



HEINRICH HEINE
UNIVERSITÄT DÜSSELDORF

Was versteht man unter dem Schlagwort „Power-to-X“?

Eine Ausarbeitung im Rahmen der Vorlesung
„Sonne, Kohle, Kernfusion: Wissenschaftliche Herausforderungen
der zukünftigen Energieversorgung“
Betreuer: Dr. Sebastijan Brezinsek, IEK-4, FZ Jülich

vorgelegt an der
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
am 16. Februar 2018 von

Robby Hesse

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Akronymverzeichnis	II
1 Historische Einleitung	1
1.1 Antropogener Treibhauseffekt und Klimawandel	1
1.2 Energiewende, Sektorkopplung und Kopernikus-Projekt	2
2 Power-to-X-Technologien	4
2.1 Power-to-Gas (PtG)	4
2.2 Power-to-Liquid (PtL)	6
2.3 Power-to-Heat (PtH)	8
2.4 Weitere Power-to-X-Technologien	9
Literaturverzeichnis	III

Abkürzungs- und Akronymverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CCS	Carbon/ CO_2 Capture and Storage
CH_4	Methan
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CtL	Coal-to-Liquid
EE	Erneuerbare Energien
EE-CH_4	Methan, gewonnen mit Hilfe von erneuerbaren Energien
FTS	Fischer-Tropsch-Synthese
H_2	molekularer Wasserstoff
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carriers
P2X	Power-to-X
PtCh	Power-to-Chemicals
PtCH_4	Power-to-Methane
PtF	Power-to-Fuel
PtG	Power-to-Gas
PtH	Power-to-Heat
PtH_2	Power-to-Hydrogen
PtL	Power-to-Liquid
PtP	Power-to-Power
PtSNG	Power-to-Syngas
PtX	Power-to-X
SNG	Substitute Natural Gas

1 Historische Einleitung

1.1 Antropogener Treibhauseffekt und Klimawandel

Seit Anbeginn der Menschheitsgeschichte werden Speichermedien genutzt, um natürliche Energie (hauptsächlich von der Sonne) in umgewandelter Form nutzbar zu machen. Dazu zählt beispielsweise Holz als organischer Biomassespeicher, in welchem durch Photosynthese die Strahlungsenergie der Sonne als chemische Bindungsenergie gespeichert ist, die dann wiederum seit ungefähr 1,5 Millionen Jahren vom Menschen bei Bedarf durch Verbrennung in Form von Wärme und Licht genutzt wird. Neben der Nutzung der Sonne für Trocknungsprozesse, findet Solarenergie auch indirekt seit jeher Anwendung durch die Nutzung von Wind- und Wasserkraft. Die Sonne treibt unter anderem den Wasserkreislauf an und sorgt damit für unterschiedliche Hoch- und Tiefdruckgebiete, die wiederum Ausgleichswinde erzeugen. Diese Kräfte werden dann vom Menschen beispielsweise für den Transport mit Segelschiffen über die Meere oder für mechanische Arbeiten mit Wassermühlen verwendet. [1, 2]

Bis zur beginnenden industriellen Revolution im 18. Jahrhundert nutzte der Mensch zu 100% diese regenerative Energie. Seit der Erfindung der Dampfmaschine traten jedoch mit Kohle, Erdöl und Erdgas stärker fossile Brennstoffe in den Fokus, die bis heute mit einem Anteil von über 85% [3, Stand 2016] eine wichtige und zentrale Rolle in der globalen Energieversorgung spielen. Diese Entwicklung führte dazu, dass die in den vorherigen 10.000 Jahren etwa konstant gebliebene CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre durch die Verbrennung dieser fossilen Energieträger, aber auch durch großflächige Waldrodungen für die Viehwirtschaft und die Zementproduktion¹ für die Bauindustrie, sprunghaft anstieg. Dieser sogenannte *antropogene Treibhauseffekt* – also die Auswirkung von Treibhausgasen wie CO_2 und CH_4 in der Erdatmosphäre, die maßgeblich durch den Einfluss des Menschen emittiert wurden, auf die Temperatur am Erdboden – ist gegenüber dem natürlichen Treibhauseffekt signifikant stärker. Im Vergleich zur menschengemachten Emission im Laufe des Industriezeitalters von ca. $30 \cdot 10^9$ Tonnen CO_2 pro Jahr, beträgt der CO_2 -Ausstoß durch vulkanische Aktivität nur etwa $300 \cdot 10^6$ Tonnen pro Jahr, also lediglich 1% [6]. Der Einfluss von CO_2 auf die Zunahme der mittleren Erdtemperatur wird bereits seit etwa 150 Jahren durch geophysikalische Messreihen verifiziert [7] (wenn auch teils kontrovers diskutiert [8-10]) und lässt sich anhand von analysierten Luft einschlüssen in Eisbohrkernen für mehrere Hunderttausende Jahre rückdatieren. Als Folge dieses messbaren *Klimawandels* treten häufiger Wetterextreme wie Flutkatastrophen, extreme Winde und Dürreperioden auch in dafür bisher untypischen Gebieten auf. Zudem ist ein Rückgang von Permafrost in

¹ massiv verstärkt durch Bauboom; macht je nach Studie ca. 5-10% der globalen CO_2 -Emissionen aus [4, 5]

Bergregionen und an den Polkappen zu verzeichnen, was verheerende Auswirkungen u. a. auf die Meeresspiegel und damit auch auf küstennahe, besiedelte Gebiete hat. [1, 11, 12]

1.2 Energiewende, Sektorkopplung und Kopernikus-Projekt

Zusätzlich zum Klimawandel durch den antropogenen Treibhauseffekt ergibt sich durch die begrenzte Verfügbarkeit von fossilen Energieträgern die Notwendigkeit des Umdenkens in der Energiepolitik. Die Lagerstätten von Erdgas, Erdöl und Kohle sind endlich und größtenteils erschlossen, während der Bedarf immer weiter steigt. Es gibt zahlreiche Studien und Prognosen für die zukünftigen Fördermöglichkeiten fossiler Energieträger, so prophezeien Zittel et. al. beispielsweise das Erreichen des globalen Fördermaximums² von Kohle und Erdgas für 2020 oder früher [13].

Umwelt- und Klimapolitik ist bereits seit vielen Jahrzehnten ein globales Thema. Bereits auf der Konferenz der Vereinten Nationen über die Umwelt des Menschen 1972 wurde festgestellt, dass es unabdingbar sein wird, dass in den kommenden Jahrzehnten die Klimaprobleme global gelöst werden müssen. Die im Dezember 2015 in Paris auf der UN-Klimakonferenz völkerrechtlich vereinbarten Klimaschutzziele [14] sehen unter anderem dazu eine Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf möglichst 1,5°C vor. Da die Nutzung von absehbar-endlichen, fossilen Energieträgern für etwa $\frac{2}{3}$ aller Treibhausgas-Emissionen verantwortlich ist, hat sich die Bundesregierung in ihrem Klimaschutzplan 2050 einer „Transformation zum kohlenstoffarmen Wirtschaften in Deutschland“ [15] verschrieben. Diese Transformation wird auch mit dem Begriff *Dekarbonisierung* bezeichnet und sieht zum einen die Entwicklung und Modernisierung von erneuerbaren, CO₂-freien Energietechnologien in allen Bereichen vor, aber auch die Bindung und Speicherung von bestehendem Kohlenstoffdioxid (CCS-Technologie). Diese Umkehr in der Energiepolitik wird auch als *Energiewende* bezeichnet und umfasst, neben dem Ziel des Ausstiegs aus Kohle, Öl und Atomenergie, auch die Umstellung der drei Sektoren der Energiewirtschaft (Strom, Wärme und Mobilität) auf nachhaltige, ökologische und erneuerbare Energien (EE) wie Solarthermie, Wind- und Wasserkraft, Bioenergie und Geothermie. [1, 11, 15, 16]

Die Verbindung der drei Energiesektoren wird notwendig, um die Elektrifizierung der Wärmeversorgung und des Mobilitätssektors mit regenerativer Energie (ohne Anbaubiomasse) voran zu treiben und so die Klimaschutzziele einhalten zu können. Diese Maßnahme der Verzahnung wird als *Sektorkopplung* oder auch „Integrated Energy“ bezeichnet. Ein Kernelement ist dabei der Ausbau von Elektromobilität, also die Entwicklung von Elektrofahrzeugen, Brennstoffzellen, der Ausbau der notwendigen Infrastruktur (z.B. Lademöglichkeiten für E-Autos), aber auch die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen. Ein weiteres Kernelement ist der Ausbau von elektrischen Wärmepumpenheizungen als effizienteste Form der Strom-Wärme-Kopplung. [11, 17, 18]

² den Höhepunkt, ab dem ein deutlicher Förderrückgang zu verzeichnen ist

Um die Herausforderungen der Energiewende gesamtgesellschaftlich anzugehen, wurde 2016 die Förderinitiative der *Kopernikus-Projekte* gegründet. Es handelt sich dabei um einen Teil des Energieforschungsprogramms der Bundesregierung, welches vom **BMBF** mit vorerst ³ 120 Millionen Euro gefördert wird, um im Verbund von „Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft technologische und wirtschaftliche Lösungen für den Umbau des Energiesystems“ zu entwickeln. Gegliedert sind die Kopernikus-Projekte in 4 Teilbereiche, von denen eines das Power-to-X-Projekt ist. Das Ziel von *Power-to-X* ist es, erneuerbare Ressourcen flexibel nutzen zu können, d.h. den Strom aus regenerativen Quellen in stoffliche Energieträger elektrochemisch umzuwandeln, um diese zur Weiterverwendung oder zur Energiespeicherung zu nutzen. Die in dieser Arbeit behandelten Power-to-X-Technologien sind Methoden, um dieses Ziel und damit letztendlich auch die Klimaschutzziele der Bundesregierung zu erreichen. ^[19]

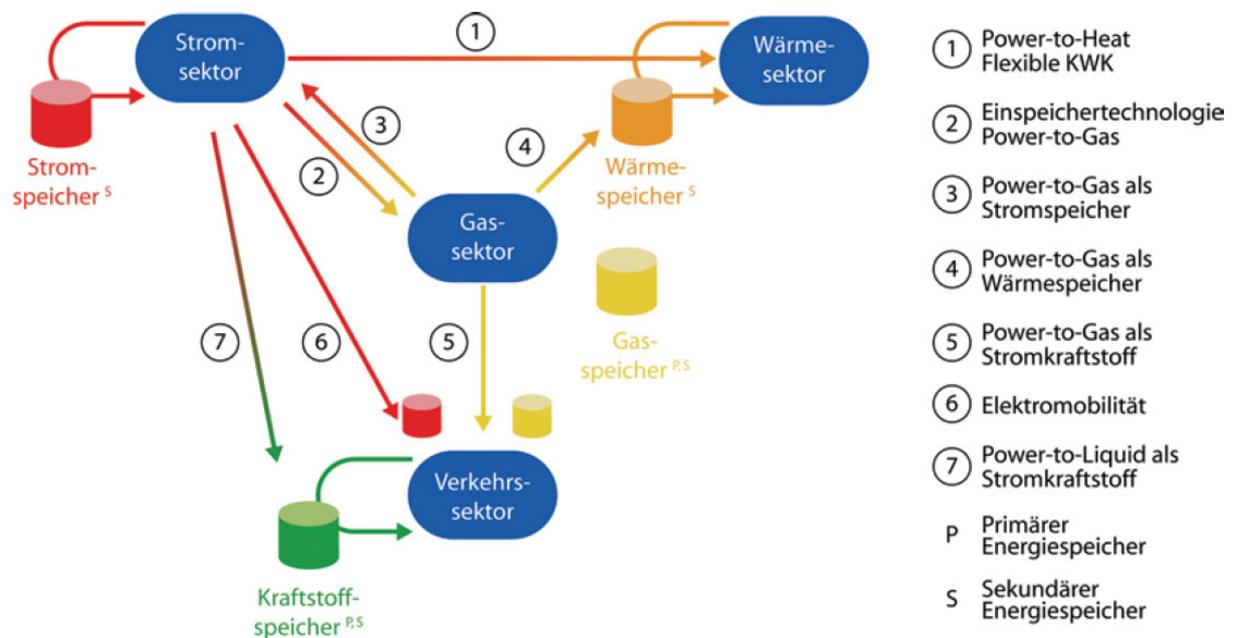


Abb. 1: Schematische Darstellung der verzahnten, sektorübergreifenden Energiespeicherung mit Power-to-X-Technologien [übernommen aus ^[1] Abb. 2.3]

³ bis 2025 sollen weitere 280 Millionen Euro folgen zur Verfügung gestellt werden

2 Power-to-X-Technologien

Die Idee hinter Power-to-X-Technologien ist, dass man im Energieversorgungssystem weg von der „verbrauchsorientierten Erzeugung“ hin zum „erzeugnisorientierten Verbrauch“ gehen muss [20]. Im Zuge des Netzausbaus und der Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien im Energieversorgungskonzept ergeben sich technischbedingte Differenzen zwischen Verbrauch und Erzeugung, die es z.B. mit fossilen Energieträgern nicht in dem Ausmaße gibt. So spielt das Wetter eine entscheidende Rolle für die Stromerzeugung mittels Sonne, Wind und Wasser. Einfach ausgedrückt: An sonnigen Tagen generieren solare Kollektorfelder mehr Strom als verbraucht wird, während nachts eine Unterversorgung herrscht. Genau so verhält es sich mit Windturbinen an stürmischen und windstillen Tagen, oder mit Wasserkraftwerken zu Regen- und Dürreperioden. Diese Stromüberproduktion muss gespeichert werden, um die Energieversorgung zu ungünstigeren Tageszeiten und Wetterlagen, die bisher dann hauptsächlich durch fossile Energieträger getragen wird, mit gespeicherten regenerativen Energien sicher zu stellen. Das Schlagwort „Power-to-X“ beschreibt dabei verschiedene Verfahren und Technologien, um diese erzeugte Energie in andere Energieformen umzuwandeln und so (langfristig) speicher- und nutzfähig zu machen. Dadurch soll eine Flexibilität und ein Lastmanagement im Stromsystem bereitgestellt werden, um den politischen Anforderungen an einen höheren Anteil an regenerativen Energien in puncto Effizienz, aber auch Wirtschaftlichkeit, gerecht zu werden. [2, 20, 21] Nachfolgend sollen die wichtigsten Power-to-X-Technologien detaillierter erläutert werden.

2.1 Power-to-Gas (PtG)

Die Stichworte „Power-to-Gas“, oder manchmal je nach Art der zugrundeliegenden Energierart auch „Windgas“, „Solargas“ oder allgemein „EE-Gas“, beschreiben die Beimengung von grünen⁴ Energiegasen ins bestehende Erdgasnetz [22]. Um die Klimaschutzziele (Vgl. Kapitel 1.2) zu erreichen, muss das Energiesystem auch den Wärme- und den Verkehrssektor mit ausschließlich regenerativen Energieträgern versorgen, ohne die gleichzeitige energetische Nutzung von Anbaubiomasse [23]. Dazu wird der vorhandene Überschussstrom aus regenerativen Quellen genutzt, um beispielsweise Wasserstoff oder Methan zu erzeugen.

Ein Verfahren hierzu ist die *Wasserelektrolyse*, bei der unter Zuführung von (regenerativer) elektrischer Energie flüssiges Wasser in gasförmige Endprodukte gespalten wird (auch „Power-to-Hydrogen“, PtH₂). Da die Reaktionsenthalpie $\Delta H_R = +571.8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ hierbei positiv ist, verläuft diese Redoxreaktion endotherm, d.h. das Wasser wird in energiereicheren

⁴ mit Hilfe von sauberen, regenerativen Energien und Verfahren erzeugt

Wasserstoff und Sauerstoff umgewandelt. Die Gleichung der Gesamtreaktion sieht folgendermaßen aus [24, Gl. 4.1]:



Ein weiteres Verfahren zur Gasgewinnung mittels elektrischer Energie ist die *Methanisierung* mit CO_2 , dem sogenannten Sabatier-Prozess (auch „Power-to-Methane“, $PtCH_4$). Hierbei wird aus Wasserstoff (der in der Regel durch vorherige Elektrolyse gewonnen wurde) und Kohlenstoffdioxid synthetisches Methan erzeugt. Die Reaktionsgleichung dieses exothermen Prozesses lautet [24, Gl. 4.2]:



Die dabei freiwerdende Enthalpie ($\Delta H_R = -165 \frac{kJ}{mol}$) kann zum Teil als Abwärme zur Heizung oder als Prozessdampf für weitere Kraft-Wärme-Kopplungs-Prozesse (KWK) genutzt werden. Der Vorteil von $EE-CH_4$ („grünem Methan“) gegenüber H_2 ist zudem, dass Methan einen deutlich höheren Wirkungsgrad bei der Verstromung aufweist. Der Gesamtenergienutzungsgrad (thermischer + elektrischer Wirkungsgrad) von $EE-CH_4$ erreicht 50-55% und übersteigt damit sogar die energetische Ausbeute von Biogas-Blockheizkraftwerken. Darüber hinaus besteht Erdgas (abhängig von der jeweiligen Lagerstätte) hauptsächlich aus hochentzündlichem Methan, wodurch hierbei anders als beim H_2 auch keine Umrüstung der Infrastruktur und der eichrechtlichen Abrechnung beim Gasanwender notwendig wird. Wird das durch PtG -Verfahren erzeugte Gas nicht direkt in das Erdgasnetz eingespeist, kann es für spätere Nutzung beispielsweise in Poren- oder Kavernenspeichern gelagert werden. $EE-CH_4$ hat eine 3-fach höhere Speicherdichte als H_2 , was den erhöhten Aufwand durch die Methanisierung ökonomisch kompensiert. [24, 25]

Wasserstoff dagegen bietet weitere, vielseitige Möglichkeiten, so beispielsweise im Einsatz von Brennstoffzellen für die Autoindustrie, als wichtiger Grundstoff in der chemischen Industrie oder als Bestandteil von strombasierten synthetischen Flüssigkraftstoffen für schwere Antriebe von Schiffen und Flugzeugen [22].

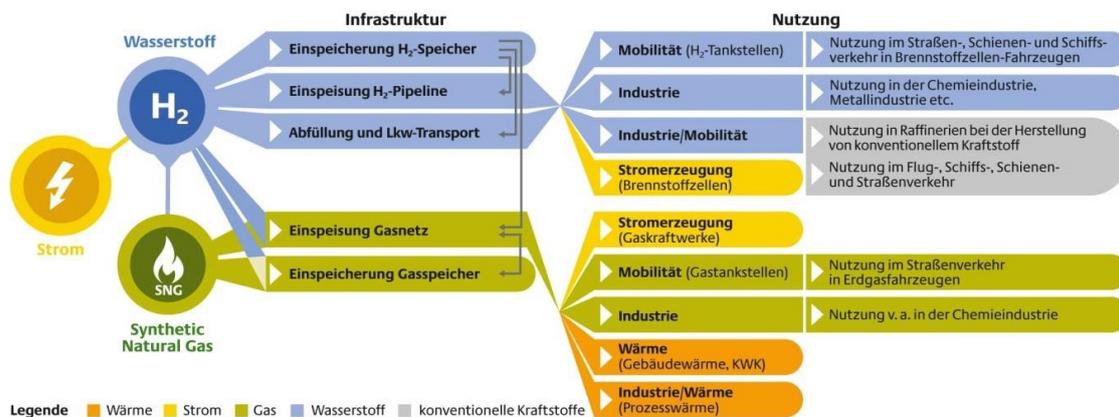
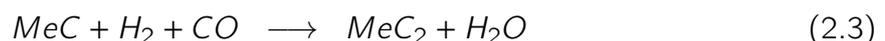


Abb. 2: Nutzungspfade von H_2 und CH_4 aus PtG -Prozessen [übernommen aus [26], Abb. 2]

2.2 Power-to-Liquid (PtL)

Eng verwandt mit den PtG-Verfahren ist die Power-to-Liquid-Technologie. Hierbei liegt der Augenmerk auf der Generierung von *flüssigen Kraftstoffen* mit Hilfe von regenerativem Überschussstrom, daher werden PtL-Verfahren in der Literatur auch teils als „Power-to-Fuel“ (PtF) bezeichnet. In der Regel folgt auf den PtG-Prozess der Wasserelektrolyse eine anschließende Synthese, um beispielsweise aus dem gewonnenen Wasserstoff zusammen mit Kohlenstoffdioxid Methanol, Benzin, Diesel, Dimethylether oder Kerosin zu synthetisieren. Der Vorteil von flüssigen Kraftstoffen gegenüber gasförmigen liegt zum einen in der einfacheren Handhabung und unproblematischeren Lagerung, zum anderen können diese synthetischen Kraftstoffe aber auch für den Antrieb von Kraftfahrzeugen fossilen Kraftstoffen beigemischt werden. Durch technische Umrüstung der vorhandenen Verbrennungsmotoren kann auch synthetischer Kraftstoff („E-Fuel“, oder auch „Designer-Diesel“) als Hauptkraftstoff verwendet werden. Dies stellt eine saubere und effiziente Alternative zur Elektromobilität mit Wasserstoffbrennstoffzellen dar. Gerade in der Luft- und Schifffahrt, aber auch für Schwerlastverkehr und Arbeitsmaschinen, stellen elektrische Akkumulatoren oder H_2 -Brennstoffzellen keine effektive Alternative zum fossilen Kraftstoff dar, da hier hohe gravimetrische und volumetrische Energiedichten benötigt werden, die nur flüssige Kohlenwasserstoffe wie beispielsweise (synthetischer) Diesel oder Kerosin bieten. [1] [23] [27]

Ein prominentes PtL-Verfahren ist die *Fischer-Tropsch-Synthese* (kurz FTS), ein indirektes Verfahren zur Verflüssigung von Kohle (Stichwort Coal-to-Liquid, CtL) mittels eines Synthesegases aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff. Die FTS ist eine stark exotherme Reaktion (Enthalpie: $\Delta H_R = -158.5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$), deren Abwärme ebenso wie bei der zuvor beschriebenen Methanisierung weiter genutzt werden kann. Die zugehörigen Reaktionsgleichungen sind folgende [28] [29], Gl. 5-7]:



Hierbei werden aus Kohlenoxiden und Metallkontakten (Fe oder Co-Katalysatoren) Carbide gebildet, deren Kohlenstoff durch Wasserstoff in Form von Methylen-Radikalen herausgelöst wird (Gl. 2.3 u. 2.4). Diese Radikale unterliegen schließlich der Polymerisation und Hydrierung. Diese beiden Gleichungen können zur Hauptreaktionsgleichung 2.5 zusammengefasst werden, wobei hier die entstehende Methylengruppe (CH_2) ein einzelnes Kettenglied eines Kohlenwasserstoffmoleküls darstellt. [29] [30]

Fischer-Tropsch-basierte Flüssigkraftstoffe haben vielfältige Anwendungsgebiete, werden aber im Vergleich zu anderen PtL-Kraftstoffen als einzige im Flugverkehr eingesetzt. Abbildung 3 zeigt die gesamte Prozessierungskette inklusive Elektrolyse und Wassergas-Shift-Reaktion (auf die im Hinblick auf den kurzen Umfang dieser Arbeit nicht einzeln eingegangen werden soll) bis hin zur FTS und den fertigen Kraftstoffen. [1]

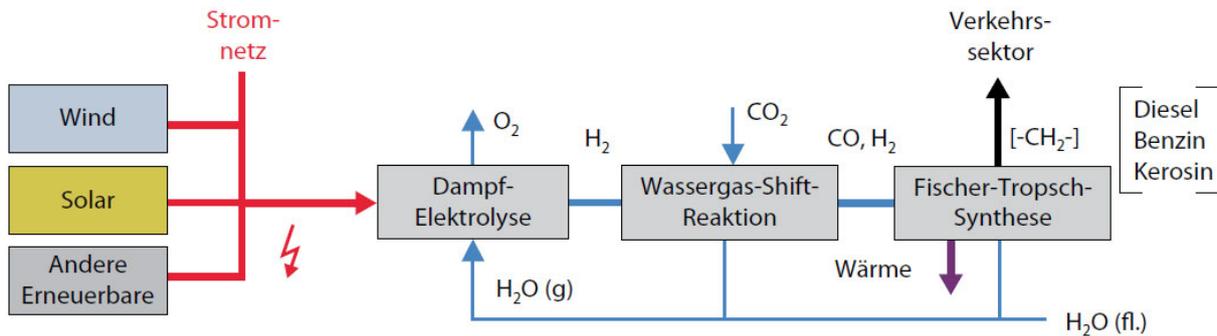
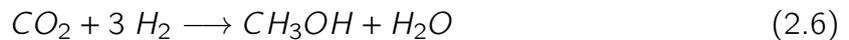


Abb. 3: Aufbau eines PtL-Speichersystems auf Basis von Fischer-Tropsch-Flüssigkraftstoffen für den Flugverkehr [übernommen aus [1], Abb. 8.93]

Ein weiteres häufig verwendetes PtL-Verfahren ist die *Methanolsynthese*. Methanol ist ebenfalls für den Verkehrssektor relevant, da es heutzutage beispielsweise in geringen Mengen zu Benzin beigemischt wird, um die Bio-Kraftstoff-Quoten zu erfüllen. Außerdem ist es neben Flüssigerdgas aus PtG-Erzeugung auch für die Schifffahrt interessant. Nach entsprechender Motor-Umrüstung können auch Autos mit reinem Methanol oder einem Kraftstoffgemisch mit hochprozentiger Methanol-Beimischung angetrieben werden. [1, 23] Die Reaktionsgleichung der Methanolsynthese nach vorheriger Elektrolyse lautet [27, Gl. 6]:



Es handelt sich dabei ebenfalls um eine exotherme Reaktion, jedoch mit geringerer Enthalpie ($\Delta H_R = -49.52 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$). Im Vergleich zur Fischer-Tropsch-Synthese hat die Energieumwandlung in Methanol einen höheren Wirkungsgrad. Zudem kann Methanol als Rohstoff für nichtenergetische Anwendungen in der chemischen Industrie eingesetzt werden und damit fossile Energieträger ersetzen. Insgesamt ist Methanol in der Herstellung effizienter, ist wasserlöslich und kann mikrobiologisch leichter als Erdöl abgebaut werden. Ein Nachteil ist jedoch seine hohe Toxizität. Abbildung 4 zeigt auch hier schematisch die Prozessierungskette der Methanolsynthese. [1, 23, 27]

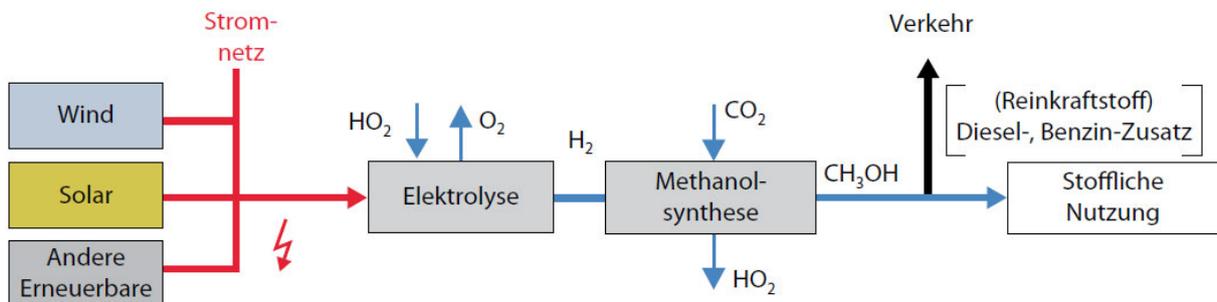


Abb. 4: Aufbau des PtL-Methanol-Speichersystems [übernommen aus [1], Abb. 8.94]

Neben diesen Verfahren gibt es noch zahlreiche weitere **PtL**-Methoden, um beispielsweise über **PtG** gewonnenes EE-Gas zu verflüssigen, oder auch Wasserstoff in organischen Verbindungen zu speichern („liquid organic hydrogen carriers“, **LOHC**). Eine detailliertere Beschreibung dieser Verfahren würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

2.3 Power-to-Heat (**PtH**)

Um den Wärmesektor mit erneuerbarer Energie zu versorgen und diese zu speichern, kommen Power-to-Heat-Technologien zum Einsatz. Anders als bei **PtG**- und **PtL**-Lösungen ist **PtH** hauptsächlich darauf ausgelegt, lediglich gelegentliche Überschüsse an regenerativer Energie (z.B. durch Überproduktion von Solarthermie- und Photovoltaik-Anlagen an besonders sonnenreichen Tagen) flexibel zu nutzen. Dies ist dadurch begründet, da es sich bei Strom um sehr hochwertige Energie (sog. „Exergie“) handelt, die in alle anderen Energieformen überführt werden kann, während Wärme nur einen sehr geringen Exergiegehalt besitzt – also eine weniger wertvolle Energieform darstellt, die nur zu einem sehr geringen Teil wieder in höherwertige Energieformen umgewandelt werden kann. Daher sind **PtH**-Technologien primär dazu geeignet, Netzüberlastungen durch ein Stromüberangebot auszugleichen. [31-33]

Es gibt prinzipiell zwei Optionen zum Heizen mit Strom: Die vollständige Umwandlung von Strom in Wärme mit regelbaren Heizelementen, oder der Betrieb einer elektrischen Wärmepumpe, welche zusätzlich die Umgebungswärme nutzt. Exemplarisch soll nachfolgend das Funktionsprinzip der *erdgekoppelten Wärmepumpe* zusammengefasst werden.

Fast $\frac{2}{3}$ aller neu-installierten Wärmepumpen in Privatwohnungen arbeiten als Erdwärmetauscher, bei denen geothermische Wärmeenergie genutzt wird. Es gibt verschiedene Wege, um diese Erdwärme zu nutzen, beispielsweise Erdwärmesonden oder -kollektoren, die oberflächennahe Geothermie (bis zu 100m Tiefe) nutzen und daher kostengünstiger und für Privathaushalte lukrativer sind. Erdwärmesonden sind Kunststoffrohre, in denen „Sole“ (ein Gemisch aus Wasser und Glykol als Frostschutzmittel) zirkuliert. Diese Trägerflüssigkeit wird mithilfe einer elektrischen Umwälzpumpe auf dem Weg durch das Rohr erwärmt und transportiert so die Wärme an die Oberfläche. Über eine nachgeschaltete Wärmepumpe wird dann die Temperatur auf das zur Heizung notwendige Niveau angehoben, wobei bei steigender Temperaturdifferenz zwischen Erdtemperatur und Heizmedium auch eine höhere mechanische Pumpenergie notwendig ist. [1, 33, 34]

2.4 Weitere Power-to-X-Technologien

Neben den drei vorgestellten Technologien gibt es zahlreiche weitere, sich teils überschneidende Gruppierungen und Schlagworte für Technologien, bei denen Überschussstrom aus regenerativen Quellen zur weiteren Nutzung in andere Energieformen transferiert oder gespeichert wird. Zu nennen wären hierbei:

- **Power-to-Chemicals (PtCh)** fasst Prozesse zusammen, bei denen mit Hilfe von Überschussstrom gezielt bestimmte Grundchemikalien für die chemische Industrie erzeugt werden, so beispielsweise Wasserstoff (PtH₂), Ammoniak (Power-to-Ammonia) oder Methan (PtCH₄). [22]
- **Power-to-Fuels (PtF) oder Power-to-Mobility** beschreibt den Einsatz von Strom zum Laden von Elektrofahrzeugbatterien, aber hauptsächlich (wie in Kapitel 2.1 beschrieben) die Nutzung von Wasserstoff zur Brennstoffzellenmobilität, oder auch weitere PtL- und PtG-Techniken zur Produktion von synthetischen, ökologischen Kraftstoffen (Vgl. Kapitel 2.2). [18, 22, 27]
- **Power-to-Power (PtP)** bezeichnet Strom für und aus der Energiepeicherung in vorwiegend kinetischer und potenzieller Form, oder als „Druckenergie“. Ein Beispiel dafür wären Pumpspeicherkraftwerke, bei denen mit Strom Wasser auf einen Berg/eine Anhöhe gepumpt wird und bei Bedarf durch Generatoren zurückfließt und so Strom erzeugt. Neben Batterien und Druckluftspeicherkraftwerken, zählen auch Schwungradspeicher hierzu, bei denen ein z.B. im Vakuum gelagertes Schwungrad in Bewegung versetzt und später die mechanische Energie über Generatoren zurücktransferiert werden kann. [1, 27]
- **Power-to-Syngas (PtSNG)** ist ein weiterer (Unter-)Begriff für PtG/PtL-Technologien, bei denen Strom zur Erzeugung von Synthesegas, einem Gemisch aus hauptsächlich Kohlenstoffmonoxid, Wasserstoff und unterschiedlichen anderen Gasen, verwendet wird. Mit Hilfe dieser Synthesegase kann z.B. Ammoniak, Methanol oder Aldehyde erzeugt werden. (SNG = substitute natural gas) [35]
- **Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)** beschreibt die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme mit Brennstoffzellen oder (Block-)Heizkraftwerken. Gasbasierte KWK-Anlagen, ergänzt um PtH-Module und Wärmespeicher, stellen ein Schlüsselement für die Sektorkoppelung von Strom und Wärme dar. [1, 18]

Über dies hinaus gibt es zahlreiche weitere Wortschöpfungen und Begriffe in diversen Papern und Artikeln, die sich alle mehr oder weniger in anderen, bereits aufgeführten Power-to-X-Technologien wieder finden und keiner expliziten Erwähnung bedürfen.

Literaturverzeichnis

- [1] Sterner M und Stadler I. *Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 978-3-642-37379-4.
- [2] Kaltschmitt M, Streicher W und Wiese A. *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. 5., erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 978-3-642-03248-6.
- [3] *BP Statistical Review of World Energy*. London, 2017.
- [4] IPCC. *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/3_Industry.pdf. 2000. Letzter Abruf: 13.02.2018.
- [5] International Energy Agency. *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions*. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/tracking_emissions.pdf. 2007. Letzter Abruf: 13.02.2018.
- [6] Hards V. „Volcanic contributions to the global carbon cycle“. *British Geological Survey Occasional Publication No. 10* (2005), 26pp.
- [7] Baier A. *Von Wolkenchichten, Wärmespeichern und Vulkanen (einige Aspekte zur "Klimakatastrophe")*. <http://www.angewandte-geologie.geol.uni-erlangen.de/klima1.htm>. 2014. Letzter Abruf: 13.02.2018.
- [8] Michaels PJ, Knappenberger PC und Davis RE. *Das logische Paradigma einer gemäßigten globalen Erwärmung*. <https://www.vdi.de/fileadmin/media/content/get/66.pdf>. Letzter Abruf: 13.02.2018.
- [9] Berner U und Hollerbach A. *Klimawandel und CO2 aus geowissenschaftlicher Sicht*. <https://www.vdi.de/fileadmin/media/content/get/67.pdf>. Letzter Abruf: 13.02.2018.
- [10] Rahmstorf S und Neu U. *Klimawandel und CO2: haben die „Skeptiker“ recht?* <https://www.vdi.de/fileadmin/media/content/get/70.pdf>. Letzter Abruf: 13.02.2018.
- [11] Brasseur GP, Jacob D und Schuck-Zöller S. *Klimawandel in Deutschland - Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2017. ISBN: 978-3-662-50396-6.
- [12] Umweltbundesamt. *Und sie erwärmt sich doch – Was steckt hinter der Debatte um den Klimawandel?* <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sie-erwaermt-sich-doch-was-steckt-hinter-debatte-um>. 2013. Letzter Abruf: 13.02.2018.

- [13] Zittel W, Zerhusen J, Zerta M und Arnold N. *Fossile und Nukleare Brennstoffe – die künftige Versorgungssituation*. <https://windfakten.at/mmedia/download/2015.09.23/1443001916066745.pdf>. 2013. Letzter Abruf: 13.02.2018.
- [14] Bau und Reaktorsicherheit Bundesministerium für Umwelt Naturschutz. *Die Klimakonferenz in Paris*. <https://www.bmub.bund.de/WS202>. Letzter Abruf: 13.02.2018.
- [15] Umweltbundesamt. *Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung - Diskussionsbeitrag des Umweltbundesamtes*. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschutzplan-2050-der-bundesregierung>. 2016. Letzter Abruf: 13.02.2018.
- [16] Neugebauer R. *Ressourceneffizienz - Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft*. 1. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2017. ISBN: 978-3-662-52888-4.
- [17] Stacic DE und Ebel F. „Sektorkopplung als Baustein in der Energiewende – Ergebnisse einer bidirektionalen Simulation von Energienetzen“. In: *Tagungsband Workshop 2017 ASIM/GI-Fachgruppen; Commerell W und Pawletta T (Hrsg.)* (2017), S. 225–230.
- [18] DVGW und ASUE. *Impulspapier Sektorenkopplung - Energiewende neu denken*. http://www.asue.de/sites/default/files/asue/themen/bio-erdgas/2016/broschueren/DVGW_Impulspapier_Sektorenkopplung.pdf. 2016. Letzter Abruf: 13.02.2018.
- [19] *Offizielle Website der Kopernikus-Projekte für die Energiewende*. <https://www.kopernikus-projekte.de>. 2016. Letzter Abruf: 13.02.2018.
- [20] Wörner A. *Konferenzbeitrag EnergieSpeicherSymposium: Zukünftige Speicher- und Flexibilitätsoptionen durch Power-to-X*. <http://elib.dlr.de/94297/>. 2014. Letzter Abruf: 13.02.2018.
- [21] Agora Energiewende. *Speicherstudie: „Stromspeicher in der Energiewende - Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz“*. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/downloads/publikationen/Studien/Speicher_in_der_Energiewende/Agora_Speicherstudie_Web.pdf. 2014. Letzter Abruf: 13.02.2018.
- [22] Töpler J und Lehmann J. *Wasserstoff und Brennstoffzelle - Technologien und Marktperspektiven*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2017. ISBN: 978-3-662-53359-8.
- [23] Umweltbundesamt. *Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess*. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/integration-von-power-to-gaspower-to-liquid-in-den>. 2016. Letzter Abruf: 13.02.2018.

- [24] Müller-Syring G, Henel M, Köppel W, Mlaker H, Sterner M und Höcher T. *DVGW Management Summary - Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz*. <https://www.dvgw.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=2141&token=6ef73229>. 2013. Letzter Abruf: 13.02.2018.
- [25] Jentsch M. *Potenziale von Power-to-Gas Energiespeichern - Modellbasierte Analyse des markt- und netzseitigen Einsatzes im zukünftigen Stromversorgungssystem*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2015. ISBN: 978-3-8396-0865-4.
- [26] Schenuit C, Heuke R und Pasch J. *Potenzialatlas Power to Gas - Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen*. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2016.
- [27] Sternberg A und Bardow A. „Power-to-What? - Environmental assessment of energy storage systems“. *Energy Environ Sci* 8 (2, 2015), S. 389–400.
- [28] *Chemgapedia: Fischer-Tropsch-Synthese*. http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/10/fischer_tropsch/fischer_tropsch.vlu.html. Letzter Abruf: 13.02.2018.
- [29] Kainer F. *Die Kohlenwasserstoff-Synthese nach Fischer-Tropsch*. 1. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1950. ISBN: 978-3-642-86291-5.
- [30] Grigoryeva MM. *Fischer-Tropsch-Synthese*. http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/42342/1/conference_tpu-2017-C11_V2_p943-944.pdf. Letzter Abruf: 13.02.2018.
- [31] Schäffer C. „Power-to-X: Hybride Energieversorgung keramischer Tunnelöfen“. *Handbuch der Keramik: Beilage zur Keramischen Zeitschrift* 68 (2016).
- [32] Pieper C, Sykora N, Beckmann M, Böhning D, Hack N und Bachmann T. „Die wirtschaftliche Nutzung von Power-to-Heat-Anlagen im Regelenergiemarkt“. *Chemie Ingenieur Technik* 87 (4, 2015), S. 390–402.
- [33] Groscurth HM und Bode S. *Discussion Paper Nr. 9 - „Power-to-heat“ oder „Power-to-gas“?* Hamburg: arrhenius Institut für Energie- und Klimapolitik, 2013.
- [34] Bloess A, Schill WP und Zerrahn A. „Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials“. *Applied Energy* 212 (2018), S. 1611–26. ISSN: 0306-2619.
- [35] Foit SR, Vinke IC, de Haart LGJ und Eichel RA. „Power-to-Syngas: An Enabling Technology for the Transition of the Energy System?“ *Angew Chem Int Ed Engl* 56 (20, 2017), S. 5402–11.