

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Abschlussbericht

Teil I und II

**Innovationsraum: BioBall – AbZuMeOH –
Abfall zu Methanol (Teilprojekt C) – Umsetzungs-
phase**

Abschlussbericht der Infraseriv GmbH & Co. Höchst KG
Dipl.-Ing. Elmar Horn, Prof. Dr. Thomas Bayer

Förderkennzeichen 031B1072C

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 031B1072C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

I.	Teil I – Kurzbericht.....	3
II.	Teil II – Eingehende Darstellung.....	6
1.	Einleitung	6
2.	Aufgabenstellung.....	7
2.1	Innovationsraum Bioökonomie im Ballungsraum (BioBall).....	7
2.2	Vorhabenbeschreibung	8
2.3	Teilprojekt Infraseriv Höchst	9
3.	Erzielte Ergebnisse	10
3.1	CO ₂ -Abscheidung.....	10
3.2	Methanolsynthese	12
3.3	Supportanlagen und Standortanalyse.....	14
3.4	Prozessevaluierung	19
4.	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten	21
5.	Verwertungsplan	22
6.	Während der Durchführung des Projektes bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet.....	22
7.	Geplante und erfolgte Veröffentlichungen.....	23

I. Teil I – Kurzbericht

Das Projekt *Abfall zu Methanol (AbZuMeOH)* gehört zum Innovationsraum BioBall, der sich mit der stofflichen Nutzung von biogenen Stoff- und Abfallströmen in der Metropolregion Frankfurt und Rhein-Main beschäftigt. Das Gesamtziel des Verbundvorhabens *AbZuMeOH* war es, für die Bioökonomie das Potential der stofflichen Nutzung des bei der Verbrennung von (biogenen) Abfällen sowie des bei der Herstellung von gebranntem Kalk (unvermeidbar) entstehenden Kohlendioxids zur Methanolsynthese zu untersuchen. Das anfallende CO₂ ist hierbei aus den jeweiligen Abgasströmen zu isolieren und der katalytischen Methanolsynthese in der erforderlichen Reinheit zur Verfügung zu stellen. Der für diese Synthese notwendige Wasserstoff soll über Elektrolyse von Wasser bereitgestellt werden, wobei der dafür erforderliche Strom teils aus der thermischen Behandlung der biogenen Abfälle gewonnen und teils durch Strom aus erneuerbaren Energien ergänzt wird (grüner Wasserstoff). Ziel ist es, Methanol nach abschließender Aufarbeitung in der handelsüblichen Spezifikation (IMPCA-Qualität) bereitzustellen. Dies würde neben dem Einsatz als erneuerbarer Kraftstoff auch den Einsatz in der chemischen Industrie ermöglichen und dort die Substitution fossiler Rohstoffe bei der Produktion langlebiger Wirtschaftsgüter wie Kunststoffen ermöglichen.

Das Verbundvorhaben *AbZuMeOH* bestand aus den vier Projektpartnern bse Methanol GmbH (BSE), Infraserv GmbH & Co. Höchst KG (ISH), SCHAEFER KALK GmbH & Co. KG (SK) und Provadis School of International Management and Technology AG (PHS). SK ist drittgrößter Kalkproduzent Deutschlands mit Standorten in Hahnstätten und Steeden. Da beim Brennen von Kalkstein (CaCO₃) CO₂ direkt aus dem Gestein freigesetzt wird, sind 65 bis 85 % der CO₂-Emissionen unvermeidbar. Als Standortbetreiber des Industrieparks Höchst betreibt ISH vor Ort u.a. Abfallverbrennungsanlagen. In der Ersatzbrennstoffverbrennungsanlage (EVA) fallen über 500.000 Tonnen CO₂ pro Jahr an, von denen, aufgrund des Inputmaterials, fast die Hälfte biogenen Ursprungs sind. BSE ist Verfahrens- und Lizenzgeber für die MeOH-Synthese aus CO₂ und elektrolysestämmigen Wasserstoff.

Etlche Arbeiten zu Carbon Capture Utilization (CCU) Projekten zur MeOH-Herstellung aus CO₂ basieren auf Simulationsdaten, beschränken sich auf Verfahrensausschnitte oder entweder nur auf die ökonomischen bzw. nur die ökologischen Aspekte. Diese Arbeit befasst sich mit der Nutzung vorhandener Abgasströme auf Basis realer Messwerte und betrachtet neben der CO₂-Isolation eine mögliche Integration der Downstream-Anwendung in einen vorhandenen Standort. Die Verbrauchs- und Investitionszahlen der einzelnen Prozesseinheiten kamen von der Verfahrensgebern, d.h. basierten auf Erfahrungen in kommerziellen Anlagen oder Pilotversuchen. Entsprechende logistische Aufwände für CO₂ wurden berücksichtigt. Somit

wurde die gesamte Prozesskette beleuchtet (s. Abbildung 1). Zur Prozessevaluierung wurde eine Techno-ökonomische Analyse (TEA) und ein Life-Cycle-Assessment (LCA) im Gradle-to-Gate Ansatz durchgeführt sowie die Akzeptanz von so hergestelltem MeOH mit Kunden diskutiert.

Die technische Machbarkeit des untersuchten Konzeptes zur Herstellung von Methanol aus CO₂ und mittels Elektrolyse erzeugtem grünem H₂ konnte im Projekt gezeigt werden. Für die Umsetzung eines solchen Vorhabens ist eine Abscheidung des CO₂ an Punktquellen mit etablierten Technologien wie der Aminwäsche und dessen Transport zu Standorten mit einer Infrastruktur für chemische Anlagen ökonomisch von Vorteil, da dies die ohnehin hohen Investitionskosten nicht noch weiter durch Infrastrukturmaßnahmen belastet. An diesen Standorten ist eine umfangreiche Hilfsmittelversorgung bzw. Nebenstromverwertung sichergestellt, wie sie beispielsweise am Standort Industriepark Höchst gegeben ist.

Kurzfristig bietet sich in Deutschland für den Transport großer CO₂-Mengen derzeit nur die Straße oder wo verfügbar die Schiene an.

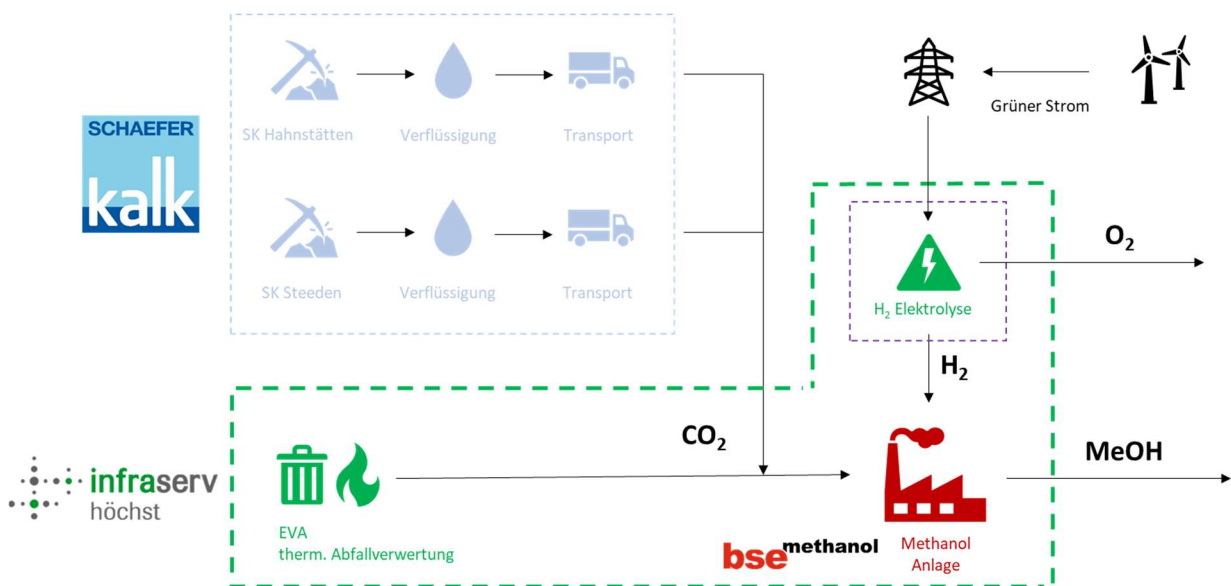


Abbildung 1: Beteiligte Standorte und Stoffströme des Verbundprojekts AbZuMeOH

Die Herstellungskosten von CO₂-basiertem Methanol werden maßgeblich durch die H₂-Bereitstellung dominiert, weswegen eine wirtschaftlich erfolgreiche Umsetzung solcher Power-to-Methanol-Konzepte maßgeblich dort gegeben ist, wo günstig erneuerbarer Strom verfügbar ist. Die LCA-Ergebnisse zeigten deutlich, dass ausschließlich mit der Nutzung von fast 100 % EE-Strom eine bessere Treibhausgasbilanz im Vergleich zur fossilen Herstellung von Methanol gegeben ist.

Die Abschätzung der Herstellkosten zeigte zudem, dass auch unter den günstigsten getroffenen Annahmen, die Herstellkosten für fossiles Methanol unter den gegenwärtigen Randbedingungen nicht annähernd erreicht werden. Nicht benötigte CO₂-Zertifikate wurden nicht bei der ökonomischen Betrachtung berücksichtigt, da CCU-Maßnahmen nach der seinerzeit geltenden Gesetzgebung nicht als treibhausgasmindernd angesehen werden konnten (mit Ausnahme von atmosphärischem CO₂). Um Vorhaben wie AbZuMeOH in Deutschland zu realisieren, sind daher die regulatorischen Rahmenbedingungen entsprechend zu gestalten. Die Berücksichtigung von nicht benötigten Zertifikaten für nicht emittiertes CO₂ beeinflusste die Herstellkosten erheblich: so verringerten sich die Herstellkosten für e-Methanol um ca. 137 € t_{MeOH}⁻¹ pro 100 € t_{CO2}⁻¹ Zertifikatskosten. Ab Zertifikatspreisen von 250 € t_{CO2}⁻¹ wurden unter günstigen Annahmen Herstellkosten erreicht, die gegenüber fossilem Methanol wettbewerbsfähig waren. Ohne solche ausgleichenden Maßnahmen besteht kein wirtschaftlicher Anreiz, solche Projekte in Deutschland umzusetzen. Um Methanol und Folgeprodukte nach dem skizzierten Prozess international wettbewerbsfähig herzustellen, ist es zudem erforderlich, dass ausreichend und kostengünstig EE-Strom bzw. H₂ zur Verfügung steht. Für eine globale Wettbewerbsfähigkeit sollte das Ziel sein, Strom in Deutschland für die industrielle Nutzung von ca. 40 € MWh⁻¹ bereitzustellen, was beispielsweise über Subventionen erreichbar ist. Standortnachteile könnten so kompensiert und eine Verlagerung energieintensiver Industrien in preisgünstigere Regionen vermieden werden. Zudem ist parallel ein Ausbau der EE-Strom-Versorgung sowie der Netzkapazitäten notwendig, um entsprechende Mengen EE-Strom an den Verbraucherstandorten zur Verfügung zu stellen. Für das skizzierte Vorhaben wäre unter günstigen Bedingungen eine zusätzliche elektrische Anschlussleistung von ca. 300 MW im Industriepark Höchst erforderlich, die auf absehbare Zeit nicht verfügbar ist.

II. Teil II – Eingehende Darstellung

1. Einleitung

Das Projekt AbZuMeOH – Abfall zu Methanol – wurde im Rahmen der Fördermaßnahme Innovationsräume Bioökonomie im Förderbereich Umsetzungsphase im Innovationsraum Bioökonomie im Ballungsraum (BioBall) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung über den Projektträger Jülich gefördert.

Kooperationspartner des Verbundvorhabens sind:

- bse Methanol GmbH (Koordinator)
- SCHAEFER KALK GmbH & Co. Kommanditgesellschaft
- Provadis School of International Management and Technology AG

Für den Partner Infraserv GmbH & Co. Höchst KG (Infraserv Höchst) sowie die Partner SCHAEFER KALK GmbH & Co. KG und Provadis School of International Management and Technology AG wurde das Projekt vom 01. Januar 2021 bis zum 31. Dezember 2023 gefördert.

Der Projektpartner bse Methanol GmbH hat das Projekt kostenneutral bis zum 31. Dezember 2025 verlängert.

Dieser Abschlussbericht umfasst die Arbeiten und Ergebnisse im Verbundprojekt bis Ende Dezember 2023.

2. Aufgabenstellung

2.1 Innovationsraum Bioökonomie im Ballungsraum (BioBall)

Der Innovationsraum Bioökonomie im Ballungsraum (BioBall) wurde 2019 zur Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung ausgewählt.

BioBall¹ versteht sich als Treiber des Strukturwandels zu einer nachhaltigen, biobasierten Wirtschaft - und zwar unter den spezifischen Bedingungen einer dicht besiedelten und industrialisierten Metropolregion. Dort sollen bisher kaum oder gar nicht stofflich verwertete Stoffströme so erschlossen werden, dass biobasierte Stoffkreisläufe geschlossen und zugleich eine höhere Wertschöpfung erreicht werden kann.

Biogene Ressourcen entstammen derzeit vor allem der Landwirtschaft. Die dort produzierte Biomasse muss jedoch in Zukunft noch stärker als bisher primär der Ernährung dienen. Der angestrebte Rohstoffwandel von fossilen zu biogenen Ressourcen darf also keinesfalls auf biogene Rohstoffe der ersten Generation setzen, um aus ihnen neben Lebens- und Futtermitteln Chemikalien, Fasern, Kunst- und Treibstoffe sowie Energie zu gewinnen. Vielmehr kann dieser Wandel nur dann nachhaltig gelingen, wenn er auf biogenen Rohstoffen der zweiten bis vierten Generation aufbaut. Die zweite Generation umfasst die nicht-essbaren Anteile landwirtschaftlicher Biomasse (z.B. Stroh, Beerentrester). Die dritte Generation entstammt organischen Reststoff- und Abfallströmen (z.B. kommunaler Grünschnitt, Lignin aus der Papierindustrie), die vierte schließlich gasförmige Kohlenstoffquellen wie Synthesegas (CO , H_2), CO_2 oder CH_4 .

Bisher werden diese Stoffströme ohne relevante Wertschöpfung, unvollständig oder gar nicht verwertet. Gleiches gilt für nicht vermeidbare Emissionen von CO_2 z.B. aus der Kalkherstellung. Zur Vermeidung des Einsatzes von fossilen Rohstoffen in der chemischen Industrie könnten nicht vermeidbares und biogenes CO_2 als Rohstoff für die Herstellung von chemischen Basischemikalien dienen.

Auf diesen und weiteren Ansätzen sowie den Infrastrukturen und Netzwerken der Metropolregion aufbauend, wurde das Projekt AbZuMeOH entwickelt, um die Nutzbarkeit von biogenem und nicht vermeidbarem CO_2 zur Herstellung der Basischemikalie Methanol zu untersuchen.

¹ Konzept für den Innovationsraum BioBall vom August 2018

2.2 Vorhabenbeschreibung

Das Gesamtziel des Verbundvorhabens AbZuMeOH war es, für die Bioökonomie das Potential der stofflichen Nutzung des bei der Verbrennung von (biogenen) Abfällen sowie des bei der Herstellung von gebranntem Kalk (unvermeidbar) entstehenden Kohlendioxids zur Methanolsynthese zu untersuchen. Das dezentral anfallende CO₂ ist hierbei aus den jeweiligen Abgasströmen abzutrennen und der katalytischen Methanolsynthese in der erforderlichen Reinheit zur Verfügung zu stellen.

Der für die Methanolsynthese notwendige Wasserstoff soll über Elektrolyse von Wasser bereitgestellt werden, wobei der dafür erforderliche Strom teils aus der thermischen Behandlung der biogenen Abfälle gewonnen und teils durch Strom aus erneuerbaren Energien ergänzt wird (grüner Wasserstoff). Sauerstoff der dabei als Koppelprodukt anfällt, kann in der thermischen Abfallbehandlung oder der Kalkherstellung vorteilhaft eingesetzt werden oder abhängig vom Standort anderen Verbrauchern zur Verfügung gestellt werden. Ziel ist es das Methanol nach abschließender Aufarbeitung in einer Reinheit zu erhalten, die die Spezifikation als Rohstoff für die chemische Industrie erfüllt (IMPCA-Qualität) und somit den Einsatz bei der Produktion langlebiger Wirtschaftsgüter wie technischen Kunststoffen oder Baustoffen ermöglicht. Die Verschaltung der einzelnen Prozessschritte ist in Abb. 2 skizziert.

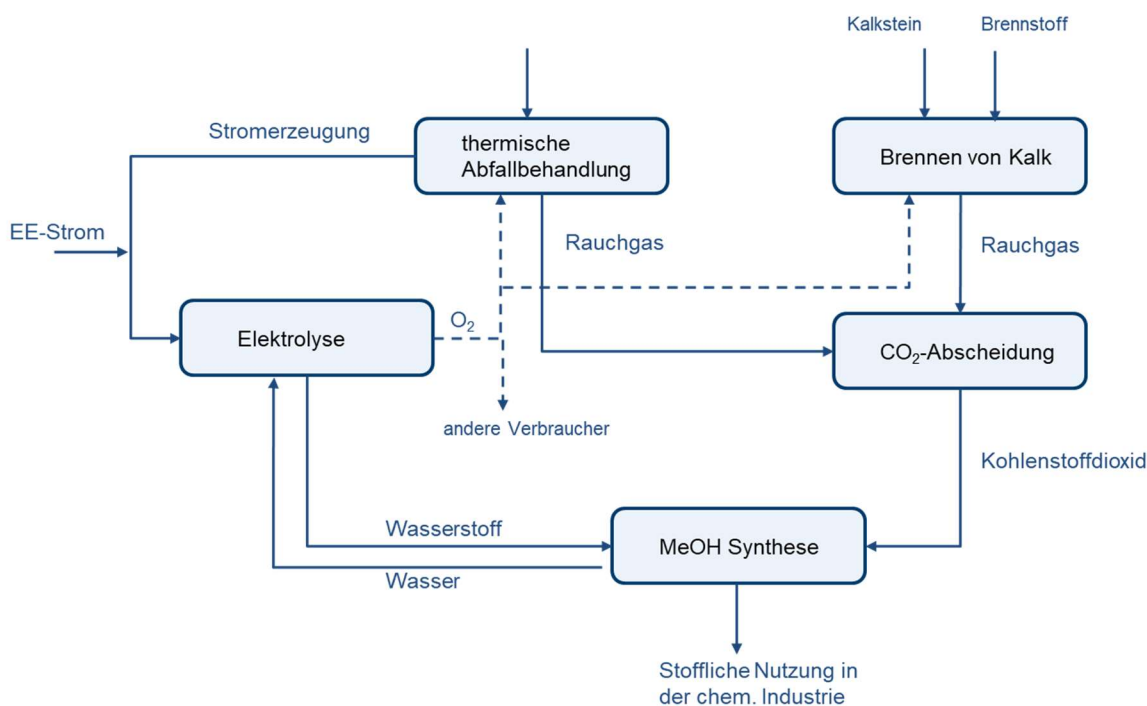


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung des Projektvorhabens von den Ausgangsstoffen zum Zielprodukt Methanol

2.3 Teilprojekt Infraserv Höchst

Das Teilprojekt der Infraserv Höchst umfasst mehrere Einzelaktivitäten, welche in verschiedene Arbeitsschritte und -pakete einfließen. Wesentliche Arbeitsinhalte betreffen:

- CO₂-Abscheidung (AP 1)
 - Technologieübersicht CO₂-Abscheidung und -aufkonzentrierung (AS 1.1)
Unterstützung Technologieübersicht (A 1.1.3)
 - Technologieübersicht CO₂-Abscheidung und –aufkonzentrierung (AS 1.2)
Identifikation CO₂-Ströme und Qualitäten aus Verbrennungsanlagen (A 1.2.2)
 - Festlegung Abscheidetechnologie (AS 1.3)
Festlegung Technologie, Auslegung für Verbrennungsanlage und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (A 1.3.2)
- Methanolsynthese (AP 2)
 - Standortintegration (AS 2.2)
Zuarbeit Daten zu CO₂ und Standort Industriepark Höchst (A 2.2.4)
- Supportanlagen und Standortanalyse (AP 3)
 - Erfassung der standortspezifischen Bedingungen (AS 3.1)
Industriepark Höchst (A 3.1.1)
 - Übersicht Methanolabnehmer und Vermarktungskonzept (AS 3.2)
Industriepark Höchst (A 3.2.1)
 - Einbindung Gesamtprozess in Standort (AS 3.3)
Industriepark Höchst (A 3.3.1)
- Prozessevaluierung (AP 4)
 - Übertragbarkeit des Gesamtkonzepts auf andere Standorte (AS 4.2)
Evaluierung anzupassender Parameter (A 4.2.2.)
 - Zusammenführung der Ergebnisse (AS 4.3)
Zuarbeit zur Zusammenführung der Ergebnisse (A 4.3.4)

3. Erzielte Ergebnisse

3.1 CO₂-Abscheidung

Infraserv Höchst hat bei der Recherche und verfahrenstechnischen Bewertung verschiedener CO₂-Abscheidetechnologien (siehe Abb. 3) unterstützt.

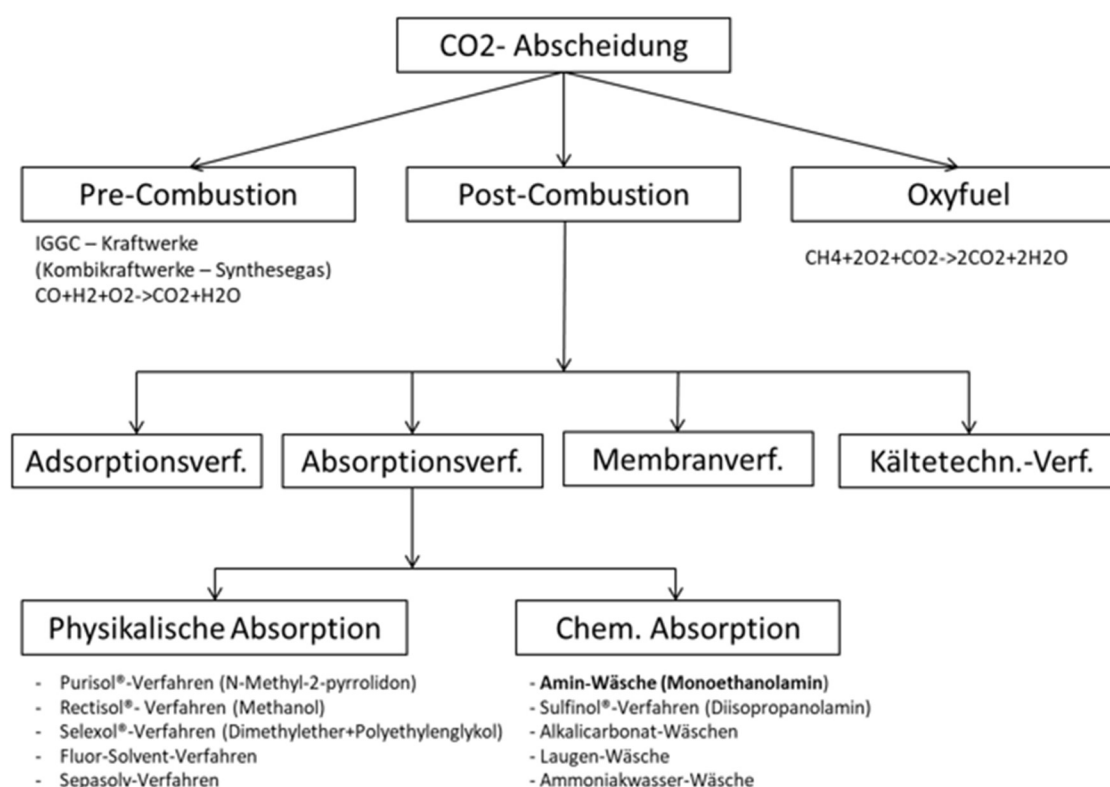


Abbildung 3: CO₂-Abscheidung - Technologieübersicht

Im Rahmen des Vorhabens wurde gemeinsam eine Analyse der unterschiedlichen Verfahren hinsichtlich der Eignung für den betrachteten Anwendungsfall vorgenommen. Der Fokus wurde ausschließlich auf Post-Combustion-Verfahren gelegt, da diese in bestehende Anlagen ohne Änderung der bestehenden Prozesse nachgerüstet werden können. Aufgrund des Reifegrads der Technologien und der angestrebten Anlagengröße kommen generell Absorptionsverfahren (Wäschen) in Betracht. Die physikalischen Wäschen (z. B. Selexol, Rectisol-Verfahren) werden zwar in großtechnischen Anlagen eingesetzt, sind aber erst bei hohen CO₂-Konzentrationen wirtschaftlich.

Infraserv Höchst hat die CO₂-Ströme der Verbrennungsanlagen im Industriepark Höchst betrachtet und Qualitäten bewertet (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: CO₂-Ströme aus Verbrennungsanlagen im Industriepark Höchst

Anlage	Output [kt / a]	CO ₂ -Anteil [Vol.%]
Ersatzbrennstoffverbrennungsanlage (EVA) der Thermal Conversion Compound Industriepark Höchst GmbH (T2C)	ca. 534.000	9
Klärschlammverbrennungsanlage (KVA) der Infraser serv GmbH & Co. Höchst KG (ISH)	ca. 120.000	9
Rückstandsverbrennungsanlage (RVA) der Infraser serv GmbH & Co. Höchst KG (ISH)	ca. 68.000	7
Summe	ca. 722.000	

In Summe werden jährlich über 700.000 Tonnen CO₂ aus den drei Entsorgungsanlagen im IPH in die Atmosphäre abgegeben. Teile dieser CO₂-Ströme sind aus biologischen Abfällen und damit als „grün“ anzusehen.

Zur EVA wurden Veränderungen nachgereicht, ca. 47 % der Energieerzeugung ist mittlerweile als nachhaltig zertifiziert. Das könnte auch auf die CO₂-Emissionen übertragen werden, so dass ggf. negative Emissionen in die Methanolherstellung eingebracht werden können, sofern dies zukünftige rechtliche Regelungen zulassen.

Anhand der Beschaffenheit der Rauchgase sowie der Massenströme wurde für die Ersatzbrennstoffverbrennungsanlage in Höchst von einem etablierten Anlagenbauer eine Aminwäsche als am geeignetsten eingestuft und eine Grobauslegung für beide Standorte durchgeführt, auf die in dieser Arbeit zurückgegriffen wird.

Das Verfahren der Aminwäsche ist technisch ausgereift und wird in verschiedenen Industrien (Biogasaufbereitung, Rauchgasaufbereitung) eingesetzt.

Für die katalytische Herstellung von MeOH ist CO₂ mit hoher Reinheit erforderlich. Insbesondere für die Abscheidung von CO₂ aus Abfallverbrennungsanlagen sind die besonderen Rahmenbedingungen der Abgaszusammensetzung zu berücksichtigen, da je nach zu verbrennenden Abfällen unterschiedliche Verunreinigungen (z.B. SO₂, HCl) in unterschiedlichen Anteilen vorliegen können. Der hohe Reinheitsgrad des abgeschiedenen CO₂ aus der Aminwäsche deckt sich mit den Güteanforderungen des Katalysators der Methanolsynthese und ist

somit bestens geeignet. Eine Aminwäsche wird bereits seit ca. 10 Jahren im Industriepark Höchst zur Abtrennung von CO₂ aus Biogas zur Herstellung von BioMethan eingesetzt, welches in das deutsche Erdgasnetz eingespeist wird.

Weiterhin erfordern die milden Prozessbedingungen der Aminwäsche keine besonderen Anforderungen hinsichtlich eines gesicherten Anlagenbetriebes bzw. einer aufwändigen Produktaufbereitung (z. B. Druckerhöhung). Der Prozess liefert aufgereinigtes CO₂ als Gasstrom mit einer Reinheit >99,95 Vol.-%. Etwa 90 % des Kohlenstoffdioxids im Rauchgas werden so abgetrennt, während 10 % als Schlupf weiterhin in die Atmosphäre entweichen.

Vom Projektpartner SCHAEFER KALK wurde ein Angebot für eine Aminwäsche eingeholt. Die Investitions- und Betriebskosten gehen in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ein.

Alternativ wurde auch das Carbonate-Looping-Verfahren betrachtet. Hierfür wurde eine erste Kostenabschätzung für die Errichtung einer solchen Anlage im Industriepark Höchst durchgeführt und den Projektpartnern vorgestellt. Das Verfahren ist allerdings noch nicht im industriellen Einsatz.

Die Ergebnisse sind in Projekttreffen mit den Partnern diskutiert worden und die Aminwäsche wurde als Technologie ausgewählt.

3.2 Methanolsynthese

Methanol ist mit einem Marktvolumen von ca. 100 Mio.t/a eine der wichtigen Basischemikalien. Es wird heute fast ausschließlich aus Erdgas und Kohle hergestellt. Der Marktanteil von "grünem" Methanol ist derzeit noch sehr gering (< 1 %) und wird aktuell nur mit Methanol aus nachwachsenden Rohstoffen bedient. Die Bezeichnung „grünes“ Methanol umfasst Bio-Methanol aus nachwachsenden Rohstoffen und sog. e-MeOH, welches aus CO₂ und grünem Wasserstoff hergestellt wird. Der Marktpreis für fossiles Methanol ist vom Preis für Erdgas abhängig und liegt in der Regel zwischen 300 – 600 Euro pro Tonne.

Die Qualität wird international gemeinsam durch Hersteller, Nutzer und Händler festgelegt. Die Spezifikation der IMPCA² ist nachfolgenden Tabelle 2 aufgeführt. Soll Methanol lokal produziert und in ein Lager- und Verbundnetz für mehrere Kunden am Standort eingespeist werden, so ist diese Spezifikation mindestens einzuhalten und sicherzustellen.

² International Methanol Producers and Consumers Association

Tabelle 2: IMPCA-Spezifikation Methanol

Merkmal	Einheit	Grenzwert
Aussehen	-	klar und frei von Partikeln
Gehalt (wasserfrei)	Gew. %	≥ 99,85
Aceton	mg/kg	≤ 30
Ethanol	mg/kg	≤ 50
Farbe	Pt-Co	≤ 5
Wasser	Gew. %	≤ 0,1
Dichte bei 20 °C	kg/L	0,791 – 0,793
Chloride als Cl ⁻	mg/kg	≤ 0,5
Schwefel	mg/kg	≤ 0,5
Wasserlöslichkeit	-	mischbar
Säuren als Essigsäure	mg/kg	≤ 30
Eisen, gelöst	mg/kg	≤ 0,1
Nicht flüchtiger Anteil	mg / 1000 mL	≤ 8

Die Technologie für die Methanolsynthese wird vom Projektpartner bse Methanol GmbH in Skid-Bauweise bereitgestellt. Skids sind modulare vormontierte Einheiten, die als fertig verrohrte und verkabelte Prozesseinheiten an den Betreiberstandort transportiert werden können, was mit einem deutlich verringerten Montageaufwand auf dem Baufeld einhergeht, aber auch eine genaue Definition der Schnittstellen zum Standort erfordert. Dies betrifft z. B. mittlere und maximale Mengenströme für Roh- und Hilfsstoffe sowie Energien.

Die standardisierten Skids besitzen eine Kapazität von ca. 1,0 bis 5,0 t/h Methanol, was in Näherung der Umsetzung von Wasserstoff aus einer 10 bzw. 50 MW Elektrolyse entspricht.

Um Methanol aus CO₂ und Wasserstoff zu produzieren, werden die Gase in einer Reinheit benötigt, die den heterogenen Cu/Zn/Al₂O₃-Katalysator nicht schädigt (s. Tabelle 3).

Tabelle 3: Spezifikation des Feedgases für die Methanolsynthese

Parameter	Grenzwert	Beispiele	Bemerkung
Schwefelverbindungen [ppm]	0,1	H ₂ S, SO _x , COS	Katalysatorgift
Halogenverbindungen [ppb]	1	Cl-, F-Verb.	Katalysatorgift
Sauerstoff [ppm]	5,0	-	Katalysatorgift
Inerte [Vol.-%]	0,1	N ₂ , Ar	Purge-Gasmenge

Die Limitierung betrifft maßgeblich Sauerstoff, Halogen- und Schwefelverbindungen. Inerte, die über die Feedgase in das System gelangen, können sich im Kreisgasstrom anreichern und die Ökonomie des Prozesses durch entsprechend höhere Purgegasströme beeinträchtigen. Mit der gewählten Aminwäsche wird davon ausgegangen, dass die erforderlichen Gasreinheit für CO₂ aus der Ersatzbrennstoffverbrennungsanlage erreicht werden kann. Die notwendigen Daten für die Methanolsynthese wurden ermittelt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Methanol kommt heute über Schiff, Bahn oder per LKW, entsprechende Vertankungs-, Verteil- und Speichereinrichtungen sind im Industriepark Höchst vorhanden. So wurde die Kapazität zur Lagerung von Methanol vor einigen Jahren um ca. 6.000 m³ erhöht.

Eine Produktionsanlage für diesen Alkohol gibt es am Standort nicht, die vorhandene Infrastruktur könnte jedoch auch für eine Anlage zur Herstellung von nachhaltigem Methanol genutzt werden.

Im Industriepark Höchst setzen verschiedene Unternehmen Methanol zur Herstellung von Produkten oder als Lösungsmittel ein. Methanol ist ein wichtiger Roh- und Hilfsstoff in der Kunststoffproduktion, der Basischemie, bei der Herstellung von Biodiesel sowie zur Erzeugung von chemisch-pharmazeutischen Produkten. Über 300 000 Tonnen Methanol werden jährlich verbraucht.

3.3 Supportanlagen und Standortanalyse

Der Industriepark Höchst verfügt über eine autarke Strom- und Dampfversorgung durch eigene Energieerzeugungsanlagen. Dampf ist in verschiedenen Druckstufen verfügbar. Eine werksinterne Netzinfrastruktur für Kühlwasser, VE-Wasser, Stickstoff, Prozessluft und weitere Medien ist vorhanden. Die Kläranlage ist auf chemische Abwässer ausgelegt und besitzt

eine ausreichende Kapazität. Für feste und schlammartige Abfälle werden Verbrennungsanlagen betrieben. Des Weiteren existiert ein Wasserstoffnetz auf verschiedenen Druckniveaus. Eine Schiffsanbindung an den Main ist ebenso vorhanden, wie an das deutsche Eisenbahnnetz. Im Industriepark Höchst existiert eine Infrastruktur zur Entladung, Speicherung und Verteilung von Methanol.

Von Infraserv Höchst wurden Daten zur industriellen Infrastruktur (Energieversorgung, Abfallentsorgung, CO₂-Quellen und deren Bewertung, potenzielle Standorte für Anlagen zur CO₂-Abscheidung, Wasserstoff- und Methanolerzeugung) zusammengetragen und bewertet. Eine Methanolanlage könnte am Standort errichtet werden. Das benötigte Kohlendioxid könnte aus der Ersatzbrennstoffverbrennungsanlage bereitgestellt werden.

Die CO₂-Mengen aus den Entsorgungsanlagen (siehe Tabelle 1) wären ausreichend, um ca. 500.000 t/a Methanol herzustellen und damit den Bedarf im Industriepark Höchst (ca. 300 kt/a) mehr als zu decken. Dazu wären aber auch ca. 115 kt/a Wasserstoff bereitzustellen. Dies könnte über die Errichtung einer neuen großtechnischen Elektrolyse erfolgen, dazu wäre aber die Verfügbarkeit von EE-Strom in erheblichen Mengen (> 5 TWh) erforderlich. Dies ist technisch zurzeit nicht möglich, da die Stromleitungen in den Raum Frankfurt ausgelastet sind. Weitere Transportkapazitäten werden erst Mitte der 2030er Jahre erwartet.

Alternativ wäre die Versorgung mit Wasserstoff über eine Pipeline nach Frankfurt erforderlich, die aber zurzeit nicht existent ist. Gasnetzbetreiber befassen sich zurzeit mit Überlegungen zur Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff. Auch hier ist vor Beginn der 30er Jahre nicht mit einer Verfügbarkeit zu rechnen. Infraserv Höchst hat die Gespräche aufgenommen und mit anderen darauf hingewirkt, dass das geplante überregionale Wasserstoffkernnetz einen Abzweig in das Rhein-Main-Gebiet und den Industriepark Höchst erhält.

Der heute im Industriepark Höchst produzierte Nebenproduktwasserstoff (ca. 4.000 t/a) aus einer Chloralkalielektrolyse wäre technisch geeignet für die Methanolsynthese (Spezifikation in Tabelle 4). Bei Einsatz von EE-Strom wäre dieser auch als „grüner“ Wasserstoff nachhaltig herstellbar. Er ist aber nicht in ausreichender Menge für eine großtechnische Anlage zur Herstellung von Methanol aus Kohlendioxid vorhanden. Weiterhin ist dieser Wasserstoff bereits für andere Einsatzgebiete (z.B. zur Hydrierung in chemischen Prozesse, der Versorgung von Tankstellen zur Betankung von PKW, LKW und Zügen) in Verwendung.

Tabelle 4: Spezifikation Wasserstoff im Industriepark Höchst

Komponente	Gehalt
H ₂ -Reinheit	99,9 Vol. % (bezogen auf wasserfreies H ₂)
O ₂	≤ 0,02 Vol.%
Ar	≤ 0,02 Vol.%
N ₂	≤ 0,10 Vol.%
CO ₂	≤ 0,10 Vol.%
CO	≤ 0,02 Vol.%
C ₁ -C ₄	≤ 0,004 Vol.%
H ₂ O	≤ 0,01 Vol.%
Hg	≤ 1 ppb Vol.
NaOH	≤ 1 mg/m ³

Gespräche mit Verwendern von Methanol im IPH wurden geführt. Alle Unternehmen im IPH setzen heute Methanol gemäß der jeweils gültigen Spezifikation (IMPCA) ein. Bei einigen Anwendern gibt es darüber hinaus weitere Anforderungen, die aber durch Maßnahmen vor Ort sichergestellt werden.

Ein Gespräch mit einem wesentlichen Verbraucher von Methanol und dem Analytiklabor, dass die Qualität des angelieferten Methanols prüft, wurde, unter Einbindung des Projektpartners Provalid Hochschule, geführt. Dabei konnten auch wichtige Informationen zur Logistik gewonnen werden.

Gemäß Aussage verschiedener Verwender von Methanol im IPH spricht nichts gegen den Einsatz von auf anderem Weg hergestelltem Rohstoff, sofern die IMPCA Spezifikationen vollständig eingehalten werden. Bei einigen Kunden gibt es darüber hinaus weitere Einschränkungen bzw. Wünsche bei einzelnen potenziell vorhandenen Komponenten (z.B. Ethanol). Diese Verunreinigungen können aber auch beim Abnehmer abgetrennt werden.

Ein Interesse an „grünem“ Methanol ist vorhanden, zum Teil wird von den Unternehmen am Standort auch schon solches Methanol (zurzeit nur kleine Mengen) zugekauft und nach

Frankfurt verbracht. In allen Gesprächen wurde aber auch immer nach dem Preis von „grünem“ am Standort hergestelltem Methanol gefragt. Dabei ist es aus Sicht der Verwender unabdingbar, dass die internationale Wettbewerbsfähigkeit erhalten bleiben muss. Es wurde auch darauf verwiesen, dass Unsicherheit bei den gesetzlichen Regeln besteht.

Es wurden Szenarien erarbeitet, zu denen bei der Proxadis Hochschule auch Simulationen zur Nachhaltigkeit erfolgt sind. Bei beiden Industriepartnern (SK und ISH) fallen erhebliche Mengen an CO₂ (zusammen ca. 1.300 kt/a) an, die auch langfristig nicht wesentlich reduziert werden können. Bei SK fallen in den beiden betrachteten Kalkwerken in Summe ca. 600 kt/a an und im Industriepark Höchst in den vorhandenen Verbrennungsanlagen ca. 700 kt/a.

Bei SK fällt das CO₂ im Rauchgas mit Konzentrationen zwischen 17 und 28 % an, bei ISH liegen die Werte zwischen 7 – 9 %. Das Potential an CO₂ der beiden Industriepartner würde für eine Methanolproduktion von ca. 900 kt/a reichen. Was den Bedarf im IPH von ca. 300 kt/a deutlich überdecken würde. Zur Erzeugung dieser Methanolmengen wären ca. 185 kt/a Wasserstoff erforderlich. Was einer Elektrolyseleistung von 1,3 GW entsprechen würde. Die dafür erforderlichen Strommengen von > 10 TWh sind (zumindest auf absehbare Zeit) im RheinMain Gebiet nicht verfügbar.

Es wurden daher 3 Szenarien entwickelt:

- ein 20 MW MeOH Skid von bseMethanol
(16 kt/a MeOH)
- die vollständige CO₂-Nutzung eines Standorts von SCHAEFER KALK
(200 kt/a MeOH)
- die vollständige Abdeckung des Bedarfs der Unternehmen im Industriepark Höchst
(300 kt/a MeOH).

Da die Gewinnung des notwendigen Wasserstoffs und der Betrieb einer chemischen Anlage (MeOH-Herstellung) von zentraler Bedeutung ist, wurde für alle drei Szenarien der Industriepark Höchst aufgrund der vorhandenen Infrastruktur für die Herstellung von Chemikalien als der favorisierte Standort gewählt. Es wird mit der Annahme gearbeitet, dass die Versorgung mit EE-Strom für diese Fälle möglich ist.

Die aus der Standortanalyse abgeleiteten Szenarien mit ihren Bilanzräumen sind in Abb. 4 mit den jeweils erforderlichen Prozesseinheiten für die betrachteten Szenarien Kalkwerk (a) und Verbrennungsanlage EVA (b) zusammengefasst.

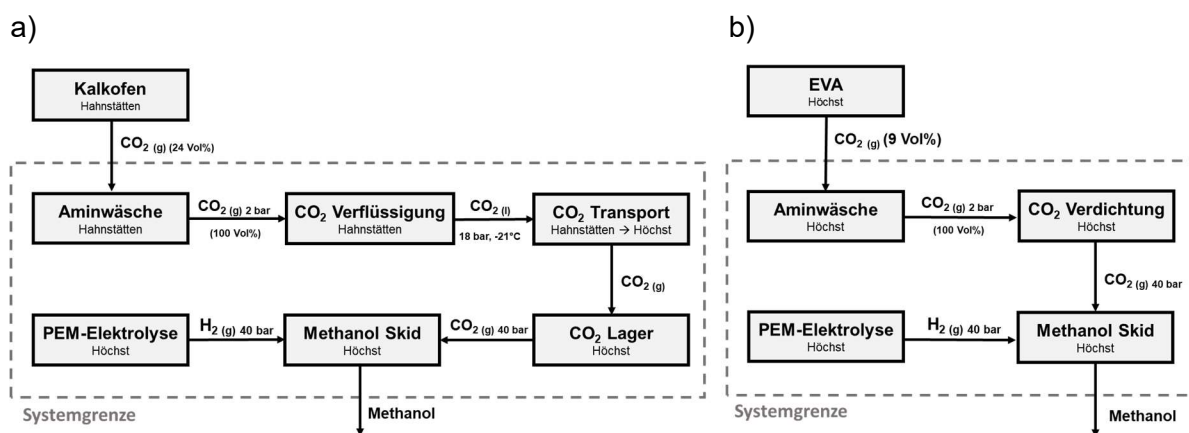


Abbildung 4: Systemgrenzen und Prozesseinheiten für die betrachteten Szenarien
 a) Kalkwerk und b) EVA

Beim Szenario Kalkwerk sind die CO₂-Verflüssigung und der Transport als zusätzliche Schritte erforderlich. Eine CO₂-Kompression auf den Betriebsdruck der Methanolstufe ist für beide Standorte erforderlich. Die Massenströme an den Bilanzgrenzen für beide Szenarien sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Der CO₂-Bedarf bei einer 200.000 t a⁻¹ Anlage für MeOH entspricht zudem in etwa den biogenen CO₂-Emissionen der EVA im Industriepark Höchst.

Tabelle 5: Massenströme und Randbedingungen für die Szenarien Kalkwerk und EVA

Szenario	Kalkwerk Hahnstätten	EVA Höchst
Standort Methanolanlage	Industriepark Höchst	Industriepark Höchst
Kapazität Methanolanlage [t a ⁻¹]	200.000	200.000
CO ₂ Bedarf [t a ⁻¹]	293.400	293.400
CO ₂ Transport	Verflüssigung und LKW-Transport	Interne Rohrleitungen
Wasserstoffbedarf [t a ⁻¹]	41.000	41.000

Die Bereitstellung des „grünen“ Wasserstoffs kann zum einen über eine eigene Elektrolyseeinheit lokal erfolgen, zum anderen ist eine zukünftige Wasserstoffversorgung in Deutschland über eine Pipeline denkbar. Im ersten Fall müssen die Investitionskosten für eine PEM-Elektrolyse aufgebracht werden (Szenario Elektrolyse). Im zweiten Fall wird das Investment in eine Elektrolyse von Dritten getragen und ist über den Einkaufspreis des Wasserstoffs abgedeckt (Szenario H₂-Zukauf). Für die betrachteten Standorte werden daher zusätzlich die Fälle Elektrolyse und H₂-Zukauf unterschieden.

Der Sauerstoff, der in der Elektrolyse als Nebenprodukt anfällt, wird in beiden Fällen nicht berücksichtigt. Aus technischer Sicht ist eine Nutzung in Verbrennungsanlagen, Stahlwerken oder in der Kalk- und Zementindustrie sowie zukünftigen Oxyfuel-Anlagen möglich. Bestehende Anlagen müssten jedoch erst auf den Einsatz von Sauerstoff umgerüstet werden. Die Annahme einer Werthaltigkeit des Sauerstoffs würde sowohl bei der ökonomischen als auch der ökologischen Betrachtung zu einer positiven Beeinflussung der Ergebnisse führen.

Ebenso wurden bei der TEA keine Einsparungen durch nicht benötigte CO₂-Zertifikate berücksichtigt. Thermische Abfallverwertungsanlagen wie die EVA im Industriepark Höchst sind derzeit nach dem Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz §2 Abs.5 vom EU-Emissionshandel ausgenommen. Bei Kalkwerken ist gegenwärtig seitens der Gesetzgebung noch nicht klar ist, ob diese von einer CO₂-Abscheidung profitieren. Ohnehin wird in Deutschland seitens des Umweltbundesamtes CCU derzeit nicht als CO₂-mindernde Maßnahme betrachtet, mit der Argumentation, dass die CO₂-Emissionen auch bei mehreren Nutzungszyklen nur zeitlich und örtlich verlagert würden, obgleich zumindest der Einsatz fossiler Rohstoffe und die Emissionen der konventionellen Herstellung vermieden werden.

3.4 Prozessevaluierung

Daten über Reinheit, Mengen und Verunreinigungen wurden zusammengetragen sowie die Nutzbarkeit bewertet und für die LCA dem Projektpartner PHS zur Verfügung gestellt sowie der Einfluss auf die LCA diskutiert.

Es ist davon auszugehen, dass auch nach 2045 die Verbrennungsanlagen betrieben werden müssen, so dass diese als Punktquellen für Kohlendioxid infrage kommen. Die Rückstandsverbrennungsanlage wird aufgrund der großen Anzahl an möglichen Verunreinigungen bei der Verbrennung von Chemikalienabfällen nicht weiter berücksichtigt.

Um die Herstellung von „grünem“ Methanol zu gewährleisten, wurde auf Anlagen mit biogenem Inputmaterial fokussiert. Hier kommt insbesondere die Biogasanlage in Betracht, da nur bioabbaubare Reststoffe verarbeitet werden und - zur Vermeidung einer „Tank oder Teller“ Diskussion - keine Lebensmittel eingesetzt werden. Die Gärreste werden – zusammen mit kommunalem Klärschlamm – in der Klärschlammverbrennungsanlage zur Erzeugung von Prozessdampf eingesetzt. Daher ist auch diese Anlage als nachhaltige CO₂-Quelle geeignet.

Weiterhin die Ersatzbrennstoffverbrennungsanlage, die aufgrund des Mixes der Einsatzstoffe (u. a. Klärschlamm), ca. 47 % „grüne“ Energie (Dampf und Strom) liefert. Damit wäre auch ein Teil der CO₂-Emissionen als grün anzusehen. Auch hier wurden Daten zu Reinheit, Mengen und Verunreinigungen im Abgasstrom erfasst und mit dem Partner PHS diskutiert.

Innerhalb der durchgeführten Arbeiten zeigt sich die technische Machbarkeit des untersuchten Konzeptes zur Herstellung von Methanol aus Kohlendioxid und mittels Elektrolyse erzeugtem Wasserstoff. Für die Umsetzung eines solchen Vorhabens ist eine Abscheidung des CO₂ aus Punktquellen und dessen Transport zu Standorten mit einer Infrastruktur für chemische Anlagen ökonomisch von Vorteil, da dies die ohnehin hohen Investitionskosten nicht noch weiter durch Infrastrukturmaßnahmen belastet. An diesen Standorten ist eine umfangreiche Hilfsmittelversorgung bzw. Nebenstromverwertung sichergestellt, wie sie beispielsweise am Standort des Industrieparks Höchst gegeben ist.

Die Herstellungskosten von CO₂-basiertem Methanol werden maßgeblich durch die H₂-Bereitstellung dominiert, weswegen eine wirtschaftlich erfolgreiche Umsetzung solcher Power-to-Methanol-Konzepte maßgeblich dort gegeben ist, wo kostengünstig erneuerbarer Strom in ausreichenden Mengen verfügbar ist.

Unter den angenommenen heutigen Randbedingung und Preisen in Deutschland liegen die Kosten für nachhaltig hergestelltes Methanol um einen Faktor 4 bis 5 über den Preisen für die fossil hergestellte Chemikalie. Damit ist aus ökonomischer Sicht gegenwärtig nicht mit einer Realisierung einer solchen großtechnischen Anlage zu rechnen.

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten

Die durchgeführten Forschungsarbeiten in dem Projekt AbZuMeOH sowie die dafür aufgewandten Ressourcen (Personalkosten) waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung entsprachen und alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben bearbeitet wurden bzw. durch Ersatzmaßnahmen erreicht werden konnten.

Eine technische und wirtschaftliche Übertragbarkeit der Abtrennung von Kohlendioxid aus Verbrennungsanlagen und die Nutzung zur Herstellung von Methanol im großindustriellen Maßstab war und ist noch mit erheblichen Risiken (technischer und ökonomischer Natur) verbunden. Daher war eine Förderung für Infraserv Höchst für die in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen erforderlich.

Erläuterung zu Verzögerungen und zum personellen Minderaufwand:

Die Pandemie hat zu Verzögerungen geführt, die aber innerhalb der Projektlaufzeit aufgefangen werden konnten. Eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts war für ISH daher nicht erforderlich.

Bedingt durch die Corona-Pandemie konnten Projekt- und Arbeitstreffen sowie die Teilnahme an Veranstaltungen zu Beginn nicht wie geplant erfolgen.

Die Arbeiten zu den anderen Arbeitspaketen sind im Wesentlichen wie geplant durchgeführt worden.

Durch die geringeren Personalaufwendungen und Reisekosten betrug der kostenmäßige Aufwand für das Projekt ca. 41 % der Vorkalkulation.

5. Verwertungsplan

Infraserv Höchst bringt die gewonnenen Erkenntnisse in weitere Untersuchungen zur Abtrennung von CO₂ und dessen Nutzung für die Herstellung von Methanol am Standort Industriepark Höchst (IPH) ein. So wurde eine Vorstudie zur Abtrennung an einer Anlage im Industriepark Höchst angestoßen, um Aufwand und Kosten dafür zu ermitteln.

Eine Methanolsynthese mit CO₂ – aus biogenem Abfall – und mit Wasserstoff – hergestellt mit EE-Strom – bietet den Zugang zu klimaneutralem, nachhaltigem Methanol. Die regulatorischen Rahmenbedingungen zur Definition nachhaltiger Produkte (z. B. zur Erzeugung von „grünem“ Wasserstoff) werden zurzeit vom Gesetzgeber definiert.

Die Verfügbarkeit von CO₂-neutralem Methanol wurde von den angesprochenen Unternehmen als sehr interessant bewertet. Eine hohe Sensibilität besteht allerdings beim Preis für erneuerbares Methanol.

Zurzeit werden Gespräche mit Unternehmen am IPH zu einer Konzeptstudie zur Errichtung einer Anlage zur Methanolsynthese geführt.

6. Während der Durchführung des Projektes bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet

Eine kontinuierliche Literatur- und Patentrecherche hat keine Erkenntnisse ergeben, die den beschriebenen Forschungsarbeiten entgegenstehen.

Es wurde dabei festgestellt, dass zahlreiche Projekte zur nachhaltigen Herstellung von Methanol im In- und Ausland angekündigt wurden und werden. In Deutschland sind aufgrund der regulatorischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen auch schon begonnene Projekte (zumindest vorerst) wieder eingestellt worden.³

³ <https://www.wacker.com/cms/de-de/about-wacker/press-and-media/press/press-releases/2024/detail-228416.html>

7. Geplante und erfolgte Veröffentlichungen

Infraserv Höchst hat sich an der gemeinsamen Veröffentlichung „*Stoffliche Nutzung von CO₂-haltigen Abgasströmen aus der Kalkindustrie und aus Abfallverwertungsanlagen*“ aller Projektpartner in der Zeitschrift Chemie Ingenieur Technik beteiligt. Das Manuskript wurde in 2023 eingereicht und befindet sich im Review-Prozess.

Die Ergebnisse des Projekts AbZuMeOH wurden im Rahmen der Aktivitäten zur Erreichung einer klimaneutralen Prozessindustrie in Hessen⁴ in Gesprächen mit den Firmen am Industriepark Höchst verwendet und in einem Methanol Workshop diskutiert.

Im Rahmen der Clusterarbeit bei Process4Sustainability wurde der Einsatz von nachhaltig hergestelltem Methanol als ein wesentlicher Stellhebel zu Erreichung einer klimaneutralen Produktion im Industriepark Höchst identifiziert.

Alle Projektmitglieder haben sich an den BioBall Jahrestreffen bei der DECHEMA in Frankfurt am Main beteiligt und dort die Erkenntnisse in Vorträgen und Postern vorgestellt und diskutiert.

⁴ <https://www.process4sustainability.eu/>