

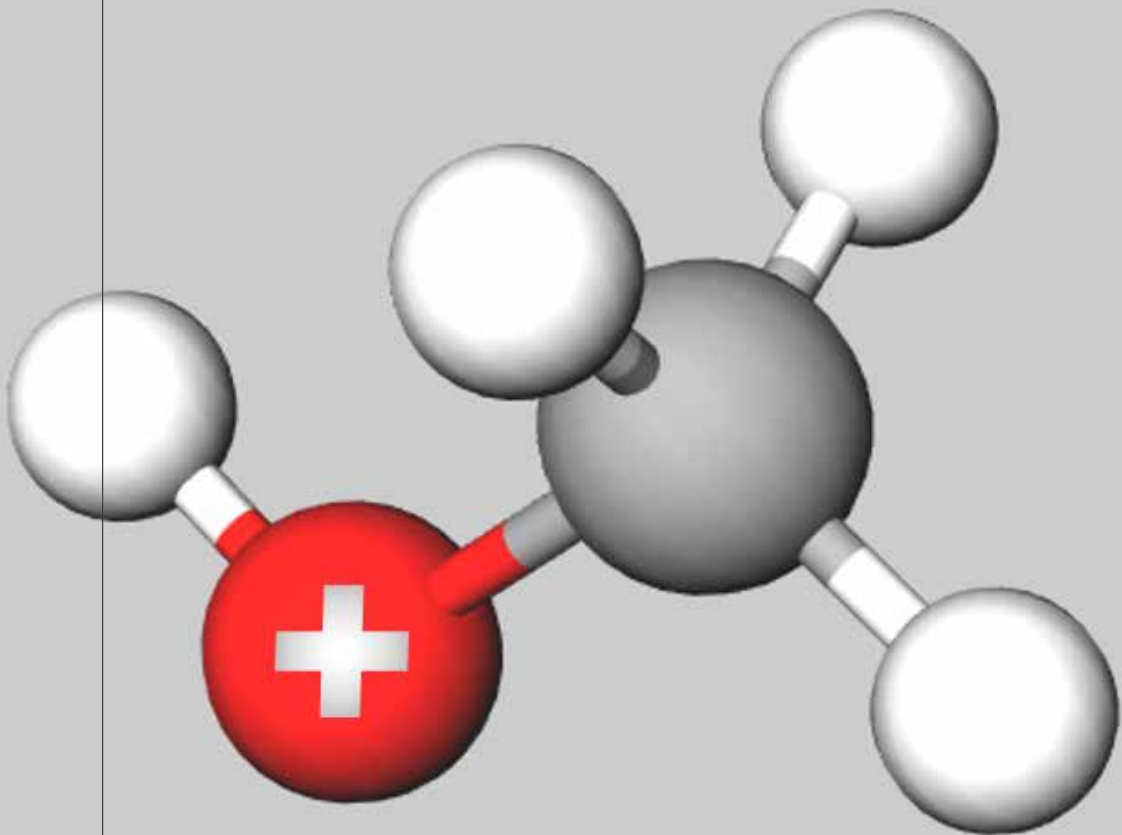


Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

Methanol

Aktivitäten in der Schweiz 2021



BFE-Forschungsprogramm Wasserstoff

Datum: 13. Januar.2021

Ort: Bern

Autor: Dr. Stefan Oberholzer

Inhalt

1	Einleitung	5
2	Einsatz von Methanol als Energieträger	6
2.1	Eigenschaften als Energieträger	6
2.2	Energetische Nutzung	7
2.2.1	Verbrennung	7
2.2.2	Biodiesel-Produktion.....	9
2.2.3	Brennstoffzellen.....	9
2.3	Methanolherstellung	9
2.3.1	Konventionell	9
2.3.2	Power-to-Liquid (P2L)	10
2.3.3	Biomethanol (Biomass-to-Liquid, BTL).....	11
2.3.4	Solares Methanol.....	11
3	«Methanolwirtschaft»	12
4	Wirtschaftlichkeit von Methanol als Energieträger	13
5	Rahmenbedingungen für synthetische und biogene Treibstoffe.....	14
5.1	Anrechenbarkeit für die CO ₂ -Flottenemission beim Einsatz synthetischer Treibstoffe..	14
5.2	Verlängerung Steuererleichterungen für biogene Treibstoffe bis 2023	14
6	Forschungsaktivitäten an Hochschulen und in der Privatwirtschaft	14
6.1	Akteure an Hochschulen	15
6.1.1	Paul Scherrer Institut PSI, Labor für Katalyse und nachhaltige Chemie (und ETHZ-ICB).....	15
6.1.2	Paul Scherrer Institut PSI, Labor für Elektrochemie (ELC)	15
6.1.3	ETH Zürich, Institut für Chemie- und Bioingenieurwissenschaften (ICB)	15
6.1.4	ETH Zürich, Labor für Anorganische Chemie (LAC).....	16
6.1.5	ETH Zürich, Professorship of Renewable Energy Carriers (PREC)	16
6.1.6	EPF Lausanne, Institute of Chemical Sciences and Engineering (ISIC)	16
6.1.7	Empa, Abteilung Fahrzeugantriebssysteme	17
6.1.8	Fachhochschule OST, Institut für Energietechnik (IET).....	17
6.1.9	Fachhochschule OST, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC) ..	17
6.1.10	Andere Forschungseinrichtungen	17

6.2	Akteure in der Privatwirtschaft	18
6.2.1	Proman AG	18
6.2.2	Casale SA.....	18
6.2.3	Clariant AG	18
6.2.4	LEWA NIKKISO Pumpen AG	19
6.2.5	Brechbühler AG	19
6.2.6	Methanology AG.....	19
6.2.7	Swiss Liquid Future AG (Silicon Fire AG)	19
6.2.8	Winterthur Gas & Diesel (WinGD).....	20
6.2.9	Silent-Power AG	20
7	Zusammenfassung.....	22

1 Einleitung

Methanol (Methylalkohol, MeOH) gehört zusammen mit Ammoniak und sogenannten hochwertigen Chemikalien (HVC = high value chemicals¹) mit einer globalen Produktionskapazität von rund 100 Millionen Tonnen pro Jahr (2019) zu den wichtigsten primären organischen Chemikalien. Es wird am häufigsten zur Herstellung anderer Chemikalien und Stoffen verwendet: etwa 40 % werden zu Formaldehyd umgewandelt und zu Kunststoffen, Sperrholz, Farben, Sprengstoffen und Textilien weiterverarbeitet. Auch in Frostschutz-, Lösungsmitteln und als Treibstoff für Fahrzeuge findet Methanol Anwendungen.²

Zum allergrössten Teil wird Methanol aus fossilen Quellen (Petrochemie) in einem katalytischen Verfahren aus Synthesegas (Gemisch aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid) gewonnen. Das Synthesegas stammt dabei aus der (1) Vergasung von Kohle, Braunkohle oder Erdölfraktionen oder aus der (2) Reformierung von Erdgas (Dampfreformierung, partielle Oxidation).

Während in Nordamerika und Europa meist Erdgas als Rohmaterial genutzt wird, basiert die Synthesegasherstellung in China ausschliesslich auf der energieintensiven Vergasung von Kohle und Braunkohle³. Etwa 25 % des globalen Bedarfs an Erdgas für chemische Grundstoffe wird für die Herstellung von Methanol eingesetzt.

Obwohl der Chemiesektor in etwa gleich viel Energie verbraucht wie Stahl- und Zementsektor zusammen, emittiert erster weniger CO₂ als die beiden anderen Sektoren zusammen. In absoluten Zahlen sind das 1,5 Gt CO₂, was 18 % der gesamten Industrieemissionen und 5 % aller verbrennungsbedingten Emissionen entspricht. Mit verstärktem Recycling, dem Einsatz von CO₂-Abscheidungstechnologien (CCUS), dem Wechsel von Kohle auf Gas sowie auch mit dem Einsatz von erneuerbaren Quellen (Biomasse, erneuerbare Stromproduktion mit «Power-to-X»-Ansätzen, siehe unten) können diese Emissionen künftig reduziert werden.

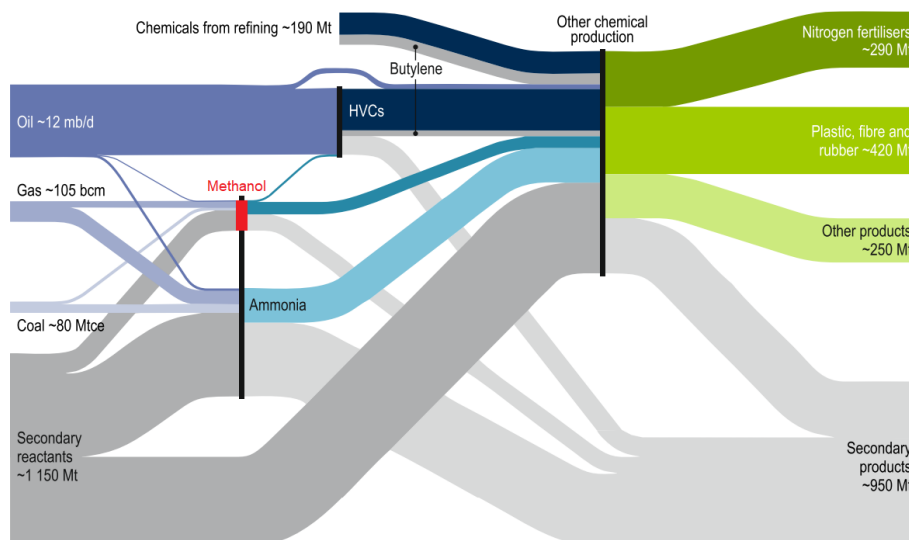


Abbildung 1: Jährlich werden 500 Millionen Tonnen Öläquivalente (entspricht etwa 6000 TWh) an Rohstoffen genutzt, um eine 1 Milliarde Tonnen an chemischen Produkten herzustellen. Die Methanol- und Ammoniakproduktion basiert auf Gas und Kohle, während hochwertige Chemikalien (HVCs) aus Erdöl gewonnen werden.²

¹ HVCs = leichte Olefinen (Ethen, Propen und Buten) und aromatische Verbindungen.

² IEA, 2018: «The Future of Petrochemicals: Towards more sustainable plastics and fertilisers»

³ China ist der grösste Produzent und Verbraucher von Methanol weltweit.

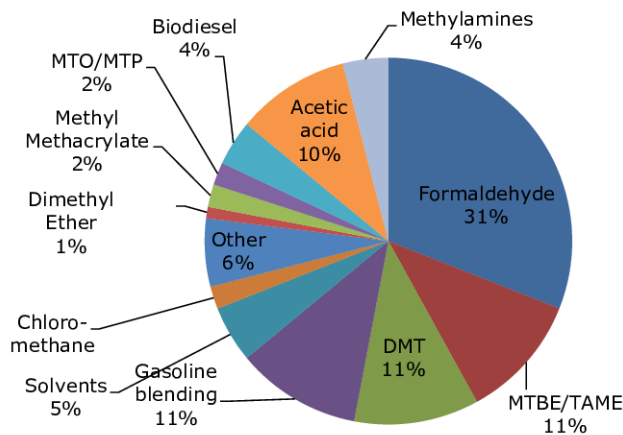


Abbildung 2: Globaler Verbrauch von Methanol nach Endanwendung. Etwa 37 % wird direkt energetisch genutzt als Treibstoff oder Treibstoffbeisatz (4 % für Biodieselproduktion, 11 % Methyl-tert-Butylether (MTBE)/tert-Amylmethylether (TAME), 11% Dimethylether (DME) und 11 % für Benzinbeimischungen (Gasoline blending).⁴

2 Einsatz von Methanol als Energieträger


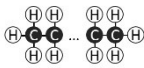


Die Verwendung von Methanol als Energieträger (Treibstoffanwendungen) macht ungefähr 37 % des gesamten Methanolverbrauchs aus und umfasst Methyl-tert-Butylether (MTBE)/tert-Amylmethylether (TAME), Biodiesel, Benzinbeimischungen und Dimethylether (DME).

2.1 Eigenschaften als Energieträger

Methanol ist eine Verbindung mit der Strukturformel CH_3OH und stellt den einfachsten Vertreter der Alkohole dar. Unter Normalbedingungen liegt Methanol als klare und geruchslose Flüssigkeit vor, ist leicht flüchtig und relativ leicht entzündlich.

Als Flüssigkeit hat Methanol eine **hohe volumetrische Energiedichte**, die etwa 52 % der Energiedichte von Benzin entspricht und um mehr als einen Faktor 2 bzw. 8 grösser ist im Vergleich zu gasförmigem Methan bzw. Wasserstoff bei 200 bar. Als Flüssigkeit ist Methanol leichter handhabbar als gasförmige Energieträger wie Methan, Propan oder Wasserstoff.

Tabelle 1: Eigenschaften ausgewählter flüssiger und gasförmiger Energieträger

Energieträger:	Struktur:	Aggregatzustand bei Normalbedingungen:	Energiedichte (MJ/L bezogen auf LHV):	Energiedichte (rel. zu Benzin in %):
Methanol	CH_3OH 	flüssig	16	52
Benzin	C_xH_y (#C: 5-10) 	flüssig	31	100
Methan (200 bar)	CH_4 	gasförmig	7	23
Wasserstoff (200 bar)	H_2 	gasförmig	2	6.7

⁴ «Production costs from energy-intensive industries in the EU and third countries», JRC Science Hub, European Union, 2016.

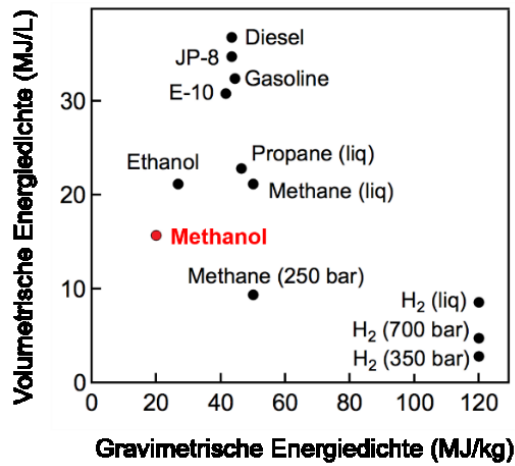


Abbildung 3: Volumetrische und gravimetrische Energiedichte ausgewählter flüssiger und gasförmiger Energieträger. Die volumetrische Energiedichte von Methanol ist nur etwa halb so gross wie die von Benzin, jedoch (sehr viel) höher als für gasförmige Energieträger.

2.2 Energetische Nutzung

Methanol kann als Treibstoff, Treibstoffzusatz oder Benzinbeimischung in Verbrennungsmotoren genutzt werden. Weiter wird es zur Herstellung von Biodiesel benötigt. In der Anwendung mit Brennstoffzellen kann Methanol direkt in Strom und Wärme umgewandelt werden.

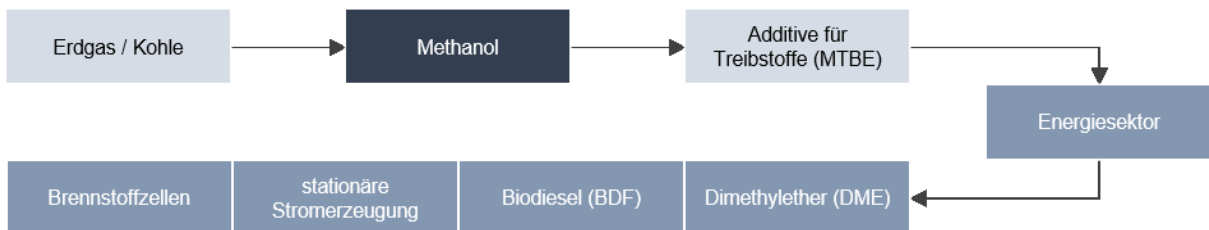


Abbildung 4: Energetische Nutzung von Methanol: etwa 37 % der globalen Produktion wird energetisch genutzt als Treibstoff oder Treibstoffbeisatz, zur Biodieselproduktion, für Nischenanwendungen in Brennstoffzellen oder auch zur stationären Stromproduktion. Die stationäre Nutzung in thermischen Kraftwerken (Substitution von Diesel) ist nicht stark verbreitet. Der Einsatz von Alkoholkraftstoffen wie Methanol ist interessant wegen der sauberen Verbrennung, was besonders für touristische Regionen wichtig ist. Im Jahr 2014 wurde beispielsweise eine 50-MW-Pratt & Whitney-Gasturbine des Kraftwerks Eilat (Israel) auf Methanol umgestellt, wodurch die NO_x-Emission um 80 % reduziert wurden. Aktuell ist vor allem wieder die direkte Verwendung von Wasserstoff für stationäre Turbinen in Diskussion.

2.2.1 Verbrennung

Für die **Verwendung als Treibstoff** wird Methanol in unterschiedlichen Anteilen dem Benzin beigemischt oder auch in Form von Ether in Dieselfahrzeugen verwendet. Für hoch konzentrierte Methanolbeimischungen wie etwa M85 existieren spezielle sogenannte «Flexible Fuel Vehicles», bei denen Gemischbildung und Zündung an die jeweiligen Kraftstoffe angepasst wird. Solche Fahrzeuge können sowohl mit Benzin, Ethanol als auch mit Methanol betrieben werden.

Methanol kommt in China in verschiedenen Mischungen von M5 bis M100 zum Einsatz und die Verwendung von mit Methanol betriebenen Fahrzeugen wird dort teilweise stark gefördert. In Europa und Nordamerika ist die Beimischung von Methanol auf wenige Prozente im Benzin begrenzt.⁵

⁵ Für weitere Informationen, siehe: https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/methanol

Bei der Verwendung als Treibstoff weist Methanol folgende Vorteile auf ⁶:

- hohe Klopfestigkeit (Eigenschaft, dass der Treibstoff bei Verdichtung nicht unkontrolliert zündet). Diese Eigenschaft erlaubt höhere Verdichtungsverhältnisse und damit einen höheren motorischen Wirkungsgrad;
- saubere (russfreie) Verbrennung;
- Verbrennung mit Luftüberschuss (mageres Gemisch), was zu geringeren Stickoxidemissionen (NO_x) führt;
- biologisch abbaubar (im Fall einer Havarie);
- mischt sich gut in Wasser (hohe Polarität des Methanol-Moleküls);
- höhere Flüchtigkeit (bessere Verteilung des Luft-Kraftstoffgemisches zwischen einzelnen Zylindern im Motor).

Nachteilig sind:

- schlechte Selbstzündeeigenschaften (langer Zündverzug);
- Schwierigkeit beim Kaltstart eines Motors;
- Korrosion;
- Verdunstung von Methanol in Kraftstoffleitungen;
- Schlechte Schmiereigenschaften aufgrund niedriger Viskosität;
- Giftigkeit⁷ von Methanol.

Ein wachsendes Interesse an Methanol als alternativem Treibstoff besteht insbesondere auch im **maritimen Bereich**. Der Hauptgrund dafür sind Verschärfungen der Emissionsgesetzgebung (Stickoxid- und Schwefeldioxid-Emissionen). Im Vergleich zu verflüssigtem Erdgas (LNG), das ebenfalls in der Schifffahrt als alternativer Treibstoff im Gespräch ist, hat Methanol den Vorteil, dass es bei normalen Bedingungen flüssig ist und somit keine grösseren Anpassungen an Schiffskonstruktion oder Nachrüstungen notwendig wären im Vergleich zur Speicherung von kryogenem LNG (flüssig bei rund 110 K).

Wegen der im Vergleich zu Kerosin geringen spezifischen Energiedichte eignet sich Methanol nicht gut als Flugtreibstoff. Es ist jedoch allenfalls ein Vorstufenprodukt zur Herstellung von erneuerbarem Flugkraftstoff über sogenannte «Power-to-Liquid» (PTL)-Verfahren (siehe unten, Herstellung).

Eine gute Übersicht zur Anwendung alternativer Treibstoffe in verschiedenen Mobilitätsbereichen, wo auch Methanol berücksichtigt ist, findet sich im EU-Bericht «State of the Art on Alternative Fuels Transport Systems in the European Union» des Joint Research Centre and DG Mobility and Transport der europäischen Kommission, publiziert im Februar 2020 (https://erticonetwork.com/wp-content/uploads/2020/06/KL0420116ENN.en_.pdf).



Abbildung 5: Im Jahr 2015 wurde eine zwischen Kiel und Göteborg eingesetzte Fähre auf Dual-Fuel-Betrieb umgebaut und fährt seither teilweise mit Methanol (rund 25 %), um Emissionsgrenzwerte einhalten zu können.

⁶ <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/03/SGS-INSPIRE-Methanol-Properties-and-Uses.pdf>

⁷ Im Gegensatz zu Ethanol (C₂H₆O) ist Methanol (CH₃OH) in jeder Konzentration giftig.

2.2.2 Biodiesel-Produktion

Methanol kommt bei der Herstellung von Biodiesel als Kernkomponente im Umesterungsprozess zum Einsatz. Bei der **Umesterung** reagiert Methanol mit den in Pflanzenölen, tierischen Fetten oder recycelten Fetten enthaltenen Triacylglyceriden und bildet Fettsäuremethylester (Biodiesel) und das Nebenprodukt Glycerin. Die für den Prozess benötigte Menge an Methanol beträgt etwa 20 % des Volumens des zu verarbeitenden Öls.

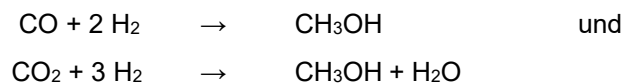
2.2.3 Brennstoffzellen

Direktmethanolbrennstoffzellen sind Niedertemperatur-Brennstoffzellen ähnlich der weit verbreiteten Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (Brennstoffzellentyp für den Mobilitätsbereich), bei denen Methanol direkt (d. h. ohne vorherige Reformierung) zugeführt und dieses in Strom und Wärme umgewandelt wird. Nachteilig ist der eher geringe Wirkungsgrad und die geringe Lebensdauer, was eine Folge des unerwünschten Übertritts von Wasser und Methanol durch die Membran der Zelle ist. Daher existieren bis heute nur Nischenanwendungen für Direktmethanolbrennstoffzellen, speziell im Outdoor-Bereich, wo die deutsche SFC Energy AG (<https://www.sfc.com>) erfolgreich ist.

2.3 Methanolherstellung

2.3.1 Konventionell

Die Synthese von Methanol (CH_3OH) erfolgt über katalytische Verfahren, wo **Synthesegas** – ein Gemisch aus Wasserstoff (H_2), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) – als Ausgangsstoff verwendet wird. Die beiden grundlegenden exothermen (Energie wird frei) Hydrierungsreaktionen sind:



Verschiedene grosstechnische Verfahren unterscheiden sich nach Reaktionsdrücken (Hochdruck-, Mitteldruck- und Niederdruckverfahren) mit jeweils spezifischen Katalysatoren und unterschiedlichen Massenverhältnissen in der Zusammensetzung des Synthesegases.

Die Ausgangsstoffe (Synthesegase) können aus fossilen Quellen gewonnen werden (Erdgas, Kohle, Braunkohle, Erdölfraktionen, Torf) oder auch aus erneuerbaren Rohstoffen (Holz, Biogas, andere Biomasse).

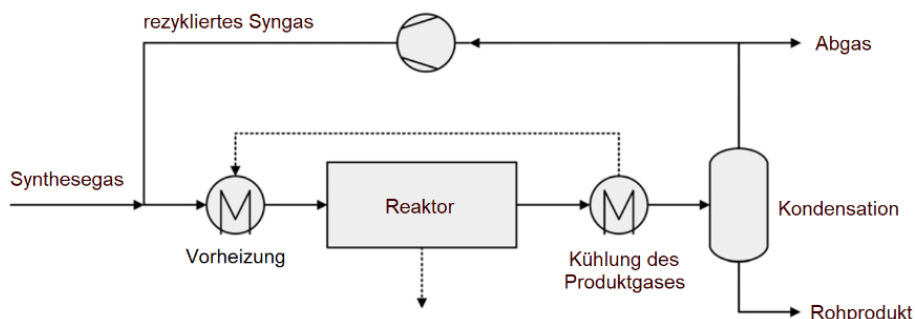


Abbildung 6: Konventionelle Prozesskette zur Synthese von flüssigen Treibstoffen wie Methanol, Dimethylether (DME) und Fischer-Tropsch⁸ (FT)-Treibstoffen.⁹

⁸ Grosstechnisches Verfahren, um aus Synthesegas langkettige Kohlenwasserstoffe (C_xH_y) wie Paraffine, Olefine und Alkohole zu gewinnen mit synthetischem Benzin, Diesel, Kerosin oder Heizöl als Endprodukt.

⁹ Nach Dieterich et al., Energy Environ. Sci., 2020.

2.3.2 Power-to-Liquid (P2L)

Weiter lässt sich Synthesegas und daraus Methanol mit dem Einsatz von erneuerbarem Strom gewinnen. Zentral ist hier die Elektrolyse von Wasser zu Wasserstoff (H_2). Das notwendige CO_2 kann aus verschiedenen Quellen gewonnen werden: direkte Gewinnung aus der Luft (z. B. mit der Technologie der Schweizer Firma Climeworks), aus dem Rauchgas von fossilen Kraftwerken, bei Zementproduktionsanlagen oder auch aus biologischen Quellen (z. B. Klärgas). Für die «Klimafreundlichkeit» entscheidend ist hier, wie bei allen Power-to-X-Verfahren, insbesondere die Art des eingesetzten Stromes für die Elektrolyse zur Gewinnung von Wasserstoff.¹⁰

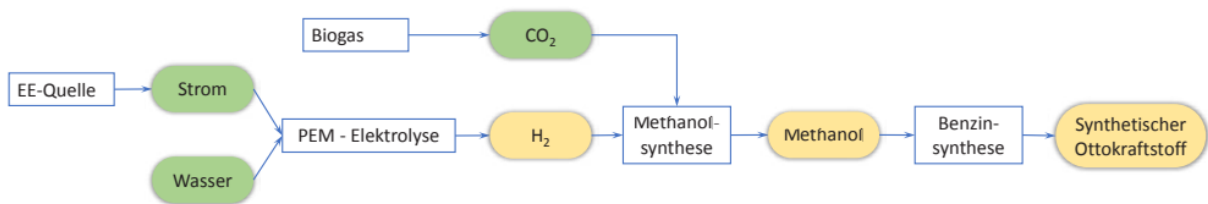


Abbildung 7: Vereinfachte Prozesskette für Power-to-Liquid-Verfahren zur Bereitstellung von synthetischem Benzin über Methanolsynthese (aus Kopernikus-Projekt «Power-to-X Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen (P2X)», BMBF, 2019).



Abbildung 8: Produktionsanlage zur Herstellung von Methanol über Power-to-Liquid-Verfahren der Firma Carbon Recycling International (CRI) in Island, wo Strom für die Wasserstoffproduktion und CO_2 aus einem nahe gelegenen Geothermiekraftwerk genutzt wird (Bild: Carbon Recycling International CRI).

In grösserem Massstab umgesetzt wird das Power-to-Liquid-Verfahren durch die isländische Firma Carbon Recycling International CRI (www.carbonrecycling.is) in einer Produktionsanlage für erneuerbares Methanol (Markenname «Vulcanol») mit einer Kapazität von rund 5000 Tonnen Methanol pro Jahr. Dort wird Strom aus einem Geothermiekraftwerk (Svartsengi power station) für die Elektrolyse zur Produktion von Wasserstoff eingesetzt. Das Kohlendioxid für die Methanolsynthese wird beim Geothermiekraftwerk abgeschieden.

¹⁰ siehe auch White-Paper «Power-to-X» <http://www.sccer-hae.ch/wpp2x.php>.

2.3.3 Biomethanol (Biomass-to-Liquid, BTL)

Hier wird das für die Methanolproduktion notwendige Synthesegas aus der Vergasung von Biomasse (insbesondere Holz) gewonnen (Wirbelschicht- und Festbettvergasung). Zusätzliche Prozessenergie ist notwendig für Trocknung und Reinigung von Schadstoffen. Der nicht erneuerbare Energieanteil bei der Gewinnung aus Holz wird gemäss der BFE/BAFU-Studie aus 2007 «Ökologische Bewertung von Bio-treibstoffen» mit rund 0,4 MJ pro MJ Methanol angegeben. Bezogen auf das Treibhausgaspotenzial ist bei der Produktion von Methan oder Methanol aus Holz eine Reduktion von mehr als 50 % möglich im Vergleich zu Benzin oder Diesel.

Europaweit gibt es zu Biomethanol ein paar grössere Demonstrationen (z. B. 74 MW-Biomethanol-Produktion von VärmlandsMetanol AB in Schweden mit Holz als Ausgangsstoff) und eine erste kommerzielle Anwendung in den Niederlanden (BioMethanol Chemie Nederland B.V. BioMCN), neu (2019) mit Wasserstoff aus Elektrolyse mit erneuerbarem Strom.

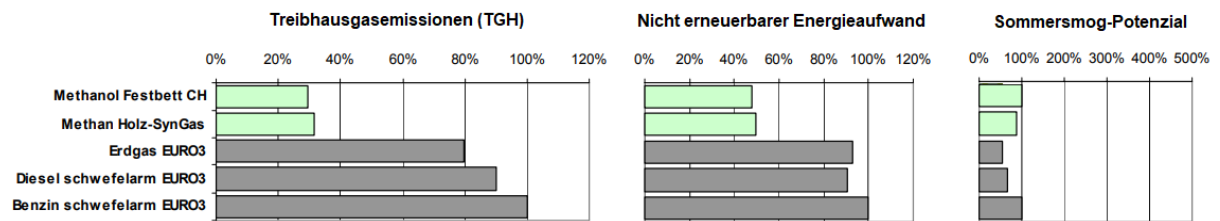


Abbildung 9: Ökologische Gesamtbilanz von Methanol auf Basis von Holz im Vergleich zu Diesel und Benzin gemäss BFE/BAFU 2007.

2.3.4 Solares Methanol

Das für die Gewinnung von Methanol notwendige Synthesegas kann auch mit dem Einsatz von konzentrierter Solarenergie gewonnen werden. An solchen Konzepten arbeiteten die ETH Zürich (vormals auch das Paul Scherrer Institut PSI) und die Schweizer Firma Synhelion. Dabei wird mit thermischer Solarenergie das aus der Luft oder aus einer anderen Quelle stammende CO₂ zusammen mit Wasser in einem thermochemischen Prozess bei hohen Temperaturen (rund 1500 °C) in einer zweistufigen Reaktion in Wasserstoff und Kohlenmonoxid aufgespalten (Synthesegas), was mit konventionellen Prozessen in Methanol- oder Fischer-Tropsch-Treibstoffe weiterverarbeitet werden kann.



Abbildung 10: Konzentrierende Solaranlage in Madrid zur Entwicklung der Produktion von solarem Synthesegas, aus welchen flüssige Treibstoffe wie Kerosin (über Fischer-Tropsch-Synthese) oder Methanol gewonnen werden kann (Bild: ETH Zurich, PREC).

3 «Methanolwirtschaft»

Darunter wird eine hypothetische Gesamtenergieversorgung verstanden, die hauptsächlich auf der Produktion, Verteilung, Speicherung und Anwendung von Methanol als Energieträger beruht. Propagiert wurde das insbesondere in den 1990er-Jahren von George Olah (Chemienobelpreis 1994) in seinem Buch «Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy».

Hauptvorteil im Vergleich zum Einsatz von Wasserstoff («Wasserstoffwirtschaft») wäre die gute Speicherbarkeit als Flüssigkeit und im Vergleich zu Wasserstoff hohe Energiedichte. Allerdings müsste in einer nachhaltigen Methanolwirtschaft zusätzlich zum Wasser- zusätzlich der Kohlenstoffkreislauf geschlossen werden (CO₂-Gewinnung aus der Luft). Ein weiterer Nachteil liegt darin, dass Methanol in der Anwendung (Verbrennung) nicht sehr effizient genutzt wird. Dies zusammen führt zu einem deutlich höheren Energieaufwand im Vergleich zum Einsatz von Wasserstoff, dessen Anwendung im Vergleich zu einer direkten Nutzung von erneuerbarem Strom bereits deutlich energieintensiver ist.

In den Energieperspektiven 2050+ kommt Methanol explizit nicht vor, sehr wohl aber der Einsatz von strombasierten Treibstoffen (Power-to-Liquid), wo Methanol als Zwischenprodukt eine Rolle spielen kann.

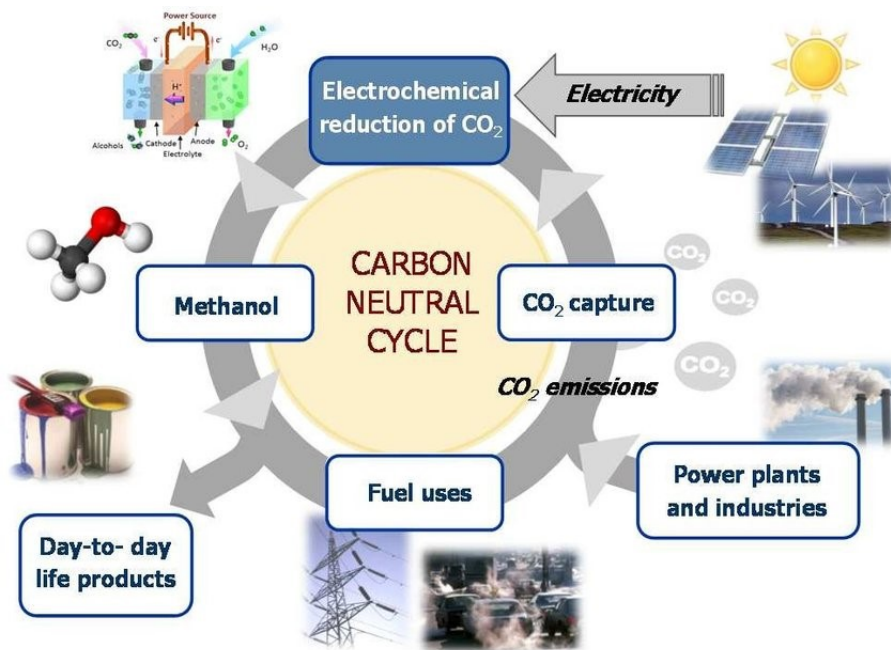


Abbildung 11: Methanolwirtschaft, wie sie von George Olah und anderen («Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy», Wiley-VCH, 2006) propagiert wird.

4 Wirtschaftlichkeit von Methanol als Energieträger

Der Preis für Methanol liegt in Europa bei Euro 0.39/kg, d. h. rund Euro 0.3/Liter. Die Gesteungskosten für «Syngas-to-Fuel» (STF)-Treibstoffen liegt heute deutlich über den Preis für fossiles Benzin (inkl. Steuern). Eine deutsche Studie (Kopernikus: P2X, BFBF 2019) zeigt auf, dass insbesondere bei einem systemdienlichen Betrieb mit 1000 Vollaststunden zur Nutzung erneuerbarer Energie (negative Residuallast), die Kosten um ein Vielfaches höher liegen und dass dabei der Anteil der Methanolsynthese rund ein Drittel ausmacht. Bis 2050 werden grosse Kostenreduktionen für den Bau solcher Anlagen erwartet, wobei dann der eingesetzte Strom zum treibenden Kostenfaktor wird.

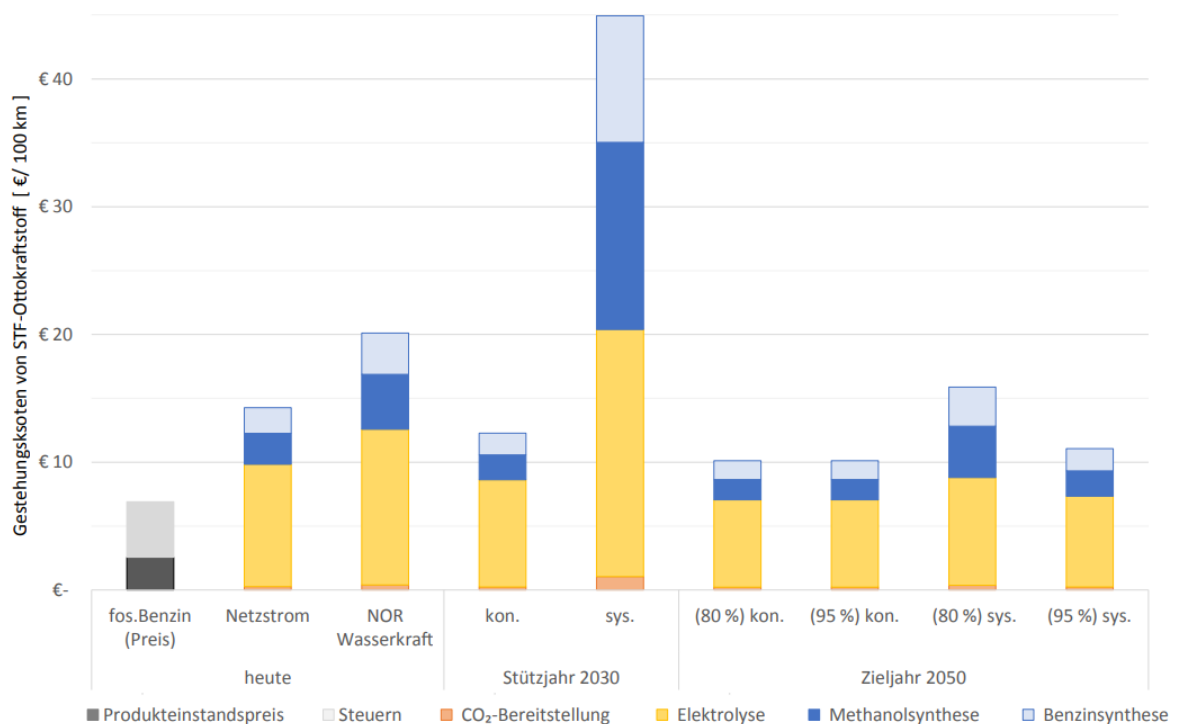


Abbildung 12: Gesteungskosten für «Syngas-to-Fuel»-Treibstoffe im Vergleich zu fossilem Benzin, heute bei Einsatz von verschiedenen Stromarten, bezogen auf das Jahr 2030 für einen kontinuierlichen und einen systemdienlichen (1000 h Vollast) Betrieb und für 2050 in Szenarien mit einem hohen Anteil an Photovoltaik- und Windstrom, aufgegliedert nach systemdienlichen und kontinuierlichem Betrieb (aus der deutschen Kopernikus-Studie «Power-to-X», 2019).

5 Rahmenbedingungen für synthetische und biogene Treibstoffe

5.1 Anrechenbarkeit für die CO₂-Flottenemission beim Einsatz synthetischer Treibstoffe

Im Jahr 2016 und 2017 hatte National- und Ständerat die von Nationalrat Thomas Böhni in 2015 eingereichte Motion 14.3837 «Synthetische, CO₂-neutrale Treibstoffe. Anrechnung bei der CO₂-Flottenemissionsregelung» angenommen¹¹.

5.2 Verlängerung Steuererleichterungen für biogene Treibstoffe bis 2023

Biogene Treibstoffe sind seit 2008 von der Mineralölsteuer befreit, sofern sie ökologischen und sozialen Mindestanforderungen genügen. Diese Befreiung ist im Rahmen des revidierten CO₂-Gesetzes bis Ende 2023 verlängert.¹²

6 Forschungsaktivitäten an Hochschulen und in der Privatwirtschaft

In der Schweiz gibt es verschiedene Akteure aus Hochschulen und aus der Privatwirtschaft, welche sich direkt oder eher indirekt (Power-to-Gas) mit dem Thema Methanol beschäftigen. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden unten verschiedene Akteure aus Hochschulen und aus der Privatwirtschaft aufgeführt.



Abbildung 13: Schweizer Akteure im Bereich Methanol aus Hochschulen und Industrie (ohne Anspruch auf Vollständigkeit).

¹¹ Diesem Anliegen wäre im revidierten CO₂-Gesetz Rechnung getragen worden (Artikel 18 «CO₂-vermindernde Faktoren bei Neuwagenflotten durch den Einsatz von synthetischen Treibstoffen»).

¹² Siehe: <https://www.parlament.ch/centers/documents/de/17-071-bericht-uvek-biogene-treibstoffe-2018-10-08-d.pdf>

6.1 Akteure an Hochschulen

6.1.1 Paul Scherrer Institut PSI, Labor für Katalyse und nachhaltige Chemie (und ETHZ-ICB)

Thema: Direkte Umwandlung von Methan in Methanol ohne Zwischenschritte

Das PSI-Labor für Katalyse und nachhaltige Chemie untersucht in Zusammenarbeit mit der ETH-Gruppe um van Bokhoven (ETHZ-ICB) die direkte Umwandlung von Methan und Wasser (Wasser dient als Sauerstoffquelle) in Methanol (siehe Abbildung 14). Der Prozess ist effizienter im Vergleich zur indirekten Nutzung von Erdgas.

Viel Aufmerksamkeit erhielt eine Science-Publikation in 2017, wo das PSI und die ETH Zürich mit einem solch direkten Prozess mit Kupfer-Zeolith als Katalysatormaterial eine hohe Selektivität (97 %) demonstrieren konnten, d. h. das Methan wird fast vollständig in Methanol umgewandelt und es entsteht nur sehr wenig Wasserstoff (DOI: 2010.1126/science.aam9035). Die Technologie ist noch nicht industriell umgesetzt.

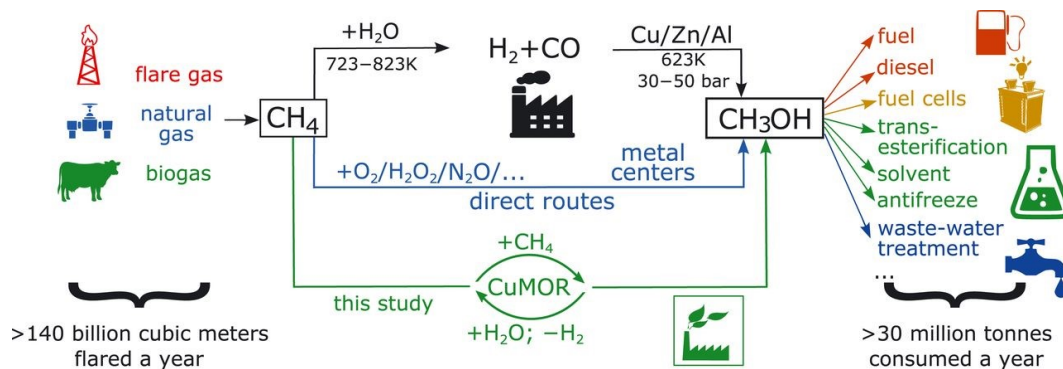


Abbildung 14: Heute wird Methanol aus Methan (CH_4) indirekt über Synthesegas produziert. Am PSI und an der ETH Zürich werden Prozesse untersucht, um Methan direkt umzusetzen (aus: Sushkevich et al., «Selective anaerobic oxidation of methane enables direct synthesis of methanol», SCIENCE Vol. 356, pp. 523-527, 2017).

6.1.2 Paul Scherrer Institut PSI, Labor für Elektrochemie (ELC)

Thema: Direkt-Methanol-Brennstoffzellen (DMFC)

Am Labor für Elektrochemie gab es in der Vergangenheit eine Reihe von Projekten, die sich mit dem Thema Direkt-Methanol-Brennstoffzellen befassen, z. B. «Polymerelektrolyt Brennstoffzellen mit H_2 und Methanol», BFE-Projekt 2000–2006 (<https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=5383>) oder «Protonen-leitende Polymermembranen für Brennstoff- und Elektrolysezellen», BFE-Projekt 2006–2009 (<https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=22635>).

6.1.3 ETH Zürich, Institut für Chemie- und Bioingenieurwissenschaften (ICB)

Thema: Entwicklung effizienter Katalysatoren für Methanolsynthese

An der ETH Zürich wird am Institut für Chemie- und Bioingenieurwissenschaften¹³ an heterogenen Katalysatoren und Reaktorkonzepten für die Methanolsynthese gearbeitet¹⁴. 2019 wurde ein neuer Ansatz mit einem Katalysator auf der Basis von Indiumoxid entwickelt (Nature Communications, 10 3377, 2019), bei dessen Anwendung sehr selektiv Methanol (d. h. praktisch ohne Nebenprodukte) entsteht

¹³ <https://www.ace.ethz.ch>

¹⁴ Die Aktivitäten sind auch in dem NCCR Catalysis (<https://www.nccr-catalysis.ch>)

und der eine hohe Langzeitstabilität zeigt. Die Innovation liegt insbesondere in der Steigerung der Aktivität des Katalysatormaterials durch Anwendung von Nanotechnologie, mit der eine geringe Menge an Palladium im Indiumoxid-Material eingebaut wird. Je grösser die Aktivität des Katalysators, desto geringere Mengen an Material werden gebraucht. Die Arbeiten der ETH Zürich sollen zusammen mit dem Mineralölunternehmen Total in einer Demonstrationsanlage umgesetzt werden.

6.1.4 ETH Zürich, Labor für Anorganische Chemie (LAC)

Thema: Entwicklung effizienter Katalysatoren für die Methanolsynthese

Die Gruppe um Christophe Copéret beschäftigt sich mit der Entwicklung von Katalysatormaterialien auf Basis von Zeolith-Materialien¹⁵ (poröse Aluminiumsilikat-Körner). Diese Arbeiten im Katalysebereich wurden 2018 von Air Liquide ausgezeichnet¹⁶ und es besteht mit dieser Firma eine aktive Projektzusammenarbeit. Die Aktivitäten waren auch Teil des Swiss Competence Center for Heat and Electricity Storage (SCCER HaE, <http://www.sccer-hae.ch>).

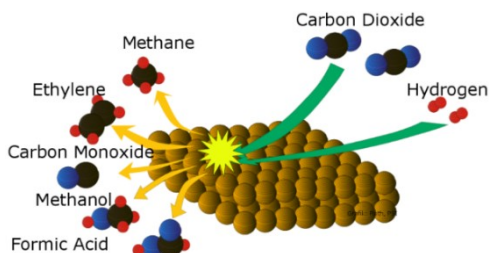


Abbildung 15: Die Entwicklung effizienter Katalysatormaterialien für die katalytische und elektrokatalytische Reduktion von CO₂ zu Synthesegas, Kohlenwasserstoffen oder Methanol ist ein sehr anspruchsvoller Prozess in Bezug auf Katalysatoraktivität und Selektivität. Im Rahmen des SCCER HaE arbeiteten hier verschiedene Arbeitsgruppen der ETH Zürich, des Paul Scherrer Instituts, der EPFL und der Uni Bern eng zusammen.

6.1.5 ETH Zürich, Professorship of Renewable Energy Carriers (PREC)

Thema: Synthesegas aus thermochemischen Prozessen mit konzentrierter Solarenergie

Die Methanolproduktion unter Verwendung von Synthesegas, das aus der solargetriebenen Aufspaltung von CO₂ und H₂O stammt, ist ein interessanter Ansatz zur Produktion von nachhaltigen flüssigen Treibstoffen. In diesem Feld arbeitet die ETH Zürich mit der Gruppe Professorship of Renewable Energy Carriers (PREC, www.prec.ethz.ch). Das Spin-Off-Unternehmen Synhelion ist daran, diese Technologie industriell umzusetzen. Ziel sind die solare Produktion von flüssigen Energieträgern wie Methanol und Fischer-Tropsch-Fuels.

6.1.6 EPF Lausanne, Institute of Chemical Sciences and Engineering (ISIC)

Thema: Methanolsynthese über Formalinsäure (Ameisensäure) und Formamid

Die Gruppe von Paul Dyson (früher ebenfalls Gábor Laurenczy) beschäftigt sich mit der Untersuchung der Hydrierung von Ameisensäure und Formamid zu Methanol und erforscht hierfür Katalysatormaterialien.¹⁷ Im vergangenen Jahr wurde eine Arbeit publiziert, wo ein zyklischer Prozess vorgestellt wurde,

¹⁵ <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscentsci.5b00226>

¹⁶ Christophe Copéret receives the Air Liquide Scientific Prize | ETH Zurich, https://www.airliquide.com/sites/airliquide.com/files/2019/11/29/poster_h2_is_coming_-_coperet.pdf

¹⁷ <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acscatal.6b03194>, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2017/gc/c6gc03359h/unauth#!divAbstract>

bei dem Methanol (MeOH) aus CO₂ über Formamid-Zwischenprodukte entsteht. Die zwei Prozessschritte zeigen eine sehr hohe Selektivität, so dass der Prozess mit hohen Methanolausbeuten abläuft.

6.1.7 Empa, Abteilung Fahrzeugantriebssysteme

Thema: Test von Verbrennungsmotoren mit Dimethylether (DME)

Forschende in der Abteilung für Fahrzeugantriebssysteme der Empa testen den Einsatz von Dimethylether (DME), ein enger Verwandter und Nebenprodukt bei der Herstellung von Methanol, als alternativen Treibstoff für die Anwendung in selbstzündenden Motoren (Diesel). Anwendungsmöglichkeiten liegen insbesondere bei grösseren Dieselmotoren für den Schwerverkehr.

6.1.8 Fachhochschule OST, Institut für Energietechnik (IET)

Thema: Methanolsynthese und Kunststoffsynthese

Am Institut für Energietechnik werden verschiedene Ansätze zur Produktion strombasierter Treibstoffe untersucht. Im Fokus steht Power-to-Gas (Power-to-Methane). Es gibt aber auch Aktivitäten im Bereich der Methanolsynthese mit einer teilautomatisierten Demonstrationsanlage (Synthesereaktor mit einer Kapazität von 120 g Methanol-Wasser Gemisch pro Stunde).

In einem BAFU-Projekt (2018 bis 2019) (<https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=41593>) wurde die Herstellung von nachhaltigen Kunststoffen aus erneuerbaren Rohstoffen erforscht, wo Methanol als Ausgangsstoff in einem Polymerisationskatalysator eingesetzt wird.

6.1.9 Fachhochschule OST, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC)

Thema: Sorptionskatalyse für Methanolsynthese

Am Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik werden in der Gruppe «Advanced Materials & Processes» innovative Materialien, Katalysatoren und Verfahren für die Umwelt- und Energieverfahrenstechnik entwickelt. Die exotherme Adsorption des Produktwassers in sogenannten Sorptionskatalysatoren erhöht die Reaktionsausbeute bei der Methanolsynthese. Diese Sorptionskatalysatoren bestehen aus katalytisch aktiven Kupfer-Partikeln, die in einen Zeolithen eingebaut sind, welcher das Produktwasser temporär adsorbiert.¹⁸

6.1.10 Andere Forschungseinrichtungen

Eine Vielzahl von Forschungseinrichtungen beschäftigt sich mit der Produktion von «grünem» Synthesegas und Komponenten von Synthesegas (Wasserstoff H₂, CO₂, CO), sei es über Elektrolyse (Power-to-Gas) oder aus Biogasproduktion mit CO₂-Abscheidung und anderen Prozessen. Solch erneuerbares Synthesegas kann als Ausgangsbasis für erneuerbares Methanol dienen.

¹⁸ Terreni et al., «Sorption-enhanced methanol synthesis» Energy Technology, 7(4), 1801093 (9 pp.), 2019. <https://doi.org/10.1002/ente.201801093>

6.2 Akteure in der Privatwirtschaft

6.2.1 Proman AG

Thema: Methanolproduzent

Proman, gegründet 1984 als Engineering-Unternehmen für den Bau von grossen Industrieprojekten, hat heute den Hauptsitz in der Schweiz (Wollerau) und ist ein überregionaler, diversifizierter Energieproduzent mit sehr grossen Methanol- und Düngemittelproduktionsanlagen in Trinidad und Tobago, den USA und im Oman.

6.2.2 Casale SA

Thema: Methanolsyntheseanlagen

Die Casale Gruppe (<https://www.casale.ch>) mit Sitz in Lugano ist ein führendes Unternehmen zur Modernisierung von Düngemittelanlagen (Ammoniakproduktion) und für Methanol-Produktionsanlagen. Casale bietet Anlagen auf der Basis von Erdgas mit einer Kapazität von bis zu 7000 Tonnen pro Tag an. Herzstück der Casale-Technologie ist ein sogenannter «Isothermal Methanol Converter», wo in einem einzelnen Reaktor eine sehr grosse Methanolkapazität erreicht wird. Casale SA arbeitet mit Schweizer Hochschulpartnern (ETH Zürich, PSI) zusammen, meistens im Rahmen von Innosuisse-Projekten. Dabei geht es um die CO₂-Rückgewinnung oder um die Synthesegasproduktion über partielle Oxidation.



Abbildung 16: Methanolanlage von Casale in Russland mit einer Kapazität von 1650 Tonnen pro Tag (Quelle: Casale SA).

6.2.3 Clariant AG

Thema: Katalysatormaterialien für Methanolsynthese

Der Schweizer Konzern Clariant AG, der in der Sparte Spezialchemie aktiv ist, entwickelt und betreibt Katalysatormaterial für die Methanolproduktion unter dem Markennamen MegaMax. Das neu eingeführte Produkt MegaMax 800¹⁹ soll als Katalysator eine um 40 % höhere Produktivität aufweisen im Vergleich zu früheren Generationen. Im Jahr 2019 hatte das Unternehmen China Energy Corporation Ningxia Coal Industry, der grösste Kohle-zu-Chemikalien-Verarbeiter in China, eine Methanolproduktionsanlage mit einer Jahreskapazität von einer Million Tonnen in Betrieb genommen, wo dieser Katalysator zum Einsatz kommt.

6.2.4 LEWA NIKKISO Pumpen AG

Thema: Membrandosier- und Prozesspumpen speziell für Methanolanwendungen

LEWA ist ein weltweit aktiver Hersteller von Membrandosierpumpen, Prozesspumpen sowie kompletten Dosiersystemen und -anlagen mit Hauptsitz in Deutschland. Methanol kommt in der Öl- und Gas-Industrie für die Trocknung und Enteisung zum Einsatz, wozu LEWA spezielle Pumpen und Anlagen für die Methanol-Einspritzung liefert.²⁰

6.2.5 Brechbühler AG

Thema: Gas-Chromatographie (zur Bestimmung des Methanolgehalts in reinem Biodiesel)

Die Überwachung von Restmethanol in reinem Biodiesel (B100) ist für einen sicheren Einsatz von hoher Relevanz, da bereits geringe Mengen an Methanol den Flammpunkt des Biodiesels herabsetzen können. Zudem können Restmengen an Methanol Pumpen, Dichtungen und Elastomere angreifen. Die Firma Brechbühler liefert entsprechendes Analyseequipment (Gas-Chromatographen), das empfindlich genug ist, um geringste Methanolspuren zu detektieren und so die entsprechenden Normen für Biodiesel erfüllen zu können.

6.2.6 Methanology AG

Das 2020 gegründete Start-Up Methanology AG (<https://www.methanology.com>) hat die in Deutschland entwickelte Technologie des Rostocker Start-up-Unternehmens Gensoric (inzwischen insolvent) übernommen. Herzstück ist ein Bioreaktor mit Elektroden, die mit speziellen Enzymen beschichtet sind. Diese Enzyme werden beheizt und produzieren bei der Zufuhr von CO₂ und Wasser Alkohol in Form von Methanol. Methanology möchte die Technologie für Landwirtschaftsbetriebe und Abwasserreinigungsanlagen anbieten, wo das heute überwiegend ungenutzte CO₂ dem Prozess zugeführt werden kann. Für die Beheizung des Bioreaktors soll erneuerbarer Strom zum Einsatz kommen.

6.2.7 Swiss Liquid Future AG (Silicon Fire AG)

Thema: Modulare, kleine Methanolproduktionseinheiten (bisher nur Pilot)

Seit 2005 existiert die private Aktivität Swiss Liquid Future AG (<https://www.swiss-liquid-future.ch/>), vormals Silicon Fire AG (<http://www.silicon-fire.com/>), die sich mit der Methanolsynthese beschäftigt. 2010 wurde in Zusammenarbeit mit der TU München ein Pilotreaktor (Niederdrucksynthese: Prozesstemperatur: 250 °C, Prozessdruck: 80 bar) mit einer Kapazität von 40 kg Methanol pro Tag entwickelt. Nach eigenen Angabe wurde ein modulares Containerkonzept entwickelt, welches einen Elektrolyseur für die Wasserstoffproduktion und eine Methanolsyntheseeinheit enthält. Die Absicht war/ist, solche Einheiten an geeigneten Standorten mit erneuerbarer Energieerzeugung (z. B. Windparks) aufzustellen, wo auch eine CO₂-Quelle verfügbar wäre.

Um 2010 wurde eine Pilotanlage im St. Gallischen Altenrhein realisiert. Ebenso gab es damals Aktivitäten für die Anwendung von Methanol in Verbrennungsmotoren für Sportboote auf dem Vierwaldstättersee, dies in Zusammenarbeit mit dem Bootsbauer Feller Yachting (<https://www.felleryachting.de/>, bietet seine Boote inzwischen mit Elektroantrieb an). Weiter gab es das Methanol-Boot-Projekt Code-X (<http://www.code-x.ch>). In 2010 wurde eine Zusammenarbeit mit dem australischen Luxus-Yacht-Hersteller Cresta Motor Yachts Limited für den Einsatz von Methanol in Yachten angekündigt. Zu diesen Aktivitäten gibt es keine aktuellen Informationen.

²⁰ <https://www.lewa.com/en/applications/methanol-injection>

Die deutsche Thyssen Krupp AG bietet die modulare Methanolproduktion von Swiss Liquid Future auf ihrer Webseite an.²¹ 2016 gab es eine gemeinsame Pressemitteilung von BKW und Swiss Liquid Future, wo industrielle Power-to-Liquid-Anlagen in der Schweiz angekündigt wurden, um mit Hilfe von Strom aus erneuerbarer Quellen Methanol zu produzieren (Power-to-Liquid).²²



Abbildung 17: Links: Pilotanlage zur Methanolproduktion von Silicon Fire (Swiss Liquid Futures) in Altenrhein, um 2010. Rechts: Sportboot mit Methanolantrieb auf dem Vierwaldstättersee des Herstellers Feller Yachting (Quelle: Swiss Liquid Futures/Silicon Fire).

6.2.8 Winterthur Gas & Diesel (WinGD)

Thema: flexibles Einspritzsystem für die Anwendung von Methanol in Schiffsdieselmotoren

WinGD hat ein flexibles Einspritzsystem entwickelt, mit dem alternative flüssige Kraftstoffe untersucht werden können, welche die Emissionen in der Schifffahrt reduzieren würden. Das System hilft Konstrukteuren von grossen Zweitaktmotoren, neue Einspritzkonzepte zu entwickeln, die es ermöglichen, saubere Flüssigkraftstoffe wie Methanol zu verbrennen, die aus Biomasse oder erneuerbarem Strom (e-Fuels) hergestellt werden. Diese Entwicklungsarbeiten sind auch im Rahmen von EU-Projekten erfolgt (HERCULES und HERCULES2, <http://www.hercules-2.com>).

6.2.9 Silent-Power AG

Thema: Anwendung von Methanol zur Stromproduktion (über Thermo-Photovoltaik)

In Cham (Kt. Zug) existiert die Firma Silent-Power AG, welche sich mit der Anwendung von Methanol in verschiedenen mobilen und stationären Anwendungen beschäftigt. Der Einsatz von Methanol soll hier insbesondere über thermo-photovoltaische Wandler erfolgen, um Strom zu erzeugen.²³

Bei der Thermophotovoltaik wird thermische Energie direkt in elektrische Energie umgewandelt. Systeme bestehen aus einem Emitter und einer Photozelle, wo die Strahlungsenergie in Strom umgewan-

²¹ <https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/de/produkte-und-services/chemische-anlagen-und-prozesse/methanol-anlagen/kleine-methanolanlagen>

²² <https://www.ee-news.ch/de/article/34727/bkw-will-nachhaltigen-treibstoff-herstellen>

²³ <https://silent-power.com/wp-content/uploads/2020/07/HK-Gebaeudetechnik-89-2019-Info-S6-7-Silent-Power-TPL-Zelle-Generator-500W-AWa-99.pdf>

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.067>, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.12.047>

B.Bitnar et al., BFE-Projekt «Entwicklung von low band gap PV Zellen / Thermophotovoltaik TPV», Schlussbericht (BFE, 2003)

delt wird. Im Unterschied zur Photovoltaik wird die Strahlungsenergie nicht von der Sonne erzeugt, sondern von einem Material (Emitter) mit hoher Temperatur. Theoretisch ist der Wirkungsgrad nur durch den Carnot-Wirkungsgrad η begrenzt:

$$\eta = 1 - T_{\text{Photozelle}}/T_{\text{Emitter}}$$

Bei einer Emitter-Temperatur von 1500 Grad Kelvin und einer Photozelle bei Raumtemperatur (300 Kelvin) ist theoretisch ein Wirkungsgrad von 80 % möglich, deutlich höher als typische Wirkungsgrade von Solarzellen (20 %).

In der Vergangenheit (2003) hat das BFE Forschungsarbeiten am Paul Scherrer Institut PSI im Bereich Thermophotovoltaik (TPV) unterstützt, wo ein Emitter auf Basis von Yb_2O_3 -Gewebe entwickelt wurde, dessen Strahlungsspektrum auf die Bandlücke von Standard Si-Zellen angepasst wurde. In diesem Rahmen wurde ein kleines (164 W) TPV-System mit einem Gesamtwirkungsgrad von 2,4 % demonstriert (BFE-Projekt DIS 22819/68060, 2003).

In der wissenschaftlichen Literatur wurden TPV-Wandler mit höheren Wirkungsgraden aufgezeigt, wo die photonischen Eigenschaften des Emitters durch Nanostrukturierung gezielt beeinflusst wurden (photonische Kristalle)²⁴.

²⁴ Walker R. Chan «Toward high-energy-density, high-efficiency, and moderate-temperature chip-scale thermophotovoltaics», PNAS (2013) <https://doi.org/10.1073/pnas.1301004110>

7 Zusammenfassung

Methanol ist eine wichtige Grundchemikalie, der auch im Energiesektor eine Bedeutung zukommt, als Speicher und insbesondere als alternativer Treibstoff.

Erneuerbares Methanol kann einen Beitrag leisten, um die CO₂-Emissionen der Petrochemie zu verringern. Beim Einsatz als Energieträger ist zu berücksichtigen, dass die Herstellung von synthetischem Methanol mit einem relativ hohen Energieaufwand verbunden ist. Flüssige Treibstoffe wie Methanol oder Fischer-Tropsch-Fuels sind vor allem in solchen Anwendungen von Bedeutung, wo eine hohe Energiedichte unabdingbar ist (zum Beispiel in der Luftfahrt)

In der Schweiz gibt es verschiedenste Forschungslabors an Hochschulen, die sich im Bereich der anwendungsorientierten Grundlagenforschung mit Katalyse beschäftigen. Daneben gibt es ein paar sehr grosse Akteure, die im globalen Markt für Methanolanwendungen stark verankert sind.

Allgemein ist der ökologische Nutzen von Power-to-X-Treibstoffen, wozu auch erneuerbares Methanol gehört, in der Literatur teilweise umstritten. Wie bei allen Power-to-X-Technologien hängt ein «positiver» Klimanutzen stark davon ab, wie stark CO₂-belastet der eingesetzte Strom ist, welche CO₂-Quellen genutzt werden und ob der Einsatz von Power-to-X allenfalls zusammen mit negativen Emissionstechnologien erfolgt.

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern

www.energieforschung.ch