



Kompetenzen für Wasserstoffsicherheit

Erasmus+ KA202 - Strategische Partnerschaften für die
berufliche Aus- und Weiterbildung

Lerneinheit 1

Grundlagen des Wasserstoffs

Inhalt

Block 1

1.1. Fossile Brennstoffe.....	
...04	
1.1.1. Erdöl.....	04
1.1.2. Kohle.....	05
1.1.3. Torf.....	06
1.1.4. Erdgas.....	07
1.1.5. Die Probleme der fossilen Brennstoffe.....	
.....09	
1.2. Treibhausgase und Klimawandel.....	09
1.3. Erneuerbare Energie.....	11
1.4. Wasserstoff.....	11

Block 2

2.1. Eigenschaften des Wasserstoffs.....	
.....15	
2.2. Wasserstoffproduktion.....	16
2.2.1. Methandampfreformierung.....	17
2.2.2. Kohlevergasung.....	18
2.2.3. Biomasse-Vergasung.....	18
2.2.4. Elektrolyse.....	18
2.3. Die Farben des Wasserstoffs.....	20

Block 3

3.1. Power-to-Gas.....	23
3.1.1. Grundlagen des Elektrolyseurs.....	
.....25	
3.2. Rolle des Wasserstoffs in der Heizung.....	
.....26	
3.2.1. Heizung für Privathaushalte und Gewerbe.....	26

3.2.2. Industrielle Heizung.....	26
3.3. Rolle des Wasserstoffs im Verkehrswesen.....	
.....	27
3.3.1. Schwertransport.....	27
3.3.2. Leichter Transport.....	28

Block 4

4.1. Komprimierung und Speicherung von Wasserstoff.....	
.....	30
4.1.1. Flüssigwasserstoff.....	31
4.1.2. Unterirdische Lagerung.....	32
4.2. Wasserstoffverteilung und Rohrleitungen.....	
.....	32
4.3. Umwandlung von Wasserstoff in Energie.....	
.....	34
4.3.1. Brennstoffzellen.....	
.....	34
4.3.2. Wasserstoffverbrennung.....	36

Block 5

5.1. Wasserstoff in der petrochemischen Industrie.....	38
5.1.1. Hydrotreating.....	38
5.1.2. Hydrocracken.....	38
5.2. Ammoniakproduktion.....	39
5.2.1. Leistung-zu-Ammoniak.....	
.....	40
5.3. Hydrierung.....	41
5.4. Andere Rollen für Wasserstoff in der Industrie.....	
.....	42
5.4.1. Halbleiterherstellung.....	42
5.4.2. Wasserstoff als Kühlmittel.....	43
5.4.3. Notstromversorgung.....	
.....	43
5.4.4. Die Sektoren Glas und Metall.....	44
5.4.5. Luft- und Raumfahrtanwendungen.....	
.....	44
Referenzen.....	45

----- BLOCK 1 -----

1.1. Fossile Brennstoffe

Fossile Brennstoffe sind Kohlenwasserstoffe, vor allem Kohle, Erdöl oder Erdgas, die aus den Überresten toter Pflanzen und Tiere entstehen. Sie bestehen aus vergrabenen, brennbaren geologischen Ablagerungen organischer Materialien, die aus verfaulten Pflanzen und Tieren entstanden sind. Diese Ablagerungen wurden durch die Einwirkung von Hitze und Druck in der Erdkruste über Hunderte von Millionen Jahren in Öl, Kohle oder Erdgas umgewandelt.

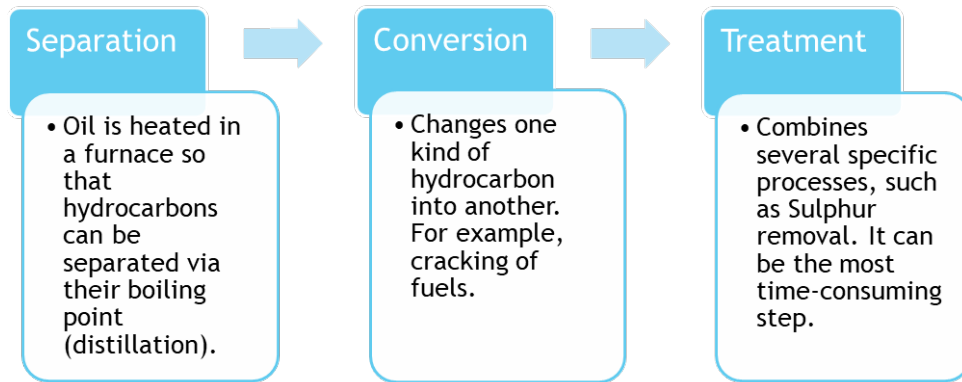
Die Nutzung fossiler Brennstoffe hat die industrielle Revolution ermöglicht und ist heute die bei weitem wichtigste Energiequelle der Welt. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe durch den Menschen ist die größte Quelle für die Emission von Kohlendioxid - einem Treibhausgas.

Fossile Brennstoffe werden durch natürliche Prozesse ständig neu gebildet - sie sind jedoch nicht erneuerbare Ressourcen. Das liegt daran, dass ihre Entstehung Millionen von Jahren dauert und die Reserven unendlich viel schneller verbraucht werden, als sie wieder aufgefüllt werden. Mit anderen Worten: Fossile Brennstoffe werden nicht auf natürliche Weise nach menschlichem Zeitmaßstab wieder aufgefüllt.

1.1.1. Erdöl

Erdöl, in seiner natürlichen Form auch Rohöl genannt, besteht aus einem Gemisch von Kohlenwasserstoffen und anderen Stoffen (hauptsächlich Schwefel). Nach der Gewinnung, Raffinierung und Trennung wird aus Erdöl eine Vielzahl von Produkten hergestellt, darunter Kraftstoffe, Kunststoffe, Schmiermittel, Wachs, Teer, Asphalt und Düngemittel.

Die Erdölraffination ist der Prozess der Umwandlung von Rohöl in nützliche Produkte, der in drei Schritte unterteilt ist:



Im Jahr 2018 werden weltweit täglich rund 80 Millionen Barrel Erdöl gefördert, wobei die Vereinigten Staaten, Saudi-Arabien und Russland die wichtigsten Förderländer sind.

Tabelle 1. Die 10 wichtigsten Ölförderländer im Jahr 2018 [Quelle: U.S. Energy Information Administration].

Land	Millionen Barrel pro Tag
Vereinigte Staaten	12.0
Saudi-Arabien	11.1
Russland	10.8
Irak	4.5
Iran	4.0
China	4.0
Kanada	3.7
UAE	3.1
Kuwait	2.9
Brasilien	2.5

1.1.2. Kohle

Kohle ist ein organisches Sedimentgestein, das aus Kohlenstoff und unterschiedlichen Mengen anderer Stoffe besteht. Sie ist immer noch die größte Energiequelle für die Stromerzeugung in der Welt. Es gibt vier Kohlesorten, je nach der Menge des enthaltenen Kohlenstoffs:

- ✓ **Torf:** frühestes und jüngstes Stadium der Kohlebildung;
- ✓ **Braunkohle:** Auch Braunkohle genannt, hat einen geringen Kohlenstoffgehalt und liefert daher wenig Energie;
- ✓ **Steinkohle:** Sie wird auch als Weichkohle bezeichnet und ist die häufigste Sorte;
- ✓ **Anthrazit:** Auch Steinkohle genannt, hat einen hohen Kohlenstoffgehalt und liefert die höchste Energie.

Im Jahr 2018 werden weltweit etwa 7.700 Millionen Tonnen Kohle pro Tag gefördert, wobei fast die Hälfte davon auf China entfällt.

Tabelle 2. Die 10 wichtigsten Kohleförderländer im Jahr 2018 [Quelle: The British Petroleum Company plc].

Land	Millionen Tonnen pro Jahr
China	3,523
Indien	716
Vereinigte Staaten	702
Australien	481
Indonesien	461
Russland	411
Südafrika	252
Deutschland	175
Polen	127
Kasachstan	111

1.1.3. Torf

Torf, auch Torf genannt, kommt in Mooren oder Sümpfen vor und ist der erste Schritt bei der geologischen Entstehung von Kohle. Torf bildet sich in Feuchtgebieten, weil Überschwemmungen die Sauerstoffzufuhr aus der Atmosphäre behindern und so die Zersetzungsgeschwindigkeit verlangsamen. Er ist ein besonders ineffizienter fossiler Brennstoff, der wesentlich mehr Kohlenstoffemissionen verursacht als andere Brennstoffe wie Kohle und Erdgas.



Abbildung 1. Torfgewinnung.

Der Torfabbau (siehe Abbildung 1) stellt eine große Umweltbelastung dar und erfolgt hauptsächlich in Hochmooren, indem die lebende Schicht abgetragen und anschließend große Mengen Torf freigelegt werden, um die Oxidation und den Verlust von Kohlenstoff zu erleichtern.

Die Torfproduktion ist auf geeignete Gebiete beschränkt und wird meist lokal verbraucht, wobei Finnland und Irland weltweit führend in der Produktion sind.

Tabelle 3. Die 10 wichtigsten torfproduzierenden Länder im Jahr 2013.
[Quelle: United States Geological Survey (USGS) Minerals Resources Program]

Land	Tausend Tonnen pro Jahr
Finnland	7,470
Irland	6,600
Schweden	3,300
Deutschland	3,000
Weißrussland	2,970
Russland	1,500
Lettland	1,380
Kanada	1,295
Estland	927

Polen	760
-------	-----

1.1.4. Erdgas

Erdgas besteht aus einem Kohlenwasserstoffgasgemisch, hauptsächlich Methan (CH_4). Es kommt in unterirdischen Gesteinsschichten und anderen Lagerstätten vor und wird auf vielfältige Weise genutzt, z. B. zur Stromerzeugung, zum Heizen, Kochen, für industrielle Anwendungen, zur Herstellung von Chemikalien und im Verkehrswesen.

Im Jahr 2017 werden weltweit rund 3.700 Milliarden Kubikmeter Erdgas pro Jahr gefördert, wobei die Vereinigten Staaten und Russland die größten Förderländer sind.

Tabelle 4. Die 10 wichtigsten erdgasproduzierenden Länder im Jahr 2017 [Quelle: Enerdata Yearbook].

Land	Milliarde m^3 pro Jahr
Vereinigte Staaten	767
Russland	694
Iran	209
Kanada	184
Katar	166
China	147
Norwegen	128
Australien	99
Saudi-Arabien	98
Algerien	95

Durch das Abfackeln oder Abbrennen von Erdgas (siehe Abbildung 2) werden etwa 3,5 % der weltweiten Produktion verschwendet. Die Unternehmen tun dies in der Regel, um eine gefährliche Ansammlung zu verhindern, wenn es an Ausrüstung oder Geld fehlt, um das Gas aufzufangen, oder wenn das Gas mit unbrennbaren Gasen verunreinigt ist. Im Allgemeinen ist

es viel besser, Erdgas abzufackeln, als es einfach abzulassen, da CO_2 ein 21-mal geringeres Erderwärmungspotenzial hat als CH_4 .



Abbildung 2. Abfackeln von Erdgas.

1.1.5. Die Probleme der fossilen Brennstoffe

Fossile Brennstoffe sind mit einer Reihe von ökologischen und sozialen Problemen verbunden, unter anderem mit der Tatsache, dass sie:

- ✓ Kohlenstoffintensiv: erzeugt große Mengen an Treibhausgasemissionen, was katastrophale Folgen für den Klimawandel hat;
- ✓ Umweltverschmutzung: Sie ist für schätzungsweise 9 Millionen Todesfälle pro Jahr verantwortlich, verursacht unzählige Krankheiten und beeinträchtigt die Lebensqualität;
- ✓ Begrenzt: Bei der derzeitigen Nutzung wird das derzeitige Niveau nicht länger als ein paar Jahrzehnte reichen;
- ✓ Teuer: wird auch als "umlagefinanzierte Energie" bezeichnet.


Diskussion → Es wird empfohlen, eine Diskussion in der Klasse zu führen, um die Probleme mit fossilen Brennstoffen und die mit der derzeitigen fossilen Energieinfrastruktur verbundenen Probleme aufzuzeigen.

1.2. Treibhausgase und Klimawandel

Treibhausgase (THG) sind Gase, die Energie im thermischen Infrarotbereich absorbieren und emittieren. Sie halten die Wärme in der Atmosphäre zurück und sind die Hauptursache für den Treibhauseffekt.

Der Treibhauseffekt ist ein natürliches Phänomen, das für die Existenz des Lebens auf der Erde unerlässlich ist - ohne ihn läge die Oberflächentemperatur der Erde bei etwa -18 °C . Die menschlichen Aktivitäten der letzten Jahrhunderte - Nutzung fossiler Brennstoffe, Abholzung der Wälder usw. - haben den Treibhauseffekt verstärkt und den Klimawandel verursacht bzw. beschleunigt.

Die häufigsten Treibhausgase sind:

- Kohlendioxid (CO_2)  das bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen und Biomasse freigesetzt und bei der Absorption durch Pflanzen entfernt (gebunden) wird;
- Methan (CH_4) wird bei der Herstellung fossiler Brennstoffe, bei der Viehzucht und beim Zerfall organischer Stoffe freigesetzt;
- Distickstoffoxid (N_2O) → wird durch landwirtschaftliche und industrielle Aktivitäten sowie durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe freigesetzt;
- Fluorierte Gase → starke Gase, die bei verschiedenen industriellen Prozessen entstehen.

Die Wirkung der einzelnen Gase hängt von Faktoren wie der Konzentration (z. B. sind die derzeitigen Kohlendioxidwerte 230-mal höher als die von Methan), der Wirkung (z. B. ist CH_4 21-mal stärker als CO_2) und der Verweildauer in der Atmosphäre (die von einigen Stunden bis zu Tausenden von Jahren reichen kann) ab.

Der Klimawandel wiederum bezieht sich auf Veränderungen in der statistischen Verteilung von Wettermustern, wenn diese Veränderungen über einen längeren Zeitraum andauern. Dies kann auf natürliche Weise geschehen, verursacht durch natürliche Prozesse wie Vulkanausbrüche, Schwankungen in der Sonneneinstrahlung, Plattentektonik usw., wird aber zu einer Quelle der Besorgnis, wenn es erzwungen wird, verursacht durch menschliche Aktivitäten - was dann als anthropogener Wandel bezeichnet wird.

Nach Angaben der National Aeronautics and Space Administration (NASA) lag die Temperatur der Erde zu Beginn des 21. Jahrhunderts um etwa $0,5\text{ °C}$ über dem langfristigen Durchschnitt. Abbildung 3 zeigt diese geschätzte Abweichung.

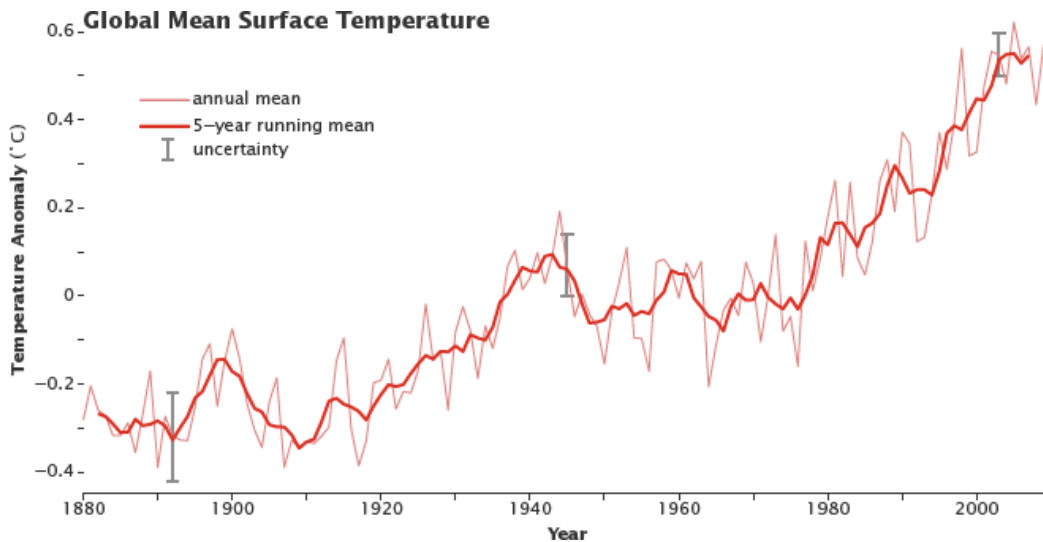


Abbildung 3. Schwankungen der durchschnittlichen Oberflächentemperatur der Welt [Quelle: NASA].

Die Folgen des Klimawandels bzw. der globalen Erwärmung sind vielfältig. Dazu gehören steigende Temperaturen, die Veränderungen in der Vegetation, ein ökologisches Ungleichgewicht und Störungen in terrestrischen und aquatischen Ökosystemen verursachen, Herausforderungen für die Landwirtschaft und die Nahrungsmittelproduktion, veränderte Niederschlagsmuster, Überschwemmungen, Dürren und Hitzewellen, stärkere und häufigere Naturkatastrophen sowie schmelzende Gletscher und steigende Meeresspiegel. Einige Experten verwenden sogar den Begriff "Klimanotstand", um die Notwendigkeit dringender Veränderungen zu unterstreichen.

1.3. Erneuerbare Energie

Erneuerbare Energie bezieht sich auf Energie, die aus erneuerbaren Ressourcen gewonnen wird - das bedeutet, dass sich diese Ressourcen innerhalb eines menschlichen Zeitrahmens erneuern. Sie sind im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen, die nur in einigen Ländern vorkommen, in viel größeren Gebieten verfügbar. Heutzutage tragen erneuerbare Energien noch wenig (weniger als 20 %) zu unserem weltweiten Energieverbrauch bei und stellen eines der besten Instrumente der Menschheit zur Bekämpfung und Abschwächung des Klimawandels dar.

Zu den bekanntesten erneuerbaren Energien gehören die Wind- und die Solarenergie. Dabei handelt es sich um ausgereifte Technologien, die in den letzten Jahren erheblich an Popularität gewonnen haben und deren Kosten entsprechend gesunken sind. Andere Arten von erneuerbaren Energien sind Wasserkraft, geothermische Energie und Biomasse.

Diskussion → Eine Diskussion in der Klasse wird empfohlen, um andere Arten der erneuerbaren Energieerzeugung zu identifizieren und zu beschreiben.

Die Technologien für erneuerbare Energien bieten eine Reihe von ökologischen und sozialen Vorteilen, unter anderem die Tatsache, dass sie umweltfreundlich sind:

- ✓ Sauberer: Sie stoßen viel weniger Treibhausgase aus und tragen so zur Bekämpfung des Klimawandels bei.
- ✓ Unerschöpflich: eine sichere Energieversorgung, die nicht versiegen wird.
- ✓ Billiger: Obwohl sie eine Anfangsinvestition erfordern, sind die Kosten für erneuerbare Energien auf lange Sicht geringer.
- ✓ Das ist gut für alle: Es bringt technologische Fortschritte und Arbeitsplätze bei Projekten für erneuerbare Energien.

1.4. Wasserstoff

Wasserstoff (H_2) ist ein ungiftiges, leicht brennbares Gas, bei dessen Verbrennung keine Kohlenstoffemissionen entstehen - in Verbindung mit Sauerstoff (O_2) entsteht lediglich Wasser (H_2O). Es ist ein vielseitiges Gas und ein wertvoller und wichtiger Energievektor, der eine Schlüsselkomponente einer zukünftigen kohlenstoffarmen oder -freien Wirtschaft sein kann.

Wasserstoff hat den höchsten Energiegehalt (33,3 kWh/kg) aller Moleküle und enthält damit 3-4 mal mehr Energie als Erdöl (12,0 kWh/kg), Erdgas (13,1 kWh/kg) oder Kohle (7,0 kWh/kg), wie in Abbildung 4 dargestellt.

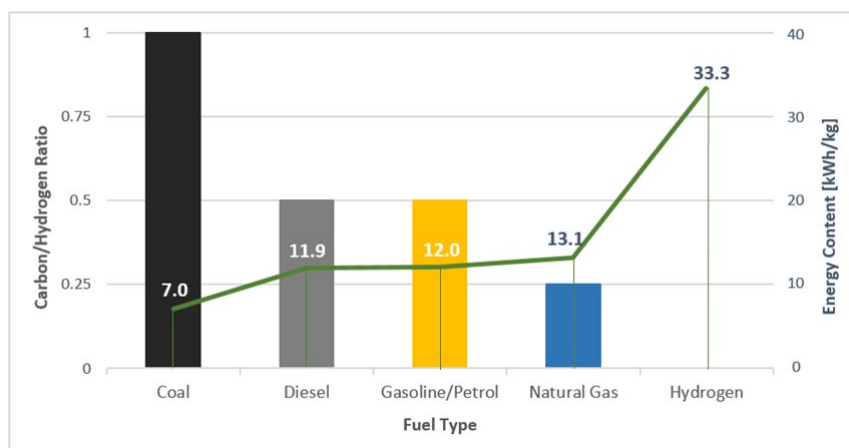


Abbildung 4. Vergleich von Kohlenstoff/Wasserstoff-Verhältnis und Energiegehalt

zwischen Wasserstoff und anderen gebräuchlichen Brennstoffen in Gewichtsprozent.

Wasserstoff kann für eine Vielzahl von Anwendungen im Energiesektor genutzt werden, von der Stromerzeugung über die Heizung bis hin zum Antrieb des Verkehrs.

Die Wasserstofftechnologie ist nicht neu. Das erste wasserstoffbetriebene Fahrzeug wurde 1807 von dem französischen Ingenieur François Isaac de Rivaz gebaut. Es folgten weitere Fahrzeugprototypen, aber die Bedeutung der Erdölindustrie, die sich auf reichlich vorhandene Ressourcen und niedrige Kosten stützte, führte dazu, dass Wasserstoff als Kraftstoff in der Öffentlichkeit kaum wahrgenommen wurde. In jüngerer Zeit, im Zuge der Ölkrise der 1970er Jahre und der Forderung nach saubereren Emissionen und allgemeiner Dekarbonisierung, hat Wasserstoff wieder an Sichtbarkeit gewonnen.

Die **Wasserstoffwirtschaft** ist ein vorgeschlagenes System zur Bereitstellung von Energie unter Verwendung von Wasserstoff als CO₂ emissionsfreiem Energieträger. Der Begriff wurde von John Bockris in den 1970er Jahren geprägt und spiegelt ein starkes Interesse an Wasserstoff als Energieträger aus mehreren Gründen wider:

- ✓ Es kann auf die gleiche Weise wie fossiles Erdgas verteilt, verbrannt und genutzt werden, wenn es entsprechend angepasst wird;
- ✓ Strom kann aus Wasserstoff mit einem sehr hohen Wirkungsgrad im Vergleich zur herkömmlichen Stromerzeugung erzeugt werden;
- ✓ Wasserstoff kann aus fossilen und erneuerbaren Energieträgern sowie aus Biomasse hergestellt werden, was den Übergang von einer kohlenstoffhaltigen zu einer künftigen kohlenstofffreien Wirtschaft erleichtert, und die Erzeugung von Wasserstoff auf mehreren Wegen kann auf die örtlichen Gegebenheiten und verfügbaren Ressourcen zugeschnitten werden;
- ✓ Wasserstoff hat nach der Verbrennung keine Auspuffemissionen, was eine kostengünstigere CO₂ Entfernung aus der Atmosphäre in der Zukunft ermöglicht;
- ✓ Die Umwandlung von Wasserstoff in Elektrizität ist reversibel, was bedeutet, dass Wasserstoff ein Analogon zur Elektrizität ist und eine effiziente Lösung zur Speicherung von Elektrizität darstellen kann.

In letzter Zeit haben Regierungen und Organisationen ein wachsendes Interesse an Wasserstofftechnologien gezeigt und investieren zunehmend in Wasserstoffprojekte. Auch

wurde in den letzten Jahren eine beträchtliche Anzahl von Veröffentlichungen über Wasserstoffstrategien, Erkenntnisse und Perspektiven veröffentlicht.

Trotz des weltweit wachsenden Interesses wird Wasserstoff jedoch nur selten als Lösung zur Dekarbonisierung eingesetzt. Wie in Abbildung 5 dargestellt, entfallen heute mehr als 90 % der derzeitigen weltweiten Wasserstoffproduktion (etwa 70-80 Millionen Tonnen jährlich) auf den Bedarf der petrochemischen Industrie.

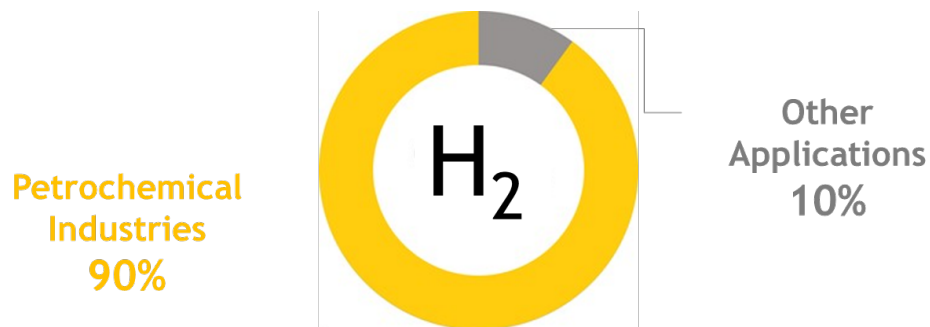


Abbildung 5. Nur ein Zehntel des heute produzierten Wasserstoffs wird nicht von der petrochemischen Industrie verwendet, wobei die Mengen, die für die Dekarbonisierung verwendet werden, vernachlässigbar sind.

Derzeit wird die Hälfte des weltweit verfügbaren Wasserstoffs zur Herstellung von Ammoniak verwendet, hauptsächlich für die Landwirtschaft. Der Rest wird von verschiedenen Industriezweigen verbraucht, von der Fetthydrierung bis zu Halbleiterprozessen.

Erschwerend kommt hinzu, dass die derzeitige Wasserstoffproduktion weltweit 830 MtCO₂ eq (Millionen Tonnen Kohlendioxidäquivalent) pro Jahr ausstößt, da die Ausgangsstoffe überwiegend aus fossilen Brennstoffen stammen.

Diskussion → Es wird eine Diskussion in der Klasse empfohlen, um herauszufinden, welche Rolle Wasserstoff bei der dringend benötigten Energiewende spielen kann, und um die Stärken und Schwächen von Wasserstoff als Mittel zur Dekarbonisierung zu diskutieren.

Empfohlene Lektüre → Wasserstoff am Horizont: Fertig, fast fertig, los?
https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Innovation_Insights_Briefing_-_Hydrogen_on_the_Horizon_-_Ready%2C_Almost_Set%2C_Go_-_July_2021.pdf

STÄNDIGE BEWERTUNG 1: PERSÖNLICHE ÜBERLEGUNGEN

----- Ende von Block 1 -----

----- BLOCK 2 -----

2.1. Eigenschaften von Wasserstoff

Wasserstoff (H) ist das erste und leichteste Element des Periodensystems der Elemente (Abbildung 6).

Group→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
↓Period	1																	2	
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	
			* 57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb			
			* 89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No			

Abbildung 6. Das Periodensystem der Elemente, wobei das Element Wasserstoff hervorgehoben ist.

Das Wasserstoffatom ist elektrisch neutral und enthält ein positiv geladenes Proton, ein negativ geladenes Elektron und keine Neutronen. Wasserstoff ist das leichteste und am häufigsten vorkommende Element und macht etwa 75 % der Masse des Universums aus.

Hydrogen ⁺¹ 1 312.0 1 ⁻¹ 2.20 H 1s ¹ 1.007975	→ Atomic number → Symbol → Atomic mass
--	--

Abbildung 7. Das Element Wasserstoff und seine grundlegenden Eigenschaften.

Atomarer Wasserstoff ist jedoch auf der Erde sehr selten. Wasserstoffatome neigen dazu, sich mit anderen Atomen in Verbindungen und mit anderen Wasserstoffatomen zu Wasserstoffgas zu verbinden (H_2).

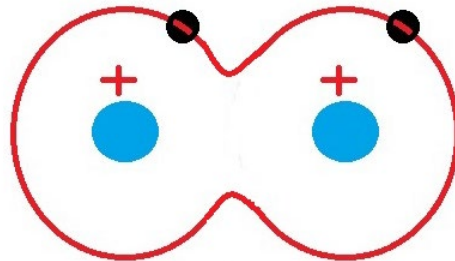


Abbildung 8. Grundschemata des Wasserstoffmoleküls mit seinen zwei Protonen und zwei Elektronen.

Bei normaler Temperatur und normalem Druck ist Wasserstoffgas ungiftig, farblos, geruchlos, geschmacklos, leicht brennbar und nicht metallisch. Er wird oft als "Treibstoff der Sterne" bezeichnet, da Sterne die meiste Zeit ihres Lebens mit der Fusion von Wasserstoff verbringen und unsere Sonne größtenteils aus Wasserstoff besteht.

Molekularer Wasserstoff kann mit einer Vielzahl von Elementen und Verbindungen reagieren - bei Raumtemperatur sind die Reaktionsraten jedoch so gering, dass sie vernachlässigbar sind. Das bedeutet, dass H_2 aufgrund seiner hohen Dissoziationsenergie (die Energie, die erforderlich ist, um die Bindung, die die Atome zusammenhält, zu brechen) bei Raumtemperatur praktisch inert ist.

Wasserstoffgas hat außerdem einen sehr niedrigen Schmelz- und Siedepunkt, d. h. es verflüssigt sich und gefriert bei extrem niedrigen Temperaturen.

Dissoziationsenergie ($25^\circ C$) = 104,2 kcal/Mol
Schmelzpunkt = $- 259,2^\circ C$
Siedepunkt = $- 252,8^\circ C$

2.2. Wasserstoffproduktion

Wasserstoff kann mit vielen Methoden hergestellt werden, die sich in Bezug auf technologischen Reifegrad, Treibhausgasemissionen und Umweltauswirkungen unterscheiden.

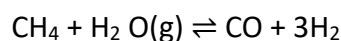
Die gebräuchlichsten Produktionsmethoden sind heute die Methandampfreformierung (SMR), die Kohlevergasung, die Biomassevergasung und die Wasserelektrolyse.

2.2.1. Methandampfreformierung

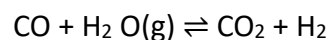
SMR ist das Verfahren zur Umwandlung von Erdgas in Wasserstoff. Es ist heute die bei weitem gängigste Methode zur Herstellung von kommerziellem Wasserstoffgas und macht etwa 95 % des weltweit verwendeten Wasserstoffs aus.

Da sie einen fossilen Brennstoff verwendet, handelt es sich nicht um eine erneuerbare Technologie. Sie ist auch nicht so sauber wie die Wasserelektrolyse. Allerdings stoßen Brennstoffzellenfahrzeuge, die mit SMR-Wasserstoff betrieben werden, immer noch weit weniger Treibhausgase aus als vergleichbare benzinbetriebene Fahrzeuge.

Bei SMR reagiert Wasserdampf mit Methan in einem Reformer bei hohen Temperaturen (700 - 1100 °C) und in Gegenwart eines Katalysators auf Metallbasis, wobei Kohlenmonoxid und Wasserstoff entstehen:



Das aus dem Reformer austretende Synthesegas durchläuft einen Wassergasverschiebungsreaktor, der das CO in CO₂ und H₂ umwandelt und dabei das verfügbare Wasser im Synthesegas (oder zusätzlichen Dampf, der bereitgestellt werden kann) verwendet:



Der letzte Schritt ist die Abtrennung des Wasserstoffs aus dem aus dem Shift-Reaktor austretenden Synthesegas, was mit einer Vielzahl von Methoden erfolgen kann. Insgesamt werden für die Herstellung von 1 kg Wasserstoff etwa 2,4 kg Methan als Ausgangsmaterial benötigt. Abbildung 9 gibt einen Überblick über die Methode.

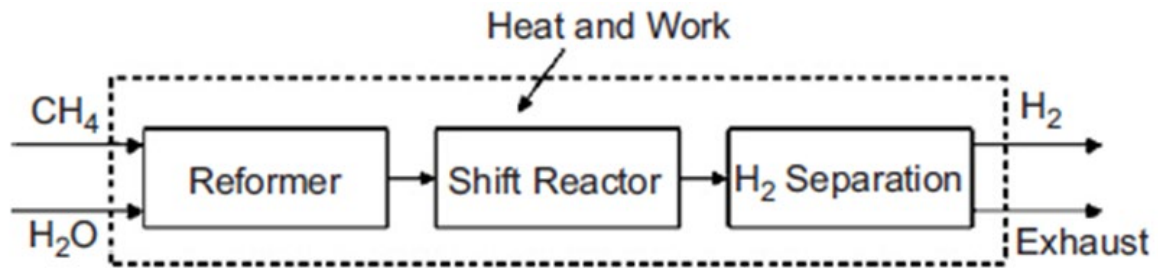


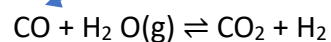
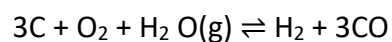
Abbildung 9. Der Prozess der Methandampfreformierung.

Einer der Hauptnachteile von SMR ist die hohe Menge an Kohlendioxid, die bei diesem Prozess freigesetzt wird: Im Durchschnitt werden für jedes Kilogramm Wasserstoff etwa 9 kg CO₂ produziert. Tatsächlich sind SMR-Anlagen für etwa 3 % der weltweiten CO₂-Emissionen des Industriesektors verantwortlich.

Eine Lösung, die dazu beitragen kann, dieses Problem zu verringern oder zu minimieren, ist die Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS), oder Kohlenstoffkontrolle und -sequestrierung. Dabei handelt es sich um ein Verfahren, bei dem CO₂ aus großen Punktquellen aufgefangen und zu einer Lagerstätte transportiert wird, wo es deponiert wird, um die Freisetzung großer Mengen des Gases zu verhindern. Bei diesen Orten handelt es sich in der Regel um unterirdische geologische Formationen. CCS kann die Menge der Kohlenstoffemissionen von SMR-Systemen verringern und die Herstellung von Wasserstoff mit dieser Methode nachhaltiger machen.

2.2.2. Kohlevergasung

Bei diesem Verfahren reagiert die Kohle mit Sauerstoff und Wasserdampf und erzeugt Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid:



Außerdem wird bei dieser Methode ein fossiler Brennstoff verwendet, und sie ist mit großen Mengen an Kohlenstoffemissionen verbunden - für jedes Kilogramm Wasserstoff können bis zu 30 kg CO₂ erzeugt werden. CCS-Technologien können auch bei der Kohlevergasung eingesetzt werden.

2.2.3. Biomasse-Vergasung

Bei der Biomassevergasung, auch Waste-to-Gas genannt, wird aus Biomasse bei hohen Temperaturen Wasserstoff erzeugt. Die Methode erzeugt unterschiedliche Raten von Kohlenstoffemissionen, geht aber auch das Problem der überschüssigen organischen Abfälle der Industrie an.

Obwohl die Methode Treibhausgasemissionen verursacht, weist sie Netto-Null-Emissionsfaktoren auf, da sie erneuerbares/nachhaltiges organisches Material als Brennstoff verwendet. Dies kann jedoch zu einem Druck auf die Anbauflächen für Lebensmittel und andere Biokraftstoffe sowie zu Problemen mit der biologischen Vielfalt führen.

2.2.4. Elektrolyse

Die Wasserelektrolyse ist ein Prozess, bei dem Wassermoleküle durch den Einsatz von elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten werden. Daher wird es auch als "Power-to-Gas" bezeichnet.



Es war die erste kommerzielle Technologie zur Herstellung von reinem Wasserstoff, die auf die 1920er Jahre zurückgeht, und sie ist in der Lage, Wasserstoff ohne direkte Treibhausgasemissionen zu erzeugen. Aufgrund der Bedeutung der Industrie für fossile Brennstoffe und der etablierten SMR-Infrastruktur weltweit basieren heute jedoch nur etwa 4 % der weltweiten Wasserstoffproduktion auf der Elektrolyse.

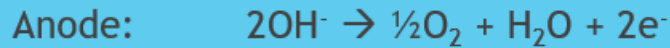
Die Elektrolysezellen sind die grundlegenden Elemente des Systems. In jeder Zelle ist eine Stromquelle an zwei Elektroden - in der Regel aus einem inerten Metall - angeschlossen, die in das Wasser getaucht werden. Die Moleküle zersetzen sich:

- An der Kathode (wo die Elektronen in das Wasser eintreten) erscheint Wasserstoff;
- Der Sauerstoff erscheint an der Anode (wo die Elektronen austreten).

Die Zellen können parallel oder in Reihe geschaltet werden, um das Elektrolyseur-Modul zu bilden. Der erzeugte Wasserstoff wird gekühlt, gereinigt, komprimiert und gespeichert, während der Sauerstoff in der Regel in die Atmosphäre abgeleitet wird.

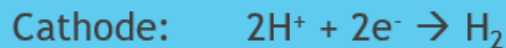
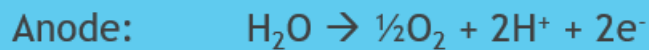
Es gibt zwei Hauptvarianten des Elektrolyseverfahrens. Bei der **alkalischen** Elektrolyse trennt ein Diaphragma die beiden Elektroden, und die Anordnung wird in einen flüssigen Elektrolyten (eine Lösung einer basischen Substanz wie KOH oder NaOH) getaucht. Wasserstoff entweicht aus der Kathode, wo Wasser reduziert wird, wobei Hydroxidionen (OH⁻) entstehen. Die Anionen wandern durch das Diaphragma zur Anode im elektrischen Feld und rekombinieren zu O₂.

Alkalische Elektrolyse



Bei der Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (**PEM**) wird kein flüssiger Elektrolyt benötigt, sondern eine gasdichte, dünne Polymermembran verwendet. An der Anode wird Wasser oxidiert, wobei Sauerstoff, Elektronen und Protonen (die eigentlich Wasserstoffionen sind) entstehen. Die Protonen wandern durch die Membran zur Kathode, wo sie reduziert werden und Wasserstoffgas erzeugen.

PEM-Elektrolyse



Es gibt auch noch andere Varianten, aber Alkaline und PEM sind die ausgereiftesten und am leichtesten im Handel erhältlichen. Abbildung 10 veranschaulicht beide Varianten.

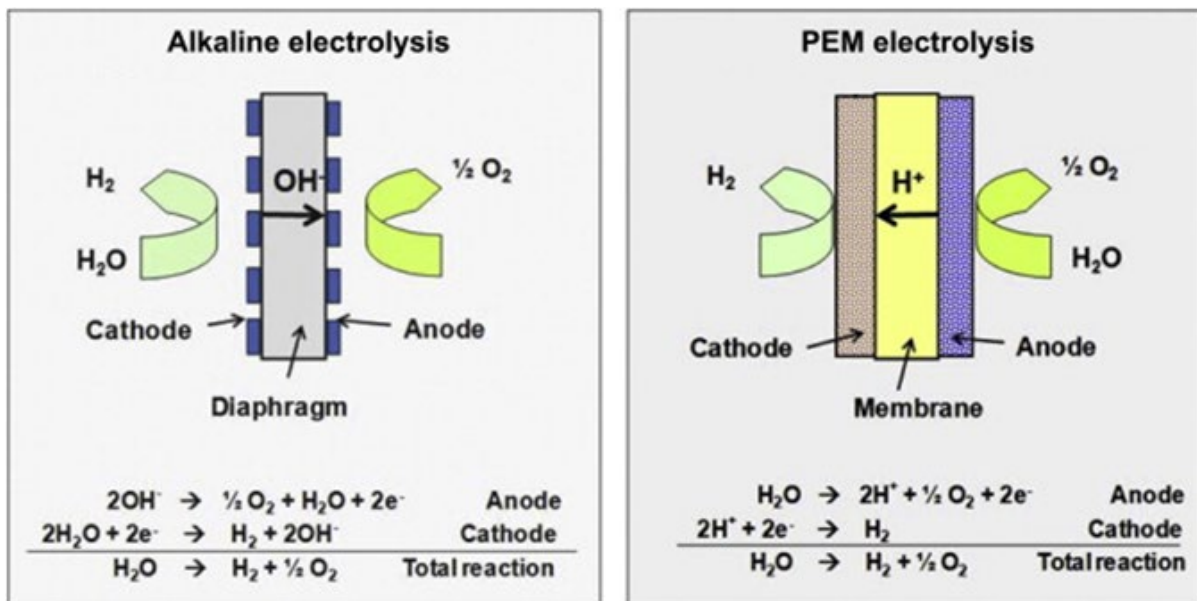


Abbildung 10. Alkalische und PEM-Elektrolyse.

Bei jeder Art von Elektrolyse ist ein wichtiger Punkt die Quelle des verwendeten Stroms: Durch Elektrolyse hergestellter Wasserstoff kann zu null Treibhausgasemissionen führen, wenn erneuerbare Ressourcen anstelle des bestehenden Energienetzes verwendet werden. In den meisten Ländern ist Netzstrom derzeit nicht die ideale Energiequelle, da er kohlenstoffintensiv ist.

2.3. Die Farben des Wasserstoffs

Obwohl es sich um ein farbloses Gas handelt, werden je nach Herstellungsverfahren und den damit verbundenen Emissionen unterschiedliche Farben zur Kennzeichnung von Wasserstoff verwendet. Zum Beispiel:

- ✓ Wenn Wasserstoff durch Elektrolyse mit erneuerbarem Strom hergestellt wird, spricht man von **grünem** Wasserstoff;
- ✓ Wenn er mittels SMR erzeugt wird, nennt man ihn **grauen** Wasserstoff;
- ✓ Wenn jedoch die Kohlenstoffabscheidung und -speicherung nach SMR durchgeführt wird, wird sie als **blauer** Wasserstoff bezeichnet.

In Tabelle 5 sind die verschiedenen Farben des Wasserstoffs aufgeführt, während in Tabelle 6 die Kohlenstoffintensität und die Kosten der wichtigsten Methoden der Wasserstoffherzeugung näher erläutert werden.

Tabelle 5: Die Farben des Wasserstoffs.

Colour code	Description	GHG Intensity
Black	Hydrogen produced using fossil fuel derived coal.	High
Brown	Hydrogen produced using fossil fuel derived lignite.	
Grey	Hydrogen produced using fossil natural gas (via SMR).	Medium
Blue	Hydrogen produced via SMR with CCS.	Low
Turquoise	Hydrogen extracted using the thermal splitting of methane.	Yields solid carbon
Green	Hydrogen produced using electrolysis powered by renewables.	Minimal
Purple Pink Red	Hydrogen produced used nuclear power as the energy source.	
White	Naturally occurring hydrogen.	

Tabelle 6. Kohlenstoffintensität und Kosten von Wasserstoff je nach Herstellungsmethode.

Production Method	Carbon Intensity [kg CO ₂ /kg H ₂]	Cost [€/kg H ₂]	Cost with CCS [€/kg H ₂]
SMR (grey/blue hydrogen)	8.9 - 9.3	€ 1.17	€ 1.75
Coal Gasification (black hydrogen)	22.0 - 29.3	€ 1.29	€ 2.02
Biomass Gasification	2.7 - 32.8 (Net zero)	€ 2.09	€3.23
Water Electrolysis (green hydrogen - from renewable source)	< 4.4	€ 4.88	CCS not needed

Video → Was ist grüner Wasserstoff und wird er die Zukunft antreiben?

<https://www.youtube.com/watch?v=aYBGSfzaa4c>

Empfohlene Lektüre → Dekarbonisierung der Endverbrauchssektoren: Praktische Erkenntnisse über grünen Wasserstoff. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/May/IRENA_Coalition_Green_Hydrogen_2021.pdf?rev=ffd96aeed97c4d029b01aa3a93131e8b

KONTINUIERLICHE BEWERTUNG 2: QUIZ

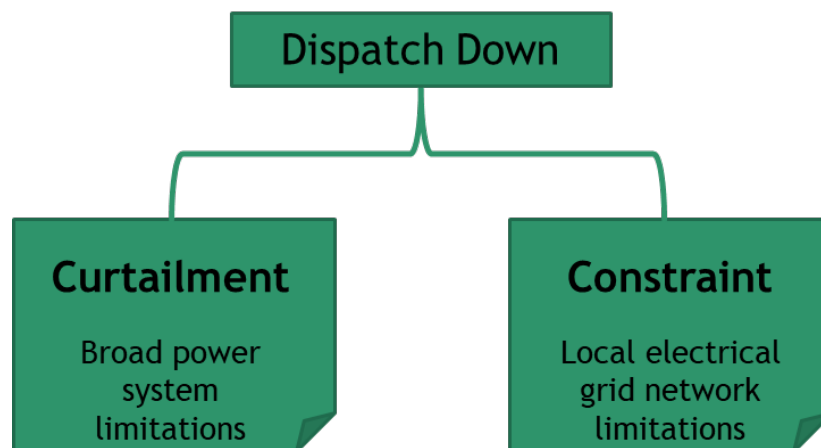
----- Ende von Block 2 -----

----- BLOCK 3 -----

3.1. Power-to-Gas

Eines der Hauptprobleme bei erneuerbaren Energien wie Wind und Sonne ist die Tatsache, dass sie von Natur aus asynchron und schwer vorhersehbar sind. So schwankt beispielsweise die Windgeschwindigkeit im Laufe des Tages und des Jahres, und auch die Sonneneinstrahlung hängt von Faktoren wie Wolkenbedeckung, Standort und Jahreszeit ab.

Manchmal reichen die erneuerbaren Energien allein nicht aus, um die Nachfrage zu decken. In anderen Fällen führt das Überangebot an erneuerbaren Energien in Zeiten geringer Nachfrage dazu, dass die verfügbare Energie nicht immer vom System absorbiert werden kann. Dies wird als Abregelung von Energie bezeichnet.



Diskussion → Eine Diskussion in der Klasse wird empfohlen, um Möglichkeiten zur Speicherung - und anschließenden Nutzung - von überschüssigem Strom aus erneuerbaren Energien aufzuzeigen, der am Ende abregelt wird. Methoden wie herkömmliche Batterien und Pumpspeicherkraftwerke (Abbildung 11) sollten diskutiert und im Hinblick auf ihre Vor- und Nachteile bewertet werden.



Abbildung 11. Pumpspeicherkraftwerke.

Hier kommt dem Wasserstoff eine wichtige Rolle zu: Die Schwankungen in der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bieten eine Chance für Wasserstoff als Energieträger und Speichermedium. Durch den Einsatz von Power-to-Gas (PtG)-Technologien kann die abgeregelte Energie gespeichert und genutzt werden.

Power-to-Gas ist der Prozess, bei dem Strom in chemische Energie umgewandelt und in Form eines Gases wie Wasserstoff gespeichert wird. Wasserstoff kann in Schwachlastzeiten oder in Zeiten, in denen es einen Überschuss an erneuerbarem Strom gibt, produziert werden, anstatt ihn abzuschalten. Dann kann dieser Wasserstoff bei erhöhter Nachfrage zum Netzausgleich verwendet oder an andere Anwendungen geliefert werden: eine Win-Win-Situation.

In PtG-Systemen wird der Wasserstoff in der Regel durch Wasserelektrolyse erzeugt, es handelt sich also um **grünen** Wasserstoff. Power-to-Gas-Systeme können eine wertvolle Lösung zur Dekarbonisierung sein und bieten viele Vorteile:

- Wasserstoff wird auf saubere Weise und ohne Treibhausgasemissionen hergestellt (grüner Wasserstoff);
- Bei den erneuerbaren Energiequellen wird weniger Bedarf an Abregelungen bestehen, und es wird weniger überschüssige Energie verschwendet werden;
- Der gespeicherte Wasserstoff sorgt für zusätzliche Sicherheit und einen Ausgleich der Energieversorgung;

- Es besteht auch die Möglichkeit, überschüssigen Wasserstoff für eine Vielzahl anderer Zwecke zu verkaufen.

Die Technologie ist jedoch mit einigen Herausforderungen verbunden:

- Hohe Kosten - PtG-Systeme sind immer noch teuer in der Installation und Wartung, aber sie werden immer kostengünstiger;
- Die Festlegung der optimalen Größe und des Standorts der Elektrolyseure ist nicht immer einfach und erfordert eine strategische Planung;
- Die großen Mengen an produziertem Wasserstoff müssen irgendwo gespeichert werden.

Diskussion → Es wird eine Diskussion in der Klasse empfohlen, um (vorläufig) herauszufinden, wie und wo die Speicherung von Wasserstoff in großem Maßstab erfolgen kann.

Fallstudien → Eine Gelegenheit, bestehende und geplante Power-to-Gas-Systeme in aller Welt vorzustellen.

3.1.1. Grundlagen des Elektrolyseurs

Das Herzstück der meisten Power-to-Gas-Systeme ist erneuerbarer Strom, der durch die Elektrolyse von Wasser erzeugt wird. Die Funktionsweise von Elektrolyseuren und die Unterschiede zwischen der alkalischen und der PEM-Elektrolyse wurden in Block 2 erforscht - eine schnelle Wiederholung wird empfohlen.

In der Praxis sind die wichtigsten Elemente einer Elektrolysezelle folgende:

- ✓ Die Energieversorgung (Strom);
- ✓ Der Eintrag von Wasser (H_2O);
- ✓ Die Emissionen von Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2);
- ✓ Die Kathode (negative Ladung);
- ✓ Die Anode (positive Ladung);
- ✓ Das Diaphragma oder die Membran, die beide Seiten trennt.

Weitere Elemente können Pumpen, Entlüftungen, Lagertanks und andere Komponenten sein.

Laborexperiment → 🙋🏻 ■ 🔌 ⚡ 🔋 🏠 Stelle wird ein Laborexperiment empfohlen, bei dem die Lernenden einen kleinen 64-W-Elektrolyseur betreiben können. Eine Anleitung finden Sie unter <https://www.fuelcellstore.com/manuals/e206-e207-electrolyzer-65-230.pdf>.

3.2. Die Rolle von Wasserstoff in der Heizung

Neben seiner Rolle als Stromspeicher kann Wasserstoff auch in anderen Bereichen des Energiesektors eine wichtige Rolle spielen, z. B. beim Heizen.

3.2.1. Heizung für Haushalte und Gewerbe

In Regionen mit kälterem Klima benötigen Wohn- und Geschäftshäuser in der Regel Raumheizung - d.h. die Beheizung von Räumen für den menschlichen Komfort - sowie Warmwasserbereitung. In den meisten Ländern, in denen Raumheizung erforderlich ist, wird diese heute im Allgemeinen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe bereitgestellt.

Es gibt nachhaltigere Alternativen zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung von Privathaushalten und Gewerbebetrieben, wie z. B. die Fernwärme. Diese Art der Heizung auf lokaler Ebene, die in Abbildung 12 dargestellt ist, kann mit einer Vielzahl von erneuerbaren Ressourcen betrieben werden und ist effizienter als einzelne Heizkessel.

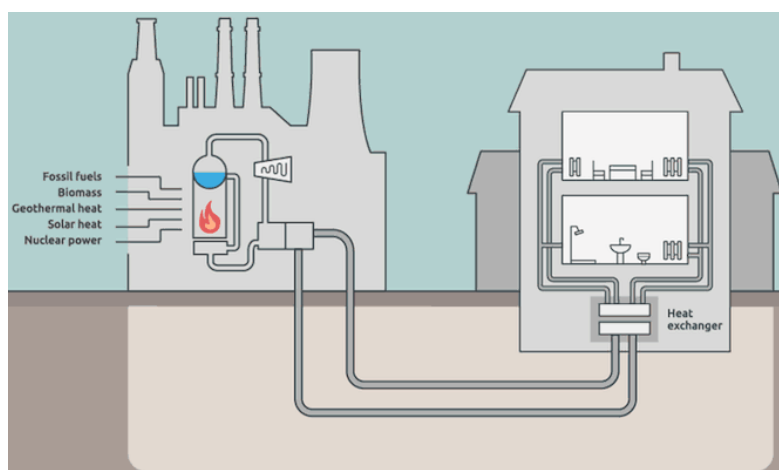


Abbildung 12. Animation Fernwärme.

Weitere nachhaltige Alternativen sind Wärmepumpen, die mit sauberem Strom betrieben werden, und Wasserstoff als Ersatz für fossiles Erdgas.

3.2.2. Industrielle Heizung

Bei der industriellen Beheizung wird jedoch für eine Vielzahl von industriellen Prozessen Hochtemperaturwärme benötigt. In diesem Fall können Alternativen wie Wärmepumpen und nukleare Fernwärme nicht die erforderlichen hohen Temperaturen liefern.

Daher ist die Verbrennung eines Brenngases die am besten geeignete Lösung für die Beheizung der Schwerindustrie. Als Alternative zu fossilem Erdgas (das heute der Standard ist) bietet sich grüner Wasserstoff als hoch brennbares Gas an, das einen kohlenstoffarmen Ersatz für Methan darstellt. Allerdings werden große Mengen des Gases benötigt, und grüner Wasserstoff ist heute noch eine sehr kostspielige Option.

3.3. Rolle des Wasserstoffs im Verkehr

Wasserstoff kann eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung eines weiteren Bereichs des Energiesektors spielen: des Verkehrs. Als Kraftstoff kann er entweder in einer Brennstoffzelle in Strom umgewandelt werden, um einen Elektromotor anzutreiben, oder in einem Verbrennungsmotor verbrannt werden.

Heute sind wasserstoffbetriebene Fahrzeuge in fast allen europäischen Ländern, in den Vereinigten Staaten und in vielen asiatischen Ländern erhältlich, auch wenn das Tankstellennetz noch nicht weit entwickelt ist.



Abbildung 13. Die erste pipelinegespeiste Wasserstofftankstelle der USA in Torrance, Kalifornien.

3.3.1. Schwertransport

Wasserstoff als Kraftstoff ermöglicht große Reichweiten und kurze Betankungszeiten, was ihn besonders für große Nutzfahrzeuge attraktiv macht, die lange Strecken zurücklegen, wie z. B.:

- ✓ Schwere Lastkraftwagen (Lkw): Das Interesse an Wasserstoff gewinnt bei den Lkw-Herstellern an Fahrt - Volvo beispielsweise rechnet damit, dass bis 2030 die Hälfte seiner europäischen Lkw-Verkäufe wasserstoff- oder batteriebetrieben sein wird.
- ✓ Busse: In London verkehren bereits mindestens zwanzig Wasserstoffbusse, in Dublin sind drei Wasserstoffbusse im Einsatz.
- ✓ Züge: Der Coradia iLint, der weltweit erste wasserstoffbetriebene Zug in Deutschland, kann fast 1.200 km ohne Nachtanken zurücklegen.



Abbildung 14. Der wasserstoffbetriebene Zug Coradia iLint.

- ✓ Schiffe: Es wurden Konzepte für wasserstoffbetriebene Schiffe vorgestellt, die eine vielversprechende Lösung für den emissionsfreien Seeverkehr darstellen.
- ✓ Flugzeuge: Ein weiterer schwer zu dekarbonisierender Sektor, die Luftfahrt, wird Kraftstoffe wie Wasserstoff in Betracht ziehen müssen, um die Emissionen zu senken. Ein Konzept, der Airbus ZEROe, könnte bis 2035 in Betrieb gehen - weitere Informationen unter <https://youtu.be/5Fi65k2K3Mw>

3.3.2. Lichttransport





Leichte Kurzstreckenfahrzeuge können auch mit Wasserstoff betrieben werden. Zu den auf dem Markt erhältlichen wasserstoffbetriebenen Autos gehören beispielsweise der Toyota Mirai (Abbildung 15) und der Hyundai Nexa.



Abbildung 15. Der Toyota Mirai.

Doch während Wasserstoff für den Schwerlastverkehr durchaus sinnvoll ist, wird seine Überlegenheit gegenüber einem batterieelektrischen Standardantrieb in kleineren Fahrzeugen angezweifelt. In Anbetracht der Verluste, die mit der Produktion, der Verdichtung und dem Transport von Wasserstoff verbunden sind, sowie der begrenzten Effizienz der Rückverstromung ist die Zukunft von Wasserstoff im Leichtverkehr nicht unumstritten.

Empfohlene Lektüre → "Why Hydrogen Will Never Be The Future Of Electric Cars" von James Morris. <https://www.forbes.com/sites/jamesmorris/2020/07/04/why-hydrogen-will-never-be-the-future-of-electric-cars/?sh=1e8f1dfd12fa>

Diskussion →     Diskussion in der Klasse empfohlen, um die Eignung von Wasserstoff als Kraftstoff für den Schwer- und insbesondere für den Leichtverkehr zu analysieren.

KONTINUIERLICHE BEWERTUNG 3: HERSTELLUNG EINES ELEKTROLYSEURDIAGRAMMS

----- Ende von Block 3 -----

----- BLOCK 4 -----

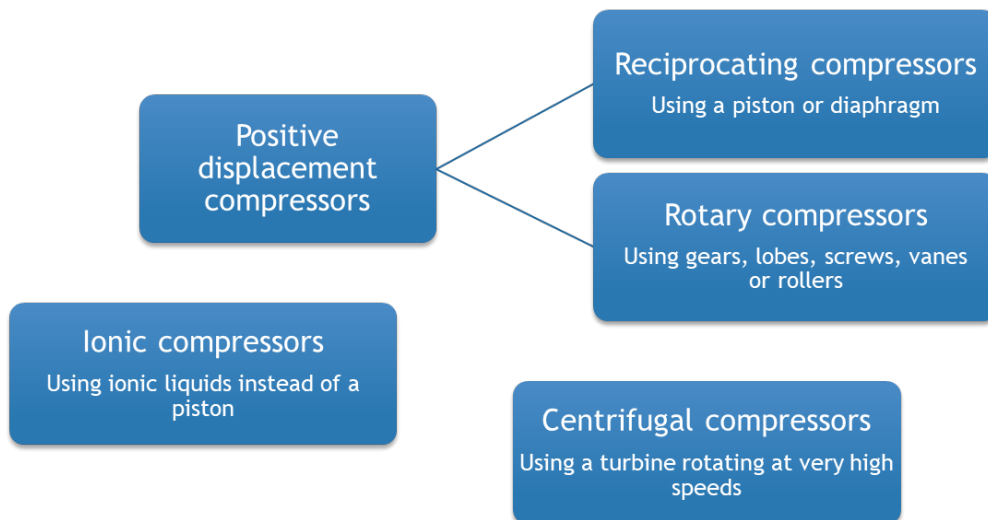
4.1. Komprimierung und Speicherung von Wasserstoff

Wasserstoff kann als Gas oberirdisch gelagert werden; dazu muss er jedoch komprimiert werden - seine Dichte ist so gering, dass 1 kg Wasserstoff bei atmosphärischem Druck (1 atm) etwa 12 m einnimmt³.

Wasserstoff wird normalerweise bei relativ niedrigem Druck (<30 bar) hergestellt, und die Verdichtung ist oft direkt nach der Herstellung erforderlich. Zum Beispiel nimmt 1 kg Wasserstoff, der auf 100 Bar komprimiert ist, nur 0,13 m³ ein - viel weniger als die ursprünglichen 12 m³.

Verdrängungskompressoren können hin- und hergehend oder rotierend sein. Ersterer verwendet einen Motor mit Linearantrieb, um eine Membran hin und her zu bewegen und so das vom Gas eingenommene Volumen durch diese Bewegung zu verringern. Letztere hingegen arbeiten durch die Rotation von Zahnrädern, Nocken oder Rollen. Es gibt noch eine dritte Variante von Verdrängungskompressoren: Ionische Kompressoren haben einen linearen Antrieb, verwenden aber ionische Flüssigkeiten anstelle von Membranen.

Zentrifugalkompressoren sind aufgrund ihres hohen Durchsatzes und ihres moderaten Verdichtungsverhältnisses in der Regel die beste Wahl für Pipeline-Anwendungen. Sie arbeiten, indem sie eine Turbine mit sehr hohen Geschwindigkeiten drehen, um das Gas zu verdichten, und müssen wegen der geringen Molekülmasse von Wasserstoff mit dreimal höheren Geschwindigkeiten als Erdgasverdichter arbeiten, um das gleiche Verdichtungsverhältnis zu erreichen.



Die Kosten für die Verdichtung sind nicht unerheblich - sie machen sogar den größten Teil der CDS-Kosten (Compression, Storage and Dispensing) aus. Die Verdichtung wirkt sich in zweifacher Hinsicht auf die Wasserstoffkosten aus: zum einen durch die Stromkosten für den Betrieb der Anlage und zum anderen durch die Kapitalkosten für den Kompressor selbst.

Durch die Komprimierung von Wasserstoff kann er in Verbundtanks, wie dem in Abbildung 16 gezeigten, gespeichert werden.



Abbildung 16. Ein Wasserstoffspeicher aus Verbundwerkstoff.

4.1.1. Flüssigwasserstoff

Wasserstoff kann auch oberirdisch in flüssiger Form gespeichert werden, bei relativ niedrigem Druck und hoher Energiedichte. Dazu sind jedoch kryogene Temperaturen erforderlich: Wie in Block 2 untersucht, liegt der Siedepunkt von Wasserstoff sehr niedrig (-253 °C) und der Temperaturbereich seiner flüssigen Phase ist eng (etwa 20 °C).

Flüssiger Wasserstoff muss in kryogenen Tanks, wie dem in Abbildung 17 gezeigten, gelagert werden.



Abbildung 17. Ein kryogener Tank für die Speicherung von flüssigem Wasserstoff.

4.1.2. Unterirdische Lagerung

Große Mengen unkomprimierten Wasserstoffs können unterirdisch gespeichert werden, z. B. in Salzkavernen oder erschöpften Gasfeldern. Die Speicherung von Erdgas (Methan) in unterirdischen Hohlräumen ist eine weit verbreitete Praxis, die schon seit Jahrzehnten praktiziert wird.

Zu den Vorteilen der unterirdischen Speicherung von Wasserstoff gehören die geringen Kosten, die hohe Betriebssicherheit und die gute Abdichtungsfähigkeit. Allerdings ist dieser Ansatz natürlich auf geologisch geeignete Gebiete mit den entsprechenden geologischen Voraussetzungen beschränkt.

Zu den Standorten, an denen Wasserstoff in Salzkavernen gespeichert wird, gehören Teesside (Vereinigtes Königreich) und bestimmte Gebiete in Texas (Vereinigte Staaten). Diese sind in Abbildung 18 dargestellt.

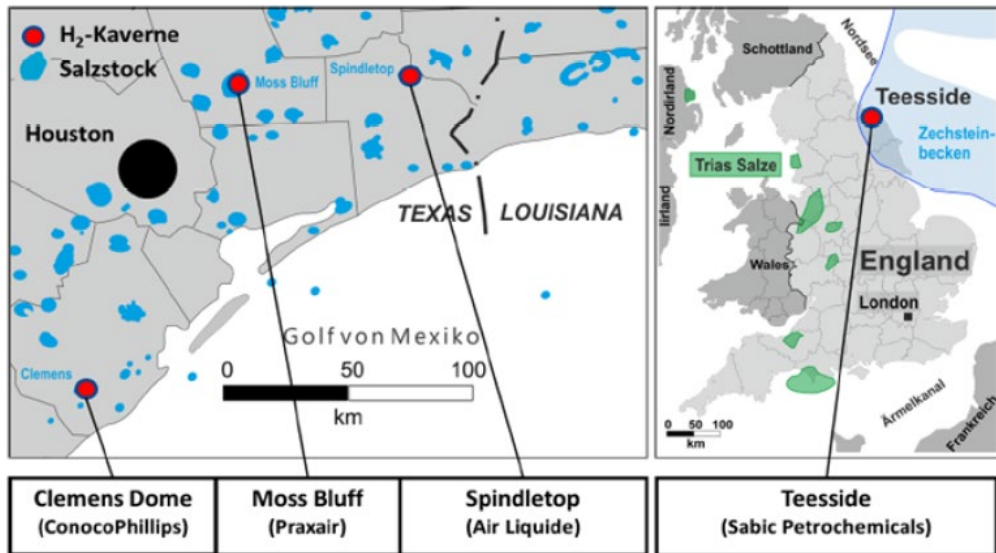


Abbildung 18. Speicherung von Wasserstoff in Salzlagern in den USA und im Vereinigten Königreich.
 [Quelle: <https://energnet.eu/wp-content/uploads/2021/02/3-Hevin-Underground-Storage-H2-in-Salt.pdf>]

4.2. Wasserstoffverteilung und Rohrleitungen

Geringe und mittlere Mengen an Wasserstoff können auf der Straße transportiert werden, vor allem über kürzere Strecken.

Komprimierter gasförmiger Wasserstoff kann in Lastkraftwagen, den so genannten Tube Trailern, transportiert werden, während flüssiger Wasserstoff in superisolierten, kryogenen Tanklastwagen, den so genannten Liquid Tankers, befördert werden kann.



Abbildung 19. Ein Schlauchanhänger (links) und ein Flüssigkeitstankwagen (rechts).

Für den Transport über große Entfernungen und in großen Mengen kann gasförmiger Wasserstoff auch durch Pipelines transportiert werden, wie dies heute bei Erdgas der Fall ist. Die Umrüstung von Erdgaspipelines für den Transport eines Gemischs aus Erdgas und Wasserstoff (<15% H₂) erfordert im Allgemeinen nur geringfügige Änderungen. Die Umstellung dieser Pipelines auf die Beförderung von reinem Wasserstoff kann jedoch umfangreichere Änderungen erfordern.

Wasserstoff kann in vielen Arten von bestehenden Pipelines mit fossilem Erdgas gemischt werden, um es zu ergänzen oder letztendlich ganz zu ersetzen. Weltweit gibt es zahlreiche Projekte zur Netzeinspeisung, darunter auch einige im Vereinigten Königreich: Das Projekt H21 Leeds City Gate stellt einen Plan für ein 100%iges Wasserstoffnetz für die Stadt Leeds vor, der wirtschaftlich machbar und technisch möglich ist, während das Projekt HyDeploy die weltweit erste Wasserstoffnetzeinspeisung realisiert hat.

Im Jahr 2020 hat die European Hydrogen Backbone (EHB) Initiative ihre Vision einer speziellen paneuropäischen Wasserstoffinfrastruktur vorgestellt (siehe Abbildung 20).

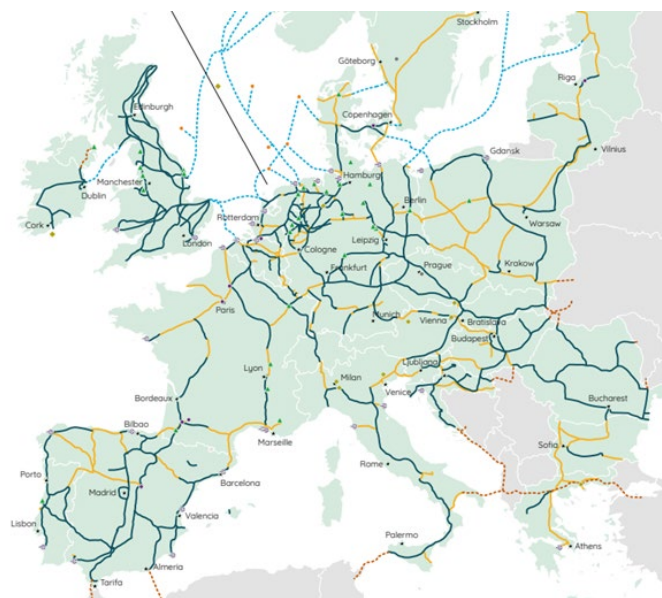


Abbildung 20. Die vorgeschlagene EHB-Infrastruktur mit neuen und wiederverwendeten Rohrleitungen.
[Quelle: <https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2022/04/EHB-A-European-hydrogen-infrastructure-vision-covering-28-countries.pdf>]

Ursprünglich sollte sich die EHB-Infrastruktur über 10 europäische Länder erstrecken und auf wiederverwendeten bestehenden Erdgasleitungen sowie einer neu errichteten Wasserstoffinfrastruktur basieren. Die Vision wurde 2022 auf 28 Länder ausgeweitet, wobei für 2040 ein 53.000 km langes Netz mit geschätzten Kosten von 80-143 Mrd. EUR vorgeschlagen wurde.

Die Initiative besteht aus einer Gruppe von 31 Gasinfrastrukturunternehmen, wobei die jüngsten Projektaktualisierungen darauf abzielen, die Umsetzung des EHB zu beschleunigen, um die Abhängigkeit Europas von fossilen Brennstoffen aus Russland zu verringern.

4.3. Umwandlung von Wasserstoff in Energie

Eine der wichtigsten Stärken von Wasserstoff als Energieträger ist die Tatsache, dass die Umwandlung zwischen Wasserstoff und Elektrizität reversibel ist und beide Energieträger als komplementär betrachtet werden können. Bei Bedarf kann Wasserstoff auf zwei grundlegende Arten in Strom umgewandelt werden: elektrochemisch (in einer Brennstoffzelle) oder durch Verbrennung.

4.3.1. Brennstoffzellen

Eine Brennstoffzelle ist eine elektrochemische Zelle, die chemische Energie in Elektrizität umwandelt. Dies geschieht durch eine Reaktion zwischen Wasserstoff und Sauerstoff.

Sie benötigen eine kontinuierliche Quelle von Wasserstoff und Sauerstoff (oft aus der Luft). Wenn grüner Wasserstoff verwendet wird, ist der erzeugte Strom sauber - überschüssiger Wasserstoff und Wasserdampf sind die einzigen Nebenprodukte.

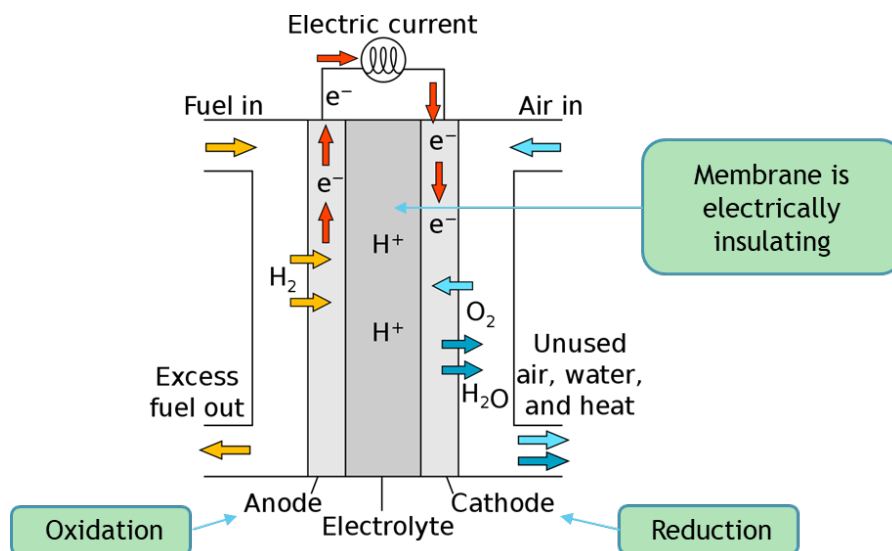


Abbildung 21. Schematische Darstellung einer Brennstoffzelle.

Brennstoffzellen haben eine Anode, an der der Brennstoff (Wasserstoff) zugeführt wird, und eine Kathode, der Sauerstoff zugeführt wird. Die beiden Seiten sind durch eine elektrisch isolierende Membran getrennt. Der Betrieb einer Brennstoffzelle gliedert sich in vier grundlegende Schritte:

1. Ein Katalysator bewirkt, dass Wasserstoffatome in Protonen und Elektronen dissoziieren;

2. Die Protonen wandern durch die Membran zur Kathode;
3. Die Elektronen werden dann gezwungen, sich in einem externen Stromkreis zu bewegen;
4. Dann wird Strom geliefert.



Brennstoffzellen werden in der Regel zu einem Stapel zusammengebaut, wobei sich die erzeugten Ströme addieren.

Sie haben ein breites Anwendungsspektrum: In Verbindung mit einem Elektromotor können sie viele Verkehrsmittel wie Autos, Züge, Busse, Lastwagen, Schiffe und Flugzeuge antreiben. Sie können auch Geräte wie persönliche Elektronik, Taschenlampen, Spielzeug, Drohnen und sogar militärische Anwendungen mit Strom versorgen sowie Notstromsysteme für netzunabhängige Anwendungen wie Arbeitsplatzbeleuchtung, Sicherheitskameras, Umweltüberwachung und Prozesssteuerungssysteme.

Brennstoffzellen haben keine großen beweglichen Teile und arbeiten ohne Verbrennung. Daher sind sie äußerst zuverlässig. Allerdings sind die Teile teuer (Membranen, Stromabnehmer usw.), hochreiner Wasserstoff ist immer noch relativ teuer, und ihr Zusammenbau muss sehr präzise sein, um Lecks zu vermeiden.

Laborexperiment → An dieser Stelle wird ein Laborexperiment empfohlen, bei dem die Lernenden einen kleinen 1-W-Brennstoffzellenstapel mit fünf modularen 200-mW-Zellen betreiben können. Die Zellen können nach Bedarf hinzugefügt oder entfernt werden. Eine Anleitung finden Sie unter <https://www.fuelcellstore.com/manuals/f108-f109-f110-fuel-cell-stacks.pdf>.

4.3.2. Wasserstoffverbrennung

Die Verbrennung ist ein exothermer chemischer Prozess, bei dem ein Stoff mit Sauerstoff reagiert und Wärme freisetzt. Bei der Verbrennung von Wasserstoff reagiert dieser mit Sauerstoff zu Wasser, wobei Energie freigesetzt wird:



Diese Reaktion wird in der Raumfahrt häufig zum Antrieb von Raketentriebwerken verwendet.

Bei der Verbrennung von Wasserstoff entstehen keine Kohlenstoffemissionen. Bei der Verbrennung an der Luft entstehen jedoch Stickoxide (NO_x) aufgrund des in der Luft vorhandenen Stickstoffs.

Wasserstoff brennt mit einer blassblauen Flamme, die bei Tageslicht fast unsichtbar ist - die Flamme kann gelb erscheinen, wenn es in der Luft Verunreinigungen wie Staub gibt. Eine reine Wasserstoffflamme erzeugt keinen Rauch, und die Flammentemperatur ist relativ hoch.

Tabelle 7. Vergleich der Temperatur einer Wasserstoffflamme mit der von anderen Brennstoffen.

Kraftstoff	Flamme Temperatur in der Luft
Wasserstoff	2,045 °C
Methan	1,957 °C
Propan	1,980 °C
Kerze	1,000 °C

Außerdem haben Wasserstoffflammen nur eine geringe Strahlungswärme - man spürt die Hitze möglicherweise erst, wenn man sehr nahe an (oder in) der Flamme ist. Daher ist der Einsatz von Flammendetektoren wie Wärmebildkameras der beste Weg, um eine Wasserstoffflamme zu erkennen.

Zu den Anwendungen der Wasserstoffverbrennung gehören:

- ✓ Wasserstoff-Verbrennungsmotoren (ICEs): Sie sind nahezu identisch mit herkömmlichen Ottomotoren, verwenden aber Wasserstoff als Kraftstoff. Wasserstoffverbrennungsmotoren sind in der Regel bei hohen Lasten am

effizientesten, während sich Brennstoffzellen im Allgemeinen bei niedrigeren Lasten als effizienter erweisen.

- ✓ Als Alternative zu Methan: Wasserstoff kann verbrannt und für die gleichen Anwendungen wie fossiles Erdgas verwendet werden, einschließlich der Verbrennung in Gasturbinen, zum Heizen und Kochen in Privathaushalten und zum Heizen in der Industrie.

Diskussion → Eine Diskussion in der Klasse wird empfohlen, um die wichtigsten Unterschiede zwischen der Verwendung von Wasserstoff in Brennstoffzellen und bei der Verbrennung hervorzuheben und das Problem der NO_x-Emissionen bei der Verbrennung von Wasserstoff zu diskutieren.

KONTINUIERLICHE BEWERTUNG 4: ERSTELLUNG EINES BRENNSTOFFZELLEN-DIAGRAMMS

----- Ende von Block 4 -----

----- BLOCK 5 -----

5.1. Wasserstoff in der petrochemischen Industrie

Erdölraffinerien und die Ammoniakproduktion dominieren derzeit die weltweite Nachfrage nach Wasserstoff und machen über 90 % des Gesamtverbrauchs aus. Das Problem wird dadurch verschärft, dass diese Anwendungen im Zusammenhang mit fossilen Brennstoffen in der Regel von eigenen, groß angelegten Dampf-Methan-Reformer-Anlagen (SMR) bedient werden.

In Erdölraffinerien finden zwei Prozesse mit Wasserstoff statt: Hydrotreating und Hydrocracking.

5.1.1. Hydrotreating

Beim Hydrotreating - oder der katalytischen Wasserstoffbehandlung - werden unerwünschte Stoffe aus Erdölfraktionen entfernt, indem diese selektiv mit Wasserstoff umgesetzt werden. Das Verfahren findet in einem Reaktor bei relativ hohen Temperaturen statt.

Zu diesen unerwünschten Stoffen gehören Schwefel, Stickstoff und Aromaten, die von Natur aus im Öl enthalten sind. Das Verfahren verbessert die Qualität der atmosphärischen Emissionen der entstehenden Kraftstoffe, indem es den Gehalt an Schwefel und metallorganischen Stoffen reduziert.

Die steigende Nachfrage nach fossilen Kraftstoffen im Verkehrswesen im 20th Jahrhundert und die Bemühungen der Raffinerieindustrie, dem weltweiten Trend zu saubereren Kraftstoffen gerecht zu werden, haben dazu geführt, dass die Wasserstoffbehandlung zu einem immer wichtigeren Raffinerieverfahren geworden ist.

Ein ähnliches Verfahren, die so genannte Hydrodesulfurierung, kann bei Bedarf auch zur Entschwefelung von Erdgas eingesetzt werden.

5.1.2. Hydrocracken

Hydrocracken ist ein Verfahren, bei dem Schweröl in leichtere, wertvollere Produkte wie Benzin, Kerosin und Diesel aufgespalten wird. Der Prozess findet bei erhöhten Temperaturen und Drücken in Anwesenheit eines Katalysators statt.

Beim Hydrocracken werden Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen gespalten und gleichzeitig hydriert. Das Verfahren spielt eine Schlüsselrolle in der Erdölverarbeitung, da es hochwertige

Kraftstoffe liefert und minderwertige Ausgangsstoffe so aufbereitet, dass sie für die weitere Verarbeitung geeignet sind.

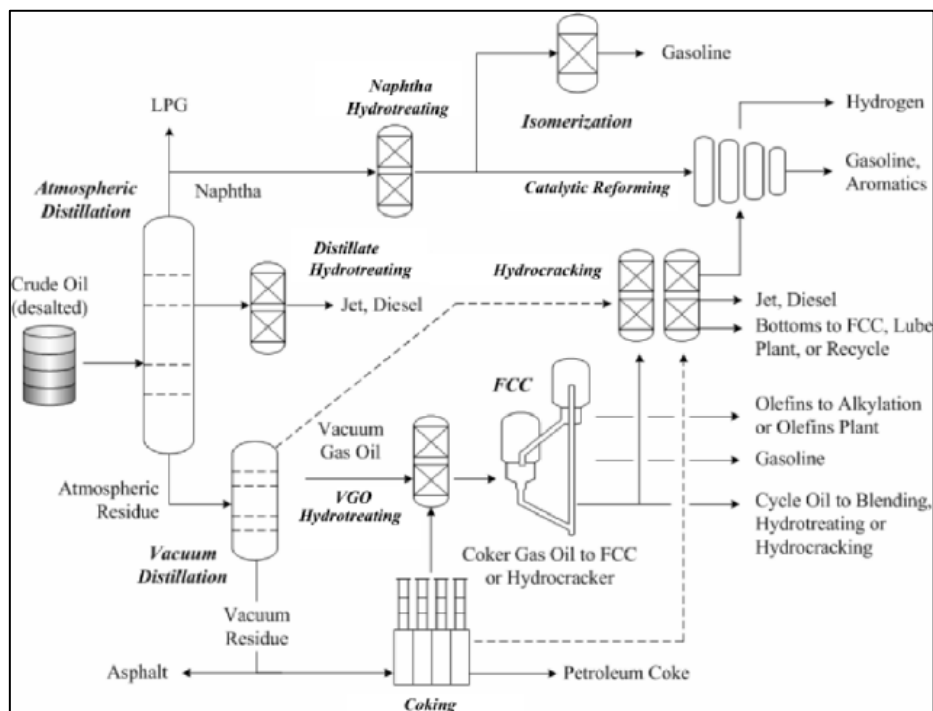


Abbildung 22. Hydrotreating- und Hydrocracking-Verfahren.

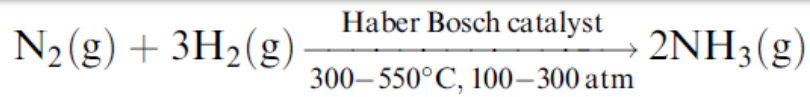
[Quelle: Robinson, Paul & Dolbear, Geoff. (2007). Hydrotreating und Hydrocracking: Fundamentals]

5.2. Ammoniak-Produktion

Heute wird etwa die Hälfte des weltweit produzierten Wasserstoffs zur Herstellung von Ammoniak (NH_3) verwendet. Diese Verbindung ist die Grundlage für die Stickstoffdüngerindustrie, die in der Landwirtschaft eine wichtige Rolle spielt.

Ammoniak selbst ist kein Treibhausgas, aber die Ammoniakemissionen müssen bekämpft werden. Die Oxidation von Ammoniak zu Nitrit durch Bakterien ist für die weltweiten Emissionen von Distickstoffoxid (N_2O) verantwortlich, das auch als "Lachgas" bekannt ist - ein starkes Treibhausgas und eine der Hauptursachen für den Abbau der Ozonschicht. Heutzutage stammt der größte Teil der Ammoniakemissionen aus landwirtschaftlichen Verfahren und Praktiken.

Für die Herstellung von Ammoniak wird Wasserstoff mit Stickstoff kombiniert, je nach Reaktion:



Dabei handelt es sich um das Haber-Bosch-Verfahren - ein ausgereiftes, kostengünstiges Verfahren, das Anfang des 20. Jahrhunderts von dem deutschen Chemiker Fritz Haber entwickelt und von Carl Bosch in ein industrielles Verfahren zur Herstellung von Düngemitteln überführt wurde.

5.2.1. Strom-zu-Ammoniak

Die Ammoniakproduktion kann auch eine Lösung für die Speicherung von Wasserstoff darstellen. Das Konzept mit der Bezeichnung Power-to-Ammonia (P2A) besteht darin, grünen Wasserstoff durch Elektrolyse zu erzeugen und ihn anschließend in Ammoniak umzuwandeln.

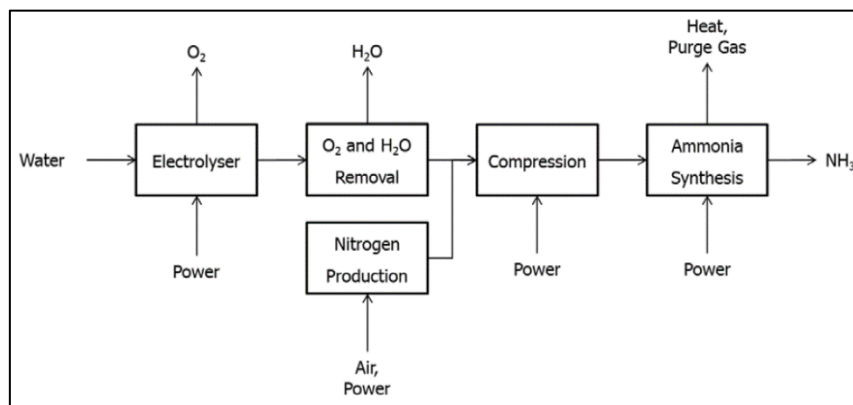


Abbildung 23. Das Power-to-Ammonia-Konzept.

Ein Großteil des weltweit verfügbaren Wasserstoffs wird derzeit zur Herstellung von Ammoniak verwendet, jedoch nicht auf nachhaltige Weise wie bei P2A. Das Verfahren bietet mehrere Vorteile:

- ✓ Ammoniak hat eine hohe Energiedichte, so dass der Transport und die Speicherung in großen Mengen eher möglich ist als bei reinem Wasserstoff;
- ✓ Es kann als Flüssigkeit transportiert und gelagert werden;
- ✓ Die chemische Industrie kann es als erneuerbaren Rohstoff für die Herstellung von Düngemitteln und anderen Produkten verwenden.

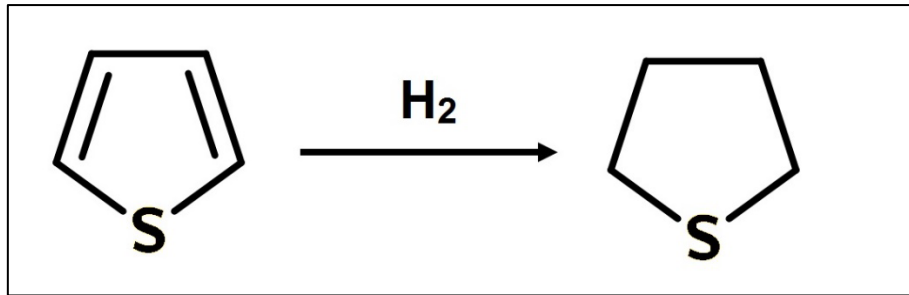


Abbildung 26. Hydrierung.

Bei der Hydrierung entstehen zum Beispiel gesättigte Fette. Das folgende Beispiel zeigt die Sättigung eines organischen Moleküls mit Platin als Katalysator, wobei die Doppelbindung reduziert wird.

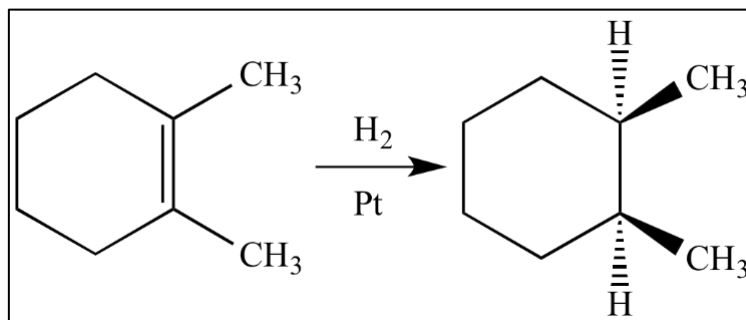


Abbildung 27. Beispiel für eine Hydrierung mit Platin.

In der Lebensmittelindustrie wird die Hydrierung in großem Umfang bei der Verarbeitung von Pflanzenölen eingesetzt: Durch die Änderung des Sättigungsgrades einiger Fette können wichtige physikalische Eigenschaften (wie der Schmelzpunkt) verändert werden, wodurch flüssige Öle halbfest werden. Margarine ist ein bekanntes Produkt der Hydrierung - für die Herstellung einer Tonne Margarine werden über 7 kg Wasserstoff benötigt.

Das Verfahren wird auch in der chemischen und pharmazeutischen Industrie eingesetzt. In diesen Fällen wird die Hydrierung genutzt, um Moleküle zu verändern und verschiedene organische Verbindungen für die Herstellung verschiedener Produkte und Arzneimittel bereitzustellen.

5.4. Andere Rollen für Wasserstoff in der Industrie

Neben der petrochemischen Industrie und der Hydrierung wird Wasserstoff heute auch von einer Vielzahl von Industriezweigen als Ausgangsstoff verwendet, z. B. von der

5.4.1. Halbleiterherstellung

Halbleiterchips sind elektrische Schaltkreise mit vielen Komponenten, die ein wesentlicher Bestandteil von Computerprozessoren, Speicherchips und Mikrocontrollern sind. Halbleiterhersteller wie Intel, Analog Devices, Samsung und Toshiba verwenden Wasserstoff in verschiedenen Schritten ihrer Herstellungsverfahren.

Zu diesen Prozessen gehören vor allem:

- Lithografie → Ein Verfahren, das in der Mikrofabrikation zur Übertragung geometrischer Muster auf eine Oberfläche verwendet wird. Bei der Lithografie dient Wasserstoff als Reinigungs- oder Schutzgas.
- Dünnschichtabscheidung → Die Technologie des Auftragens einer sehr dünnen Materialschicht auf eine Oberfläche oder eine andere abgeschiedene Schicht. Bei der Dünnschichtabscheidung dient Wasserstoff als Trägergas, das die Abscheidungsmaterialien in eine Vakuumkammer transportiert, in der die Abscheidung stattfindet. Es kann auch Argon verwendet werden, obwohl Wasserstoff bessere Ergebnisse liefert.

5.4.2. Wasserstoff als Kühlmittel

Wasserstoff ist ein hervorragendes Kühlmittel und wird häufig zur Verbesserung der Wärmeübertragung bei der Kühlung von Turbinengeneratoren eingesetzt, insbesondere bei Generatoren mit hoher Leistung (über 100 MW). Tatsächlich ist Wasserstoffgas als Wärmeübertragungsmedium siebenmal effektiver als Luft und hat eine 14-mal geringere Dichte.

Die meisten Kraftwerke sind jedoch auf die Lieferung von Wasserstoff zur Kühlung ihrer Generatoren angewiesen, anstatt ihn vor Ort zu produzieren. Dies führt unweigerlich zu Sicherheitsrisiken und Ineffizienzen sowie zu Unannehmlichkeiten und Kosten im Zusammenhang mit dem Nachfüllen, dem Transport und der Lagerung von Wasserstofftanks.

Fallstudie → Wasserstoffgenerator verbessert Effizienz und Sicherheit im Kraftwerk Aguirre in Puerto Rico - Austausch der Lagertanks gegen eine Elektrolyseanlage.
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=10539>

5.4.3. Reserveleistung

Wasserstoff kann als Energiequelle in Notstromsystemen und Generatoren verwendet werden. Solche Systeme werden für netzunabhängige Anwendungen eingesetzt, wie z. B.:

- ✓ Arbeitsbeleuchtung;
- ✓ Sicherheitskameras;
- ✓ Überwachung der Umwelt;

- ✓ Prozesssteuerungssysteme.

Das Chemieunternehmen Linde beispielsweise vermarktet das HYMERA-System (Abbildung 28), das als der weltweit erste "kommerziell nutzbare" Wasserstoff-Brennstoffzellengenerator bezeichnet wird. Das System kann bis zu 175 W Spitzenleistung liefern und bietet eine Alternative zu fossilen Generatoren und sperrigen Batteriespeichern.



Abbildung 28. Der HYMERA-Generator [Quelle: Linde].

5.4.4. Die Sektoren Glas und Metall

In der Glasindustrie wird Wasserstoff in Kombination mit Stickstoff als Schutzgas verwendet, um Oxidation zu verhindern und die Glasqualität zu verbessern.

Die Metall-/Stahlindustrie wiederum nutzt Wasserstoff für Anwendungen wie z. B.:

- ✓ Kontrollierte Atmosphären;
- ✓ Bei der Wärmebehandlung von Nichteisenmetallen;
- ✓ Zur Unterstützung des Plasmaschweißens und -schneidens.

5.4.5. Luft- und Raumfahrtanwendungen

Die Luft- und Raumfahrtindustrie verwendet Wasserstoff als Brenngas für Raumfahrzeuge oder in einigen ihrer internen Systeme. In Kombination mit einem Oxidationsmittel (z. B. flüssigem Sauerstoff) liefert flüssiger Wasserstoff den höchsten spezifischen Impuls aller bekannten Raketentreibstoffe.

Heutzutage ist flüssiger Wasserstoff der bevorzugte Treibstoff für Raumfahrtprogramme und Satellitenstarts.

Gastredner → In dieser Phase können Vertreter der Industrie den Kurs bereichern und eine neue Perspektive einbringen, indem sie ihre Erfahrungen aus der Praxis weitergeben.

**KONTINUIERLICHE BEWERTUNG 5:
SZENARIOSTUDIE**

----- Ende von Block 5 -----

Referenzen

Bockris, J.M., 1972. Eine Wasserstoffwirtschaft. Wissenschaft, 176(4041), S.1323-1323

European Hydrogen Backbone - Eine Vision für eine europäische Wasserstoffinfrastruktur, die 28 Länder umfasst. Verfügbar unter: <https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2022/04/EHB-A-European-hydrogen-infrastructure-vision-covering-28-countries.pdf>.

Komprimierung von gasförmigem Wasserstoff - U.S. Department of Energy. Verfügbar unter: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/gaseous-hydrogen-compression>.

H₂ Bulletin. Verfügbar unter: <https://www.h2bulletin.com/knowledge/hydrogen-colours-codes/>

Wasserstoffproduktion - Hydrogen Ireland. Verfügbar unter: <https://hydrogenireland.org/hydrogen/hydrogen-production/>

Auf Abbildungen und Tabellen wird in der Überschrift verwiesen, sofern zutreffend .