



Treibhausgasneutrale Synthetische Brennstoffe

von Diplom-Physiker Dr. M. Seelmann-Eggebert, 79280 Au, den 30. August 2023

Version mit Ergänzungen vom 9. August 2025

Inhalt

1	Einleitung.....	2
2	Wasserstoff als Energieträger.....	4
3	Synthetisches Methan als Energieträger	6
4	Synthetisches Methanol als Energieträger	10
5	Synthetischer Ammoniak als Energieträger	11
6	Farbiger Wasserstoff	12
7	LOHC-Wasserstoff	13
8	Zusammenfassung	14
9	Quellen	16
10	Anhang	18

1 Einleitung

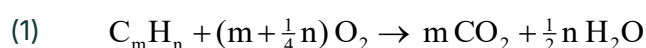
Treibhausgasneutrale Brennstoffe sind solche Brennstoffe, bei deren Verbrennung in der Bilanz keine Treibhausgase freigesetzt werden. Diese können auf biologischem Wege durch Photosynthese als Energiepflanzen oder Holz hergestellt werden. Allerdings sind diese Methoden sehr flächenintensiv und im Vergleich zur Produktion mit Hilfe von Wind- und Sonnenstrom ineffizient.

Eine großtechnische Erzeugung setzt daher auf elektrochemische Methoden, durch welche erneuerbarer Strom in chemische Energieträger und Speicherstoffe umgesetzt werden kann. Diese Methoden werden auch als Power to Gas (P2G) oder Power to Liquid (P2L) Verfahren bezeichnet, denn die Speicherstoffe sind meist Gase oder auch Flüssigkeiten. Das Bindeglied und Schlüsselement zur chemischen Speicherung ist die Elektrolyse. Nach gängiger Auffassung ist Wasser der geeignete Ausgangsstoff. Wasser ist fast überall in großen Mengen vorhanden und verfügbar. Bei der Elektrolyse wird Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Wasserstoff ist damit der Ausgangsstoff aller Überlegungen in dieser Studie.

Wasserstoff hat allerdings auch Nachteile. Er erfordert hohe Ansprüche an Dichtungen. Daraus können sich Komplikationen und Verluste bei Transport und Lagerung ergeben. Nachteilhaft ist aber vor allem (auf das Volumen bezogen) seine relativ kleine Energiedichte, weshalb er daher viel Platz zum Speichern benötigt. Eine Möglichkeit diese Probleme zu umgehen, besteht darin, den Wasserstoff chemisch mit einem Hilfsträger reagieren zu lassen und die entstehende Verbindung als Energieträger zu benutzen. Hierdurch lässt sich die Energiedichte beträchtlich erhöhen und Transport und Lagerung deutlich vereinfachen. Diskutiert werden als sekundäre synthetische Energieträger vor allem Ammoniak, Methan und Methanol /NEWD/. Diese können aber auch stofflich genutzt und/oder zu komplexeren synthetischen Brennstoffen bzw. Kraftstoffen weiterverarbeitet werden /ISEWD,ISIWD,FFBL/. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass jeder Verarbeitungsschritt zu weiteren Verlusten und zu einer Verringerung des Wirkungsgrads bei Betrachtung der Gesamtkette führt. Die Emission von Treibhausgasen bei der Verbrennung ist ein weiterer Gesichtspunkt bei der Auswahl von synthetischen Kraftstoffen.

Von der Bedeutung von sekundären Energieträgern als sog. Wasserstoff Derivate in einem treibhausgasneutralen Wirtschaftssystem wird in vielen Studien unter dem Aspekt möglicher Anwendungen berichtet /ARSR, AEWK, LFSP2G, DENE/. In dieser Untersuchung sollen hingegen die technischen und physikalischen Konsequenzen gegeneinander abgewogen werden, die sich für Energiesysteme ergeben, die überwiegend auf einem der betrachteten sekundären Energieträger basieren. Viele der hier vorgestellten Ergebnisse fußen auf grundsätzlichen thermodynamischen Überlegungen. Sie lassen sich auf einfache Weise auf der Basis der bekannten Daten für die molaren Bildungsenthalpien und den Phasenübergängen der beteiligten Substanzen nachvollziehen. Diese Daten sind im Anhang tabellarisch zusammengestellt. Anstelle von Molzahlen und kJ-Werten, werden hier Normkubikmeter und kWh als Einheiten für Mengenangaben und Energien angegeben. Reaktionsenthalpien haben die Einheit kWh pro Normmeter (pnm). Diese unübliche Handhabung ermöglicht eine für die Energietechnik erhöhte Anschaulichkeit der diskutierten Reaktionen und Schlussfolgerungen. Die hier verwendete Thermodynamik geht von Reaktionsgleichgewichten aus. Kinetische Hemmungen und Reaktionsbarrieren werden nicht berücksichtigt. Die abgeleiteten Folgerungen ergeben dennoch wichtige Anhaltspunkte für Effizienz und Machbarkeit des jeweiligen betrachteten Energiesystems.

Die heutige Energietechnik beruht auf der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen. Die allgemeine Reaktionsgleichung hierfür lautet



Als Reaktionsprodukte entstehen daher das Treibhausgas Kohlendioxid und das klimaschädliche Wasser. Bei der Verbrennung von Kohle ($m=1, n=0$) entsteht ausschließlich Kohlendioxid, während bei der Verbrennung von molekularem Wasserstoff ($m=0, n=2$) nur Wasser gebildet wird. Für Erdgas ($m=1, n=4$) überwiegt noch der Wasseranteil in den Reaktionsprodukten. Für leichtes Heizöl ($m=18-20, n=2m$ bis $2m+2$ /WIMD) wird Kohlendioxid und Wasser zu gleichen Anteilen gebildet. Zur freigesetzten Energie, dem Brennwert, trägt ein Kohlendioxid Molekül $5/3$ mal soviel bei wie ein Wasserdampf-Molekül. Die Reaktionswärme wird aber nicht nur von der in den Endprodukten enthaltenen Energie bestimmt, sondern auch von der Stärke der Bindungen zwischen Kohlenstoff und Wasserstoff in der Ausgangssubstanz.

Anhand der molaren Bildungsenthalpien /WKCD,HCPD,SNCD/ lassen sich die Heizwerte der Verbrennungsreaktionen berechnen (Abb. 1, rechte Skala). Der Heizwert pro Kohlenstoffatom hängt allein von der Anzahl der Wasserstoffatome pro Kohlenstoff ab und steigt linear mit wachsendem H/C-Verhältnis. Er ist überwiegend durch den Energieinhalt der beiden zusätzlich entstehenden Moleküle CO_2 und H_2O bestimmt ist. Setzt man diese Energie in Relation zu der Menge an entstandenem Kohlendioxid so erhält man die blaue Kurve von Abb.1 für die Emission in Gramm CO_2 pro kWh. Da hier lediglich Reaktionen im thermodynamischen Gleichgewicht betrachtet werden, ist es nicht verwunderlich, dass die gezeigten Emissionswerte geringer ausfallen als die in der Praxis zutreffenden Werte.

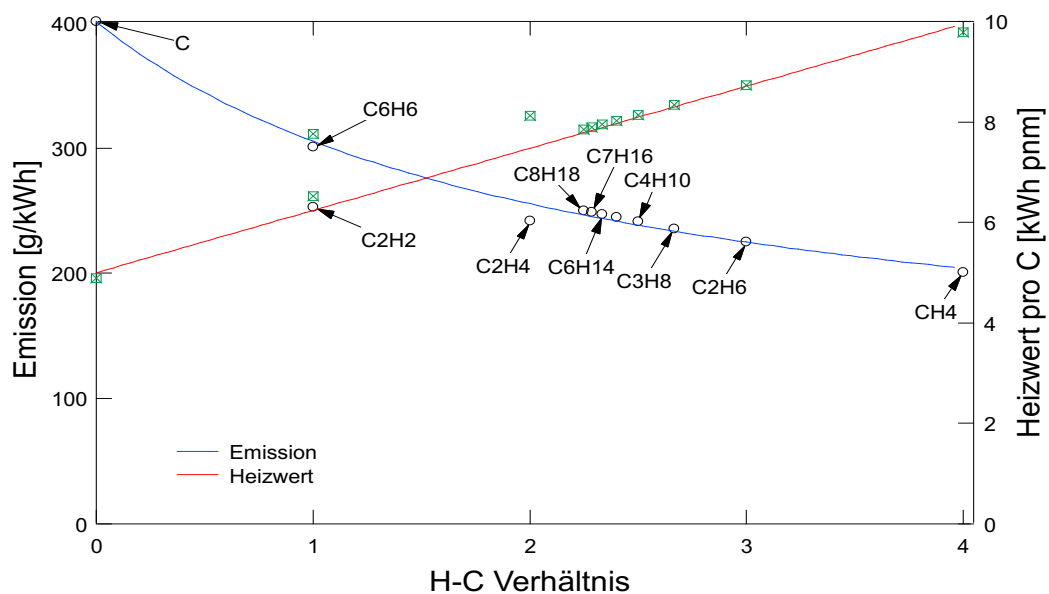
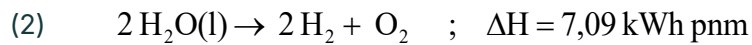


Abb. 1: Berechneter Heizwert (rechte Skala) und Menge an emittiertem CO_2 pro kWh Heizwert (linke Skala) in Abhängigkeit des Verhältnisses von Wasserstoff und Kohlenstoff im Ausgangsstoff.

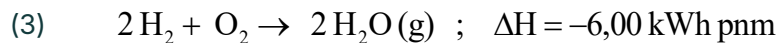
Die Kurve zeigt aber den klaren Trend, dass zur Deckung eines gegebenen Energiebedarfs ein Brennstoff mit möglichst hohem Wasserstoffanteil zu wählen ist, wenn gleichzeitig die Treibhausgasemission minimiert werden soll. Im Hinblick auf synthetische Bren- und Kraftstoffe zeigt die Kurve aber auch, dass für eine gegebene Menge an Kohlenstoff die größten Heizwerte erzielt werden, wenn das Syntheseprodukt einen möglichst großen Anteil von Wasserstoff enthält. Dabei versteht sich von selbst, dass das Syntheseprodukt nur dann treibhausgasneutral sein kann, wenn der verwendete Kohlenstoff zuvor aus der Atmosphäre entfernt wurde oder Bestandteil eines geschlossenen Kreislaufs ist.

2 Wasserstoff als Energieträger

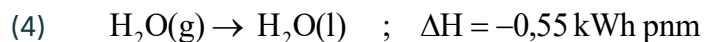
Bei der Wasserelektrolyse wird unter Zuführung elektrischer Energie durch Elektroden Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt.



Zur Erzeugung eines Kubikmeters Wasserstoff müssen dabei 0,8 Liter Wasser (Tab A2) bereitgestellt werden. Mit den Bildungsenthalpien von Tab. A3 findet man, dass rund 7 kWh an Energie aufgewendet werden müssen. Tatsächlich treten bei der Elektrolyse unvermeidliche Überspannungen auf, welche zu Energieverlusten führen. Typische Wirkungsgrade, die sich großtechnisch erzielen lassen, liegen bei 60% bis 70%, so dass zur Erzeugung eines Kubikmeter Wasserstoffs eher 10 kWh aufgewendet werden müssen. Der Differenzbetrag wird als Wärme freigesetzt, die energetisch z.B. zur Erzeugung von Warmwasser genutzt werden kann. Der Energieinhalt von Wasserstoff wird allerdings nicht gemäß der Erzeugungsreaktion (2) angegeben, sondern bezieht sich auf die Verbrennungsreaktion



wonach ein Normkubikmeter Wasserstoff ein Energieinhalt von 3 kWh enthält. Der energetische Unterschied zwischen (2) und (3) beruht auf der Tatsache, dass bei der Verbrennung Wasser als Dampf freigesetzt wird. Die Reaktionswärme von (3) bezeichnet man als Heizwert, während die größere Reaktionswärme von (2) als Brennwert angegeben wird /HBWSFC/. Der Unterschied besteht in der latenten Wärme, die bei der Kondensation von Wasserdampf freigesetzt wird.



Primärenergieangaben und damit auch Angaben zu Wirkungsgraden von Kraftwerken beziehen sich auf den Heizwert, nicht den Brennwert/WIPE/.

Tabelle 1: Eigenschaften von Wasserstoff

	pro kg	Norm m3	pro kWh
Energieinhalt	33 kWh	3 kWh	1 kWh
Volumen (gasförmig)	11 m3	1 m3	333 l
Volumen (flüssig)	14,1 l	789:1	0,427 l
Gewicht	1 kg	0,091 kg	30,3 g
verbundene Wassermenge	9 l	0,82 l	0,273 l
molare Masse	2		
Verflüssigungspunkt	21 K	-252 °C	
Verbrennungsreaktion	$2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$		
nutzbarer Primärenergieanteil	85%/100%		

Oft wird der Energieinhalt auch auf das Gewicht bezogen. Wegen seiner kleinen molaren Masse hat Wasserstoffgas eine sehr geringe Dichte. Da 1 kg Wasserstoffmoleküle etwa 11 Kubikmeter einnehmen, ergibt sich ein sehr hoher spezifischer Energieinhalt von 33 kWh pro kg. Bereits 30 Gramm Wasserstoff beinhalten eine Energie von 1 kWh. Die Energiedichte pro Volumen ist hingegen relativ klein. Zur Speicherung muss Wasserstoff deshalb unter enormem Druck komprimiert werden: Hier sind Drücke von 200 bar üblich. Alternativ kann Wasserstoff verflüssigt werden, wobei sich das Volumen um einen Faktor von knapp 800 reduziert. Eine Verflüssigung erfordert allerdings extrem tiefe Temperaturen von -252°C. Wasserstoffmoleküle sind sehr klein.

An vielen Oberflächen tendieren sie zu dissoziieren. Atomarer Wasserstoff diffundiert aber durch viele Materialien äußerst gut, was zu Transportverlusten führen kann /HEUS/.

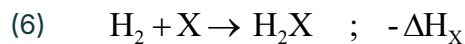
Wird Wasserstoff als Brennstoff eingesetzt, so werden nur 85% des Energieinhalts tatsächlich verwendet, es sei denn es werden Prozesse eingesetzt, welche die Kondensationswärme von Wasser ebenfalls nutzen. So kann z.B. durch geeignete Einrichtungen in Blockheizkraftwerken die Kondensationswärme als Heizwärme genutzt werden. Eine volle energetische Nutzung der Reaktionsenthalpie von 7 kWh pro Kubikmeter Wasserstoff ist auch in Brennstoffzellen möglich, denn sie arbeiten mit wässriger Lösung und stellen quasi die Umkehrung von Reaktion (2) dar.

Beim Übergang auf sekundäre Energieträger gilt folgende Überlegung:

Zur Erzeugung von Wasserstoff wird für einen Kubikmeter die Energie ΔH_H benötigt

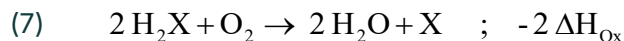


Durch Reaktion mit einem Hilfsstoff X wird der sekundäre Energieträger H_2X erzeugt.



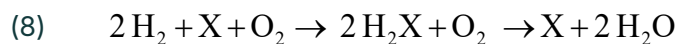
Dabei soll die Reaktion ohne zusätzlichen Energieeinsatz erfolgen können, d.h. die Reaktionsenthalpie ist negativ.

Anstelle des Wasserstoffs wird der sekundäre Energieträger als Brennstoff genutzt.



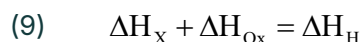
Dabei wird pro Normmenge des sekundären Brennstoffs die Energie ΔH_{Ox} abgegeben und der Hilfsstoff X wieder freigesetzt.

Für die gesamte Reaktionskette gilt



was summa summarum der Umkehrung der Erzeugungsreaktion (2) entspricht.

Wegen der thermodynamischen Unabhängigkeit vom Reaktionsweg gilt für die Reaktionsenthalpien

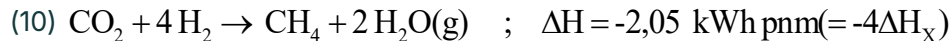


Diese Beziehung zwischen den Energien zur Erzeugung von Wasserstoff und des sekundären Energieträgers bedeutet, dass von der ursprünglichen Energie für den Sekundärträger nur der Anteil $\Delta H_{\text{Ox}} / \Delta H_H$ nutzbar bleibt und der Anteil $\Delta H_X / \Delta H_H$ verloren geht. In den noch zu besprechenden Fällen liegt dieser Anteil bezogen auf den Heizwert zwischen 83% und 87%.

3 Synthetisches Methan als Energieträger

Als sekundärer Energieträger bietet sich besonders synthetisches Methan an, denn Erdgas besteht zu fast 100% aus Methan. Der großtechnische Einsatz von Methan würde daher erlauben, unsere existierende Erdgas-Infrastruktur direkt zu übernehmen. Dies betrifft einerseits ein gut ausgebautes und weitverzweigtes Gasnetz und andererseits die vorhandenen Kavernenspeicher.

Eine Synthese von Methan ist im Sabatier-Prozess möglich, bei dem Kohlendioxid (oder Kohlenmonoxid) mit Wasserstoff unter gleichzeitiger Bildung von Wasser reagiert



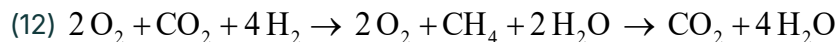
Obwohl diese Reaktion exotherm ist, sind beim gängigen Prozess Temperaturen von mindestens 300°C und katalytische Unterstützung erforderlich. Eine Hochskalierung auf großtechnische Anforderung erscheint möglich, ist aber wegen der guten Verfügbarkeit von Methan aus Erdgas bisher nicht erfolgt.

Da sich synthetisches Methan kaum von Erdgas unterscheidet, kann es in herkömmlichen Gaskraftwerken verwendet werden. Die Verbrennungsreaktion ist

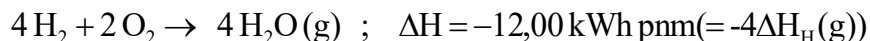


In der Reaktion entsteht neben Kohlendioxid Wasserdampf und es wird pro Kubikmeter Methan-gas der Heizwert ΔH_{HW} in Höhe von knapp 10kWh als Wärme freigesetzt.

Die Reaktionskette von (9) und (10) ergibt



oder



die mit Reaktion (2) identisch ist.

Tabelle 2: Eigenschaften von Methan (Erdgas)

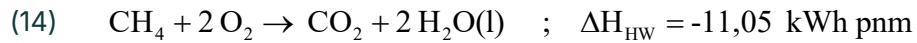
	pro kg	Norm m3	pro kWh
Energieinhalt	14 kWh	10 kWh	1 kWh
Volumen (gasförmig)	1,4 m3	1 m3	99 l
Volumen (flüssig)	2,4 l	583:1	0,171 l
Gewicht	1 kg	0,72 kg	71,4 g
freigesetzte CO ₂ Menge	2,75 kg	1,98 kg	196 g
molare Masse	16		
Verflüssigungspunkt	111 K	-162°C	
Verbrennungsreaktion	$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$		

Der Vergleich von (9) mit (2) ergibt, dass durch die Formierung des sekundären Energieträgers Methan 17% verloren gehen.

$$(13) \quad \Delta H_{\text{X}} / \Delta H_{\text{H}} = 2,05 / 12 = 0,17$$

Vom Heizwert des Wasserstoffs verbleiben noch 83% zur Nutzung. Bezogen auf den Brennwert stehen bei synthetischem Methan noch 70% des Energieinhalts von Wasserstoff zur Verfügung.

In Brennwert-Gasthermen oder BHKW gelingt es auch noch zumindest teilweise die Kondensationswärme des Wasserdampfs (nach (3)) abzuführen.



Im Vergleich zu (10) steht daher 11% mehr Reaktionswärme zur Verfügung.

Die für die Energiewirtschaft relevanten Eigenschaften von Methan sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Im Vergleich mit Wasserstoff ist die Dichte um ein Vielfaches größer. Der Energieinhalt pro kg beträgt deshalb weniger als die Hälfte. Maßgeblich für Transport und Speicherung ist allerdings nicht das Gewicht, sondern das Volumen. Ein Normkubikmeter Methan enthält rund 10 kWh an Energie und damit mehr als das Dreifache im Vergleich zu Wasserstoff.

Deutschland verfügt über 24,6 Milliarden Kubikmeter an Kavernenspeicher /WKKS/. Darin lassen sich saisonal in Form von Methan 246 TWh an Energie speichern. In Form von Wasserstoff könnte in diesen Speichern lediglich 74 TWh bevorratet werden. Ein Feldtest der Eignung von Kavernenspeichern für Wasserstoff, der in viele Materialien schnell eindiffundiert, steht allerdings noch aus.

Die Energiedichte von 10 kWh pro Kubikmeter ist ausreichend für den Transport in fest verlegten Gasleitungen. Für einen Transport per Schiff oder Zug muss das Gas verflüssigt werden (LNG=liquified natural gas). Hierbei reduziert sich das Volumen auf etwa ein sechshundertstel.

Allerdings ist während des Transports eine dauerhafte und energieintensive Kühlung auf -162°C erforderlich. Da ein Teil der Energie zur Kühlung durch Verdampfungswärme aufgebracht wird, entstehen zusätzlich merkliche Materialverluste. Die Wirkung von Methan als Treibhausgas ist etwa 25-mal höher als die von Kohlendioxid.

Energetische Kreislaufwirtschaft auf der Basis von synthetischem Methan

Ein gravierender Nachteil von Methan besteht darin, dass bei der Verbrennung für jeden Kubikmeter Methan ein Kubikmeter Kohlendioxid als Treibhausgas freigesetzt wird. Allerdings wird genau dieselbe Menge an CO₂ bei seiner Formierung verbraucht. Damit ist für die Treibhausgasneutralität entscheidend, woher das Kohlendioxid zu seiner Formierung stammt.

Wurde es zuvor aus der Atmosphäre entfernt, so bildet sich ein geschlossener Kreislauf und eine ausgeglichene Treibhausgasbilanz. Der Anteil von Kohlendioxid in der Atmosphäre beträgt aber nur etwa 0,4%. Sämtliche Verfahren diesen Anteil herauszufiltern sind daher sehr energieintensiv.

Bei der Verbrennung entsteht das Kohlendioxid in hochkonzentrierter Form. Eine bessere Lösung besteht darin, das Kohlendioxid nach der Verbrennung aufzufangen. Heute wird allgemein davon ausgegangen, dass CCS (Carbon Capture and Storage) im großen Maßstab (z.B. für die Betonindustrie) ein unverzichtbarer Bestandteil eines treibhausgasneutralen Wirtschaftssystems sein wird.

Das Hauptproblem einer effektiven Abscheidetechnik liegt darin, dass die Atmosphäre zu 78% aus Stickstoff besteht. Findet die Verbrennung unter normalen atmosphärischen Bedingungen statt, so ist Stickstoff auch der Hauptbestandteil des Abgases.

Dies behindert eine Abscheidung des erzeugten Kohlendioxids enorm. Effiziente Abscheidungsverfahren sind bisher noch im Feldversuchsstadium. Das Stickstoff-Problem lässt sich umgehen,

wenn der Verbrennungsprozess in reiner Sauerstoffatmosphäre gefahren wird (Oxyfuel-Verfahren /DBCCS). Während unter heutigen Bedingungen ein Kraftwerkbetrieb mit reinem Sauerstoff hoch unwirtschaftlich wäre, liegen in einer Energiewirtschaft, die auf Wasserelektrolyse basiert, andere Verhältnisse vor.

Die Diskussion der Reaktionsketten in (7) und (11) haben gezeigt, dass die Verbrennung letztlich auf eine Umkehrung der Elektrolysereaktion hinausläuft. Bei der Elektrolyse entsteht aber neben reinem Wasserstoff auch reiner Sauerstoff. Wird dieser aufgefangen und gespeichert, so steht er zum stickstofffreien Betrieb des Kraftwerks zur Verfügung. Der Wasserdampf aus der Reaktion (13) kann durch Verwendung von Brennwertechnik entfernt werden, so dass das Abgas fast ausschließlich aus CO₂ besteht. Durch eine Kühlfalle kann das Gas bei Unterschreiten des Sublimationspunkts von -79°C ausgefroren werden und in geeigneten Behältern gespeichert werden. Ein Liter festes CO₂ kann als Ausgangsmaterial für 1 Kubikmeter Methan als Energieträger von 10 kWh Energie dienen. Das bei der Verbrennung entstehende CO₂ kann daher in großen Mengen bei relativ kleinen Volumina gespeichert und recycled werden. Es entsteht ein geschlossener Kreislauf, in welchem lediglich Wasser dem System zu- und abgeführt wird.

Tabelle 3: Eigenschaften von Kohlendioxid (CO₂)

	pro kg	Norm m3	pro kWh
Energieinhalt	-	-10 kWh	- 1 kWh
Volumen (gasförmig)	0,5 m3	1 m3	99 l
Volumen (fest)	0,64 l	781:1	0,127 l
Gewicht	1 kg	1,98 kg	198 g
molare Masse	44		
Sublimationspunkt	111 K	-79°C	
Verbrennungsreaktion	$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$		

Ein Beispiel soll die Größendimensionen der benötigten Stoffmengen demonstrieren. Es soll zyklisch eine Energie von 10 GWh elektrolytisch erzeugt, saisonal gespeichert und in einem Kraftwerk verbrannt werden.

Ein Gaskraftwerk hat eine Nennleistung von 10 MW und soll nun für 1000 Stunden betrieben werden. Im Vorfeld wurde bereits Methan mit einem Heizwert von 10 GWh erzeugt und in das Gasnetz eingespeist. Der Sauerstoff steht in flüssiger Form in einem Speicher vor Ort bereit. Das Methan wird dem Gasnetz entnommen und zusammen mit dem Sauerstoff dem Kraftwerk zugeführt. Da der Heizwert knapp 10 kWh pro Kubikmeter beträgt müssen eine Million Kubikmeter Methan und zwei Millionen Kubikmeter Sauerstoff zusammengeführt werden. Der Sauerstoff nimmt in verflüssigter Form 2515 Kubikmeter ein und kann damit z.B. in einem würfelförmigen Behälter der Kantenlänge von 14 m untergebracht werden. Im Vollastbetrieb durchströmen den Brennraum des Kraftwerks pro Stunde tausend Kubikmeter Methan und 2000 Kubikmeter Sauerstoff, wobei 1,3 Kubikmeter Trockeneis abgeschieden werden (Tab A2).

In der Summe entstehen eine Million Kubikmeter Kohlendioxid, die eingefangen und als Trockeneis gespeichert werden. Das Speichervolumen beträgt 1287 Kubikmeter. Ein entsprechend großes Behältnis stellt ebenfalls keine großen Anforderungen an die Platzverhältnisse. Beim Verbrennen entstehen 1613 Kubikmeter Wasser. Die Kondensationswärme von 1 GWh, die hiermit verbunden ist, kann u.U. thermisch genutzt werden.

Im anderen Betriebsmodus der Versorgungsanlage wird Wasser elektrolytisch zersetzt. Der freigesetzte Sauerstoff wird verflüssigt und gespeichert, während der erzeugte Wasserstoff direkt im Reaktor zur Methansynthese verarbeitet wird. Um eine Million Kubikmeter Methan herzustellen, müssen nach Reaktionsgleichung (10) vier Millionen Kubikmeter Wasserstoff zugeführt werden. Zur Reaktion wird das als Trockeneis gespeicherte CO_2 verwendet. Das Methan wird nach Erzeugung direkt in das Gasnetz eingespeist. Im Methanisierungsreaktor wird dabei eine Reaktionswärme von 2 GWh freigesetzt. Weitere 1 GWh entstehen als Kondensationswärme des Dampfes aus dem Reaktor.

Für die elektrolytische Erzeugung von 4 Millionen Kubikmeter Wasserstoff werden nach Gleichung (2) 14,18 GWh an elektrischer Energie und 3226 Kubikmeter Wasser benötigt. Die Menge an einzusetzendem erneuerbarem Strom beträgt daher mindestens 40% mehr als die Heizenergie, die im produzierten Methan steckt. Hat der Elektrolyseur einen Wirkungsgrad von 70%, so ist sogar die doppelte Menge an erneuerbarer Energie aufzuwenden.

Die im Beispiel beschriebene Anlage ist treibhausgasneutral. Eine Speicherung des Sauerstoffs kann entfallen, wenn eine Lösung für die effiziente Abscheidung von CO_2 in Gegenwart von Stickstoff gefunden wird. Ein Betrieb des Kraftwerks mit reinem Sauerstoff kann sogar den positiven Nebeneffekt einer Effizienzsteigerung haben /TECCS/.

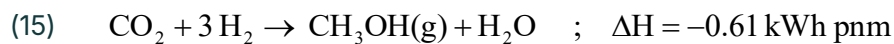
Bei den diskutierten CCS-Szenarien /DBCCS/ wird das abgeschiedene Kohlendioxid zu einem geeigneten Ort transportiert, wo es sicher unterirdisch verpresst werden kann. Wegen der dauerhaft zu bewältigen Transportmengen, wird der Aufbau eines eigenen Gasnetzes für CO_2 in Erwägung gezogen /ZWSZ/. Anstelle das CO_2 zu verpressen, könnte es temporär in Kavernenspeichern gehalten werden und von dort aus in großem Maßstab nach dem beschriebenen Methanisierungsverfahren recycled werden. Eine Lagerung vor Ort, wie im Beispiel beschrieben, würde dann entfallen.

Da ohnehin ein Großteil des Gasnetzes für die Wasserstofftauglichkeit neu aufgebaut werden müsste, sollte die Möglichkeit einer Nutzung für CO_2 unter teilweisem Erhalt des heutigen Erdgasnetzes in die Planung mit einbezogen werden.

4 Synthetisches Methanol als Energieträger

Methanol ist die einfachste Verbindung von Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff, die bei Zimmertemperatur und Normaldruck flüssig ist. Für Transport und Speicherung ist dies ein großer Vorteil. Methanol ist einer der meisthergestellten organischen Chemikalien und spielt auch eine Rolle als Grundstoff bei der Synthese vieler organischer Stoffe.

Wie bei Methan erfolgt die Bindung des grünen Wasserstoffs durch Synthese unter Verwendung von Kohlendioxid. Sie kann bei katalytischer Unterstützung über die Reaktionsgleichung



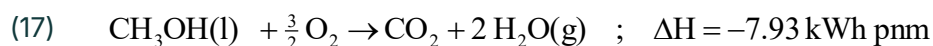
erfolgen, wobei Methanol zunächst in der Gasphase entsteht.

Bei Abkühlung kondensiert das Methanol und gibt dabei Wärme ab.



Als nicht mehr nutzbare Formierungsenergie ist deshalb die Summe der Reaktionsenthalpien von (15) und (16) anzusetzen.

Die Verbrennungsreaktion von Methanol ist



Unter Berücksichtigung der Volumenänderung ergibt sich: Bei der Verbrennung von einem Liter flüssigem Methanol werden 4,4 kWh an Energie freigesetzt.

Aus der Reaktionskette (14) bis (16) ergibt sich analog der Summengleichung (2).

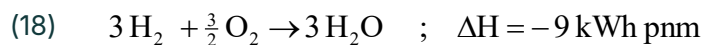


Tabelle 4: Eigenschaften von Methanol (CH₃OH)

	pro kg	Norm m3	pro kWh
Energieinhalt	5,55 kWh	7,93 kWh	1 kWh
Volumen (gasförmig)	0,7 m3	1 m3	126 l
Volumen (flüssig)	1,26 l	554:1	0,23 l
Gewicht	1 kg	1,43 kg	0,18 kg
molare Masse	31		
Siedepunkt	338 K	65 °C	
Verbrennungsreaktion	2 CH ₃ OH + 3 O ₂ → 2 CO ₂ + 4 H ₂ O		

Bezogen auf die dazugehörige Reaktionsenthalpie nutzt Methanol als sekundärer Energieträger 88% des Heizwerts von Wasserstoff. Bezogen auf den Brennwert, der als Untergrenze bei der Elektrolyse als Energie eingesetzt werden muss, verbleiben immerhin knapp 75%.

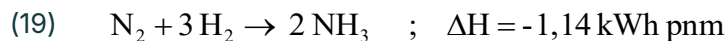
Eine Energiewirtschaft, die auf Methanol basiert, ließe sich auf demselben Wege wie synthetisches Methan treibhausgasneutral gestalten, indem das CO₂ abgefangen und recycled wird.

Der Heizwert pro Normkubikmeter liegt bei Methanol bei knapp 80% des Heizwerts von Methan.

5 Synthetischer Ammoniak als Energieträger

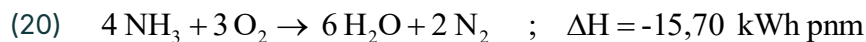
Synthetischer Ammoniak ist als ad hoc treibhausgasneutraler sekundärer Energieträger interessant /EUAM/, denn anders als Methan oder Methanol enthält Ammoniak keinen Kohlenstoff, so dass bei seiner Verbrennung kein klimaschädliches Kohlendioxid freigesetzt wird. Ammoniak ist zwar bei Zimmertemperatur gasförmig. Es wird aber schon mit relativ geringem Kühlaufwand bei -33°C flüssig, was den Transport des Energieträgers erheblich vereinfacht. Ammoniak dient auch als Ausgangsmaterial bei der Herstellung von vielen chemischen Stoffen, z.B. Dünger.

Die Synthese von Ammoniak aus Stickstoff und Wasserstoff wird seit mehr als hundert Jahren mittels des Haber-Bosch Verfahrens großtechnisch durchgeführt, das allerdings hohe Drucke (mehr als 250 bar) und hohe Temperaturen (mehr als 450°C) erfordert.

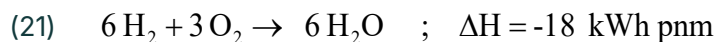


Elektrochemische Niedertemperaturverfahren sind vielversprechend, aber noch in der Entwicklungsphase. Bei grünem Ammoniak übernimmt Stickstoff die Rolle des Kohlenstoffs als Hilfsstoff für den sekundären Energieträger.

In der Verbrennungsreaktion von Ammoniak entsteht lediglich Wasser unter Freisetzung von molekularem Stickstoff.



Die Reaktionskette von (18) und (19) führt auf die Summenreaktion



die, wie erwartet, (bis auf den Faktor 3) mit der Grundreaktion (3) identisch ist.

Mit Ammoniak als sekundärem Energieträger werden daher 87% des Heizwerts und 74% des Brennwerts von Wasserstoff genutzt. Im Gaszustand stellt Ammoniak bezüglich des Energieinhalts pro Kubikmeter keine wesentliche Verbesserung gegenüber Wasserstoff dar.

Tabelle 5: Eigenschaften von Ammoniak (NH_3)

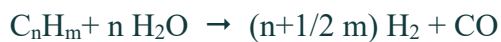
	pro kg	Norm m3	pro kWh
Energieinhalt	5,17 kWh	3,92 kWh	1 kWh
Volumen (gasförmig)	1,32 m3	1 m3	255 l
Volumen (flüssig)	1,56 l	844:1	0,30 l
Gewicht	1 kg	0,76 kg	0,19 kg
molare Masse	17		
Siedepunkt	238 K	- 33 °C	
Verbrennungsreaktion	$4 \text{NH}_3 + 3 \text{O}_2 \rightarrow 6 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{N}_2$		

6 Farbiger Wasserstoff

Neben dem in Abschnitt 1 beschriebenen grünen Wasserstoff gibt es Wasserstoff in weiteren Farben. Diese Typen von Wasserstoff unterscheiden sich in der Art Ihrer Herstellung. Da Kohlenwasserstoffe als Ausgangsstoffe dienen, sind die Herstellung dieser Arten von Wasserstoff i.a. mit Treibhausgasemissionen in nicht unerheblichen Mengen verbunden. Für die Abspaltung des Wasserstoffs von den Kohlenstoffbindungen muss eine Energiemenge aufgewendet werden, die etwa einem Sechstel seines Energieinhalts entspricht.

Grauer Wasserstoff

Grauer Wasserstoff wird großtechnisch in großen Mengen hergestellt. Dabei wird das Verfahren der sogenannten Dampfreformierung bei Temperaturen nahe 500°C und Drucken bis zu 30 bar auf i.a. langkettige Kohlenwasserstoffe angewandt.



Das entstehende Zwischenprodukt Kohlenmonoxid wird mit einer nachgelagerten Wassergas-Shift-Reaktion in Kohlendioxid umgewandelt.

Mit Methan als Ausgangsprodukt ergibt sich die endotherme Summenreaktion



Pro erzeugtem Kubikmeter Wasserstoff ist eine nicht unerhebliche Energie von 0,5 kWh aufzuwenden, was 17% seines Energieinhalts entspricht. Im Gegenzug stehen an Stelle jeden Normkubikmeters Methan mit einem Energieinhalt von 10 kWh 4 Normkubikmeter Wasserstoff mit insgesamt 12 kWh Energie zur Verfügung. Von den Wasserstoffmolekülen entstehen die Hälfte aus dem Wasserdampf. Pro kWh Wasserstoff wird eine stöchiometrische Menge von 0,17 kg CO₂ freigesetzt. Unter Berücksichtigung der Vorkettenemissionen ist aber von einer erheblich höheren Emissionsmenge von 0,47 kg pro kWh auszugehen /UBA/.

Blauer Wasserstoff

Grauer und blauer Wasserstoff unterscheiden sich lediglich bezüglich des Umgangs mit dem freigesetzten Kohlendioxid. Bei der Herstellung von grauem Wasserstoff wird das Kohlendioxid in die Atmosphäre entlassen. Im Herstellungsprozess von blauem Wasserstoff wird das entstehende Kohlendioxid abgeschieden und dauerhaft unterirdisch gespeichert. Selbst wenn dieser Anteil aus der Treibhausgasbilanz herausgenommen wird, bleibt unter Berücksichtigung der Prozess- und Transportenergie eine Emissionsmenge von 0,36 kg pro kWh /UBA/.

Türkiser Wasserstoff

Türkiser Wasserstoff wird bei einer Temperatur von 1600°C in einem pyrolytischen Plasma-Prozess nach Kvaerner hergestellt. Als Endprodukt bleibt reiner Kohlenstoff, so dass stöchiometrisch keinerlei CO₂-Emission entsteht. Die Energie für den Plasmabogen kann rein elektrisch als Wind- oder Solarstrom zugeführt werden.



Unter dem Strich bleibt unter Berücksichtigung des Erdgastransports aber auch bei türkischem Wasserstoff ein CO₂-Fußabdruck von mindestens 0,2 kg pro kWh. Bei Methanerzeugung vor Ort kann dieser deutlich reduziert werden.

Grüner Wasserstoff

Die elektrolytische Zersetzung von Wasser gilt als das klimaschonendste Herstellungsverfahren für Wasserstoff. Der CO₂-Fußabdruck wird mit 40 g pro kWh nach oben abgeschätzt /UBA/.

7 LOHC-Wasserstoff

Neben den verschiedenen Formen elementaren Wasserstoffs und den synthetischen Brennstoffen gibt es noch die Möglichkeit, elementaren Wasserstoff zu Zweck der Speicherung temporär an einen Träger zu binden und ihn bei Bedarf wieder von diesem abzulösen. Ist der Träger flüssig und bindet man pro Trägermolekül ein Wasserstoffatom, so können für die Speicherung im Vergleich zu gasförmigem Wasserstoff hohe Energiedichten erzielt werden.

Die Abkürzung LOHC steht für „Liquid Organic Hydrogen Carrier“. Grundsätzlich sind alle ungesättigten organischen Stoffe potentiell als LOHC geeignet. Allerdings sind eine Reihe weiterer Anforderungen an diese Stoffe zu stellen. So sollte der Stoff sowohl im hydrierten als auch im dehydrierten Zustand (und möglichen Zwischenzuständen) flüssig sein und bleiben.

Man bezeichnet den Prozess der Bindung als Hydrierung. Die Wasserstoffatome werden dabei meist an aromatische Ringsysteme angelagert. Bei der Bindungsreaktion wird Energie freigesetzt, die für die spätere Nutzung verloren ist. Beim Umkehrprozess, der Dehydrierung, muss Energie aufgewendet. Die Bildungsenthalpie hängt dabei vom speziellen Träger ab. Pro Wasserstoffatom und LOHC Molekül gilt vereinfacht die folgende Reaktionsgleichung, wobei die Reaktionsenthalpie auf den Normmeter Wasserstoff bezogen ist.



In Bezug auf den Heizwert liegen die Speicherverluste etwa bei 15%.

Der Speicherprozess unterscheidet sich von den bisherigen Verfahren dadurch, dass das Reaktionsprodukt nicht direkt verbrannt wird. Vielmehr wird Wasserstoff zunächst ausgelöst und dann direkt verbrannt. Da der Träger in seiner ursprünglichen Form zurückgewonnen wird, entstehen bei der Verbrennung keine schädlichen Treibhausgase.

Geeignete Träger müssen verschiedenste Bedingungen erfüllen. Sie müssen ungiftig, umweltverträglich und ungefährlich sein. Dabei sollten sie ähnlich leicht handhabbar wie Diesel oder Heizöl sein, so dass die bestehende Tank- und Lagerinfrastruktur weiter genutzt werden kann. Der LOHC sollte eine Viskosität aufweisen, die ein gutes Pumpen erlaubt.

Die größte Schwierigkeit besteht in dem Dehydrierprozess. Hierzu sind hohe Temperaturen von 250 bis 320°C unter kontinuierlicher Wärmezufuhr erforderlich. LOHC ist deshalb besonders interessant in Kombination mit einer Festoxid-Brennstoffzelle, die bei Temperaturen von 650 bis 850°C betrieben wird. LOHC-Materialien sollten sowohl im beladenen als auch im entladenen Zustand einen Schmelzpunkt deutlich unter dem Gefrierpunkt haben und erst deutlich oberhalb von 300°C verdampfen.

Benzyltoluol ist eine ölige Substanz und erfüllt weitgehend diese Eigenschaften. Das spezifische Gewicht dieses Trägermaterials ist etwa 15% höher als die von Heizöl. Jeder der drei aromatischen Ringe kann 6 Wasserstoffatome aufnehmen, so dass pro Molekül Benzyltoluol (bis zu) 18 Wasserstoffatome gebunden werden. Die Energiedichte beträgt etwa ein Sechstel des Wertes von Heizöl. Verschiedene aktuelle Projekte zu grünem Wasserstoff bringen die LOHC-Technologie an die Schwelle zur großindustriellen Anwendung. Für den vollständigen Rückverstromungszyklus erwartet man Gesamtwirkungsgrade von bis zu 40%/HYD/.

8 Zusammenfassung

In dieser Untersuchung wurde die Eignung von Wasserstoff und sekundären Energieträgern als saisonale chemische Speicher analysiert. Als Untersuchungskriterien für die verschiedenen Energieträger galten energetische Nutzung in Bezug auf die eingesetzte elektrische Energie, Transport-, Lager- und Speicherfähigkeit, sowie Treibhausgasneutralität.

Ein grundsätzliches Problem bei der Nutzung von Wasserstoff und daraus abgeleiteter sekundärer Energieträger zur Rückverstromung, liegt darin, dass zur elektrolytischen Herstellung als Energie der Brennwert aufgebracht werden muss, während in konventionellen Kraftwerken lediglich der Heizwert genutzt werden kann. Hierdurch reduziert sich in Kraftwerken, deren Wirkungsgrade üblicherweise in Bezug auf den Heizwert angegeben werden, die nutzbare Energie auf 85%. Brennstoffzellen basieren hingegen auf einer wässrigen Lösung, so dass dieses Problem für sie bei der Rückverstromung nicht existiert. Bei Blockheizkraftwerken lässt sich die Kondensationswärme zumindest thermisch nutzen.

Die untersuchten sekundären Energieträger werden alle in Formierungsreaktionen hergestellt, die exotherm verlaufen. Diese Energie steht für die eigentliche Verbrennungsreaktion nicht mehr zur Verfügung. Der damit verbundene (weitere) Energieverlust fällt für Methanol mit 12% am geringsten und für Methan mit 17% am höchsten aus (Tab.6). Dieser Verlust besteht bei direkter Verwendung von Wasserstoff als Brennstoff nicht.

Wasserstoff, Methan und Ammoniak sind Gase, welche in Gasnetzen transportiert werden können. Für Methan kann das bestehende Erdgasnetz direkt weiterverwendet werden. Für Wasserstoff sind zur Vermeidung von Leckage umfängliche Nachbesserungen oder Neuverlegungen vorzunehmen.

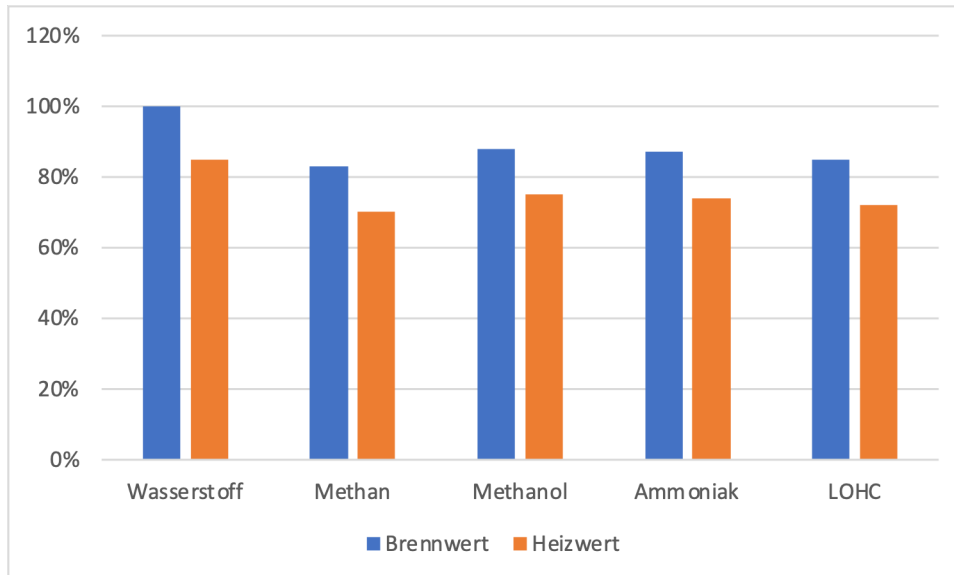


Abb. 2: Heizwerte und Brennwerte verschiedener Energieträger bezogen auf Wasserstoff. Zur elektrolytischen Herstellung von Wasserstoff muss der Brennwert von 7,09 kWh pro Normkubikmeter eingesetzt werden. Als Energieinhalt von Wasserstoff wird der Heizwert angegeben.

Für einen Transport auf Schiffen ist eine hohe Dichte des Energieträgers erforderlich. Gasförmige Substanzen sind daher unter sehr hohem Druck zu verdichten oder durch Abkühlen zu verflüssigen. Der Kühlaufwand ist dabei für Wasserstoff mit Abstand am höchsten. Der Transport von Methan als LNG ist bereits großtechnisch üblich, aber ebenfalls aufwendig. Ammoniak wird

hingegen schon bei relativ hohen Temperaturen flüssig und ist in dieser Form gut zu transportieren. Methanol ist indessen schon bei Zimmertemperatur flüssig, so dass mit diesem Stoff ein Raumproblem weder für den Transport noch für die Speicherung besteht.

Für die Speicherung von Erdgas existieren in Deutschland große Kavernenspeicher, die unverändert für Methan genutzt werden können. Für Methan ergibt sich eine nominelle Speicherkapazität von 246 TWh, die in einer treibhausgasneutralen Wirtschaft als saisonaler Speicher ausreichen dürfte. Theoretisch könnten die Kavernenspeicher auch für Wasserstoff genutzt werden, ein Praxistest steht aber noch aus. Wegen der geringen Energiedichte würde der vorhandene Speicher mit Wasserstoff aber nur für 74 TWh ausreichen. Diese Kapazität ist für einen saisonalen Speicher sehr wahrscheinlich zu gering. Dasselbe gilt für Ammoniak, das nur eine unwesentlich höhere Energiedichte als Wasserstoff hat.

Eine Energiewirtschaft, die auf Wasserstoff oder Ammoniak basiert, ist treibhausgasneutral, da bei der Verbrennung lediglich Wasser produziert wird. Bei der Verwendung von Methan, Methanol oder andere synthetische kohlenstoffbasierte Energieträger wie Kerosin muss sichergestellt sein, dass das zur Synthese verwendete Kohlendioxid aus einem zyklischen Kreislauf stammt. Dies kann entweder durch aufwendige Rückgewinnung von CO₂ aus der Atmosphäre oder den Ozeanen oder durch eine dem Verbrennungsprozess direkt nachgelagerte Abscheidung erreicht werden.

Bis zur Wiederverwendung muss das abgeschiedene CO₂ allerdings vor Ort gelagert und/oder zu einer Lagerstätte transportiert werden. Eine treibhausgasneutrale Energiewirtschaft muss zu diesem Zweck für diesen Hilfsstoff zur Herstellung des sekundären Energieträgers eine zusätzliche umfängliche Infrastruktur schaffen. Hier ist grüner Ammoniak im Vorteil, denn Ammoniak bedient sich des Hilfsstoffs Stickstoff, der über die Atmosphäre direkt und jederzeit zur Verfügung steht.

Mit der Anwendung der Elektrolyse steht reiner Sauerstoff im großen Maßstab zur Verfügung. Dies ermöglicht den wirtschaftlichen Betrieb von Kraftwerken mit dem Oxyfuel Prinzip und damit die Abscheidung von Kohlendioxid.

Elektrolyse, Formierungsanlage und Kraftwerk sollten künftig als Gesamtheit und in Verbindung mit Speichermöglichkeiten für die verwendeten chemischen Stoffe konzipiert werden. Dies hat den Vorteil, dass Wasserstoff und Sauerstoff direkt vor Ort weiterverarbeitet werden können. Da beim Betrieb jeder dieser Anlagen große Mengen an Abwärme anfallen, sollten sie an den Einspeisepunkten von Wärmenetzen platziert werden.

Zusammenfassend sprechen viele Argumente für die Verwendung von Methan oder Methanol als Energieträger an Stelle von Wasserstoff. Das setzt allerdings die Bereitschaft voraus, umfassende Investitionen für eine CO₂-Infrastruktur zu tätigen. Netzausbau und Speicheraufbau sind hingegen auch beim Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in ähnlichem, wenn nicht höherem Umfang erforderlich.

9 Quellen

/WKCD

https://de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung_Chemie/_Thermodynamische_Daten

/HCPCD

David R. Lide (Hrsg.): CRC Handbook of Chemistry and Physics. 90. Auflage. (Internet-Version: 2010), CRC Press / Taylor and Francis, Boca Raton FL, Standard Thermodynamic Properties of Chemical Substances, S. 5-24.

/SNCD

<https://www.seilnacht.com/Lexikon/dhtabell.htm>

/HBWSFC/

<https://www.sfc.com/glossar/heizwert-von-wasserstoff/>

/HEUS

hydrogen embrittlement

http://www.uni-saarland.de/fak8/wwm/research/phd_barnoush/hydrogen.pdf

/WIPE

<https://wiki.energie-m.de/Heizwert>

/LFSP2G

<https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php>

/ARSR

https://ariadneprojekt.de/media/2022/02/Ariadne_Szenarienreport_Oktober2021_corr0222.pdf

/AEWK

https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf

/ISEKNE

<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-treibhausgasneutralen-Energiesystem-Update-Treibhausgasneutralitaet-2045.pdf>

/DENE

https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/562/9219_E-Fuels-Studie_deutsche_Zusammenfassung.pdf

/FFBL

<https://futurefuels.blog/tag/efuels>

/ISIWD

<https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2023/Diskussionspapier%20final.pdf>

/MEWD

<https://www.meraevum.com/de/wasserstoff>

/ISEWD

<https://www.bundestag.de/resource/blob/843806/07557ce5eff2a34440b54883e09f8268/PowerPoint-Praesentation-von-Prof-Christopher-Hebling-Fraunhofer-Institut-fuer-Solare-Energiesysteme-ISE-data.pdf>

/WIMD

<https://de.wikipedia.org/wiki/Mitteldestillat>

/WKKS

<https://de.wikipedia.org/wiki/Untergroundspeicher#Kavernenspeicher>

/ZWSZ

https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Studien/Systemanalyse/2022_Teilbericht_Sektorziele_BW.pdf

/TECCS

<https://totalenergies.com/sites/g/files/nytnzq121/files/atoms/file/Captage-Carbon-capture-and-storage-the-Lacq-pilot.pdf>

OXyfuel

/DBCCS

Ausarbeitung Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag Erkenntnisse aus der Erprobung von Technologien zur CO₂-Abscheidung und CO₂-Speicherung (CCS) in Deutschland, 2018

<https://www.bundestag.de/resource/blob/567342/f356ac5bb411dca92e8a18c8c3037c28/WD-8-055-18-pdf-data.pdf>

/EUAM

https://www.ikts.fraunhofer.de/de/presse/news/2020_09_17_eu_projekt_hipowar_gestartet.html

/UBA

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/dokumente/uba_welche_treibhausgasemissionen_verursacht_die_wasserstoffproduktion.pdf

/HYD

<https://hydrogenious.net>

10 Anhang

In dieser Arbeit werden einige Grundlagen der Chemie benutzt und daraus Schlussfolgerungen zu ziehen. Stoffmengen werden in Einheiten von mol angegeben.

Anschaulicher aus technischer Sicht sind Normkubikmeter. Ein Normkubikmeter beschreibt für ein Gas die Teilchenzahl, die bei einer Temperatur von 273,15 K (0°C) und Standarddruck (1,013 bar) in einem Kubikmeter enthalten sind. Für ein ideales Gas ist die Teilchenzahl unabhängig von der Teilchensorte und beträgt 44,6 mol (oder 1 mol = 1 Nm³/44,6). Für reale Gase sind Abweichungen von dieser Regel klein.

Reaktionsenthalpien werden gewöhnlich in kJ pro mol angegeben. In der Energietechnik ist hingegen die Einheit kWh gebräuchlich (1 kJ = 1 kW s = 1 kWh/3600).

1 kJ/mol entspricht damit 0,0124 kWh pnm (pro Norm-Menge)

Tab. A1: Umrechnungstabelle für Energie und Mengengrößen. Zur Umrechnung: bekannte Größe in Spaltenkopf aufsuchen und Ergebnis in Zeile ablesen. Anwendungsbeispiel: 1 kWh entsprechen 3600 kJ.

	kJ	kWh	mol	nm	kJ/mol	kWh pnm
kJ	-	3600	-	-	-	-
kWh	0,00028	-	-	-	-	-
mol	-	-	-	44,64	-	-
nm	-	-	0.0224	-	-	-
kJ/mol	-	-	-	-	-	80,65
kWh pnm	-	-	-	-	0,0124	-

Für die folgenden Überlegungen benötigen wir die molaren Bildungsenthalpien, die sich aus gängigen Tabellen entnehmen lassen. Sie geben für eine Verbindung die Enthalpie an, die bei der Bildung aus den Elementen (im Standardzustand) aufgewendet werden muss. Definitionsgemäß haben die Elemente, wenn sie sich in ihrem Standardzustand befinden, eine molare Bildungsenthalpie von 0. Ein negatives Vorzeichen bedeutet, dass diese Energie freigesetzt wird.

Tab. A2: Molare Bildungsenthalpien einiger Verbindungen im Standardzustand nach /TD1,TD2/. Zur besseren Veranschaulichung wurden die Bildungsenthalpien in kWh ausgedrückt und auf die Stoffmenge in einem Normkubikmeter bezogen.

Verbindung	Formel	ΔH_o [kJ/mol]	ΔH_o [kWh pnm]
Wasser (flüssig)	H ₂ O(l)	-286,0	-3,55
Wasser (Dampf)	H ₂ O(g)	-241,8	-3,00
Methan	CH ₄	-74,9	-0,929
Methanol (Gas)	CH ₃ OH(g)	-201,6	-2,50
Methanol (flüssig)	CH ₃ OH(l)	-238,5	-2,96
Kohlenmonoxid	CO	-110,5	-1,37
Kohlendioxid	CO ₂	-394	-4,89
Ammoniak	NH ₃	-46,2	-0,573

Die Bildungsenthalpie hängt vom Aggregatzustand ab, denn bei einem Phasenübergang muss Energie zugeführt werden (z.B. Verdampfungswärme von Wasser) bzw wieder freigesetzt

werden. Nach dem Hess'schen Wärmesatz lassen sich aus den molaren Bildungsenthalpien alle die Reaktionswärmen für alle Reaktionen berechnen, an denen die Verbindungen beteiligt sind.

Tab A3: Übergangstemperaturen für Verflüssigung bzw. Sublimation (CO_2) bei Normaldruck und Volumenänderung bei gleichbleibender Teilchenzahl.

Substanz	Verdichtung	Übergangstemperatur [°C]
H_2	789	-252
O_2	799	-183
N_2	647	-196
H_2O	1246	100
NH_3	844	-33
CO_2	781	-79
CH_4	583	-162
CH_3OH	554	65

Tab. A4: Heizwerte und Brennwerte verschiedener Energieträger bezogen auf Wasserstoff. Zur elektrolytischen Herstellung muss der Brennwert von 7,09 kWh pro Normkubikmeter eingesetzt werden. Als Energieinhalt von Wasserstoff wird der Heizwert angegeben.

Nutzbarkeit bezogen auf	Brennwert	Heizwert
Wasserstoff	100%	85%
Methan	83%	70%
Methanol	88%	75%
Ammoniak	87%	74%
LOHC	85%	72%