Marlene Buchinger, MSc Mai 2021

Grüner Wasserstoff als Zukunftshoffnung

Seit dem Sommer 2020 beschäftigt mich das Thema „grüner“ Wasserstoff intensiv. Ständig, wenn ich diesen Beitrag schreiben will, kommen neue Aspekte dazu. Jetzt ist es aber soweit, finden Sie im Rahmen des #RestartThinking Blogs eine ausführliche Betrachtung der Technologie und Einsatzgebiete von Wasserstoff, die hochtrabenden Pläne sowie die Potentiale und Knackpunkte. Kostenaspekte sind explizit ausgeklammert, denn dann würden Sie den Umfang einer Diplomarbeit lesen müssen.

1. Einführung

1.1. Wasserstoff – Stoff der Träume oder Zukunftshoffnung?

Es ist unbestritten, dass uns der Klimawandel vor große Herausforderungen stellt. Deshalb ist die Abkehr von fossilen Brennstoffen ein wichtiger Beitrag, um den wir nicht herumkommen. Wasserstoff wird derzeit von vielen als die Lösung des Problems angesehen. Doch kann das klappen? Kommen Sie mit auf eine spannende Reise in die Zukunft…

1.2. Was ist Wasserstoff?

Vielleicht erinnern Sie sich noch an den Chemie-Unterricht in der Schule. Im Periodensystem steht das chemische Element Wasserstoff (H) ganz oben links. In jedem Organismus kommt Wasserstoff (in gebundenen Form) vor und es ist das häufigste chemische Element im Universum. Auch bei uns auf der Erde ist es zu finden – einerseits in den Gewässern (Meere, Flüsse, Seen, Grundwasser, etc.), im Wasserdampf in der Luft (Luftfeuchtigkeit) und im Eis (Permafrost, Arktis, Antarktis, Gletscher). Aber auch Gase, wie etwa Methan, und Erdöl basieren auf Wasserstoff-Verbindungen (1).

1.3. Wenn es soviel Wasserstoff gibt, kann ja nichts mehr schief gehen?

Nicht ganz. Wasserstoff in atomarer Form (H) mit einem positiv geladenem Kern mit einem Proton und null bis zwei Neutronen und einem negativ geladenen Elektron gibt es unter „normalen“ Bedingungen auf der Erde nicht (2). Häufig findet man den molekularen Wasserstoff (H_2), als zweiatomiges Wasserstoffgas, welches farb- und geruchlos ist (3). Und wie kommt man an dieses Gas?

2. Technologien

Es gibt verschiedenen Möglichkeiten um Wasserstoff (H_2) herzustellen. Meistens wird in der derzeitigen Diskussion von Elektrolyse gesprochen, aber es gibt noch wesentlich mehr Möglichkeiten und momentan wird intensiv geforscht.

2.1. Elektrolyse

Bei der Elektrolyse wird Wasser mittels Stromzufuhr in Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) in einem Elektrolyseur zerlegt. Dazu wird elektrische Spannung an zwei Elektroden angelegt. Die entstehenden Gase sind rein und müssen nicht nachbehandelt werden. Mit 4,3 –4,9 kWh Energie kann 1 m^3 Wasserstoff hergestellt werden (4). Außerdem benötigt man 9 Liter Wasser um 1 Kilo H_2 und 8 Kilo Sauerstoff (O_2) als Beiprodukt zu erzeugen (5). Wird Salzwasser verwendet, ist es notwendig sein, dieses vorher noch zu entsalzen (6). Es gibt verschiedene Arten von Elektrolyseuren:

- Alkalischer Elektrolyseur

Die derzeit gängigste Elektrolyse-Methode funktioniert mit dem sogenannten alkalischen Elektrolyseur, welcher bereits seit den 1920iger Jahren in der chemischen Industrie im Einsatz ist und bei dem die Anlagekosten niedriger als bei anderen Varianten sind (7). Die Betriebstemperatur liegt zwischen 60 und 80 Grad Celsius, der Druck beträgt 1 bis 30 bar (8). Als Elektrolyt wird Kalilauge mit einer Konzentration von 20–40 % verwendet. In der Mitte dieses Elektrolyseurs befindet sich eine gasdichte Membran, damit sich der entstehende Wasserstoff und der entstehende Sauerstoff auf der jeweiligen Elektrodenseite nicht vermischen (9).

- PEM-Elektrolyseur

Der PEM-Elektrolyseur kommt durch die „Proton Exchange Membran“, eine Polymermembran, zu seinem Namen. In diesem Elektrolyseur wird destilliertes Wasser über zwei speziell beschichtete Elektroden (Platin überzogener Kohlenstoff auf der Kathodenseite und Iridium und Ruthenium beschichtete Anode) unter Spannung gesetzt. Durch die Polymermembran können nur die Wasserstoff-Ionen entweichen, so kann Wasserstoff und Sauerstoff getrennt werden (10). Die Betriebstemperatur beträgt 50 bis 80 Grad Celsius bei 30 bis 80 bar Druck (11). Laut der IEA sind PEM-Elektrolyseure noch nicht so weit entwickelt wie die alkalischen Elektrolyseure, aber sie können flexibler arbeiten und damit besser in variablen Bedingungen, etwa mit Schwankungen bei der Stromproduktion aus erneuerbaren Energiequellen, betrieben werden (12).

- Weitere Elektrolyseure

Weitere Varianten sind beispielsweise Hochtemperatur-Elektrolyseure oder Nickel-Eisen-Elektrolyseure (13). Die Festoxid-Elektrolyseurzelle (*englisch solid oxide electrolyzer cell* – kurz *SOEC*) ist eine neue Entwicklung und Hoffnungsträger vieler. Brennstoffzellen und das Thema „Power to X“ werden später genauer erklärt. Grundsätzlich verwandeln Brennstoffzellen chemische Energie, enthalten in kohlenwasserstoffhaltigen Brennstoffen, in elektrische Energie. Die SOEC kann zudem als „reversible Brennstoffzelle“ Dampf mittels Elektrolyse in Wasserstoff umwandeln. Diese Vielseitigkeit ist bei erneuerbaren Energiequellen interessant, um Lastschwankungen bei Produktionsüberschüssen oder Bedarfsspitzen entsprechend ausgleichen zu können (14).

2.2. Dampfreformierung

Dabei werden kohlenstoffhaltige Energieträger, die gasförmig (z.B. Erdgas, Biogas) oder mit verdampfbarer Flüssigkeit (z.B. Leichtbenzin) sind, gemeinsam mit heißem Wasserdampf in einem Katalysator bei etwa 500 Grad in Gas (Synthesegas) umgewandelt. Dieses Synthesegas besteht aus Wasserstoff (H_2) und Kohlenmonoxid (CO) (15).

Um den Wasserstoffanteil im Gas zu steigern, wird ein weiterer Prozessschritt (Shiftreaktion) durchgeführt. Dort wird in einem Katalysator bei 250-450 Grad Wasserdampf zugeführt. Damit reagiert das Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid (CO_2) (16).

2.3. Partielle Oxidation

Dabei wird ein Brennstoff-Luft-Gemisch in einem Reformer (Katalysator) bei hohen Temperaturen teilweise verbrannt. Je nach Verfahren liegen die Temperaturen bei 800-900 Grad oder bei 1200 Grad und darüber. Dadurch entsteht ein wasserstoffreiches Synthesegas, welches in gewissen Arten auch von Brennstoffzellen verwendet werden kann. (17)

Exkurs Synthesegasreinigung

Bei Dampfreformierung, Pyrolyse und partieller Oxidation sind je nach Verfahren, unterschiedliche und unterschiedlich komplexe Reinigungs- und Weiterverarbeitungs-schritte nötig. Die Shiftreaktion wurde schon bei der Dampfreformation erklärt. Weitere Maßnahmen können Rußabtrennung, Wasserentfernung und Trocknung oder die Abtrennung von CO_2- oder Schwefelverbindungen sein (18).

2.4. Pyrolyse

Bei diesem Prozess werden feste Brennstoffe, wie zum Beispiel Biomasse oder Kohle, unter Ausschluss von Sauerstoff hohen Temperaturen ausgesetzt. Dabei entsteht ein wasserstoffhaltiges Synthesegas und Wasserdampf. Die Reste bestehen aus reinem Kohlenstoff, der weiterverwendet werden kann und auch muss. Dazu kommen wir später nochmals.

- Methanpyrolyse

An dieser Stelle müssen wir nochmals zurück in den Chemie-Unterricht gehen. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird Methan häufig mit Erdgas gleichgesetzt. Zwar besteht Erdgas zu einem großen Anteil (über 85 %) aus Methan, doch je nach Vorkommen variiert die chemische Zusammensetzung, etwa durch Ethan, Propan, Butan, Schwefelwasserstoff oder CO_2 (19).

Bei der Methanpyrolyse wird – wie der Name schon sagt – reines Methan unter Ausschluss von Sauerstoff im Hochtemperaturbereich verarbeitet um Wasserstoff zu erzeugen. Dazu muss das Erdgas vorher entsprechend gereinigt werden um die Nicht-Methan-Bestandteile zu entfernen. Bei dem Pyrolyseprozess bleibt der im Gas enthaltene Kohlenstoff nach der Behandlung als Feststoff übrig. Das entstehenden Gas muss ebenfalls wieder gereinigt werden (20).

Damit der Prozess einen nachhaltigen Beitrag zum Klimaschutz liefert, muss der Kohlenstoff gebunden bleiben und darf nicht wieder thermisch verwertet, also verbrannt, werden. Je nach Qualität des abgeschiedenen Kohlenstoffs, können unterschiedliche Nutzungen resultieren. Etwa kann der Kohlenstoff bei entsprechender Qualität in industriellen Prozessen als „Thermal- oder Industrieruß“ (*englisch carbon black*) genutzt werden (21). Die Einlagerung in alten Kohleabbaugebieten wäre ebenfalls denkbar (22). Auch die Nutzung zum Humusaufbau in Böden (Stichwort Terra Preta) kann angedacht werden, wenn die Schadstoffwerte entsprechend eingehalten werden (23).

- Drei Arten der Methanpyrolyse

Die Methanpyroylse kann auf drei verschiedene Arten erfolgen: Mittels Plasma, thermischer (24) oder katalytischer (25) Spaltung. Die beiden letztgenannten sind derzeit noch im Versuchsstadium.

Die Wasserstoffgewinnung durch Methanpyrolyse mittels Plasma wird auch Kværner-Verfahren genannt. Dieses Verfahren wurde von dem norwegischen Unternehmen Kværner in den 1980iger Jahren entwickelt. Dabei wird Methan mit einem Plasmabrenner bei etwa 1600 Grad in reinen Kohlenstoff (Aktivkohle) und Wasserstoff getrennt (26).

2.5. Weitere Wasserstoff-Herstellarten

Aufgrund des derzeitigen Wasserstoff-Booms werden verschiedene Erzeugungsmöglichkeiten erforscht. Beispielswiese wird die H_2-Herstellung mittels Grünalgen probiert, wobei der Aufwand der Algenzüchtung groß ist. Die Reaktion verdünnter Säuren mit unedlen Metallen oder die Zersetzung des Wassers durch Alkalimetallen erzeugen ebenfalls H_2, sind aber aufgrund des Aufwandes nicht für den industriellen Einsatz geeignet (27).

2.6. Bisherige Umsetzung

Bisher wird Wasserstoff hauptsächlich (über 99 %) aus Erdgas – vor allem mittels Dampfreformation – gewonnen. Daher kann von „grünem Wasserstoff“ kann nicht die Rede sein, mehr dazu finden Sie im Abschnitt 4 „Einsatzgebiete und Bedarf“. Die Internationale Energie Agentur (IEA) listet alle seit dem Jahr 2000 weltweit betriebenen und geplanten Wasserstoff-Projekte auf. Bei den Neuprojekten sind der größte Teil bisher Elektrolyse-Anlagen (28).

2.7. Notwendiger Aufwand

Ich hoffe, Sie haben nach dem ganzen „Tech Talk“ noch Lust weiterzulesen. Wenn man sich die ganzen o.a. Methoden ansieht, merkt man, dass viel Aufwand dahinter steckt um Wasserstoff zu produzieren. In der folgenden Tabelle habe ich nochmals für Sie eine deskriptive Übersicht der Problemfelder und eventueller positiver Effekte zusammengestellt.

Methode	Problemfelder	Positive Effekte
Elektrolyse	• Energiebedarf für H_2-Herstellung • Wasserbehandlung (Entsalzung) • Wasserbedarf • Aufwand für Anlage	• Hergestellter Wasserstoff kann direkt verwendet werden (keine Reinigung nötig) • Entstehender Sauerstoff kann für industrielle Prozesse verwendet werden
Dampf-reformierung	• Energiebedarf für H_2-Herstellung (v.a. für Dampferzeugung) • CO_2 entsteht • Nachbehandlung des Synthesegases notwendig • Aufwand für Anlage	• Mit Biogas möglich (s. Anmerkung)
Partielle Oxidation	• Energiebedarf für H_2-Herstellung • CO_2 entsteht • Nachbehandlung des Synthesegases notwendig • Aufwand für Anlage	• Mit Biogas möglich (s. Anmerkung)
Pyrolyse von Feststoffen	• Energiebedarf für H_2-Herstellung • Nachbehandlung des Synthesegases notwendig • Aufwand für Anlage	• Mit Biomasse möglich • Kohlenstoff bleibt als Feststoff übrig
Methanpyrolyse	• Energiebedarf für H_2-Herstellung • Gasreinigung vorher nötig • Nachbehandlung des Synthesegases notwendig • Aufwand für Anlage	• Mit Biogas möglich (s. Anmerkung) • Kohlenstoff bleibt als Feststoff übrig

Tab. 1: Deskriptive Gegenüberstellung von Arten der Wasserstofferzeugung
Quelle: Eigene Darstellung, 2021

Anmerkung Biogas

Die Idee Biogas zu verwenden wird im Klimadiskurs gerne angeführt. Meiner Ansicht handelt es sich aber anhand der derzeit vorhandenen Zahlen um Wunschdenken, denn die entsprechenden Kapazitäten reichen bei weitem nicht aus. Einerseits ist die Verwendung des Biogases zu berücksichtigen. Laut der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) wurden im Jahr 2015 in Deutschland 89,6 % des erzeugten Biomethans mittels Kraft-Wärme-Kopplung, also Anlagen zur Stromerzeugung, deren Abwärme zum Heizen genutzt wird, verbraucht. **Nur 4,3 % des Biogases wurde als Kraftstoff verwendet** (29). Andererseits muss auch die Gesamtmenge an Biomethan gesehen werden, die derzeit überhaupt zur Umwandlung in Wasserstoff zur Verfügung stünde. Laut FNR betrug der Biomethan-Anteil am gesamten deutschen Kraftstoffverbrauch im Jahr 2017 28.000 Tonnen. Im gleichen Zeitraum wurden aber 36.486.650 Tonnen Diesel (63,8 % am Gesamtverbrauch) benötigt, damit liegt der **Biomethan-Anteil unter 0,05 %** der gesamten Kraftstoffmenge (30).

Wie man an der Tabelle 1 sieht, sind alle Arten der Wasserstoffherstellung energieintensiv. Der Umstieg auf regenerative Energien ist daher zwingend nötig, um damit die Treibhausgasemissionen nicht noch weiter zu steigern. Da die Wasserstoffherstellung aus regenerativen Quellen derzeit noch marginal ist (lt. VCÖ 0,7 % des derzeit weltweiten Verbrauchs (31)), gibt es verschiedene Kennzeichnungen um die Arten von Wasserstoff und deren Herstellungsmethoden zu unterscheiden. Diese finden Sie im nächsten Abschnitt.

3. Farbenlehre – verschiedene Arten von Wasserstoff (32)

Grauer Wasserstoff: Dieser Wasserstoff wird aus **fossilen Brennstoffen** (hauptsächlich Erdgas) durch Wärmezufuhr (vor allem mittels Dampfreformation) gewonnen. Das dabei entstehende CO_2 wird in die Atmosphäre emittiert. Damit ist die Klimabilanz sogar schlechter, als wenn man Erdgas direkt verbrennen würde. Bei der Herstellung einer Tonne H_2 entstehen rund 10 Tonnen CO_2 (33).

Blauer Wasserstoff: Wie „grauer“ wird auch „blauer“ Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen (hauptsächlich Erdgas) hergestellt, aber als CO_2-neutral bilanziert, wenn das dabei entstehende CO_2 nicht in die Erdatmosphäre emittiert wird. Unter Einsatz der CCS-Technologie (*englisch Carbon Capture and Storage,* kurz CCS) wird das **CO_2 abgetrennt und endgelagert**. Allerdings steckt die Forschung dazu noch in den Kinderschuhen und es gibt derzeit keine CO_2-Endlager.

Türkiser Wasserstoff: Dabei handelt es sich um den Wasserstoff aus der **Methanpyrolyse**. Vielleicht erinnern Sie sich noch, bei diesem Verfahren bleibt der im Prozess enthaltene Kohlenstoff als Feststoff übrig. Damit der Prozess als CO_2-neutral gilt, muss die Prozesswärme aus erneuerbarer Energie erzeugt und der Kohlenstoff darf nicht thermisch verwertet werden.

Grüner Wasserstoff: Durch Elektrolyse aus Wasser und Strom aus **erneuerbaren Energiequellen** (z.B. Photovoltaik oder Windenergie) wird „grüner" Wasserstoff hergestellt. Für die Produktionsanlagen fallen gewisse CO_2-Emissionen an, aber dennoch ist das die sauberste Technologie um Wasserstoff zu erzeugen, auch wenn sie energieintensiv ist.

Weitere Wasserstoff-Arten:

Im Zuge der Recherchen zu diesem Artikel bin ich auf die Seite von Solarify über eine weitere Einteilung gestoßen, die ich Ihnen nicht vorenthalten möchte (34):

Brauner Wasserstoff:
Entsteht, wenn **Kohle vergast** wird (vgl. Pyrolyse).

Rosa bzw. violetter Wasserstoff:
Diese Bezeichnung trifft für Wasserstoff aus der Elektrolyse zu, die mittels **Atomstrom** betrieben wird.

Gelber Wasserstoff:
Wenn die Elektrolyse mit Strom aus dem Netz (**allgemeiner Strommix**) stattfindet.

Weißer Wasserstoff:
Fällt bei bestimmten Prozessen in Chemieanlagen als **Nebenprodukt** an.

4. Einsatzgebiete und Bedarf

4.1. Der Status Quo – bisheriger Verbrauch

Die Internationale Energie Agentur (IEA) sah 2019 als ein Rekordjahr für Wasserstoff an, denn viele Anlagen – vor allem für Elektrolyse – wurden in Betrieb genommen, der Markt für Brennstoffzellen-Fahrzeuge hat sich verdoppelt und immer mehr Politiker haben das Thema Wasserstoff entdeckt. Nichtsdestotrotz bemängelt die IEA, dass die CO_2-armen oder -freien Produktionstechnologien nicht wirklich vom Fleck kommen und weiter hinter den Erwartungen stagnieren.

Es seien wesentlich mehr Anstrengungen nötig, um verschiedene Sektoren (Fernverkehr, chemische Industrie, Stahl- und Eisenherstellung) mittels „grüner" und „türkiser" Wasserstofftechnologie emissionsärmer zu machen und Wasserstoff in neue Anwendungen zu bringen.

Zu diesen Anwendungen zählt beispielsweise die Erzeugung, Speicherung und Rückverstromung des Wasserstoffes zur Erhaltung der Netzstabilität (35).

Was bedeutet das in Zahlen ausgedrückt?

Heute werden etwa **70 Megatonnen Wasserstoff pro Jahr zu 99,3 % aus fossilen Brennstoffen** (6 % des weltweiten Gas- und 2 % des weltweiten Kohlebedarfs) hergestellt. Dabei entstehen jährlich 830 Megatonnen CO_2. Der produzierte Wasserstoff wird hauptsächlich in der Raffinierung (Öl, Treibstoffe, etc.) und in der Chemischen Industrie verwendet. Da der nachhaltige Wasserstoffanteil aus Erzeugung mittels **erneuerbarer Energie oder dem Einsatz von CCS nur 0,7 %** beträgt (36).
Die IEA unterscheidet außerdem zwischen dem Wasserstoff, der speziell produziert wird (70 Megatonnen/Jahr) und dem Wasserstoff, der als Beiprodukt in anderen Prozessen entsteht. Hier sprechen wir von weiteren 48 Megatonnen H_2 pro Jahr (3). In den Berechnungen und Szenarien der IEA wird immer auf die 70 Megatonnen H_2 referenziert.

Heutige Wasserstoff-Wertströme (basierend auf dem Jahr 2018)

Wie man aus dieser Abbildung sieht, werden 69 Megatonnen H_2 sofort wieder für die **Raffinierung und in der chemischen Industrie zur Ammonium-Produktion** verwendet. Ammonium wird hauptsächlich zur Herstellung von Kunstdünger für die industrielle Landwirtschaft verwendet.
Ebenso fällt auf, dass **derzeit nur 0,01 Megatonnen H_2 für den Verkehrssektor** verwendet werden. Da die derzeit produzierten Mengen an Wasserstoff sofort wieder in bestimmten Prozessen eingesetzt werden und nur ein marginaler Anteil für den Transportbereich verwendet wird, sind kein großes Transportnetz oder gar ein Handelssystem für Wasserstoff etabliert.

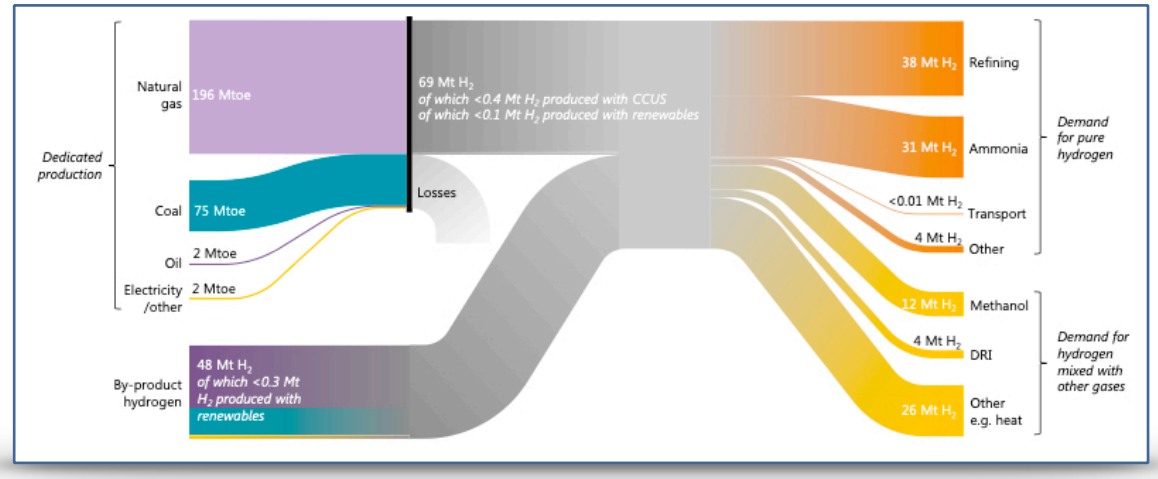


Abb. 1: Wie viel Wasserstoff wurde im Jahr 2018 hergestellt und wofür wurde er verwendet?
Quelle: IEA, 2019 (37)

CO_2-Emissionen

Wenn man die Berechnung der Standford University aus dem Jahr 2019 mit einem jährlichen Ausstoß von 37.000 Megatonnen CO_2 weltweit (38) zugrunde legt, werden somit **2,24 % der weltweiten Emissionen nur durch die Produktion von Wasserstoff verursacht**.

Etwaiger zusätzlicher Wasserstoffbedarf für neue Sektoren, wie etwa den Transportbereich, sind in dieser Rechnung nicht berücksichtigt. Zur besseren Einschätzung der Größenordnungen: 2018 wurden weltweit 42 % der CO_2 Emissionen durch Strom- & Wärmeerzeugung verursacht, 25 % durch den Verkehrssektor, 19 % durch die Industrie, 6 % durch den Bau und die restlichen 8 % durch andere Bereiche, wie andere erzeugende Industrie, Landwirtschaft und Dienstleistungen (39).

Ist der derzeitige Einsatz von Wasserstoff nachhaltig?

Von den knapp 70 Megatonnen Wasserstoff wurden im **Jahr 2019 allerdings nur 0,36 Megatonnen H_2 klimaschonend produziert (0,5 % der Gesamtproduktion)**, für das Jahr **2020 wurden 0,46 Megatonnen (0,7 % der Gesamtproduktion) nachhaltiger Wasserstoff anvisiert** (40). Genaue Zahlen für das Jahr 2020 liegen zum Stand 18.05.2021 noch nicht vor.

Was mich allerdings überrascht hat, war das der größere Teil (< 0,4 Megatonnen H_2) in den CCS-Bereich („blauer“ Wasserstoff) fällt und die Produktion von „grünem“ Wasserstoff auf nur unter 0,1 Megatonnen H_2 kommt (41).

Die IEA geht in ihrem Nachhaltigkeitsszenario von einem **„grünen“ und „blauen“ Wasserstoffanteil von 7,92 Megatonnen im Jahr 2030** aus. Wenn man sich die Abbildung 2 mit der bisherigen Entwicklung im zeitlichen Verlauf seit dem Jahr 2010 ansieht, ist bis zur Zielerreichung im Jahr 2030 noch einiges zu tun.

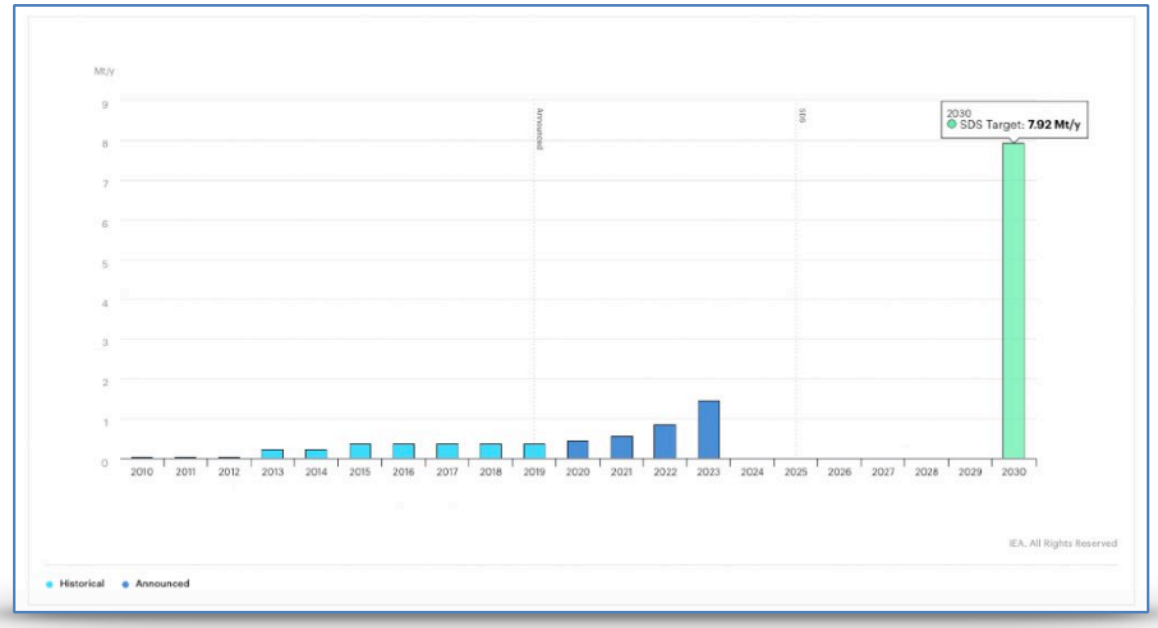


Abb. 2: Wie viel Wasserstoff wurde regenerativ seit 2010 hergestellt und welche Ziele gibt es für 2030? Quelle: IEA, 2021 (42)

Regenerative Wasserstoffherstellung 2010 bis 2030

Die Dekarbonisierung der bisherigen Wasserstoffproduktion wäre somit ein guter Beginn in Bezug auf den Klimaschutz, doch selbst bis dahin ist es noch ein weiter Weg. **Selbst wenn wir das Ziel im Jahr 2030 erreichen, haben wir dann nur 11,3 % des heutigen Bedarfs nachhaltig produziert**. Zur Wiederholung, dieser Wasserstoff wird hauptsächlich in der chemischen Industrie eingesetzt. Weitere Nutzungen, wie für den Mobilitätssektor oder gar zur Wärmebereitstellung, sind hier noch lange nicht regenerativ gesichert.

Wasserstoff als „Retter der erneuerbaren Energien“

Neben der Dekarbonisierung der bisherigen Wasserstoffproduktion, wird der Stoff in diversen Diskussionsrunden auch als „Retter“ für die erneuerbaren Energien gesehen. Was versteht man darunter und müssen die erneuerbaren Energie gerettet werden?

Da die Stromproduktion jahrzehntelang auf Großanlagen ausgelegt war und die Stromnetze entsprechend gestaltet wurden, ist die Netzlandschaft nicht in gleicher Geschwindigkeit, wie die erneuerbaren Energien ausgebaut worden. Wozu auch? Die Stromerzeuger und Netzbetreiber haben lange Zeit gutes Geld mit großen Anlagen verdient. Und wenn ein Kraftwerk, das buchhalterisch bereits abgeschrieben war, noch immer in Betrieb ist, warum sollte man daran etwas ändern? Besonders, wenn man den Dreck, den der Abbau der Rohstoffe und der Betrieb verursachen, nicht bezahlen muss. Um die gleiche Menge Strom zu erzeugen, sind eine wesentlich größere Anzahl an Photovoltaik- oder Windanlagen nötig.

Ich bin sehr froh, dass sich diese einseitige Sicht nicht komplett durchgesetzt hat und die erneuerbaren Energiequellen sich langsam immer weiter verbreiten. Da aber ein Kohlemeiler im Betrieb nicht so schnell abgestellt werden kann, werden Wind- und PV-Parks abgeschaltet, wenn zu viel Strom im Netz ist. Das wird dann auch „Abregelung“ oder „Abwurf“ genannt. In diesem Zusammenhang wird Wasserstoff oft als Alternative gesehen, um diesen Strom nutzen zu können.

Dazu ein Rechenbeispiel:

Im ersten Quartal 2019 wurden 3,23 Mrd. kWh von deutschen Windparks abgeregelt (43), da die lokalen und die Übertragungsnetze nicht frei waren. Das bedeutet in der Praxis, dass diese Windparks stillgelegt werden und erst nach Freigabe des Netzbetreibers wieder starten dürfen. Der Strom hätte zur Wasserstoffproduktion genutzt werden können. Wenn wir diese Quartalszahl von 3,23 Mrd. kWh auf ein Jahr grob mit 12 Mrd. kWh hochrechnen und durch 4,6 kWh durchschnittlichen Energieaufwand zur Produktion von einem m^3 Wasserstoff teilen, würde man rechnerisch 2,6 Mrd. m^3 Wasserstoff erhalten. Ich lasse jetzt etwaige Übertragungsverluste aus der Berechnung weg, auch wenn nicht bei jedem Windrad ein Elektrolyseur steht.

Der derzeitige Wasserstoffbedarf in Deutschland beträgt etwa 55 TWh (44). Wenn man diese Zahl durch den durchschnittlichen Heizwert von 3,00 kWh pro m^3 H_2 dividiert, ergibt das 18,33 Mrd. m^3 Wasserstoff. **Mit dem Strom von abgeregelten Windparks könnten im Jahr somit etwa 14 % des derzeitig benötigen Wasserstoffs regenerativ mit ansonsten abgeregeltem Strom hergestellt werden**. Da der Anteil der Windenergie am deutschen Strommix im Jahr 2019 24,5 % betrug und der Strom aus PV-Anlagen auf 9,1 % kam (45), wird sich die mögliche Erzeugungsmenge von Wasserstoff aus ansonsten „überflüssigem“ PV-Strom nicht maßgeblich erhöhen. Angesichts dieser Zahlen, würde ich sagen: „Besser als nichts.“

Wenn man nun von einem durchschnittlichen Wasserstoffbedarf von 100 TWh (90-110 TWh) im Jahr 2030 in Deutschland ausgeht (46) und diese Zahl durch den durchschnittlichen Heizwert von 3 kWh pro m^3 H_2 (47) dividiert, ergibt das 33,33 Mrd. m^3 Wasserstoff. In diesem Fall reicht der Strom aus diesen abgeregelten Windanlagen für 7,8 % des zukünftigen Wasserstoffbedarfs.

Anhand dieser Zahlen sieht man, dass die Idee mit dem Wasserstoff zur Unterstützung der erneuerbaren Energien gut gemeint ist, aber von „Rettung“ kann hier keine Rede sein. Es ist sicherlich sinnvoll, vorhandene Kapazitäten zu nutzen anstatt diese aufgrund fehlender oder falscher Netze abzuregeln.

Ich gebe allerdings zu bedenken, dass der Anteil der erneuerbaren Energien am deutschen Strommix – wir reden hier noch nicht vom Verkehr oder Wärmesektor – im Jahr 2019 46 % betrug (48). Das bedeutet, dass selbst im Stromsektor hinsichtlich regenerativer Produktion noch viel zu tun ist – dabei sind die Kapazitäten für „grünen" Wasserstoff noch gar nicht berücksichtigt. Auf dieses Thema gehe ich später nochmals ein.

4.2. Die Brennstoffzelle – Seit dem 19. Jahrhundert immer wieder im Gespräch

Ja, Sie haben richtig gelesen. Seit etwa 1838 gibt es immer wieder Versuche die Brennstoffzelle in die großflächige Anwendung zu bringen. Die Raumfahrt und deren spezielle Anforderungen bezüglich Gewicht und Kraftstoff brachten einen Schub für die Technik. Seit den 1990iger Jahren gab es im Fahrzeugbereich diverse Aktivitäten (49), die aber eher im Sande verliefen, bevor asiatische Hersteller in den letzten Jahren das Ruder in die Hand nahmen. Aber dazu kommen wir gleich noch.

Wie funktioniert eine Brennstoffzelle eigentlich?

In einer solchen Zelle wird die im jeweiligen Brennstoff gespeicherte Energie in elektrische Energie umgewandelt. Was braucht man dazu? Eventuell einen Katalysator, auf jeden Fall zwei Elektroden (Anode und Kathode), die porös und elektrisch leitend sind und ein Elektrolyt (flüssig bis fest). Je nach verwendeten Elektrolyten werden die Brennstoffzellen weiter unterteilt, außerdem hängt die Klassifizierung von der jeweiligen Zelltemperatur (zwischen 100 und 600 Grad Celsius) ab (50).

Je nach Art der Brennstoffzelle können verschiedene Brenngase verwendet werden – von Wasserstoff, über Methanol, Kohlenmonoxid bis hin zu Erd- oder Kohlegas. Diese müssen allerdings je nach Zellart mehr oder weniger vorher aufbereitet werden (z.B. mittels Reformer, Shift-Konverter, Scrubber, CO- oder CO_2-Abscheidung) (51). Das klingt alles sehr aufwändig. Stimmt, ist es auch. Aber bevor Sie die Brennstoffzelle gleich abschreiben, bedenken Sie, die Gewinnung von Erdöl und die Raffinierung bevor dieses als Diesel oder Benzin an der Tankstelle landet, ist auch nicht ganz trivial. Eines der charmantesten Argumente für die Brennstoffzelle ist, dass aus dem Auspuff solcher Fahrzeuge nur Wasser tropft. Doch warum hat sich diese Technik noch nicht durchgesetzt?

Eine Zeitreise

Deutsche Hersteller waren in den Anfängen dabei – zwischen 1994 und 2002 forschte Mercedes-Benz mit dem NeCar (New Electric Car) an Fahrzeugen mit Brennstoffzellen (52). Von 2003 bis 2007 wurde aufbauend auf den gesammelten Erfahrungen die A-Klasse entwickelt, auf die 2007 eine entsprechende B-Klasse folgte. Ebenfalls zum Start des neuen Jahrtausends kamen andere Spieler auf den Markt. Chrysler, VW, Fiat, GM und Toyota starteten mit Fahrzeugen mit Brennstoffzelle (53). BMW ging mit einem Wasserstoffverbrennungsmotor einen anderen Weg (54). Etwas später zogen noch Ford, Audi und Peugeot nach. 2008 kam mit Honda ein weiterer Anbieter hinzu, Hyundai begann im Jahr 2013. In den letzten Jahren starteten die deutschen Hersteller weitere Versuche (Audi 2014), BWM (2015 und 2019) und Daimler (2018), doch keines der Fahrzeuge wurde irgendwie ernsthaft weiterverfolgt (55).

Apropos ernsthaft, **die einzig in Serie fahrenden Brennstoffzellenfahrzeuge im KFZ-Bereich stammen allesamt von asiatischen Herstellern**. Honda legte mit dem FCX Clarity (1. Generation) bereits 2008 los. Seit 2016 ist das Fahrzeug in 2. Generation unterwegs. Hyundai folgte mit dem ix35 FCEV ab 2013. Dieses Modell wurde durch den Hyundai Nexo 2018 abgelöst. Der Toyota Mirai startete im Jahr 2014 und das überarbeitete Modell Mirai II kam 2020 auf den Markt (56).

Einsatzgebiete für Brennstoffzellen-Fahrzeuge

Der österreichische VCÖ ist der Ansicht, dass sich

„der Brennstoffzellen- Antrieb vor allem für Bereiche, in denen hohe Reichweiten, das Fahrzeuggewicht, hohe Zuladung, Betrieb bei kalten Umgebungstemperaturen und Betankungszeiten relevant sind“

eignet. Leichtgewichte sind diese Fahrzeuge auch nicht, denn neben den Brennstoffzellen selbst braucht es dennoch eine Batterie, den Motor für die Kraftübertragung und der spezielle Drucktank mit verschiedenen Schichten muss bis zu 700 bar aushalten (57).

Im Umkehrschluss bedeutet die Aussage des VCÖ aber, dass die Entwicklungen im KFZ-Bereich nicht sinnvoll sind. Denn auch wenn die Fahrzeuge geräusch- und emissionsarm im Betrieb sind, ist der **Aufwand für die Herstellung des Brennstoffes enorm und der Wirkungsgrad eines wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen-fahrzeuges ist nur etwas besser als der des Verbrennungsmotors**, womit nicht wirklich etwas gewonnen ist. Zum Thema Wirkungsgrad kommen wir gleich nochmals im nächsten Abschnitt „Power-to-X“.

Wenn wir auf die VCÖ-Aussage zurückkommen, sind vor allem **Anwendungen im öffentlichen Verkehr (Busse) oder beim Transport (LKW) sinnvoll**. Die Wiener Linien haben einen solchen Bus des polnischen-spanischen Herstellers Solaris bereits getestet und waren damit zufrieden (58). Mercedes-Benz entwickelt auch Brennstoffzellen-Busse, die mit Wasserstoff fahren sollen (59). Im LKW-Bereich tut sich ebenfalls einiges. Hier liegt Hyundai vorne, das südkoreanische Unternehmen liefert seit 2020 mit dem „Xcient Fuel Cell" den ersten in Serie gebauten Schwerlast-Lkw mit Wasserstoff-Brennstoffzellen-System für etwa 400 Kilometer Reichweite (60).

Manchmal geht das Thema Wasserstoff auch kuriose Wege im Bereich Schwerlast

Hier in der Region Tirol wird gerne ein Leuchtturmprojekt hochgehalten: Die Zillertal-Bahn soll auf Wasserstoff umgestellt werden. Es handelt sich dabei um eine Lokalbahn vom Bahnhof Jenbach hinein bis Mayrhofen ins Zillertal. Derzeit wird die Strecke noch mit Dieselloks befahren und eine Veränderung ist nötig (61). Einfacher wäre es, die Strecke mit Leitungen zu elektrifizieren und elektrische Standardloks zu verwenden, aber das wird kategorisch abgelehnt. Argumente, wie der visuelle Einfluss der Leitungen auf das Landschaftsbild, werden geltend gemacht. Da kommt die Wasserstofflok gerade richtig. Und mit derzeit geplanten Investitionen von 80 Millionen Euro für die Loks, die Anlagen zur Wassertstoffherstellung und Betankungen ist das für eine Bahnstrecke in der Länge von 31,7 Kilometer definitiv ein Leuchtturmprojekt. Zum Vergleich: Eine komplette ICE-Garnitur kosten zwischen 20 und 30 Millionen Euro.

4.3. Hochtrabende Wasserstoff-Pläne – Power to X

Als langjährige Beobachterin der Automobilbranche sehe ich derzeit auch große Agilität und Aufruhr beim Thema Wasserstoff. In diesem Zusammenhang fällt oft der Begriff „Power to X" (PtX). Kurz gesagt, geht es dabei um

- Stoffe (Power to Chem, Power to Fuel),
- Gase (Power to Gas) und
- Flüssigkeiten (Power to Liquid, kurz PtL),

die **synthetisch mithilfe von Strom hergestellt** werden. Da der Prozess vielseitig ist, sagt man „X" (62) (63).

Sie können sich vielleicht noch an das Thema **Elektrolyse** erinnern. Dabei werden aus Wasser (H_2O) und Strom Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2), beides in Gasform, gewonnen. Setzt man noch mehr Energie ein, kann man den Wasserstoff **zuerst verdichten und anschließend auch verflüssigen**. Wird bei der **weiteren Verarbeitung** dem gasförmigen Wasserstoff noch CO_2 zugesetzt, erhält man Methan (64).

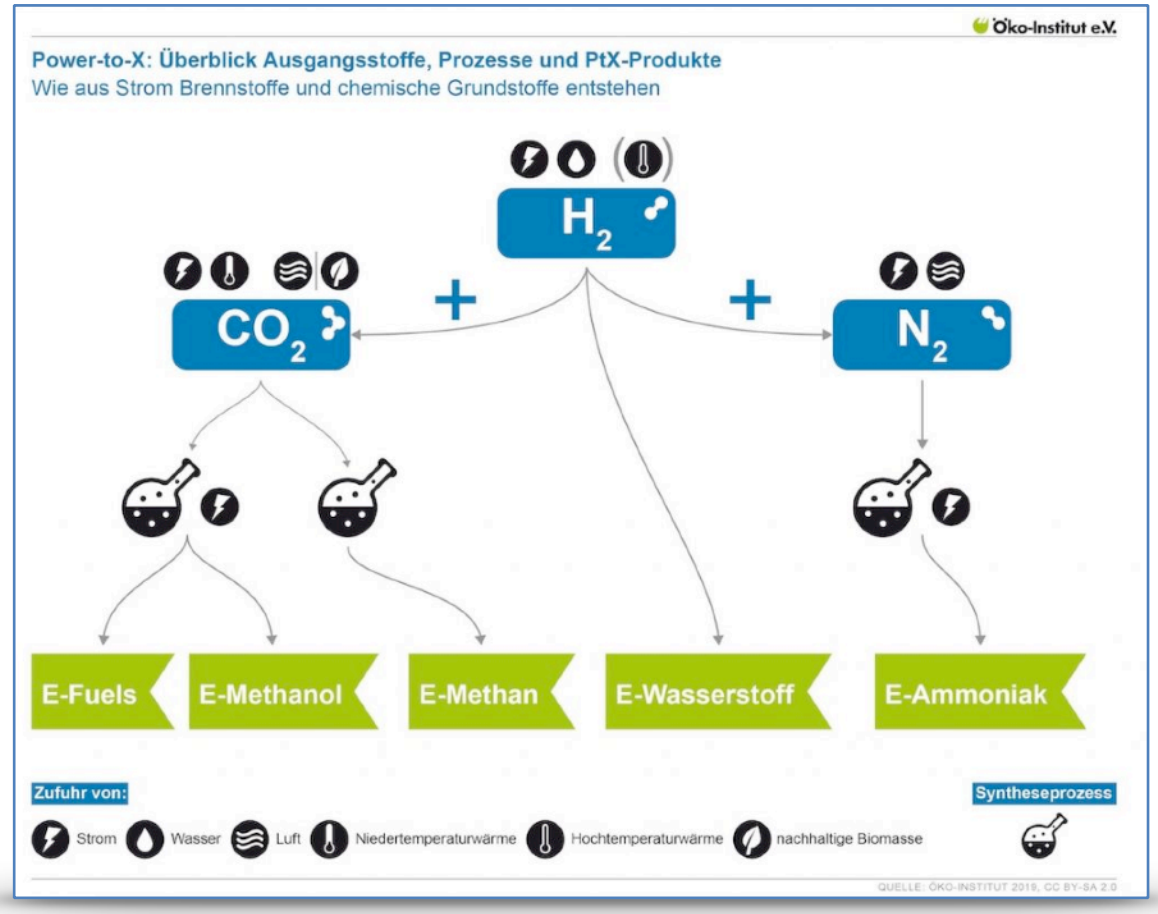


Abb. 3: Power-to-X: Wie kann Wasserstoff eingesetzt werden?
Quelle: Öko-Instituts, 2019 (65)

Die derzeitige Euphorie dreht sich aber um das Thema **E-Fuels**. Dazu wird der Wasserstoff **aufwändig im Fischer-Tropsch-Verfahren** gemeinsam mit Kohlendioxid (CO_2) verflüssigt. So erhält man flüssige Kraftstoffe, wie synthetischen Diesel oder Kerosin, welche in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden können (66).

Dabei wird deutlich, dass sehr viel Aufwand nötig ist und entsprechende Umwandlungsverluste zu berücksichtigen sind. Wenn man dann noch bedenkt, dass man diesen **aufwendig aus bereits energieintensivem Wasserstoff hergestellten Stoff, dann einfach in einem Verbrennungsmotor mit einem Umwandlungsverlust von mehr als 70 % verbrennt, ist das gelinde gesagt, der energetische Wahnsinn**.

Exkurs: Der Wirkungsgrad

Die Vielseitigkeit von Wasserstoff wird von dessen Verfechter:innen gerne angeführt. Das stimmt. Doch muss uns auch bei diesem Thema klar sein, dass

die beste Energie die ist, die wir nicht benötigen.

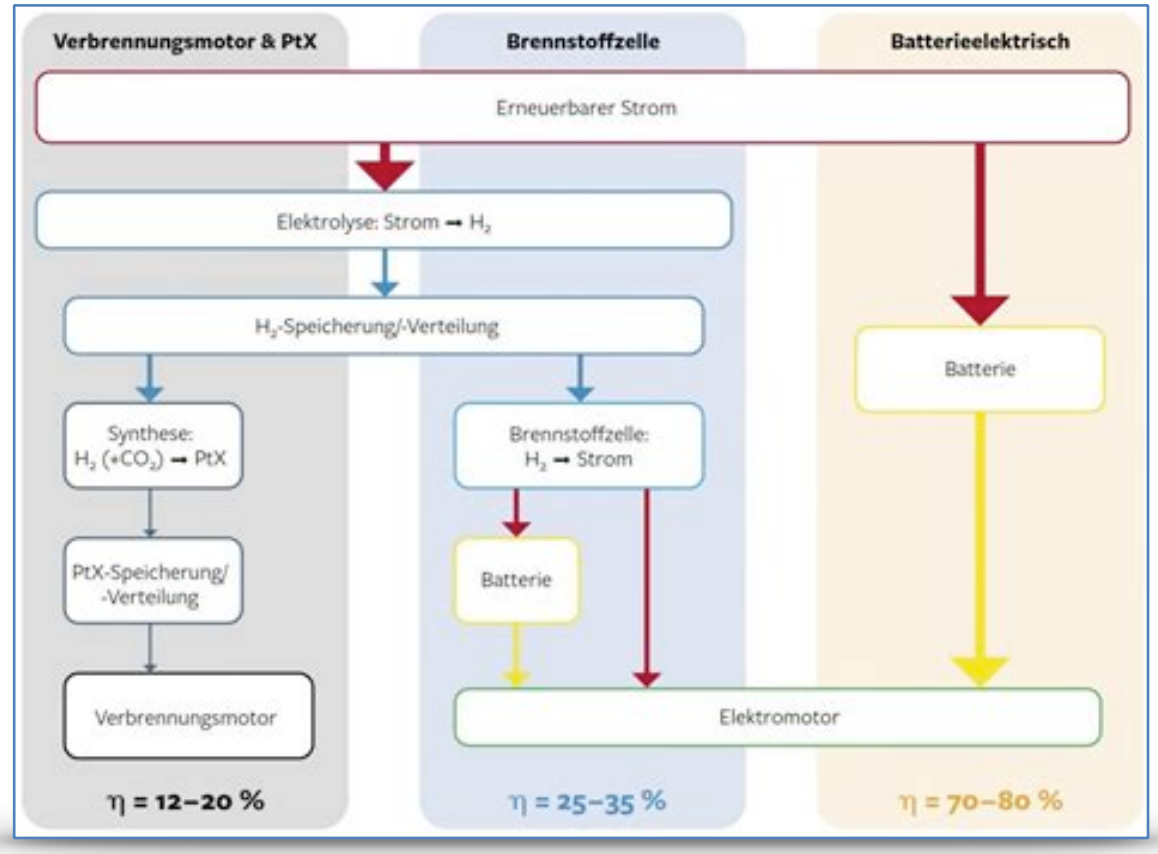


Abb. 4: Wie hoch ist der Gesamtwirkungsgrad verschiedener Antriebsoptionen?
Quelle: Sachverständigenrat für Umweltfragen, 2017 (67)

Ein moderner Verbrennungsmotor hat vom Beginn der Prozesskette, von der Erdölförderung über die Raffinierung und den Transport bis zur **Verbrennung einen Gesamtwirkungsgrad von 22 % (Benziner) bis 25 % (Diesel)** (68). Das liegt vor allem daran, dass etwa 75 % des Energiegehaltes des Kraftstoffes im Tank durch den Verbrennungsmotor im wahrsten Sinne verbrannt werden und nur ein Viertel in Bewegung umgesetzt wird (69). Oder um es mit einem Beispiel von Zukunftsforscher Lars Thomsen zu beschreiben: Sie machen sich eine schöne Flasche Wein auf, gehen dann zum Waschbecken, leeren 3/4 davon weg und sagen: *„Der Rest ist ja noch gut, den können wir noch trinken*."

Das Beispiel ist krass, trifft es aber absolut. Wir haben uns mittlerweile daran gewöhnt, dass konventionelle Fahrzeuge als **„ineffiziente Heizungen"** durch die Gegend fahren. Das Zitat stammt vom Ökonomie-Physiker Mario Buchinger. Es kann also nicht für die Zukunft sinnvoll sein uns mit so einer schlechten Leistungsbilanz zufrieden zu geben.

Daher finde ich die Euphorie um **Power-to-X** und die bereits genannten **E-Fuels** absolut nicht angebracht. Denn wie wir bereits gesehen haben, ist der Aufwand um den Wasserstoff und anschließend aus diesem den Kraftstoff herzustellen schon enorm. Wenn man als nächsten Schritt diesen Kraftstoff in einem Verbrennungsmotor mit etwa 25 % bis 30 % Effizienz verbrennt, kommt man auf einen **Gesamtwirkungsgrad von 12 bis 20 %.** Aber nur wenn der Strom aus erneuerbaren Quellen stammt. Wird der Wasserstoff aus Erdgas hergestellt, fällt die Rechnung noch schlechter aus.

Das **Brennstoffzellenfahrzeug** mit Wasserstoff aus regenerativer Herstellung schneidet laut Abbildung 4mit einem **Wirkungsgrad von 25 bis 35 %** etwas besser als konventionelle Verbrennerantriebe ab. Das liegt am bereits beschriebenen Herstellungsprozess und der notwendigen weiteren Behandlung. Beispielsweise fallen für die Verflüssigung des Wasserstoffs 12 % Verlust an. Die Brennstoffzelle arbeitet mit einem Wirkungsgrad von etwa 60 bis 70 % und der Strom von der Brennstoffzelle muss im Motor erneut mit Verlusten in Bewegungsenergie umgewandelt werden (70).

Wenn wir als abschließende Größe ein **E-Fahrzeug** vergleichen, dass ebenfalls mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen betankt wird, hat das mit etwa **70 bis 80 % Gesamtwirkungsgrad** die Nase weit vorne.

Anhand dieser Zahlen sieht man, dass die derzeitigen Rufe nach Wasserstoff und E-Fuels im normalen KFZ-Bereich jenseits von Gut und Böse sind. Denken Sie bei der nächsten Flasche Wein daran.

4.4. Weitere Einsatzgebiete für Wasserstoff: Gasnetz & Wärme

Grundsätzlich kann man Wasserstoff im vorhandenen Gasnetz zu einem gewissen Anteil einspeisen und wieder entnehmen, um damit Energie zu erzeugen. Dabei könnten Turbinen mit Kraft-Wärmekopplung oder Brennstoffzellen zum Einsatz kommen. **Anhand der bisher vorhandenen Erzeugungskapazität ist aber schlichtweg kein Wasserstoff für diese Variante vorhanden.**

Die Möglichkeit das Gas in speziellen Brennern in Wärme umzuwandeln, wäre technisch sicherlich kein Problem. Es wäre allerdings die **schlechteste aller Lösungen, da vorher mit viel Aufwand ein Gas hergestellt wird, dass dann mit niedrigem Wirkungsgrad in Wärme verwandelt und sich diese im wahrsten Sinne des Wortes in Luft auflöst.**

5. Visionen

Welche internationalen Pläne gibt es? Was plant man auf EU-Ebene und wie sehen die Wasserstoff-Strategien in Deutschland und Österreich aus? Finden Sie mehr in den folgenden Abschnitten.

5.1. Internationale Pläne

Die IEA hat im Auftrag von Japan im Rahmen dessen G20-Vorsitzes das Thema Wasserstoff genauer untersucht und folgendes festgestellt (71):

"Hydrogen is already widely used in some industries, but it has not yet realised its potential to support clean energy transitions. Ambitious, targeted and near-term action is needed to further overcome barriers and reduce costs."

Wie wir bereits aus den Zahlen für den „grünen" Wasserstoff sehen konnten, ist die Formulierung „das Potential wurde noch nicht verwirklicht" sehr nett formuliert. Um das Henne-Ei-Problem zu lösen, sieht die IEA **vier Wertströme, die eine Skalierung vorantreiben sollen** (72):

1. **Bestehende Häfen** sollen Schaltzentralen für Wasserstoff werden, da auch bereits jetzt in diesen Gegenden häufig Raffinerien angesiedelt sind. Wenn diese Anlagen statt „grauem" auf nachhaltig produzierten Wasserstoff umsteigen, verspricht sich die IEA Skaleneffekte und damit sinkende Kosten. Zudem könnte der Wasserstoff Schiffe antreiben oder in nahegelegenen Industrieanlagen verwendet werden.
2. Die **bestehende Gasinfrastruktur** soll verwendet und das **Erdgas durch Wasserstoff** substituiert werden. Die IEA nennt hier einen Eingangswert von 5 %. Wenn man von einer weltweiten Erdgas-Produktion von etwa 3,3 Mrd. Tonnen (Produktionswert im Jahr 2018) ausgeht (73), wären das 165 Millionen Tonnen Gas, die es zu ersetzen gilt. Nimmt man bei dieser Menge Erdgas einen durchschnittlichen Methananteil von 80 % an, müssten somit 132 Millionen Tonnen Methan mit einem Heizwert von 1834,8 Mrd. kWh subsituiert werden. Bei einem durchschnittlichen Heizwert von 33,3 kWh pro Kilo Wasserstoff (74), wären damit etwa 55 Megatonnen Wasserstoff nötig.
   Somit entsprechen 5 % der Erdgassubstitution einem Mehrbedarf von 80 % der heutigen Produktionsmenge (etwa 70 Megatonnen H_2 p.a.). Nur nochmals kurz zur Erinnerung: Derzeit werden nur etwa 0,4 Megatonnen Wasserstoff regenerativ hergestellt und im Jahr 2030 soll der Anteil mit erneuerbaren Energiequellen oder CCS lediglich knappe 8 Megatonnen betragen. Da ist somit noch einiges zu tun.

3. Zudem soll die Anwendung von **Brennstoffzellen im Transportbereich** ausgebaut werden v.a. bei Autos, LKWs und Bussen mit hoher Laufleistung zum Personen- und Gütertransport.
4. Außerdem sollen erste **Schiffstransportrouten** etabliert werden um den internationalen Handel mit Wasserstoff zu starten. Dabei will man vom globalen LNG (Liquefied Natural Gas, also Flüssigerdgas)-Handel lernen.

Exkurs "LNG around the world"

Nein, dabei handelt es sich nicht um eine neue Pop-Band aus Südkorea. Flüssigerdgas wird aufbereitet in dem alle anderen Gasbestandteile bis auf das Methan entfernt werden. Der Methangehalt im LNG liegt dann bei etwa 98 %. Anschließend wird das Gas bei -161 bis -164 Grad Celsius verflüssigt, da es dann nur 1/600 des gasförmigen Volumens aufweist. Damit kann man es mit Spezialschiffen über längere Strecken transportiert werden. Allerdings benötigt der Aufwand für die Aufbereitung und Verflüssigung etwa 10 bis 25 % des Energiegehalts des Gases (75). Der weltweite Handel mit Flüssiggas hat sich seit dem Jahr 2000 bis 2018 verdreifacht und liefert mittlerweile 14 % des weltweiten Gasverbrauchs. Oder anders gesagt 314 Millionen Tonnen Gas. Die führenden Nationen sind Qatar, die USA, Kanada, Russland und Australien (76).

Geplante weltweite Projekte

Jedenfalls sieht die IEA großen Handlungsbedarf, um Wasserstoff in den langfristigen Energieplänen verankern zu können. Ankündigungen für Projekte sind bereits vorhanden – in der Auswertung „Hydrogen Project Pipeline" der IEA sind Anlagen mit einer **Gesamtnennleistung von knapp 50 GW gelistet** (77). Allerdings betrug die Gesamtkapazität der **weltweit in Betrieb befindlichen Anlagen im Jahr 2019 erst knapp 100 MW, also 0,2 % der Nennleistung der genannten Projekte**. Die bis zum Jahr 2019 betriebenen Elektrolyseure hatten alle eine maximale Nennleistung kleiner 10 MW (78).

Um die Umsetzung voran zu treiben, nennt die IEA als Maßnahmenfelder etwa die vermehrte staatliche Nachfrage nach „grünem" anstelle „grauem" Wasserstoff. Auch sollten die gesetzlichen und finanziellen Rahmenbedingungen, beispielsweise durch entsprechende Forschungsförderung, geschaffen werden (79). Wie sieht daher der Plan für die Europäische Union, Deutschland und Österreich aus? Lesen Sie mehr dazu im folgenden Abschnitt.

5.2. Die Europäische Wasserstoffstrategie

Im Rahmen des Green Deals und dem Aufbauplan „Next Generation EU“ hat die Europäische Kommission **Wasserstoff bei den Investitionen priorisiert**. Die Idee dahinter, den europäischen Wirtschaftsraum zu stärken und von ausländischen Importen weniger abhängig zu machen, sowie Arbeitsplätze zu schaffen und einen Technologievorsprung zu erreichen, ist auf jeden Fall begrüßenswert. **Neben erneuerbaren Energiequellen wird Wasserstoff als wichtiger Bestandteil gesehen**, um das EU-Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2050 zu erreichen (80). Ein wertstromübergreifendes System soll in folgenden Schritten erreicht werden:

1. Als ersten Schritt wird **bis 2024** einerseits die Errichtung von Elektrolyseuren mit einer Leistung von mindestens **6 GW** sowie die **Erzeugung von bis zu einer Million Tonnen (1 Megatonne) Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen** unterstützt (81). Nur zur Erinnerung im Jahr 2019 wurden nur 0,4 Megatonnen „grüner“ und „blauer“ Wasserstoff weltweit erzeugt und die Produktionskapazität liegt bei unter 100 MW weltweit – diesbezüglich ist also noch einiges zu tun.
   Die Elektrolyseure sollten in der Nähe von Anlagen mit hohem Bedarf, etwa bei Raffinerien, chemischen Produktionen und Stahlwerken, errichtet werden. Wenn es möglich ist, sollen auch bestehende Wasserstoffproduktionsanlagen, die hauptsächlich mit Erdgas operieren, ersetzt werden. Zudem ist geplant, in dieser Phase auch das Wasserstoff-Tankstellennetz auszubauen und die Planung eines Wasserstoff-Leitungsnetzes voranzutreiben.
2. Im Zeitraum **2025-2030** sollen laut Plan der EU Elektrolyseure mit einer Mindestleistung von **40 GW** in der EU installiert und bis zu **10 Megatonnen Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen** in der EU produziert werden (82). Zusätzlich sollen **40 GW Produktionskapazität in Nachbarländern** der EU installiert werden, mit dem Ziel diesen Wasserstoff in die EU zu importieren (83). Bei den geplanten Produktionskapazitäten steht man vor den gleichen Herausforderungen, wie bereits im vorherigen Absatz genannt: Wie ist der massive Ausbau zu bewerkstelligen und das nicht nur innerhalb der EU sondern auch hinsichtlich der Import-Kapazitäten?
   Die genannte Produktionsmenge von 10 Megatonnen kann erreicht werden, wenn es sich um die kumulierte Menge über fünf Jahre handelt. Es war leider aus dem Kommunikationspapier nicht ersichtlich, ob die Menge kumuliert oder jährlich zu verstehen ist. Denn, wie bereits erwähnt, rechnet die IEA mit einer weltweiten Gesamtproduktionsmenge von 7,92 Megatonnen im Jahr 2030.

3. Laut den Plänen der EU soll **ab dem Jahr 2030 „grüner“ Wasserstoff in all den Sektoren** eingesetzt werden, in denen die **Emissionen nur schwer gesenkt werden können** (84). Dazu zählen vor allem der Verkehr, in dem Wasserstoff oder die synthetischen Kraftstoffe (siehe E-Fuels) eingesetzt werden sollen (85). Außerdem sollen in diesem Abschnitt auch schon signifikante Fortschritte bei einem transeuropäischen Wasserstoff-Leitungsnetz gemacht sein (86).
4. Bis zum Jahr 2050 soll der **Wasserstoffanteil im europäischen Energiemix** von derzeit weniger als 2 % **auf 13 bis 14 % gesteigert** werden (87).

Weitere Details der europäischen Wasserstoffstrategie

Die EU-Kommission hat sich zudem Gedanken über die Lieferkette und die Rohmaterialien für die Gewinnung von Wasserstoff gemacht, denn 19 von 29 **Rohmaterialien** für Brennstoffzellen und Elektrolyseure sind in der EU **nicht vorhanden** (88).

Ein weiterer Satz im Papier der EU-Kommission hat mich neugierig gemacht:

“A life-cycle approach is also needed to minimize the negative climate and environmental impacts of the hydrogen sector”. (89)

Stimmt, **Wasserstoff ist ein indirektes Klimagas**, da es die Verteilung von Methan und Ozon in der Atmosphäre stört. Es wird bei der Produktion, der Lagerung und Verteilung sowie der Verwendung von Wasserstoff zu **Leckagen** kommen. Je nach Menge dieser Austritte ist die klimaschonende Wirkung im Vergleich zu fossilen Technologien reduziert (90). Hinsichtlich der **Sicherheit** ist die Brennbarkeit von Wasserstoff zu berücksichtigen und größere Mengen sind für Menschen giftig (91).

Wo soll der Strom für diesen Wasserstoff herkommen?

Laut den Plänen der EU soll der Wasserstoff primär mit Strom aus Wind- und Photovoltaikanlagen hergestellt werden. Entsprechende Initiativen zum großflächigen Ausbau von Strom aus erneuerbaren Quellen werden ebenfalls vorangetrieben. Doch dann kommt die Einschränkung (92):

“In the short and medium term, however, other forms of low-carbon hydrogen are needed.”

Das bedeutet, bis diese Kapazität vorhanden ist, werden andere kohlenstoffarme Produktionsformen benötigt. Und hier sollten die Alarmglocken läuten. Denn die EU hat im November 2020 eingeräumt, dass auch **Wasserstoff als Atomstrom als CO_2-arm zu betrachten sei** (93), dagegen hat die grüne österreichische Umweltministerin Gewessler allerdings im Dezember 2020 ein Veto eingelegt (94).

Das Veto ist als berechtigt anzusehen, da Atomstrom nur im stabilen, laufenden Betrieb klimaneutral ist. Rechnet man Bau, Anreicherung und Aufarbeitung der Brennstäbe sowie eine irgendwann fällige Entsorgung dazu, ist Kernenergie kaum weniger klimaschädlich als Kohleenergie. Dazu kommt noch das große Maß an Unsicherheit im Betrieb.

Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen

Dazu rechnet die EU-Kommission mit einem notwendigen Zubau der erneuerbaren Energiequellen bis zum Jahr 2050 in der Höhe von 25 %, um diese Menge an Wasserstoff überhaupt nachhaltig produzieren zu können (95). Kann das klappen?

Grundsätzlich ja. Vom Jahr 2013 bis zum Jahr 2019 stieg der regenerative Anteil am Stromverbrauch über alle 27 EU Länder gerechnet von 26,85 auf 34,08 %, also um knapp 27 % (96). Wie gesagt, handelt es sich hierbei nur um den Stromverbrauch. Andere Bereich wie Wärme oder Mobilität sind ebenfalls energieintensiv und sollen auch emissionsärmer gemacht werden.

Daher sollte man auch den regenerativen Anteil am Bruttoenergieverbrauch (97) betrachten: Im Jahr 2019 betrug der Anteil erneuerbarer Energie am Bruttoenergieverbrauch im Schnitt der 27 EU-Länder 19,73 % (Österreich 33,6 %, Deutschland 17,3 %) (98).

Somit basieren über 80 % unseres Energieverbrauchs in Europa nach wie vor auf fossilen Brennstoffen. Wasserstoff mag zwar Teile davon zu substituieren, aber dann ist die Frage, wo die erneuerbare Energie dafür herkommt.

5.3. Deutschlands Pläne

Die größte Volkswirtschaft der EU hält das Thema Wasserstoff besonders hoch. Schon im Jahr 2019 verlautbarte der Energie- und Wirtschaftsminister Peter Altmaier, dass

„Deutschland die Wasserstoffnation Nummer 1 werden“

wolle (99). Am 10. Juni 2020 war es dann soweit, die „Nationale Wasserstoffstrategie“ wurde vorgestellt und Herr Altmaier wiederholte die oben genannte Aussage und ergänzte:
„Er (Anm. Wasserstoff) wird als Energieträger der Zukunft sowohl in Deutschland als auch weltweit einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten. Dabei wird Deutschland eine Vorreiterrolle einnehmen, wie wir es vor 20 Jahren bereits mit der Förderung der erneuerbaren Energien haben“. (100)

Exkurs: Deutschland und die erneuerbaren Energien

Zum Thema der Energiewende in Deutschland könnte ich jetzt über mehrere Seiten referieren, doch das erspare ich Ihnen an dieser Stelle und versuche mich kurz zu fassen. Ja, Deutschland war bei der erneuerbaren Energie einmal Markt- und Technologietreiber. Anstelle das ursprünglich gut gemachte EEG (Erneuerbare Energien Gesetz) maßvoll anzupassen, wurde im Sommer **2011 ein massiver Schnitt** bei den Photovoltaik-Förderungen beschlossen, der nur neun Monate später bereits in Kraft trat.

In der Realität brachte das das Aus für viele Projekte, da die Rahmenbedingungen wesentlich verändert waren. Folglich brach der Zubau an PV-Anlagen von 2012 auf 2013 um etwa die Hälfte ein und viele Unternehmen verschwanden. Da im Bereich Photovoltaik – etwa im Vergleich zu einem großen Wasserkraftwerk – eher kleinteilig gearbeitet wird, **verschwanden binnen eines Jahres (!) etwa 50.000 Jobs aus der Branche** (101). Die bis dahin mühsam in Deutschland aufgebauten Produktionslinien und das Wissen aus Entwicklung, Projektierung und Monitoring gingen teilweise verloren. Der jährliche Zubau an PV-Anlagen ging zwischen 2010 und 2017 um 80 % zurück (102). Wenn man diesen Aktionismus mit dem deutschen Kohleausstieg mit Restlaufzeiten bis 2038 vergleicht, wirkt es wie ein Hohn.

Danach ruhte sich die deutsche Politik auf dem bis dahin geschaffenen Erfolg aus. Mehrere EEG-Novellen folgten und **„verschlimmbesserten" das System** nur. Dazu kamen teilweise Verhinderungsplanungen, wie die bayrische 10H-Regelung für Windanlagen, oder schlichtes Chaos beim Netzausbau – für das übrigens auch Herrn Altmaier politisch verantwortlich ist. Mittlerweile sind auch viele Jobs in der Windindustrie bedroht und im Vergleich zum Jahr 2011 gab es im Jahr 2018 27 % weniger Arbeitskräfte im Bereich der erneuerbaren Energie oder anders gesagt mehr als 100.000 – zum Teil hochqualifizierte – Jobs wurden vernichtet (103). In dieser Zahl sind die betroffenen Zulieferbetriebe nicht mitgerechnet, hier spricht man branchenintern von etwa weiteren 400.000 Arbeitsplätzen.

Wenn daher jetzt von einer **Vorreiterrolle beim Wasserstoff** geredet wird, ziehe ich **unweigerlich Parallelen zur erneuerbaren Energie**. Das mag alles schön klingen, aber man muss es auch längerfristig durchziehen. Und ohne den Strom aus den erneuerbaren Energien wird das mit dem „grünen" Wasserstoff leider nichts werden. Entschuldigung, bei dem Thema werde ich emotional, da ich auch zu den 100.000 Arbeitskräften zählte. Aber wie soll die Vorreiterposition in Deutschland genau geschaffen werden?

Deutschlands „Nationale Wasserstoffstrategie“ (NWS)

Die Nationale Wasserstoffstrategie wurde im Juni 2020 vorgestellt und ist an die Positionen der EU angelehnt. Das Ziel ist es „grünen“ Wasserstoff zu erzeugen und damit das „Ziel der Treibhausgasneutralität in 2050“ zu erreichen, in dem der **Stoff wichtiger Teil des deutschen Energiesystems wird**. Es ist in dem Papier auch von Sektorkopplung, also der sinnvollen Verknüpfung verschiedener Anwendungen, die Rede und dass vor allem Branchen mit hohem Treibhausemissionen dekarbonisiert werden sollen (104).

Da momentan – wie bereits ausgiebig erläutert – **viel zu wenig „grüner“ Wasserstoff produziert wird, soll in den kommenden zehn Jahren auch „blauer“ oder „türkiser“ Wasserstoff zum Einsatz kommen** (105). Das klingt recht pragmatisch und unkompliziert, doch zur Erinnerung: „Türkiser“ Wasserstoff entsteht durch Methanpryrolyse bei der das CO_2 aus dem Methan als Feststoff übrigbleibt. Zwei von drei dieser **Pyrolyseverfahren sind noch im Versuchsstadium** und vom großflächigen Einsatz weit entfernt. Beim „blauen“ Wasserstoff wird das CO_2, das bei der Aufspaltung der fossilen Grundstoffe übrigbleibt, abgeschieden und soll eingelagert werden (Carbon Capture and Storage, kurz CCS). Über **CCS-Versuchsanlagen** ist man hier auch noch nicht hinausgekommen (106).

Mengenlehre

Derzeit werden in Deutschland jährlich 55 TWh Wasserstoff verbraucht (107). Bis 2030 wird ein Zuwachs auf 90 bis 110 TWh p.a. in Deutschland prognostiziert (108). Um einen Teil dieses Bedarfs regenerativ decken zu können, soll bis 2030 eine Produktionskapazität von 5 GW errichtet werden. Damit könnten etwa 14 TWh Wasserstoff erzeugt werden, was dann 12 bis 15 % des prognostizierten Bedarfs entspricht. Man sieht auch hier – der Weg zur Nachhaltigkeit ist weit.

Anschließend sollen – wenn möglich – bis 2035 ansonsten bis 2040 weitere 5 GW „grüne“ Wasserstoffproduktionskapazität errichtet werden. Bis 2050 muss die Produktion noch weiter massiv ausgebaut werden, denn das BMWi rechnet allein für die Umstellung der Stahlproduktion mit 80 TWh Wasserstoff und für die Umstellung der deutschen Raffinerie- und Ammoniakproduktion weitere 22 TWh benötigt (109). Über den gesamt prognostizierten Bedarf 2050 gibt es in der NWS keine Angaben. Die Szenarien reichen von 250 bis 800 TWh (110).

Daher sollen parallel zur Wasserstoffproduktion auch die dafür nötigen Kapazitäten bei der „Offshore- und Onshore-Energiegewinnung“ entstehen um den Strombedarf (teilweise) abzudecken. Als erster Schritt plant man 20 TWh erneuerbarer Strom bis 2030. Ist das viel?

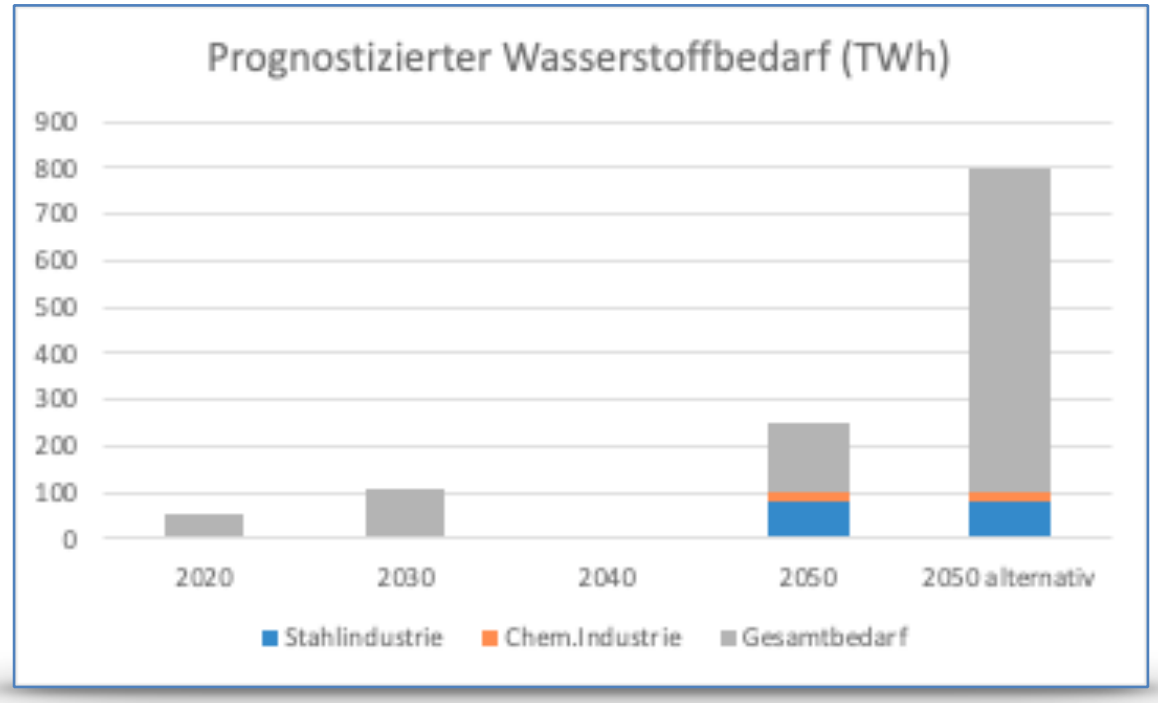


Abb. 5: Prognostizierte Wasserstoffbedarf (TWh) in Deutschland 2020-2050
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf der „Wasserstoff-Roadmap für Deutschland“ (111), 2021

Zum Vergleich: Im Jahr 2019 wurden in Deutschland 455 TWh Energie (Strom, Wärme, Kraftstoffe) erneuerbar erzeugt, der Stromanteil betrug davon 53 %, etwa 241 TWh (112). Somit entspräche der zusätzliche Stromaufwand für die geplante „grüne“ Wasserstoffproduktion im Jahr 2030 einem Zubau von 8,3 %, für die nächsten 5 GW ebenso.

Zwischen 2013 und 2019 konnte Deutschland den regenerativen Anteil der Stromproduktion um etwas mehr als 60 % steigern (113). Mit einem ähnlichen Zuwachs wäre es möglich die in den ersten beiden Abschnitten geplanten Elektrolyse-Kapazitäten von 10 GW mit Strom aus erneuerbaren Quellen zu versorgen. Dann wären 28 TWh Wasserstoff „grün“ produziert, das entspräche **etwa 25 % des Bedarfs im Jahr 2030.**

Nimmt man die Menge von 102 TWh für Stahl- und chemische Industrie her bzw. den prognostizierten Gesamtwasserstoffverbrauch im Jahr **2030** (90 – 110 TWh) **über alle Sektoren**, werden etwa 146 TWh erneuerbare Energieproduktionskapazitäten benötigt. Dann würden **60 % der gesamten heutigen regenerativen Stromproduktion** aus Deutschland für die Produktion dieser Menge an Wasserstoff verwendet werden.

Da aber im Jahr **2050** ein Verbrauch von 250 bis sogar 800 TWh Wasserstoff prognostiziert wird, ist **nicht klar wie die dafür nötige Energie aufgebracht werden soll**. Und hier ist dezidiert noch nicht der Energiebedarf von Power to X eingerechnet (114).

Jedenfalls stellt der deutsche Staat erstmals 9 Mrd. Euro für das Thema Wasserstoff bereit, davon sollen 7 Mrd. in den „Markthochlauf von Wasserstofftechnologien in Deutschland“ investiert werden. Die restlichen 2 Mrd. sollen für internationale Projekte zur Verfügung stehen (115).

Deutschlands globale Führungsrolle

Was aus der NWS heraussticht, sind mehrmalige Hinweise, dass Deutschland auch in Zukunft **„ein großer Energieimporteur“** bleiben wird. Aber auch beim Wasserstoff wird Deutschland den größten Teil importieren müssen (116). Wie passt das zur angekündigten Führungsrolle? In der NWS heißt es

„Deutschland hat jetzt die Chance, im internationalen Wettbewerb eine wichtige Rolle bei der Entwicklung und dem Export von Wasserstoff- und Power-to-X-Technologien (PtX) einzunehmen.” (117)

Klar, es geht um einen **Milliardenmarkt** und man – also viele Player in der Industrie – versprechen sich davon neue Chancen. Darauf kommen wir etwas später noch ausführlich zu sprechen.

Wenn man die **Datenbank der weltweiten Wasserstoffprojekte** der IEA seziert, zeigt sich die bis zum Jahr 2020 installierte Produktionskapazität vor allem in Deutschland, gefolgt von Japan und Österreich befindet (118). Bevor Sie jetzt in Jubelstürme ausbrechen, wir sprechen hier von etwas über gesamt **50 MW Kapazität**, damit sind wir von den oben angeführten Bedarfsmengen noch Lichtjahre weit entfernt.

Der deutsche Optimismus stützt sich allerdings auf diese Zahlen, da die Kompetenzen im Bereich der Brennstoffzelle im KFZ-Bereich, wie bereits gezeigt, in Asien liegen und diese Hersteller derzeit auch im Bereich Schwerlastfahrzeuge die Nase vorne haben. Die deutsche Autoindustrie pocht daher ganz stark auf den Bereich Power to X, was allerdings vom energetischen Standpunkt aus die Schlechteste aller Lösungen darstellt. **Ob der momentane Vorsprung bei den Wasserstoffproduktionsanlagen auf lange Sicht wirklich eine weltweite Führungsrolle bringen wird, muss hinterfragt werden**, denn andere Nationen, wie Kanada, Korea oder Japan, sind ebenfalls bereits auf den Wasserstofftrend aufgesprungen und bauen rasch Kapazitäten und damit Wissen auf (119).

5.4. Österreichs Pläne

Bei den Recherchen zu diesem Abschnitt musste ich etwas lachen, denn ich stieß auf die Ankündigung von Bundeskanzler Kurz im 2019:

„Österreich soll zur Wasserstoffnation Nummer 1 werden." (120)

Das kommt mir irgendwoher bekannt vor… Seit 2019 ist in dieser Hinsicht in Österreich nicht allzu viel passiert. Die vorherige Regierung war im Umweltministerium nur auf Marketing bedacht, bis auf schöne Ankündigungen ist nichts geblieben. Etwa wurde Österreich in dieser Zeit von der EU gerügt. Wir haben im #RestartThinking Blog berichtet, der Nationale Energie- und Klimaplan (kurz NEKP) wurde als nicht genügenden zurückgewiesen und musste überarbeitet werden (121).

Dann kam der Ibiza-Skandal, die Neuwahl und seit Anfang 2020 muss der grüne Koalitionspartner die Versäumnisse aus früheren Perioden ausbaden – und das noch dazu während eine weltweite Pandemie herrscht. Daher wurde die österreichische Wasserstoffstrategie auf 2021 verschoben.

6. Keine falschen Illusionen

Auch wenn die Pläne toll klingen, dürfen wir uns keine falschen Illusionen über Wasserstoff machen:

- Die Herstellung von Wasserstoff ist immer **energieaufwändig**. Bei der Elektrolyse sind 4,3 –4,9 kWh Energie pro m^3 Wasserstoff nötig (122).
- Derzeit werden 99,3 % des Wasserstoffs (derzeitige Gesamtmenge knapp 70 Megatonnen p.a.) aus fossilen Energieträgern hergestellt und nur **0,7 % aus nachhaltigen Quellen** („grüner“ und „blauer“ Wasserstoff“).
- Es gibt **keine – auch nur annähernd – ausreichenden Kapazitäten** um die bisherigen Sektoren, die Wasserstoff im großen Stil verwenden (Raffinerien, Chemische Industrie, Stahlherstellung) zu dekarbonisieren.
- **Bis 2030** ist auch nicht viel Besserung in Sicht. Wie bereits beschrieben, rechnet die IEA mit 7,92 Megatonnen „grünem“ und „blauem“ Wasserstoff im Jahr 2030 (123). Im Vergleich zum heutigen Verbrauch wären das **11,3 % aus nachhaltigen Quellen**.
- Viele Herstellfahren oder auch die Brennstoffzelle sind noch im **Versuchsstadium**.
- Zudem fehlt die komplette **Infrastruktur** für die großflächige Bereitstellung (Speicherung, Leitungen bzw. Transport).
- Für weitere zukünftige Anwendungen, wie Mobilität oder den Wärmesektor, und den damit steigenden H_2-Bedarf **reichen die Mengen bei weiten nicht**.
- Neben den fehlenden Kapazitäten zur Wasserstoffherstellung sind die **benötigten Mengen an Strom aus erneuerbaren Energien nicht vorhanden**.
- Der Ausbau der erneuerbaren Energien hinkt im Vergleich zu den fossilen Energieträgern hinterher. Laut der IEA-Energiebilanz wurden von den weltweit produzierten Energiemengen im Jahr 2018 gerade mal 13,67 % regenerativ hergestellt (124).
- **Atomstrom ist keine Alternative**.
- „**Grünes Gas**“: Die Verwendung Biogas oder Biomasse-Pyrolyse-Anlagen zur Wasserstoffherstellung lenkt vom Thema ab. Das Gas ist **nur marginal vorhanden** und wird hauptsächlich verstromt bzw. die Pyrolyse-Anlagen sind noch größtenteils im **Versuchsstadium**.

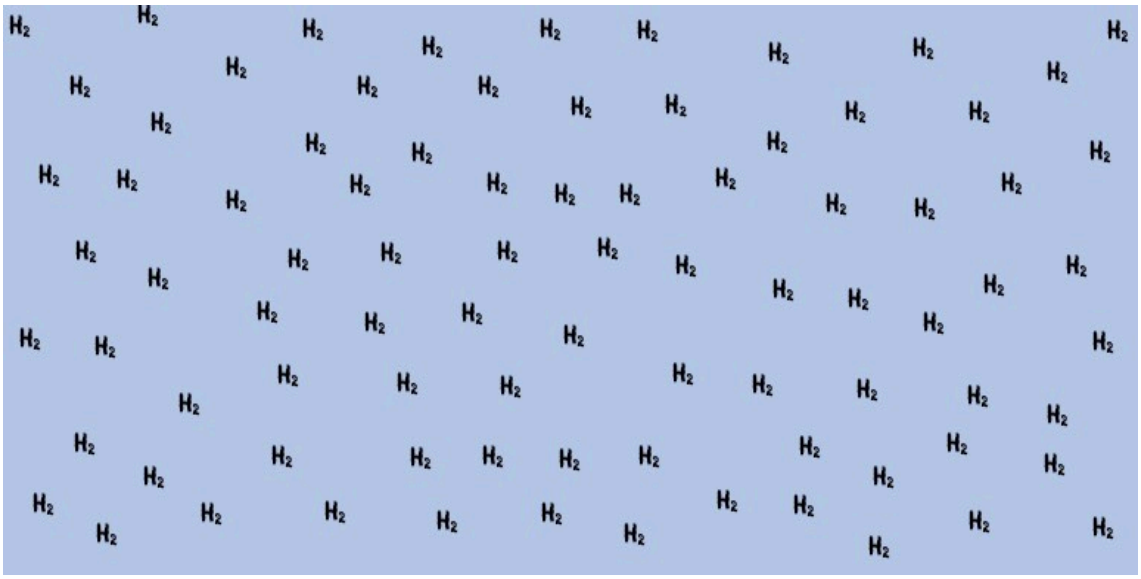
7. Was bei der Wasserstoff-Diskussion gerne vergessen wird

Neben den oben genannten „großen“ Themen, wie dem Stand der Technik und der notwendigen Energie, gibt es noch **weitere Einflussfaktoren**, die das Projekt „Wasserstoff“ maßgeblich beeinflussen.

- Wasserstoff ist ein **indirektes Klimagas** und beeinflusst das chemische Gleichgewicht in den oberen Luftschichten unserer Atmosphäre. Leckagen über die gesamte Wasserstoff-Prozesskette – von der Herstellung, dem Transport und der Lagerung bis hin zur Verwendung – sind daher einzurechnen und bei der Kalkulation der CO_2-Ersparnis im Vergleich zu fossilen Technologien zu berücksichtigen (125).
- Ein Satz aus der deutschen Wasserstoffstrategie brachte mich zum Schmunzeln (126): *„Negativereignisse und Unfälle können die Akzeptanz der Wasserstoff-technologie gefährden.“* Stimmt, Wasserstoff ist reaktionsfreudig und bei unsachgemäßer Handhabung kann es bis hin zu **Explosionen** kommen. Zudem sind größere Mengen sind für Menschen **giftig** (127).
- Etwa **zwei Drittel der benötigten Rohmaterialien** für Brennstoffzellen und Elektrolyseure sind in der EU nicht vorhanden und müssen entsprechend importiert werden (128).
- Außerdem braucht man für die Elektrolyse entsprechende **Wassermengen** (9 Liter pro Kilo Wasserstoff). Bei der derzeitigen jährlichen Produktionsmenge von 70 Megatonnen pro Jahr, wären dafür 617 Millionen Kubikmeter Wasser nötig (129) – oder anders gesagt fünfmal das maximale Volumen des Sylvensteinspeichersees an der Grenze zwischen Tirol und Bayern bei Lenggries (130).
- In Meeresnähe kann Salzwasser verwendet werden, das aber vorher mittels zusätzlichem **Energieeinsatz** noch entsalzt werden muss (3-4 kWh Energie pro m^3 Wasser). Ohne **Entsalzung** kann es zur Korrosionsschäden an den Anlagen kommen (131).
- Das bringt uns zu den weiteren **Standortfragen**: Soll Wasserstoff wieder zentral hergestellt und anschließend verteilt werden oder ist die dezentrale Herstellung und Nutzung doch das bessere Konzept? In der Stromerzeugung dominierten jahrzehntelang Großkraftwerke bis die dezentralen Anlagen für Windenergie, Photovoltaik und Biomasse den Markt durcheinander wirbelten. Hier werden sich sicherlich wieder Lobbyisten für große Player in Stellung bringen, denn mit Großanlagen ist viel Geld zu machen, obwohl dezentrale Strukturen (local-for-local) wesentlich effizienter sind.

- Je nach Erzeugungsstrategie (zentral/dezentral) müssen die **Transportwege** entwickelt werden: Beim Import mit Schiffen oder Pipelines **fehlt die Infrastruktur** für den Transport über lange Wege.
- Um den gasförmigen Wasserstoff besser transportieren zu können, muss dieser **komprimiert oder sogar verflüssigt** werden. Dazu braucht man allerdings **Energie** – genauer gesagt 12 bzw. 30 % des Wasserstoffheizwertes (132).
- Aber auch bei **Kurzstrecken ist die Infrastruktur nicht vorhanden**.
- Die **Nutzung der bestehenden Gasinfrastruktur ist nur eingeschränkt möglich**, denn das Beimischen von Wasserstoff zum Erdgas (*englisch blending*) ist wenig effizient und vermindert den Wert des Wasserstoffs. Außerdem wird die Qualität des derzeit verwendeten Gases verändert und es kann zu Problemen bei der – vor allem länderübergreifenden – Gasinfrastruktur und bei den Anwendungen der Endkonsumenten kommen (133).
- Wie sehen die **Standards** aus, wenn man den Wasserstoff **importiert**? Wie kann man sicherstellen, dass es sich um nachhaltige Produktion handelt? In Drittländern, wie in Nordafrika oder dem Nahen Osten, ist der Ausbau von erneuerbaren Energiequellen noch nicht in ausreichendem Maß vorangeschritten um den eigenen Energiebedarf decken zu können. Zudem kämpfen diese Länder mit Wasserknappheit. **Es bringt daher nichts Wasserstoff aus fossilen Quellen über weite Strecken zu importieren**.
- Wie sieht es mit der **politischen Stabilität der Länder** aus? Es ist definitiv nicht sinnvoll, sich von einem neuen **Rohstoff abhängig** zu machen. Das sollten wir schon bei Gas aus Russland oder dem Streit der OPEC Staaten gelernt haben.

Sie sehen, dass Thema Wasserstoff ist komplex und viele der Punkte sind nicht schnell zu lösen.



8. Worum geht es wirklich?

Der von mir sehr geschätzte Volker Quaschning, Professor für Regenerative Energiesysteme an der HTW Berlin, bringt es auf den Punkt. Quaschnig bezeichnet die deutsche Wasserstoffstrategie als „reines Ablenkungsmanöver“, denn von einer Überkapazität an erneuerbaren Energieträgern sind wir weit entfernt und ohne diese wird es mit dem „grünen“ Wasserstoff nichts werden. Der Wissenschaftler hält die derzeitigen Diskussionen für eine „Luftnummer“. In einem sehr lesenswerten Interview mit der Plattform Watson führt Quaschnig unter anderem aus:

„Wenn wir den Klimaschutz ernst nehmen würden, würden wir den Ausbau der erneuerbaren Energien vorantreiben. Aber man baut lieber nicht, will stattdessen klimaneutralen Wasserstoff aus Afrika holen und redet nicht darüber, ob das realistisch ist.“ (134)

Die Probleme unseres Wirtschaft- und Energiesystems in Bezug auf die Klimakrise sind bekannt:

Wir leben auf zu großem Fuß und
nehmen uns damit selbst unsere ökologische Nische.

Die Erkenntnis des anthropogenen Klimawandels gibt es seit mehr als 40 Jahren. Lange Zeit wurden diverse Studien als Panikmache abgetan oder schlichtweg geleugnet. Das hat sich mittlerweile etwas gebessert. Dennoch wird nach wie vor von der technologischen Lösung gesprochen – dass zur richtigen Zeit die richtige Lösung kommen wird. Das passiert nicht! Wir kommen um **Veränderungen** nicht herum. Diese müssen nicht immer negativ sein, wie ich bereits im Artikel *„Was wir wirklich brauchen“* beschrieben habe.

Derzeit ist allerdings zu befürchten, dass der Wasserstoffhype als bequeme Ausrede genommen wird, um wieder nichts gegen die Klimakrise zu tun. Damit verlieren wir noch mehr Zeit.

8.1. Das oberste Ziel

Auch wenn es sich noch immer nicht an alle herumgesprochen hat:

Unser oberstes Ziel muss es sein, unseren Ressourcen- und Energieverbrauch zu reduzieren, sodass wir Klimaneutralität erreichen und die Umweltzerstörung und den Artenschwund stoppen.

Kurz gesagt: Weniger von allem. Bevor jetzt einige der Leser:innen Schnappatmung bekommen. Denken Sie an Ihre Waage – weniger muss nicht schlechter sein.

Die weltweit produzierten Energiemengen bestehen zu über 86 % aus fossilen Energieträgern (135) und dementsprechend zu hoch ist der Ausstoß an Klimagasen. An dieser Menge sieht man, dass Wasserstoff alleine das Problem nicht lösen wird. Das Zitat von Claudia Kemfert, Leiterin der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung (DIW Berlin) und Professorin für Energiewirtschaft und Energiepolitik, finde ich besonders zutreffend:

„*Wasserstoff ist der Champagner unter den Energieträgern*. (136)“

Eine Veränderung unseres Ressourcen- und Energieverbrauches ist unumgänglich

Das bedeutet **Reduzieren → Anpassen → Ersetzen** – genau in dieser Reihenfolge.

Reduzieren	Als wichtigste Maßnahme muss der absolute Verbrauch gesenkt werden.	Die größten Energieverbraucher sind v.a. die Bereiche Industrie, Verkehr und Haushalte (137)
Anpassen – Effizienz	Anschließend folgt die sinnvollere Verwendung des Bestehenden.	Etwa müssen die Lastspitzen von erneuerbaren Energien gespeichert anstatt abgeregelt werden. Auch sparsamere Anwendungen und Geräte sind ein wesentlicher Beitrag.
Ersetzen	Hier ist der massive Ausbau der erneuerbaren Energien anstatt von fossilen Energieträgern nötig. In den Bereichen in denen kein Ersatz möglich ist (z.B. Stahlindustrie) kann Wasserstoff zur Anwendung kommen.	Verwendung von „grünem“ statt „grauem“ Wasserstoff.

Tab. 2: Veränderung des Ressourcen- und Energieverbrauchs
Quelle: Eigene Darstellung, 2021

Die Einsparungsmöglichkeiten sind groß

Die Deutsche Energieagentur (Dena) geht im Rahmen der Initiative Energieeffizienz von **Einsparungspotentialen** im öffentlichen und privaten Sektor in Deutschland von **20 bis teilweise 50 %** aus (138). Über den **Verkehrsbereich** und die möglichen Veränderungen (z.B. Nutzen von E-Mobilität und dem Ausbau des öffentlichen Verkehrs) schreiben wir im #RestartThinking Blog seit Jahren. Ein wesentlicher „Energiefresser" ist der Bereich **Wärme und Kälte**, der in der EU etwa 50 % des Endenergiebedarfs ausmacht und größtenteils über fossile Energieträger gedeckt wird. Das betrifft einerseits den industriellen Bereich, als auch die Haushalte (139). Veränderte Vorgaben, wie etwa das Verbot von Ölheizungen in österreichischen Neubauten ab dem Jahr 2020 (140), sind ein wesentlicher Schritt in die richtige Richtung.

Auch die **Sektorkopplung** ist ein wesentlicher Beitrag zur Verbesserung, obwohl sie noch eher sträflich behandelt wird. Unter Sektorkopplung versteht man die sinnvolle Vernetzung verschiedener Bereiche oder Anwendungen – also **Elektrizität, Wärme, Verkehr und Industrie**. Wir betrieben beispielsweise Sektorkopplung indem wir mit unserer Photovoltaikanlage sowohl Strom (Elektrizität) als auch Wasser für die Heizung und Warmwasserbereitung wärmen (Wärme) und zudem noch die Batterie des Elektroautos laden (Verkehr). Ein anderes Beispiel ist etwa die Nutzung von Abwärme aus Industrieprozessen um nahegelegene Gebäude zu heizen oder auch zu kühlen.

Der notwendige **massive Ausbau der erneuerbaren Energie ist unbestritten** und schon ausreichend diskutiert worden. Dass die Energiegestehungskosten der Erneuerbaren im Vergleich zu fossilen Energieträgern wesentlich niedriger sind, ist schon länger bekannt (141). Es spricht einfach kein logischer Grund gegen dezentrale Energieversorgung mit entsprechender **lokaler Wertschöpfung** und damit einhergehender **Reduktion der Energieimporte**. Ja, die Regelung der Stromnetze ist aufwändiger. Hier kann Wasserstoff zur Lastregelung einen sinnvollen Beitrag leisten. Der entsprechende Aus- bzw. Umbau der **Energienetze** muss in diesem Bereich entsprechend berücksichtigt werden.

8.2. Anreize – wie kann das gelingen?

Diese Maßnahmen sind nicht neu. Warum ist seit so vielen Jahren nicht wirklich etwas passiert? **Das Problem ist, ohne finanzielle Anreize geht nicht viel voran**. Die Freiwilligkeit hat uns in den letzten zwei Jahrzehnten nicht wirklich weitergebracht. Es darf einfach nicht mehr kostenlos sein, die Umwelt zu verschmutzen. Sie und ich zahlen Gebühren, damit unser Müll abgeholt und entsorgt wird. Warum ist aber der Ausstoß von Treibhausgaben noch immer beinahe „gratis"?

Das ändert sich langsam. **Deutschland** hat beispielsweise Anfang 2021 eine **CO_2-Steuer auf Treibstoffe** eingeführt. Allerdings ist die Starthöhe von 25 Euro pro Tonne CO_2 lächerlich gering und selbst im Jahr 2025 sind die 55 Euro pro Tonne CO_2 noch immer viel zu niedrig bemessen (142). Andere Länder, wie Schweden oder die Schweiz, sind da schon wesentlich weiter.

In der **Schweiz** beträgt die **CO_2-Abgabe auf fossile Brennstoffe** derzeit 96 Franken pro Tonne CO_2. Die Abgabe wurde 2008 eingeführt und seitdem schrittweise erhöht. Dazu gibt es einen klaren Fahrplan, wenn die nationalen Einsparungsziele innerhalb eines bestimmten Zeitraumes nicht erreicht werden, steigt die Abgabe auf den nächsthöheren Betrag. Anschließend wird der Zeitraum wieder evaluiert, usw. Damit hat man Planungssicherheit. Begleitet wurde die Abgabe von einer ökosozialen Reform, denn etwa zwei Drittel der Erträge der CO_2-Abgabe gehen an die Bevölkerung zurück.

Außerdem wird mit dem Geld die Forschung neuer Technologien gefördert. Unternehmen können sich auch von der CO_2-Abgabe befreien lassen, wenn sie einen klaren Fahrplan mit Reduktionszielen vorlegen und diesen auch einhalten (143). Ja, das wird kontrolliert!

8.3. Die Industrie geht nicht unter

Nein, der Untergang der Industrie kommt nicht. Es wird aber endlich Zeit, dass verantwortungsvolle Unternehmensführung vor dem Shareholder Value kommt. **Seit ewigen Zeiten werden Profite privatisiert und Aufwände sozialisiert**. Unternehmen müssen ihren Anteil leisten, denn schließlich profitieren sie von Luft und Wasser ohne Verschmutzung und unbelasteten Böden – genauso wie von gut erhaltener Infrastruktur oder Mitarbeitenden, die eine ordentliche Schulbildung haben. Doch dazu müssen die Unternehmenssteuern steigen, denn die Arbeitnehmer:innen und kleinen Unternehmen, die keine Möglichkeiten zur „Steuergestaltung“ haben, zahlen heute schon den Hauptanteil.

Zu diesem Thema kann ich Ihnen den #RestartThinking Podcast von Ökonomie-Physiker Mario Buchinger empfehlen:

8.4. Die Auswirkungen der Klimakrise

Die Kosten der Klimakrise werden ein Vielfaches von dem ausmachen, was wir dagegen investieren müssen. Diese Weisheit ist seit dem Stern Report (*Stern Review on the Economics of Climate Change*) (144) im Jahr 2006 bekannt, aber noch nicht überall durchgesickert. Im April 2021 ist eine Berechnung der Swiss Re, einem der größten Rückversicherer weltweit, erschienen, dass die **Folgen der Klimakrise bis 2050 die Weltwirtschaft 23 Billionen Dollar kosten werden** (145). Wenn das jetzt nicht ein Anreiz wäre…

Anscheinend sind viele von uns ohne Preisschild in Form von Abgaben oder Strafen nicht in der Lage das Verhalten zu ändern. Aber vielleicht hilft diese Denkweise: **Die Investitionen in Klimaschutzmaßnahmen sind nicht „weg“** – denn durch das Geld können neue und zukunftsfähige Sektoren entstehen, die wiederum Arbeitsplätze schaffen. Im Ausbau von erneuerbaren Energien und Klimatechnologien liegt die Zukunft.

8.5. Positive Effekte für Staaten

Hier schließt sich der Kreis zum Wasserstoff und zu den erneuerbaren Energien. Staaten, die verstanden haben, dass Investitionen in die emissionsfreie Zukunft sinnvoll sind, werden Vorteile haben.

- Sie können **Standards** (ähnlich wie die *„DSGVO made in Europe“* als Qualitätszeichen bei Datenschutz) **setzen**
- und neue Sektoren mit **lokaler Wertschöpfung** aufbauen.
- Zudem **reduziert** man die **Importabhängigkeit** von anderen Staaten.
- Die **Förderung emissionsärmerer Sektoren**, wie etwa Dienstleistungen, ist ein Erfolgsfaktor der Zukunft. Gerade in der Covid19-Pandemie hat man gesehen, dass menschenzentrierte Leistungen immens wichtig sind.
- Sektoren, wie **Landwirtschaft oder Bauwirtschaft dürfen nicht vergessen** werden, denn auch diese haben massive Auswirkungen (zu hoher Düngemitteleinsatz, Zerstörung des Regenwaldes und anderer sensibler Gebiete wie Feuchtgebiete, Emissionen bei Brandrodung, verlorene CO_2-Speicher, Verlust der Biodiversität, Ausbreitung von Seuchen und Monokulturen, usw.).
- Die **öffentliche Nachfrage** nach bestimmten Produkten oder Kriterien, ist dabei ein wichtiger Hebel. Was spricht dagegen, bei öffentlichen Ausschreibungen klimaneutrale Produkte vorzugeben oder nur Unternehmen mit Treibhausgasbilanzierung zu berücksichtigen?
- **Neue Messkriterien** sind nötig und Staaten, wie Neuseeland, zeigen es bereits: Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) ist nicht der Weisheit letzter Schluss. Wie wäre es mit einem Glücksindex (Neuseeland, Bhutan) oder tatsächlich verpflichtenden CO_2-Obergrenzen (Schweiz).
- Die **Politiker:innen und Medienvertreter:innen müssen anders kommunizieren**: Veränderung statt Verzicht. Es ist in unseren gesättigten Nationen nicht schlimm, etwas weniger zu konsumieren, zu reisen, zu essen … In vielen Fällen wäre das sogar von Vorteil (weniger Zucker, weniger tierische Produkte, weniger Autofahrten, etc.). Eines habe ich mittlerweile gelernt: Das Wort „Verzicht“ ist nicht negativ, aber leider kommt das es so bei vielen Menschen an. Daher sprechen wir gerne von V**eränderung, das ist eine Aktivität – die bewusste Entscheidung**. Dieses Bild muss von reichweitenstarken Personen und Medien transportiert werden.

8.6. Positive Effekte für Unternehmen

Wir treten mit unserem kleinen Unternehmen seit Jahren für unsere Unternehmensvision ein: *„Die Wirtschaft und die Gesellschaft handeln als Ehrbare Kaufleute*.“ Ja, der Weg dazu ist weit und ich weiß nicht, ob wir das erleben werden. Denn besonders in der Wirtschaft herrschen oft Gier und kurzfristige Sichtweisen.

Wir sind allerdings überzeugt, dass die **Unternehmen, die den Wandel durch die Klimakrise verstanden haben, langfristig zukunftsfähig sein werden**. Selbst wenn die oben angeführten staatlichen Maßnahmen nicht so rasch kommen, kann ein anderes Unternehmen schneller veränderungsfähig sein und damit die Messlatte setzen.

Es ist bereits eine **verstärkte Nachfrage nach klimaschonenden Produkten und Dienstleistungen** bemerkbar. Derzeit kann man sich als Unternehmen dadurch differenzieren und neue Kund:innen gewinnen. Außerdem sind ernst gemeinte Ambitionen ein **starkes Zeichen für motivierte Mitarbeitende**. Da die Nachfrage nach qualifizierten Fachkräften immer größer wird und junge Menschen verstärkt auf den Klimawandel achten, ist eine wirkliche grüne Unternehmensstrategie (ich rede hier nicht von „*Greenwashing*”) ein Wettbewerbsvorteil.

8.7. Die persönliche Ebene

Die Klimakrise tangiert uns alle, dazu kommt noch das Artensterben und Umweltverschmutzung. Allein diese drei Gründe sprechen für einen massiven Wandel auf staatlicher Ebene, im Unternehmensumfeld und im persönlichen Bereich. Und für alle, die sich noch immer nicht betroffen fühlen, möchte ich an dieser Stelle unsere liebe Freundin *Caroline Krohn* zitieren, die meinte:

“Klimaschutz ist wie Datenschutz – man merkt erst, was man hatte, wenn er weg ist.”

Das Bewusstsein für die notwendigen Veränderungen ist der erste Schritt um aktiv zu werden und selbst zu gestalten.

9. Fazit: Wasserstoff als Zukunftshoffnung

Die Klimakrise stellt uns vor noch nie dagewesene Herausforderungen. Die **Abkehr von fossilen Brennstoffen ist unumgänglich. Wasserstoff ist ein möglicher Beitrag**, aber keine allgemeine Lösung für unsere Probleme und daher nicht die Zukunftshoffnung, als die er immer dargestellt wird.

Das deutsche Ziel *„die Technologie zur Wasserstoffproduktion und -anwendung zu entwickeln und „Technologieführer“ zu werden*“ ist zu wenig. Es lenkt von den bisherigen Versäumnissen beim Ausbau der erneuerbaren Energien ab und diese **Technologiegläubigkeit verhindert wirkliche Verhaltensänderungen**. Denn die Hoffnung auf die Wasserstofftechnologie dient als bequeme Ausrede nichts zu verändern. Damit verlieren wir noch mehr Zeit, die wir nicht haben. Der Ökonomie-Physiker Mario Buchinger beschreibt es sehr schön:

“Wasserstoff ist nichts anderes als ein Image-Katalysator.”

Wasserstoffthemen, wie **Power-to-X** mit maximalen Wirkungsgraden von 12-20 %, sind jenseits aller Vernunft und dienen nur dazu **alte, lobbystarke Sektoren am Leben zu erhalten.**

Statt Zeit, Geld und Energie in die Wasserstofftechnologie zu stecken, gibt es bessere Hebel um wesentliche Massnahmen gegen die Klimakrise voran zutreiben. Der **Ausbau der erneuerbaren Energie, der Speicher- und Netzstruktur** und gleichzeitig die massive Reduktion der Emissionen sind die einzigen Lösungen. Das stärkt die jeweiligen Gebiete durch lokale Wertschöpfung und reduziert Importabhängigkeit. Wasserstoff kann ein Element zur Speicherung sein, aber wie man an der Elektromobilität sieht, ist der Batteriespeicher mittlerweile mehr als nur konkurrenzfähig.

All das wird es aber nur mit einer **Bepreisung von CO_2** und anderer klimaschädlicher Gase gehen, denn ohne finanzielle Konsequenzen gibt es leider aus kurzfristiger Sicht vieler Entscheider:innen keinen Anlass zur Umkehr. Daher begrüßen wir Initiativen, wie etwa die in Frankreich. Dort wurde der „Ökozid“, also ernste Fälle von Umweltschädigungen, unter Strafe gestellt. Die Strafen gehen in die Millionenhöhe und sehen sogar Gefängnisstrafen für die Verursacher vor (146). Der Vorstoß von Joe Biden die US Emissionen zum Stand 2005 zu halbieren und die Ankündigungen der EU die Emissionen um 55 % zu senken (147) sind absolut begrüßenswert. Jetzt geht es um die Umsetzung und wir werden ohne ein ausreichend hohes Preisschild keine wirkliche Veränderung einleiten können.

Egal ob Strafen oder CO_2-Preis: **Die Gelder dieser Maßnahmen kommen uns allen zu Gute!** Die Einnahmen des Staates können für Klimaschutzmaßnahmen oder andere Infrastrukturprojekte (Ausbau öffentlicher Verkehr, Gesundheitsversorgung, Bildung, etc.) verwendet werden. Die lokale **Errichtung von erneuerbare Energieanlagen bringt Arbeitsplätze und Steuereinnahmen. Wir müssen weg von dem Gedanken, dass Ausgaben in Bezug auf die Klimakrise verschwendet sind**. Wir profitieren davon – Sie und ich. Währenddessen werden häufig große Unternehmensgewinne mittels Steuertricks niedrig besteuert und kommen Einzelnen zu, die aber nicht in notwendigen Maße zur Gesellschaft beitragen.

Diese Haltung muss sich ändern und dass wir verstehen, dass **Veränderung positiv** ist. Es fühlt sich besser an, die Veränderung zu gestalten als nur zu reagieren. Daher machen Sie mit und verändern Sie Ihr eigenes Umfeld, wir alle können einen Beitrag leisten. In unserer *#RestartThinking Klimaaktion* haben wir bereits 30 Tage lang gezeigt, was man tun kann.

Gestalten Sie Ihren Weg zur Veränderungsfähigkeit!

#RestartThinking

10. Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
BIP	Bruttoinlandsprodukt
CCS	Carbon Capture and Storage
CO	Kohlenmonodix
CO_2	Kohlendioxid
DENA	Deutsche Energieagentur
DIW	Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung
DSGVO	Datenschutzgrundverordnung
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
f.	folgende
ff.	fortfolgende
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe
GW	Gigawatt
H	Wasserstoff rein
H_2	Wasserstoff gebunden
H_2O	Wasser
HTW	Hochschule für Technik und Wirtschaft
IEA	International Energy Agency, Internationale Energie Agentur
kWh	Kilowattstunde
LKW	Lastkraftwagen
LNG	Liquefied Natural Gas, Flüssigerdgas
m^3	Kubikmeter
Mrd.	Milliarde(n)
Mt	Megatonne(n)
MW	Megawatt
NEKP	Nationaler Energie- und Klimaplan
NWS	Nationale Wasserstoff Strategie
O_2	Sauerstoff
OPEC	Organization of the Petroleum Exporting Countries, Organisation erdölexportierender Länder
p.a.	per annum, pro Jahr
PEM	Proton Exchange Membran
PtL	Power to Liquid
PtX	Power to X
PV	Photovoltaic
s.	siehe
S.	Seite
SOEC	Solid Oxide Electrolyzer Cell, Festoxid-Elektrolyseurzelle
TWh	Terrawattstunde
US	United States
VCÖ	Verkehrsclub Österreich
vgl.	vergleiche

11. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1:
Wie viel Wasserstoff wurde im Jahr 2018 hergestellt und wofür wurde er verwendet?
Seite 10

Abbildung 2:
Wie viel Wasserstoff wurde regenerativ seit 2010 hergestellt und welche Ziele gibt es für 2030?
Seite 11

Abbildung 3:
Power-to-X: Wie kann Wasserstoff eingesetzt werden?
Seite 16

Abbildung 4:
Wie hoch ist der Gesamtwirkungsgrad verschiedener Antriebsoptionen?
Seite 17

Abbildung 5:
Prognostizierter Wasserstoffbedarf (TWh) in Deutschland 2020-2050
Seite 26

Tabelle 1:
Deskriptive Gegenüberstellung von Arten der Wasserstofferzeugung
Seite 6

Tabelle 2:
Veränderung des Ressourcen- und Energieverbrauchs
Seite 33

12. Quellen

(1) *chemie.de – Lexikon – Wasserstoff*, abgerufen am 12.01.2021
(2) *chemie.de – Lexikon – Wasserstoffatom*, abgerufen am 12.01.2021
(3) *chemie.de – Lexikon – Wasserstoff*, abgerufen am 12.01.2021
(4) *chemie.de – Lexikon – Elektrolyse*, abgerufen am 12.01.2021
(5) IEA, Report „The Future of Hydrogen", 2019, S. 43
(6) IEA, Report „The Future of Hydrogen", 2019, S. 43
(7) IEA, Report „The Future of Hydrogen", 2019, S. 43
(8) IEA, Report „The Future of Hydrogen", 2019, S. 47
(9) *chemie.de – Lexikon – Elektrolyseur*, abgerufen am 12.01.2021
(10) *chemie.de – Lexikon – Elektrolyseur*, abgerufen am 12.01.2021
(11) IEA, Report „The Future of Hydrogen", 2019, S. 47
(12) *IEA – Reports – Hydrogen*, abgerufen am 16.01.2021
(13) *IEA – Fuels & technologies – Hydrogen Project Database*, abgerufen am 16.01.2021
(14) IEA, Report „The Future of Hydrogen", 2019, S. 44
(15) *chemie.de – Lexikon – Dampfreformierung*, abgerufen am 12.01.2021
(16) *chemie.de – Lexikon – Wassergas-Shift-Reaktion*, abgerufen am 12.01.2021
(17) *chemie.de – Lexikon – Partielle Oxidation*, abgerufen am 12.01.2021
(18) *chemie.de – Lexikon – Synthesegas*, abgerufen am 12.01.2021
(19) *chemie.de – Lexikon* – Erdgas, abgerufen am 14.01.2021
(20) *Energie Lexikon – Methanpyrolyse*, abgerufen am 13.01.2021
(21) IEA, Report „The Future of Hydrogen", 2019, S. 41
(22) *BDEW- Energie – Wasserstoff*, abgerufen am 15.01.2021
(23) *NABU- Umwelt & Ressourcen*, abgerufen am 15.01.2021
(24) *Dechema, Technology Study „Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry"*, abgerufen am 15.01.2021
(25) *Dechema, Potentialabschätzung „Herstellung von Wasserstoff – Photokatalyse",* abgerufen am 15.01.2021
(26) *chemie.de – Lexikon – Kvaerner-Verfahren*, abgerufen am 15.01.2021
(27) *chemie.de – Lexikon – Wasserstoff*, abgerufen am 12.01.2021
(28) *IEA – Fuels & technologies – Hydrogen Project Database*, abgerufen am 16.01.2021
(29) *FNR, Basisdaten Bioenergie Deutschland 2018, S. 29,* abgerufen am 15.01.2021
(30) *FNR, Basisdaten Bioenergie Deutschland 2018, S. 43*, abgerufen am 15.01.2021
(31) VCÖ, Factsheet „Grünen Wasserstoff sinnvoll im Verkehr einsetzen", 2020-02, S. 3
(32) BMWi Deutschland, Die Nationale Wasserstoffstrategie, IV. Glossar, Juli 2020, S. 29
(33) *solarify.eu*, abgerufen am 16.01.2021
(34) *solarify.eu*, abgerufen am 16.01.2021
(35) *IEA – Reports – Hydrogen*, abgerufen am 16.01.2021
(36) *IEA – Reports – Hydrogen*, abgerufen am 16.01.2021

(37) IEA, Report „The Future of Hydrogen", 2019, S. 32
(38) *Standford University – News Service*, abgerufen am 16.01.2021
(39) *Statista*, abgerufen am 17.01.2021
(40) *IEA – Reports – Hydrogen*, abgerufen am 16.01.2021
(41) IEA, Report „The Future of Hydrogen", 2019, S. 32
(42) *IEA – Data – Low-carbon hydrogen production 2010-2030*, abgerufen am 16.01.2021
(43) *BNEW*, abgerufen am 17.01.2021
(44) BMWI Deutschland, „Die Nationale Wasserstoffstrategie", Stand 06/2020, Seite 6
(45) *Strom-Report.de*, abgerufen am 17.02.2021
(46) BMWI Deutschland, „Die Nationale Wasserstoffstrategie", Stand 06/2020, Seite 5
(47) *HRS – Heiz- und Brennwerte*, abgerufen am 21.01.2021
(48) *Strom-Report.de*, abgerufen am 17.02.2021
(49) Zahoransky, R.A., Energietechnik, 2009, S. 196
(50) Zahoransky, R.A., Energietechnik, 2009, S. 197 ff.
(51) Zahoransky, R.A., Energietechnik, 2009, S. 205 ff.
(52) *Wikipedia – Necar*, abgerufen am 22.02.2021
(53) *Wikipedia – Brennstoffzellenfahrzeug*, abgerufen am 22.02.2021
(54) *Wikipedia – 750hL*, abgerufen am 22.02.2021
(55) *Wikipedia – Brennstoffzellenfahrzeug*, abgerufen am 22.02.2021
(56) *Wikipedia – Liste von Brennstoffzellenautos in Serienproduktion*, abgerufen am 22.02.2021
(57) VCÖ, Factsheet „Grünen Wasserstoff sinnvoll im Verkehr einsetzen", 2020-02, S. 1
(58) *Wiener Linien – Blog*, abgerufen am 22.02.2021
(59) *Business Insider*, abgerufen am 22.02.2021
(60) *ecomento.de*, abgerufen am 24.02.2021
(61) *Orf.at*, abgerufen am 22.02.2021
(62) *BMU*, abgerufen am 17.01.2021
(63) *Fona*, abgerufen am 16.01.2021
(64) *Öko-Institut e.V.*, abgerufen am 16.01.2021
(65) *Öko-Institut e.V.*, abgerufen am 17.01.2021
(66) *Öko-Institut e.V.*, abgerufen am 16.01.2021
(67) Sachverständigenrat für Umweltfragen, Sondergutachten" Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor, 2017, S. 86
(68) *Auto Motor Sport.de*, abgerufen am 24.02.2021
(69) Sachverständigenrat für Umweltfragen, Sondergutachten" Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor, 2017, S. 86
(70) *Auto Motor Sport.de*, abgerufen am 24.02.2021
(71) *IEA – Reports – The future of Hydrogen*, abgerufen am 20.01.2021
(72) *IEA – Reports – The future of Hydrogen*, abgerufen am 20.01.2021
(73) *IEA – Data & Statistics – 2018*, abgerufen am 23.02.2021
(74) *HRS – Heiz- und Brennwerte*, abgerufen am 21.01.2021

(75) *wikipedia.de – Flüssigerdgas,* abgerufen am 15.03.2021
(76) *Forbes*, abgerufen am 15.02.2021
(77) *IEA – Fuels & technologies – Hydrogen Project Database*, abgerufen am 15.03.2021
(78) IEA, Report „The Future of Hydrogen", S. 45
(79) *IEA – Reports – The future of Hydrogen*, abgerufen am 15.03.2021
(80) *Europäische Kommission – Vertretung in Deutschland*, abgerufen am 17.03.2021
(81) *Europäische Kommission – Vertretung in Deutschland*, abgerufen am 17.03.2021
(82) *Europäische Kommission – Vertretung in Deutschland*, abgerufen am 17.03.2021
(83) European Commission, Communication "A hydrogen strategy for climate-neutral Europe", 07/2020, S. 1
(84) *Europäische Kommission – Vertretung in Deutschland*, abgerufen am 17.03.2021
(85) European Commission, Communication "A hydrogen strategy for climate-neutral Europe", 07/2020, S. 7
(86) European Commission, Communication "A hydrogen strategy for climate-neutral Europe", 07/2020, S. 15
(87) European Commission, Communication "A hydrogen strategy for climate-neutral Europe", 07/2020, S. 1
(88) European Commission, Communication "A hydrogen strategy for climate-neutral Europe", 07/2020, S. 10
(89) European Commission, Communication "A hydrogen strategy for climate-neutral Europe", 07/2020, S. 10
(90) *Science for Environment Policy: European Commision DG Environment News Alert Service*, abgerufen am 17.03.2021
(91) *chemie.de – Lexikon – Wasserstoff*, abgerufen am 17.03.2021
(92) European Commission, Communication "A hydrogen strategy for climate-neutral Europe", 07/2020, S. 5
(93) *Heise*, abgerufen am 15.03.2021
(94) *Wiener Zeitung*, abgerufen am 17.03.2021
(95) European Commission, Communication "A hydrogen strategy for climate-neutral Europe", 07/2020, S. 7
(96) *Eurostat – Share of energy from renewable sources, online data code: NRG_IND_REN*, abgerufen am 23.03.2021
(97) *Eurostat – Glossar: Bruttoinlandsverbrauch an Energie*, abgerufen am 17.03.2021
(98) *Eurostat – Share of energy from renewable sources, online data code: NRG_IND_REN*, abgerufen am 23.03.2021
(99) *BMWi – Pressemitteilung – 09.10.2019*, abgerufen am 18.03.2021
(100) *BMWi – Pressemitteilung – 10.06.2020*, abgerufen am 18.03.2021
(101) *Strom-Report.de*, abgerufen am 18.03.2021
(102) *Strom-Report.de*, abgerufen am 18.03.2021
(103) *BMWi – Aufstellung „Bruttobeschäftigung durch erneuerbare Energien 2000 bis 2018*, abgerufen am 18.03.2021

(104) BMWi – „Die Nationale Wasserstoffstrategie“, Juni 2020, S. 1
(105) BMWi – „Die Nationale Wasserstoffstrategie“, Juni 2020, S. 3
(106) *Fraunhofer ISI*, abgerufen am 18.03.2021
(107) BMWI Deutschland, „Die Nationale Wasserstoffstrategie“, Stand 06/2020, Seite 6
(108) BMWI Deutschland, „Die Nationale Wasserstoffstrategie“, Stand 06/2020, Seite 6
(109) BMWi – „Die Nationale Wasserstoffstrategie“, Juni 2020, S. 5 f.
(110) C. Helbing et al., Fraunhofer – Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, 2019, S. 10
(111) C. Helbing et al., Fraunhofer – Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, 2019, S. 10
(112) *Umweltbundesamt*, abgerufen am 18.03.2021
(113) *Eurostat – Share of energy from renewable sources*, online data code: NRG_IND_REN, abgerufen 23.03.2021
(114) C. Helbing et al., Fraunhofer – Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, 2019, S. 10
(115) BMWi – „Die Nationale Wasserstoffstrategie“, Juni 2020, S. 3
(116) BMWi – „Die Nationale Wasserstoffstrategie“, Juni 2020, S. 4, S. 6, S. 8
(117) BMWi – „Die Nationale Wasserstoffstrategie“, Juni 2020, S. 7
(118) *IEA – Fuels & technologies – Hydrogen Project Database*, abgerufen am 15.03.2021
(119) *IEA – Reports – The future of Hydrogen*, abgerufen am 23.03.2021
(120) *Wiener Zeitung*, abgerufen am 23.03.2021
(121) *EU-Umweltbüro*, abgerufen am 23.03.2021
(122) *chemie.de - Lexikon - Elektrolyse*, abgerufen am 22.04.2021
(123) *IEA – Fuels & technologies – Hydrogen*, abgerufen am 16.01.2021
(124) *IEA – Data – Data tables – Balances – 2018 – Production*, abgerufen am 27.04.2021
(125) *Science for Environment Policy: European Commision DG Environment News Alert Service,* abgerufen am 17.03.2021
(126) BMWI Deutschland, „Die Nationale Wasserstoffstrategie“, Stand 06/2020, Seite 9
(127) *chemie.de chemie.de – Lexikon - Wasserstoff*, abgerufen am 17.03.2021
(128) European Commission, Communication “A hydrogen strategy for climate-neutral Europe”, 07/2020, S. 10
(129) IEA, Report „The Future of Hydrogen”, 2019, S. 43
(130) *Wikipedia – Sylvensteinspeicher*, abgerufen am 27.04.2021
(131) IEA, Report „The Future of Hydrogen”, 2019, S. 43
(132) *Bayern-Innovativ, Prof. Dr. Jochen Fricke*, abgerufen am 27.04.2021
(133) European Commission, Communication “A hydrogen strategy for climate-neutral Europe”, 07/2020, S. 15
(134) *Watson*, abgerufen am 27.04.2021
(135) *IEA – Data – Data tables – Balances – 2018 – Production*, abgerufen am 27.04.2021
(136) *tagesschau.de*, abgerufen 27.04.2021
(137) *IEA – Data – Data browser – Energy consumption – TFC by sector*, abgerufen am 27.04.2021
(138) *Initiative Energieeffizienz*, abgerufen am 27.04.2021

(139) *Heat Roadmap Europe*, abgerufen am 28.04.2021
(140) *APA – OTS*, abgerufen am 28.04.2021
(141) *IRENA – International Renewable Energy Agency*, abgerufen am 28.04.2021
(142) *Deutsche Bundesregierung*, abgerufen am 27.04.2021
(143) *Bundesamt für Umwelt* – BAFU, abgerufen am 28.04.2021
(144) *Wikipedia – Stern-Report*, abgerufen am 27.04.2021
(145) *New York Times*, abgerufen am 23.04.2021
(146) *ZDF*, abgerufen am 28.04.2021
(147) *spiegel.de*, abgerufen am 27.04.2021