

UMWELTMEDIZIN

Mit grünem Methanol Milliarden Tonnen CO₂-Emissionen vermeiden

Michael Trapp, Nonnenhorn am Bodensee

Vorbemerkung von Thomas Lob-Corzilius: Michael Trapp beschäftigt sich aus der Sicht des Ingenieurs und Biochemikers seit vielen Jahren mit den Dimensionen technologischer sowie natürlicher Möglichkeiten, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und CO₂ aus der Atmosphäre zurückzuholen. Dazu hat er in der Pädiatrischen Allergologie bereits drei Artikel publiziert, in denen er die Optionen beschreibt, CO₂ zeitlich befristet, aber vor allem dauerhaft zu binden: [↗ Artikel 1](#), [↗ Artikel 2](#), [↗ Artikel 3](#)

In diesem Beitrag behandelt er das grüne Methanol als eine bedeutende Schlüsseltechnologie, die in der gesamten Wertschöpfungskette klimaneutral ist und CO₂ im Kreislauf bewegt.

Anmerkung des Autors: Aus der Vielzahl der Forschungs- und Entwicklungsprojekte, Unternehmen und staatlichen Unterstützungen, die grünes Methanol als Transformationsbaustein fördern, können in diesem Review nur einige Beispiele erwähnt werden.

Klimawandel zwingt zu mehr Tempo bei der Transformation

Der Wandel der Erdsysteme und die damit verbundenen klimatischen Veränderungen vollziehen sich mit zunehmender Geschwindigkeit, was die jüngsten meteorologischen Extremereignisse, die wachsenden Eisverluste, der Anstieg der globalen Oberflächentemperatur und der Treibhausgaskonzentrationen indizieren. Wir brauchen Quantensprünge im Transformationsprozess zur Klimaneutralität, bevor Anpassungs-, Schadensbehebungs- und Transformationskosten die Staatshaushalte überfordern oder sogar ein ökologischer Kipppunkt erreicht wird [z.B. 30, 42]. Technologien zur Beschleunigung des Transformationsprozesses

stehen zur Verfügung. Investitionsrisiken, fehlende großtechnische Erfahrungen, zu wenig „Grüner Strom“ u.a.m. hemmen aber die kurzfristige Nutzung entsprechender Technologien. Mehr fachliche Aufklärung und spezifische Subventionen könnten helfen, entsprechende Technologien oder klimaneutrale Schlüsseltechnologien trotz wirtschaftlicher Risiken kurzfristig am Markt zu aktivieren und die systemischen Veränderungen im Erdsystem zu reduzieren.

Klimaneutrale Schlüsseltechnologie: Grünes Methanol

Als klimaneutrale Schlüsseltechnologien können solche Technologien definiert werden, die während ihrer Nutzung in der gesamten Wertschöpfungskette kompatibel mit ökologischen Stoffkreisläufen sind oder CO₂ im Kreislauf bewegen. Grünes Methanol entspricht diesen Bedingungen, denn es wird aus Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) hergestellt und bei seiner Verbrennung entsteht wieder CO₂ und H₂O. Zunächst wird mit regenerativem Strom das CO₂ aus der Luft oder aus Abgasen von Betonwerken oder Müllverbrennungsanla-

gen gefiltert und aus Wasser elektrolytisch Wasserstoff gewonnen. Mittels chemisch-physikalischer oder biochemisch-biologischer Katalysatoren werden dann beide Gase in Methanol umgewandelt (vereinfacht $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$).

| Abkürzungen | |
|-------------------------|--|
| Gt | 1 Gigatonne = 1 Milliarde Tonnen |
| Mt | Millionen Tonnen |
| THG | Treibhausgase (Kohlendioxid, Methan, Lachgas, halogenierte Kohlenwasserstoffe, Schwefelhexafluorid, u.a.) |
| CCU | Carbon Capture and Utilization = CO ₂ -Abscheidung und anschließende Nutzung von Kohlenstoff |
| CH₃OH | Methanol |
| CO₂ | Kohlendioxid |
| CO₂e | CO ₂ -Äquivalente = Maßeinheit zur Vereinheitlichung der Klimawirkung unterschiedlicher Treibhausgase |
| H₂ | Wasserstoff |

Mit grünem Methanol könnte es möglich sein, die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) um Milliarden Tonnen zu reduzieren (2023 wurden global ca. 37 Gt CO₂ bzw. 57 Gt CO₂e emittiert). CO₂ wird somit recycelt und ist folglich ein quasi „unendlich“ verfügbarer Rohstoff, der keinen Bergbau und auch keine weiten Transportwege, Raffinerien, Verhüttungsprozesse und anderes mehr benötigt. Zahlreiche Produktions- und Anwendungstechnologien stehen für die Energie- und Materialwirtschaft bereits zur Verfügung oder befinden sich in der Entwicklung – einschließlich solcher, die nach neuen Anwendungsmöglichkeiten suchen (Methanol-to-X-Routen). Die große Herausforderung ist der Aufbau einer deutlich höheren Produktionskapazität von Methanol und ein massiver Ausbau regenerativer Stromproduktion sowie die Weiterentwicklung der CO₂-Gewinnung. Das Filtern aus der Luft ist energetisch aufwendig (0,042 Volumenprozent CO₂), es aus Meerwasser herauszufiltern

Tabelle 1. Schätzungen zur weltweiten THG-Emissionen nach Sektor
(57 Gt CO₂-Äquivalente in 2023; +1,3% im Vergleich zu 2022)

| Sektor | Anteil |
|--|--------|
| Stromerzeugung | 26% |
| Industrie | 11% |
| Transport | 15% |
| Gebäude | 6% |
| Treibstoffherzeugung | 10% |
| Industrieprozesse | 9% |
| Abfallwirtschaft & sonstiges | 4% |
| Land-/Forstwirtschaft & Flächennutzung | 18% |

Rot: Energiebedingte Emissionen;
Blau: Prozessbedingte Emissionen;

[39]

scheint energie günstiger zu sein [19]. Bisher wird das CO₂ primär aus Biomasseabfällen gewonnen. Biomasse allein wird das erforderliche Volumen jedoch nicht zur Verfügung stellen können, zudem könnte Biomasse in der Materialwirtschaft als wertvoller Ausgangsstoff nachgefragt werden [6, 12]. Ein Start-Up aus Mannheim hat ein sich selbst regenerierendes Hybridsystem entwickelt, das effizient CO₂ aus dem Gasgemisch eines Klärwerks extrahiert [16]. Andere Verfahren könnten künftig das in geologischen Formationen gespeicherte CO₂ nutzen [vgl. 37].

Methanol ist Rohstoff und Energieträger

Methanol, der kleinste aller Alkohole, ist bereits heute Ausgangsstoff für eine Vielzahl von Gütern und Prozessen: Er kann für die Treibstoffherzeugung, Energieversorgung von Gebäuden oder als Energiespeicher genutzt werden. Grünes Methanol kann fossile Energieträger in vielen Bereichen ersetzen; selbst der Sektor Abfallwirtschaft wäre entlastet, denn die aus grünem Methanol erzeugten Produkte wären in die Stoffkreisläufe integriert.

Eine Energiebilanz zur Herstellung von Millionen Tonnen grünem Methanol, inkl. der Gewinnung von CO₂ aus der Luft, liegt noch nicht vor. Schätzungen zufolge hätte grünes Methanol, in allen relevanten Sektoren optimal eingesetzt, ein Reduktionspotenzial von circa 18 Gt der globalen CO₂-Emissionen (Tab. 1). Weitere Investitionen in die zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die versuchen grünes Methanol kosten- und energie günstiger zu produzieren, würden die Wettbewerbsfähigkeit dieses Rohstoffs und Energieträgers steigern [3, 13, 20, 31, 35]. Mit verfahrenstechnischen Optimierungen und der Suche nach wei-

teren Anwendungen könnte das Reduktionspotenzial der CO₂-Emissionen noch größer ausfallen.

Methanol gehört gegenwärtig (2023) mit einem Produktionsvolumen von ca. 170 Mt [33] bzw. ca. 32 Milliarden US-Dollar pro Jahr [34] zu den meistproduzierten organischen Chemikalien. Für 2050 wird das Marktvolumen von erneuerbarem Methanol auf fast 400 Mt geschätzt [17, 29]. Noch wird es überwiegend mit Kohle und Erdgas erzeugt [15]. Seit 1987 gibt es einen globalen Handelsverband [36], der auf seiner Website umfangreiche Daten bietet. Vergleicht man grünes Methanol mit anorganischen Chemikalien, wie z.B. Ammoniak, oder mit Oxymethylenether, die ebenfalls der Energie- und Materialwirtschaft dienen, sollten die Energie- und Emissionsbilanzen gegenübergestellt werden.

Wann ist Klimaneutralität erreicht?

Klimaneutralität ist erreicht, wenn die emittierten THG die Stoffkreisläufe auf der Erde nicht stören oder die THG-Emissionen (Lebenszyklusemissionen) in allen Schritten eines Verfahrens oder Produktlebens (Cradle-to-Grave¹) vermieden oder entsorgt werden oder Kreisläufe geschlossen werden, also nur so viel CO₂ für die Herstellung benötigt wird, wie später aus dem Schornstein kommt.

¹ Cradle-to-Grave ist eine Lebenszyklusanalyse und bezieht sich auf die Umweltauswirkungen eines Produkts von der Rohstoffgewinnung (cradle) bis zur Entsorgung am Ende des Produktlebenszyklus (grave). Die Heliatek GmbH definiert Klimaneutralität wie folgt: Erstens: Carbon Payback Time (CPBT) ist die Zeit, die ein Produkt benötigt, die während seines Lebenszyklus freigesetzten THG-Emissionen durch deren Vermeidung zurückzuzahlen. Zweitens: Energy Payback Time (EPBT) gibt den Zeitraum an, die ein Produkt benötigt, um den Primärenergiebedarf über den Lebenszyklus durch Stromerzeugung „zurückzuzahlen“.

Grünes Methanol in der Materialwirtschaft

2022 wurden etwa drei Viertel des weltweit erzeugten Methanols stofflich genutzt [1]. Der größte Anteil des derzeit produzierten Methanols wird in der Industrie z.B. für die Herstellung von Gefrierschutz-, Reinigungs-, Lösungs-, Verdünnungsmitteln und anderem mehr verwendet. Genutzt wird Methanol auch für die Herstellung von Basischemikalien wie Essigsäure, Formaldehyd, Ethansäure, Methylamid als Ausgangsstoff für Medikamente, Textilien, Verpackungsmaterial, Klebstoffe, Windeln, Farbstoffe, Lacke, Harze etc.

Grünes Methanol in der Mobilität

Methanol kann als Treibstoff für Pkw, Lkw, Schiffe und auch für Flugzeuge eingesetzt werden. Es ist, für eine Übergangsphase, prinzipiell mit Diesel und Kerosin mischbar, kann in vorhandenen Tanks gespeichert und Leitungen transportiert werden und ist ohne größere Umbauten kompatibel mit der heutigen Betankungsinfrastruktur. THG-Emissionen, die mit Anpassung des weltweiten Treibstoffversorgungsnetzes verbunden sind, können so vermieden werden. Im Vergleich zu Elektro-Fahrzeugen sind Batterien nicht erforderlich, lange Aufladezeiten und ein höheres Gesamtgewicht des Fahrzeugs werden somit vermieden und Reichweiten sind mit Benzin oder Diesel vergleichbar.

Methanol im Straßenverkehr

Motorenhersteller öffnen sich zunehmend für Methanol als Treibstoff [23, 26]. Während bei Methanol-Verbrennern der Alkohol wie Benzin im Kolben des Motors direkt verwendet wird, wird in der Methanol-Brennstoffzelle aus Methanol Strom gewonnen und Elektromotoren werden ohne Batterien angetrieben. In einer Brennstoff-

zelle wird Methanol mit Sauerstoff zu Wasser und Kohlendioxid oxidiert und mittels Kathode/Anode die freigesetzte Energie genutzt. Methanol-Brennstoffzellensysteme gibt es in zwei Funktionsweisen:

- die Direktmethanol-Brennstoffzellen (DMFC), die Methanol direkt in Wasser und Kohlendioxid umwandeln und die
- indirekten Methanol-Brennstoffzellen (RMFC), die aus Methanol zuerst Wasserstoff extrahieren und diesen dann zur Stromerzeugung nutzen.

Vor- und Nachteile im Vergleich der Nutzungsarten sind komplex, Reinheitsgrad, Wirkungsgrad, Motoraufbau oder Betriebstemperatur bestimmen den Energieverbrauch und damit die Emissionsrate (vgl. Sigens GmbH München [32]).

Mit Methanol als Wasserstoffträger entfallen die THG-Emissionen, die mit den Batterielebenszyklen verbunden sind, sowie das Gewicht von Batterien, das besonders im Lastverkehr den Verbrauch erhöht.

Methanol in der Schifffahrt

Erste Schiffe wurden bereits mit Methanol-Motoren und solchen, die leicht auf Methanol umgerüstet werden können, ausgerüstet. Die Reederei Maersk [22] hat über 25 mit Methanol betriebene Schiffe bestellt. Auch TUI Cruises hat mit dem Hamburger Energieunternehmen Mabanft [38] begonnen, die Flotte auf Methanol-Motoren umzustellen. Andere nutzen einen Mix aus Methanol und Schiffsdiesel oder die Brennstoffzellentechnologie für eine klimaneutrale Schifffahrt [7]. Die UN-Schifffahrtsorganisation will Klimaschutzvorgaben beschließen, um die Schifffahrt mit grünem Methanol auf klimaneutralen Kurs zu bringen [14]. Den Vorreitern steht aber nicht ausreichend grünes Methanol zur Verfügung, denn nur wenige Unternehmen sind bisher auf Massenproduktionen ausgerichtet (vgl. unten: Grünes Methanol als Wirtschaftsmotor).

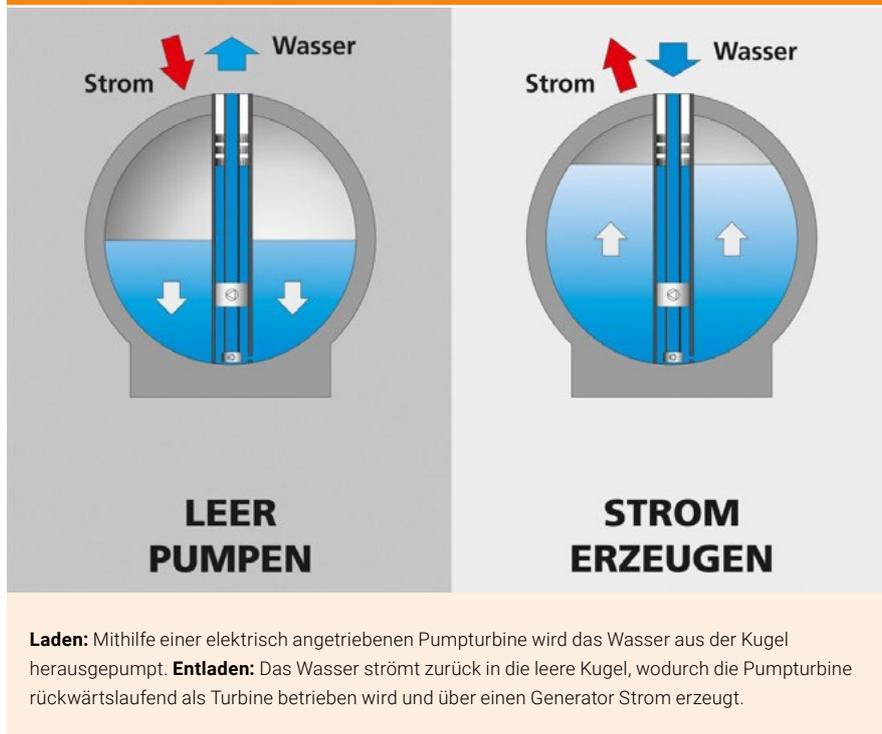
Methanol im Flugbetrieb

Im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt werden in Kooperation mit Industrieunternehmen Treibstoffvarianten für synthetisches Kerosin auf Basis von Methanol erprobt [8]. Entwickelt werden sowohl Mischungen (sogenannte Drop-in-Treibstoffe) aus Methanol und fossilbasiertem Kerosin, die für alle Flugzeugtypen einsetzbar sind und keinen Umbau der Infrastruktur erfordern, als auch synthetische Treibstoffe ohne Zusatz fossilbasierter Treibstoffs (Non-Drop-in-Treibstoffe), die Umbauten am Triebwerk erfordern. Die CAC ENGINEERING GMBH [4] arbeitet mit Unternehmen aus Forschung und Industrie an einem Syntheseprozess, um aus grünem Methanol über Olefine als Zwischenprodukt synthetisches Kerosin zu entwickeln. Eine Demonstrationsanlage ist in Heide in Schleswig-Holstein geplant.

Dezentral energieautark mit grünem Methanol

Mit Methanol können Privathaushalte und Gewerbe energieautark versorgt werden. Das schließt Warmwasser, Heizung, die Treibstoffbereitstellung und Energiespeicherung ein. Mit Solarkollektoren am Haus oder auf dem Grundstück wird Strom erzeugt, der mit Methanol-Reaktoren den Alkohol produziert. Mithilfe eines Methanol-Brenners wird dann warmes Wasser erzeugt und die Heizung betrieben. Eine Studie ergab, dass Methanol-Heizungen und Luftwärmepumpen vergleichbare jährliche Kostenwerte aufweisen [21]. Die METHANOLOGY AG [24] arbeitet an Reaktoren, die mit aktuell 10 l grünem Methanol pro Tag Einfamilienhäuser mit Energie versorgen können. Das Karlsruher Institut für Technologie arbeitet mit Partnern an einer Pilotanlage, die etwa 50 l Methanol pro Tag wirtschaftlich wettbewerbsfähig produzieren soll [18]. Die EU unterstützt die Entwicklung einer dezentralen Methanol-Versorgung [40].

Abbildung 1. Betonkugeln als Energiespeicher



Laden: Mithilfe einer elektrisch angetriebenen Pumperturbine wird das Wasser aus der Kugel herausgepumpt. **Entladen:** Das Wasser strömt zurück in die leere Kugel, wodurch die Pumperturbine rückwärtslaufend als Turbine betrieben wird und über einen Generator Strom erzeugt.

© Fraunhofer IEE [10]

Ließe sich diese Technik breit realisieren, könnten viele Fernwärmenetze, Gasanschlüsse, Heizöltransporte oder Einspeisung in das Netz entfallen. Mit größeren Methanol-Reaktoren könnten so auch Mehrfamilienhäuser oder Betriebe energieautark und klimaneutral energetisch versorgt werden.

Grünes Methanol als Energiespeicher?

Sonnenstunden und starke Winde werden mit dem Klimawandel wahrscheinlich zunehmen. Wie könnte dann der regenerativ im Überschuss erzeugte Strom gespeichert werden? Es gibt verschiedene Optionen. Das Versenken von Betonkugeln [11] (Abb. 1), die den Druck in tiefem Wasser nutzen, um Energie in einer hohlen Betonkugeln zu speichern, scheint eine attraktive Speicheroption zu sein. Wasserstoffspeicher sind kostenintensiv und mit Risiken verbunden,

Vorteile bieten geologische Speicher, wie Salz- oder Felskavernen [41]. Pumpspeicherkraftwerke, die Wasser zurück auf die Berge pumpen, haben ihr Limit besonders dann, wenn regenarme Phasen künftig zunehmen.

Von allen Optionen der Energiespeicherung könnte Methanol eine führende Rolle einnehmen, denn die Umwandlung von überschüssigem Strom in Methanol bietet für die Stromspeicherung Vorteile mit Alleinstellungsanspruch. Methanol kann zentral oder dezentral gespeichert und in gewöhnlichen, verfügbaren Erdöltanks, Erdgastanks über lange Zeiträume sicher gelagert werden. Die Speicherkosten sind gering [25] und es steht ein universaler Rohstoff für die Energie- und Materialwirtschaft zur Verfügung (Speicherung mit hoher Wertschöpfung). Diese Speicheroption dürfte sicherlich auch Einfluss auf die Stromkosten und künftige Netzstruktur haben.

Grünes Methanol als Wirtschaftsmotor

In einem Interview betonte Ottmar Edenhofer, Direktor am Potsdamer Institut Klimafolgenforschung, die Bedeutung von fossilfrei produzierten Produkten, um international wettbewerbsfähig zu bleiben [27]. Grünes Methanol bietet zahlreiche Wettbewerbsvorteile:

- Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern,
- die Option dezentraler Produktion,
- minimierte sog. Gesteungskosten durch einfache Rohstoffverfügbarkeit sowie
- minimierte Investitionen in Infrastrukturanpassungen.

Grünes Methanol könnte auch die mit neuen Klimaschutzprogrammen verbundenen Kosten reduzieren. Der gesamte Methanol-Markt soll bis 2050 auf ca. 500 Mt wachsen, mit einem durchschnittlichen jährlichen Umsatzwachstum von 5,7% (Prognosezeitraums 2025–2033) [34]. Um alle auch künftigen Bedarfsfelder zu decken, muss die Erzeugung aber deutlich stärker wachsen.

Dafür gibt es vielversprechende Ansätze:

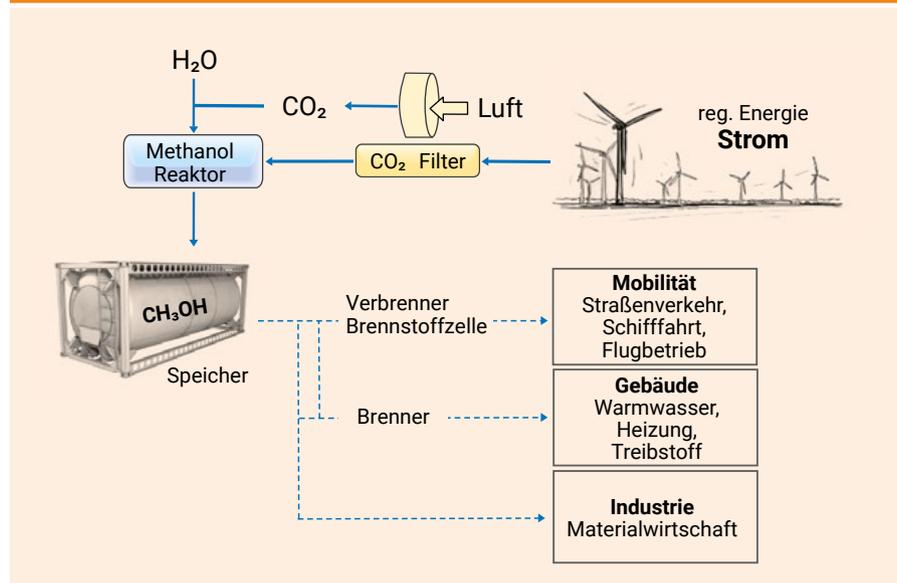
- Carbon Recycling International [5] auf Island plant seine Jahresproduktion von grünem Methanol von gegenwärtig 300.000 t auf 400 Mt in 2050 zu steigern. Energie gibt es auf Island mit „heißem Wasser“ reichlich.
- Die Obrist Group [28] plant in der Wüste grünes Methanol mit großen Solarparks zu produzieren. Angestrebt ist zunächst eine Jahresproduktion von ca. 4 Mt. Da als Nebenprodukt reiner Kohlenstoff anfällt, arbeitet diese Anlagen sogar CO₂-negativ. Kohlenstoff wird u.a. für die Farben- oder Kunststoffproduktion gebraucht, was die Wirtschaftlichkeit der Anlage steigert.

- I Das Berliner Climate-Tech-Start-up C1 hat das Ziel, mit Kooperationspartnern die Produktion von Grünem Methanol für die Schiff- und Luftfahrt marktreif und skalierbar zu entwickeln in der der eingesetzte Kohlenstoff in einem kontinuierlichen Kreislauf genutzt werden kann [2, 13].
- I Die East Energy GmbH [9] ermöglicht Gemeinden und Unternehmen die Produktion von grünem Methanol vor Ort. Ziel ist es auch, durch klimaneutrale Energieprojekte die lokale Wirtschaft zu stärken und individuelle Beteiligungen zu ermöglichen.

Persönliches Fazit des Autors

Grünes Methanol ist einer der bedeutendsten Transformationsbausteine auf dem Weg zur Klimaneutralität. Es kann in der Material- und Energiewirtschaft multipel eingesetzt werden, ist eingebunden in globale Stoffkreisläufe, ist biologisch abbaubar, wasserlöslich, bietet unendliche Rohstoffverfügbarkeit und ist verbunden mit einfacher Logistik. Für den Aufbau einer Methanolwirtschaft ist allerdings ein massiver Ausbau der Produktion von grünem Strom erforderlich (Abb. 2).

Abbildung 2. Grünes Methanol und grüner Strom



© M. Trapp

Die weltweite Nutzung könnte die THG-Emissionen (CO₂e) wahrscheinlich um einige Gt pro Jahr reduzieren und wäre gleichzeitig ein Beitrag zur wirtschaftlichen Unabhängigkeit. Die Nutzung dieses und ähnlicher Transformationsbausteine würden dazu beitragen, die Risiken erdsystemischer Veränderungen auf unserem Planeten zu verlangsamen. Die Nutzung muss jedoch schnell erfolgen – trotz der kritischen Situation, in der sich

die Weltgemeinschaft zurzeit befindet. Wir sind verantwortlich für die Zukunft unserer Kinder.

Dr. Ing. Michael Trapp

Freier Autor
Nonnenhorn am Bodensee

Literatur

- 1 Bakman M, Gagelmann J, Hörnschemeyer M et al. IMPULSPAPIER Erneuerbares Methanol. Grüne Basischemikalie und Importvektor für klimaneutralen Wasserstoff und Kohlenstoff mit erheblichem Potenzial. Stand Juli 2024. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, Deutschland. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2024/IMPULSPAPIER_Erneuerbares_Methanol.pdf
- 2 C1 Green Chemicals AG, Berlin. Grünes Methanol für eine fossilfreie Zukunft. C1 sichert sich weitere 20 Millionen Euro zur Kommerzialisierung des zirkulären Rohstoffs der Zukunft. Pressemitteilung vom 19. März 2025. Aufgerufen am 23.7.2025; verfügbar unter: <https://www.carbon.one/de>
- 3 C1 Green Chemicals, Berlin Deutschland. Eine ULTRA-effiziente Katalyse für hoch-reines, grünes Methanol. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: <https://www.carbon.one/de#technology>
- 4 CAC Engineering GmbH, Chemnitz. Nachhaltiger Luftverkehr mit CAC METHAJET®. CAC METHAJET® – ein neuer, einzigartiger Herstellungsweg. Stand 2025. Aufgerufen am 23.7.2025; verfügbar unter: <https://www.cac-synfuel.com/de/kerosin>
- 5 Carbon Recycling International, Reykjavik, Island. A proven carbon utilisation solution. End-to-end Services for CO₂ to Methanol. Aufgerufen am 23.7.2025; verfügbar unter: <https://carbonrecycling.com/>
- 6 Carbonauten GmbH Giengen Deutschland. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: <https://carbonauten.com/>
- 7 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart. Brennstoffzellentechnologie für klimaneutrale Schifffahrt: Projekt zero4cruise geht an den Start. Stand 24.1.2025. Aufgerufen am 23.7.2025, verfügbar unter: <https://www.dlr.de/de/tt/aktuelles/nachrichten/2025/brennstoffzellentechnologie-fuer-klimaneutrale-schifffahrt-projekt-zero4cruise-geht-an-den-start>
- 8 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Köln. Neues Verfahren für nachhaltiges Kerosin aus Methanol. Stand 17.11.2022. Aufgerufen am 23.7.2025; verfügbar unter: <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2022/04/neues-verfahren-fuer-nachhaltiges-kerosin-aus-methanol>
- 9 East Energy GmbH, Rostock. Aufgerufen am 23.7.2025, verfügbar unter: <https://east-energy.de>
- 10 Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik. Fraunhofer IEE und Partner testen

- Kugelspeicher auf dem Meeresgrund vor der kalifornischen Küste. Presseinformation vom 1.11.2024. Aufgerufen am 23.7.25; verfügbar unter: <https://www.iee.fraunhofer.de/de/presse-infothek/Presse-Medien/2024/test-kugelspeicher-auf-meeresgrund-in-kalifornien.html>
- 11 Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik, Kassel. StEnSea – Stored Energy in the Sea. Funktionsprinzip der StEnSea Meeres-Pumpspeicherkraftwerke. Stand 2025. Aufgerufen am 23.7.2025; verfügbar unter: <https://www.iee.fraunhofer.de/de/themen/stensea.html>
 - 12 Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg. Forschung und Entwicklung zu Pflanzenkohlen/Biokohlen durch Karbonisierung/Pyrolyse. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: <https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/de/unsere-loesungen/Biokohle.html>
 - 13 Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen, Deutschland. Einsatz des grünen Kraftstoffs spart Gigatonnen an CO₂ ein. Pressemitteilung vom 15. August 2023. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2023/gruenes-methanol.html>
 - 14 Greenpeace. Greenpeace-Studie: Grünes Methanol kann Schifffahrt in klimaneutrale Zukunft steuern. Pressemeldung vom 6.4.2025. Aufgerufen am 23.7.2025, verfügbar unter: <https://presseportal.greenpeace.de/248671-greenpeace-studie-gruenes-methanol-kann-schifffahrt-in-klimaneutrale-zukunft-steuern>
 - 15 Höhlein B, Grube Th, Biedermann T et al. Methanol als Energieträger. Schriften des Forschungszentrums Jülich in der Helmholtz-Gemeinschaft. Reihe Energietechnik/Energy Technology 2003; 28. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://juser.fz-juelich.de/record/32762/files/Energietechnik_28.pdf&ved=2ahUKEwjjs_E-YaMAxUMgP0HHdPoAT4QFnoECDIQAQ&usq=AoVvaw1WDLrDRWAjRzy_Z2vIiV3n
 - 16 ICODOS GmbH. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: <https://icodos.com/>
 - 17 International Renewable Energy Agency (IRENA). Innovation Outlook: Renewable Methanol. Stand Januar 2021. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: <https://www.irena.org/publications/2021/Jan/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol>
 - 18 Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. Aus klimaschädlichem Kohlenstoffdioxid wird Methanol. Stand 21.2.2023. Aufgerufen am 23.7.2025, verfügbar unter: <https://www.kit-technology.de/de/blog/aus-klimaschaedlichem-co2-wird-methanol>
 - 19 Kim S, Nitzsche MP, Rufer SB et al. Asymmetric chloride-mediated electrochemical process for CO₂ removal from oceanwater. Energy & Environmental Science 2023; 16: 2030–2044
 - 20 Liebherr. Dekarbonisierung. Das Liebherr Zero Emission Mining-Programm. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: <https://www.liebherr.com/de-at/mining/dekarbonisierung-6976586>
 - 21 Liu J, Zhao J, Zhu Q et al. Methanol-based fuel boiler: Design, process, emission, energy consumption, and techno-economic analysis. Case Studies in Thermal Engineering 2024; 54: 103885
 - 22 MAERSK. Maersk secures green methanol for maiden voyage of the world's first methanol-enabled container vessel. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: <https://www.maersk.com/news/articles/2023/06/13/maersk-secures-green-methanol>
 - 23 Maritimes Cluster Norddeutschland e.V., Hamburg. Markttransparenzstudie: Methanol-Motoren. Stand 2024. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: https://www.maritimes-cluster.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/MCN-Markttransparenzstudie-Methanol-Motoren-2024.pdf
 - 24 Methanology AG, Neuhausen am Rheinfall, Schweiz. willpower energy™ Reaktor System 10. Stand 2024. Aufgerufen am 23.7.2025; verfügbar unter: <https://www.methanology.com/de/WPE-RS10#no-back>
 - 25 Meyer J, Jakuttis M, Binder S, Hornung A. Energetische und wirtschaftliche Betrachtung einer dezentralen Methanolsynthese zur Speicherung von erneuerbarer Energie. 13. Symposium Energieinnovation, Graz, Austria. Stand 14.2.2014. Aufgerufen am 23.7.2025; verfügbar unter: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2014/files/lf/LF_Meyer.pdf&ved=2ahUKEwio4s64zrGKAxVPzAIHHbFLEUwQFnoECBkQAQ&usq=AoVvaw1sX-cwh9gb6kD6EJVQFlwB
 - 26 Mohr H, Wolf R. Markttransparenzstudie: Methanol-Motoren Update 2024/25 für Maritimes Cluster Norddeutschland e. V. GasKraft Engineering – Driving Force Optimization for Sustainable Ships & Power Plants. Stand 13.1.2025. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: https://www.maritimes-cluster.de/fileadmin/user_upload/Veranstaltungen/Dokumente/Markttransparenzstudie_Methanol-Motoren_Update_2024_-_Hinrich_Mohr.pdf
 - 27 Neue Osnabrücker Zeitung. Wirtschaftskrise wegen Klimaschutz? Klima-Ökonom Edenhofer kritisiert „fatale Quatsch-Debatte“. Presseportal Neue Osnabrücker Zeitung. Stand 4.1.2025. Aufgerufen am 23.7.2025; verfügbar unter: <https://www.presseportal.de/pm/58964/5942554>
 - 28 [Obrist Gruppe, Lustenau, Österreich. Pioneering sustainable solutions for a zero-emission future. Stand 2025. Aufgerufen am 23.7.2025; verfügbar unter: <https://www.obrist.at/>
 - 29 Prismane Consulting. Globaler Markt für grünes Methanol/Kapazität, Produktion, Nachfrage und Prognose 2050. Stand Februar 2025. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: https://prismaneconsulting-com.translate.goog/blog-details/global-green-methanol-market-capacity-production-demand-forecast-2050?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=de&_x_tr_hl=de&_x_tr_pto=rq
 - 30 Ripple WJ, Wolf C, Gregg JW et al. The 2024 state of the climate report: Perilous times on planet Earth. BioScience 2024; 74(12): 812–824
 - 31 Schlager S, Dumitru LM, Haberbauer M et al. Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide to Methanol by Direct Injection of Electrons into Immobilized Enzymes on a Modified Electrode. ChemSusChem 2016; 9(6): 631–635
 - 32 Siqens GmbH, München. Wie funktioniert eine Methanol-Brennstoffzelle? Aufbau und Funktion einer Methanol-Brennstoffzelle. Stand 27.1.2023. Aufgerufen am 23.7.2025, verfügbar unter: <https://siqens.de/methanol-brennstoffzelle/#Design-and-principle-of-a-methanol-fuel-cell>
 - 33 Statista Research Department. Produktionskapazität von Methanol weltweit von 2018 bis 2023. Stand 6.6.2025. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten-studie/1454582/umfrage/methanol-globale-produktionskapazitaet/>
 - 34 Straits Research. Methanol Marktgröße. Stand 2025. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: <https://straitsresearch.com/de/report/methanol-market>
 - 35 Technische Universität Wien, Institut für Materialchemie, Wien, Österreich. Neue Technik für den Klimaschutz: Aus CO₂ wird Methanol. Pressemitteilung vom 28. Juni 2022. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: <https://www.tuwien.at/tu-wien/aktuelles/news/neue-technik-fuer-den-klimaschutz-aus-co2-wird-methanol>
 - 36 The Methanol Institute. The global trade association for the methanol industry. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: <https://www.methanol.org/about-us/>
 - 37 Trapp M. Tausend Milliarden Tonnen Kohlenstoffdioxid zu viel in der Atmosphäre. Pädiatrische Allergologie 01/2022: 60–66
 - 38 TUI Cruises GmbH, Hamburg. TUI Cruises vereinbart Partnerschaft mit Energieunternehmen Mabanaf. Pressemitteilung vom 25.1.2024. Aufgerufen am 21.7.2025; verfügbar unter: <https://www.mein-schiff.com/presse/archiv/tui-cruises-vereinbart-partnerschaft-mit-energieunternehmen-mabanaf>
 - 39 UN Environment Programme (UNEP). Emissions Gap Report 2024. Stand Oktober 2024. Aufgerufen am 23.7.2025; verfügbar unter: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2024>
 - 40 UP-TO-ME UK. Unmanned Power To Methanol Production. UP-TO-ME is an EU funded project. Stand 2025. Aufgerufen am 23.7.2025; verfügbar unter: <https://up-to-me.com/>
 - 41 Warnecke M, Röhling S. Untertägige Speicherung von Wasserstoff – Status quo. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. Stand September 2021. Aufgerufen am 23.7.2025; verfügbar unter: https://www.deutscherohstoffagentur.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Downloads/2021_Speicherung_Wasserstoff.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D2&ved=2ahUKEwiBwazs4yLAXV22gIHx6nBP8QFnoECB0QAQ&usq=AoVvaw0N1vn3Y6KiCn-Rz0l65zWb
 - 42 Wille J. Wir riskieren den Fortbestand unserer Zivilisation. Klimareporter, Interview mit Hans Joachim Schellnhuber vom 10. April 2020. Aufgerufen am 21.7.2025. Verfügbar unter: <https://www.klimareporter.de/erdsystem/wir-riskieren-den-fortbestand-unserer-zivilisation>