



# Wasserstoff und Brennstoffzellen

## Starke Partner erneuerbarer Energien



Deutscher Wasserstoff- und  
Brennstoffzellen-Verband

Der Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V. versteht sich als die Dachorganisation all jener in Deutschland, die sich für den allgemeinen Einsatz von Wasserstoff als Energieträger in der Wirtschaft einsetzen und dafür, dass Wasserstoff aus regenerativen Energien – für eine nachhaltige Energiewirtschaft – erzeugt wird.

Der DWV bringt die Interessensgruppen (Firmen, Institute, Privatpersonen, Nichtregierungsorganisationen) zusammen, informiert regelmäßig über versorgungssichere, wirtschaftliche und emissionsfreie Mobilität und Energieversorgung, formuliert berechnete Brancheninteressen, steht mit politischen Entscheidern in Kontakt und bringt seine Positionen und Argumente in Gesetzgebungsverfahren durch gezielte Lobbyarbeit ein und unterrichtet die Öffentlichkeit über die Vorteile von Wasserstoff- und Brennstoffzellen und deren Systemrelevanz in einer nachhaltigen Energiewirtschaft durch gezielte Aktivitäten in den Medien und auf Veranstaltungen. Kurz gesagt: Der DWV ist die deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Lobby für seine Mitglieder mit bundesweit gegenwärtig 1,5 Millionen Arbeitsplätzen.

Der DWV kooperiert eng mit Hydrogen Europe und anderen nationalen Partnerorganisationen europa- und weltweit.

[www.dwv-info.de](http://www.dwv-info.de)



Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) ist ein führendes unabhängiges europäisches Technologie- und Strategieberatungsunternehmen auf den Gebieten nachhaltiger Entwicklung, Energieversorgung, Mobilität und Ressourcen. Besonderer Fokus liegt auf Erneuerbaren Energien, alternativen Kraftstoffen und Infrastrukturen. Es wird ein konsequenter Systemansatz verfolgt, gepaart mit dem Denken über Bereichsgrenzen hinweg.

Seit 1982 berät LBST führende nationale und internationale Firmen, politische Organe sowie andere gesellschaftliche Akteure in der Analyse und Realisierung nachhaltiger Strukturen, Produkte und Dienstleistungen.

[www.LBST.de](http://www.LBST.de)

# Wasserstoff und Brennstoffzellen

## Starke Partner erneuerbarer Energien



Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V. (DWV)

Mai 2017

## Auf dem Weg ...



Mit dem Pariser Klimaschutzabkommen (COP21) vom Dezember 2015 wurde erstmals ein international völkerrechtlich verbindliches Abkommen für einen weitgehenden Verzicht fossiler Energieträger bis 2050 vereinbart. Wichtigstes Ziel ist es, den Temperaturanstieg der Erde über dem vorindustriellen Niveau der mittleren Oberflächenerdtemperatur von etwa 15°C auf höchstens 2°C, besser auf 1,5°C zu begrenzen. Alle 196 Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention, zu denen neben China, der EU und den USA auch Brasilien und Indien gehören, haben Verpflichtungen übernommen.

Um die gesetzten Klimaschutzziele bis zum Jahr 2050 zu erreichen, dürfen spätestens ab 2030 alle Neuanschaffungen und Installationen (z. B. Fahrzeuge, Heizungen, Kraftwerke) keine Treibhausgase mehr ausstoßen. In Deutschland stellt der Klimaschutzplan 2050 vom November 2016 eine wichtige Grundlage und Leitlinie für die weitere Identifikation und Ausgestaltung der jeweiligen Klimaschutzstrategien und -maßnahmen in den verschiedenen Handlungsfeldern dar. Er bietet insbesondere eine Orientierung, wie diese sektoral detaillierten Ziele (Wärme, Verkehr und Industrie) in einer ersten Phase bis zum Jahr 2030 umgesetzt werden sollen und weist der Sektorkopplung eine wichtige Rolle zu. Vor dem Hintergrund der Tatsache, dass vor allem der Verkehrssektor in Deutschland seit 1990 keine Klimagasemissionen einsparen konnte, erscheint die geforderte Reduktion von 40–42 % bis 2030 als enorme Herausforderung. Im Verkehrssektor stellt Wasserstoff mit Brennstoffzellenantrieben kurzfristig die einzige Kraftstoff-Antriebs-Kombination dar, die alle anstehenden Zielkonflikte lösen kann: Klimagasreduktion, Vermeidung lokaler Schadstoffemissionen, systemische Integration in die Energie- und Verkehrswende unter Beibehaltung des vollen Kundennutzens wie schnelle Betankung und hohe Reichweite.

Im Rahmen der in Deutschland beschlossenen Energiewende, stellt die „Verkehrswende“ eine der größten Herausforderungen dar. Bisherige Reduktionsmaßnahmen im Verkehrsbereich konnten bisher zu keiner Minderung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen führen. Neben der Energieeinsparung und der verstärkten Nutzung von Wind- und Sonnenstrom bietet Wasserstoff mit seiner Energietransport- und Speichereffizienz als sektorübergreifender Energieträger eine systemorientierte, nachhaltige, im Gesamtsystem effiziente und nutzerfreundliche Lösung an. Sobald die Energieversorgung vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt wird und die Effizienzpotentiale weitgehend ausgeschöpft sind, führt an Wasserstoff praktisch kein Weg vorbei. Auch der zunehmende Umstieg auf strombasierte Kraftstoffe (Wasserstoff – PtH<sub>2</sub>, synthetisches Methan – PtCH<sub>4</sub>, synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe – PtL) erfordert den Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung deutlich über das heutige Maß hinaus.

# ... zum Integrierten Energiekonzept

Die Herausforderung besteht damit in der Schaffung ausreichender Strom- und Wasserstofferzeugungs- sowie Speicherkapazitäten. Wasserstoff kann bereits heute in großen Mengen in Salzkavernen besonders kosteneffizient gespeichert werden und langfristig die Rolle der strategischen Energie- und Kraftstoffreserve übernehmen wie heute Rohöl und Erdgas. Er kann sowohl zentral als auch dezentral für eine Versorgungs- und Störungssicherheit der Stromnetze und der Kraftstoffversorgung sorgen.

Eine Vielzahl von Studien kommt zu dem Ergebnis, dass Wasserstoff ein idealer Energieträger in einer immer stärker zu dekarbonisierenden oder defossilisierenden erneuerbaren Energiewelt ist – auch bereits in einer Übergangsphase. Wasserstoff kann, wie kein anderer emissionsfreier Energieträger, einen strategischen und wirtschaftlichen Beitrag zur Energieversorgungssicherheit effizient gewährleisten. Aus diesem Grunde erfordert eine verantwortungsvolle und sozial tragfähige Energiepolitik die explizite Berücksichtigung von Wasserstoff, der mit erneuerbaren Energien erzeugt wird, in den Konzepten der Politik und Wirtschaft.

**Eine effiziente Gestaltung des Energiemarktdesigns 2050 wird ohne die angemessene Berücksichtigung der Wasserstofferzeugung mit erneuerbarem Strom und die effiziente Nutzung des Wasserstoffs in Brennstoffzellenfahrzeugen, industriellen Prozessen (z. B. Raffinerien) und dem Wärmemarkt nicht möglich sein.**



Werner Diwald, Vorsitzender  
Deutscher Wasserstoff- und  
Brennstoffzellen-Verband e.V. (DWV)

## Inhalt

### 5 Treiber für den Wandel

- 5 Verminderung von Klimagasemissionen
- 8 Verminderung lokaler Schadstoffemissionen
- 9 Versorgungssicherheit
- 10 Endlichkeit der fossilen Energieressourcen – Künftige Energieversorgung
- 11 Etablierung von lokaler Wertschöpfung
- 13 Einführung von Wasserstoff – gesetzliche und politische Bedingungen

### 15 Woher wir kommen ...

- 15 Erste Märkte – die Rolle von Nebenproduktwasserstoff
- 17 Potenziale erneuerbarer Energien
- 20 Regenerative Stromerzeugung aus fluktuierenden Quellen

### 22 ...wohin wir gehen

- 22 Speicherung von erneuerbarem Strom
- 26 Wirtschaftliche Aspekte
- 27 Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur

### 29 Wasserstoff und Brennstoffzellen Starke Partner erneuerbarer Energien

- 33 Abkürzungsverzeichnis

## Impressum

Herausgeber	Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V. Moltkestraße 42, 12203 Berlin Telefon 030 398209946-0, E-Mail h2@dwv-info.de www.dwv-info.de
Autoren	Reinhold Wurster, Martin Zerta; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), www.lbst.de
Copyright	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)
Gestaltung	Theißen-Design, www.theissen-design.de
Druck	ausDRUCK, www.ausdruck.com
Bildnachweis	(soweit nicht anders angegeben) Cover: soturi   fotolia.com (Hintergrund), buchachon   fotolia.com (oben klein), change-up-manager   fotolia.com (mitte), Kruwt   fotolia.com (unten) Seite 1/29: shironosov   istockphoto.com Seite 5: LL28   istockphoto.com Seite 8: Gina Sanders   fotolia.com Seite 15: W.Scott McGill   fotolia.com Seite 16: Monika Huňáčková   fotolia.com (Hintergrund Grafik) Seite 17: Ezume Images   fotolia.com Seite 21: lupolucis   fotolia.com Seite 22 oben: stockpics   fotolia.com Seite 22 unten: K+S Aktiengesellschaft   www.k-plus-s.com/de/fotoalbum/kalibergbau.html

Das Dokument ist in Teilen oder als Ganzes urheberrechtlich geschützt. Anfragen zur Verwendung von Inhalten bitte an den DWV richten. Eine Nutzung ist gerne nach ausdrücklich erteilter Genehmigung möglich.

Die Nutzungsrechte liegen beim Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V.

Mai 2017

# Treiber für den Wandel



Die Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien ist eine wichtige und zentrale Herausforderung für die nächsten Jahre und Jahrzehnte. Die wesentlichen Treiber für diesen Wandel sind die

- Reduzierung von Klimagasemissionen
- Minderung lokaler Schadstoffemissionen
- Endlichkeit der fossilen Energieressourcen
- Etablierung von lokaler Wertschöpfung
- Versorgungssicherheit

## Verminderung von Klimagasemissionen

### Motivation und Handlungsdruck<sup>1</sup>:

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:

<b>Territoriale Hitzeperioden</b>	➔ <b>Austrocknung, Entwaldung, Wüstenbildung</b>
<b>Polkappen- und Gletscherschmelze</b>	➔ <b>Meeresspiegelanstieg und Überschwemmungen; Trinkwasserverlust</b>
<b>Zunahme von (Wirbel-)Stürmen</b>	➔ <b>Schäden in der Landwirtschaft und an Siedlungen / Städten</b>
<b>Verschiebung der Jahreszeiten, Klimazonen</b>	➔ <b>Veränderung der Biomasseproduktion, Verlust an Biodiversität</b>
<b>Auftauen von Permafrostböden und von Methanhydraten im Ozean</b>	➔ <b>Verstärkte Emission des Treibhausgases Methan und damit Beschleunigung des Klimawandels</b>

<sup>1</sup> Entnommen aus J. Schwarz, H.-J. Fell, Deutsche Klimapolitik – vom Vorreiter zum Bremser, Energy Watch Group, Nov. 2016

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**

## Europäische und deutsche Energiepolitik

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<sup>2</sup>, der Verordnung zum Emissionshandelssystem von 2003<sup>3</sup>, der Strategie für saubere Luft von 2005<sup>4</sup>, der städtischen Umweltstrategie von 2005<sup>5</sup>, dem Aktionsplan für Energieeffizienz von 2006<sup>6</sup>, der Verordnung zur Kraftstoffqualität von 2007<sup>7</sup>, der Verordnung über CCS von 2008<sup>8</sup>, oder der Verordnung über erneuerbare Energien von 2008<sup>9</sup> sowie der Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe von 2014<sup>10</sup>. Der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung<sup>11</sup> 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.

<sup>2</sup> Directive 2001/77/EC on the promotion of electricity from renewable energy sources, adopted by Council and Parliament

<sup>3</sup> Directive 2003/87/EC establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community

<sup>4</sup> COM(2005)446 final

<sup>5</sup> COM(2005)718 final

<sup>6</sup> COM(2006)545 final

<sup>7</sup> IP/07/120

<sup>8</sup> Proposal for a Directive 2008/0015 (COD) on the geological storage of carbon dioxide

<sup>9</sup> Proposal for a Directive 2008/0016 (COD) on the promotion of the use of energy from renewable sources

<sup>10</sup> Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure (AFID)

<sup>11</sup> Klimaschutzplan 2050 – Kabinettsbeschluss vom 14. November 2016

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<sup>12</sup>. Man hat sich im Jahre 2016 bei der ICAO<sup>13</sup> verständigt, ein separates globales Emissionshandelssystem (CORSIA) für die Luftfahrt einzuführen<sup>14</sup>, 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 95 g-CO<sub>2</sub>/km ist gesetzlich vorgeschrieben. Um diese Ziele zu unterstützen, haben verschiedene EU-Mitgliedsstaaten bereits eine CO<sub>2</sub>-basierte Fahrzeugbesteuerung eingeführt<sup>15</sup>. Eine weitere Verschärfung der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte in Richtung auf 68 bis 78 g-CO<sub>2</sub>/km (ca. 2025)<sup>16</sup> und auf 40 g-CO<sub>2</sub>/km (ca. 2030) wird seit Jahren in Europa diskutiert.

## Einführung alternativer Kraftstoffe

Die Europäische Kommission schreibt in der RED<sup>17</sup> vor, dass jedes Mitgliedsland im Jahr 2020 einen verbindlichen Anteil von 10% erneuerbaren Energien als Antriebsenergie (Endenergie) im Transportsektor bereitstellen muss. Die FQD<sup>18</sup> fordert bis 2020 eine Reduzierung der Klimagasemissionen von 6 % für alle Fahrzeuge und Binnenschiffe nach einem vorgegebenen Berechnungsverfahren<sup>19</sup>. 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-CO<sub>2</sub> vor.

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

---

<sup>12</sup> "The Commission should, in particular, consider policies and measures at Community level in order that the transport sector makes a substantial contribution to the Community and its Member States meeting their climate change obligations under the Kyoto Protocol." (Directive 2003/87/EC)

<sup>13</sup> ICAO: Internationale Zivilluftfahrtorganisation (Englisch: *International Civil Aviation Organization*)

<sup>14</sup> The CORSIA: ICAO's market based measure and implications for Europe, Carbon Market Watch Policy Briefing, October 2016

<sup>15</sup> ACEA Overview of CO<sub>2</sub> Based Motor Vehicles Taxes in the EU, 6 März 2007

<sup>16</sup> EU-Parlament beschließt strengere CO<sub>2</sub>-Grenzwerte, Spiegel, 24.03.2013

<sup>17</sup> RED – Renewable Energy Directive (Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG)

<sup>18</sup> FQD – Fuel Quality Directive – Richtlinie 2009/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Spezifikationen für Otto-, Diesel- und Gasölkraftstoffe und die Einführung eines Systems zur Überwachung und Verringerung der Treibhausgasemissionen sowie zur Änderung der Richtlinie 1999/32/EG des Rates im Hinblick auf die Spezifikationen für von Binnenschiffen gebrauchte Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 93/12/EWG

<sup>19</sup> Richtlinie 2015/62/EU des Rates vom 20. April 2015 zur Festlegung von Berechnungsverfahren und Berichterstattungspflichten gemäß der Richtlinie 98/70/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Qualität von Otto- und Dieselmotorkraftstoffen

In einem ersten Schritt könnte regenerativ erzeugter Wasserstoff in der Raffinerie aus Erdgas reformierten Wasserstoff ersetzen und mit der Vermeidung von 105 g-CO<sub>2</sub>/MJ einen ersten Beitrag leisten, sobald die Anrechnung auf die Klimagasreduktionsquote rechtlich erfolgen kann.

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 %<sup>20</sup> aller Europäer leben in urbanen Räumen. Der Straßenverkehr in Städten trägt 40 % zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen des gesamten Straßenverkehrs bei und bis zu 70 % zu allen anderen verkehrsbedingten Emissionen (z. B. NO<sub>x</sub>, Partikel und Feinstaub, Lärm)<sup>21</sup>. Diese Emissionen gilt es entscheidend zu reduzieren. Seit Jahrzehnten gefährden Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) 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 NO<sub>2</sub> 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.



<sup>20</sup> Siehe European Union 2016: Eurostat: Urban Europe – Statistics on cities, towns and suburbs, 2016 edition

<sup>21</sup> Siehe European Commission: Clean transport, Urban transport ([http://ec.europa.eu/transport/themes/urban/urban\\_mobility\\_en](http://ec.europa.eu/transport/themes/urban/urban_mobility_en))

## Versorgungssicherheit

In den letzten 25 Jahren stiegen Energieimporte zur Deckung des Primärenergieverbrauch Deutschlands von 46 % (1990) auf ca. 62 % (2015). Dabei erhöhten sich beispielsweise die Nettoimporte für Rohöl auf 99,5 %, für Erdgas auf 88,9 % und für Steinkohle auf 88,5 %. Der Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch belief sich im Vergleich dazu auf 12,5 % (2015).<sup>22</sup>

Der Umstieg von einer fossilen und nuklear dominierten Energieversorgung hin zu 100 % erneuerbaren Energien wird die Bedeutung und Rolle des Stroms als wichtigsten Energieträger grundlegend verändern. 2015 lag der Anteil des Stroms am Endenergieverbrauch bei ca. 21 %. Zukünftig wird erneuerbarer Strom die Rolle der Energieträger Öl, Erdgas, Kohle und Uran weitestgehend übernehmen müssen.

Durch die regionale Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien können dabei Risiken und Konflikte, die durch den Import von fossilen Energieträgern aus anderen Weltregionen bestehen, verhindert bzw. abgebaut werden.

Jedoch erfordert die Umstellung der Energieversorgung auf Strom als Haupt-Energielieferant auch zusätzliche Maßnahmen zur Stabilisierung der Stromversorgung. Hier übernimmt Wasserstoff als Energiespeicher, der über Wochen und Monate Strom speichern kann, eine wesentliche Rolle insbesondere in Hinblick auf die steigenden Anforderungen zur Versorgungssicherheit der Energiebereitstellung. Wasserstoff als Gas kann, ähnlich wie Erdöl, Erdgas oder Kohle als „strategische Energiereserve“, große Mengen Strom speichern. Die Kombination aus dezentraler Stromerzeugung, z. B. mittels PV-/Windkraftanlagen, und zentralen wie dezentralen Wasserstoffspeichern erhöht die Versorgungssicherheit in Deutschland bzw. schafft eine wesentliche Grundlage für die langfristig stabile Energieversorgung ohne die endlichen fossilen Rohstoffe.

### Der Wasser- und Wasserstoffkreislauf

Mit Hilfe der Elektrolyse wird unter Zufuhr von elektrischem Strom Wasser ( $H_2O$ ) in die Bestandteile Wasserstoff ( $H_2$ ) und Sauerstoff ( $O_2$ ) gespalten. In einer Brennstoffzelle wird dieser Vorgang umgekehrt: Zugeführter Wasserstoff reagiert in einer Brennstoffzelle mit Sauerstoff (z. B. aus der Luft) wieder zu Wasser. Dabei kann, ähnlich wie in einer Batterie, Strom erzeugt werden.

Wasserstoff bzw. Wasser können dabei immer wieder erneut in einer Elektrolyse oder einer Brennstoffzelle eingesetzt werden.

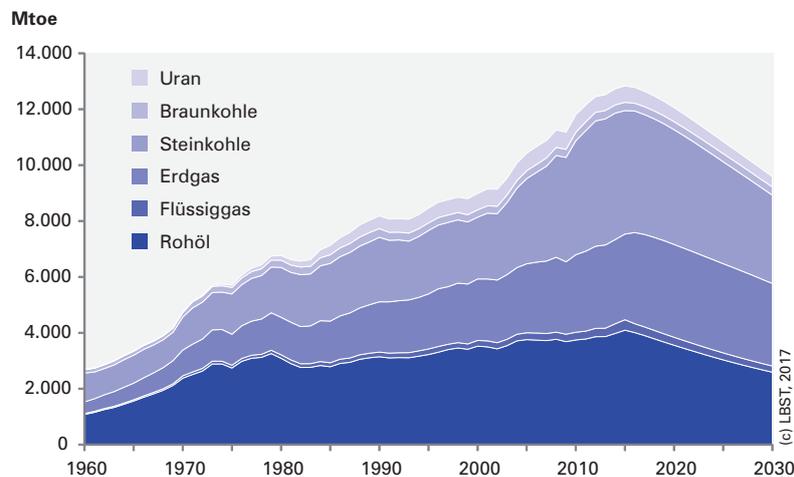
Die Verwendung von Wasser als Ausgangsrohstoff für die Stromspeicherung eignet sich ideal als Partner der erneuerbaren Energien. Bei der Verwendung von Wasser und Wasserstoff entstehen weder Klimagasemissionen oder Schadstoffe, noch werden fossile, giftige oder seltene Materialien benötigt. Der Wasser- und Wasserstoffkreislauf stellt eine stabile und robuste Grundlage für den weiteren Ausbau der Energiespeicherung dar.

<sup>22</sup> Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Gesamtausgabe der Energiedaten – Datensammlung des BMWi, Stand: 30.01.2017

## Endlichkeit der fossilen Energieressourcen – Künftige Energieversorgung

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

Nach dem Überschreiten des Fördermaximums des konventionellen Erdöls<sup>[1]</sup> um das Jahr 2008 kann für die weltweite Versorgung mit Erdgas, Kohle<sup>[2]</sup> und Nuklearbrennstoff<sup>[3]</sup> 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>

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

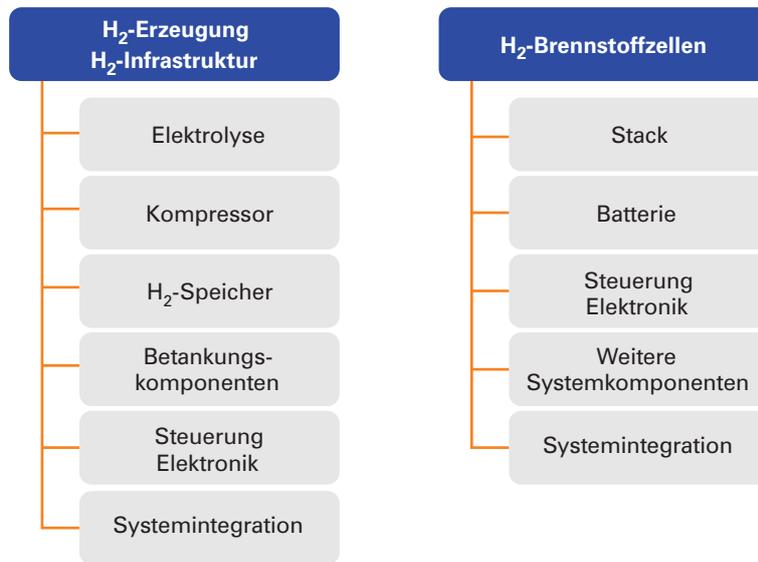
Der Übergang von fossilen und nuklearen Energiequellen (Erdöl, Erdgas, Kohle, Uran) zu erneuerbaren Energien (wie z. B. Photovoltaik, solarthermische Kraftwerke, Wind- und Wasserkraft) macht Strom – anders als heute – zunehmend zu einer Primärenergie. Dies wird neue Möglichkeiten und Chancen für die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

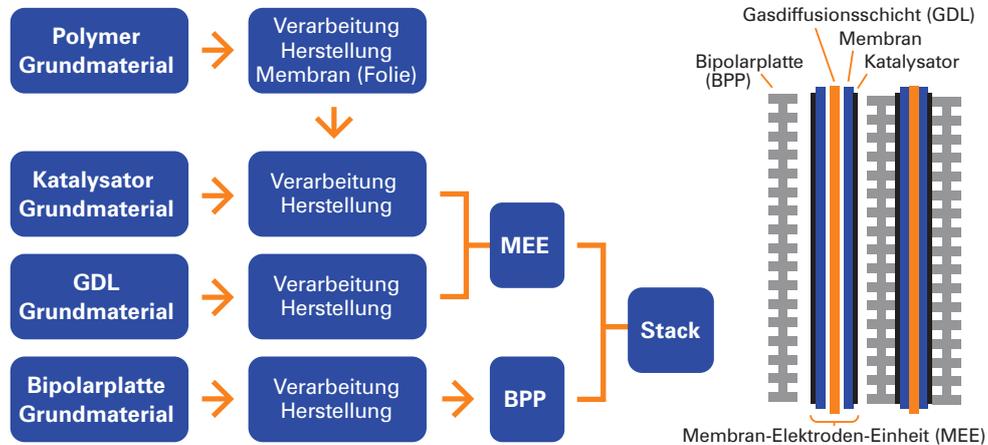
## Etablierung von lokaler Wertschöpfung

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.



Beispiele für zukünftige Fertigungsprozesse und neue Arbeitsplätze in Deutschland zur Herstellung von Schlüsselkomponenten für die H<sub>2</sub>-Erzeugung / Infrastruktur und H<sub>2</sub>-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

## Einführung von Wasserstoff – gesetzliche und politische Bedingungen

### 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 Null-emissionsfahrzeugen, 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<sup>23</sup>. Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen ist gegenwärtig von der Energiesteuer<sup>24</sup> 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.

---

<sup>23</sup> HyWays Action Plan – Policy Measures for the Introduction of Hydrogen Energy in Europe ([http://www.hyways.de/docs/Brochures\\_and\\_Flyers/HyWays\\_Action\\_Plan\\_FINAL\\_FEB2008.pdf](http://www.hyways.de/docs/Brochures_and_Flyers/HyWays_Action_Plan_FINAL_FEB2008.pdf))

<sup>24</sup> § 8c StromStG – Angenommener Entwurf eines Zweiten Gesetzes zur Änderung des Energiesteuer- und des Stromsteuergesetzes, 15.02.2017, [[http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Gesetzestexte/Gesetzentwurfe\\_Arbeitsfassungen/2017-02-15-aenderung-energie-und-stromsteuergesetz.html](http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Gesetzestexte/Gesetzentwurfe_Arbeitsfassungen/2017-02-15-aenderung-energie-und-stromsteuergesetz.html)]

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<sub>x</sub>, 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

# Woher wir kommen...



## Erste Märkte – die Rolle von Nebenproduktwasserstoff

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 Herstellungsortes 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 Nebenproduktquellen dabei helfen, kostengünstigen Wasserstoff effizient bereit zu stellen, da sie Energieverluste und die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von mindestens 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<sup>3</sup> pro Jahr Nebenproduktwasserstoff als Kraftstoff in Deutschland verfügbar gemacht werden können. Mit dieser Wasserstoffmenge lassen sich etwa 1/2 Million effiziente Brennstoffzellenfahrzeuge betreiben.<sup>25</sup> 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.

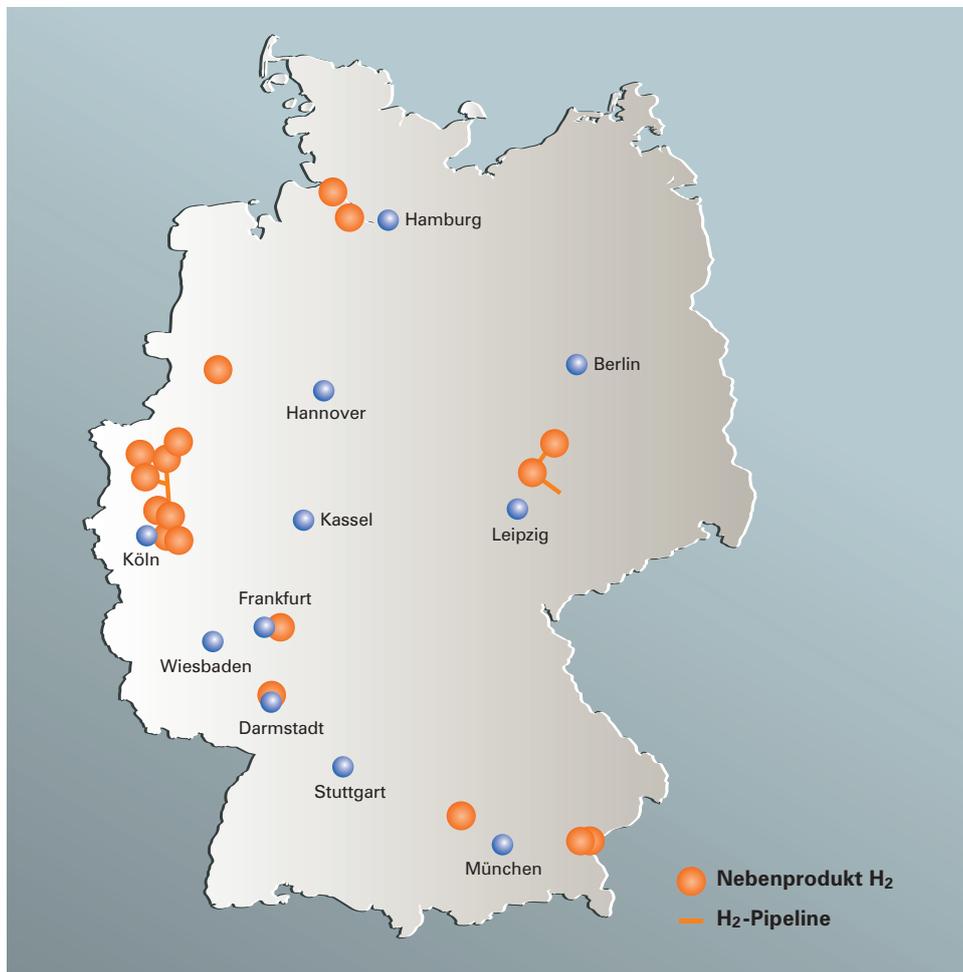
Im Rahmen des HyWays-Projektes [[www.hyways.de](http://www.hyways.de)] wurden 2007 für Europa die größten Mengen an Nebenproduktwasserstoff in Deutschland (~ 850 Mio. Nm<sup>3</sup>/Jahr), Norwegen (~ 650 Mio. Nm<sup>3</sup>/Jahr), Frankreich (~ 300 Mio. Nm<sup>3</sup>/Jahr) und den Niederlande (~ 100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

---

<sup>25</sup> Es werden ein Energieverbrauch von 0,3 kWh / Fahrzeug-km und eine jährliche Fahrstrecke von 15.000 km angenommen.

### Wasserstoff als Nebenprodukt

Die Hauptquellen für industriellen Wasserstoff sind heute Rohölraffinerien, die Ammoniak-, Methanol- und Wasserstoffperoxidproduktion, die elektrolytische Chlorproduktion, die Ethylenproduktion, die Azethylenproduktion, die Zyanidproduktion und die Styrenproduktion. Verschiedene dieser Prozesse erzeugen und verbrauchen Wasserstoff gleichzeitig, einige von diesen erzeugen Überschusswasserstoff und in einigen Fällen ist Wasserstoff ein (unvermeidliches) Nebenprodukt, z. B. bei der Chlorelektrolyse und der Natriumhydroxid-erzeugung. Sofern dieser Überschusswasserstoff nicht in einem chemischen Prozess weiterverarbeitet werden kann, wird er üblicherweise mit Erdgas zusammen bei der Wärme-/Dampferzeugung verbrannt oder zusammen mit Erdgas in Gasturbinen zu Strom umgewandelt.



Chemischer Nebenproduktwasserstoff in Deutschland [Quelle: LBST 2015]

In Deutschland gibt es an verschiedenen Stellen Wasserstoffüberschuss, der heutzutage nur zur Wärmeerzeugung verbrannt werden kann. Dieser Wasserstoff könnte in seinen thermischen Verwendungen durch Erdgas ersetzt und für andere energetisch höherwertige Nutzungen verfügbar gemacht werden, wie z. B. als Kraftstoff. In den meisten Fällen wird dann eine Reinigung und Nachverdichtung erforderlich.

Typische Standorte solcher Wasserstoffquellen finden sich in Bayern, Hamburg/Unterelbe, Hessen, Nordrheinwestfalen und Sachsen-Anhalt. In Deutschland belief sich im Jahre 2015 die von Chlor-Alkali-Elektrolysen erzeugte Menge an Wasserstoffnebenprodukt auf etwa 1,4 Mrd. Nm<sup>3</sup> / Jahr oder 4,2 TWh (15,1 PJ).

## Potenziale erneuerbarer Energien



### Erneuerbarer Strom

Regenerative Energien, insbesondere Solar- und Windenergie, haben das Potenzial, das Mehrfache der weltweit für stationäre und mobile Anwendungen benötigten Energie bereitzustellen. Um dieses Potenzial entsprechend der Nachfrage nutzen zu können, ist die Speicherung von dieser Energie sowie die Konditionierung und der Transport der Energie zum Verbraucher erforderlich.

Experten sehen in Deutschland ein realistisches erneuerbares Stromerzeugungspotenzial von ca. 1.000 TWh/a. Damit könnte der heutige Strom und Kraftstoffbedarf<sup>26</sup> (bezogen auf den Endenergieverbrauch) unter Annahme von Effizienzsteigerungen gedeckt werden. Deutschland könnte sich damit stärker von geopolitischen Konflikten unabhängig machen. Auch könnte es sich von Preissteigerungen fossiler Energieträger, die mit der Zunahme des globalen Energiehungers zu erwarten sind entkoppeln. Gleichzeitig würden die Klimaziele 2050 leichter erreichbar werden.

Potenzialannahmen für erneuerbare Stromerzeugung in Deutschland (ohne Biomasse)<sup>27</sup>:

Technologie	Langfristiges technisches nachhaltiges Potenzial in TWh/a			Bereits genutztes Potenzial 2012 [AGEB 2014] in TWh/a
	Literaturlauswertung Untere Grenze	Obere Grenze	Realistische Annahmen	
Wasserkraft	25	42	25	21,8
Wind Onshore	195	2.897	390	50,7
Wind Offshore	64	300	280	
Photovoltaik	163	405	284	26,4
Geothermie	15	300	15	0,03
<b>Gesamt</b>	<b>462</b>	<b>3.939</b>	<b>~1.000</b>	<b>~100</b>

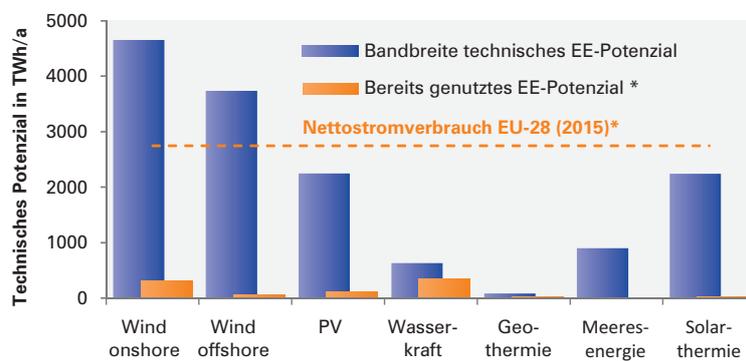
<sup>26</sup> Endenergieverbrauch Deutschland, 2015: Strom = 521 TWh, Kraftstoff = 713 TWh; Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Gesamtausgabe der Energiedaten – Datensammlung des BMWi, Stand: 30.01.2017

<sup>27</sup> Kurzstudie: „Erneuerbare Energien im Verkehr“ – „Erneuerbare Energien im Verkehr. Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger“, Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima, DLR, IFEU, LBST, DBFZ, 10. März 2015 [[http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr.pdf?__blob=publicationFile)]

## Technisches Potenzial zur Stromerzeugung aus Windkraft und Solarenergie – Europa (EU) und Deutschland (D)

In der EU sind die Potenziale regenerativer Stromerzeugung für Wind und Solarenergie am größten. Im Folgenden werden die Ergebnisse und Einschätzungen verschiedenster Studien und Untersuchungen dargestellt.

Das technische Potenzial in EU-28 wird auf ca. 6.500 TWh/a für Wind (onshore und offshore) und auf jeweils ca. 1.800 TWh/a für Strom aus solarthermischen Kraftwerken (SOT) oder aus photovoltaischen Kraftwerken geschätzt. Insgesamt wird das technische Potenzial für Strom aus erneuerbaren Energiequellen in der EU-28 auf etwa 12.000 TWh/a abgeschätzt.

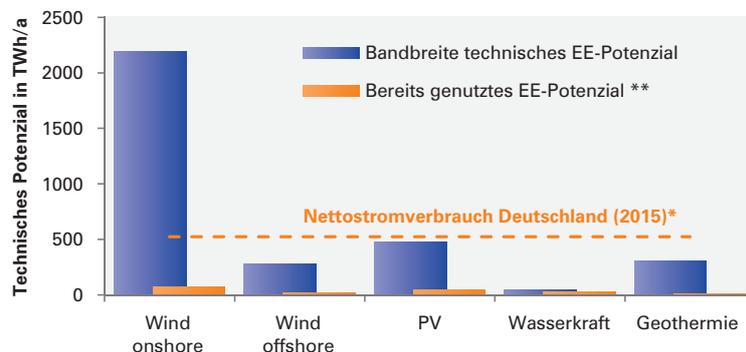


### Technisches Potenzial zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in EU-28

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2017; Daten: [Matthies et al. 1995], [IWES 2012], [BWE 2013], [Klariß et al. 1992], [Trieb et al. 2005], [TAB 2003], [Stefansson 2005], [MNH 2005], [SI OCEAN 2014]

\*2015 data: Eurostat provisional as per 01/2017

In Deutschland gibt es die größten Potenziale für Wind onshore und für Photovoltaik. Insgesamt wird das technische Potenzial für Strom aus erneuerbaren Energiequellen in Deutschland auf mindestens 1.000 TWh/a abgeschätzt.



### Technisches Potenzial zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2017; Daten: [BMVI 2015], [UBA 2014], [BWE 2013], [AEE 2013], [UBA 2013], [BMU 2012], [IWES-PV 2012], [UBA 2010], [Wagner 2008], [TAB 2003]

\* Daten für 2015: vorläufig, Stand 09/2016 [BDEW 2016]

\*\* Daten für 2016: vorläufig, Stand 12/2016 [AGEB 2016]

## Energie aus Biomasse

Das Potenzial der Biomasse für die Herstellung von Kraftstoffen ist begrenzt und steht in direktem Wettbewerb mit der Produktion von Nahrungsmitteln sowie anderen Nutzungen. Generell sollte die energetische Nutzung von Biomasse in erster Linie auf die stationäre Anwendung abzielen und nicht auf die Erzeugung von Kraftstoffen (wie z.B. BtL).

## Potenziale

Das weltweite Potenzial fester Biomasse und aus Reststoffen wird je nach angelegten Nachhaltigkeitskriterien auf zwischen 66–74 EJ und 103–116 EJ jährlich abgeschätzt [DBFZ 2011]<sup>28</sup>.

	PJ/a	TWh/a
Forstwirtschaft	511	142
Stroh	184	51
Gülle	90	25
Bio- und Grünabfall	23	6,4
Alt- und Industrierestholz (verfügbar)	168	47
<b>Summe Deutschland</b>	<b>976</b>	<b>271</b>

### Biogenes Brennstoffpotenzial Deutschland [DBFZ 2013]<sup>29</sup>

	EJ/a	TWh/a
Forstwirtschaft	43,4	12.060
Reststoffe	24,3	6.759
<b>Summe weltweit</b>	<b>67,7</b>	<b>18.819</b>

### Weltweites biogenes Brennstoffpotenzial [DBFZ 2013]

In manchen Literaturquellen werden höhere Potenziale genannt (z. B. [Hoogwijk 2004]<sup>30</sup>), die jedoch auf einer extremen Intensivierung des Ackerbaus mit hohem Düngemittel- und Pestizideinsatz basieren und deshalb nicht als nachhaltig betrachtet werden können. Wegen der begrenzten Potenziale ist es nicht möglich, den heutigen Kraftstoffbedarf der EU oder in Deutschland für den Verkehr – oder auch nur einen größeren Anteil davon – künftig durch heimische Biomasse zu ersetzen.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass Biomasse nur einen relativ kleinen Teil des gesamten Energiebedarfs decken kann. Auch gilt es, negative Umwelteffekte wie indirekte Landnutzungsänderung, Nutzungskonkurrenz der Landflächennutzung wie auch der Biomasse selbst und negative soziale Auswirkungen zu vermeiden. Der größte Anteil des künftigen erneuerbaren Energiebedarfs wird durch Windkraft und die direkte Nutzung der Solarenergie bereitgestellt werden müssen.

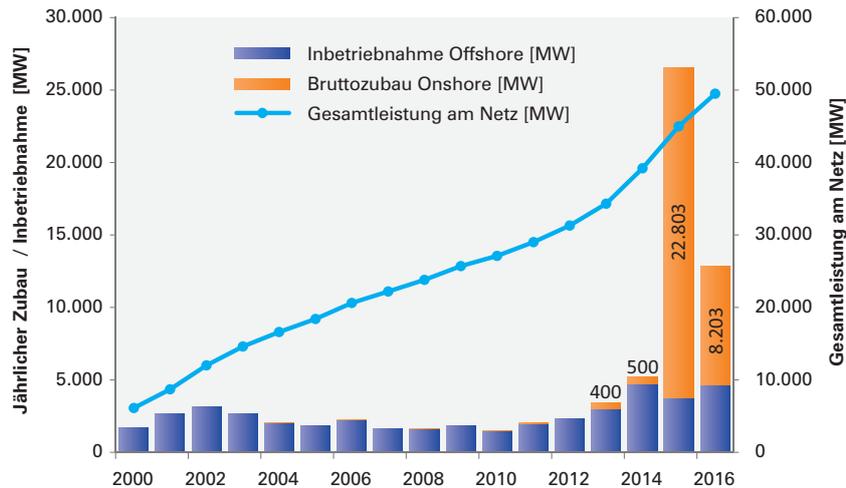
<sup>28</sup> [DBFZ 2011] Global and Regional Spatial Distribution of Biomass Potentials – Status quo and options for specification –, DBFZ Report Nr. 7, November 2011

<sup>29</sup> [DBFZ 2013] – Biomassepotenziale und Nutzungskonkurrenzen, Kurzstudie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima, DBFZ, ifeu, LBST, 17.07.2013

<sup>30</sup> [Hoogwijk 2004] Hoogwijk, M.: On the global and regional potential of renewable energy sources; Proefschrift Universiteit Utrecht, Faculteit Scheikunde, Netherlands; 12 March 2004; ISBN 90-393-3640-7

## Regenerative Stromerzeugung aus fluktuierenden Quellen

Es wird unterstellt, dass die Erzeugung erneuerbaren Stroms deutlich wachsen wird, denn die größten Potenziale für die Erzeugung erneuerbaren Stroms in Europa und Deutschland bestehen bei der Windkraft, der Wasserkraft, der Photovoltaik und der Geothermie und die politischen Ausbauziele fordern diesen weiteren Ausbau.



### Erneuerbare Stromerzeugung aus Wind in Deutschland

[Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2017; Daten: IWR 2017, <http://www.windbranche.de>]

Die Grafik zeigt den stetig steigenden Ausbau der Windstromerzeugungskapazitäten in Deutschland über die letzten 20 Jahre. Heute hat Deutschland mit fast 50 GW etwa 10 % der weltweit installierten Kapazität. Im Jahre 2015 sind über 3.000 GWh an potenziell erzeugbarer Windenergie nicht erzeugt und damit nicht in Netz gespeist worden (Einspeisemanagement).

## Anforderungen an das Stromnetz

Der steigende Anteil an Windkraft und Solarenergie wird die Fluktuationen im Stromnetz erhöhen. Diese Problematik kann durch eine Reihe von Maßnahmen entschärft werden: Verstärkung der Netze, Demand-Side-Management und intelligente Netze, Kurzzeitspeicherung in Pufferbatterien, Nutzung von Erzeugungsspitzen zur Aufladung der Batterien von Batteriefahrzeugen und Plug-In-Hybrids, etc.. Langfristig wird jedoch auch die Speicherung von größeren Menge an Strom über mehrere Tage und Wochen notwendig werden.

Die dena Netzstudien<sup>31</sup> kommen zu dem Ergebnis, dass es notwendig ist, Erzeugungsmanagement und/oder Netzerweiterung zu den Nachbarländern und/oder neue Speichertechnologien einzusetzen, um die gegenwärtige Netzstabilität zu erhalten.

<sup>31</sup> Siehe: <https://www.dena.de/themen-projekte/energiesysteme/stromnetze/>

In der dena-Studie „Systemdienstleistungen 2030“<sup>32</sup> wurde dabei untersucht, welche Anforderungen der Ausbau der erneuerbaren Energien an die Erbringung und Bereitstellung von Systemdienstleistungen stellt und welche Maßnahmen zur Sicherung einer stabilen Stromversorgung bis 2030 notwendig sein werden. Ein zentrales Ergebnis ist, dass aufgrund sinkender Betriebszeiten konventionelle Kraftwerke zukünftig Stromspeicher, Anlagen erneuerbarer Energien und flexible Stromlasten Regelleistung bereitstellen müssen. Damit könnten Fluktuationen im Stromnetz ausgeglichen und reduziert werden, die in Folge eines verstärkten Zubaus von Windkraftanlagen und PV-Systemen auftreten können. Stromspeicher könnten bereits 2030 Regelleistung wirtschaftlicher erbringen als konventionelle Kraftwerke, die ausschließlich zur Mindestenergieerzeugung kontinuierlich am Netz gehalten werden müssen.

Verfestigt sich die gegenwärtig sichtbare Entwicklung, dass der wesentliche Anteil der Windkraftenerzeugung auch weiterhin im Norden Deutschlands erfolgt und im Süden ein nennenswerter Zubau unterbleibt, wird der Zubau von Transportleitungen für den EE-Strom erforderlich sein. Allein der Verkehrssektor könnte in solch einer Grenzbetrachtung bis zum Jahr 2050 den Zubau von etwa 10 HGÜ-Transportleitungen erforderlich machen. Diese werden benötigt, um Batterie- und H<sub>2</sub>-Brennstoffzellenfahrzeuge sowie Verkehrsanwendungen mit synthetischen aus Strom erzeugten Kraftstoffen (PtCH<sub>4</sub>, PtL) zu versorgen. Zur Versorgung der Fahrzeuge, die Kraftstoff auf Wasserstoffbasis benötigen, würde eine H<sub>2</sub>-Rohrleitung ausreichen und für die direkt stromversorgten Batteriefahrzeuge noch etwa zwei HGÜ-Leitungen. Dieser Ansatz erscheint unter Akzeptanzgesichtspunkten als leichter realisierbar.



<sup>32</sup> dena-Factsheet: dena-Studie Systemdienstleistungen 2030. Erscheinungsdatum: 02/2014, Artikelnummer: 9040

# ... wohin wir gehen



## Speicherung von erneuerbarem Strom

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.

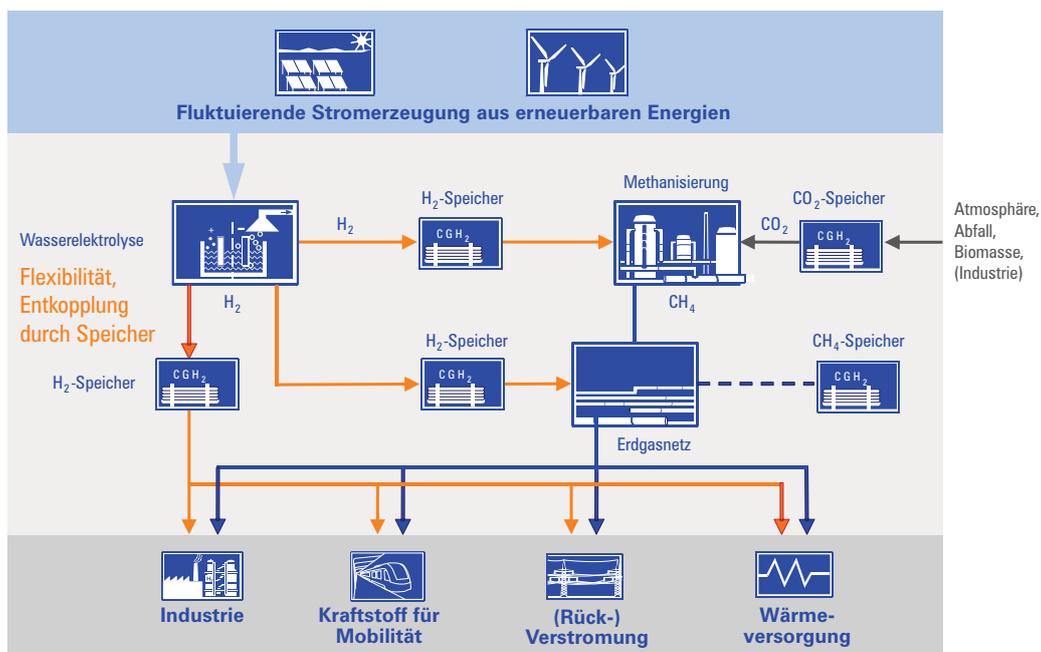
Zukünftig wird der Speicherbedarf von EE-Strom, mit dem Ausbau der EE-Anlagen, vor allem von Windkraftanlagen und PV-System, weiter steigen. Bei einem vollständigen Umstieg von fossilen und nuklearen Brennstoffen auf EE-Strom wird der EE-Stromspeicherbedarf auf mehrere 100 TWh ansteigen. Wasserstoff kann hier eine wichtige Rolle und Funktion als Energiespeicher übernehmen.





**Stromspeicherbedarf**

**Wasserstoff als Speicher für Strom**



**Wasserstoff als Speicher für elektrischen Strom**

Wasserstoff kann aus elektrischem Strom in Hochdruckelektrolyseuren 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 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 betragen, 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 erneuerbarem Strom die Treibhausgasemissionen für die in den Verkehr gebrachte Kraftstoffe um ca. 105 g-CO<sub>2</sub>eq/MJ reduziert werden. Insgesamt könnten damit jährlich kurzfristig ca. 1 Mio. t. CO<sub>2</sub>-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 andererseits 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 CO<sub>2</sub>-Reduktionen im Verkehrssektor um 40 % bis 2030 sowie der Notwendigkeit, in städtischen Verdichtungsräumen Partikel- und NO<sub>x</sub>-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 H<sub>2</sub>-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.

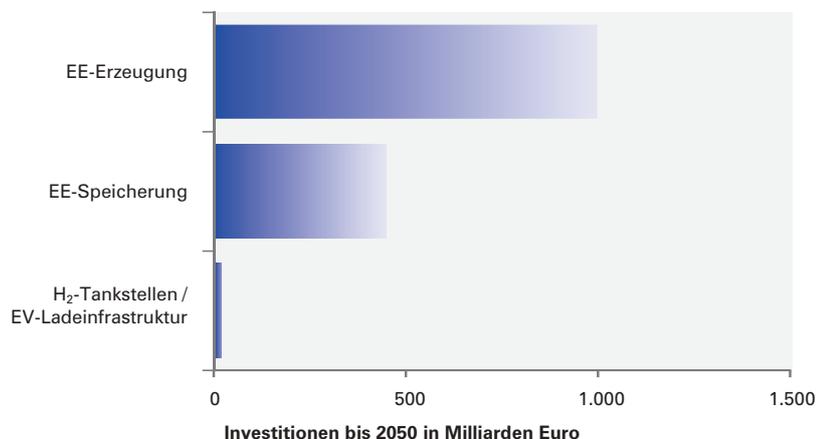


Links: COOP H<sub>2</sub>-BZ Lkw; Rechts: BMW 5GT mit H<sub>2</sub>-BZ-Antrieb; Reinhold Wurster, LBST, 2016

## Wirtschaftliche Aspekte

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 Brennstoffzellenfahrzeuge ebenfalls berücksichtigt werden.

Im Rahmen einer Studie<sup>33</sup> 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. Berücksichtigt sind der Aufbau erneuerbarer Energiequellen zur Stromerzeugung (vor allem Windkraftanlagen und PV-Systeme<sup>34</sup>), der Zubau erneuerbarer Stromspeicheranlagen (Wasserstoff, PtCH<sub>4</sub>, 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.<sup>35</sup>



### 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 benötigte 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).

<sup>33</sup> P. Schmidt, W. Zittel, W. Weindorf, T. Raksha, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH: Renewables in Transport 2050 – Empowering a sustainable mobility future with zero emission fuels from renewable electricity – Europe and Germany, Research Association for Combustion Engines e.V. (ed.) FVV-Report 1086/2016, <http://www.fvv-net.de/en/download/renewables-in-transport-2050/renewables-in-transport-2050.html>

<sup>34</sup> Annahme: Zubau EE bis 2050: ca. 38 GW Wind onshore, 3 GW Wind offshore und 39 GW PV)

<sup>35</sup> Zum Vergleich dazu lag das Bruttonationalprodukt (BIP) Deutschlands im Jahr 2014 bei ca. 2.900 Milliarden Euro. Bei einer linearen Abschreibung über 35 Jahren würden somit die jährlichen Investitionen bei ca. 1–2 % des BIP liegen.

## Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur



**Heutige Tankstellen (blaue Punkte) und geplante Tankstellen (orange Punkte) sowie realisierbare Distanzen (300 km), Quelle: LBST, H<sub>2</sub>stations, 2017**

In Deutschland ist der Aufbau einer Betankungsinfrastruktur für BZ-Pkw durch H<sub>2</sub>Mobility<sup>36</sup> bereits jetzt deutlich fortgeschritten:

- ➔ Im zweiten Halbjahr 2017 sind 50 H<sub>2</sub>-Tankstellen (HRSs) in Betrieb.
- ➔ Bis Ende 2018 soll deren Zahl auf ca. 100 steigen.
- ➔ Abhängig von der Zahl an Brennstoffzellenfahrzeugen im Markt sollen bis Ende 2023 bis zu 400 HRSs in Betrieb sein, bei angenommenen 200.000 BZ-Fahrzeugen.
- ➔ Perspektivisch werden bis 2030 etwa 1.000 HRSs erwartet, die bis zu 1,8 Mio. BZ-Fahrzeuge bedienen sollen.

<sup>36</sup> H<sub>2</sub> MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG hat den Auftrag, einen schnellen, effizienten und flächendeckenden Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur für Brennstoffzellen-Autos in Deutschland zu realisieren [<http://h2-mobility.de/h2-mobility/>].

## 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 Batteriebusen 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 vollständig abdecken. H<sub>2</sub> 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)<sup>37</sup> 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<sup>38</sup> ist, um Kontinuität sicherzustellen, seit 2015 in ihrer 2. Phase in Europa aktiv.



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 H<sub>2</sub>&BZ-Technologien kümmern soll. Die Koordination und Umsetzung des NIP liegt in den Händen der NOW GmbH (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie).



<sup>37</sup> Siehe "Interim Structure" (<https://www.hfpeurope.org/hfp/jti>) und "Industry Grouping" ([www.fchindustry-jti.eu](http://www.fchindustry-jti.eu))

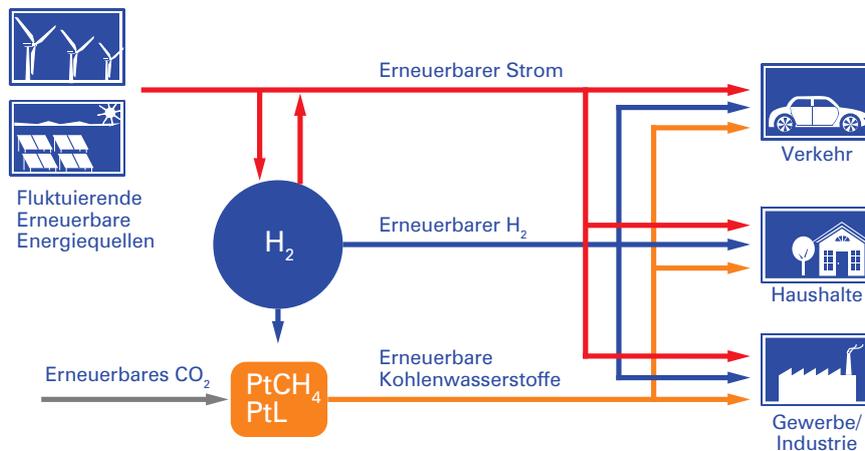
<sup>38</sup> Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (<http://www.fch.europa.eu/>)

# Wasserstoff und Brennstoffzellen

## Starke Partner erneuerbarer Energien



### Sektorkopplung



**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 (CO<sub>2</sub>) zu Methan (Power-to-Methane, PtCH<sub>4</sub>) 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

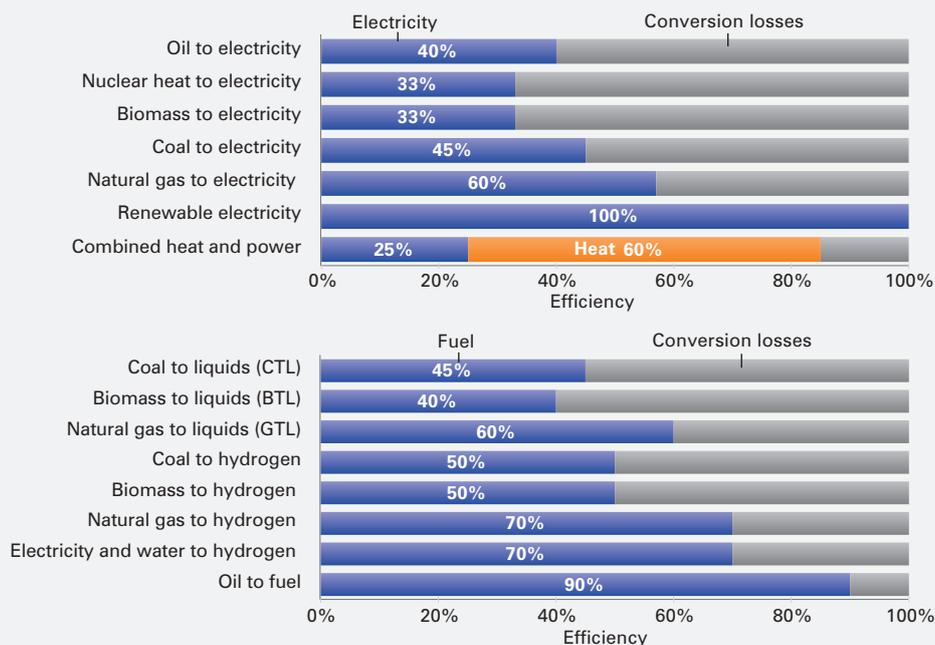
Für stationäre Anwendungen ist der effizienteste Pfad die direkte Nutzung von Wind- oder Solarstrom. Kohlenstoffbasierte Energiequellen (z. B. Erdgas oder Biomasse) erreichen im stationären Einsatz in kombinierter Wärme- und Stromerzeugung (KWK) den höchsten Wirkungsgrad.

Wasserstoff, der eine Sekundärenergie und ein Energieträger ist, sollte im stationären Bereich nur eingesetzt werden, wo die Speicherefähigkeit 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 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.

### Energiewandlungssektor

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

## 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 Batteriefahrzeuge 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 H<sub>2</sub>-BZ-Triebwagen und wird diese ab 2020 in mehreren Bundesländern für den Regelbetrieb liefern.



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

## 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.

# Abkürzungsverzeichnis

a	Anno (Jahr)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BtL	Biomass-to-Liquid (Kraftstoff)
BZ	Brennstoffzelle
CAES	Compressed Air Energy Storage (Luftdruckspeicher)
CCS	Carbon Capture and Storage (Kohlenstoffextraktion und -speicherung)
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
DWV	Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (German Hydrogen and Fuel Cell Association)
EC	European Commission (Europäische Kommission)
EJ	Exa-Joule (= 10 <sup>18</sup> Joule)
EE	Erneuerbare Energien
ETS	(European) Emission Trading Scheme (Europäisches Emissionshandelssystem)
EU	European Union (Europäische Union)
FC	Fuel Cell (Brennstoffzelle)
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
F&E	Forschung und Entwicklung
GJ	Giga-Joule (= 10 <sup>9</sup> Joule)
GWh	Gigawattstunde (= 10 <sup>9</sup> Wh)
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
HRS	Hydrogen Refuelling Station (Wasserstofftankstelle)
ICE	Internal Combustion Engine (Verbrennungsmotor)
kWh	Kilowatt-hour (= 10 <sup>3</sup> Wh) (Kilowattstunde)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LBST	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
MPa	Mega Pascal (= 10 bar)
Mtoe	Millionen Tonnen Öläquivalent
Nm <sup>3</sup>	Normkubikmeter
PJ	Peta-Joule (= 10 <sup>15</sup> Joule)
PtCH <sub>4</sub>	Power-to-Methane (Strom zu synthetischem Methan – SMG)
PtH <sub>2</sub>	Power-to-Hydrogen (Strom zu Wasserstoff)
PtG	Power-to-Gas (Strom zu Erdgas)
PtL	Power-to-Liquid (Strom zu synthetischen Flüssigkraftstoffen)
PtX	Power-to-Fuel (Strom zu H <sub>2</sub> , Erdgas, flüssigen synthetischen Kohlenwasserstoffen)
PV	Photovoltaik
RES	Renewable Energies (Erneuerbare Energien)
SOT	Solar Thermal Power Plants (Solarthermische Kraftwerke)
TWh	Terawattstunden (= 10 <sup>12</sup> Wh)
ZEV	Zero Emission Vehicle (Nullemissionsfahrzeug)

## Wasserstoff – Kernelement für eine nachhaltige Energiewirtschaft

Kreisläufe sind der Inbegriff von Nachhaltigkeit. Die Natur tut es: Wasser – Wasserstoff – Wasser. Innerhalb von Kreisläufen wird Wasser in vielfältiger Weise benutzt, aber nicht verbraucht.

Mit James Watts Dampfmaschine hat es begonnen, dass Leben und Wohlstand auch durch die Arbeit der Ingenieure bestimmt werden und nicht mehr ausschließlich vom Reichtum an Bodenschätzen und der Nutzung der Äcker. Allerdings nahm die ersten Jahrhunderte die Industrialisierung wenig Rücksicht auf die Erhaltung der Umwelt. Mit der Erkenntnis über die Auswirkungen unseres Handelns haben wir begonnen, die daraus resultierenden Folgen zu hinterfragen.

Zweihundert Jahre hat es somit gedauert, bevor sich die Ingenieurkunst im Energiesektor der Natur zu nähern begann. Regenerative Energiequellen werden im großen Stil genutzt und grüner Strom wird in Form der chemischen Energie des Wasserstoffs gespeichert. Dieser steht als vielseitiger Rohstoff in der chemischen Produktion oder als Kraftstoff zur Verfügung, zur Wärme- und Kälteerzeugung sowie im Bedarfsfall nach erneuter Umwandlung als Regelenergie zur Stabilisierung elektrischer Netze und zur Stromversorgung an netzlosen Orten.

Die Zeit ist absehbar, dass Unwiederbringliches nicht mehr vergeudet und tiefgreifende Schädigungen der Umwelt im Interesse unserer nachfolgenden Generationen nicht länger hingenommen werden dürfen. Grüner Wasserstoff wird zum zentralen Element in einer von regenerativen Energiequellen dominierten Welt und sorgt somit für Gesundheit, Frieden und Wohlstand.

Die vorliegende Broschüre wurde bereits 2008 erstmalig aufgelegt. Nunmehr steht sie – vollständig überarbeitet – aktualisiert und ergänzt zur Verfügung. Mögen die Leser für ihr eigenes Handeln im Großen wie im Kleinen motiviert werden, zur Umstellung der Energiewirtschaft beizutragen und Anregungen für eine effizientere und umweltverträgliche Integration von Energie- und Verkehrssystem aus der Broschüre entnehmen!

Der DWV wird mit allen seinen Mitgliedern sich nach Kräften für eine nachhaltige, klimaschonende, versorgungssichere und wirtschaftliche Energieversorgung einsetzen.