

1

Einleitung

Spätestens durch die Nationale Wasserstoffstrategie [1] der Bundesregierung genießt Wasserstoff auch in der breiten Öffentlichkeit eine besondere Aufmerksamkeit. Der Einsatz von Wasserstoff wird sowohl in der Rolle als Sekundärenergieträger als auch als Grundstoff für industrielle Prozesse verortet. Mit beiden Anwendungsfeldern wird die Dekarbonisierung, das Vermeiden von Treibhausgasemissionen, in allen Bereichen der Wirtschaft und Gesellschaft unterstützt.

Im Bereich der Energieversorgung steht die Substitution von gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen wie Erdgas, Heizöl, Benzin, Diesel und Kerosin im Vordergrund. Im Gegensatz zur Verbrennung von fossilen Energieträgern fallen bei der energetischen Nutzung von Wasserstoff kein Kohlenstoffdioxid und auch keine Schwefeloxide, sondern lediglich Wasserdampf an. Partikelförmige Emissionen entstehen nicht. Anders als beim Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellen entstehen beim Betrieb von Verbrennungsmotoren jedoch Stickoxide und andere Verbrennungsnebenprodukte.

Wasserstoff lässt sich direkt als Energieträger einsetzen oder auch durch chemische Prozesse zu synthetischen Brenn- und Kraftstoffen aufbereiten. Die Palette möglicher Produkte ist breit und reicht von synthetischem Methan (CH_4 , Hauptbestandteil von Erdgas) bis zu flüssigen Treibstoffen wie Methanol (CH_3OH). In Bezug auf den Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung spielen u. a. die Wirkungsgrade der beteiligten Herstellungs- und Umwandlungsprozesse eine bedeutende Rolle (dazu mehr in den Kap. 2 und 3). Je nach Quelle der für die Produktion der synthetischen Brennstoffe erforderlichen Kohlenstoffverbindungen kann ein klimaneutraler Betrieb erreicht werden.

Die für die Herstellung und den Einsatz von Wasserstoff erforderlichen Komponenten sind seit vielen Jahrzehnten bekannt, jedoch bislang nur in Nischenanwendungen zu finden. Insbesondere im Zusammenhang mit der Speicherung von größeren Energiemengen für eine (Voll-)Versorgung aus fluktuierenden, regenerativen Energieträgern kommt dem Sekundärenergieträger Wasserstoff eine hohe Bedeutung als Speichermedium zu. Angesichts eines Anteils von derzeit (2020) 33 % Stromerzeugung aus fluktuierenden Quellen [2] wie Photovoltaik (PV) und Windenergie sowie einer regenerativen Stromerzeugung von insgesamt 45 % zeichnen sich die künftigen Entwicklungsschritte für die Energieversorgung in Deutschland ab: Dies betrifft zum einen die Einführung von Flexibilisierungsoptionen – als Antwort auf die Frage, wie eine zunehmend volatile Erzeugung mit dem ebenso fluktuierendem Bedarf in Einklang zu bringen ist. Die zweite, vielleicht sogar noch vordringlichere Frage ist jedoch die Transformation des Energieversorgungssystems als solches. Dies wird deutlich, wenn der Stromanteil von derzeit lediglich 20 % am gesam-

ten Endenergiebedarf in den Blick gerät. 20 % Strom bedeuten, dass 50 % des Verbrauchs für Wärme- und Kältezwecke (davon 85 % fossil) sowie 30 % für Mobilität (davon 93 % fossil) aufgewendet werden (vgl. Abb. 1.2). Die dominierenden Energieträger sind in beiden Bereichen Erdöl und Erdgas, nicht Kohle und Kernenergie. Anhand dieser Zahlen wird überdeutlich, dass die eigentliche Transformation des Energiesystems noch nicht begonnen hat, sondern noch bevorsteht.

Die Einsatzmöglichkeiten des Sekundärenergieträgers Wasserstoff sind so vielfältig, dass praktisch jede heutige Nutzung von Erdöl oder Erdgas durch Wasserstoff substituiert werden kann. Dabei dürfen jedoch die Energiemengen, die zur Wasserstoffproduktion und in der weiteren Wertschöpfungskette erforderlich sind, nicht vernachlässigt werden. Ein Ein-zu-eins-Ersatz erscheint daher wenig zielführend. Wesentlicher ist das Identifizieren von besonderen Eigenschaften – dazu zählen insbesondere die Speicherfähigkeit und eine emissionsfreie Nutzung durch Brennstoffzellen am Einsatzort. Entsprechende Konzepte für eine CO₂-neutrale Energieversorgung aus regenerativen Energieträgern mit Wasserstoff als Speichermedium liegen seit langer Zeit vor [3, 4].

Durch die Nutzung von Wasserstoff als Speicher entsteht keineswegs eine technische Wettbewerbssituation zu anderen Speichersystemen wie beispielsweise Großbatterien. Wasserstoff und daraus abgeleitete Brennstoffe wie synthetisches Methan (CH₄) eignen sich insbesondere für die Speicherung sehr großer Energiemengen. Batterien sind hingegen eher in der Lage, kurzfristig Strom aufzunehmen oder abzugeben. Moderne Wasserstoffherzeuger (PEM-Hydrolyse) lassen sich in einem weiten Leistungsbereich betreiben und können damit einen Beitrag zur Stabilisierung der Stromnetze leisten, haben jedoch ein trägeres Antwortzeitverhalten als Batteriespeicher.

Als besonders attraktiv erscheint eine Weiternutzung bestehender Erdgasinfrastrukturen. Konkret sind das Pipelinesysteme mit verschiedenen Druckniveaus für Übertragungs- und Verteilnetze, Gaskraftwerke und Kavernenspeicher. Auf deutschem Boden befinden sich Speicher für 24 Mrd. m³ Erdgas [5]. Das entspricht einem Energieäquivalent von rund 260 TWh (thermisch) oder rund einem Viertel des jährlichen Erdgasbedarfs (2020: 956 TWh [6]) in Deutschland. Zudem wäre ein Weiterbetrieb diverser anderer Erdgasverbraucher wie Gasherde, Heizungsanlagen oder Verbrennungsmotoren denkbar. Technisch limitierend wirkt sich jedoch der Energieaufwand zur Bereitstellung von CO₂-neutralem Wasserstoff aus. Bedingt durch den endlichen Wirkungsgrad von Umwandlungsprozessen werden hierfür große Strommengen benötigt. Beide Aspekte, die Energiespeicherung und die Weiternutzung bestehender Infrastrukturen, werden in den folgenden Kapiteln vertieft.

Anders als in der Energiewirtschaft wird Wasserstoff in der chemischen Industrie bereits seit Ende des 19. Jahrhunderts eingesetzt. Dazu zählen die stoffliche Nutzung für:

- die Ammoniaksynthese (Haber-Bosch-Verfahren)
Produkte: u. a. Düngemittel, Salpetersäure und Sprengstoffe,
- das Hydrieren von Kohlenstoffdoppelbindungen
Produkte: Fetthärtung in Margarine, Hydrazin (Raketentreibstoff).

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts zählt auch die Erdölverarbeitung (*Steamcracker*) mit den Hauptprodukten Ethen und Propen zur Kunststoffherstellung und Produktion technischer Brennstoffe dazu. Wasserstoff kommt zudem in Kombination mit anderen Gasen (u. a. Sauerstoff, Ethin) als Schweißgas zum Einsatz.

Aktuell entwickeln sich weitere Anwendungsfelder wie:

- der Sabatier-Prozess (Methanisierung)
Produkte: Methan sowie in weiteren Prozessschritten auch Aromaten und Kunststoffe sowie synthetische Brenn- und Kraftstoffe,
- Anwendungen in der Grundstoffindustrie
Produkte: u. a. Green Steel¹⁾.

Damit stehen insbesondere Wirtschaftsbereiche im Energiesektor sowie der Grundstoff- und der chemischen Industrie vor essenziellen Transformationen. Die weitgehende Dekarbonisierung aller Wirtschafts- und Lebensbereiche bis 2050 [7] setzt das Vermeiden und Verhindern von CO₂-Emissionen und damit eine Abkehr vom Einsatz fossiler Energieträger voraus. Analog hierzu sind zur Vermeidung prozessbedingter Emissionen Ersatzstoffe für die stoffliche Nutzung heranzuziehen.

1.1 Technische Beschreibung

Wasserstoff ist das häufigste Element im Universum und zählt zu den zehn häufigsten Elementen in der Erdkruste. Auch der menschliche Körper und alle anderen Lebewesen bestehen – bezogen auf die Stoffmenge – hauptsächlich aus Wasserstoff [8].

Wasserstoff liegt nicht elementar in Reinform vor, sondern ist in Stoffen wie Wasser, Biomassen und anderen Kohlenwasserstoffen gebunden. Auch in vielen Mineralien kommen Wasserstoffverbindungen vor. Um Wasserstoff technisch einsetzen zu können, ist daher – unabhängig von der Art der Nutzung – zunächst ein physikalischer und/oder chemischer Prozess zur Herstellung erforderlich. Präziser: Wasserstoff muss aus den bestehenden Verbindungen herausgetrennt werden.

Obwohl der weit überwiegende Teil des irdischen Wasserstoffs in Wasser gebunden ist, basieren diese Herstellprozesse aktuell nahezu ausschließlich auf Erdgas und Erdöl, zu geringeren Teilen auch auf Kohle, als Ausgangsmaterial²⁾. Strombasierte Elektrolyseverfahren werden zwar seit dem Aufkommen einer regenerativen Energieversorgung zunehmend diskutiert, spielen jedoch derzeit nur eine marginale Rolle. Dies wirkt umso erstaunlicher, da in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts Elektrolyseverfahren die Wasserstoffproduktion dominierten und erst ab den 1960er-Jahren insbesondere durch Erdgas verdrängt wurden.

Wird Wasserstoff als Energieträger – genauer: als Sekundärenergieträger, denn er ist zunächst herzustellen – herangezogen, so treten je nach Nutzungspfad entweder nur Wasserdampf (Brennstoffzelle) oder zusätzlich auch Stickoxide und weitere Verbrennungsrückstände (Verbrennungsmotor, Gasturbine) auf. Die derzeitige Praxis, Wasserstoff überwiegend aus fossilen Energierohstoffen zu gewinnen, führt dazu, dass genau jene CO₂-Emissionen im Herstellungsprozess vorweggenommen werden, die sonst erst bei der Nutzung in thermischen Prozessen (Verbrennung) oder bei einer stofflichen Nutzung der fossilen Energierohstoffe entstehen würden. Zudem ist auch der Energiebedarf für die Wasserstoffherstellung emissionsbehaftet.

1) Anstelle von Kohle wird Wasserstoff als Reduktionsmittel für Eisenoxid eingesetzt und trägt damit zur Minderung der prozessbedingten Kohlenstoffdioxidemissionen (CO₂) bei.

2) In der englischsprachigen Literatur wird hier von *feed* gesprochen.

Immerhin eröffnet sich aus der Bereitstellung von Wasserstoff aus fossilen Energierohstoffen zumindest theoretisch ein Potenzial, Emissionen vom Ort der Endenergienutzung (Motor, Wärmeversorgung, Stromerzeugung) auf den Ort der Brennstoffherzeugung (hier: Wasserstoffproduktion) zu verlagern. Technologien zur Abtrennung von Kohlenstoffdioxid aus dem Abgasstrom sind im großtechnischen Maßstab verfügbar, werden jedoch de facto kaum genutzt. Inwieweit dieses Potenzial zur Emissionsvermeidung tatsächlich realistisch ist und sich technisch (Massen, Volumina, Endlager) auch wirtschaftlich umsetzen lässt, wird in den Abschn. 2.3.2 und 2.3.3 näher betrachtet.

Um die politischen Ziele zur CO₂-Vermeidung zu erreichen, spielen zudem Energieaufwand und Nachhaltigkeitskriterien für die verschiedenen Prozessrouten eine wesentliche Rolle (vgl. Kap. 2). Regenerative Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff, die gänzlich ohne direkte Treibhausgasemissionen auskommen, haben derzeit nur eine marginale Bedeutung [9].

Beim Einsatz von Wasserstoff als Sekundärenergieträger sind Wirkungsgrade entscheidend. Durch den Wirkungsgrad wird das Verhältnis von Energieertrag zu Energieaufwand beschrieben. Ein geringer Wirkungsgrad bedeutet, dass der Energieaufwand für das Herstellen eines Sekundärenergieträgers wesentlich größer ist als die zur Verfügung gestellte Energiemenge. Mit anderen Worten, es muss entsprechend mehr saubere Energie für die Produktion derselben Wasserstoffmenge aufgewendet werden (vgl. Abb. 1.4).

1.2 Chemische und physikalische Eigenschaften

Wasserstoff weist einige herausragende energetische und stoffliche Eigenschaften auf. Die äußerst geringe volumenbezogene Dichte von Wasserstoff von lediglich 89,9 g/m³ bei atmosphärischem Druck führt zu vergleichsweise hohen Werten bei massebezogener Energiedichte und auch großen Volumina für die Speicherung einer vorgegebenen Energiemenge.

Durch Kompression auf 70 MPa kann die volumenbezogene Energiedichte für gasförmigen Wasserstoff bis auf 1,3 kWh/l gesteigert werden [10]. Die technische Grenze für Drucktanks liegt bei über 100 MPa. Zum Vergleich: Flüssiges Benzin verfügt über eine Energiedichte³⁾ von 9,0 kWh/l [11], Diesel noch 11 % darüber. Die höhere Energiedichte konventioneller Kraftstoffe erlaubt, trotz der, verglichen mit elektrischen Antriebssystemen, vergleichsweise ineffizienten Energieumwandlung in Verbrennungsmotoren, höhere Reichweiten. Der nicht vernachlässigbare Energiebedarf für die Kompression oder eine Verflüssigung zu Speicherzwecken wird in Abschn. 3.1 detailliert betrachtet.

Die geringe Dichte führt dazu, dass etwaig austretender Wasserstoff in der Atmosphäre aufsteigt (nur 7 % der Dichte von Luft) oder sich im obersten Bereich eines geschlossenen Raumes sammelt. Damit verringert sich die Gefahr von Brandrisiken bei einem potenziellen Austritt in Bodennähe gegenüber gängigen flüssigen Kraftstoffen [12]. Ein Sicherheitsaspekt ist auch der im Vergleich zu Benzin [13] wesentlich höhere Zündpunkt (Benzin: 220 °C; Wasserstoff 560 °C). Der Bereich für ein zündfähiges Gemisch mit Luft ist

3) Sämtliche Angaben zu Energiemengen und Energiedichten werden in diesem Abschnitt, so nicht explizit anders beschrieben, auf den Heizwert bezogen. Der Brennwert liegt je nach Wasserstoffanteil eines Energieträgers 5–20 % höher als der Heizwert (vgl. Tabelle 3.1).

Tab. 1.1 Physikalische Eigenschaften von Wasserstoff.

| Eigenschaft | Einheit | Wert | Anmerkung |
|----------------|--------------------|--------|---|
| Heizwert | kWh/kg | 33,32 | Ohne Kondensationsenthalpie; z. B. im Verbrennungsmotor |
| | kWh/m ³ | 2,995 | |
| Brennwert | kWh/kg | 39,41 | Mit Kondensationsenthalpie; z. B. im Brennwertheizgerät |
| | kWh/m ³ | 3,51 | |
| Dichte | kg/m ³ | 0,0899 | Gasförmig |
| | kg/m ³ | 70,8 | Flüssig; bei –253 °C |
| Wärmekapazität | kJ/kg K | 14,30 | |
| Zündtemperatur | °C | 530 | In Luft |

Daten: [14, 15].

bei Wasserstoff im Vergleich zu herkömmlichen Kraftstoffen (1–8 %) jedoch deutlich größer (4–77 %) und die erforderliche Zündenergie ist bei Wasserstoff sehr gering (0,02 mJ). Die Verbrennung verläuft bei Wasserstoff zudem deutlich schneller, was beim Einsatz als Kraftstoffsubstitut Anpassungen an der Motortechnik oder dem Design von Gasturbinen erfordert.

Der Siedepunkt von Wasserstoff liegt bei atmosphärischem Druck bei lediglich 20,3 K oder –252,76 °C. Selbst bei erhöhtem Druck muss eine Temperatur von –240 °C (33,2 K) für die Verflüssigung unterschritten werden (kritischer Punkt; ca. 1,3 MPa). Entsprechend aufwendig gestalten sich die Herstellung, Speicherung⁴⁾ und Verteilung von flüssigem Wasserstoff. Der Energieaufwand zur Kühlung und dem Aufrechterhalten des Temperaturniveaus, die hochwertige thermische Isolierung aller technischen Komponenten und Infrastrukturen sowie der sichere Umgang mit unvermeidlich auftretenden Abdampfverlusten sind zu berücksichtigen und zu beherrschen. Andererseits nimmt bei einer Verflüssigung von Wasserstoff die Dichte um den Faktor 788 zu, was beispielsweise für den Energietransport mit deutlich veränderten Anforderungen an die Dimensionen (Volumen, Volumenströme, Querschnitte) einhergeht (vgl. Tab. 1.1). Anders als bei der derzeit überwiegend stofflichen Nutzung von Wasserstoff, haben bei energetischer Nutzung Energiebedarfe für die Herstellung von Wasserstoff und den Betrieb etwaiger Tieftemperaturinfrastrukturen eine große Bedeutung.

Gegenüber vielen anderen Gasen und Gasgemischen wie Luft, Sauerstoff (O₂) oder Stickstoff (N₂) weist Wasserstoff einen negativen Joule-Thomson-Koeffizient auf. Das bedeutet, dass unter Normalbedingungen (1013 hPa, 0 °C) eine Druckerhöhung zum Absinken der Temperatur führt [16]. Bei Luft findet hingegen eine Temperaturerhöhung statt, was beim Bedienen einer Fahrradluftpumpe deutlich spürbar ist.

Als kleinstes Molekül (H₂) oder im atomaren Zustand als kleinstes Atom (H) kann Wasserstoff innerhalb kurzer Zeit selbst in Metalle eindiffundieren (Permeation). Durch Wasserstoffkorrosion findet eine Versprödung des Materials statt, die auch in Stahl und Titan beobachtet wird.

Die hohe Diffusionsfähigkeit ist bei der Auswahl der Werkstoffe für Infrastrukturen zum Transport und Verteilung von Wasserstoff zu berücksichtigen und betrifft ebenso Armatur-

4) Vergleiche auch Abb. 3.1 Speicherdichte von Wasserstoff.

ren, Messeinrichtungen etc. Kunststoffe stellen keine hinreichende Barriere für Wasserstoff dar und kommen nur als Schutzmantel für geeignete metallische Werkstoffe infrage. Insbesondere bei Speichern ist die hohe Diffusivität von Bedeutung. Durch Sperrschichten und die Auswahl besonderer Materialien lassen sich Speicherverluste vermeiden. Hierzu zählen Austenitische Stähle (z. B. mit hohem Chrom- und Nickelanteilen, **Edelstahl**). Sie sind auch bei dauerhaftem Kontakt mit Wasserstoff nicht oder nur kaum von Wasserstoffdiffusion und -korrosion betroffen.

Stadtgas

Ab Beginn des 19. Jahrhunderts existierten in zahlreichen größeren Städten Stadtgasnetze. Beim Stadtgas handelte es sich um ein wasserstoffhaltiges Gemisch (Wasserstoffanteil ca. 50 Vol.-%). Das Gas wird durch Entgasung von Steinkohle in Kammeröfen unter Luftabschluss produziert. Als Nebenprodukt entsteht hochwertiger Koks, der für die Eisenreduktion in der Stahlherstellung benötigt wird.

Ab den 1970er-Jahren wurde Stadtgas zunehmend durch Erdgas abgelöst und die Infrastrukturen und Gasverbraucher entsprechend umgestellt.

Bei nur kurzfristig einwirkendem Wasserstoff kann durch Wärmebehandlung der Vorgang der Wasserstoffkorrosion in vielen Stählen rückgängig gemacht werden. Dies kann beispielsweise nach Schweißvorgängen erforderlich sein.

Die chemische Anlagerung von Wasserstoff im Metallgefüge kann zur Bildung von Metallhydrid führen und lässt sich technisch als Möglichkeit zur drucklosen Wasserstoffspeicherung nutzen (vgl. Abschn. 3.2.3).

1.3 Aktuelle Einsatzfelder und Mengengerüste

In Deutschland wird Wasserstoff mit einem Energieäquivalent von 57 TWh hergestellt⁵⁾ [1, 17]. Das entspricht 19 Mrd. m³ oder 1,7 Mio. t. Mit Anteilen von 45 bzw. 33 % sind Erdöl und Erdgas die wichtigsten Ausgangsmaterialien. Kohle folgt mit 15 %. Aus Strom werden lediglich 7 % des Wasserstoffs produziert⁶⁾. Das wichtigste Herstellungsverfahren ist mit 32 % der hergestellten Mengen die Dampfreformierung.

Anmerkung der Autoren: In der von deutschsprachigen Autoren [18–22] vielfach zitierten Veröffentlichung *Wasserstoff – Der neue Energieträger* des Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verbands [23] liegt die Wasserstoffproduktion im globalen Maßstab bei 600 Mrd. m³ bzw. 54 Mio. t. Diese Angaben müssen jedoch als veraltet gelten, selbst wenn es sich um die Nutzung von reinem Wasserstoff und nicht auch daraus hergestellten Sekundärprodukten wie u. a. Methanol und wasserstoffhaltigen Gasmischungen handelt⁷⁾. Die Internationale Energieagentur gibt in ihrem Report *The Future of Hydrogen* [9] für 2018 eine Produktion von ca. 1600 Mrd. m³ oder 144 Mio. t an. Dieser Produktionsmen-

5) Angabe für 2019.

6) Primärprodukt der Chlor-Alkali-Elektrolyse ist Chlor. Wasserstoff wird als Nebenprodukt betrachtet.

7) Laut IEA-Studie *The Future of Hydrogen* (2019) lag der globale Bedarf an reinem Wasserstoff im Jahre 2005 in der Größenordnung von 54 Mio. t.

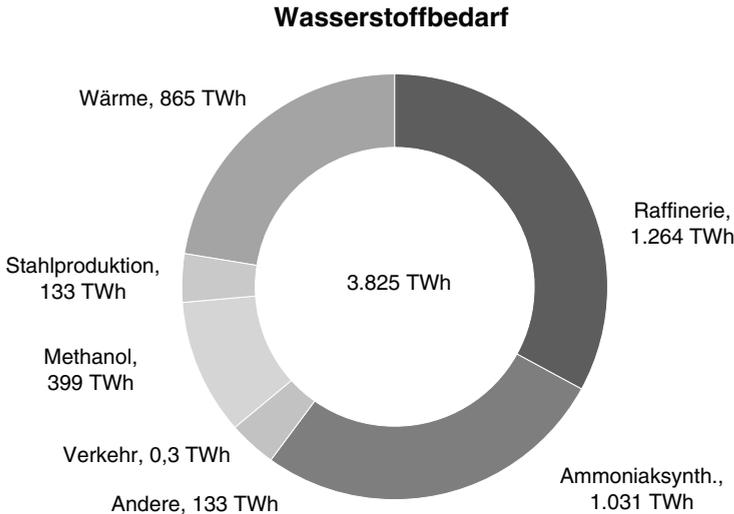


Abb. 1.1 Weltweiter Wasserstoffbedarf (2018); Daten: [9, 43] (© Ing-Büro Synwoldt).

ge werden Bedarfe von 115 Mio. t gegenübergestellt, davon 38 Mio. t in Erdölraffinerien und 31 Mio. t für die Ammoniaksynthese. Die Differenz von knapp 30 Mio. t wird als Verlust bei der Herstellung ausgewiesen (vgl. Abb. 1.1). Der größte Anteil hiervon resultiert aus dem Bereitstellen von Prozesswärme für die Wasserstoffproduktion.

Derzeit steht die stoffliche Nutzung von Wasserstoff im Vordergrund. Das wichtigste Einsatzfeld ist die Mineralölverarbeitung. Sie ist für 40 % des Wasserstoffbedarfs in Deutschland verantwortlich. Im Raffinerieprozess wird gleichzeitig eine große Menge Wasserstoff freigesetzt, die den Wasserstoffbedarf der Raffinerien zu 78 % decken kann. Die restlichen Bedarfe der Raffinerien werden durch Dampfreformierung von Erdgas bereitgestellt [24]. Große Raffineriestandorte benötigen jährlich 100 000–200 000 t Wasserstoff [25].

Der zweite annähernd gleich große Einsatzbereich für Wasserstoff ist in Deutschland die Ammoniaksynthese. Ammoniak (NH_3) zählt zu den mengenmäßig wichtigsten Grundstoffchemikalien. Weltweit werden jährlich mehr als 140 Mio. t Ammoniak produziert, davon 2,4 Mio. t in Deutschland [26]. Mehr als drei Viertel des Ammoniaks werden für die Düngemittelproduktion genutzt, der Rest für die Herstellung von Kunstfasern, Gummi und Arzneimitteln. Weitere Anwendungen sind die Herstellung von Sprengstoffen und der Einsatz als Kältemittel in Kühlsystemen bis -33 °C sowie zur Rauchgasreinigung (Entfernen von Stickstoffoxiden⁸⁾: NO , NO_2) von Großfeuerungsanlagen und in SCR⁹⁾-Katalysatoren von Dieselfahrzeugen.

Wasserstoff wird außerdem in der chemischen Industrie, insbesondere auch zur Herstellung von Methanol (CH_4O), das als Grundstoff für Ethansäure ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$), Formaldehyd (CH_2O) und weitere organische Substanzen dient, genutzt. Nischenanwendungen sind außerdem die Verwendung als inertes Schutzgas in der Lebensmittel-, Glas- und Metall-

8) Distickstoffmonoxid (N_2O) entsteht durch die bakterielle und anthropogene Nitrifikation von Biomassen. Anthropogene Ursache sind der Einsatz von Düngemitteln und die Verbrennung von Biomassen.

9) Selektive katalytische Reduktion (*selective catalytical reduction*, SCR); durch Zugabe von Harnstoff ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) oder Ammoniak (NH_3). Harnstoff ist gegenüber Ammoniak einfacher in der Handhabung und ungiftig, muss für die Reduktion jedoch zunächst in Ammoniak umgewandelt werden.

industrie, ebenso beim Schweißen. Bei der Herstellung von hochreinem Silicium für die Elektronik- und Solarindustrie wird ein chemischer Umwandlungs- und Abscheideprozess über Trichlorsilan (SiHCl_3) und Monosilan (SiH_4) genutzt (vgl. auch Abschn. 3.2.7).

Aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität ($c_{p,\text{H}_2} = 14,3 \text{ kJ/kg K}$; $c_{p,\text{Luft}} = 1,0 \text{ kJ/kg K}$) kommt Wasserstoff bereits seit Jahrzehnten in Großkraftwerken zur Kühlung der Generatoren zum Einsatz [27]. Bei Maschinensätzen ab 100 MVA werden die Wicklungen mit komprimiertem Wasserstoff gekühlt und so eine höhere Strombelastbarkeit erzielt [28].

1.4 Künftige Rolle in einem Energiesystem

1.4.1 Energieversorgung 2020

Bevor auf die besondere Rolle von Wasserstoff in einem zukünftigen Energiesystem eingegangen wird, sei der Blick zunächst auf das bestehende Energiesystem gelenkt. Auch wenn Strom in nahezu allen Lebens- und Wirtschaftsbereichen eine herausragende Bedeutung hat, macht der Anteil des Stromverbrauchs am gesamten Energiebedarf nur einen kleinen Teil aus. Aus dem Primärenergiebedarf von Deutschland (2020) in Höhe von 3305 TWh werden 2317 TWh Endenergie¹⁰⁾ bereitgestellt. Die Differenz von 988 TWh zwischen Primär- und Endenergie beruht im Wesentlichen auf Umwandlungsverlusten und dem Eigenverbrauch im Energiesektor (689 TWh). Vom Endenergiebedarf entfallen lediglich 485 TWh oder 21 % auf den inländischen Stromverbrauch (Abb. 1.2; [6, 11, 29]).

Mehr als Stein- und Braunkohle tragen Erdöl und Erdgas zum Decken des verbleibenden Energiebedarfs bei. Allein Erdöl und Erdgas machen mehr als 60 % des Endenergiebedarfs aus, Stein- und Braunkohlen kaum 5 %¹¹⁾. Die verbleibenden 15 % werden überwie-

Endenergiebedarf in Deutschland (2020)

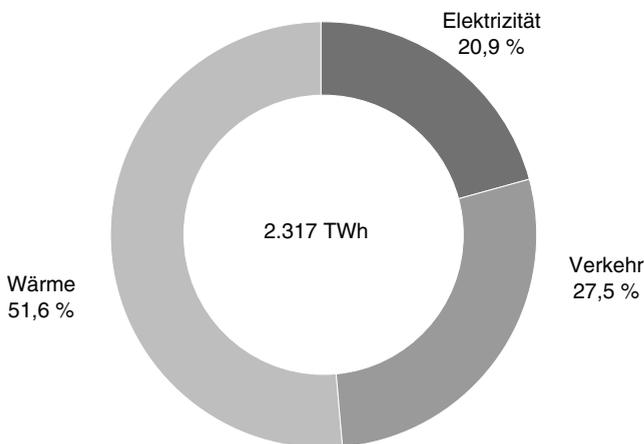


Abb. 1.2 Endenergiebedarf nach Verbrauchssektoren; Daten: [6].

10) Durch den pandemiebedingten Lockdown lag der Endenergiebedarf in 2020 ca. 10 % unter dem von 2019.

11) Vergleiche Abb. 3.3 mit Angaben zum globalen Bedarf an Primärenergieträgern.

gend durch regenerative Energieträger, darunter biogene Brenn- und Kraftstoffe sowie Solarthermie und Geothermie, bereitgestellt. Mit anderen Worten: Während rund die Hälfte des inländischen Stromverbrauchs bereits durch regenerative Technologien erzeugt wird, sind dies im Wärmesektor nur 15 % und im Bereich Mobilität gerade einmal 7 %. Hier dominieren Brenn- und Kraftstoffe auf der Basis von Erdöl und Erdgas.

1.4.2 Energiedichte und Flächeneffizienz

Um eine weitreichende Dekarbonisierung des Energiesystems bis 2050 zu erreichen, ist eine umfassende Abkehr von fossilen Brennstoffen erforderlich. Dazu sei ins Gedächtnis gerufen, was deren besondere Attraktivität ausmacht: die hohe Energiedichte. Ein kleines Volumen bzw. eine kleine Masse des jeweiligen Energieträgers (Kohle, Erdöl, Erdgas) stellt eine vergleichsweise große Energiemenge dar. Damit muss für dieselbe Wärmelieferung nur etwa halb so viel Kohle transportiert werden, wie es bei Holz der Fall wäre. Die hohe Energiedichte von Steinkohle, Erdöl und Erdgas erlaubt den weltweiten Handel und Transport. Braunkohle wird nur am Ort der Grubenstandorte eingesetzt. Der Transport und die Handhabung flüssiger und gasförmiger Energieträger sind zudem weniger aufwendig als bei Feststoffen.

Ist Kernenergie emissionsfrei?

Die auf eine Masseinheit bezogene Energiemenge ist bei Uran noch wesentlich höher als bei Kohle und Erdöl. Dennoch unterscheidet sich die Art der Nutzung fossiler und nuklearer Energieträger deutlich.

Fossile Energieträger verbrennen bis auf geringe Rückstände (Staub, Ruß, Asche) zu Gasen, die durch einen Kamin oder Auspuff entweichen und damit am Ort der Nutzung – bezogen auf die eingesetzten Brennstoffmengen – kaum Abfall hinterlassen. Dies macht die Handhabung in Heizungsanlagen, Kraftwerken und Motoren sehr bequem. Eine Folge dieser Bequemlichkeit ist jedoch die steigende Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Jährlich werden derzeit 35–40 Mrd. t Kohlenstoffdioxid (CO₂) emittiert.

Anders sieht es bei Kernkraftwerken aus: Hier werden nur wenige Prozent der Uranmasse **abgebrannt**. Danach muss das verbliebene, weiterhin hochradioaktive Uran dem Reaktor entnommen und einer Wiederaufbereitung zugeführt werden. Anders als der Name **Wiederaufbereitungsprozess** vermuten lässt, können nur ca. 20 % der Rückstände weitergenutzt werden. Neben der komplizierten Handhabung entstehen große Mengen an toxischen und radioaktiven Abfällen. Hinzu kommt, dass die gesamte Vorkette, der Bau von Kraftwerksgebäuden (Stahl, Beton) und -infrastrukturen (Stahl, Kupfer), vor allem aber der Uranbergbau und die Herstellung der Brennstäbe mit hohem Energieaufwand verbunden sind. Der Energieaufwand der Vorkette führt, bei zunehmend aufwendigerem Erzabbau, zu immer niedrigeren Nettoerträgen (Erntefaktor aktuell ca. drei, [30]). Somit ist auch die Kernenergie keineswegs CO₂-neutral.

Anhand dieser Ausführungen wird bereits eine wesentliche Randbedingung für die Systemtransformation zu regenerativen Energien deutlich. Bei einer brennstoffbasierten Versorgung geht es vorrangig um den Verbrauch eines Gutes. Regenerative Systeme basieren dagegen auf dem Konzept der Ernte.

Analog zu land- und forstwirtschaftlichen Systemen wird eine Fläche – möglichst nachhaltig, d. h. dauerhaft – für das Erzielen von Erträgen genutzt. Dies gilt für alle Formen regenerativer Systeme, auch wenn dies auf den ersten Blick nicht immer sichtbar ist. Beispielsweise werden Wasserkraftanlagen häufig in Dämme oder Staumauern integriert, sodass sie optisch kaum wahrnehmbar sind. Dennoch sind die Wassermassen, die die Turbinen antreiben, das Resultat aus dem Abfluss eines ausgedehnten Einzugsgebiets. Andere wichtige Technologien wie Freiflächen-Photovoltaik und Windenergieanlagen sind deutlich sichtbar, ebenso wie land- und forstwirtschaftlicher Anbau. Da sich Flächen¹²⁾ nicht vermehren lassen und somit prinzipiell immer Nutzungskonkurrenzen vorliegen, ist die Flächeneffizienz bei der Energieernte ein wesentlicher Aspekt. Mehrnutzungskonzepte wie die Agri-Photovoltaik, eine Flächennutzung in mehreren übereinander liegenden Ebenen (Photovoltaik und Landwirtschaft) kommt damit eine wesentliche Bedeutung zu.

Flächenbedarf, Flächeneffizienz

Die solare Einstrahlung ist global und auch in Deutschland die wichtigste Energiequelle. Solarzellen setzen 20 % und mehr der Strahlung direkt in Strom um, Pflanzen selten mehr als 1 % in Kohlenhydrate. Zudem sind für Anbau, Ernte und Verarbeitung der Substrate weitere Energieaufwände erforderlich, sodass die Nettoerträge weiter schrumpfen. Verglichen mit einer PV-Freiflächenanlage fallen die Energieerträge (elektrische Energie) bei nachwachsenden Rohstoffen um den Faktor 100 geringer aus. Anbausysteme und Verwertungspfade führen zu einer gewissen Streuung, können die Größenordnungen jedoch nicht nennenswert verschieben.

Auch Windenergieanlagen weisen einen Flächenbedarf auf, der über die eigentliche Stand- und Fundamentfläche weit hinausgeht. Aus aerodynamischen Gründen müssen die Rotoren mit großen Abständen zueinander platziert werden. Zwar kann die Fläche zwischen den Anlagenstandorten für andere Zwecke genutzt werden, nicht jedoch für eine weitere Windernte. Bei Windenergieanlagen liegt die auf die Fläche des Windparks bezogene Energieernte um etwa den Faktor zwei bis drei niedriger als bei Freiflächen-Photovoltaik [30].

Neben der Flächeneffizienz existieren für verschiedene regenerative Technologien weitere technische Randbedingungen:

- Solarthermie und Geothermie (oberflächennah) eignen sich insbesondere für Niedertemperaturwärmeanwendungen. Durch Wärmepumpen lässt sich der Einsatzbereich der Erdwärme erweitern.
- Durch Tiefe Geothermie mit Horizonten von mehr als 2500–3000 m Bohrtiefe wird ein Temperaturniveau von mehr als 100 °C erreicht. Damit lassen sich Bedarfe im Bereich der gewerblichen Prozesswärme decken und bei > 150 °C auch Dampfturbinenprozesse zur Stromproduktion betreiben.
- Andere Prozesse in der chemischen Industrie und Metallindustrie benötigen ein deutlich höheres Temperaturniveau. Entsprechend wird gerade im Hochtemperaturbereich zur CO₂-Vermeidung künftig weit mehr Wärme aus Stromheizungen eingesetzt werden (in der Metallverarbeitung ist dies seit Jahrzehnten der Fall).

12) Engl. *real estate*, wahrer Wert.

- Auch im Bereich Mobilität sind im Bereich Bahnen, aber auch bei Bussen und zunehmend im Individualverkehr elektrische Antriebe im Einsatz.
- Die Potenziale von Anbaubiomassen sind aus den eingangs erwähnten Flächenkonkurrenzen und der geringen Flächeneffizienz begrenzt.
- Die Wasserkraft, als älteste regenerative Energiequelle, ist stark von der Topographie abhängig und besitzt in Deutschland ebenfalls nur geringe Zubaupotenziale.

1.4.3 Energieversorgung 20xx

Ein wesentlicher Transformationspfad zur Vermeidung von CO₂-Emissionen wird der Einsatz von regenerativem Strom in den beiden großen Verbrauchssektoren Wärme/Kälte und Mobilität sein. Mit den oben aufgeführten Restriktionen und unter Berücksichtigung der Flächeneffizienz sind die Eckpfeiler für ein im Wesentlichen strombasiertes System skizziert.

Photovoltaik und Windenergie werden die Hauptsäulen dieser künftigen Energieversorgung bilden. Andere Stromerzeuger wie Biomasseanlagen¹³⁾ und Wasserkraft werden bedarfsgerecht dann Strom erzeugen, wenn die fluktuierende Erzeugung aus Photovoltaik und Windenergie den Bedarf temporär nicht decken kann. Ein Grundlastbetrieb von Biomasseanlagen, wie heute noch weit verbreitet, ist aufgrund der Speicherfähigkeit von Biogas oder holzartigen Biomassen unbedingt zu vermeiden. Auch verbraucherseitig sind Flexibilitätsoptionen gezielt aufzubauen, um Phasen hoher Stromerzeugung effizient zu nutzen. Dazu zählen beispielsweise das gezielte Aufheizen eines Warmwassertanks oder der temporäre Betrieb von Prozessen mit höherem Produktausstoß.

Im Rahmen des Ausgleichs von Über- und Unterdeckung spielen sowohl die Herstellung von Wasserstoff (bei Überdeckung) wie auch die Nutzung (bei Unterdeckung) eine technisch herausragende Rolle¹⁴⁾. Neben der heute vornehmlich stofflichen Nutzung kommt Wasserstoff und den darauf basierenden synthetischen Energieträgern künftig damit auch die Rolle eines Sekundärenergieträgers zu. Wasserstoff und die daraus abgeleiteten Stoffe sind Energiespeicher. Sie entkoppeln in zeitlicher Weise die Erzeugung des Energieträgers von deren Nutzung. Dabei spielen die Speicherfähigkeit und die Infrastrukturen zur Verteilung der Energieträger eine ebenso wichtige Rolle wie die Technologien zur Nutzung der jeweiligen Sekundärenergieträger.

Die möglichen Nutzungspfade für Wasserstoff decken dabei sämtliche großen Verbrauchssektoren, aber auch die Grundstoffindustrie ab. Die folgende Zusammenstellung soll nur einen ersten Eindruck über die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten vermitteln:

- Stromerzeugung z. B. über Brennstoffzellen mit Wasserstoff oder über Gasturbinen mit Wasserstoff und synthetischen Brennstoffen,
- Mobilität durch z. B. Brennstoffzellen mit Wasserstoff oder über Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen,

13) Aus Effizienzgründen sind die begrenzten Biomasseressourcen immer in einer Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zu nutzen. Dasselbe gilt auch für den Einsatz von Wasserstoff und daraus abgeleiteten Brennstoffen.

14) Die Logik zu einer wechselseitigen Erzeugung und Nutzung basiert auf dem Primat der Effizienz, das eine mehrfache Energiewandlung möglichst vermeidet. Dieses Vorgehensmodell widerspricht damit Annahmen von Anlagenlaufzeiten im Bereich > 5000 h/a. Andere Randbedingungen treten bei einer Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie [1] mit hohen Importquoten für Wasserstoff ein.

- Wärmeerzeugung z. B. über die Restwärme aus Brennstoffzellen mit Wasserstoff oder über Heizungsanlagen mit Wasserstoff und synthetischen Brennstoffen,
- synthetische Kohlenwasserstoffe auf Basis der Methan-, Methanol- und Fischer-Tropsch-Synthese für die energetische und stoffliche Nutzung,
- Ammoniaksynthese als Ausgangspunkt für Dünger und Kunststoffe,
- Wasserstoff als Reduktionsmittel in der Stahlindustrie.

Power to X

Im Bereich der Wasserstoffnutzung hat sich eine Reihe von Neologismen entwickelt. Gemeinsam ist den Abkürzungen das Präfix Pt (*power to ...*)

PtG (*power to gas*)¹⁵⁾

Umgangssprachlich auch als Windgas oder Solargas bezeichnet. Hiermit werden Wasserstoff (H_2) oder ein daraus abgeleiteter anderer gasförmiger Sekundärenergieträger wie beispielweise synthetisches¹⁶⁾ Methan (CH_4) bezeichnet.

PtL (*power to liquid*), PtF (*power to fuel*)

Auf der Basis von Elektrolysewasserstoff hergestellte flüssige Energieträger wie Methanol (CH_4O) sowie über weitere Prozessschritte (Fischer-Tropsch-Synthese, Raffinierung) erzeugte synthetische Brenn- und Kraftstoffe.

PtC (*power to chemicals*)

Durch Elektrolyse bereitgestellter Wasserstoff für die stoffliche Nutzung in der chemischen Industrie, z. B. für die Ammoniaksynthese.

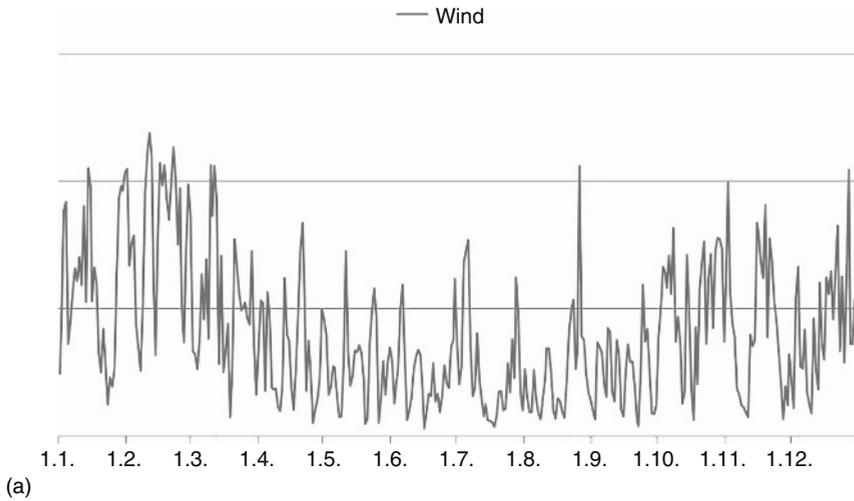
Neben den hier beispielhaft aufgeführten Nutzungsszenarien ergibt sich noch ein weiterer Aspekt im Kontext der Wasserstofferzeugung. Damit Wasserstoff und synthetische Brennstoffe zum Zeitpunkt der Nutzung auch vorrätig sind, müssen die Sekundärenergieträger zuvor erzeugt werden. Das klingt zunächst banal, hat jedoch weitreichende Konsequenzen. Denn es muss dafür Zeitintervalle mit einem hinreichenden Überangebot (zeitlich und mengenmäßig) an Strom geben, um die Sekundärenergieträger zu produzieren. Dieser Umstand kommt einem Versorgungssystem, das überwiegend auf fluktuierenden regenerativen Energien wie Photovoltaik und Wind basiert, durchaus entgegen. Ein weiteres Detail wird in Abb. 1.4 vertieft: der physikalische Wirkungsgrad von Umwandlungsprozessen. Da gemäß dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik Wirkungsgrade immer $\leq 100\%$ sind, ist für die Bereitstellung eines Sekundärenergieträgers regelmäßig mehr Primärenergie aufzuwenden, als der Sekundärenergieträger bereitstellen kann. Das Prinzip gilt ebenso für den Betrieb von Speichern.

Die weiter oben vorgestellten Überlegungen zeichnen das Bild für die künftige, auf erneuerbaren Energien basierende Stromversorgung. Solar- und Windenergie werden dabei die tragenden Säulen sein. Wie Abb. 1.3 zeigt, weisen die beiden Ressourcen in Deutschland ein komplementäres Erzeugungsprofil auf. Während die Solareinstrahlung in den Sommer-

¹⁵⁾ Vergleiche auch Infobox Kohlenstoffquelle in Abschn. 3.2.6.

¹⁶⁾ Der Begriff **synthetisch** wird hier in Abgrenzung zur heute überwiegenden Nutzung fossiler Energieträger verwendet.

Saisonales Erzeugungprofil



Saisonales Erzeugungprofil

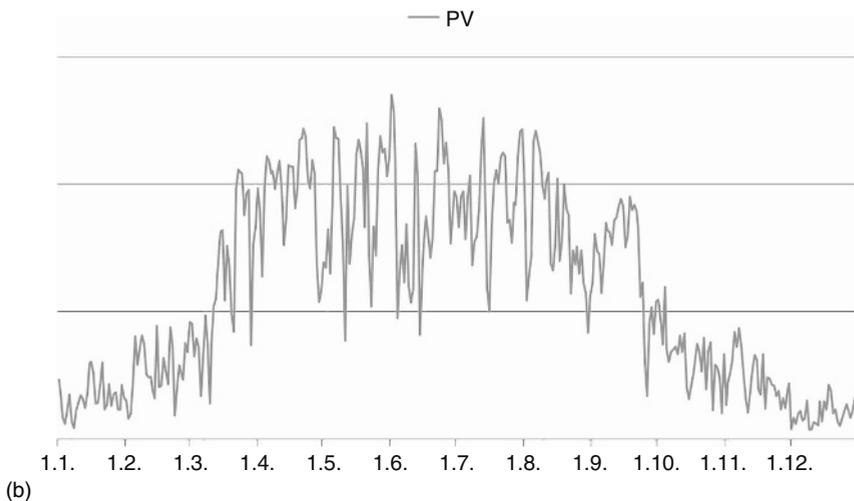


Abb. 1.3 Saisonale Erzeugungprofile von (a) PV und (b) Windenergie (2020); Daten: [32–35], Daten für Deutschland.

monaten für eine deutlich höhere Stromerzeugung sorgt, verhält sich das Windaufkommen in den Wintermonaten spiegelbildlich dazu. Betrachtungen des Deutschen Wetterdienstes und der Universität Frankfurt [31] zeigen für Deutschland und Europa eine vergleichbare Charakteristik.

Ein Energiemix, der sich an den erzeugten Strommengen – nicht an der installierten Leistung – orientiert, trägt damit wesentlich zu einer Verstetigung der Stromerzeugung bei. Dennoch sind kurzfristige, wetterbedingte Fluktuationen unmittelbar aus den Erzeugungprofilen abzulesen.

Damit sich zu jedem Zeitpunkt die Summe aller Ein- und Ausspeisungen ins Stromnetz die Waage halten, sind erzeuger- wie auch bedarfsseitige Flexibilitätsoptionen vorzusehen. Dies geht deutlich über die derzeitigen Instrumente der Regelleistung hinaus, da es Zeiträume von Stunden oder Tagen mit einer Über- oder Unterdeckung geben wird. Als besonders ungünstig stellt sich eine längere Periode der **Dunkelflaute** dar, d. h., wenn sowohl das Windaufkommen wie auch die solare Einstrahlung niedrig sind.

Regelleistung

Der Fahrplanbetrieb von Kraftwerken wird durch eine Prognose vom Vortag bestimmt. Treten im laufenden Betrieb erzeuger- oder bedarfsseitige Prognoseabweichungen auf, kann durch positive und negative **Regelleistung** die Prognoseabweichung ausgeglichen werden. Bei Erzeugern auf der Basis von Wind- und Solarenergie kann es sich auch um Abweichungen von der Wetterprognose handeln, nicht jedoch um den fluktuierenden Charakter allgemein.

Um auf Abweichungen reagieren zu können, müssen entsprechende Leistungen kurzfristig abrufbar (positive Regelleistung) oder einsenkbar (negative Regelleistung) sein. Spiegelbildlich gilt dasselbe für flexible Lasten.

Dabei wird in Abhängigkeit vom zeitlichen Verhalten zwischen FCR (*frequency containment reserve*; früher Primärregelleistung), sowie aFRR (*automatic frequency restoration reserve*; früher Sekundärregelleistung) und mFRR (*manual frequency restoration reserve*; früher Minutenregelleistung) unterschieden.

Regelleistung wird in einem Zeitbereich bis zu 1 h eingesetzt, darüber hinaus werden Strommengen innerhalb eines Tages (*intraday*) gehandelt.

Anhand eines groben Überschlages werden die Dimensionen von Energiespeichern in einem vollständig regenerativen Stromversorgungssystem deutlich. Derzeit (2020) liegt der tägliche Strombedarf in Deutschland bei rund 1,5 TWh. Eine beispielsweise 20 %-ige Über- oder Unterdeckung stellt eine Energiemenge von 300 GWh/d dar.

Anstelle hier reflexartig die Frage nach Batteriespeichern zu stellen, soll an die Flexibilitätsoptionen erinnert werden. Darunter lassen sich technische Einrichtungen zusammenfassen, die eine zeitliche Entkopplung von Energiebedarfen für das **Herstellen** eines Produktes oder einer Dienstleistung und das **Nutzen** dieser Produkte oder Dienstleistungen ermöglichen. Analog zur Bereitstellung von Regelleistung wird von positiver und negativer Flexibilität gesprochen. Ersteres entspricht einer Leistungsreduzierung von elektrischen Lasten, Zweiteres der Erhöhung.

Die im Folgenden benannten Beispiele sind zudem exemplarisch für eine **Sektorenkopplung**, das Verbinden der großen Energiebereiche Elektrizität, Wärme und Mobilität. Auch die strombasierte Herstellung von Wasserstoff sowie dessen Einsatz für Mobilitäts- oder Wärmezwecke und die Rückverstromung stellen eine Sektorenkopplung dar:

- **Wärmeerzeugung und temporäre Speicherung**
Thermische Energie kann, je nach Temperaturniveau, in großen Wassertanks oder mit Steinen oder Beton gefüllten Behältern (z. B. Cowper) gespeichert werden. Analoges gilt für die Kälteerzeugung und die Nutzung von Speichermassen.

Während Kälte in der Regel mit Kompressionsmaschinen und Strom erzeugt wird, überwiegt bei der Wärmeerzeugung der Einsatz von fossilen Brennstoffen. Zur Substitution der Brennstoffe werden bei der Erzeugung von Niedertemperaturwärme strombetriebene Wärmepumpen eine zunehmende Rolle spielen. Hochtemperaturwärme lässt sich direkt aus Strom gewinnen (u. a. Lichtbogen- und Induktionsofen, Plasmabrenner). Andere Wärmeerzeuger mit geringen CO₂-Emissionen verfügen nur über begrenzte Mengen- oder Nutzungspotenziale (vgl. Abschn. 1.4.2).

- **Reinigung/Demineralisierung/Entsalzung von Wasser und Abwasser**
Dies betrifft sowohl die Reinigung von Trinkwasser wie auch den Betrieb von Abwasserbehandlungsanlagen. Abwasserbehandlungsanlagen sind in der Regel die größten kommunalen Stromverbraucher.
Weitere Beispiele sind Hochbehälter im Trinkwassernetz oder Behälter mit entsalztem Meerwasser.
- **Laden von Elektrofahrzeugen**
Privat genutzte Fahrzeuge werden durchschnittlich nur 1 h täglich genutzt. Auch gewerblich und öffentlich eingesetzte Fahrzeugflotten verweilen in der Regel viele Stunden an ihren Stützpunkten [36].
Eine Dekarbonisierung des Verkehrssektors kommt im Wesentlichen durch die Nutzung von Strom – direkt für batterieelektrische Fahrzeuge, indirekt über Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe – zustande. Die Mengengerüste für biogene Kraftstoffe sind, wie in Abschn. 1.4.2 beschrieben, begrenzt.
- **Produzieren von energieintensiven Gütern**
Dies betrifft insbesondere die Grundstoffindustrie, bei der es sich um die größten industriellen Stromverbraucher handelt. In vielen Fällen ist der Einsatz weiterer Brennstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas) für die Prozesse erforderlich und übertrifft noch den Strombedarf. Im Zuge einer Dekarbonisierung wird eine Substitution durch zusätzliche Strommengen, direkt oder indirekt über synthetische Brennstoffe erforderlich.
- **Produzieren von Sekundärenergieträgern, synthetischen Brennstoffen**
Hierzu zählt insbesondere Wasserstoff, da Wasserstoff sowohl direkt in Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren eingesetzt werden kann als auch die Basis für die Herstellung synthetischer Brenn- und Kraftstoffe (Kohlenwasserstoffe) ist.

Die hier beispielhaft vorgestellten Maßnahmen zur Flexibilisierung des Strombedarfs sind aus technischer Sicht bereits heute realisierbar [37]. Bei der Betrachtung der einzelnen Maßnahmen steht die Netzdienlichkeit für eine zu jedem Zeitpunkt ausgeglichene Bilanz bei Stromerzeugung und Strombedarf im Vordergrund. Maßgeblich für das mögliche Reagieren auf Fluktuationen sind technische und wirtschaftliche Faktoren wie:

- **Zeitliche Horizonte**
Dazu zählen die Dauer für das Verschieben von Bedarfen und deren Dynamik wie die Geschwindigkeit von Leistungsänderungen.
- **Maximal bereitgestellte Leistung und zeitlich verschobene Wirkarbeit.**
- **Wirkungsgrade von Umwandlungsketten und Speicherverluste**
- **Tatsächliche Auslastung von Anlagen**
Wenn Anlagen dauerhaft an ihrer oberen Leistungsgrenze betrieben werden, ist ein temporäres Absenken oder Erhöhen der Leistung nicht möglich.

- Mögliche Einsatzstrategien
Das Bereitstellen einer maximalen positiven oder maximalen negativen Flexibilität.
- Betriebliche Aspekte
Erforderliche Investition in zusätzliche Erzeugerleistung und Speicherkapazitäten sowie die betriebliche Organisation von Arbeitsabläufen.
- Märkte für das Anbieten von Flexibilitätsoptionen [38–40]
Anreize und bzw. Vergütung für das Bereitstellen von Flexibilität.
- Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen
Die Strombezugskosten enthalten eine Leistungskomponente der Netznutzungsentgelte. Im Fall eines netzdienlichen temporären Abrufs von höheren Leistungen erhöhen sich die Strombezugskosten über die gesamte Abrechnungsperiode. Durch diese Regelung wird Flexibilität wirtschaftlich bestraft.

Abschaltbare Lasten

Aktuell (2021) existiert mit der *Verordnung zu abschaltbaren Lasten* (AbLaV) lediglich für abschaltbare Lasten eine wöchentliche Ausschreibung. Dabei wird zwischen sofort und schnell abschaltbaren Lasten mit einer Gesamtleistung von jeweils 750 MW differenziert. Die Mindestleistung zur Teilnahme beträgt seit 2017 5 MW (Verordnungsermächtigung gemäß § 13i EnWG).

Da der Markt auf der Übertragungsebene organisiert ist, muss ein Einsatz von Lasten, die auf der Verteilnetzebene angeschlossen sind, mit dem jeweiligen Verteilnetzbetreiber abgestimmt werden. Die Vergütung für die Anbieter abschaltbarer Lasten wird als mit den Netznutzungsentgelten verbundene Umlage (AbLaV-Umlage) auf die Endverbraucher umgelegt.

Bei der Aufzählung von Flexibilitätsmaßnahmen verschwimmen die Grenzen der Verbrauchssektoren Strom, Wärme/Kälte und Mobilität. Folgerichtig wird die Integration der einzelnen Bereiche als Sektorenkopplung bezeichnet. Der Energieträger Strom – aus erneuerbaren Energien! – erfährt hierdurch eine zunehmende Bedeutung für die Versorgung (vgl. Abb. 1.2), denn eine Dekarbonisierung der Wärme- und Kältebedarfe sowie im Mobilitätssektor macht die weitgehende Abkehr von Brennstoffen erforderlich. Da, wo dies nicht möglich erscheint, werden grüner Wasserstoff oder darauf basierende synthetische Energieträger die Rolle von Erdöl, Erdgas und daraus hergestellten Brennstoffen einnehmen.

Die Sektorenkopplung ist darüber hinaus ein Schlüsselfaktor, um bei fluktuierender Stromerzeugung und ebenso fluktuierendem Strombedarf die Balance zu halten. Leistungsfähige Wasserstoffherzeuger tragen dabei ebenso zu einem stromnetzdienlichen Betrieb als Verbraucher bei wie Brennstoffzellen oder gegebenenfalls Gasturbinen als flexible Stromerzeuger. Die verbraucherseitige Steuerung von Lasten im Stromnetz (*demand side management*) erfordert eine präzise Ausrichtung an der jeweiligen regionalen Stromerzeugung und den Netzressourcen und darf keinesfalls allein als marktliche Maßnahme wie eine Strompreisampel verstanden werden. Diese würden im gesamten Marktbereich (Deutschland, unter Umständen inklusive angrenzender Märkte) einheitlich gelten – unabhängig vom Ort der tatsächlichen Über- oder Untererzeugung. Die Folge wäre ein

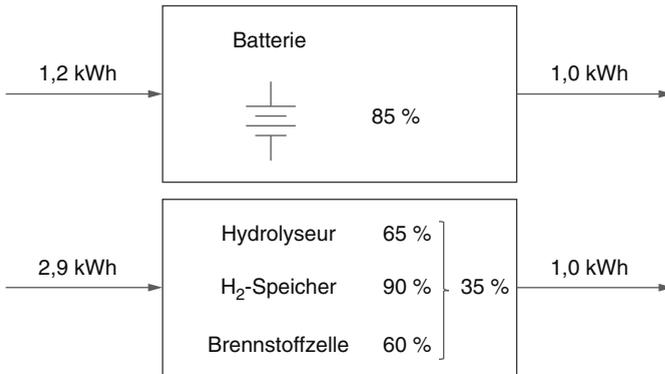


Abb. 1.4 Auswirkung des Speicherwirkungsgrads auf den Primärenergiebedarf (© Ing-Büro Synwoldt).

weitaus intensiveres Engpassmanagement im Netzbetrieb, als dies heute der Fall ist. Bereits in der dena-Verteilnetzstudie [41] aus dem Jahre 2012 wurde die Abhängigkeit von Netzausbaumaßnahmen u. a. in Abhängigkeit vom Betriebsmodus von Speichern festgestellt. Während ein netzgetriebener Einsatz von Speichern den Ausbaubedarf der Stromnetze um ca. 17 % reduziert, führt ein marktgetriebener Einsatz zu 35 % höheren Investitionen in den Netzausbau. Auch wenn in der dena-Verteilnetzstudie explizit Speicher betrachtet wurden, so lässt sich die Aussage durchaus auch auf andere Flexibilitätsoptionen, insbesondere flexible Verbraucher wie Hydrolyseure, übertragen.

Die de facto universelle Nutzbarkeit von Wasserstoff sollte jedoch nicht dazu (ver-)führen, hier eine ebenso universelle Antwort auf alle Fragen einer CO₂-neutralen Energieversorgung und Wirtschaft zu finden. Die Tatsache, dass es sich bei Wasserstoff um einen Sekundärenergieträger handelt, bedeutet eben auch, dass die Energiemengen zur Wasserstoffherstellung zunächst einmal bereitgestellt werden müssen.

Die Konsequenzen für ein Energieversorgungssystem mit Wasserstoff oder wasserstoffbasierten Speichern werden damit am Beispiel der Stromversorgung deutlich. Welche Strommengen können direkt, d. h. zum Zeitpunkt der Erzeugung genutzt werden und welche Strommengen werden indirekt über einen Speicher geliefert. Für das Aufladen des Speichers ist, entsprechend dem Speicherwirkungsgrad, regelmäßig eine größere Strommenge für das Aufladen erforderlich, als später geliefert werden kann.

Die Rolle des Speicherwirkungsgrads wird sowohl in Gl. (1.1) als auch in Abb. 1.4 deutlich.

$$\eta_{\text{speicher}} = \frac{E_{\text{nutz}}}{E_{\text{zugeführt}}} \quad (1.1)$$

Für eine Beurteilung von Wasserstoff als Energieträger sind bei jedem Herstellungspfad für Wasserstoff und den gegebenenfalls daraus abgeleiteten Energieträgern, wie auch bei jedem Nutzungspfad, die Kette sämtlicher Umwandlungsprozesse zu betrachten und der daraus resultierende Gesamtwirkungsgrad zu ermitteln. Darüber hinaus sind auch Nachhaltigkeitsaspekte wie die Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe und Schadstoffemissionen zu beachten (vgl. Abschn. 2.3).

1.5 Zukünftiger Bedarf an Wasserstoff

Zum Abschluss der Einleitung sei eine Prognose für die Bedeutung von Wasserstoff im künftigen Energie- und Wirtschaftssystem gewagt. In der Studie [43] *Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland* geben die Fraunhofer Institute für System- und Innovationsforschung (FHG-ISI) und für Solare Energiesysteme (FHG-ISE) einen Überblick über die mittel- und langfristigen Wasserstoffbedarfe – und auch über die voraussichtlich in Deutschland installierten Erzeuger. Auffällig ist dabei die deutliche Diskrepanz zwischen Erzeugung und Bedarf im Jahre 2050 (vgl. Tab. 1.2). Bei einer Hydrolyseleistung von 80 GW_{el} mit einem Wirkungsgrad von 65 % und einer durchschnittlichen Auslastung von 4000 Vollbenutzungsstunden pro Jahr käme eine Wasserstoffproduktion von 208 TWh_{th} oder lediglich 26 % des prognostizierten Bedarfs zustande.

Die in Tab. 1.2 genannten Wasserstoffbedarfe beziehen sich dabei sowohl auf die Nachfrage für eine stoffliche Nutzung in der Industrie als auch für energetische Zwecke für den direkten Einsatz zur Stromerzeugung in Brennstoffzellen (Elektrizitätswirtschaft, Verkehr) sowie in Form von synthetischem Methan (CH₄) und flüssigen Kohlenwasserstoffen (u. a. Methanol, CH₄O). In einer Studie von Prognos wird eine noch größere Bandbreite von 110 bis 1200 TWh angegeben [42].

Verbunden mit dem Hinweis, dass der deutsche Energiebedarf etwa um den Faktor zwei höher liegt als der Erwartungswert für einen energiewirtschaftlich geeigneten Ausbau an erneuerbaren Energien [43], wird von großen Energieimporten ausgegangen. Die derzeitige Importabhängigkeit von > 90 % beim Erdgas und > 95 % beim Erdöl [44] wird aus Sicht der Fraunhofer Institute damit beim Wasserstoffimport fortgeschrieben.

Das Öko-Institut trägt in einer Metastudie Annahmen aus zahlreichen Studien für eine Nutzung von Wasserstoff als Sekundärenergieträger im Jahre 2050 zusammen. Die Werte liegen je nach Studienautor und Szenario in einer Bandbreite von 250 bis zu über 900 TWh [45]. Unabhängig von dieser beachtlichen Spannweite sind die Zahlen jedoch immer noch vergleichsweise gering im Vergleich zum derzeitigen (2020) Verbrauch an Erdöl (1101 TWh) und Erdgas (863 TWh) [6].

Die **Nationale Wasserstoffstrategie** der Bundesregierung [1] prognostiziert bis 2030 einen Wasserstoffbedarf von 90 bis 110 TWh. Dem steht eine Hydrolyseleistung von lediglich 5 GW gegenüber. Unter den weiter oben genannten Annahmen läge die Eigenproduktion damit lediglich bei 12–15 % des inländischen Wasserstoffbedarfs. Mit anderen Worten, Wasserstoff wird nach den Plänen der Bundesregierung zum weit überwiegenden Teil importiert werden. Bis 2040 wird „nach Möglichkeit“ von einer Verdoppelung der Hydrolyseleistung ausgegangen. Die so bereitgestellten Wasserstoffmengen würden selbst die derzeitige (2021) stoffliche Nutzung von Wasserstoff in der Industrie nur zu rund 50 % decken. Zusätzliche Bedarfe aus der Energiewirtschaft sowie den Sektoren Wärme und Mobilität sind

Tab. 1.2 Wasserstoff-Roadmap nach FHG ISI/ISE.

| | Mittelfristig bis 2030 | Langfristig bis 2050 |
|-----------|------------------------|----------------------|
| Erzeugung | 1–5 GW | 50–80 GW |
| Bedarf | 4–20 TWh/a | 250–800 TWh/a |

Daten: [43].

nicht berücksichtigt. In begleitenden Informationen [46] der Bundesregierung werden für 2050 Wasserstoffimporte von bis zu 45 Mio. t/a genannt. Diese Summe entspricht 1500 TWh thermischer Energie und liegt damit bei gut drei Viertel des energiebedingten Erdöl- und Erdgasbedarfs von 2020. Eine weitere Zahl verdeutlicht die Dimension aus einem anderen Betrachtungswinkel: Die globale Wasserstoffproduktion in 2018 liegt bei 2300 TWh (ohne Nebenproduktion in Raffinerien) [9].

Der geringe Anteil der inländischen Wasserstoffherzeugung wird mit dem damit einhergehenden zusätzlichen Strombedarf begründet. Zudem existieren u. a. in Südeuropa und Nordafrika Möglichkeiten für eine kostengünstigere Stromerzeugung. Anders formuliert, der Ausbau erneuerbarer Energien für eine CO₂-arme Energieversorgung wird oder soll nicht in Deutschland stattfinden. Ob die Erzeugung importierter Wasserstoffmengen dann jedoch tatsächlich auf erneuerbaren Energien basiert und zur Emissionsminderung beiträgt, bleibt offen. Zudem wird für die Hydrolyse – *nomen est omen* – Wasser benötigt. Die angegebenen Mengen von jährlich bis zu 45 Mio. t Wasserstoff allein für den deutschen Import erfordern eine Wassermenge von rund 400 Mio. m³/a. Die Eignung arider Gebiete stellt dies durchaus infrage. Würde im Sinne einer **großen Lösung** das Aufbereiten von Meerwasser in Erwägung gezogen, so würde der Energieaufwand für die Entsalzung mit Umkehrosmoseanlagen zwar nur zu einer marginalen Erhöhung der Strombedarfe führen¹⁷⁾ – jedoch führen die Abwässer der Entsalzungsanlagen zu stark erhöhten Salzkonzentrationen und Chemikalienbelastungen in der jeweiligen Meeresregion.

Noch ein zweiter Aspekt bereitet Anlass zum Nachdenken und auch Nachrechnen. Große Hydrolyseure benötigen nicht nur entsprechende Mengen Strom für die Wasserstoffproduktion, sie zählen auch zu den flexiblen Lasten. Komplementär zu fluktuierenden Quellen wie Photovoltaik und Windenergie wird so ein Ausgleich zwischen Strombedarf und -erzeugung sichergestellt. Analoges gilt für die Rückverstromung mit Brennstoffzellen. Damit gilt auch der Umkehrschluss zum geringen Ausbau der Hydrolyseleistung aufgrund eines Mangels an Strom aus erneuerbaren Energien. Ohne hinreichende Flexibilitätsoptionen im Stromnetz ist ein Ausbau fluktuierender erneuerbarer Energien nur begrenzt zweckmäßig, da ab einem gewissen Punkt des Ausbaus immer größere temporäre Erzeugungüberschüsse auftreten. Ohne flexible Lasten müssen diese Strommengen aberegelt werden (Einspeisemanagement). Abgeregelte Strommengen erhöhen jedoch künstlich die Kosten der Stromerzeugung aus Photovoltaik- und Windenergieanlagen – ganz gleich, ob es sich dabei um eine Kompensation nach § 14 EEG i. V. m. § 13ff EnWG handelt, oder die Anlagenbetreiber entsprechende Mindermengen bei ihrer Kostenkalkulation für die Teilnahme an Auktionen zur wettbewerblichen Ermittlung des anzulegenden Wertes berücksichtigen.

17) Eigene Kalkulation: 0,1 % bezogen auf den Energieaufwand der Elektrolyse.

Literaturnachweis

- 1 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020). Nationales Reformprogramm 2020 – Die Nationale Wasserstoffstrategie. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20.
- 2 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021). Zeitreihen Erneuerbare Energien. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 3 Nitsch, J. und Fishedick, M. (2002). Eine vollständig regenerative Energieversorgung mit Wasserstoff – Illusion oder realistische Perspektive? Konferenzbeitrag, Wasserstofftag Essen, Stuttgart, Wuppertal.
- 4 Ramesoh, S., Fishedick, M., Arnold, K. et al. (2006). Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Einführung alternativer Kraftstoffe, insbesondere regenerativ erzeugten Wasserstoffs. Dessau: Umweltbundesamt (UBA).
- 5 Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (2021). Gasspeicher in Deutschland. <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/gasspeicher-deutschland>. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 6 Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2021). Energieverbrauch in Deutschland: Daten für das 1. bis 4. Quartal 2020. https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=quartalsbericht_q4_2020.pdf. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 7 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2016). Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 8 Binder, H.H. (1999). Lexikon der chemischen Elemente: Das Periodensystem in Fakten, Zahlen und Daten; mit vielen tabellarischen Zusammenstellungen. Stuttgart, Leipzig: Hirzel.
- 9 International Energy Agency (2019). The Future of Hydrogen: Seizing today's Opportunities. Report prepared by the IEA for the G20, Japan.
- 10 Kurzweil, P. und Dietlmeier, O.K. (2018). *Elektrochemische Speicher: Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen*. 2., aktualisierte und erweiterte Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- 11 Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2021). Energieeinheitenumrechner. <https://ag-energiebilanzen.de/33-0-Energieeinheitenumrechner.html>. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 12 Synwoldt, C. (2008). *Mehr als Sonne, Wind und Wasser: Energie für eine neue Ära*. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- 13 GESTIS-Stoffdatenbank (2021). Ottokraftstoff. <https://gestis.dguv.de/data?name=531390>. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 14 Winter, M. (2021). The Periodic Table of the Elements by WebElements. <https://www.webelements.com>. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 15 Salchenegger, S. (2006). Emissionen von Wasserstofffahrzeugen: Abschätzung der Emissionen von wasserstoff- und brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen. Report, Wien.
- 16 Adolf, J., Balzer, C.H., Louis, J. et al. (2017). Shell Wasserstoff-Studie: Energie der Zukunft?: Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂, Hamburg.
- 17 Deutsche Energie-Agentur (2020). Wasserstoff. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2020/dena-FACTSHEET_Wasserstoff_PtG.pdf. Letzter Zugriff 28.04.2021.

- 18 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021). Wasserstoff: Schlüsselement für die Energiewende. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html>. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 19 Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2021). Energieträger Wasserstoff. <https://www.vdi.de/energie-und-umwelt/wasserstoff>. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 20 Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (2019). Wasserstoff: kleines Molekül mit großem Potenzial. https://www.bdew.de/media/documents/Factsheet_Wasserstoff_20210127.pdf. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 21 Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (2018). Wasserstoff statt Kohle: Weltgrößte Power-to-Gas-Anlage entsteht in Linz. <https://www.energie-wasser-praxis.de/energieeffizienz/artikel/wasserstoff-statt-kohle-weltgroesste-power-to-gas-anlage-entsteht-in-linz>. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 22 Brinner, A. (2013). Elektrolyse – Basics I: Wasserstoff. https://www.zsw-bw.de/uploads/media/Elektrolyse_Basics_I_04.pdf. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 23 Lehmann, J. und Schmidtchen, U. (2015). *Wasserstoff – der neue Energieträger: Eine fachliche Einführung vom Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e. V. – DWV: H2*. Überarbeitete Aufl. 2015. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag.
- 24 Deutsche Energie-Agentur (2018). Erdölraffinerie. https://www.powertogas.info/fileadmin/Power_To_Gas/Dokumente/Factsheets/DENA-Factsheet8_Eroelraffinerie.pdf. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 25 Clean Refinery Hydrogen for Europe (2018). Weltgrößte Wasserstoff-Elektrolyse entsteht in der Rheinland-Raffinerie. <https://refhyne.eu/weltgrosste-wasserstoff-elektrolyse-entsteht-in-der-rheinland-raffinerie>. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 26 Apodaca, L.E. (2021). Nitrogen (Fixed) – Ammonia. *Mineral Commodity Summaries*.
- 27 Gesellschaft für Energietechnik (1994). Ertüchtigung und Lebensdauererlängerung energietechnischer Anlagen: Tagung Veitshöchheim, 25. und 26. Oktober 1994. *VDI-Berichte* 1160. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- 28 Binder, A. (2017). Großgeneratoren und Hochleistungsantriebe: Vorlesungen, Übungen. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- 29 Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2021). Auswertungstabellen 2020. <https://ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html>. Letzter Zugriff 28.08.2021.
- 30 Synwoldt, C. (2021). *Dezentrale Energieversorgung mit regenerativen Energien: Technik, Märkte, kommunale Perspektiven*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- 31 Kaspar, F., Borsche, M., Pfeifroth, U. et al. (2019). A climatological assessment of balancing effects and shortfall risks of photovoltaics and wind energy in germany and europe. *Advances in Science and Research* 16: 119–128. <https://doi.org/10.5194/asr-16-119-2019>.
- 32 Amprion GmbH (2021). Netzkennzahlen. <https://www.amprion.net/Netzkennzahlen>. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 33 Hertz Transmission GmbH (2021). Erzeugung in der Regelzone von 50Hertz. <https://www.50hertz.com/de/Transparenz/Kennzahlen/Erzeugung>. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 34 TenneT TSO GmbH (2021). Netzkennzahlen. <https://www.tennet.eu/de/strommarkt/transparenz/transparenz-deutschland/netzkennzahlen>. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 35 TransnetBW GmbH (2021). Kennzahlen. <https://www.transnetbw.de/de/transparenz/marktdaten/kennzahlen>. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 36 Institut für angewandte Sozialwissenschaft; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.; IVT Research GmbH; infas 360 GmbH (2019). Mobilität in Deutschland – MiD: Ergebnisbericht. FE-Projektnummer 70.904/15.

- 37 Ausfelder, F., Seitz, A. und von Roon, S. (2019). *Flexibilitätsoptionen in der Grundstoff-industrie*. 1. Aufl. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V.
- 38 Deutsche Energie-Agentur (2019). Netzdienlicher Einsatz von Flexibilitäten. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Themen_und_Projekte/Energiesysteme/Netzflex/dena-Positionspapier_Initiative_Netzflex_Flexibilitaeten_20190124.pdf. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 39 EWE AG (Hrsg.) (2021). enera: Gemeinsamer Abschlussbericht des Konsortiums, Oldenburg.
- 40 Dr. Langniß Energie & Analyse (Hrsg.) (2020). *1,5° Celsius: Energiewende zellulär – partizipativ – vielfältig umgesetzt*. Selbstverlag: Stuttgart.
- 41 dena-Verteilnetzstudie (2012). Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030, Berlin.
- 42 Kreidelmeyer, S., Dambeck, H., Kirchner, A. et al. (2020). Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Basel: PROGNOSE, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.
- 43 Hebling, C., Ragwitz, T., Fleiter, T. et al. (2019). Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Karlsruhe, Freiburg: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE).
- 44 Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen Importabhängigkeit der deutschen Energieversorgung 2020. https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_infografik_04_2021_importabhaengigkeit_2020.pdf. Letzter Zugriff 28.04.2021.
- 45 Matthes, F.C., Heinemann, C., Hesse, T. et al. (2020). Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte Energieträger und Rohstoffe: Eine Überblicksuntersuchung. Berlin, Freiburg: Öko-Institut e. V.
- 46 Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2021). Fragen und Antworten zu Wasserstoff: Kann in Deutschland ausreichend grüner Wasserstoff hergestellt werden? <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/themenseite-forschung/faq-wasserstoff-1732248>. Letzter Zugriff 28.04.2021.