

Das Projekt ALIGN-CCUS – Ein Beitrag zum evolutiven Transformationsprozess der Energie- und Rohstoffversorgung durch Recycling von Kohlenstoff

Dr. Peter Moser, Dr. Sandra Schmidt, Dipl.-Ing. Knut Stahl; Dipl.-Ing. Georg Wiechers, RWE Power AG;
Dr. Arthur Heberle, Dr. Christian Kuhr, Dipl.-Ing. Kay Schroer; Mitsubishi Hitachi Power Systems
Europe GmbH;
Dipl.-Ing. Hiroshi Kakihira, Asahi Kasei Europe GmbH;
Prof. Ralf Peters, M.Sc. Stefan Weiske, Dr. Petra Zapp, Dr. Stefanie Troy; Forschungszentrum Jülich
GmbH;
M.Sc. Marcel Neumann, Dipl.-Ing. Bastian Lehrheuer; RWTH University;
Dr. Thorsten Schnorbus, Dr. Sandra Glück, FEV Europe GmbH.

Kurzfassung

Die technischen, wirtschaftlichen und sozialen Herausforderungen zur Erreichung der Klimaschutzziele sind immens. Die Senkung der CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 auf netto Null bedarf globaler Umwälzungen in allen Bereichen des täglichen Lebens und betreffen alle Sektoren (Energie, Verkehr, Industrie, Gewerbe/Gebäude) sowie Infrastruktur und Landnutzung. Die Maßnahmen zur Transformation der Energie- und Rohstoffversorgung sind in ihrem Ausmaß ohne historisches Beispiel. Es ist unmittelbar einleuchtend, dass die möglichst weitgehende sektorenübergreifende Nutzung bestehender Infrastruktur nicht nur die Umsetzung von Maßnahmen zum Klimaschutz beschleunigt, sondern auch die daraus resultierenden immens hohen Kosten senken kann. Dieser evolutive Ansatz zielt darauf ab, bestehende Kraftwerke, Industrieanlagen und Verkehrsmittel zu nutzen sowie deren Emissionen mit Hilfe der erneuerbaren Energien zu senken und Strukturbrüche zu vermeiden. Basischemikalien und Treibstoffe, die aus abgetrenntem CO₂ und regenerativ erzeugtem Wasserstoff hergestellt werden (Carbon Capture and Usage: CCU) dienen als Bindeglied zwischen den Sektoren. Wichtige CCU-Produkte wie Methanol und Dimethylether (DME) sind sektorenübergreifend einsetzbare, chemische Langzeitenergiespeicher mit höherer Energiedichte als H₂. Im Rahmen des Projektes ALIGN-CCUS wird eine solche CCU-Demonstrationsanlage zur DME-Synthese im Innovationszentrum in Niederaussem errichtet und die Nutzung von DME in Dieselmotoren wird exemplarisch in einem Notstromaggregat zur Peak- und Back-Up-Stromerzeugung demonstriert. Darüber hinaus wird die Nutzung des CCU-Kraftstoffs Oxymethylenether (OME) im Verkehr untersucht.

Abstract

The technical, economic and social challenges for achieving the climate protection goals are immense. The desired reduction of carbon dioxide emissions to net zero by the year 2050 requires global radical changes in all areas of economy and daily life that are without precedence in history, comprising all sectors (energy, transport, industry, households) as well as infrastructure and land use. It is immediately evident that the use of existing infrastructure to the maximum extent possible not only accelerates the implementation of

climate protection measures, but can also reduce the resulting immense costs. For the energy and fuel supply, this evolutionary approach aims to use existing power plants and transport infrastructure and to reduce their emissions with the help of renewable energies, while avoiding structural breaks at the same time. Base chemicals and fuels produced from captured CO₂ from flue gases and renewably produced hydrogen (Carbon Capture and Usage: CCU) are coupling the sectors. Important CCU products, such as methanol and dimethyl ether (DME), are cross-sectorally applicable chemical long-term energy storages with a higher energy density than hydrogen. As a part of the project ALIGN-CCUS, such a CCU demonstration plant for DME synthesis is being built in the Innovation Center in Niederaussem and the use of DME in diesel engines is demonstrated in an emergency generator for peak and back-up power generation. In addition the usage of the CCU-fuel oxymethylene ether (OME) for transportation is examined.

1 Einleitung

Das zukünftige Energieversorgungssystem in Deutschland wird durch die je nach Wetterbedingung und Tageszeit stark schwankende Einspeisung von Wind- und Photovoltaik-Anlagen dominiert werden. Forderungen möglichst viele Energie konsumierende Prozesse zu elektrifizieren, um Wandlungsverluste zu vermeiden, also z. B. E-Autos, Heizung, Prozesswärmebereitstellung in der Industrie, blenden diesen Aspekt immer wieder aus. Obwohl es niemand aus energetischen Gründen will, wird man in dem zukünftigen Energieversorgungssystem elektrische Energie speichern müssen und zwar über Sekunden bis Monate und in riesigen Mengen. Stellt man die von den Erneuerbaren Energien eingespeiste elektrische Energie dem Verbrauch gegenüber, kann man häufig ausgedehnte Phasen mit sehr großen Versorgungslücken von z. B. 10 TWh in 10 Tagen erkennen (Deutschland, Januar 2019 [1]), die durch konventionelle Kraftwerke aufgefangen werden müssen, trotz einer installierten Netto-Leistung der Erneuerbaren Energien von rund 112 GW (März 2019). Alle in Deutschland bestehenden Pumpspeicher tragen mit einem Energieinhalt von rund 42 GWh zur Versorgungssicherheit und Flexibilisierung der Stromversorgung bei, was jedoch um den Faktor 240 zu wenig ist, um – ohne Berücksichtigung der Wandlungsverluste – die im genannten Beispiel fehlende Energiemenge bereitzustellen. Manchmal werden als smart bezeichnete Konzepte in die Diskussion eingebracht, in denen Autobatterien von E-Autos als Puffer für das Netz dienen sollen. Nimmt man an, dass alle 46,5 Mio. PKW in Deutschland E-Autos mit jeweils mehr als 40 kWh Batteriekapazität wären, könnte man tatsächlich erhebliche Energiemengen (etwa 2 TWh) speichern. Allerdings wären das nur rund 20% der im genannten Beispiel notwendigen Energiemenge von 10 TWh. Zudem könnte für mindestens zehn Tage niemand in Deutschland PKW fahren.

Es wird offensichtlich, dass Langzeit-Energiespeicherung mit hoher Energiedichte im Stromsektor notwendig ist. Dieselbe Notwendigkeit ergibt sich für Teile des Personen- und Güterverkehrs sobald große Leistungen oder lange Streckenabschnitte zu bewältigen sind. Die direkte Elektrifizierung des Transportsektors ist energetisch effizient, wird jedoch durch die schwankende Verfügbarkeit des Stromes aus Wind- und Photovoltaikanlagen eingeschränkt. Auch hier muss deshalb Energie gespeichert werden. Wie begrenzt die Möglichkeiten zur Elektrifizierung mittels Batterien sind, zeigt ein Blick auf die für den Ferntransport benötigten Größen. Möchte man mit einem elektrischen 40 t-LKW die gleiche Reichweite wie im Ferntransport mit Diesel erreichen, so würde eine Batterie 25 t wiegen. Bei einer Nutzlast von 27 t verbleiben 2 t Nutzlast. Ein Schiff würde mit der benötigten Batterie untergehen und ein Flugzeug könnte nicht vom Boden abheben. **BILD 1**



Abbildung 1: Grenzen der Elektrifizierung des Transportsektors (Schwerlast und Fernverkehr) durch die geringe gewichtsbezogene Energiespeicherdichte von Batterien (DWT: Deadweight tonnage, DWT ist die Summe des Gewichts aus Fracht, Treibstoff, Frischwasser, Ballastwasser, Vorräten, Passagieren und Crew).

Auch hier werden Treibstoffe mit hoher Energiedichte benötigt und es bietet sich daher an, Strom- und Transportsektor über den Treibstoff zu koppeln, der als chemischer Langzeitenergiespeicher dient. Mögliche Konzepte sind neben Wasserstoff und Brennstoffzellen insbesondere auch E-Fuels und Verbrennungsmotoren. Ziele des Projektes ALIGN-CCUS sind die Herstellung solcher E-Fuels aus recyceltem CO₂ und regenerativ erzeugtem Wasserstoff und ihre Nutzung im Strom- und Transportsektor.

Das europäisch und national geförderte ALIGN-CCUS-Projekt vereint 30 Industrieunternehmen, Forschungsinstitute und Universitäten aus fünf europäischen Ländern (DE, NL, NO, RO, UK) mit dem gemeinsamen Ziel, den schnellen und kosteneffektiven Einsatz von CO₂-Abscheidung, -Nutzung und -Speicherung zu unterstützen. Die deutschen Partner des Projektes werden durch das BMWi gefördert (EU Horizon 2020, ERA-NET,

Accelerating CCUS Technologies, Projektnummer 271501 [2]). Im Rahmen von ALIGN-CCUS wurde eine CCU-Demonstrationsanlage zur Synthese von DME aus abgetrenntem CO₂ und elektrolytisch erzeugtem H₂ errichtet und es wurde ein Lkw-Dieselmotor für den DME-Betrieb umgerüstet, mit dem exemplarisch die Peak- und Back-Up-Stromerzeugung mit einem Notstrom-Aggregat demonstriert wird. Die ALIGN-CCUS-Anlage umfasst alle Bausteine einer Power-to-X-to-Power-Kette, um mögliche Beiträge zur Defossilisierung von Strom- und Transportsektor anhand von Realdaten zu analysieren. Letztendlich soll der Ansatz von ALIGN-CCUS als Blaupause dienen, wie man Klimaschutz und Versorgungssicherheit mit Energie und Rohstoffen vereinen kann.

Dass das Thema Versorgungssicherheit nicht ein abstraktes Menetekel für die ferne Zukunft darstellt, sondern im Stromsektor bereits innerhalb weniger Jahre deutlich in den Vordergrund treten wird, ergibt sich aus den Planungen für den Bestand der gesicherten, nicht wetterabhängigen Erzeugungsleistung in Deutschland (gesamte installierte Netto-Kraftwerksleistung März 2019 in Deutschland: 214 GW, davon 112 GW Erneuerbare Energien [3]). Mit dem Ende des Betriebes der letzten verbliebenen Kernkraftwerke im Rahmen des Kernenergieausstiegs verliert Deutschland 9,5 GW gesicherte Kraftwerksleistung bis zum 31.12.2022. Werden zudem die Pläne der Kommission für Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung umgesetzt, sinkt die gesicherte Erzeugungsleistung infolge des Kohleausstiegs noch einmal zusätzlich um etwa den gleichen Wert bis Ende 2022 (in Summe rund 22 GW) und bis 2030 um insgesamt 35 GW.

BILD2

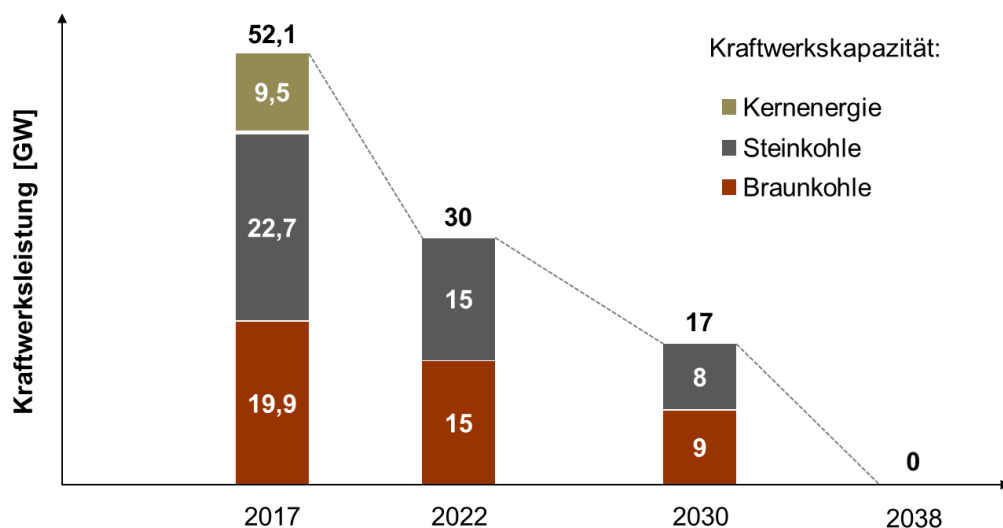


Abbildung 2: Kernenergieausstieg und Umsetzung der Ausstiegspläne zur Stromerzeugung aus Kohle führen in Deutschland zu einer Abnahme der gesicherten Kraftwerksleistung von 34% innerhalb der nächsten 10 Jahre.

Die nicht-wetterabhängige Kraftwerksleistung wird Anfang des nächsten Jahrzehnts den Spitzenbedarf in Deutschland alleine nicht mehr decken können. Mit der angestrebten Elektrifizierung des städtischen Autoverkehrs und vermehrter elektrischer Beheizung von Haushalten sowie zur Prozesswärmebereitstellung wird der Strombedarf im Gegensatz hierzu anwachsen, was die Problematik verschärft. Versorgungslücken in Deutschland müssen durch die verbleibenden konventionellen Kraftwerke sowie den Import von Strom aus den benachbarten europäischen Ländern abgefangen werden, sofern nicht genügend Erneuerbare Energien und Energiespeicher zur Verfügung stehen. Mit Hilfe von CCU kann man sowohl die Emissionen von CO₂-emittierenden Anlagen senken als auch Energie speichern. Dies schließt explizit auch Anlagen ein, die Biomasse verbrennen. Damit wird Energie so gespeichert, dass sie vergleichsweise einfach über große Entfernungen in Form von chemischer Bindungsenergie bzw. als synthetischer Treibstoff transportiert werden kann. Da Deutschland zur Erreichung der Klimaschutzziele innerhalb der nächsten 30 Jahre nicht nur auf die Energiebereitstellung durch Kohle sondern auch komplett auf Erdgas- und Erdölverbrennung sowie deren stofflicher Nutzung verzichten soll, wird zwangsläufig eine erhebliche Unterdeckung der Primärenergieversorgung auftreten, die bei weitem nicht durch Photovoltaik- und Windkraftanlagen alleine in Deutschland kompensiert werden kann. So stehen dem Gesamtprimärenergieverbrauch in Deutschland von 13.106 PJ in 2018 ein Beitrag der Windenergie von 396 PJ (3,0%), an Photovoltaik 165 PJ (1,3%) und an Solarthermie 32 PJ (0,2%) entgegen [1]. Alleine der Verkehrssektor verbrauchte 2018 mit 2.705 PJ etwa das 4,8-fache des Primärenergieangebots von Windenergie und Photovoltaik. Entsprechend müsste in den nächsten Jahrzehnten der Bedarf an Energieimporten, die auf Erneuerbaren Energien basieren, drastisch anwachsen, um die sich abzeichnenden Versorgungslücken zu schließen. Das ergibt sich alleine schon aus den im Vergleich zu Deutschland in anderen Regionen besseren technischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen, wie höhere Jahresvolllaststunden von Wind- und Photovoltaikanlagen, ausreichende Verfügbarkeit von Landflächen für Biomasse, topografische Voraussetzungen für Wasserkraft und höhere Akzeptanz in der Bevölkerung für die reale Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen vor Ort. Obgleich Deutschland ein Netto-Importeur von Energie bleiben wird, kann der Eigenanteil bei der Herstellung von Kraftstoffen in Deutschland zukünftig höher sein als heute, wenn heimische Strommengen aus Erneuerbarer Erzeugung in Zeiten guter Stromausbeute für die Synthese von Energieträgern wie Methanol und DME bereitgestellt werden.

2 Die Technik der ALIGN-CCUS-Demonstrationsanlage

Das für die Synthese von DME verwendete CO₂ wird aus dem Rauchgas des Kraftwerks Niederaußem in einer aminbasierten CO₂-Wäsche-Pilotanlage abgetrennt und anschließend komprimiert und flüssig gelagert. Während der Testphase der Demonstrationsanlage wird das CO₂-Absorptionsmittel „CESAR1“ eingesetzt (eine wässrige Lösung von Piperazin und 2-Aminomethylpropanol), das im gleichnamigen EU-Projekt entwickelt wurde und bessere Eigenschaften als das bis dato übliche Absorptionsmittel Monoethanolamin (MEA) aufweist.

Die CO₂-Wäsche-Pilotanlage wurde 2009 in Betrieb genommen und befindet sich mittlerweile seit mehr als 80.000 Betriebsstunden im Einsatz, bei einer Verfügbarkeit von >97%. Die Anlage wird kontinuierlich im 24/7-Modus betrieben. Mit der CO₂-Wäsche können bis zu 7,2 t CO₂ pro Tag aus einem Teilstrom des Rauchgases des Braunkohlenkraftwerks BoA1 abgetrennt werden [3]. Die Reinheit des CO₂ ist prozessbedingt sehr hoch (> 99,98 % (v/v), trocken), entsprechend gering ist das Risiko einer möglichen Deaktivierung der für die anschließende DME-Synthese benötigten Katalysatoren. Insbesondere enthält das Produkt-CO₂ nur in geringsten Mengen Schwefelverbindungen (SO₂-Gehalt < 1 ppmv). Verbrennungsprozesse (explizit Kohlekraftwerke, Müll- und Biomasseverbrennungsanlagen) sind bereits mit effizienten Rauchgasreinigungsanlagen zur Entfernung schwefelhaltiger Komponenten ausgestattet, was die weitere Entschwefelung auf das für die CO₂-Abtrennung notwendige Niveau – etwa gegenüber Vergasungsprozessen (Entfernung insbesondere von H₂S) – vereinfacht.

Die im Innovationszentrum in Niederaußem existierende CO₂-Infrastruktur umfasst zusätzlich eine CO₂-Kompressions- und Verflüssigungsanlage. Das flüssige CO₂ wird der DME-Synthesanlage aus einem Tank bereitgestellt, der über eine Speicherkapazität von 18 t (16,5 bar, -26,5°C) verfügt. Bei laufender DME-Synthese wird das flüssige CO₂ zu einem weiteren Puffertank geleitet und in einer CO₂-Konditionierungseinheit durch Erwärmung verdampft und gasförmig mit einem Druck von 11 bar in die DME-Syntheseeinheit geleitet. Die Reaktionen von H₂ mit CO₂ und dem intermediär gebildeten CO zum Zwischenprodukt Methanol (CH₃OH) sind exotherm, ebenso wie die Kondensationsreaktion zweier Methanolmoleküle unter Wasserabspaltung zum Endprodukt DME (6 H₂ + 2 CO₂ reagieren zu CH₃OCH₃ + 3 H₂O). Erhöhter Druck und niedrige Temperaturen verschieben hierbei das Gleichgewicht in Richtung des Produktes. Der für den Gesamtprozess nötige Energieeintrag erfolgt über den Wasserstoff, der mittels Elektrolyse gewonnen wird. Die elektrische Energie wird so in chemische Energie umgewandelt und gespeichert. Für das ALIGN-CCUS-Projekt wurde bewusst entschieden, eine alkalischen Elektrolyse zu verwenden, die auf der seit

Jahrzehnten bewährten und großtechnisch im kommerziellen Einsatz befindlichen Chlor-Alkali-Elektrolyse-Technologie aufbaut. Ein einzelnes Elektrolyseurmodul kann 220 Zellen umfassen, mit einer Elektrodenfläche von 2,7 m² je Zelle. Dank eines weiterentwickelten Werkstoffkonzepts des Elektrolyseurs konnten insbesondere die Überspannungen und ohmschen Verluste reduziert werden, um einen Betrieb mit höheren Stromdichten zu ermöglichen und so die Effizienz gegenüber konventionellen Elektrolyseuren zu verbessern. Der Stromverbrauch beträgt ca. 4,3 kWh/m³ H₂ bei einer Stromdichte von 0,6 A/cm² und bei einer Zellspannung von rund 1,8 V (ca. 4,5 kWh/m³ bei 1,0 A/cm² und 1,9 V). Im Vergleich mit herkömmlichen alkalischen Elektrolyseuren weist die neu entwickelte Elektrolyseurtechnik damit eine um 10% höhere Effizienz auf. In der Demonstrationsanlage werden bis zu 22 kg H₂ pro Tag hergestellt. Der an der Anode entstehende Sauerstoff wird nicht verwendet. **BILD3**

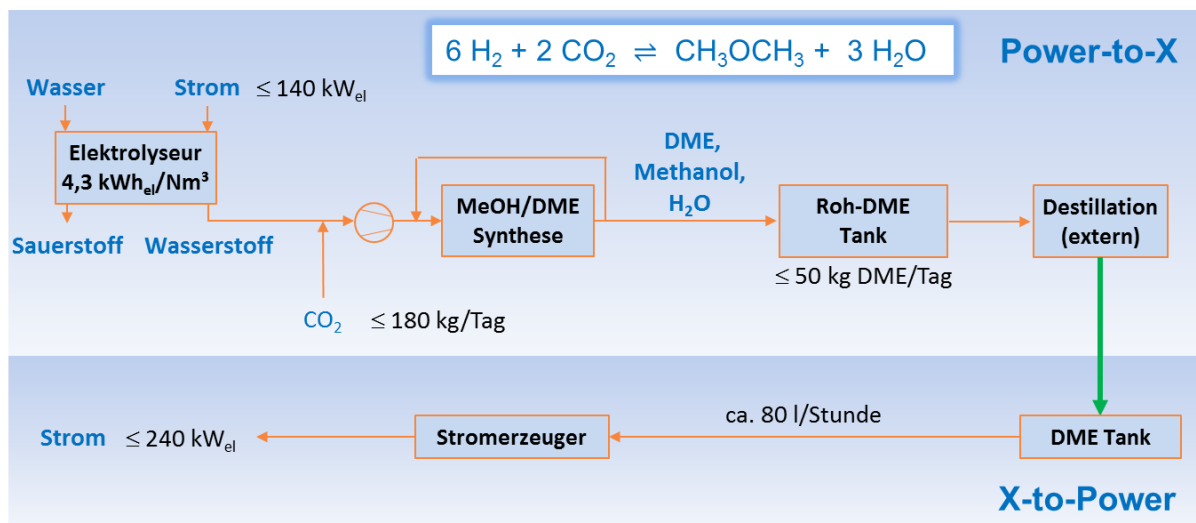


Abbildung 3: Vereinfachtes Schema des DME-Syntheseprozesses und der Stromerzeugung mittels des synthetischen Treibstoffs DME in der ALIGN-CCUS Power-to-X-to-Power-Anlage.

Im Gegensatz zum sonst üblichen zweistufigen Verfahren zur DME-Synthese, bei dem mittels eines Cu/ZnO-Katalysators zunächst Methanol synthetisiert wird, dessen Dehydratisierung im zweiten Prozessschritt mittels Al₂O₃ oder eines Zeolithen erfolgt, verwendet die ALIGN-CCUS-Anlage eine einstufige Synthese und nutzt hierfür einen bifunktionalen Katalysator. Mit diesem sind Monolithe beschichtet, die sich in den Rohren eines Rohrbündelreaktors befinden. Von dem entwickelten Katalysator-/Reaktor-Konzept verspricht man sich für Großanlagen verminderte Investitions- und Betriebskosten. Im Prozess werden zwei Trennbehälter nach dem Reaktor verwendet, in dem durch Abkühlung des Stoffstroms die Nebenprodukte Wasser und Methanol abgeschieden werden können.

Um nicht umgesetzte Edukte in der Gasphase und das Nebenprodukt CO zu nutzen bzw. zur Ausbeuteerhöhung, wird der Hauptteil des Gases nach dem zweiten Trennbehälter rezirkuliert, mit dem Eduktstrom vermischt und erneut dem Reaktor zugeführt. Der interne Heiz- und Kühlaufwand im Prozess wird durch Gas-Gas-Wärmeübertrager auf ein Minimum verringert. Die Anlage verfügt über eine Abgasnachbehandlung, in der im Abgas enthaltenes CO und Kohlenwasserstoffe mit Hilfe eines katalytischen Brenners in CO₂ und H₂O umgewandelt werden, sodass die Grenzwerte der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft sicher unterschritten werden. Eine Destillation des Roh-DME-Produktes ist vor Ort in Niederaußem nicht vorgesehen. Die Errichtung der Anlage startete im Oktober 2019 und die kalte Inbetriebnahme im November.

Der alkalische Wasserelektrolyseur wurde von Asahi Kasei Europe entwickelt und gebaut und die DME-Syntheseanlage von Mitsubishi Hitachi Power Systems Europe GmbH (MHPS). Der Stromerzeuger der Firma Henkelhausen basiert auf einem Dieselmotor der Firma Deutz, der von den Partnern Bosch, RWTH Aachen University und FEV Europe auf den Betrieb mit DME angepasst wurde. Einbindung und Betrieb der Anlage erfolgt durch RWE Power. **BILD4**

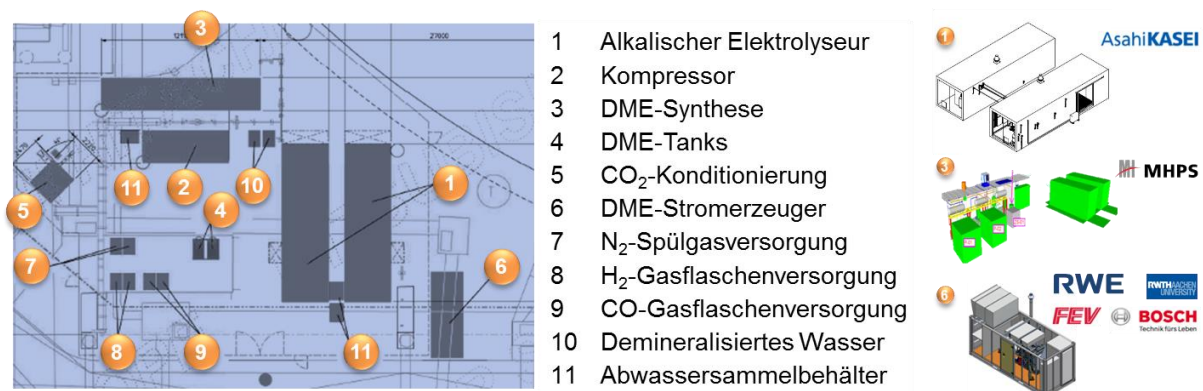


Abbildung 4: Anordnung der Komponenten der ALIGN-CCUS-Anlage und verantwortliche Partner für die drei Hauptkomponenten.

Der auf DME-Betrieb angepasste Dieselmotor des stationären Spitzenlast-Stromerzeugers wird aus 500-l-Tanks gespeist und wird ca. 80 l DME pro Stunde verbrauchen. Es handelt sich um einen wassergekühlten 6-Zylinder-Reihenmotor mit Turboaufladung, Ladeluftkühlung, Common-Rail-Einspritzsystem und elektronischer Motorregelung. Im Dauerbetrieb mit Diesel (Stromfrequenz 50 Hertz, 1.500 Umdrehungen pro Minute) wird eine elektrische Leistung von 225 kVA bereitgestellt (Generatorwirkungsgrad 90% - 92%, Leistungsfaktor 0,8). Zeitlich begrenzt kann die Leistung auf 251 kVA erhöht werden. Aufgrund des geringeren Kohlenstoff-Wasserstoff-Verhältnisses und des höheren

Sauerstoffanteils ist der untere Heizwert von DME (28,4 MJ/kg) im Vergleich zu Diesel niedriger (Diesel 42,5 MJ/kg). Um die gleiche Motor-/Generatorleistung zu erzielen, muss deshalb die Einspritzmenge entsprechend erhöht werden. Deshalb wurden Injektortests in einer beheizten Hochdruckkammer durchgeführt, bei denen das Einspritz-, Gemischbildungs- und Zündverhalten von DME mittels optischer Methoden (Shadowgraphie, Mie-Streuung, OH*-Radikal-Spektroskopie) untersucht wurden. Die Ergebnisse der optischen Untersuchungen bilden Eingangsparameter für 3D-CFD-Simulationen zur Auslegung der Einspritzdüsen, Optimierung der Kolbenmulden-Geometrie und der Validierung des Verbrennungsmodells für DME. Nach diesen Untersuchungen wird das Betriebs- und Emissionsverhalten des modifizierten Motors zunächst auf einem Prüfstand analysiert, bevor er zusammen mit dem Kraftstoffversorgungssystem in das Spitzenlast-Aggregat eingebaut wird. Der mit dem Stromerzeuger produzierte Strom wird in Niederaußem zur Stromversorgung der CO₂-Wäsche und anderer Forschungsanlagen verwendet. Die Einspeisung erfolgt auf einer Spannungsebene von 400 V. Die Inbetriebnahme des Stromerzeugers in Niederaußem ist für April 2020 vorgesehen. **BILD5**



Abbildung 5: Die Errichtung der ALIGN-CCUS-Anlage erfolgte im Oktober 2019. Bild links: Installation des Kompressor-Moduls für die DME-Synthese und CO₂-Wäsche-Pilotanlage am Gebäude der Rauchgasentschwefelungsanlage von Block K in Niederaußem. Rechtes Bild: vorne links – Stromerzeugermodul; vorne rechts – zwei Container mit der alkalischen Elektrolyse; hinten rechts – drei Container mit der DME-Syntheseinheit; hinten links: offene Einhausung für die Lagerung des produzierten Roh-DME.

3 DME als Baustein eines evolutiven Transformationsprozesses

Ein wichtiger Vorteil des Ansatzes von CCU und Sektorkopplung ist, dass Teile der vorhandenen Industrie-, Strom- und Transportinfrastruktur genutzt werden, was einen reibungslosen Übergang von „konventionell zu erneuerbar“ ermöglicht. Dies steht im Gegensatz zur Strukturbrüche erzeugenden, langwierigen und extrem kostspieligen parallelen Umsetzung vollständig neuer Strom- und Transportinfrastruktur. Will man bewerten, wie mittels CCU produziertes DME zu diesem evolutiven Transformationsprozess der Energie- und Rohstoffversorgung beitragen kann, muss man nicht nur den technischen, finanziellen und energetischen Aufwand für die CCU-Synthese betrachten, sondern auch die Nutzung des CCU-Produktes im Gesamtsystem der gekoppelten Sektoren mit schwankender Einspeisung von Windkraft und Photovoltaik, die Umweltauswirkungen bzw. Ökobilanz (mittels einer umfangreichen Lebenszyklusanalyse „Cradle to Grave“) sowie den Aufwand für die Verteilung des Energieträgers und den Aufwand für seine Nutzung beim Endkunden bzw. Verbraucher. Die ganzheitliche Analyse ist sehr aufwändig und komplex, hilft aber Grenzen der Anwendungsfelder zu identifizieren und Fehlentwicklungen vorzubeugen. Ausblenden wichtiger Rahmenbedingungen und Anwendungsaspekte führt zu wenig oder nicht nachhaltigen Technologierouten. So ist eine direkte Elektrifizierung von Transport und Industrieprozessen wegen der Vermeidung von Wandlungsprozessen wünschenswert. Bei diesem Ansatz muss aber auch die Frage beantwortet werden, wie elektrische Energie bereitgestellt werden soll, wenn keine Einspeisung durch die Erneuerbaren Energien erfolgt. Die Notwendigkeit zur Energiespeicherung wird oftmals missachtet. Ebenso müssen auch die real existierenden Herstellungs- und Entsorgungsprozesse beleuchtet werden, um zu verhindern, dass technische Fakten aus Unwissenheit übersehen oder bewusst ausgeblendet werden. Ein Beispiel ist hier die regulatorische Festlegung, nach der Elektroautos kein CO₂ ausstoßen, obgleich der reale Strom-Mix zum Laden der Batterie mit einem CO₂-Fußabdruck behaftet ist und insbesondere die energie- und rohstoffintensive Batterieherstellung zu hohen Treibhausgasemissionen führt. Im Gegensatz dazu werden mit E-Fuels betriebene Fahrzeuge so bewertet wie mit fossilem Kraftstoff betriebene. Die Vernachlässigung der Emissionen bzw. der Gutschriften aus der Vorkette „well-to-tank“ führt zu einer unausgewogenen Bewertung. Die alleinige Betrachtung lokaler Effekte (am Elektroauto) leidet hier, da globaler Klimaschutz nicht zwischen lokalen und globalen Emissionen unterscheidet. Und auch die Verschiebung von Emissionen ins Ausland mag lokal Zustimmung finden, ist aber nicht nachhaltig sondern nur unaufrichtig.

Der Aufwand für die Transformation der Infrastruktur kann anhand des Vergleichs der Power-to-X-Produkte Wasserstoff und DME näher erläutert werden. Wasserstoff wird für die

DME Synthese benötigt und stellt selbstverständlich auch selbst einen chemischen Speicher dar. Kann man den mittels Erneuerbaren Energien erzeugten Wasserstoff direkt nutzen, so kann elektrische Energie effizient, d.h. mit einem Wirkungsgrad des Elektrolyseurs von etwa 70% (entsprechend eines Energiebedarfs von ca. 4,3 kWh/m³ H₂ der Elektrolyse und einem Heizwert von H₂ von 2,995 kWh/m³), in chemische Energie umgewandelt werden. Muss man die elektrische Energie jedoch speichern, insbesondere über einen längeren Zeitraum, hat Wasserstoff aufgrund seiner geringen volumetrischen Speicherdichte Nachteile gegenüber flüssigen Energieträgern. Das bei 5 bar und Umgebungstemperatur flüssig vorliegende DME speichert etwa 10 mal soviel Energie im Vergleich zu Wasserstoff, der auf 200 bar komprimiert wurde. Deshalb kann man für die Speicherung und Handhabung von DME heute übliche Tanks, Leitungen und Armaturen verwenden, für Wasserstoff benötigt man in der Großanwendung hingegen Kavernen oder ausgedehnte Röhrenspeicher in Regionen die nicht über geeignete Salzformationen im Untergrund für die Realisierung von Gasspeichern verfügen. DME speichert nicht nur Energie „platzsparend“, sondern auch Wasserstoff effektiver als reiner Wasserstoff. 1 Liter DME enthält fast siebenmal soviel Wasserstoff, wie auf 200 bar komprimiertes H₂. Mit einem Wasserstoffanteil in der Größenordnung von 100 g H₂ pro Liter enthält der flüssige Kraftstoff DME mehr Wasserstoff als modernste Drucktanks in Fahrzeugen (700 bar, ca. 40 g/l H₂) oder kryogene LH₂-Tanks (ca. 70 g/l H₂). Neben der Speicherinfrastruktur ist für den Transportsektor auch der Aufwand bezüglich der Infrastruktur für die Verteilung des Treibstoffs und die Neuanschaffung bzw. Modifikation des Fahrzeugs des Endkunden sehr wichtig. Von den rund 14.500 Tankstellen in Deutschland wären mehr als 7.000 Autogas (oder Liquefied Petroleum Gas: LPG)-Tankstellen einfach für DME zu nutzen. Im Wesentlichen sind Kunststoffteile und Dichtungen zu wechseln. Demgegenüber gibt es derzeit nur etwa 100 H₂-Tankstellen. Es ist unmittelbar ersichtlich, dass der Ausbau eines H₂-Tankstellensystems erhebliche finanzielle Mittel binden wird und zudem nur eine Langfristperspektive ist. **BILD6**

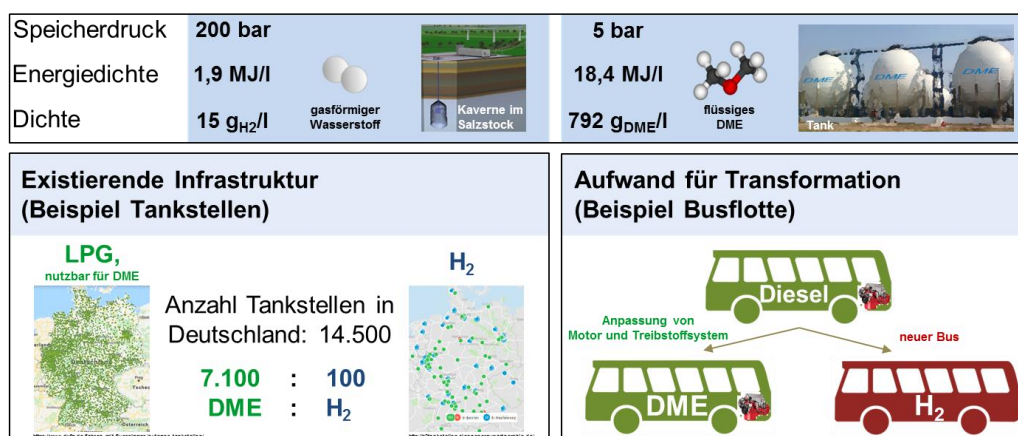


Abbildung 6: Vergleich von Wasserstoff und DME bezüglich der Speicherdichte, bestehender Infrastruktur für die Verteilung zur Nutzung im Transportsektor und den Aufwand beim Endnutzer im Transportsektor.

Nach Robinius et al. [5] liegen die Infrastrukturkosten für den Ausbau einer Infrastruktur für 20 Mio. batteriebetriebene Elektrofahrzeuge bei 51 Milliarden Euro, für 20 Mio. wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge bei 40 Milliarden Euro. Die FVV geht von Kosten von 40 – 200 Milliarden Euro bei einer vollständigen Umstellung auf batteriebetriebene Pkw und von 20 – 40 Milliarden Euro für wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge aus [6].

DME kann als Dieseleratz verwendet werden, mit dem Vorteil niedriger NO_x-, Ruß- und Schwefel-Emissionen oder als Edukt für die Synthese anderer Kraftstoffe, wie längerkettige Ether (Polyoxmethyldimethylether: OME). Ein vorhandenes Dieselfahrzeug kann auf DME-Betrieb umgerüstet werden. Hierbei tritt ein Aufwand für ein neues Kraftstoffsystem (Tank, Kraftstoffpumpe, Einspritzsystem, Motorsteuerung) auf. Der Motor und das Fahrzeug selbst können aber weiter verwendet werden, was eine kurzfristige Umsetzung von Maßnahmen möglich macht (z.B. im ÖPNV). Nachrüstsets für PKW befinden sich derzeit in der Entwicklung. Für den Betrieb mit Wasserstoff benötigt man hingegen ein komplett neues Fahrzeug, was sowohl kostenmäßig als auch bezüglich der Umweltbilanz bei Technologievergleichen berücksichtigt werden muss. Selbst bei Neufahrzeugen mit dem gegenüber Verbrennungsmotoren effizienteren Brennstoffzellenantrieb kann die Bereitstellung von Wasserstoff aus Wasserstoffträgern wie Methanol und DME vorteilhaft sein, da Infrastruktur, Handhabung und Speicherung viel einfacher, sicherer und effektiver sind.

Von Anhängern der direkten Elektrifizierung werden häufig als Kritikpunkte an synthetischen Energieträgern angeführt, dass hohe Wirkungsgradverluste über die Prozesskette auftreten und die Kosten sehr hoch seien. Über die bereits dargestellten Notwendigkeiten zur Energiespeicherung, den alternativlosen Bedarf an Energieträgern mit hoher Energiedichte und den Aspekt der Infrastrukturkosten hinaus, will das ALIGN-CCUS-Projekt hier mit Realdaten und Systemanalysen aufklärend wirken und aufzeigen warum und unter welchen Randbedingungen CCU und Sektorenkopplung einen positiven Beitrag zum zukünftigen Versorgungssystem leisten kann. Zur Ermittlung des Wirkungsgrades der chemischen Energiespeicherung wurde jeder einzelne Prozessschritt über eine eigene Prozesssimulation abgebildet und diese zu einer Gesamtkette verknüpft [7,8]. **BILD7**

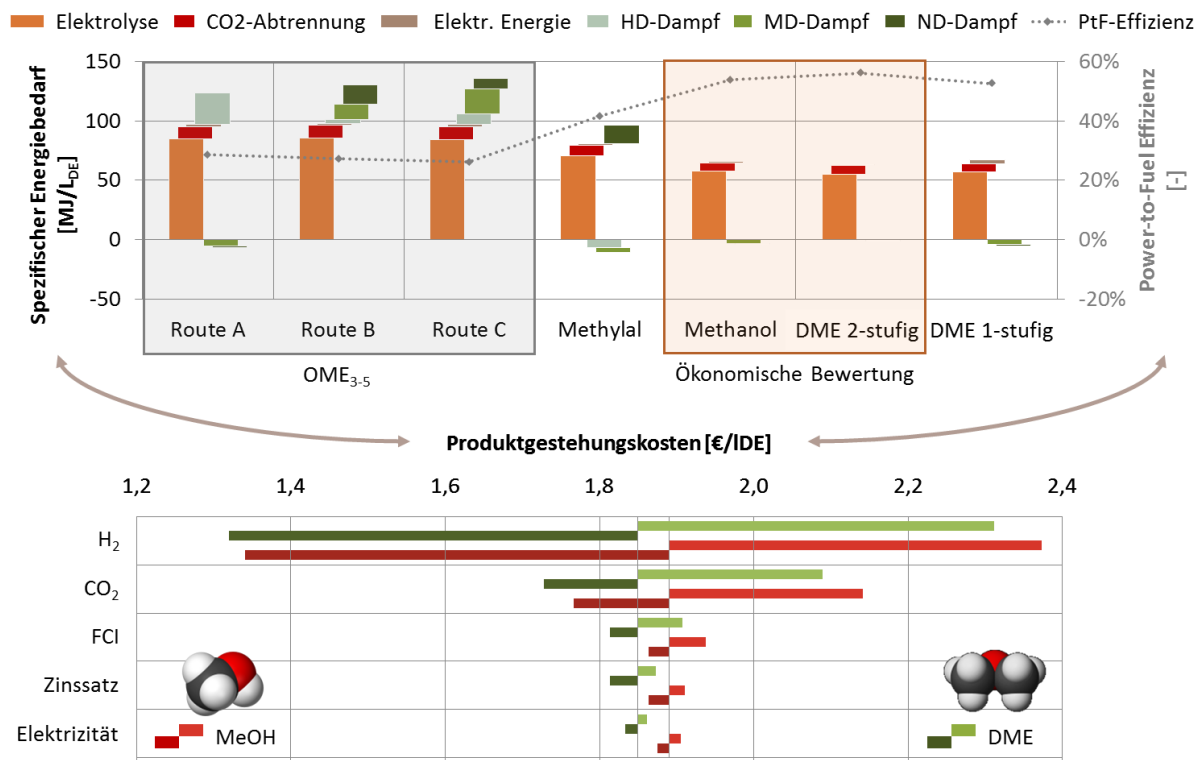


Abbildung 7: Techno-ökonomische Bewertung von Power-to-Fuel-Produktionspfaden am Beispiel von Methanol und Dimethylether (DME).

Das Diagramm zeigt für verschiedene CCU-Produkte bzw. Verfahrensvarianten (insbesondere die direkte, einstufige sowie die zweistufige DME-Synthese) den Gesamtenergieeinsatz und zwar bezogen auf den Energieinhalt von einem Liter Diesel (35,4 MJ/L_{Diesel}) und aufgeteilt in die einzelnen Teilverbräuche. Es ist offensichtlich, dass der elektrische Energiebedarf für die Elektrolyse der mit Abstand wichtigste Faktor ist. Genau dieser Energiebetrag wird chemisch gespeichert. Der Vorwurf, dass viel Energie für die Synthese verbraucht wird, läuft hier ins Leere, da es – wie gezeigt – kaum eine andere Möglichkeit gibt, die elektrische Energie in großen Mengen und langfristig zu speichern. Ohne Berücksichtigung von Optionen zur Abwärmenutzung und eine verbesserte Kopplung von Syntheseprozess und Kraftwerk bzw. Industrieprozess bei der Synthese von DME ergibt sich ein Power-to-X-Wirkungsgrad von rund 60% (Wirkungsgrad chemische Synthese ca. 85%, Elektrolyse 65-70%). Wegen der exothermen Methanol- und DME-Synthesereaktionen benötigen ihre Herstellungsprozesse keinen Prozessdampf, was die deutlich höheren Wirkungsgrade im Vergleich zur OME-Synthese erklärt. Bei der OME-Synthese werden für die mehrstufige Destillation relativ hohe Dampfmengen benötigt, was den deutlich niedrigeren Wirkungsgrad bedingt.

Wird ausschließlich der Wirkungsgrad betrachtet, so schneidet die zweistufige DME-Synthese etwas besser als das einstufige, direkte Verfahren ab. Das einstufige Verfahren weist aber eine geringere Anzahl von Apparaten und Reaktoren auf. Somit ist die verfahrenstechnische Verschaltung einfacher und die Regelungstechnik weniger aufwendig. Dies führt letztendlich zu einer Verringerung der erforderlichen Investitions- und Betriebskosten. In den Kostenanalysen wurden diese Merkmale ebenso wie der gewählte Reaktortyp mit Monolithen und weitere Optimierungspotenziale hinsichtlich Produktaufbereitung und energetischer Prozessverschaltung des Gesamtsystems bisher nicht betrachtet. Sie sind Gegenstand weiterer Kalkulationen, welche insbesondere die Ergebnisse des Betriebes der ALIGN-CCUS-Anlage berücksichtigen werden.

Die Ermittlung und Analyse der Produktgestehungskosten von DME und Methanol bei Herstellung aus CO₂ ergibt bei Annahme mittlerer Eingangsparameter und bezogen auf einen Liter Dieselläquivalent für DME 1,85 €/l_{DE} und für Methanol 1,89 €/l_{DE}. Der angenommene Wasserstoffpreis wurde in dieser Analyse mit 3,0, 4,6 und 6,0 €/kg variiert. Als mittlerer spezifischer Preis der CO₂-Abtrennung wurden 70 €/t_{CO2} und als Strompreis 97,6 €/MWh angenommen. Den größten Einfluss auf die Produktgestehungskosten haben wie zu erwarten die Bereitstellungskosten von Wasserstoff. Bei einem Dieselpreis inklusive Steuern von 1,33 €/l_{Diesel} und ohne Steuern von rund 0,60 €/l_{Diesel} erkennt man, dass der synthetische Treibstoff deutlich teurer ist, als der konventionelle, aus Erdöl hergestellte Kraftstoff, der substituiert werden soll.

Wie schneidet der synthetische Treibstoff aber im Vergleich zum Konzept des Elektrofahrzeugs ab? Elektrofahrzeuge werden stark subventioniert durch: Ausblendung der wahren CO₂-Emissionen, Kaufprämien, Vermeidung von Strafzahlungen durch freiwerdende CO₂-Kontingente zur Erreichung der europäischen Autoflottenziele von 95 g CO₂/km, Steuerbefreiungen, Zuschüsse und von Dienstfahrzeug-Abschreibungsregelungen. Nach Bräuninger und Teuber können folgende Überlegungen angestellt werden: Für einen Elektro-PKW mit einer jährlichen Fahrtstrecke von 11.000 km, ergeben sich durch die direkte und indirekte Subventionierung innerhalb von 12 Jahren Kostenvorteile von >20.000 € gegenüber einem Benzinauto. Diese trägt letztendlich der Endkunde oder der Steuerzahler. Der Benzin-PKW hat bei gleicher Fahrleistung mit einem spezifischen Verbrauch von 5 l/100 km insgesamt einen Kraftstoffverbrauch von 6.600 l. Hieraus ergibt sich nun für das Elektroauto ein äquivalenter „Treibstoffpreis“ von >20.000 € / 6.600 l > 3 € pro Liter [9]. Das ist deutlich mehr als die Produktionskosten von DME, womit sich die Behauptung, dass synthetische Treibstoffe sehr teuer wären, relativiert. Bisher werden synthetische Treibstoffe aus CO₂

nicht unterstützt. Der Emissionsrechtehandel oder die Erneuerbare Energie Direktive der EU ergeben hier keine Anreize.

Zudem können die Wirkungsgrade von Verbrennungsmotoren durch maßgeschneiderte Kraftstoffe gegenüber fossilbasierten Kraftstoffgemischen noch deutlich gesteigert werden. Eine detaillierte und ausgewogene Analyse ist in der FVV Studie „Energiepfade für den Straßenverkehr der Zukunft“ zu finden [6]. Laut dieser Studie nähern sich die Mobilitätskosten von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen, Brennstoffzellenfahrzeugen und mit E-Fuels betriebenen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor einander an, da hier neben den Energieträgerkosten auch Infrastrukturumlagen und die Fahrzeug-Anschaffungskosten einfließen. Für Pkw erreichen liegen die Mobilitätskosten im Bestfall danach bei 31,40 €/100 km beim Einsatz von DME (28,90 €/100 km für Methanol) im Verbrennungsmotor. Batterieelektrische Pkw liegen mit 29,40 €/100 km und Brennstoffzellen-Pkw mit 29,90 €/100 km im günstigsten Fall im gleichen Bereich. Für Lkw ergibt die Studie, dass die niedrigsten Mobilitätskosten mit 70,10 €/100 km mit DME erreicht werden. Rein elektrische Lkw fahren im Bestfall mit 76,30 €/100 km. Die großen Bandbreiten in der Studie lassen aber Raum für weitere Analysen, die z. B. in der Projektinitiative „Energiewende im Verkehr“ und der zugehörigen Begleitforschung umfangreich vertieft werden.

Die im Projekt durchgeführte Ökobilanz hat das Ziel einer kompletten Lebenswegbetrachtung. Ökologische Folgen der CO₂-Abscheidung und ihres Eingreifens in den Kraftwerksprozess sind die erste Instanz. Die Emission der Demonstratoranlage inklusive der Wasserstofferzeugung ist der nächste Prozessschritt. Auch die Nutzung des synthetisierten DME sowohl für die Peak-Strom Bereitstellung, als auch für eine mögliche Nutzung für den Mobilitätssektor werden untersucht. Zudem wird die LCA um entsprechende Szenarien der OME-Erzeugung und Nutzung erweitert, um diese dem DME vergleichend gegenüber zu stellen.

Ergebnisse der ganzheitlichen Ökobilanz stehen noch aus. Erste Ergebnisse (Bild 8) zum Ökobilanz-Teilabschnitt der Synthese identifizieren die Wasserstofferzeugung als kritischen Punkt auch aus Ökobilanz-Sicht. Unter Nutzung von Netzstrom schlägt der Betrieb des Elektrolyseurs sehr deutlich zu Buche. Ersetzt man den Netzstrom allerdings durch Windstrom ist eine drastische Reduzierung um weit mehr als 90% möglich. Vergleicht man OME mit DME wird klar, dass die energieintensivere OME-Synthese schlechter abschneidet, auch bedingt durch den benötigten Prozessdampf im Syntheseprozess. **BILD 8**

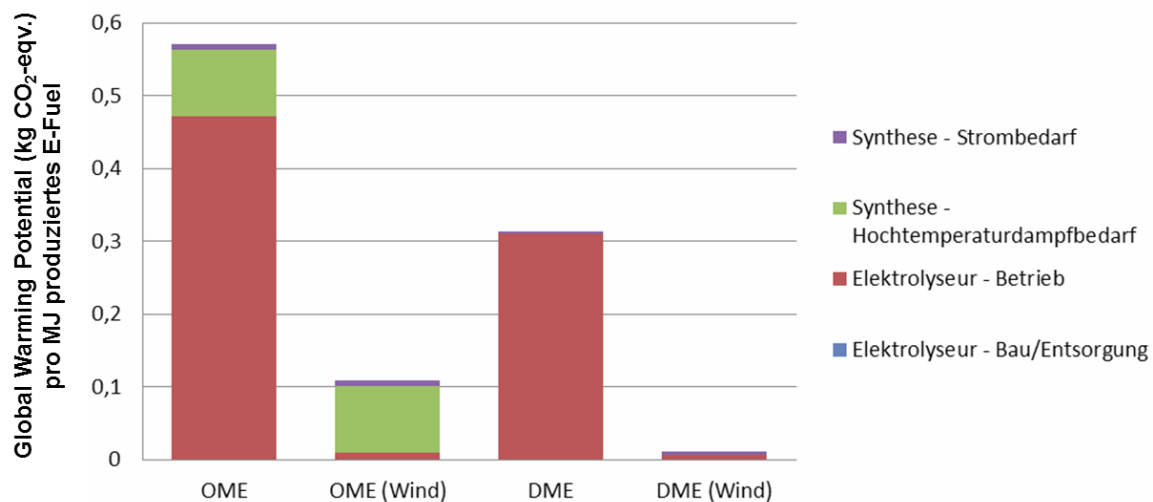


Abbildung 8: Vergleich der Global-Warming-Potentiale der OME und DME-Synthese abhängig von der für die Elektrolyse verwendeten Stromquelle (heutiger Strom-Mix oder Wind).

Im Verlauf der restlichen Projektlaufzeit wird die Ökobilanz um weitere Elemente der Prozesskette erweitert, um eine ganzheitliche Betrachtung zu ermöglichen. Bisherige Ergebnisse lassen eine ökologische Konkurrenzfähigkeit der DME-Mobilität unter Einsatz von Windstrom im Bereich der Klimaemissionen vermuten.

Gegenüber der Nutzung des synthetischen Treibstoffs im Transportsektor, erlaubt die Anwendung in stationären Stromerzeugern die Abgasrückführung vor die CO₂-Abtrennung und Abgaswärmenutzung. Die Erzeugung von Spitzenlaststrom mit sehr geringen CO₂-Emissionen scheint möglich. Kohlenstoff wird hier vielfach recycelt. Ein Konzept was in ALIGN-CCUS derzeit intensiv untersucht wird.

6 Zusammenfassung

Der gesellschaftlich angestrebte Wandel der Energie- und Rohstoffversorgung kann nur durch einen ganzheitlichen und alle Sektoren umfassenden Ansatz nachhaltig gelingen. Nachhaltigkeit beinhaltet hier nicht nur den Klimaschutz sondern auch die Bewahrung der Lebensgrundlagen durch gesicherte Versorgung und sozialen Frieden auf Basis ökonomischer Leistbarkeit, Erhalt von Industrie und qualifizierten Arbeitsplätzen sowie Teilhabe an Mobilität und Zugang zu Gütern für alle Bevölkerungsschichten.

Europa und insbesondere auch Deutschland verfügt derzeit über eine sichere, zuverlässige und bezahlbare Energie- und Rohstoffversorgung, welche die Grundlage für qualifizierte Arbeit und Wohlstand bilden. Wenn die Versorgung mit Strom und Energieträgern - wie in Deutschland geplant - zukünftig im Wesentlichen auf fluktuierend einspeisenden

Erneuerbaren Energien beruhen soll, ist eine kurz- und langfristige Energiespeicherung sowie der Transfer von Energieträgern vom Stromsektor in andere Sektoren unumgänglich. Synthetische Kraftstoffe wie DME können hier eine wichtige Rolle einnehmen, um Strom langfristig chemisch zu speichern und dann wahlweise im Energie- oder im Transportsektor eingesetzt zu werden. Speicherung von überschüssiger, das heißt für den direkten Einsatz nicht verwendbarer elektrischer Energie („Überschussstrom“, den es bisher nicht gibt) muss über Sekunden bis hin zu Monaten erfolgen und in riesigen Mengen. Der verbundene Wirkungsgradverlust ist eine immanente Eigenschaft des zukünftigen Versorgungssystems.

Durch den Ansatz von CCU und Sektorenkopplung, die im Rahmen des ALIGN-CCUS-Projekts anhand einer vollständigen CCU-Kette und der Rückverstromung des emissionsarmen Treibstoffs DME demonstriert wird, kann Spitzen- und Reserveleistung oder Wärme bereitgestellt werden. CCU wird zu einem Element der großtechnischen Langzeit-Energiespeicherung, unterstützt die Stabilität des Netzes und reduziert Emissionen im Verkehrssektor. Der Sektoren übergreifende und gesellschaftliche Nutzen der Anwendung von CCU bietet mehr als „nur“ Klimaschutz. Letztendlich werden die politischen Weichenstellungen und die daraus resultierenden regulatorischen Rahmenbedingungen sowie der Ausbau Erneuerbarer Energien für die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten von CCU und Sektorkopplung entscheidend sein.

7 Danksagung

Die hier beschriebenen Arbeiten werden dankenswerterweise durch die Europäische Kommission und das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert (ALIGN CCUS, Projekt Nr. 271501, wird von RVO (NL), FZJ / PtJ (DE), Gassnova (NO), UEFISCDI (RO) und BEIS (UK) finanziert und von der Europäischen Kommission im Rahmen des Horizon 2020-Programms ACT (Accelerating CCUS Technologie) mitfinanziert). Wir danken zudem der DEUTZ AG und der Firma Henkelhausen für die Unterstützung der Arbeiten. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung tragen die Autoren.

LOGO



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

8 Literatur

- [1] "Bundesnetzagentur | SMARD.de".
- [2] P. Moser, G. Wiechers, S. Schmidt, K. Stahl, M. Majid, S. Bosser, A. Heberle, H. Kakihiro, M. Maruyamac, R. Peters, S. Weiske, P. Zapp, S. Troy, B. Lehrheuer, M. Neumann, S. Schaub, J. Vente, J.-P. Pieterse, J. Boon, E. Goetheer, „Demonstrating the CCU-chain and sector coupling as part of ALIGN-CCUS – Dimethyl ether from CO₂ as chemical energy storage, fuel and feedstock for industries“, GHGT14, Oktober 2018 (Online-Veröffentlichung im Social Science Research Network in Vorbereitung).
- [3] „Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland - Daten für die Jahre von 1990 bis 2018“ Stand: August 2019 (endgültige Ergebnisse bis 2017 und vorläufige Daten für 2018), Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
- [4] S. Schmidt, P. Moser, „CO₂-Abtrennung mit Monoethanolamin für braunkohlegefeuerte Kraftwerke“, VGB PowerTech, 12, 2013, 35-41.
- [5] Robinius, M.; Linßen, J.; Grube, T.; Reuß, M.; Stenzel, P.; Syranidis, K.; Kuckertz, P.; Stolten, D.: Comparative Analysis of Infrastructure: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles, Schriften des Forschungszentrum Jülich, Reihe Energie & Umwelt, Band 408, 127 S., Jülich, 2018
- [6] FVV, Energiepfade für den Straßenverkehr der Zukunft, 2019, Frankfurt a. M.
- [7] Schemme, S.; Breuer, J. L.; Köller, M.; Meschede, S.; Walman, F.; Samsun, R. C.; Peters, R.; Stolten, D.: H₂-based synthetic fuels: A techno-economic comparison of alcohol, ether and hydrocarbon production. In: International Journal of Hydrogen Energy (2019).
- [8] Schemme, S.: Techno-ökonomische Bewertung von Verfahren zur Herstellung von Kraftstoffen aus H₂ und CO₂. Dissertation; in Bearbeitung. 2019, RWTH Aachen: Jülich.
- [9] https://www.mwv.de/wp-content/uploads/2019/11/191126_ETR-Studie-Subventionen-fuer-E-Auto-benachteiligen-E-Fuels.pdf.