

Machbarkeitsstudie zur Erzeugung von synthetischem Kerosin aus Zementwerk-Abgasen – CO₂ als Rohstoff für reFuels

Hintergrund

Das Verkehrsministerium Baden-Württemberg ist auf der Grundlage mehrerer Studien zu dem Schluss gekommen, dass sogenannte reFuels – die mit Hilfe von Erneuerbaren Energien erzeugt werden – einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele sein können und eine no-regret-Maßnahme darstellen, da diese Stoffe im Luft-, Schiffs- und Güterverkehr voraussichtlich auch langfristig benötigt werden. reFuels ist ein übergeordneter Begriff für Kraftstoffe, die auf der Grundlage von Erneuerbaren Energien hergestellt werden. Er umfasst Wasserstoff, synthetisch hergestellte Kohlenwasserstoffe und nachhaltige Biokraftstoffe (Advanced Biofuels) im Sinne der Renewable Energy Directive II (RED II).

Im Fazit einer Studie des Wuppertal-Instituts für Greenpeace (April 2019) steht: „Für die Dekarbonisierung des internationalen Flug- und Seeverkehrs sind hingegen kaum Alternativen zu synthetischen Kraftstoffen absehbar. Deshalb sind sie hier bevorzugt einzusetzen. Außerdem sollte in diesen Bereichen Nachfragesteuerung und Verkehrsmittelleffizienz so organisiert werden, dass die globale Nachfrage die nachhaltigen Bereitstellungsoptionen von PtL nicht übersteigt.“

Der Einsatzbereich für reFuels ist aus Sicht des Verkehrsministeriums vor allem im Luftverkehr, Schwerlastverkehr und bei der Schifffahrt gegeben. Daher soll in der vorliegenden Studie vor allem untersucht werden, wie reFuels für Kerosin aus Zementwerk-Abgasen erzeugt werden können.

Aktuell ist der Marktanteil synthetischer Kraftstoffe in Deutschland, Europa und der Welt jedoch noch verschwindend gering und es gibt nur wenige realisierte Anlagen zur Herstellung von reFuels. Voraussetzung für die Zielerreichung ist daher, dass umgehend Investitionssicherheit für den Aufbau der benötigten Kapazitäten und die breite Markteinführung durch regulatorische Rahmensetzungen seitens der europäischen Union und der Mitgliedstaaten geschaffen wird. Nur dann können zeitnah Anlagen errichtet und die Produktion ausgedehnt werden. Dadurch wird gleichzeitig ein hohes Potential an neuen Arbeitsplätzen in Deutschland und Europa erwartet.

Aus Sicht des Verkehrsministeriums sind die Produktionsanlagen für reFuels zumindest im großen Maßstab eher in Südeuropa zu verorten und ggf. in der MENA-Region, da dort die klimatischen Bedingungen, z.B. für PV-Anlagen, ganzjährig konstanter sind. Hier müssten zeitnah Kooperationspartner gesucht werden. Dezentrale kleinere Produktionsanlagen bei Industriestandorten sind auch in Baden-Württemberg/ Deutschland vorstellbar. Voraussetzung ist hierbei ausreichend erneuerbar erzeugter Strom. Nur wenn es gelingt, die erneuerbaren Energien in Baden-Württemberg und in Deutschland flächig auszubauen, könnten reFuels in größerem Umfang in Deutschland produziert werden, da andernfalls der Strombedarf in Konkurrenz zu anderen Verwendungen steht.

Nächste konsequente Schritte wären eine Anpassung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) an die RED II, eine sukzessive ansteigende (Beimisch-)Quote für reFuels. reFuels sollten ein wichtiger Baustein der Klimastrategie im Verkehr der Bundesregierung sein. Hierzu hat das VM im

August 2019 eine Bundesratsinitiative gestartet. Im Rahmen eines reFuels-Programms hat das Verkehrsministerium INERATEC mit einer Machbarkeitsstudie zur Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen aus Zementwerk-Abgasen beauftragt.

Zusammenfassung

CO₂ aus Zement als Rohstoff

In der Herstellung von Zement fällt prozessbedingt CO₂ an. Will man auf den Werkstoff Zement nicht verzichten, wird man dieses CO₂ auch in Zukunft nicht realistisch vermeiden können. Daher gelten Zementwerke auch in Szenarien, die eine weitgehende Entkopplung der Energieerzeugung sowie aller industriellen Prozesse von fossilen Rohstoffen annehmen, immer noch als maßgebliche Quelle für CO₂. Im Vergleich zur ebenfalls möglichen direkten Abtrennung von CO₂ aus der Luft, ist die Nutzung einer solchen unvermeidlichen CO₂-Punktquelle deshalb zu bevorzugen, weil die großtechnische Machbarkeit bereits heute gegeben ist. Gleichzeitig ermöglichen die höheren CO₂-Konzentrationen einer Punktquelle eine bessere Energieeffizienz in der Abtrennung und damit geringere Investitions- sowie Betriebskosten. Wie dies realistisch nutzbar gemacht werden könnte, soll die vorliegende Machbarkeitsstudie zeigen. Spezieller Fokus wird auf die Nutzung der Zementwerk-Abgase als Ausgasstoffe für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen (insbesondere Kerosin) gelegt. 50% der Treibhausgasemissionen aus der Luftfahrt können potenziell durch den Einsatz von reFuels vermieden werden (Power-to-Liquids: Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel, P. Schmidt, W. Weindorf, A. Roth, V. Batteiger, F. Riegel (2016), Hrsg. Umweltbundesamt; 60% CO₂ aus rohstoffbedingten Emissionen, 80% CO₂-Neutralität des erzeugten reFuels). Neben der Nutzung von Zementwerk-Abgasen wird auch der Einsatz von Direct Air Capture (DAC)-Verfahren mit einbezogen, bei denen CO₂ mithilfe von Absorption aus der Umgebungsluft abgeschieden wird. Diese Technologie kann trotz höherem Energieaufwand in Zukunft einen signifikanten Beitrag zur Defossilisierung beitragen. Im Hinblick auf die Klimaziele sind beide Pfade zu verfolgen. So wie im Verkehrssektor generell jede Möglichkeit zur CO₂-Reduktion genutzt werden muss, da dieser trotz aller Maßnahmen im Umweltverbund bislang noch nicht einmal eine Trendwende erreicht hat. In Baden-Württemberg wird der Verkehrssektor das Klimaziel von minus 20-25 Prozent bis zum Jahr 2020 gegenüber 1990 nicht erreichen, sondern steuert auf ein Plus von 13 Prozent zu (Monitoring-Kurzbericht 2018, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, S.42).

Die Zusammensetzung des Abgases eines Zementwerks wird derzeit vor allem durch die Prozessbedingungen sowie die Regularien des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) bestimmt. Die Hauptbestandteile der (trockenen) Gase sind N₂ (~70%), CO₂ (~20%), sowie O₂ (~10%). Daneben liegen in kleineren Mengen die Gase H₂ und CO sowie verschiedene organische und anorganische Spurenstoffe vor. Um die Abgase eines Zementwerks für eine chemische Umsetzung nutzbar zu machen, wird eine chemische und physikalische Aufbereitung benötigt. Diese muss zwei Ziele verfolgen: Zum einen muss die CO₂-Konzentration dabei so weit wie möglich erhöht werden, um die Effizienz der nachgeschalteten Prozesse zu erhöhen. Zum anderen müssen potenzielle Katalysatortgifte (z.B. Schwefel (<500 ppb) oder Quecksilber (<50 ppb)) und andere störende Inhaltsstoffe

(wie z.B. Teer oder Staub (je $<1 \text{ mg/m}^3$)) entfernt werden. Für die Aufbereitung von Zementwerk-Abgasen kommt eine Kombination aus druck- und/oder temperaturabhängiger Adsorption, Gaswäsche und CO_2 -Verflüssigung in Frage.

Vorgehensweise

Um aus dem aufbereiteten CO_2 einen speicher- und transportierbaren Rohstoff zu machen, kann dieser mithilfe von (grünem) H_2 in Synthesegas und im nächsten Schritt in der Fischer-Tropsch-Synthese (FT) in flüssige und feste Energieträger umgewandelt werden. Eine entsprechende Prozesskette bestünde aus einer Aufreinigung des Abgasstroms aus dem Hauptkamin des Zementwerks, einer H_2O -Elektrolyse zur H_2 -Herstellung sowie einer Synthese-Anlage zur Herstellung der Kraftstoffe.

In der FT-Synthese entstehen als Produkte in etwa gleichen Teilen Naphtha, Diesel (je ca. 30%) und Wachse (ca. 40%). Aus diesen Grundstoffen kann durch entsprechende Aufbereitung normkonformer Kraftstoff gewonnen werden. Dabei sind verschiedene Qualitätsanforderungen für die jeweiligen Kraftstoffe zu betrachten: Kerosin ASTM D7655 und ASTM D1655, Benzin EN228, Diesel EN15940 sowie EN590. Vor allem der Diesel nach Norm EN15940 ist bereits heute direkt als Drop-in-fähige Lösung vor Ort nutzbar. Die hier genannten FT-Produkte sind direkte synthetische Alternativen zu fossilen Stoffen, wie sie derzeit im großen Maßstab in der chemischen Industrie als Grundstoffe eingesetzt werden. Die synthetischen Produkte können diese daher in den vorhandenen Infrastrukturen ersetzen und so die jeweiligen Prozesse erneuerbar machen.

Jeder der genannten Prozessschritte ist für sich genommen bereits in relevanten Maßstäben verfügbar, jedoch ist die Kombination der einzelnen Verfahren so weltweit noch nie gezeigt worden. Die Realisierung einer solchen Prozesskette im großindustriellen Maßstab bringt gewisse Herausforderungen mit sich. Daher wird ein schnell zu realisierendes Demonstrationsprojekt im kleineren Maßstab angestrebt. Eine sinnvolle Größenordnung hierfür wäre die Herstellung von 1000 l synthetischem Kraftstoff pro Tag. Dieses Projekt soll im Idealfall innerhalb eines Jahres realisiert werden. Ziel ist es, die technische Machbarkeit des Ansatzes zu zeigen und in der Öffentlichkeit die notwendige breite Akzeptanz zu schaffen. So sollen etwaige technische, ökologische und ökonomische Risiken identifiziert und vermindert werden, während unter realen Bedingungen gezeigt wird, dass aus Abgasen synthetische Kraftstoffe entstehen können und gleichzeitig Betriebserfahrung gewonnen wird. Letztere kann dann als Grundlage für eine Lernkurve in der Hochskalierung eines modularen Ansatzes dienen.

Alternativ zur Aufbereitung der Abgase kann das CO_2 mit der DAC-Technologie auch direkt aus der Luft entnommen werden. Aufgrund der heute noch vergleichsweise hohen Investitionskosten zur Bereitstellung des gesamten CO_2 -Bedarfs einer PtL-Anlage wird eine Kombination beider Prozessrouten betrachtet. Mit deutlich weniger Aufwand könnte ein einzelnes DAC-Modul integriert werden, um einen Anteil des benötigten CO_2 aus der Luft parallel zu dem aufbereiteten CO_2 aus einem Zementwerk bereitzustellen. Für die PtL-Anlage selbst ist es aus technischer Sicht gleichgültig, welcher Quelle das CO_2 entstammt.

Prozesskette

Die beschriebene Prozesskette zur Nutzung von Zementwerk-Abgasen besteht aus Einzelschritten, die teilweise räumlich getrennt stehen könnten. Zusätzlich ermöglicht die für die CO₂-Aufbereitung notwendige Verflüssigung des Gases eine Zwischenspeicherung und anschließenden Transport desselben vor der Umwandlung in Kraftstoffe. Dabei fallen die Speicherung und der Transport des CO₂ innerhalb der Wertschöpfungskette nicht signifikant ins Gewicht. Daraus ergeben sich vier unterschiedliche Konfigurationen, wie eine PtL-Prozesskette aussehen könnte:

- Fall 1: CO₂-, Stromquelle sowie PtL-Anlage in räumlicher Nähe
- Fall 2: Stromquelle getrennt von CO₂-Quelle und PtL-Anlage
- Fall 3: CO₂-Quelle getrennt von Stromquelle und PtL-Anlage
- Fall 4: PtL-Anlage getrennt von CO₂-Quelle und Stromquelle

In Baden-Württemberg ist der ideale Fall 1, dass sich eine ausreichende Quelle erneuerbarer Energie in direkter Nähe eines Zementwerks befindet, nicht gegeben. Für ein Demonstrationsprojekt wurden daher die Konfigurationen der Fälle 2-4 evaluiert.

In Fall 2 würde man die gesamte Prozesskette an einem Zementwerk aufbauen und demonstrieren. Dadurch würde der Transport für CO₂ entfallen. Für Fall 3 würde die PtL-Anlage inklusive der Elektrolyse als stromintensivster Schritt an einer Quelle für erneuerbaren Strom errichtet werden. Um die benötigten Betriebsstunden realisieren zu können, sollte diese Quelle idealerweise ein Wasserkraftwerk sein, welches kontinuierlich erneuerbaren Strom zur Verfügung stellen kann. Dadurch kann ein attraktiver Strompreis, wie er am Gesteungsort anfällt, für die Demonstration genutzt werden. Im Fall 4 kann man den Aufstellungsort für die PtL-Anlage anhand der Öffentlichkeitswirksamkeit auswählen, um das Bewusstsein für die Möglichkeiten dieser Technologie zu steigern. Ein geeigneter Ort hierfür wäre der Flughafen Stuttgart. Für die Fälle 3 und 4 erfolgt die CO₂ Abscheidung und Aufbereitung am Zementwerk entsprechend räumlich getrennt von der PtL-Anlage. Eine Lieferkette mit CO₂ kann aufgrund bestehender Infrastruktur ohne deutliche Mehrkosten etabliert werden. Die Abtrennung von CO₂ aus der Luft mittels DAC-Moduls wäre in allen Fällen in direkter räumlicher Nähe zu der PtL-Anlage zu realisieren.

Standortvergleich und weiteres Vorgehen

Abschließender Bestandteil der vorliegenden Studie war ein Vergleich verschiedener Zementwerke als Standort für den genannten Demonstrator. In direktem Austausch mit allen Betreibern von baden-württembergischen Zementwerken wurden die benötigten Daten gesammelt und ausgewertet. Die betrachteten Kriterien für einen solchen Demonstrator beinhalten unter anderem den verfügbaren Flächenbedarf, die Zusammensetzung des Abgases und die Anbindung an Bahnverbindungen, um einen möglichen Transport von CO₂ über die Straße zu vermeiden. Die von den Zementwerksbetreibern vorgeschlagenen Werke in Allmendingen (SCHWENK Zement KG), Dotternhausen (Holcim (Deutschland) GmbH), Schelklingen (HeidelbergCement AG) und Wössingen (OPTERRA GmbH) konnten als potenziell geeignete Standorte für einen oben beschriebenen Demonstrator



identifiziert werden. Sollte eine Demonstration des gesamten Prozessverbundes an einem einzelnen Standort realisiert werden (Fall 2), so ist nach dem derzeitigen Stand das Werk der Firma SCHWENK Zement AG in Allmendingen zu empfehlen, da hier in direkter Nähe zum Hauptkamin das größte Flächenangebot zur Verfügung steht. Gleichzeitig haben alle Zementwerke unabhängig voneinander ihr großes Interesse an der Thematik bekundet. An allen Standorten könnte eine Realisierung des Demonstrators mit vertretbarem und vergleichbarem Aufwand durchgeführt werden. Mit dem CO₂ eines größeren Zementwerks könnte theoretisch der Kerosinbedarf des Flughafens Stuttgart gedeckt werden. Dort wird derzeit im seit August 2019 laufenden Projekt SAF in BW (sustainable aviation fuel) geprüft, wie der Flughafen rasch auf nachhaltiges Kerosin umstellen kann.

Nach dem erfolgreichen Abschluss einer Demonstration der Nutzung von Zementwerk-Abgasen für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen wird der nächste Schritt die vollständige Abgasnutzung eines Zementwerks sein. Hierfür wären prinzipiell alle in dieser Studie untersuchten Zementwerke geeignet. Dabei ist zu beachten, dass vor allem für die Herstellung des H₂ enorme Mengen an erneuerbarer Energie benötigt werden. Deren Bereitstellung kann nach dem derzeitigen Stand der Forschung in Deutschland nur in einer dezentralen Infrastruktur realisiert werden. Gleichzeitig ist der Transport oder die Speicherung von H₂ technisch wesentlich aufwendiger als von CO₂. Entsprechend ist in einem industriellen Maßstab davon auszugehen, dass die Abtrennung von CO₂ zentral am Zementwerk geschehen wird. Im Anschluss sollte das CO₂ auf mehrere dezentrale PtL-Anlagen, die direkt an den Quellen des erneuerbaren Stroms stehen, verteilt und mit dem dort erzeugten H₂ umgesetzt werden. Auf diese Weise wären auch fluktuierende Stromquellen sinnvoll nutzbar, da (Flüssig-) Speicher für CO₂ an den Umwandlungsstellen implementiert wären und dieses so bei Verfügbarkeit von H₂ umgesetzt werden kann. Bei einer notwendigen weiteren Skalierung sind Standorte mit besseren Bedingungen für erneuerbaren Strom zu bevorzugen (Südeuropa, Nordafrika).

Ansprechpartner/in im Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg:
Dr. Monika Herrmann, Abteilung Nachhaltige Mobilität,
Referat 41: Grundsatz, Klimaschutz, Digitalisierung und
Europa, E-Mail: Monika.Herrmann@vm.bwl.de
Rainer Gessler, Referat 42: Elektromobilität und Fahrzeuginnovation,
E-Mail: Rainer.Gessler@vm.bwl.de