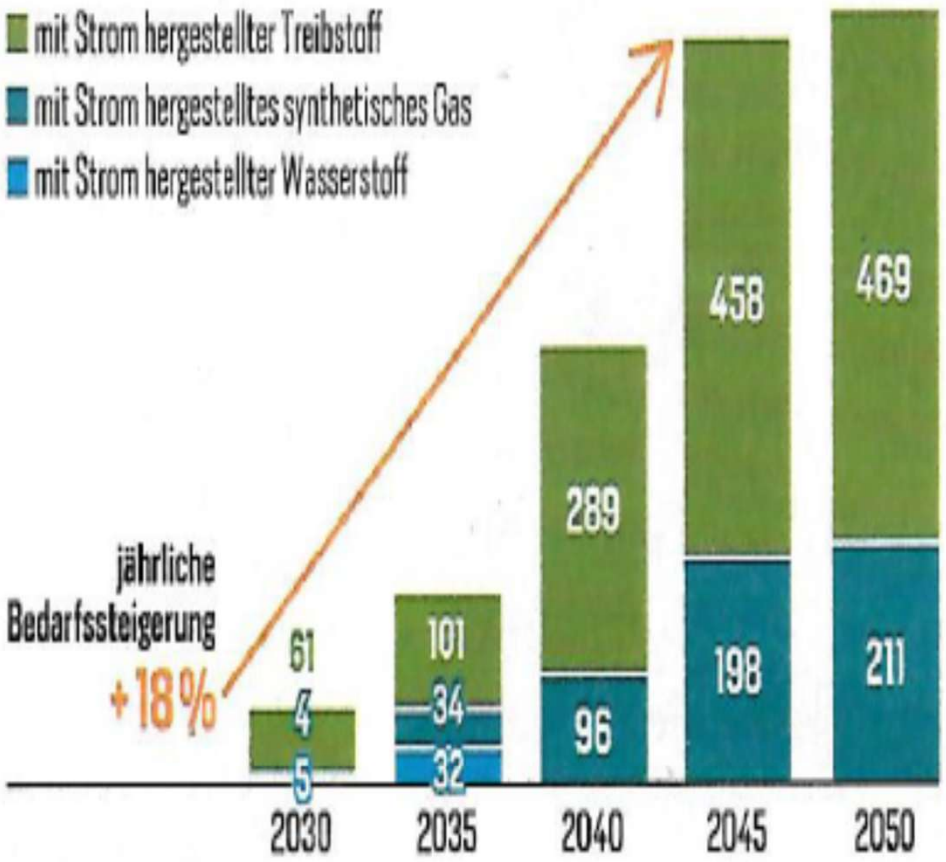



Quelle: Deutsche-Energie-Agentur Dena, EnBW, Internationale Energieagentur IEA, Bellona aus Focus – Der Stoff, aus dem die Zukunft ist, S. 66-75, 34/2022

# Globale Übersicht zum Zeitalter des Wasserstoffs bis 2050 (3)

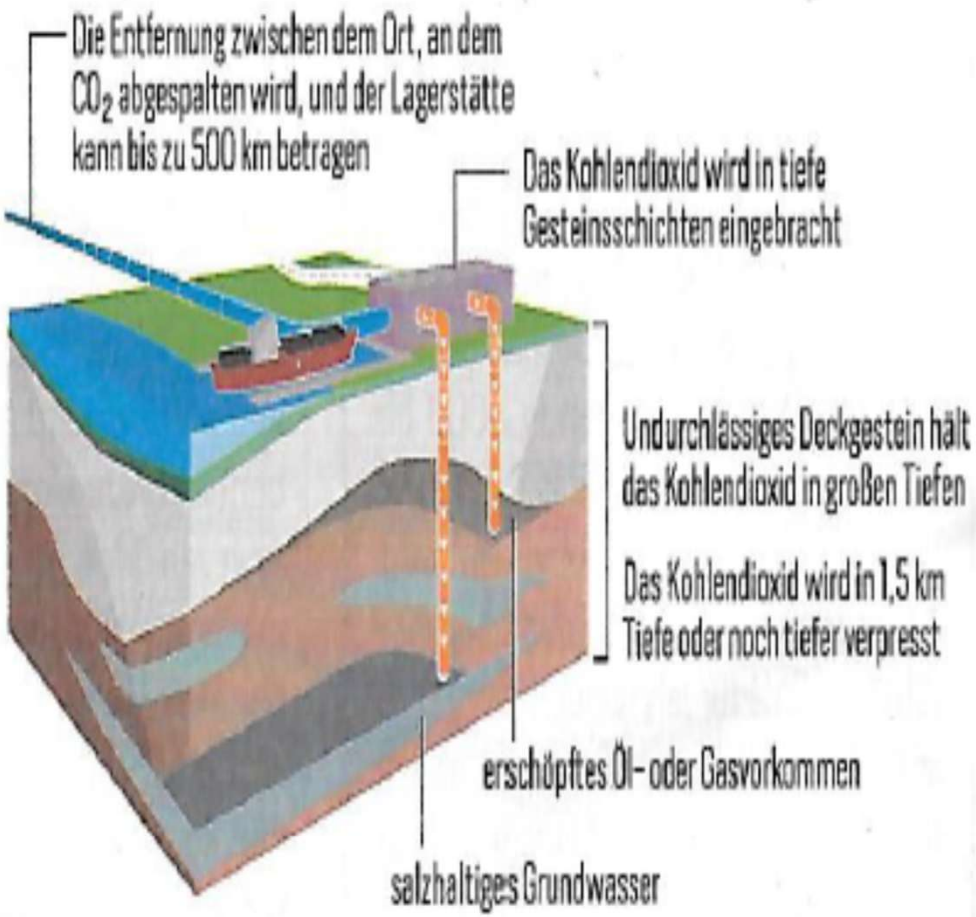
**Prognostizierte Entwicklung der Wasserstoffnachfrage in den Sektoren bis 2050**

in Terawattstunden pro Jahr




**Immenser Bedarf** Seit dem Ukraine-Krieg rechnen die Experten neu. Womöglich werden die Mengen weiter nach oben korrigiert

**Kohlendioxidabspaltung und Einlagerung CCS**




**Grab fürs Treibhausgas** Die Lagerung von $CO_2$ in tiefen Grundwasserschichten sei ungefährlich, behaupten die Verfechter der Technologie

Quelle: Deutsche-Energie-Agentur Dena, EnBW, Internationale Energieagentur IEA, Bellona aus Focus – Der Stoff, aus dem die Zukunft ist, S. 66-75, 34/2022

# Fazit und Ausblick

## Globaler Grüner Wasserstoff

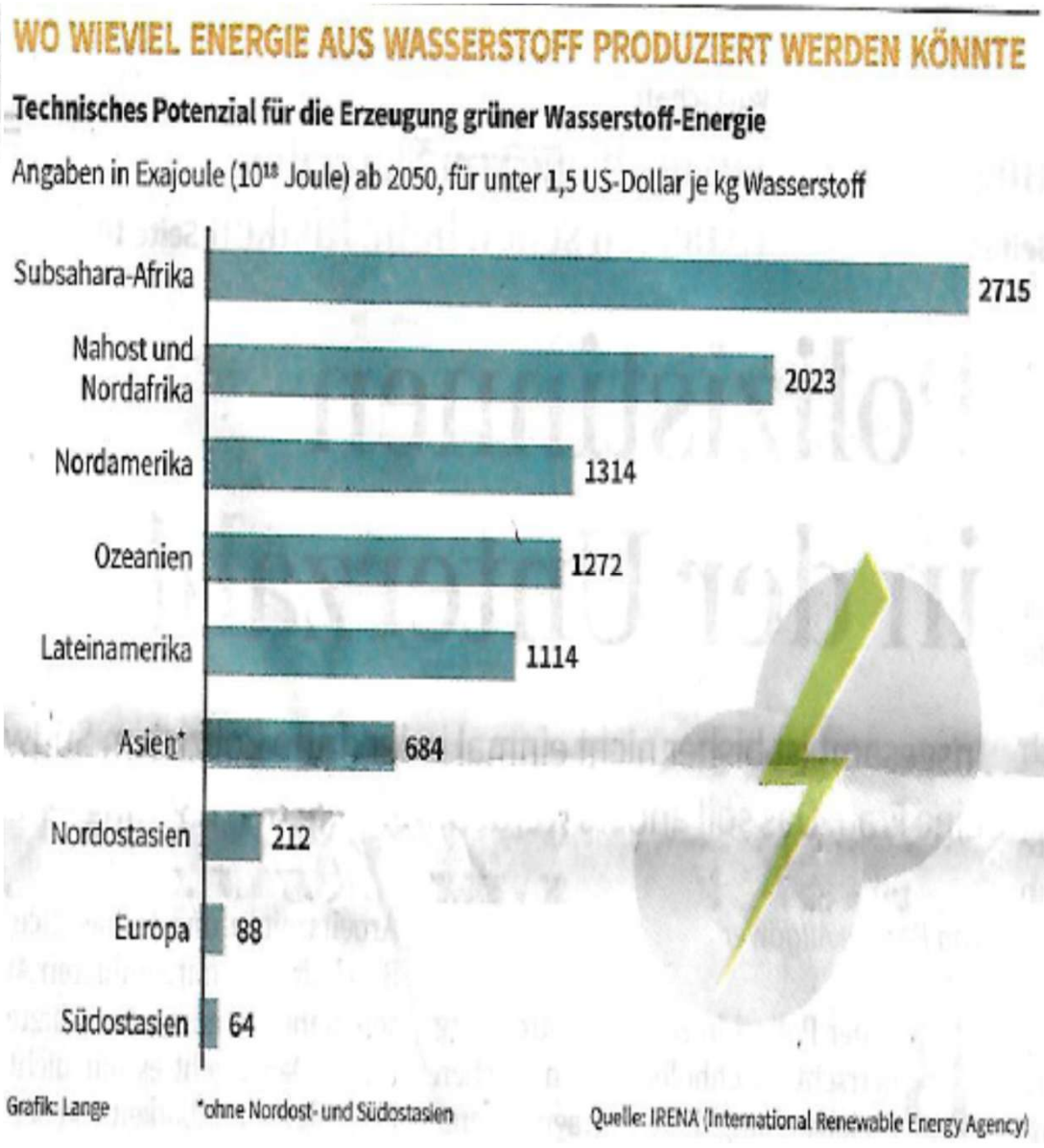
**Grüner Wasserstoff ist ein umweltfreundlicher Brennstoff mit großer Zukunft. In Angola, Namibia und Mauretanien werden derzeit gewaltige Anlagen geplant, um den zukünftigen Bedarf zu decken. Die notwendige Sonne dafür gibt es in Afrika reichlich.**

Dem umweltfreundlichen Brennstoff wird eine blendende Zukunft vorausgesagt. Der sonnenverwöhnte Kontinent könne „zur Supermacht klimafreundlicher Energie" werden, heißt es im Magazin des Afrika-Vereins – keineswegs nur Werbung in eigener Sache. Die Europäische Union geht davon aus, dass der Energiebedarf der gesamten Welt spätestens in 30 Jahren zu einem Viertel aus grünem Wasserstoff gedeckt wird – und diese Prognose wurde vor Wladimirs Putins Überfall auf die Ukraine gestellt, der die globale Energieversorgung völlig durcheinanderwirbelte. Dem Element werden die besten Chancen nachgesagt, zumindest mittelfristig russisches Erdgas zu ersetzen: Die Fachwelt spricht vom „hydrogen hype".

### Der physikalische Aufwand ist groß, um Wasserstoff zu gewinnen

Wasserstoff ist – anders als Erdöl – in der Natur kaum vorzufinden. Der Stoff ist so unselbstständig, dass er sofort neue Verbindungen sucht. Er ist genau genommen Träger und nicht Quelle von Energie, weil er zuerst unter großem physikalischen Aufwand aus Wasser gewonnen werden muss. Würde der für die elektrolytische Trennung der Wasser- und Sauerstoffatome benötigte Strom von einem Kohlekraftwerk erzeugt, wäre das Endprodukt nicht grüner, sondern grauer Wasserstoff und „schmutziger" als Erdöl. Die Trennung ergibt nur Sinn, wenn der Strom für die Elektrolyse aus erneuerbarer Energie, also aus Wasser-, Wind- oder Solarkraftwerken kommt.

Und da kommt Afrika ins Spiel. Der Kontinent ist für seine gnadenlosen Sonnenstrahlen bekannt – auch über Wind- und Wassermangel können sich zumindest die in Küsten- oder Regenwald-Regionen lebenden Afrikaner nicht beklagen. Eine Studie ergab, dass allein Westafrika 1500 Mal mehr Wasserstoff herstellen könnte, als Deutschland Prognosen zufolge in acht Jahren verbrauchen wird. Wüstenstaaten wie Mauretanien, Marokko oder Namibia könnten zum Kuwait des Wasserstoffzeitalters werden. Wo es kein Süßwasser für die Elektrolyse gibt, kann zuvor entsalztes Meerwasser verwendet werden. Und wo es keine Pipelines gibt, kann Wasserstoff mit Stickstoff in Ammoniak verwandelt auf Tankern über die Weltmeere verfrachtet werden. Technologisch alles kein Problem mehr – höchstens noch etwas teuer. Wasserstoff gilt als „Champagner des Energiewandels".




Quelle: Johannes Dieterich, Champagner des Energiewandels, Auszug, Stuttgarter Zeitung vom 23. Mai 2022

# Beispiele aus der Praxis

## - Das kann die Brennstoffzelle

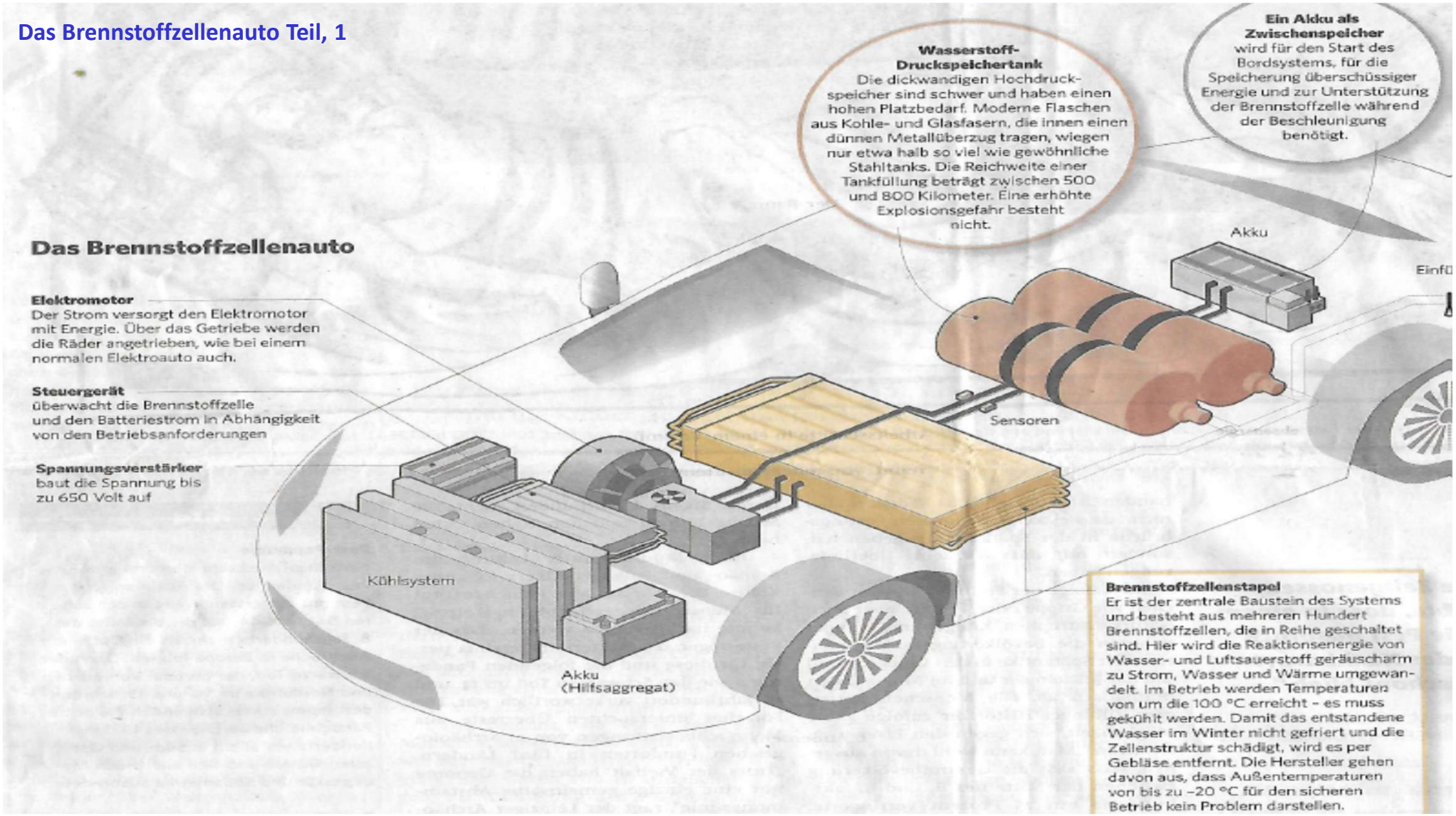
## - FfE-Beitragsreihe Wasserstoff

# **Das kann die Brennstoffzelle,** Stand 12/2019 **(1)**

## Ausgangslage und Einleitung

Tesla-Chef Elon Musk nennt sie die „Idiotenzelle“. Die japanische Regierung lässt sich davon nicht beirren. Sie setzt voll und ganz auf die Brennstoffzelle. Japan plant den Bau von 800.000 Fahrzeugen bis zum Jahr 2030 - inklusive der dafür notwendigen Infrastruktur. In Deutschland dagegen wartet die Brennstoffzelle noch auf den kommerziellen Durchbruch. Technisch ist sie zwar weitgehend ausgereift. Aber aus ökologischer Sicht ist die Anschaffung eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs nicht sinnvoll, solange der Wasserstoff aus den endlichen Rohstoffen Erdöl und Erdgas produziert wird. Am sinnvollsten wäre es, wenn man ihn durch Spaltung von Wasser und mit Hilfe von Ökostrom gewinnen würde.

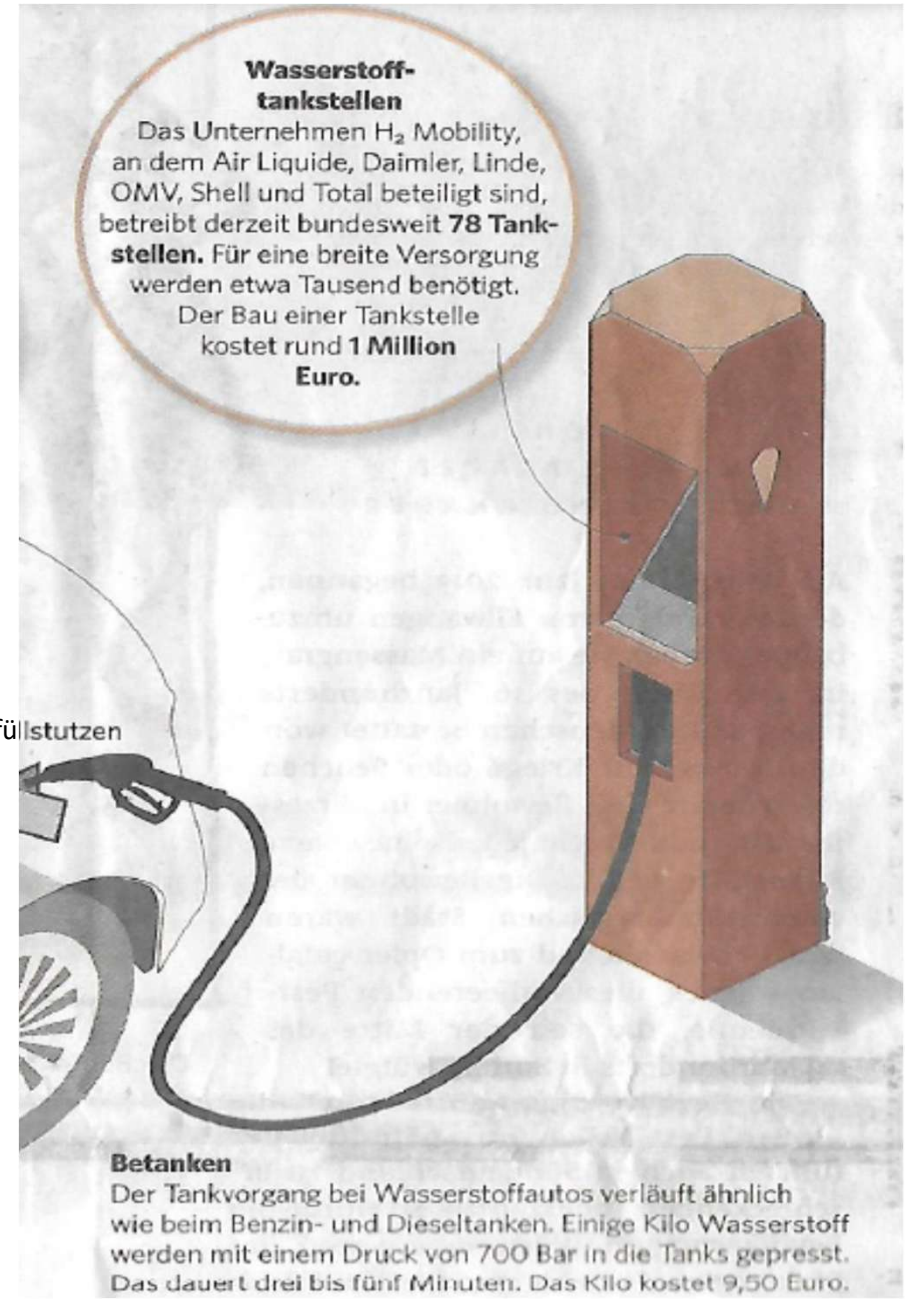
## Das Brennstoffzellenauto Teil, 1




Quelle: Zapletal, Manfred - Das kann die Brennstoffzelle, Bilderreihe der Stuttgarter Zeitung von 14./15.12.2019

# **Das kann die Brennstoffzelle,** Stand 12/2019 **(2)**

## Das Brennstoffzellenauto, Teil 2




## Speicherung und Transport von Wasserstoff




Quelle: Zapletal, Manfred - Das kann die Brennstoffzelle, Bilderreihe der Stuttgarter Zeitung von 14./15.12.2019

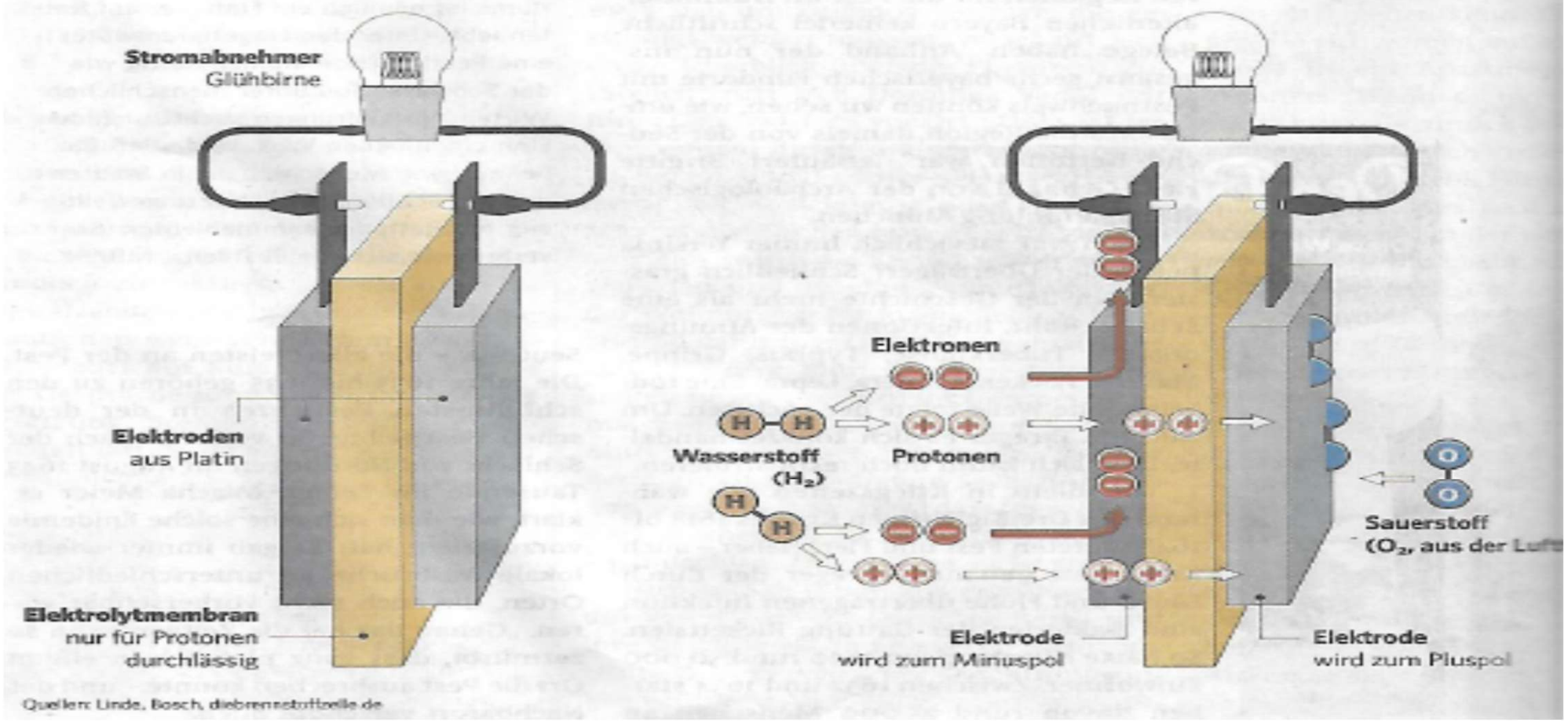
# **Das kann die Brennstoffzelle,** Stand 12/2019 **(3)**

**Funktion Brennstoffzelle, Teil 1**

## So funktioniert eine Brennstoffzelle

**Die Brennstoffzelle**
Eine Brennstoffzelle besteht aus zwei platinhaltigen Elektroden und einer dazwischen liegenden Membran, die protonendurchlässig ist. Das **Platin wirkt als Katalysator,** ohne den Wasser- und Sauerstoff nicht miteinander reagieren würden.

**Aufbau der Spannung**
Unter dem **Einfluss des Katalysators** zerfällt ein Wasserstoffmolekül in **zwei Elektronen** mit je einer negativen Ladung (–) und **zwei Protonen** mit je einer positiven Ladung (+). Die Protonen wandern durch die Membran zum Pluspol.



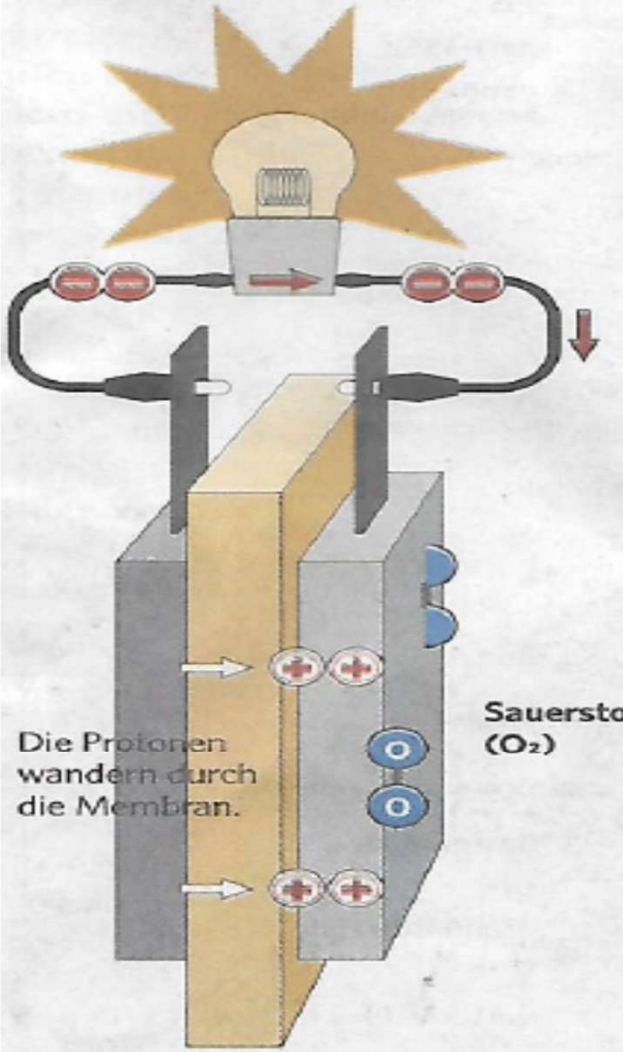

Quellen: Linde, Bosch, diebrennstoffzelle.de

Quelle: Zapletal, Manfred - Das kann die Brennstoffzelle, Bilderreihe der Stuttgarter Zeitung von 14./15.12.2019

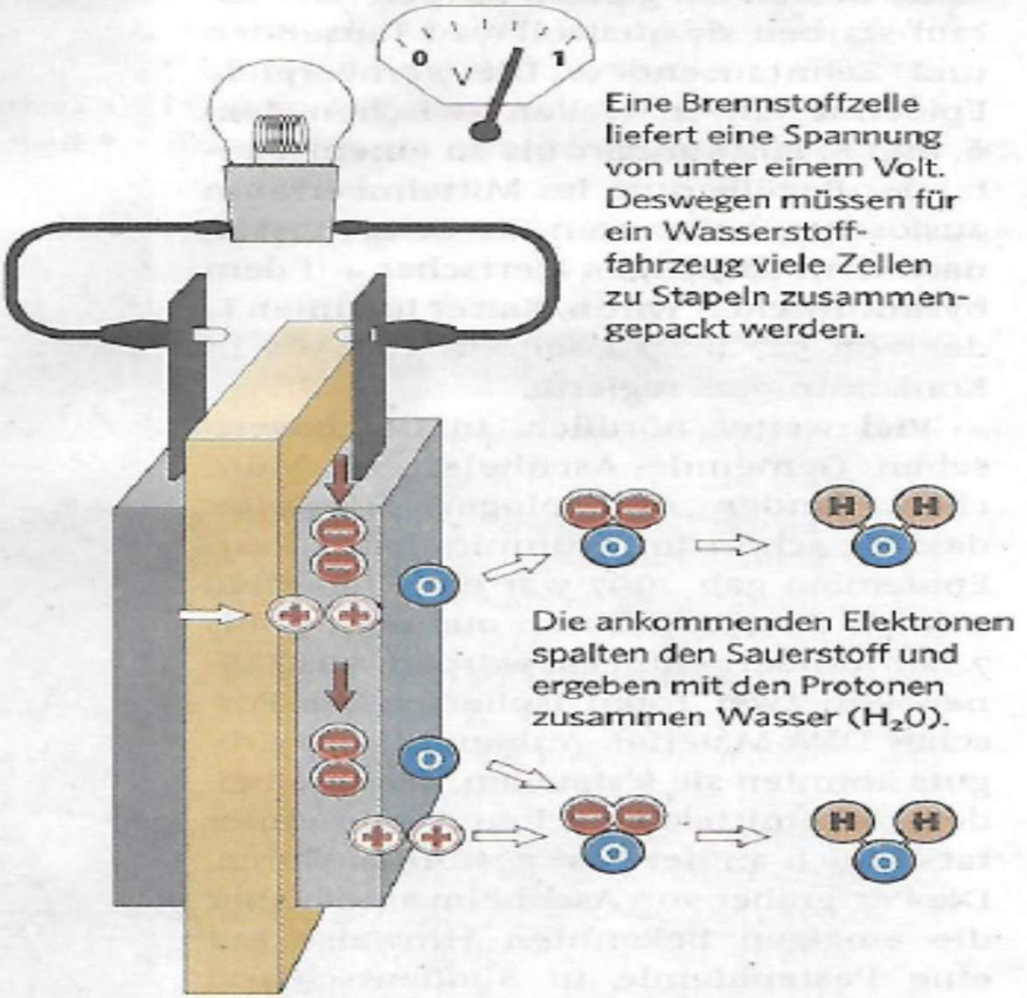
# **Das kann die Brennstoffzelle,** Stand 12/2019 **(4)**

## Funktion Brennstoffzelle, Teil 2

**Es entsteht nutzbarer Strom**
Wird über einen elektrischen Verbraucher der **Stromkreis geschlossen,** fließen Elektronen von einer Elektrode zur anderen.




**Das Endprodukt ist Wasser**
Die am Pluspol ankommenden Elektronen übertragen ihre **negative Ladung auf den Luftsauerstoff.** Nun reagieren die zwei Protonen, die ja positiv geladene Wasserstoffkerne sind, mit einem Sauerstoffatom zu einem Wassermolekül ($H_2O$).




Quelle: Zapletal, Manfred - Das kann die Brennstoffzelle, Bilderreihe der Stuttgarter Zeitung von 14./15.12.2019

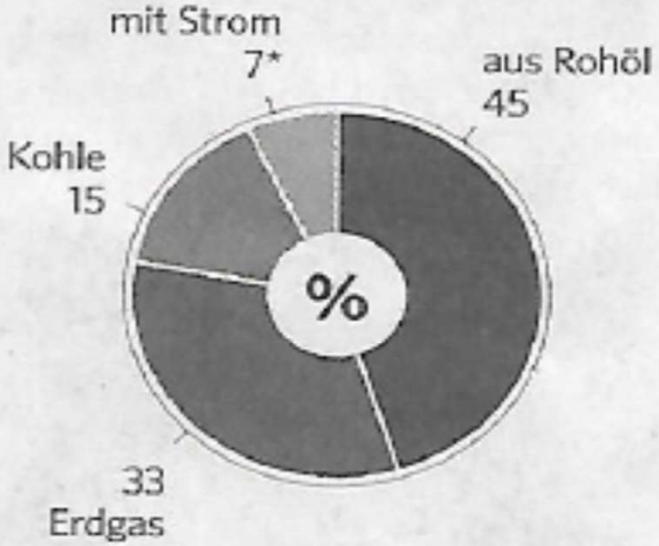
# **Das kann die Brennstoffzelle,** Stand 12/2019 **(5)**

**Wie wird der Wasserstoff in Deutschland und weltweit hergestellt 2015/2019**

## Wie wird der Wasserstoff für den Antrieb hergestellt?

Die Grundidee ist: Wasser wird durch Strom elektrolytisch in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Im Auto stellt dann die Brennstoffzelle aus diesen beiden Gasen Strom her, der dann das Auto über einen Elektromotor antreibt. Und aus dem Auspuff kommt kein Kohlendioxid, sondern nur Wasser. Was sich wunderbar anhört, ist leider (noch) nicht ganz Wirklichkeit geworden. Bisher kommt der Wasserstoff fast gänzlich aus fossilen Brennstoffen.

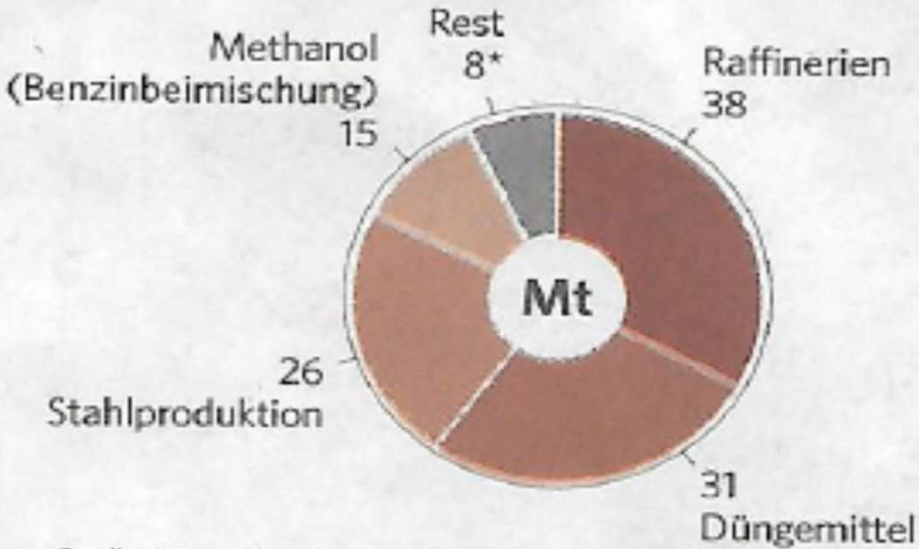
**Wasserstoffherstellung in Deutschland**
Anteile nach Primärenergieträger in Prozent, 2015




Quelle: IWD 2019

*60 % aus fossilen Brennstoffen (Deutscher Strommix 2018)

**Wasserstoffbedarf weltweit**
Angaben in Millionen Tonnen (Mt), 2019




Quelle: Internationale Energieagentur

*darunter < 0,01 Mt für Brennstoffzellen

Quelle: Zapletal, Manfred - Das kann die Brennstoffzelle, Bilderreihe der Stuttgarter Zeitung von 14./15.12.2019

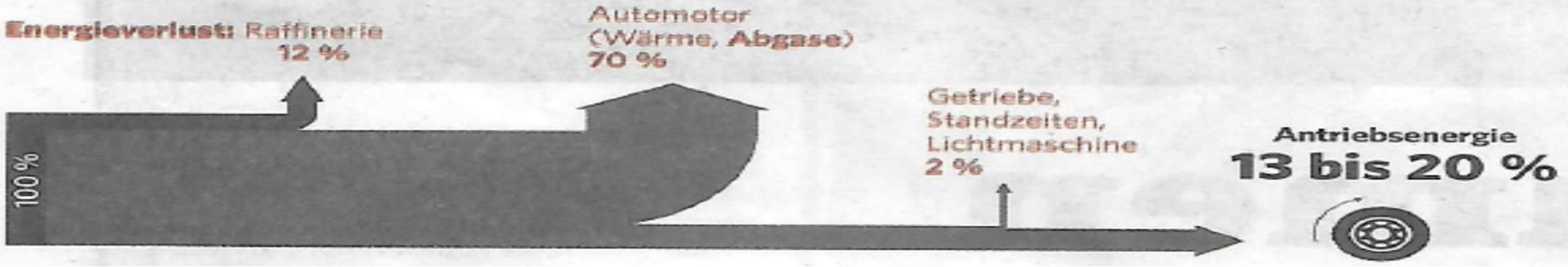
# **Das kann die Brennstoffzelle,** Stand 12/2019 **(6)**

## Effizienzvergleich von Antriebssystemen im Vergleich bei Pkw, Teil 1

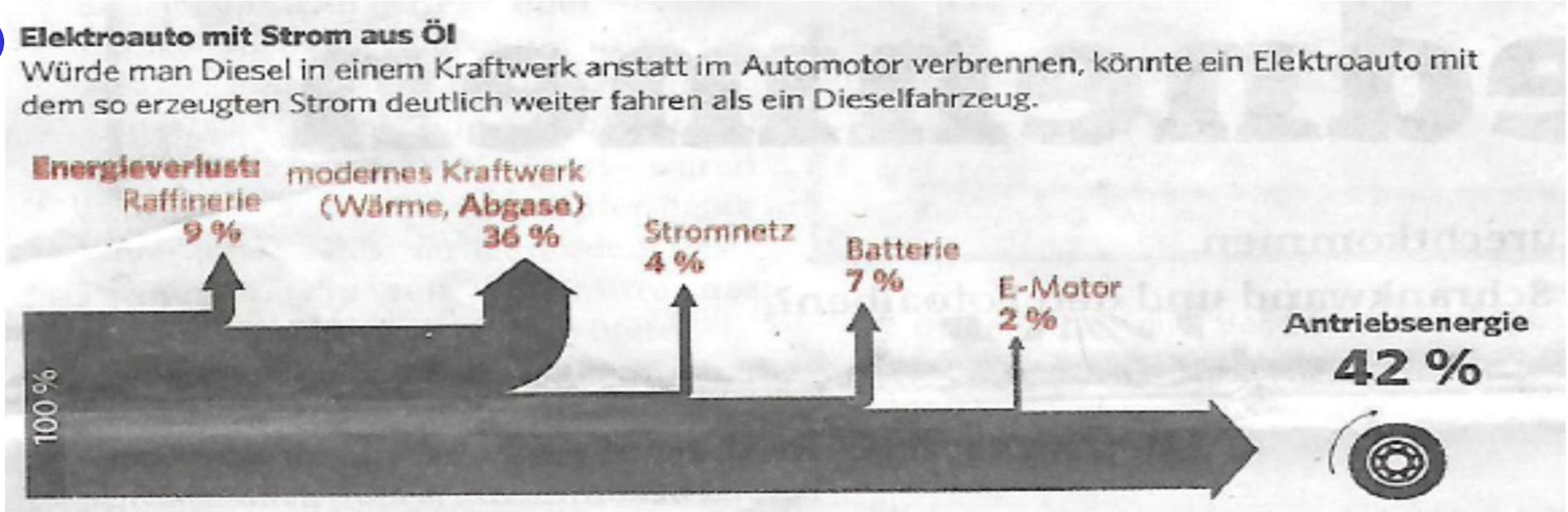
### Effizienzvergleich von Antriebssystemen bei Pkw*

Ein Großteil der im Rohöl enthaltenen Energie geht bei **Benzinern und Dieselfahrzeugen** schon bei der Weiterverarbeitung und im Motor verloren. Für den reinen Antrieb bleibt nicht mehr viel übrig. Etwas besser sähe es bei **Brennstoffzellenautos** aus, wenn bei der elektrolytischen Herstellung von Wasserstoff erneuerbare Energien eingesetzt werden könnten. **Elektroautos** kommen in puncto Effizienz auf Bestwerte, weil hier am wenigsten Energie bis zum Antrieb auf der Strecke bleibt.

**Auto mit Verbrennungsmotor (Diesel aus Öl)**
jeweilige Verluste in Prozent




**Elektroauto mit Strom aus Öl**
Würde man Diesel in einem Kraftwerk anstatt im Automotor verbrennen, könnte ein Elektroauto mit dem so erzeugten Strom deutlich weiter fahren als ein Dieselfahrzeug.



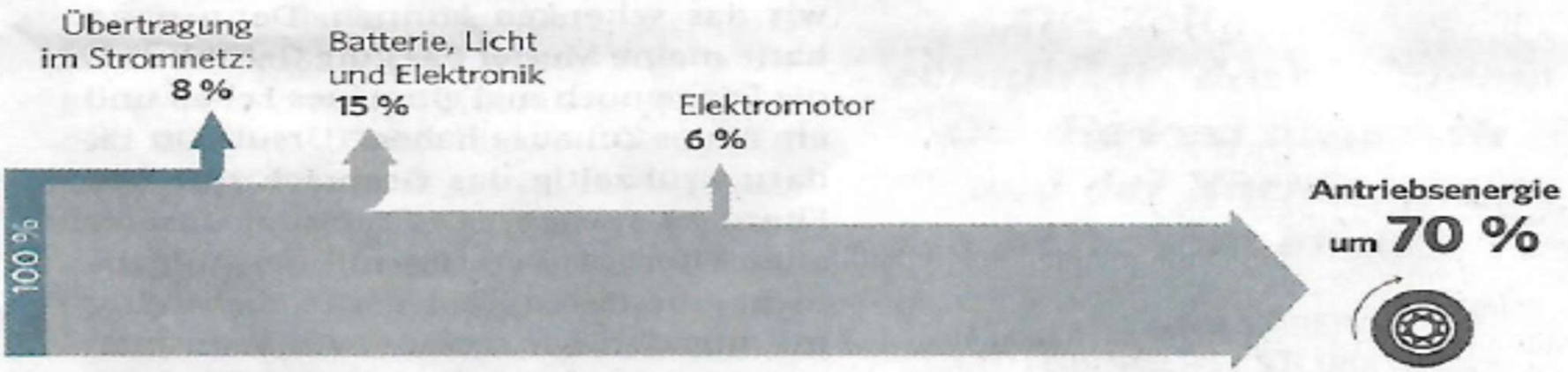

Quelle: Zapletal, Manfred - Das kann die Brennstoffzelle, Bilderreihe der Stuttgarter Zeitung von 14./15.12.2019

# **Das kann die Brennstoffzelle,** Stand 12/2019 **(7)**

## Effizienzvergleich von Antriebssystemen im Vergleich bei Pkw, Teil 2

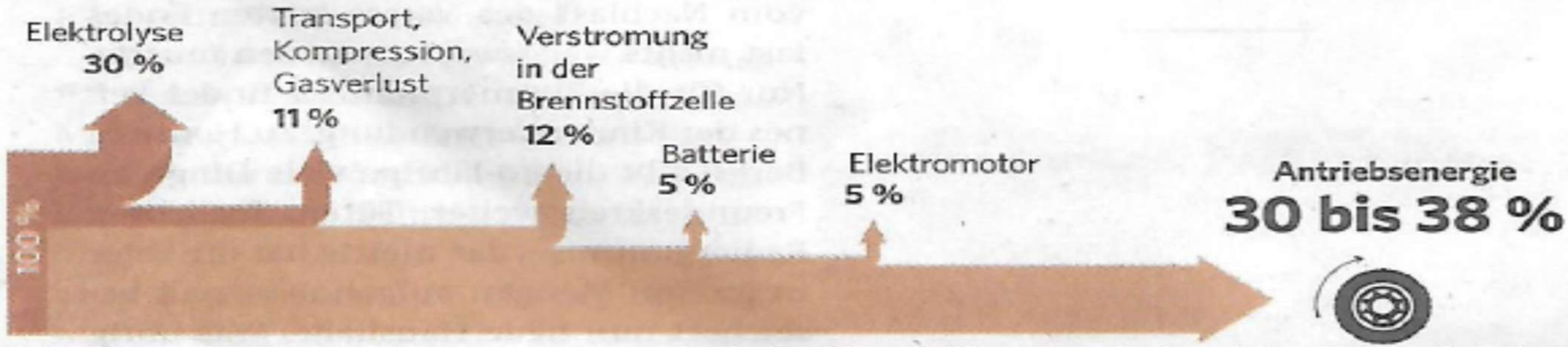
**Elektroauto mit Strom aus erneuerbaren Energien**

Elektromotoren sind hervorragende Energiewandler und können elektrische Energie (bis zu 90 %) beinahe verlustfrei in mechanische Arbeit umwandeln.




**Wasserstoffauto mit Strom aus erneuerbaren Energien**

Schon bei der Herstellung des Wasserstoffs treten sehr hohe Energieverluste auf. Weil keine schweren Batterien mitgeführt werden müssen, erscheint die Brennstoffzellentechnologie derzeit hauptsächlich für Lkw sinnvoll, wo Gewicht gespart werden muss.




Quellen: Pricewaterhouse Coopers, Medium.com, grimselstrom.ch, zukunft-mobilitaet.net (*Berechnungen beruhen auf unterschiedlichen Quellen)

Quelle: Zapletal, Manfred - Das kann die Brennstoffzelle, Bilderreihe der Stuttgarter Zeitung von 14./15.12.2019

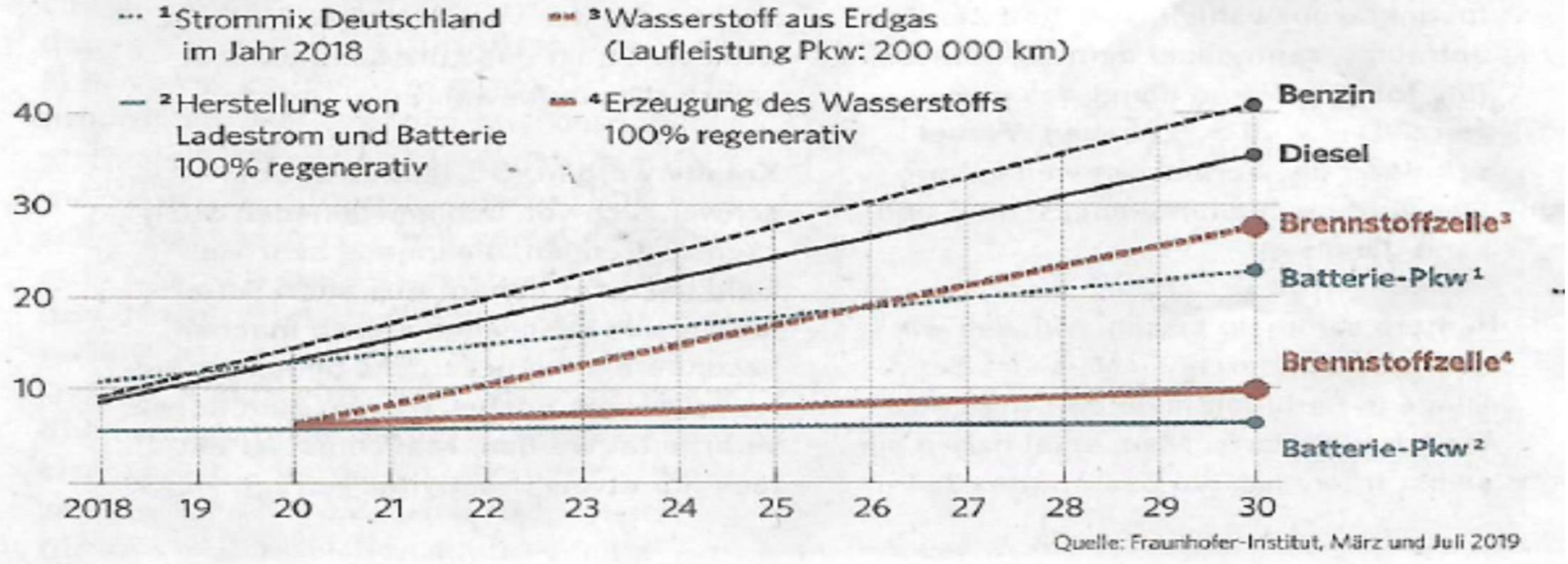
# **Das kann die Brennstoffzelle,** Stand 12/2019 **(8)**

**Der Ausstoß von Treibhausgasen in einem Autoleben von 2018-2030**

## Der Ausstoß von Treibhausgas in einem Autoleben

Ein 2018 produziertes Elektroauto erzeugt gegenüber einem vergleichbaren Benziner deutlich weniger Treibhausgas. Und zwar selbst dann, wenn man den deutschen Strom zum Laden der Batterie zugrunde legt, der noch zu 60 Prozent aus fossilen Brennstoffen hergestellt wird. Für **Brennstoffzellenautos** ist die $CO_2$-Bilanz schlecht, weil der Energieträger Wasserstoff derzeit komplett aus Rohöl und Erdgas hergestellt wird. Sollte die Wasserstoffgewinnung irgendwann durch Elektrolyse von Wasser mit erneuerbaren Energien stattfinden, würde sich das ändern. Dann wären nur noch sehr geringe Emissionen zu erwarten.

**Treibhausgasemissionen eines Mittelklassewagens vom Kauf bis zum Jahr 2030**
in Tonnen, über die Nutzungsdauer aufaddiert (inklusive Herstellung)




Quelle: Fraunhofer-Institut, März und Juli 2019

Quelle: Zapletal, Manfred - Das kann die Brennstoffzelle, Bilderreihe der Stuttgarter Zeitung von 14./15.12.2019

# **Das kann die Brennstoffzelle,** Stand 12/2019 **(9)**

**Entwicklung Deutscher Pkw-Stand mit Beitrag Wasserstoff 1960-2019**




Quelle: Zapletal, Manfred - Das kann die Brennstoffzelle, Bilderreihe der Stuttgarter Zeitung von 14./15.12.2019

# FfE-Beitragsreihe Wasserstoff, Stand ab 17.05.2021 (1)

## Übersicht über die Themen der Beitragsreihe Wasserstoff

**[1] Historie des Wasserstoffs als Energieträger**
[2] Wie wird Wasserstoff produziert?
[3] Wo soll Wasserstoff verwendet werden?
[4] Wie wird Wasserstoff transportiert?
[5] Welchen Beitrag kann Wasserstoff zur Energiewende liefern?
[6] Übersicht aktueller Wasserstoffprojekte

Spätestens seit der verabschiedeten nationalen Wasserstoffstrategie ist Wasserstoff in aller Munde. Auch an der FfE wird Forschung betrieben in Bezug auf den Beitrag von Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem. In aktuellen Projekten liegt u. a. der Fokus auf der nachhaltigen Erzeugung, dem Transport und der Verwendung von Wasserstoff sowie übergeordneten Themen der Marktentwicklung und Geschäftsmodelle.

# Teil 1: Historie des Wasserstoffs als Energieträger

Dieser Beitrag ist der erste einer Reihe von sechs Beiträgen, die sukzessive in den kommenden Wochen erscheinen werden. In dieser Beitragsreihe werden die wichtigsten Aspekte zum Thema Wasserstoff kurz, verständlich und kompakt erläutert.

## Wasserstoff als Energieträger der Zukunft

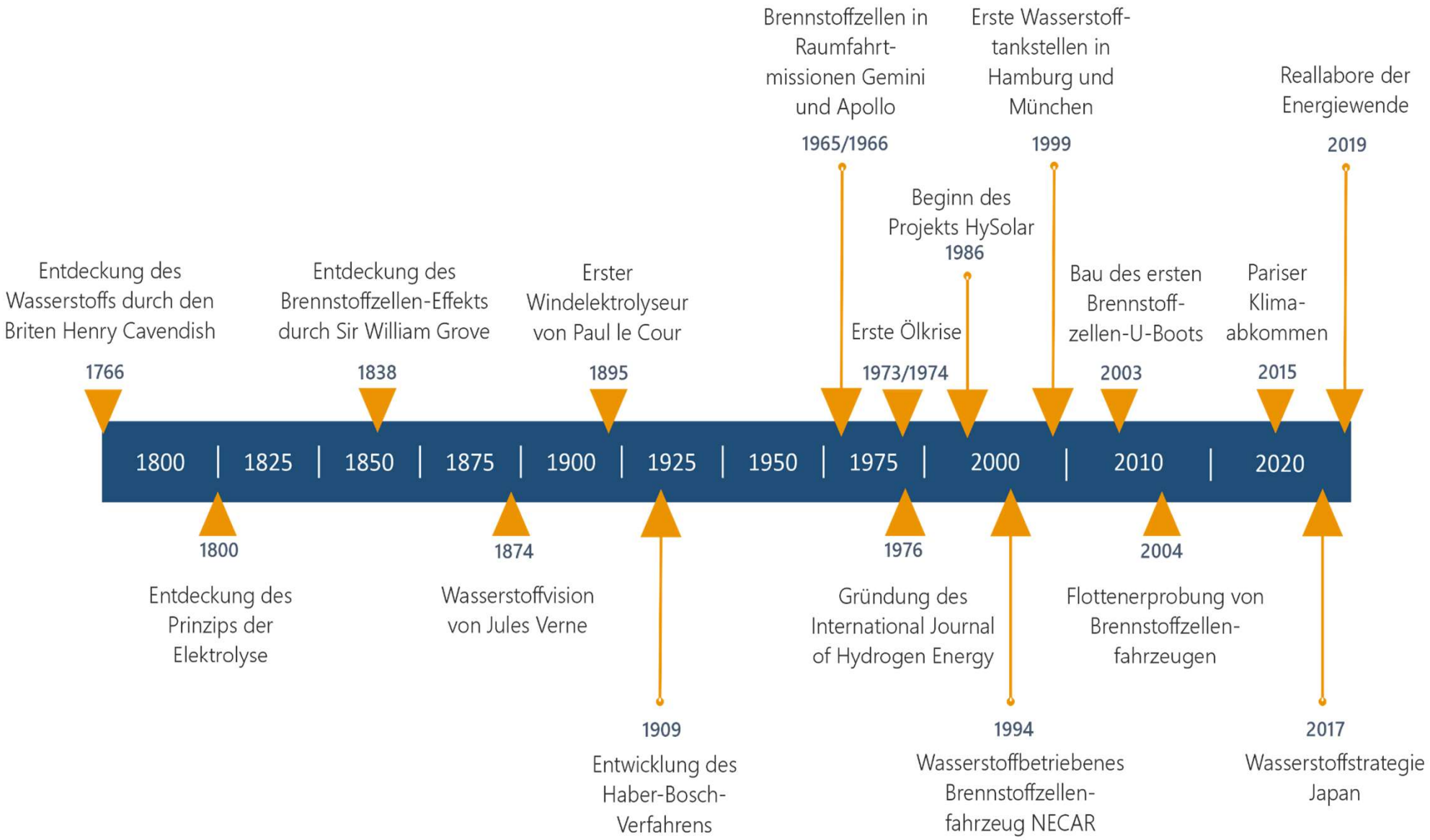
Aktuell werden in vielen Ländern der Welt nationale Wasserstoffstrategien verabschiedet und große Wasserstoffprojekte verkündet. Die Vision des Wasserstoffs als „Energieträger der Zukunft“ ist jedoch bereits etwa 150 Jahre alt und hat mehrere Zyklen der Illusion und Desillusion durchlaufen. In diesem Beitrag möchten wir einen Überblick über die historischen Entwicklungen im Bereich Wasserstoff geben.

## Grundlagen der Wasserstofftechnologie

Nachdem Wasserstoff als Element 1766 vom Briten Cavendish entdeckt wurde, wurden die technischen Grundlagen der Wasserstofftechnologie bereits im 19. Jahrhundert gelegt: 1800 wurde das Prinzip der Wasserelektrolyse entdeckt, bei der Wasser unter Anlegen von Spannung in Sauerstoff und Wasserstoff zerlegt wird. Das Prinzip der Brennstoffzelle, die es erlaubt, die im Wasserstoff gespeicherte Energie in Strom zu wandeln, wurde 1838 entdeckt. Die Brennstoffzelle konnte sich jedoch nicht gegenüber den zur selben Zeit entwickelten durch Dampfmaschinen betriebenen Generatoren durchsetzen. [1]

# FfE-Beitragsreihe Wasserstoff, Stand ab 17.05.2021 (2)

## Zeitstrahl: Entwicklung der Wasserstofftechnologie



# FfE-Beitragsreihe Wasserstoff, Stand ab 17.05.2021 (3)

## Frühe Wasserstoffvisionen

Visionen eines auf Wasserstoff basierenden Energiesystems existierten jedoch bereits früh. Jules Verne beschrieb in seinem Buch „Die geheimnisvolle Insel“ bereits 1874 Wasserstoff als die Kohle der Zukunft:

»...mit Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist [...] Wasserstoff und Sauerstoff, werden wir auf unabsehbare Zeit die Energieversorgung der Erde sichern. Eines Tages werden Dampfer und Lokomotiven keine Kohlebunker mehr führen, sondern Gastanks, aus denen komprimierte Gase durch Rohre in die Heizkessel strömen. Das Wasser ist die Kohle der Zukunft. ...«

Jules Verne sah in seiner Vision bereits die Erzeugung des Wasserstoffs mittels Elektrizität vor, beantwortete aber nicht die Frage, wie dieser Strom erzeugt werden sollte. [2]

## Erster Windstromelektrolyseur

Die Frage zum möglichen Ursprung des Stroms beantwortete bereits 1895 der „Pionier der Windenergie“ Poul le Cour nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch. Er errichtete 1895 in Dänemark eine Versuchsanlage mit einer der weltweit ersten Windkraftanlagen zur Stromerzeugung. Um das Problem der zeitlich variablen Erzeugung der Windkraftanlage zu lösen, sah er zusätzlich eine Speicherung der Windenergie in Form von Wasserstoff vor. Diese Anlage lief sieben Jahre. Der erzeugte und gespeicherte Wasserstoff wurde direkt in Gasleuchten einer nahen Volkshochschule verwendet. [2]

## Wasserstoff zur Düngemittelproduktion

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts gewann die nicht-energetische Verwendung von Wasserstoff an Bedeutung. Die Deutschen Bosch und Haber entwickelten ein Verfahren zur industriellen synthetischen Gewinnung von Ammoniak aus Wasserstoff und Stickstoff. Beide Wissenschaftler wurden hierfür mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Ammoniak ist ein wichtiger chemischer Grundstoff, der insbesondere für Düngemittel benötigt wird und dadurch das Bevölkerungswachstum ermöglichte. Damalige Elektrolyseure konnten die benötigten Mengen industrieller Mengen Wasserstoff nicht herstellen, weswegen auf Verfahren der Kohlevergasung zurückgegriffen wurde. Auch heute noch wird ein Großteil des produzierten Wasserstoffs nicht für energetische Nutzung, sondern zur Ammoniaksynthese verwendet. [3]

## Erste Brennstoffzellen-Anwendungen in der Raumfahrt

Die ersten praktischen Anwendungen zur Gewinnung von Strom aus Wasserstoff gab es in der Raumfahrt. Für die Raumfahrtprogramme der NASA wurde Mitte des 20. Jahrhunderts nicht nur Wasserstoff als Treibstoff der Raketen verwendet, sondern die Raumschiffe der Gemini und Apollo Missionen führten auch Brennstoffzellen mit, die der Strom, Wärme- und Trinkwasserversorgung an Bord dienten. Vorteil des Wasserstoffes in der Raumfahrt war insbesondere sein geringes Gewicht, während Kosten keine große Rolle spielten. Im Zuge dieser Missionen wurden wichtige Weiterentwicklungen der Brennstoffzellen- und Speichertechnologie von Wasserstoff unternommen. [1]

## Suche nach Alternativen zum Öl

Im Zuge der Ölkrisen in den 1970er Jahren wurde nach Alternativen zu fossilen Energieträgen gesucht und das Konzept einer Wasserstoffwirtschaft entwickelt, bei dem Wasserstoff eine zentrale Rolle als Energieträger spielt. Insbesondere in den USA und Europa wurden große Forschungsvorhaben durchgeführt, die ersten wissenschaftlichen Fachzeitschriften gegründet sowie Konferenzen mit dem Thema der Wasserstoffwirtschaft durchgeführt. [1,4]

## Solarer Wasserstoff

In den 1980er Jahren wurden die ersten Demonstrationsprojekte für solaren Wasserstoff vorgestellt, die weltweit Aufmerksamkeit erhielten. Einerseits war dies das deutsch-saudi-arabische Projekt HYSOLAR, sowie das Solar-Wasserstoffprojekt bei Neuenburg in Bayern. In beide Projekten speiste Strom aus Photovoltaikanlagen die Elektrolyseure. Sie zeigten, dass eine Wasserstoffwirtschaft technisch möglich war. Die hohen Kosten stellten jedoch weiterhin eine sehr große Hürde dar. [5]

# FfE-Beitragsreihe Wasserstoff, Stand ab 17.05.2021 (4)

## Brennstoffzelle und Mobilität

In den 1990er und 2000er Jahren wurden in der Forschung große Fortschritte bei der mobilen Anwendung von Wasserstoff und Brennstoffzellen erreicht. Die Autoindustrie unternahm große Anstrengungen, um wasserstoffgetriebene Brennstoffzellenautos zu entwickeln. Prototypen wasserstoffbetriebener Brennstoffzellen-Fahrzeuge wie PKWs und Busse wurden vorgestellt und die technische Tauglichkeit wurde in weltweiten Flottenerprobungen erwiesen. Ein Problem blieben aber insbesondere die hohen Kosten gegenüber konventionellen Fahrzeugen sowie die Probleme der fehlenden Tankinfrastruktur. [1,5,6]

## Wasserstoff als Teil der Energiewende

Die 2010er Jahre waren geprägt von dem Ziel der Klimaneutralität und des Begrenzens der Erderwärmung auf 1,5 Grad. (Hydrogen Council). Dank erheblich gesunkener Kosten erneuerbarer Energien stieg deren Anteil weltweit im Stromsektor. Eine vollständige Dekarbonisierung des Energiesektors verlangt jedoch Emissionsreduktionen in allen Sektoren, auch in schwer zu dekarbonisierenden Sektoren, wie der Industrie. Hier bietet Wasserstoff mit seinen vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten das Potenzial, die Erreichung der Klimaziele durch bessere Integration erneuerbarer Energien zu unterstützen. [6,7]

## Wasserstoffstrategien und Markthochlauf

Als Beitrag zur Erreichung der Klimaziele haben bereits mehr als 20 Länder Wasserstoffstrategien und -Roadmaps verabschiedet. In Deutschland sieht die 2020 verabschiedete Wasserstoffstrategie eine jährliche Erzeugung von 14 TWh Wasserstoff bis 2030 vor. Staaten stellen weltweit mehr als 70 Milliarden USD zur Verfügung, um einen Markthochlauf zu ermöglichen. In Deutschland geschieht dies unter anderem in den sogenannten „Reallaboren der Energiewende“ bei denen marktnahe Wasserstofftechnologien in industriellem Maßstab gefördert werden. [7,8]

Knappe 150 Jahre nach Jules Vernes ersten Wasserstoffvisionen hat sich viel getan in der Welt des Wasserstoffs, aber an **den grundlegenden Konzepten der energetischen Nutzung des** Wasserstoffs hat sich überraschend wenig geändert. Dennoch scheint es, als würden nun die Zusagen zur Erreichung der Klimaziele von Unternehmen und Staaten dazu führen, dass Wasserstoff in vielen Bereichen Einzug hält. Die Forschung muss diesen Prozess begleiten, damit der Beitrag von Wasserstoff zur Zielerreichung überprüft und Möglichkeiten zur Steuerung aufgezeigt werden können.

**Weitere Informationen:**

Trans4ReaL – Transferforschung für die Reallabore der Energiewende zu Sektorkopplung und Wasserstoff
Warum reden alle über Wasserstoff? – Interview mit Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner
Elektrolyse – Die Schlüsseltechnologie für Power-to-X

**Quellen:**

[1] J. Adolf, M. Fischedick, Shell Wasserstoff-Studie Energie der Zukunft?: Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H2, 2017.
[2] K. Schönleber, Wasserstoffwirtschaft –Ein flüchtiger Traum?, Kultur & Technik – das Magazin aus dem Deutschen Museum (2020).
[3] C. Flavell-While, Fritz Haber and Carl Bosch - Feed the World, 2010. https://www.thechemicalengineer.com/features/cewctw-fritz-haber-and-carl-bosch-feed-the-world/ (accessed 30 April 2021).
[4] International Renewable Energy Agency, Green hydrogen: A guide to policy making.
[5] Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Strategiepapier zum Forschungsbedarf in der Wasserstoff-Energietechnologie, 2005.
[6] J. Töpler, J. Lehmann, Wasserstoff und Brennstoffzelle, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017.
[7] Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness, 2021.
[8] BMWi, Nationales Reformprogramm 2020 - Die Nationale Wasserstoffstrategie, 2020.

Quelle: FfE Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V, München, Auszug aus aktuelle Informationen, Auszug Wasserstoff, Juni 2021

# Anhang zum Foliensatz

# Glossar Wasserstoff

## Grauer Wasserstoff:

Grauer Wasserstoff basiert auf dem Einsatz von fossilen Kohlenwasserstoffen. Maßgeblich für die Produktion von grauem Wasserstoff ist die Dampfreformierung von Erdgas. Seine Erzeugung ist – abhängig vom eingesetzten fossilen Ausgangsstoff – mit erheblichen CO2-Emissionen verbunden.

## Blauer Wasserstoff:

Als blauer Wasserstoff wird Wasserstoff bezeichnet, dessen Erzeugung mit einem CO2-Abscheidungs- und -Speicherungsverfahren gekoppelt wird (engl. Carbon Capture and Storage, CCS). Das bei der Wasserstoffproduktion erzeugte CO2 gelangt so nicht in die Atmosphäre und die Wasserstoffproduktion kann bilanziell als CO2-neutral betrachtet werden.

## Grüner Wasserstoff:

Grüner Wasserstoff wird durch Elektrolyse von Wasser hergestellt, wobei für die Elektrolyse ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien zum Einsatz kommt. Unabhängig von der gewählten Elektrolysetechnologie erfolgt die Produktion von Wasserstoff CO2-frei, da der eingesetzte Strom zu 100 Prozent aus erneuerbaren Quellen stammt und damit CO2-frei ist.

## Türkiser Wasserstoff:

Als „türkiser Wasserstoff“ wird Wasserstoff bezeichnet, der über die thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) hergestellt wurde. Anstelle von CO2 entsteht dabei fester Kohlenstoff. Voraussetzungen für die CO2-Neutralität des Verfahrens sind die Wärmeversorgung des Hochtemperaturreaktors aus erneuerbaren oder CO2-neutralen Energiequellen sowie die dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs.

## Folgeprodukte:

Aus Wasserstoff können weitere Folgeprodukte hergestellt werden (Ammoniak, Methanol, Methan usw.). Sofern diese Produkte unter der Verwendung von „grünem“ Wasserstoff erzeugt werden, wird im Folgenden übergreifend von Power-to-X (PtX) gesprochen. Je nachdem, ob die erzeugten Folgeprodukte in gasförmiger oder flüssiger Form anfallen, spricht man von Power-to-Gas (PtG) oder von Power-to-Liquid (PtL).

Quelle: BMWI – Die Nationale Wasserstoffstrategie, Schlüsselelement der Energiewende, Juni 2020

# Ausgewählte Internetportale + KI (1)

## Statistikportal Bund & Länder
**www.statistikportal.de**

**Herausgeber:**

**Statistische Ämter des Bundes und der Länder**
E-Mail: Statistik-Portal@stala.bwl.de ; verantwortlich:
Statistisches Landesamt Baden-Württemberg
70199 Stuttgart, Böblinger Straße 68
Telefon: 0711 641- 0; E-Mail: webmaster@stala.bwl.de
Kontakt: Frau Spegg

**Info**

Bevölkerung, Wirtschaft, Energie, Umwelt u.a, **sowie**

- **Arbeitsgruppe Umweltökonomische Gesamtrechnungen www.ugrdl.de**
- **Arbeitskreis „Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder“; www.vgrdl.de**
- **Länderarbeitskreis Energiebilanzen Bund-Länder www.lak-Energiebilanzen.de > mit Klimagasdaten**
- **Bund-Länder Arbeitsgemeinschaft Nachhaltige Entwicklung; www.blak-ne.de**

## Energieportal Baden-Württemberg
**www.energie.baden-wuerttemberg.de**

**Herausgeber:**

**Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg**
Postfach 103439; 70029 Stuttgart
Tel.: 0711/126-0; Fax 0711/126-2881
E-Mail: Poststelle@um.bwl.de

## Portal Energieatlas Baden-Württemberg
**www.energieatlas-bw.de**

**Herausgeber:**

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart und
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe

**Info**

Behördliche Informationen zum Thema Energie aus Baden-Württemberg

## Versorgerportal Baden-Württemberg
**www.versorger-bw.de**

**Herausgeber:**

**Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg**
Postfach 103439; 70029 Stuttgart
Tel.: +49 (711) 126 – 0; Fax: +49 (711) 222 4957 1204
E-Mail: poststelle@um.bwl.de

**Info**

Aufgaben der Energiekartellbehörde B.-W. (EKartB) und der Landes-regulierungsbehörde B.-W. (LRegB), Netzentgelte, Gas- und Trinkwasserpreise, Informationen der 230 baden-württembergischen Netzbetreiber

## Umweltportal Baden-Württemberg
**www.umwelt-bw.de**

**Herausgeber:**

**Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg**
Postfach 103439; 70029 Stuttgart
Tel.: 0711/126-0; Fax 0711/126-2881
E-Mail: Poststelle@um.bwl.de

**Info**

Der direkte Draht zu allen Umwelt- und Klimaschutz-informationen in BW

# Ausgewählte Internetportale + KI (2)

## Portal Klima sucht Schutz

### Interakiver EnergieSparBerater

**Die Klimaschutzkampagne wird vom Bundesumweltministerium gefördert.**

**www.klima-sucht-schutz.de;**
**www.co2online.de**

**Herausgeber:**

Projektträger ist die

co2online gGmbH, Gemeinnützige Beratungsgesellschaft
Hochkirchstr. 9, 10829 Berlin

Tel.: 030 / 7676 85-0, Fax: 030/ 7676 85-11
E-Mail: info@klima-sucht-schutz.de

**Info**

Die Klimaschutzkampagne hat zum Ziel, in privaten Haushalten, Gewerbe und Handel Energie einzusparen und die Emission von Kohlendioxid zu verringern.

## Portal IHK-Tag Baden Württembergischer Industrie- und Handelskammertag

### Federführung für die Themen Energie & Industrie

**www.karlsruhe.ihk.de**

**Herausgeber:**

**IHK-Tag Baden-Württembergischer Industrie- und Handelskammertag**
Federführung für Energie & Industrie in BW

**IHK Karlsruhe**
Lammstr. 13-17, 76133 Karlsruhe
Tel.: 0721 / 174-174, Fax: 0721 / 174-290
E-mail: jeromin@karlsruhe.ihk.de,

Kontakt: Linda Jeromin; Armin Hartlieb

**Info**

Energie

## Shell Energie-Dialog

**www.shell.com/home/content/de-de**

**Herausgeber:**

**Deutsche Shell Holding GmbH**
Suhrenkamp 71 – 77; 22335 Hamburg
Tel.: +49 (0) 40 6324 - 0
E-Mail: kontakt@shell.com

**Info**

Veröffentlichungen, z.B. Vorträge Energie & Verkehr 2007(PDF)

## Esso

**www.esso.de**

**Herausgeber:**

**ESSO Deutschland GmbH**
Kapstadtring 2; 22297 Hamburg
Telefon: 040 / 6393-0; Fax: 040 / 6393-3368

**Info**

Veröffentlichungen, z.B. Öldorado, Energieprognosen (PDF)

# Ausgewählte Internetportale + KI (3)

## Microsoft – Bing-Chat mit GPT-4

**www.bing.com/chat**

**Herausgeber:**

Microsoft Bing

**Info**

b Bing ist KI-gesteuerter Copilot für das Internet zu Themen – Fragen und Antworten

## Infoportal Energiewende Baden-Württemberg plus weltweit

**www.dieter-bouse.de**

**Herausgeber:**

**Dieter Bouse, Diplom-Ingenieur**
Werner-Messmer-Str. 6, 78315 Radolfzell am Bodensee
Tel.: 07732 / 8 23 62 30;
E-Mail: dieter.bouse@gmx.de

**Info**

Energiewende in Baden-Württemberg, Deutschland, EU-27 und weltweit

# Ausgewählte Informationsstellen (1)

**Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM)**

Kerner Platz 9, 70178 Stuttgart
Internet: www.um.baden-wuerttemberg.de
Tel.: 0711-126-0, Fax: 0711/126-2881; E-Mail: poststelle@um.bwl.de,
**Besucheradresse:**
Hauptstätter Str. 67 (Argon-Haus), 70178 Stuttgart
**Referat 66: Wasserstoff**
Leitung: LMR Reuter
Tel.: 0711/ 126 …..; Fax: 0711 / 126-1258
E-Mail: …… …… @um.bwl.de

**Info**
Wasserstoff, Brennstoffzelle

**Statistisches Landesamt Baden-Württemberg**
Referat 44: Energiewirtschaft, Handwerk, Dienstleistungen, Gewerbeanzeigen
Böblinger Str. 68, 70199 Stuttgart
Internet: www.statistik-baden-wuerttemberg.de
Tel.: 0711 / 641-0; Fax: 0711 / 641-2440
Leitung: Präsidentin Dr. Carmina Brenner
Kontakt: RL'in RD'in Monika Hin (Tel. 2672),
E-Mail: Monika.Hin@stala.bwl.de; Frau Autzen M.A. (Tel. 2137)
**Info** Energiewirtschaft, Handwerk, Dienstleistungen, Gewerbeanzeigen
Landesarbeitskreis Energiebilanzen der Länder,
www.lak-Energiebilanzen.de

**Stiftung Energie & Klimaschutz Baden-Württemberg**
Durlacher Allee 93, 76131 Karlsruhe
Internet: www.energieundklimaschutzbw.de
Tel.: 07 2163 - 12020, Fax: 07 2163 – 12113
E-Mail: energieundklimaschutzBW@enbw.com
Kontakt: Dr. Wolf-Dietrich Erhard
**Info**
Plattform für die Diskussion aktueller und allgemeiner Fragen rund um die Themen Energie und Klimawandel; Stiftungsmittel durch EnBW

**Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)**
Heßbrühlstr. 21c, 70565 Stuttgart
Tel.: 0711/7870-0, Fax: 0711/7870-200
Internet: www.zsw-bw.de
Kontakt: Prof. Dr. Frithjof Staiß,
Tel.: 0711 / 7870-235, E-Mail: staiss@zsw-bw.de
**Info**
Statistik Erneuerbare Energien u.a.

**Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)**
Heßbrühlstr. 21c, 70565 Stuttgart
Tel.: 0711/7870-0, Fax: 0711/7870-200
Internet: www.zsw-bw.de
Kontakt: Leiter Prof. Dr. Frithjof Staiß,
Tel.: 0711 / 7870-235, E-Mail: staiss@zsw-bw.de
Dipl-Ing Tobias Kelm
**Info**
Statistik Erneuerbare Energien u.a.

**Universität Stuttgart**
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER),
Heßbrühlstr. 49a, 70565 Stuttgart,
Internet: www.ier.uni-stuttgart.de
Tel.: 0711 / 685-878-00; Fax: 0711/ 685-878-73
Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Kai Hufendiek
Kontakt: AL Dr. Ludger Eltrop, AL Dr. Ulrich Fahl
E-Mail: le@ier.uni-stuttgart.de, ulrich.fahl@ier.uni-stuttgart.de,
Tel.: 0711 / 685-878-11/ 16 / 30
**Info**
Energiemärkte, GW-Analysen , Systemanalyse und Energiewirtschaft bzw. EE u.a.

# Ausgewählte Informationsstellen (2)

**Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg (VM)**
Hauptstätter Str. 67, 70178 Stuttgart
Internet: www.mvi.baden-wuerttemberg.de
Tel.: 0711/231-4; Fax: 0711/ 231-5819
Poststelle@mvi.bwl.de
Kontakt:
**Info**
Verkehr

**Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR)**
Kernerplatz 10, 70182 Stuttgart
Internet: www.mlr.baden-wuerttemberg.de
Tel.: 0711/ 126-0; Fax: 0711/ 126-2255
Kontakt:
**Info**
Ländlicher Raum und Verbraucherschutz, Nachwachsende Rohstoffe u.a.

**Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM)**
Kerner Platz 9, 70178 Stuttgart
Tel.: 0711/126-0, Fax: 0711/126-2881
E-Mail: poststelle@um.bwl.de,
Internet: www.um.baden-wuerttemberg.de
**Referat 21: Grundsatzfragen Klimaschutz, Monitoring**
Leitung: MR Fischer
Tel. 0711/126-2706
**Info**
Klima, Klimaschutz

**Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)**
Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe
Tel.: 0721/ 5600-0, Fax: 0721/ 5600-1456
E-Mail: poststelle@lubw.bwl.de
Internet: www.lubw.baden-wuerttemberg.de
Kontakt:
**Info**
Klima- und Umweltinformationen

**KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH**
Kaiserstraße 94a; 76133 Karlsruhe
Tel.. 0721 / 98471-0, Fax: 0721 / 98471-20
E-Mail: info@kea-bw.de, Internet: www.kea-bw.de
Kontakt: GF Dr. Volker Kienzlen
**Info**
Klimaschutz & Energie, z.B. UM-Förderprogramme wie Klimaschutz Plus; B & Info Programm Zukunft Altbau

**L-Bank Karlsruhe**
Schlossplatz 10; 76131 Karlsruhe
Tel.: 0721 150-0;
**L-Bank Stuttgart**
Börsenplatz 1, 70174 Stuttgart
Tel.: 0711 122-0; Internet: www.L-Bank.de
Kontakt:
**Info**
Landes-Förderprogramme

# Ausgewählte Informationsstellen (3)

**Verband für Energie- und Wasserwirtschaft Baden-Württemberg e.V.- VfEW -**
Schützenstraße 6; 70182 Stuttgart
Internet: www.vfew-bw.de
Tel.: 0711/ 933491-20; Fax 0711 /933491-99
E-Mail: info@vfew-bw.de
Internet: www.vfew-bw.de
Kontakt: GF Matthias Wambach, GF Dr. Bernhard Schneider Stv.
**Info**
Energie (Strom Gas, Fernwärme), Wasser

**LVI Landesverband der Baden-Württembergischen Industrie e.V.**
Gerhard-Koch-Str. 2-4, 73760 Ostfildern
Tel.: 0711 / 327 325 -00 10/12; Fax: 0711 / 327 325-69,
E-Mail: info@lvi.de, Internet: www.lvi.de
Kontakt: GF Wolfgang Wolf, Uwe Bechinka
E-mail: bechinka@lvi.de
**Info**
Energie- und Umweltpolitik der Industrie

**Verband für Energiehandel Südwest-Mitte e.V.**
Tullastr. 18, 68161 Mannheim
Tel.: 0621/411095, Fax: 0621/415222
E-Mail: info@veh-ev.de, Internet: www.veh-ev.de
Kontakt: Geschäftsführer Dipl.-Vw. Hans-Jürgen Funke
**Info**
Energiehandel

**BWHT Baden-Württembergischer Handwerkstag**
Heilbronner Straße 43, 70191 Stuttgart,
Tel. 0711/1657-401, Fax: 0711/1657-444,
E-Mail: info@handwerk-bw.de, Internet: www.handwerk-bw.de,
Kontakt: Karin Müller
Tel: 0711 26 37 09-106; Fax: 0711 26 37 09-206
E-Mail: kmueller@handwerk-bw.de
**Info**
Technologie und Umweltschutz mit Energie Handwerk

**Universität Stuttgart**
**IGE – Institut für GebäudeEnergetik**
Lehrstuhl für Heiz- und Raumlufttechnik
Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart
Tel.: 0711/ 685-62085, Fax: 0711 / 685 62096
E-Mail: info@ige.uni-stuttgart.de
Internet: www.ige.uni-stuttgart.de
Kontakt: Direktor Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt
Dipl.-Ing. Gunther Claus
**Info**
Forschung und Lehre in der Gebäudetechnik

**e-mobil BW GmbH –**
Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg
Leuschnerstraße 45, 70176 Stuttgart
Internet: www.e-mobilbw.de
Telefon: 0711 / 892385-0 Fax: 0711 / 892385-49
E-Mail: info@e-mobilbw.de
Kontakt: GF Franz Loogen,

**Info**
Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie

# Ausgewählte Informationsstellen (4)

### Wasserstoff-und Brennstoffzellen Verband e.V. (DWV)

Robert-Kochplatz 4, 12205 Berlin
Tel.: + 49 30398 209946-0 ; Fax: + 49 30398 209946-6
E-Mail: h2@dwv-info.de
Internet: www.dwv-info.de
Kontakt: Dr. Ulrich Schmidtchen
**Info:**
Wasserstoff und Brennstoffzellen

### L-B Systemtechnik GmbH

Daimlerstr. 15, 85521 Ottobronn
Tel: 089/608110-0, Fax: 089/6099-731
E-Mail: webmaster@hyweb.de
Internet: www.lbst.de
AP: Dipl.-Physiker Matthias Altmann

### Förderverein H2-Mobilität Schweiz

Spitalgasse 5, CH-8001 Zürich
Internet: www.h2mobilitaet.ch
Tel.: +41 44 218 50 28
Mail: info@h2mobilitaet.ch
**Info:**
Wasserstoffwirtschaft in der Schweiz

### BP-Internetplattform

www.deutschebp.de
www.bp.com
**Info**
Wasserstofftankstelle in Berlin (Aral)

### IEA International Energy Agency

9, rue de la Federation, F 75739 Paris Cedex 15
Tel.: + 33 1 40 57 65 00, Fax: + 33 1 40 57 65 59
Internet: www.iea.org
Kontakt:
**Info**
Energiestatistik

### ZSW Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

Geschäftsbereich Elektrochemische Energietechnologien
Helmholtzstr. 8, 89081 Ulm
Internet: www.zsw-bw.de
Tel.: +49 731 9530-0; Fax: +49 731 9530-666
info@zsw-bw.de
Kontakt:
**Info**
Akkumulatoren Materialforschung (ECM), Brennstoffzellen Grundlagen (ECG)
Brennstoffzellen Stacks (ECB), Brennstoffzellen Systeme (ECS)

### DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. –

Technisch-wissenschaftlicher Verein
Josef-Wirmer-Straße 1–3; 53123 Bonn
Tel.: 0228 9188-5; Fax: 0228 9188-990
E-Mail: info@dvgw.de
Internet: www.dvgw.de und www.dvgw-wasserstoff.de
**Info**
Gas und Wasser, Wasserstoff

### Bundeswirtschaftsministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

Kontakt BMWi Bonn
Villemombler Str. 76, 53123 Bonn
Tel.: 0228 / 615-0, Fax: 0228 / 615-4436
E-Mail:
Internet: www.bmwi.de
Kontakt:
**Info**
Energiepolitik, Wasserstoff u.a.

# Ausgewählte Infomaterialien (1)

| | |
|---|---|
| **Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept Baden-Württemberg (IEKK),**<br>Beschlussfassung vom 15. Juli 2014<br>Ausgabe Juli 2014<br>**Herausgeber:**<br>**Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM) & Stat. LA BW**<br>*Besucheradresse:* Willy-Brandt-Str. 41, 70173 Stuttgart<br>Internet: www.um.baden-wuerttemberg.de<br>Tel.: 0711/126-1203, Fax: 0711/126-1258<br>E-Mail: poststelle@um.bwl.de,<br>Schutzgebühr: jeweils kostenlos | **Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2022**<br>Ausgaben: 10/2023<br>**Herausgeber:**<br>**Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (WM)**<br>***Besucheradresse:*** Willy-Brandt-Str. 41, 70173 Stuttgart<br>Internet: www.um.baden-wuerttemberg.de<br>Tel.: 0711/126-1203, Fax: 0711/126-1258<br>E-Mail: ilona.szemelka@um.bwl.de,<br>Schutzgebühr: kostenlos |
| **Energiebericht 2022 , Energiebericht kompakt 2023**<br>Ausgaben: 10/2022, 7/2023<br>**Preisbericht für den Energiemarkt in Baden-Württemberg 2021**<br>Ausgabe 6/2021.pdf<br>Verfasser:<br>**Leipziger Institut für Energie GmbH**<br>**Herausgeber:**<br>**Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM)**<br>Schutzgebühr: jeweils kostenlos | **Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016, Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2016,** Ausgabe 7/2018<br>**Daten zur Umwelt in Deutschland 2016,** Ausgabe Juni 2017<br>**Herausgeber:**<br>UBA Umweltbundesamt<br>Bismarckplatz 1, 14191 Berlin<br>Tel.: 030 / 8903-0, Fax: 030 / 89 03 -3993<br>Internet: www.uba.de |
| **Energiedaten**<br>Nationale und Internationale Entwicklung<br>Ausgabe 1/2022; pdf<br>**Herausgeber:**<br>**Bundeswirtschaftsministerium für Wirtschaft und Klimaschutz**<br>Kontakt BMWi Berlin<br>Scharnhorstr.34-37, 11015 Berlin<br>Tel.: 030 /2014-9, Fax: 030 7 2014– 70 10<br>E-Mail: poststelle@bmwi.bund.de<br>Schutzgebühr: kostenlos | **Erneuerbare Energien in Zahlen**<br>Nationale und Internationale Entwicklung 2022<br>Stand: 10/2023<br>**Herausgeber:**<br>**Bundeswirtschaftsministerium für Wirtschaft und Klimaschutz**<br>Kontakt BMWi Berlin<br>Scharnhorstr.34-37, 11015 Berlin<br>Tel.: 030 /2014-9, Fax: 030 7 2014– 70 10<br>E-Mail: poststelle@bmwi.bund.de<br>Schutzgebühr: kostenlos |
| **BGR – BGR Energiestudie 2025, Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung,**<br>Ausgabe: 9/2026<br>**Herausgeber:**<br>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)<br>Schutzgebühr: kostenlos | |

# Ausgewähltes Informationsmaterial (2)

| | |
|---|---|
| **Monitoringbericht 2020, Klimaschutzgesetz & Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept (IEKK) Baden-Württemberg,**<br>Ausgabe 11/2020<br>**Herausgeber:**<br>Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft<br>Baden-Württemberg (UM) & Stat. LA BW<br>**Besucheradresse:** Hauptstätter Str. 67 (Argon-Haus), 70178 Stuttgart<br>Internet: www.um.baden-wuerttemberg.de<br>Tel.: 0711/126-1203, Fax: 0711/126-1258<br>E-Mail: poststelle@um.bwl.de,<br>Schutzgebühr: jeweils kostenlos | **Umweltdaten 2022 Baden-Württemberg**<br>Auflage: Karlsruhe 2/2023<br>**Herausgeber:**<br>**Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg**<br>70178 Stuttgart<br>**LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg**<br>Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe<br>www.lubw.baden-wuerttemberg.de<br>Schutzgebühr: kostenlos |
| **Shell PKW-Szenarien bis 2030**<br>Ausgabe 2009<br>**Shell LKW-Studie bis 2030**<br>Ausgabe 4/2010<br>**Herausgeber:**<br>Shell Deutschland Oel, 22284 Hamburg<br>Tel.: 040/6324-5652, Internet: www.shell.de<br>Schutzgebühr: kostenlos | **Leitfaden Pkw zum Kraftstoffverbrauch, $CO_2$-Emissionen und Stromverbrauch 1.-4. Quartal 2020**<br>aller neuen Personenkraftwagenmodelle, die in Deutschland zum Verkauf angeboten werden<br>Jährliche Ausgabe:1-4. Quartal als PDF-Datei<br>**Herausgeber:**<br>DAT Deutsche Automobil Treuhand GmbH im Auftrag von VDA und VDIK;<br>Internet: www.dat.de<br>Schutzgebühr: kostenlos |
| **Energie, Transport und Umweltindikatoren 2020**<br>Ausgabe 11/2020<br>**Herausgeber**<br>**Eurostat - Europäische Kommission**<br>L-2920 Luxemburg<br>Internet: http://ec.europa.eu/eurostat<br>Tel: (352) 4301 33444, Fax (352) 4301 35349<br>E-Mail: eurostat-pressoffice@ec.europa.eu<br>Schutzgebühr: kostenlos | **Kraftfahrzeugtechnik –Jahresbericht 2011**<br>Auto-Mobilität: Fahrleistungen steigen 2011 weiter<br>Ausgabe: DIW WOCHENBERICHT NR. 47/2012 VOM 21.11.2012<br>**Herausgeber:**<br>DIW Berlin — Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e. V.<br>Mohrenstraße 58, 10117 Berlin<br>Tel: + 49 30 897 89 – 0; Fax + 49 30 897 89 – 200<br>Internet: www.diw.de<br>Schutzgebühr: kostenlos |
| **Fahrzeugstatistik 2022 bis 1. Januar 2023**<br>**Herausgeber**<br>Kraftfahrt- Bundesamt (KBA)<br>Ausgabe 1/2023 | **Verkehr in Zahlen 2022/23**<br>**Herausgeber**<br>Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)<br>www-bmvi.de<br>Stand 12/2022 |

# Ausgewähltes Informationsmaterial (3)

**Wasserstoff-Infrastruktur - für eine nachhaltige Mobilität Entwicklungsstand und Forschungsbedarf**
Studie: Ausgabe 3/2013

**Verfasser:**

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg

**Herausgeber:**
e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg
Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg

Schutzgebühr: kostenlos, pdf

**Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland 2014-2020,** Ausgabe 11/2021

**Verfasser:** TUM-IfE, Fraunhofer ISI, RWI

**Ausgewählte Effizienzindikatoren zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2020,** Ausgabe 12/2021

**Verfasser:** AGEB, EEFA, Braunkohle

**Energieverbrauch in Deutschland 1.-4. Quartal 2020**

Bericht 12/2020

**Herausgeber:**
BDEW, MWV, GVSt, Braunkohle, DIW-Berlin
**Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.**
Mohrenstraße 58; 10117 Berlin
www.ag-energiebilanzen.de
Tel.: 030/89 78 9-666; Fax: 030/89 78 9-113
Kontakt: h. Ziesing
E-Mail: hziesing@ag-energiebilanzen.de

**Achter Monitoring-Bericht „Energie der Zukunft, Berichtsjahr 2018/19“**
Ausgabe: 1/2021
**Herausgeber:**
**Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)**
Öffentlichkeitsarbeit
11019 Berlin
Internet: www.bmwi.de
**Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)**
Öffentlichkeitsarbeit
11055 Berlin
Internet: www.bmub.bund.de
Schutzgebühr: kostenlos, PDF

**Statistisches Jahrbuch 2022,**
Themenbereiche
Ausgabe 11/2022
**Herausgeber:**
**Statisches Bundesamt, Wiesbaden**
Internet : *www.destatis.de*
Schutzgebühr: kostenlos PDF

**- WASSERSTOFF, CO2-freier Wasserstoff als Schlüsselelement für die Energiewende und den Klimaschutz**
**- WASSERSTOFF, Schlüssel für das Gelingen der Energiewende in allen Sektoren**
DATEN UND FAKTEN WASSERSTOFF
Ausgabe: jeweils 11/2019
**Herausgeber:**
DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. –
Josef-Wirmer-Straße 1–3, 53123 Bonn
Tel.: 0228 9188-5, Fax: 0228 9188-990, E-Mail: info@dvgw.de, Internet: www.dvgw.de

**Die Nationale Wasserstoffstrategie, Schlüsselelement der Energiewende,**
Ausgabe Juni 2020
**Herausgeber:**
Bundeswirtschaftsministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
Kontakt BMWi Bonn
Villemombler Str. 76, 53123 Bonn
Tel.: 0228 / 615-0, Fax: 0228 / 615-4436

# Ausgewähltes Informationsmaterial (4)

**VDA Jahresbericht 2020,**
Ausgabe 10/ 2029
**Herausgeber:**
**Verband der Automobilwirtschaft**
www.vda.de
Schutzgebühr: kostenlos, PDF

**Fortschrittsbericht 2014 –Bilanz der Marktvorbereitung**
Ausgabe: Dezember 2014
**Herausgeber**
Nationale Plattform Elektromobilität (NPE)
Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO)
Scharnhorststraße 34–37, 10115 Berlin
Schutzgebühr: kostenlos

**Energieträger der Zukunft - Potenziale der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg,**
Ausgabe 2012

**Leitfaden zur Ladeinfrastruktur in Bestandsimmobilien,**
Ausgabe 3-2019

**Strukturstudie BW e mobil 2019**
Ausgabe 2019

**Rohstoffe für innovative Fahrzeugtechnologien,**
Ausgabe 7-2019

**Datenmonitor der E-Mobil BW,**
Ausgabe Juli 2019
**Herausgeber:**
**e-mobil BW GmbH –**
Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg
Leuschnerstraße 45, 70176 Stuttgart
Internet: www.e-mobilbw.de
Telefon: 0711 / 892385-0, Fax: 0711 / 892385-49
E-Mail: info@e-mobilbw.de

**Wasserstoff- und Brennstoffzellen 2017,**
Ausgabe Mai 2017
**Herausgeber:**
**Wasserstoff-und Brennstoffzellen Verband e.V. (DWV)**
Robert-Kochplatz 4, 12205 Berlin
Internet: www.dwv-info.de
Tel.: + 49 30398 209946-0 ; Fax: + 49 30398 209946-6
E-Mail: h2@dwv-info.de

**The Future of Hydrogen - Die Zukunft von Wasserstoff**
Ausgabe 6-2019
**Herausgeber:**
**IEA International Energy Agency**
9, rue de la Federation, F 75739 Paris Cedex 15
Tel.: + 33 1 40 57 65 00, Fax: + 33 1 40 57 65 59
Internet: www.iea.org

# Übersicht Foliensätze zu den Energiethemen
# Märkte, Versorgung, Verbraucher und Klimaschutz

<table>
<tr><th>Energieträgermärkte</th><th>Energieversorgung</th><th>Stromversorgung</th><th>Energieverbrauch & Energieeffizienz</th></tr>
<tr><td>Mineralölmärkte<br>Nationale und Internationale Entwicklung</td><td>Energieversorgung in Baden-Württemberg</td><td>Stromversorgung in Baden-Württemberg</td><td>Energieverbrauch & Energieeffizienz<br>im Sektor Private Haushalte</td></tr>
<tr><td>Erdgasmärkte<br>Nationale und Internationale Entwicklung</td><td>Energieversorgung in Deutschland</td><td>Stromversorgung in Deutschland</td><td>Energieverbrauch & Energieeffizienz im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD)</td></tr>
<tr><td>Kohlemärkte<br>Nationale und Internationale Entwicklung</td><td>Energieversorgung in der EU-28</td><td>Stromversorgung in der EU-28</td><td>Energieverbrauch & Energieeffizienz<br>im Sektor Industrie</td></tr>
<tr><td>Kernenergiemärkte<br>Nationale und Internationale Entwicklung</td><td>Energieversorgung in der Welt</td><td>Stromversorgung in der Welt</td><td>Energieverbrauch & Energieeffizienz<br>im Sektor Verkehr</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Erneuerbare Energiemärkte<br>Nationale und internationale Entwicklung</td><td colspan="2">Energie- und Stromversorgung<br>Baden-Württemberg im internationalen Vergleich</td><td rowspan="2">Energiebilanz<br>Anwendungsbereiche</td></tr>
<tr><td colspan="2">Energiewende<br>Nationale und internationale Entwicklung</td></tr>
<tr><td>Klima & Energie<br>Nationale und internationale Entwicklung</td><td colspan="2">Die Energie der Zukunft<br>Entwicklung der Energiewende in Deutschland</td><td>Wirtschaft & Energie, Effizienz<br>Nationale und internationale Entwicklung</td></tr>
<tr><td>Wasserstoff<br>Nationale und internationale Entwicklung</td><td colspan="2">Energie- und Stromversorgung<br>Nationale und internationale Entwicklung</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="4">Stand: 9/2023</td></tr>
</table>