

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

09/06/2023

Projekttitel:

Hydratbasiertes Carbon Capture mittels
Gasphasenabscheidung unter Druck
(hbCC)

Projektnummer: 888401

Energieforschungsprogramm - 07. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	7. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/12/2021
Projektende	28/02/2023
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	15 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Fachhochschule Vorarlberg GmbH
AnsprechpartnerIn	Prof. (FH) Dr.-Ing. Markus Preißinger
Postadresse	Hochschulstraße 1, 6850 Dornbirn
Telefon	05572 792 3801
Fax	
E-mail	markus.preissinger@fhv.at
Website	www.fhv.at/forschung/energie

Hydratbasiertes Carbon Capture mittels Gasphasenabscheidung unter Druck (hbCC)

AutorInnen:

Markus Preißinger, Elias Eder, Miriam Kadinger, Stefan Arzbacher

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
3	Inhaltliche Darstellung	7
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	16
5	Ausblick und Empfehlungen	17
6	Literaturverzeichnis	18
7	Kontaktdaten	19

2 Einleitung

Carbon Capture and Storage (CCS) Technologien gelten gemäß des aktuellen Stands der Wissenschaft als eine der relevantesten Übergangstechnologien zur Eindämmung des anthropogenen Klimawandels. Wenn die Kinetik und Thermodynamik der hydratbasierten Abscheidung von CO₂ (hydrate based Carbon Capture, hbCC) verbessert wird, gilt diese Technologie als eine der vielversprechendsten zur Senkung der CO₂-Emissionen konventioneller Kraftwerke. Da 86 % des weltweiten Energiebedarfs immer noch durch Kraftwerke gedeckt werden, die Wärme und Strom aus Kohle, Erdöl oder Erdgas erzeugen, ist ein schneller Übergang zu erneuerbaren Energiequellen in absehbarer Zeit technologisch nicht möglich. Der sofortige Handlungsbedarf fördert daher die Entwicklung verschiedener Carbon Capture (CC) Technologien, um das von konventionellen Kraftwerken emittierte CO₂ aufzufangen.

Die Reduktion von CO₂ aus dem Abgasstrom eines fossilen Kraftwerks kann entweder durch Pre-Combustion, Oxy-Fuel-Verbrennung oder Post-Combustion Capture erreicht werden [1]. Für CC werden derzeit zahlreiche Verfahren angewandt, wobei das Post-Combustion Capture durch Absorption unter Verwendung von Lösungsmitteln wie Monoethanolamin (MEA) derzeit den Stand der Technik darstellt [2]. Während die typischen Konzepte, die im CC verwendet werden, aus der chemischen Industrie bekannt sind, ist ein allgemeiner Nachteil der meisten Verfahren ein sehr hoher spezifischer Energiebedarf. Bis zu 30 % der in einem fossil befeuerten Kraftwerk erzeugten Energie wird demnach für die Abtrennung von CO₂ aus dem Rauchgas verwendet [3].

Dieser hohe Energieaufwand hat die Forschung zu alternativen Verfahren für CC vorangetrieben, darunter Adsorption [4], Membranverfahren [5], kryogene Kondensation [6], chemische Kreislaufführung [7] oder hbCC [8]. Einige Nachteile der meisten der genannten Verfahren sind (1) eine schlechte Leistung bei niedrigen Konzentrationen von CO₂ im Rauchgas (Membranverfahren, kryogene Verfahren), (2) die Unfähigkeit zum Scale-up (chemischer Kreislauf) und (3) ein hoher spezifischer Energiebedarf (Absorption/Adsorption) [3]. Im Vergleich zu den anderen genannten Prozessen hat das hbCC jedoch das Potenzial, einen deutlich geringeren Energiebedarf zu benötigen, vorausgesetzt, es werden umfangreiche Forschungen zum Prozessdesign und zur Optimierung der Bildungs- und Dissoziationskinetik durchgeführt.

Unter hbCC versteht man im Allgemeinen die Abscheidung und Speicherung von CO₂-Molekülen in Form von Gashydraten. Dabei handelt es sich um kristalline Einschlussverbindungen, bei denen ein Gastgas in einem Käfig aus Wassermolekülen eingeschlossen ist, die durch Wasserstoffbrücken gebunden sind. Gashydrate wurden erstmals in Erdgaspipelines entdeckt, wo die Bildung von Gashydraten aufgrund hohen Drucks und niedriger Temperaturen zur Verstopfung von Pipelines führte. Naturgemäß konzentrierte sich die Forschung zunächst in erster Linie auf die Verhinderung und Zersetzung von Hydraten. Heutzutage gibt es jedoch weiterführendes Interesse an der Bildung von Gashydraten, welches unter anderem auf der hohen spezifischen Speicherdichte des Gastgases beruht (bis zu 180 m³ Gastgas unter Standardbedingungen pro m³ Gashydrat) [9]. Trotz dieses Potenzials gibt es immer noch Nachteile, die bei der industriellen Umsetzung behoben werden müssen. Gashydrate

leiden nicht nur unter einer langsamen Bildungskinetik, sondern bilden sich auch unter thermodynamisch ungünstigen Bedingungen ($p > 50$ bar, $T < 280$ K). Diese Nachteile erlaubten der hbCC-Technologie bisher keinen industriellen Durchbruch.

Das vorliegende Projekt hatte zum Ziel, die maßgeblichen Nachteile der hbCC-Technologie zu adressieren und durch angewandte Forschung an einem experimentellen Prototypen innovative Lösungen vorzuschlagen, die einen zukünftigen industriellen Einsatz vorbereiten sollten. Nach Aufbau des Prototypen waren daher umfangreiche Sensitivitätsanalysen für die Abscheidung von CO_2 aus einem typischen Abgasstrom eines industriellen Kraftwerks geplant, welche am Ende des Projektes zu einem umsetzbaren technischen und wirtschaftlichen Gesamtprozess führen sollten. Das Projekt adressierte daher einen grundsätzlichen Schwerpunkt des Energieforschungsprogramms, nämlich eine Lösung für die technisch-wirtschaftliche Abscheidung und Speicherung von CO_2 , welche für die Erreichung der Klimaziele nicht nur in Österreich, sondern auch in Europa und weltweit von enormer Dringlichkeit ist.

3 Inhaltliche Darstellung

In diesem Forschungsprojekt war der Machbarkeitsnachweis einer neuartigen Methode zur hydratbasierten CO₂-Abscheidung, engl. hydrate-based carbon capture (hbCC), zu erbringen. Die Abscheidung sollte dabei bei hohem Druck und tiefen Temperaturen direkt aus der Gasphase erfolgen. Zusätzlich sollte geklärt werden, ob die diesem Verfahren für CO₂-Abscheidung zugesprochenen theoretischen Vorteile auch in der Praxis genutzt werden können.

Das Projekt war in insgesamt 6 Arbeitspakete gegliedert, die im Folgenden mit den einzelnen Versuchsergebnissen dargestellt werden. Darüber hinaus wurden relevante Änderungen, die sich im Verlauf des Projektes ergeben haben, beschrieben und entsprechend begründet.

In Arbeitspaket 1 wurde ein erweitertes Projektmanagement eingeführt und umgesetzt. „Erweitert“ deswegen, weil in AP1 zwei weitreichende Entscheidungen für den Projekterfolg zu treffen waren, die im Vorfeld so nicht abzusehen waren.

Durch eine parallel zum Projekt durchgeführte Masterarbeit konnte festgestellt werden, dass hohe Phasenumwandlungsenthalpien und die Ausbildung von Wärmebrücken zwischen der Verdampfer- und der Kondensatorseite des geplanten Verfahrens einen kontinuierlichen Abscheidungsbetrieb aus der Gasphase mit hohen Leistungsindikatoren erschweren bzw. sogar verhindern. Die Ausbildung solcher Wärmebrücken durch das kristalline Hydratwachstum von der Kondensatorseite zur Verdampferseite ist dabei in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Ausbildung von dendritischen Gashydratkristallen, die als Wärmebrücke zwischen Verdampfer- und Kondensatorseite fungieren

Es ist klar ersichtlich, dass mit zunehmender Abscheidung dendritische Gashydratkristalle von der Kondensator- zur Verdampferseite wachsen. Dadurch nimmt einerseits die Abscheidetemperatur auf dem Gashydratkristall zu. Andererseits wird mit zunehmender Distanz der Wachstumsoberfläche zur Kühlvorrichtung immer mehr Kühlleistung für den Abtransport der Bildungsenthalpie benötigt. Das

ursprünglich vorgeschlagene Konzept ließe sich demnach nicht im industriellen Maßstab realisieren, ein alternatives Konzept zur hydratbasierten Abscheidung wurde in der Folge untersucht.

Das entwickelte Lösungskonzept ist in Abbildung 2 dargestellt und beschrieben.

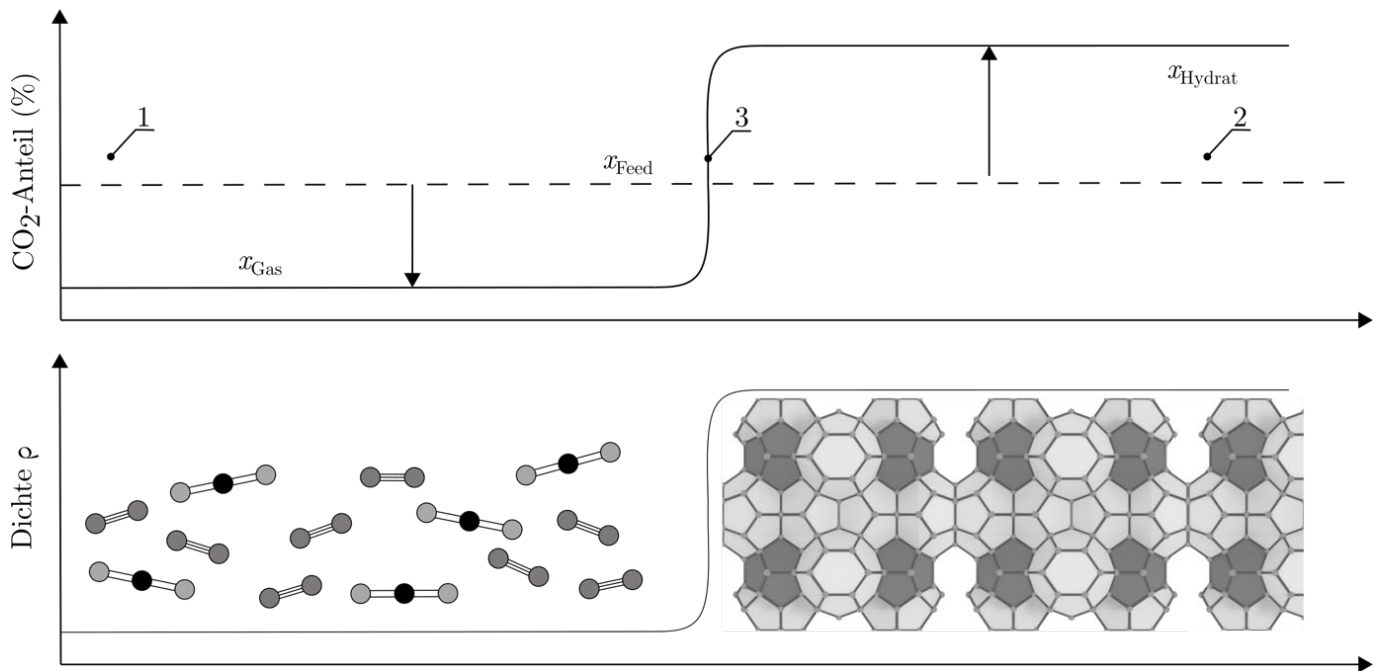


Abbildung 2: Schematische Darstellung der CO₂-Abscheidung an einer Gas-Eis Grenzfläche

Gemäß Abbildung 2 entsteht an der Grenzfläche zwischen einem aufzureinigenden Gas mit der Konzentration x_{Feed} und einer porösen Eisstruktur eine aufgereinigte Gasphase mit der Konzentration x_{Gas} sowie ein Mischhydrat mit der Konzentration x_{Hydrat} . Das Phänomen der Selbsterhaltung, nämlich die längerfristige Stabilität von Gashydrat unter eigentlich thermodynamisch instabilen Bedingungen, gibt dieser Verfahrensanordnung in einem sogenannten Pressure-Swing Versuch, bei dem die Hydratbildung und -dissoziation nur durch Variationen des Drucks eingeleitet werden, einen signifikanten Vorteil. Die Bildungsenthalpien nehmen dadurch nämlich um die Schmelzenthalpie des Wassers ab, was die notwendige Kühlleistung eines potenziellen Verfahrens erheblich reduzieren würde. Eine mögliche verfahrenstechnische Realisierung in einem Druckreaktor, die diesen Vorteil nutzen könnte, ist in Abbildung 3 dargestellt.



Die hier vorgeschlagene Anordnung stellte eine weitreichende Verbesserung der zunächst geplanten Anordnung dar, führte aber direkt zur nächsten weitreichenden Entscheidung: Sollte ein Patent für diese neue Anordnung mit allen Vor- und Nachteilen eingereicht werden oder nicht. Das Projektteam hat sich

nach reichlicher Abwägung für die Anmeldung eines Patents entschieden, da die Vorteile einer Patentanmeldung gegenüber den nötigen Anpassungen der Verwertungsstrategie in AP6 überwogen.

Arbeitspaket 2 hatte den Bau und die Inbetriebnahme des Prototyps zum Ziel. Dabei erwies sich insbesondere die Erreichung einer vollständigen Gasdichtigkeit bei Temperaturen unter 250 K und Drücken zwischen 20 und 60 bar als sehr herausfordernd. Gerade die thermische Ausdehnung der Komponenten machte eine spezielle Wahl der O-Ring Materialien nötig, da diese einerseits eine sehr geringe Gasdurchlässigkeit durch Diffusion erlauben und andererseits auch bei sehr tiefen Temperaturen eine ausreichende Elastizität behalten sollten. Zudem wurde aus Sicherheitsgründen das ursprüngliche geplante Reaktorvolumen von 10 l auf 2 l reduziert. Der errichtete Versuchsaufbau im Labormaßstab ist in Abbildung 4 dargestellt, ein entsprechendes Prozessschema in Abbildung 5.

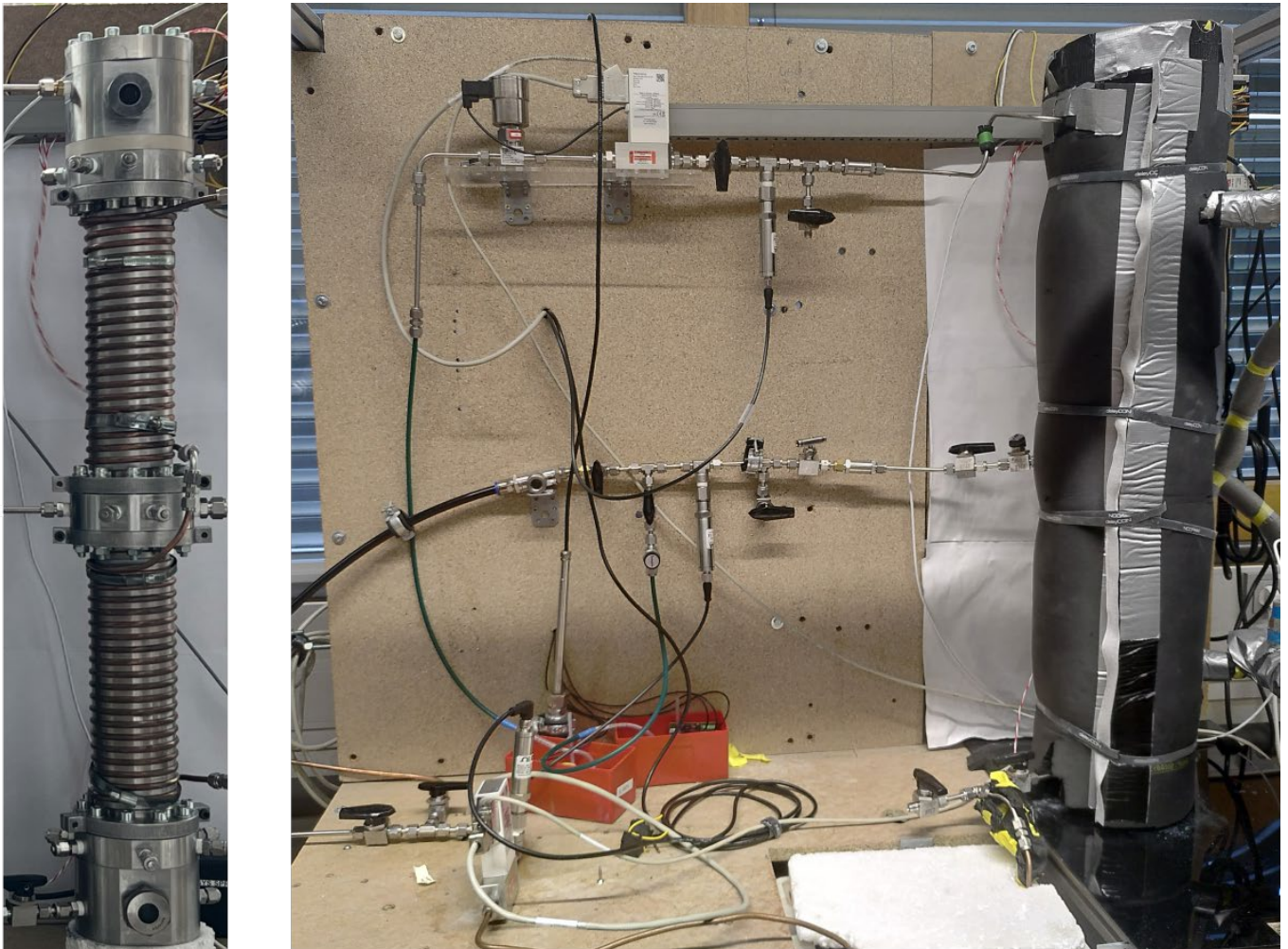


Abbildung 4: Fotografien des experimentellen Versuchsaufbaus mit und ohne thermischer Isolation

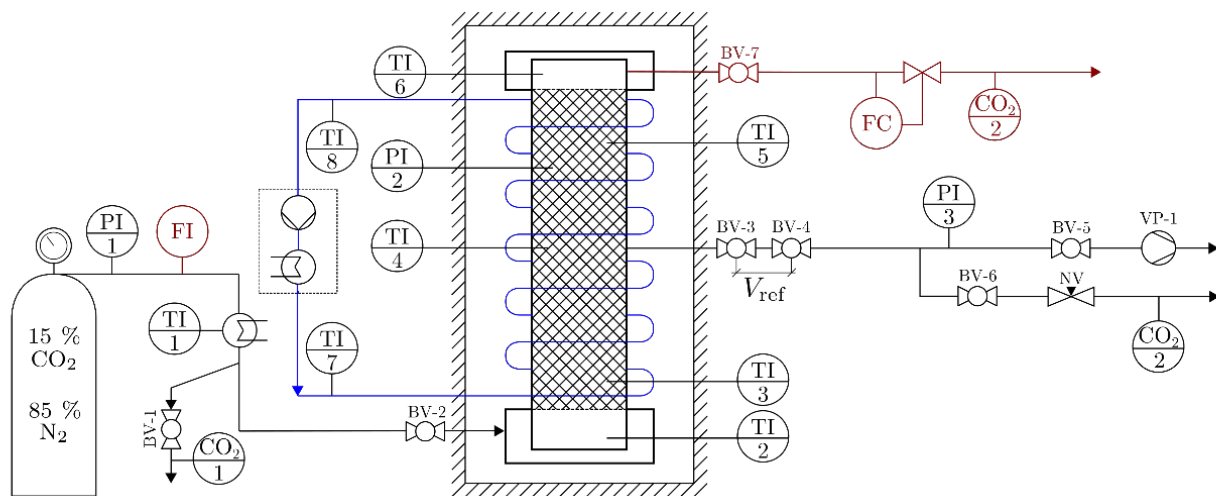


Abbildung 5: Rohrleitungs- und Installationsschema des Versuchsaufbaus im Labormaßstab zur hydratbasierten Abscheidung von CO₂

In Arbeitspaket 3 wurden der Machbarkeitsnachweis der Technologie erbracht. Dabei war vorgesehen, durch die Ausbildung von Gashydrat aus einem $0,85 \text{ N}_2 + 0,15 \text{ CO}_2$ Gasgemisch 40 g CO_2 pro Stunde abzuscheiden. Dabei sollte das Feedgas bei einer Abscheidetemperatur von 233 K und einem Druck von 30 bar auf eine CO_2 Restkonzentration von weniger als $10 \text{ vol\%}$ reduziert werden. Abbildung 6 zeigt die CO_2 Konzentration und den Massenstrom am Ein- und Austritt des Reaktors während eines kontinuierlichen Abscheideversuches. Die $15 \text{ vol\% CO}_2$ Konzentration am Reaktoreintritt, welche genau dem Molanteil der kalibrierten Prüfgasflasche entsprechen, wird am Reaktorausstritt auf minimal $3,7 \text{ vol\%}$ reduziert und nähert sich anschließend über einen Zeitraum von mehreren Stunden nur langsam der Eintrittskonzentration an. Damit einher geht eine Reduktion des Massenstromes von $1,3 \text{ slpm}$ am Reaktoreintritt auf den nominellen Austrittsmassenstrom von 1 slpm . Mithilfe einer Massenbilanz für die beteiligten Gaskomponenten Stickstoff und Kohlenstoffdioxid lässt sich somit ermitteln, dass in der ersten Stunde der Versuchsdurchführung bereits über 20 g CO_2 im Reaktor aufgenommen und damit abgeschieden wurden. Auch Versuche in einem Semi-Batch-Verfahren zeigten ähnliche Ergebnisse. Der Machbarkeitsnachweis konnte somit erreicht werden.

Umfangreiche und multivariante Sensitivitätsanalysen waren Inhalt von Arbeitspaket 4. Durch die Änderung der Prozessführung wurde eine zusätzliche Dimension hinzugefügt, um die Eignung des Verfahrens für einen industriellen Prozess feststellen zu können. Diese zusätzliche Dimension betrifft die Zyklenstabilität des Festbettreaktors. Diese beschreibt, inwieweit das im Reaktor vorhandene Festbett nach einem vollen Abscheidungs-Regenerations-Zyklus für den nächsten Zyklus gebraucht werden kann. Dabei geht es weniger um die Aufnahmekapazität des Festbetts, welche einzig von der Menge des Wassers abhängt und sich praktisch nicht verändert, als um die erreichbare Abscheiderate, welche sehr stark von der spezifischen Oberfläche des Festbetts abhängen und sich mitunter mit jedem Zyklus stark verändern kann. Insgesamt konnte im Arbeitspaket wie geplant ein umfangreiches Bild hinsichtlich der Effekte der Einflussfaktoren Druck, Temperatur und Gasmassenstrom entwickelt werden. Gerade der Einfluss der Zyklenstabilität des Festbetts hat sich als sehr komplex erwiesen, hier konnte aber sogar eine Verbesserung der Wachstumsrate insbesondere über die ersten Versuchszyklen beobachtet

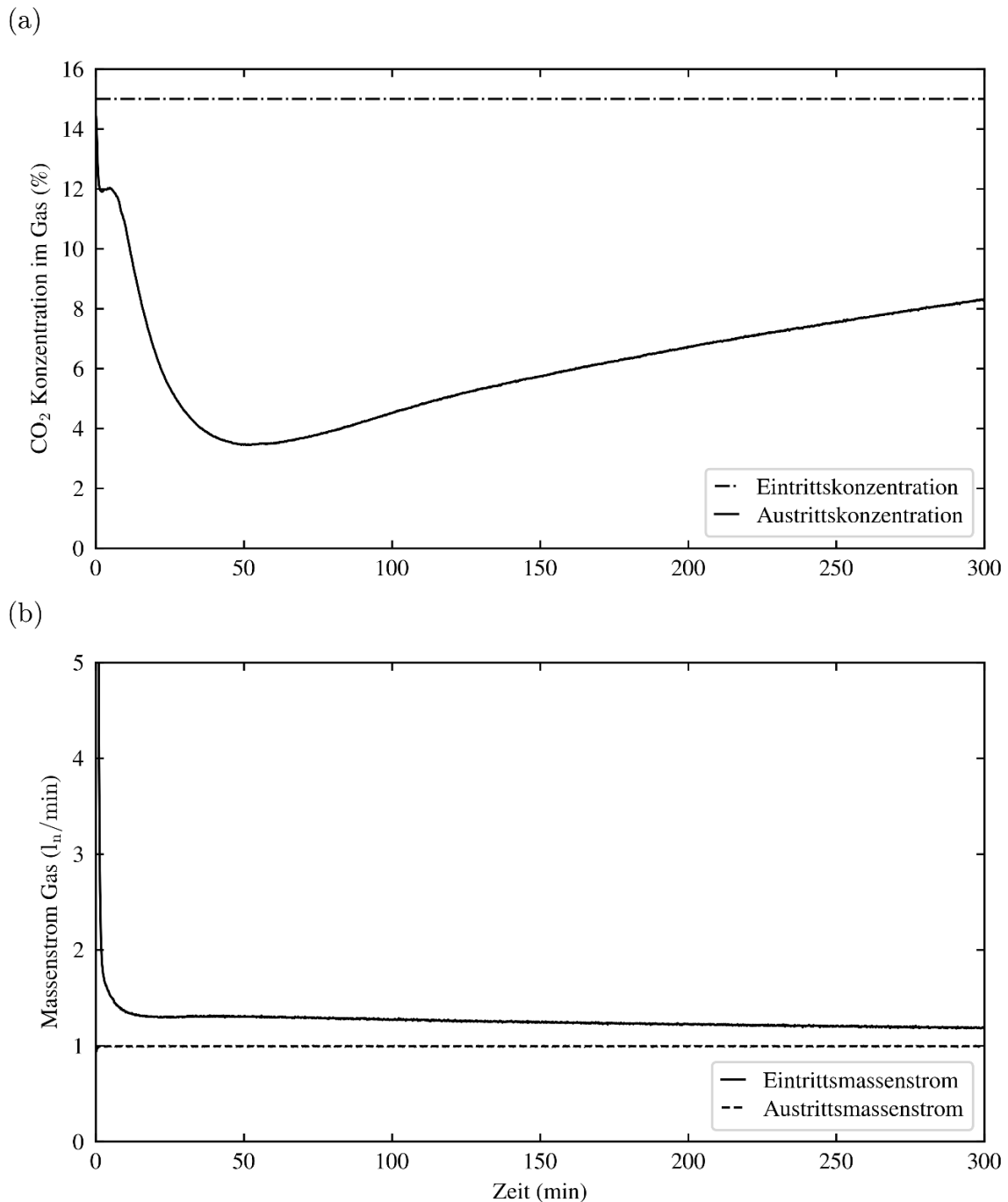
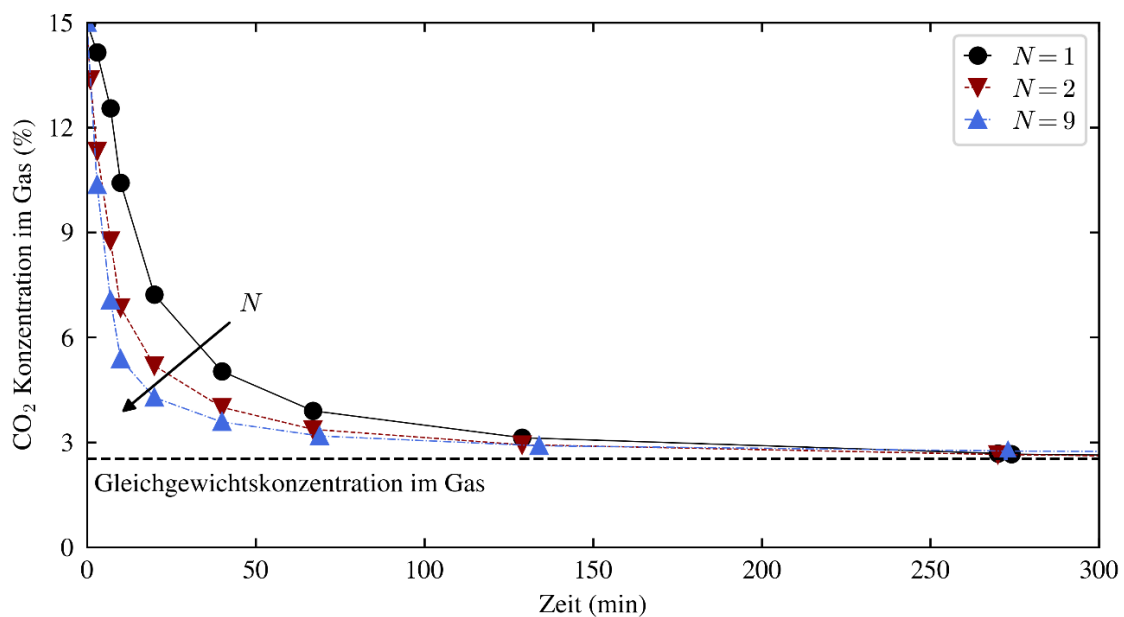


Abbildung 6: Beispiel eines kontinuierlichen Versuchsdurchlaufs mit (a) dem zeitlichen Verlauf der CO₂-Konzentrationen am Reaktoreintritt und respektive am Reaktoraustritt und (b) dem zeitlichen Verlauf des Gasmassenstroms am Reaktoreintritt sowie am Reaktoraustritt

werden, die sich auf der Ausbildung von Porenräumen durch die Umwandlung der pentagonalen Hydratstrukturen zu hexagonalen Eiskristallen begründen lässt. Die Abscheidungsrate konnte über 9 Prozesszyklen insbesondere zu Beginn stark gesteigert werden und anschließend über viele Zyklen konstant gehalten werden. Abbildung 7 zeigt (a) den zeitlichen Verlauf der CO₂ Konzentration am Reaktoraustritt für drei verschiedene Prozesszyklen sowie (b) die Abscheidungsrate an CO₂ für die ersten 9 Prozesszyklen im Pressure-Swing Betrieb.

(a)



(b)

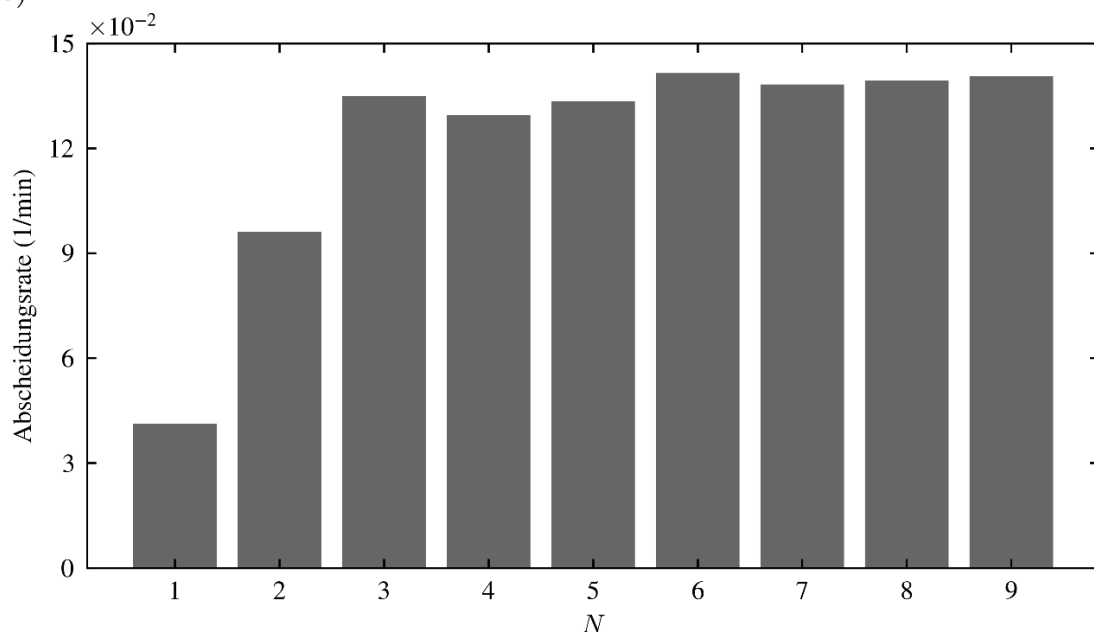


Abbildung 7: Zyklusstabilität des Festbettreaktors im Pressure-Swing Betrieb

Aufbauend auf den Ergebnissen aus Arbeitspaket 4 konnte in Arbeitspaket 5 eine thermoökonomische Analyse durchgeführt werden. Dabei wurde ein Fokus auf die Skalierbarkeit auf Basis der Experimente und der transienten Simulationen gelegt. Es zeigte sich, dass mit einem Reaktorvolumen von 2 l in einer Stunde 20 g CO₂ abgeschieden werden können. Skaliert auf einen Abgasstrom eines Gaskraftwerks mit einer elektrischen Leistung von 1 MW, erfordert das einen Reaktor mit einer Größe von etwa 27 m³. Ein zylindrischer Versuchsreaktor mit einem Durchmesser von 2 m hätte somit eine Höhe von etwas über 9 m. Dabei handelt es sich um übliche Dimensionen solcher Abscheidereaktoren, womit die Skalierbarkeit dieser Technologie gegeben ist. Auch das Thema *Energy Penalty*, also die benötigte

Energiemenge für die Abscheidung des CO₂ in Bezug auf die Gesamtenergie des Kraftwerks konnte in AP 5 abgeschätzt werden, wobei sich im Vergleich mit konventionellen Prozessen wie Absorption und Adsorption vergleichbare und teils bessere Werte ergaben. Zwei relevante Key Performance Indikatoren sind dabei in Abbildung 8 dargestellt und zeigen das hohe Potential dieser Anwendung deutlich auf.

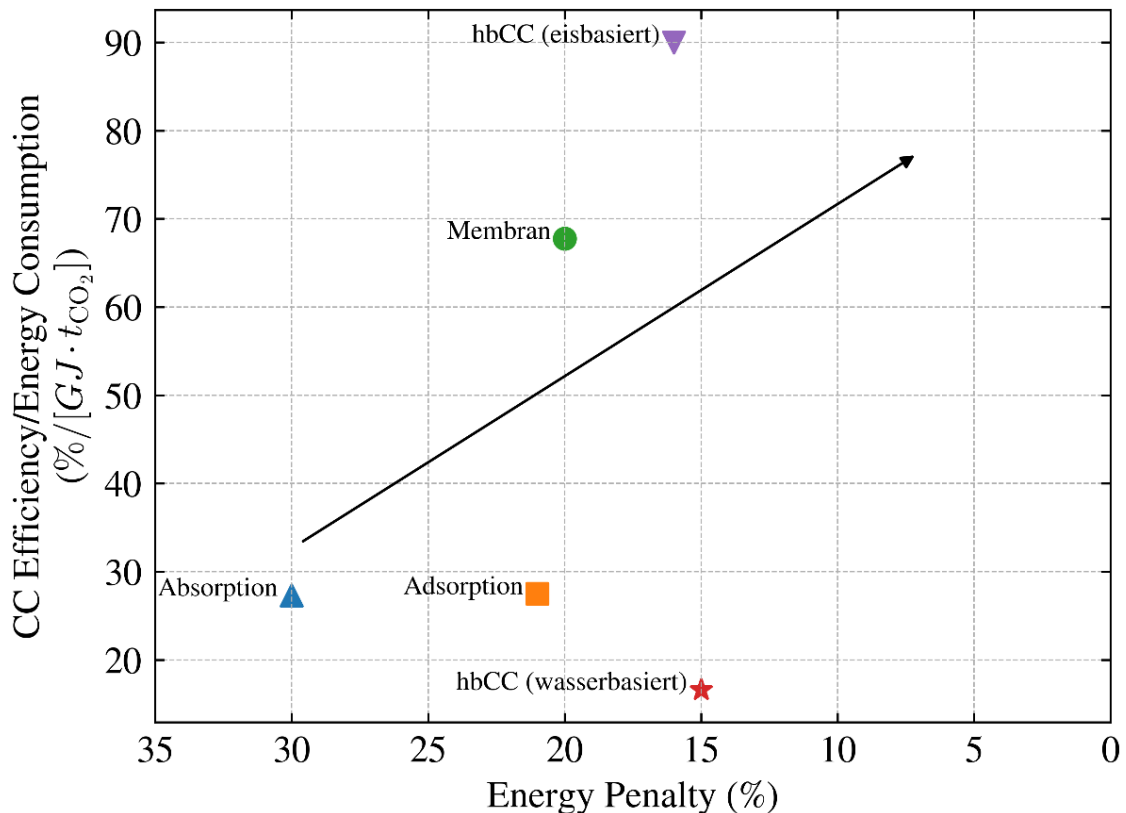


Abbildung 8: Vergleich unterschiedlicher Carbon Capture Technologien hinsichtlich Performance Indikatoren wie *Energy Penalty* und *Carbon Capture Efficiency / Energy Consumption*

Abschließend betrachtete das Projektkonsortium in Arbeitspaket 4 die Verwertung und Dissemination der Ergebnisse, wobei diese anders als geplant, dafür deutlich vielversprechender umgesetzt wurden. Statt einer wissenschaftlichen Publikation und einem Projektkonsortium wurde ein Patent eingereicht, welches die wirtschaftliche Verwertung und industrielle Umsetzung des Projektes positiv beeinflusst. Abbildung 9 zeigt dabei ein Fließbild des im Patent eingereichten Verfahrens.

Gemäß der vorgeschlagenen und im Patent dargestellten Zwillingsreaktoranordnung wäre es demnach möglich, einen Reaktor zu beladen, während der zweite Reaktor regeneriert werde. Das Fließschema zeigt auf, dass sich ein solches System aus Standardkomponenten der Verfahrenstechnik darstellen lassen würde, im Wesentlichen handelt es sich dabei um mit einer Kühlung versehene Druckbehälter.

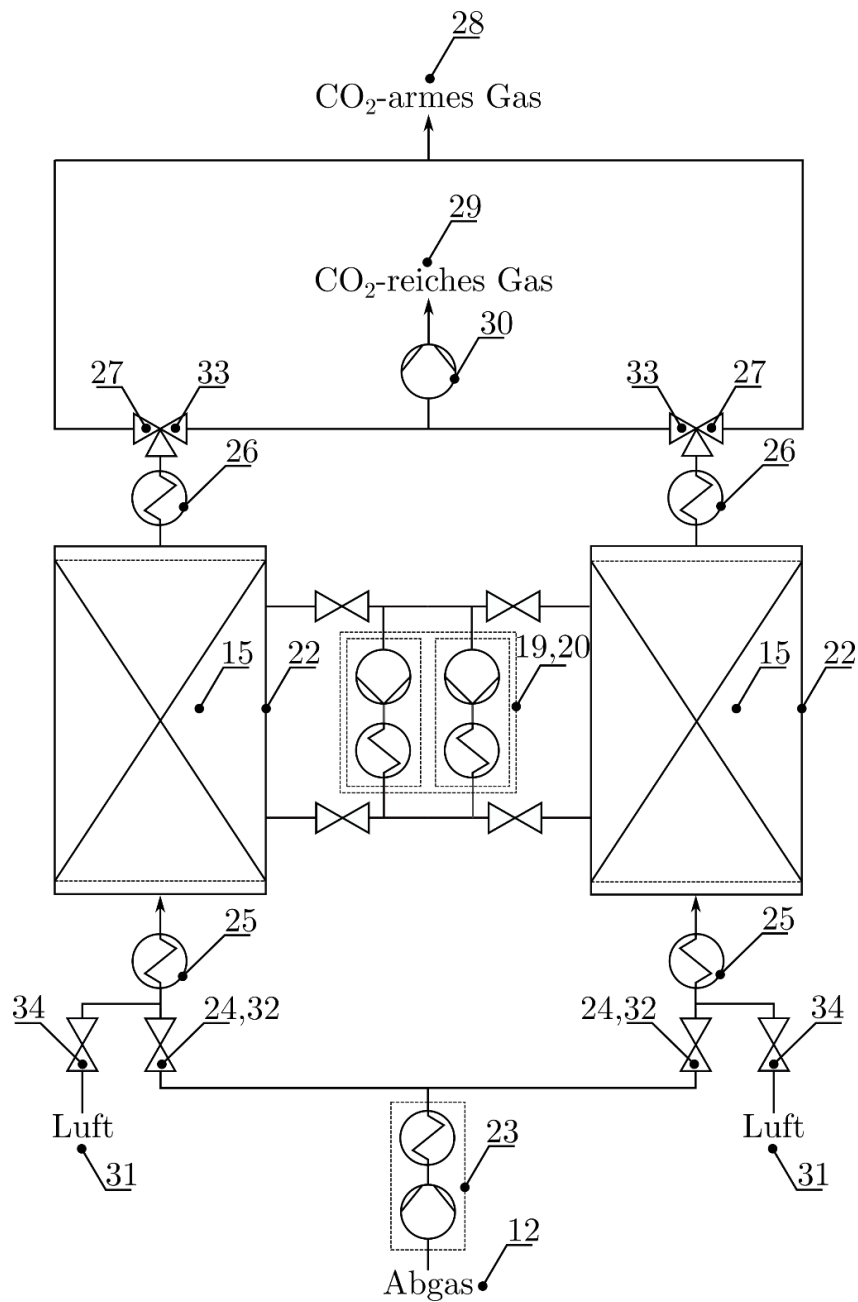


Abbildung 9: Fließschema einer potenziellen Zwillingsreaktoranordnung zur industriellen Realisierung der hydratbasierten CO₂-Abscheidung aus einem typischen Kraftwerksabgasstrom

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

In Kapitel 3 wurden bereits wichtige Ergebnisse der Arbeitspakete zusammengefasst. Das vorliegende Kapitel fasst in sehr komprimierter Form die wichtigsten übergeordneten Ergebnisse und Schlussfolgerungen zusammen. Details können dem eingereichten Patent entnommen werden.

Im vorliegenden Forschungsprojekt konnte eine Ausführungsvariante des kryogenen hydratbasierten Abscheidungsverfahrens entwickelt werden, mit welcher sich die Probleme bestehender Verfahren umgehen lassen. Die entwickelte alternative Ausführungsvariante ist darüber hinaus verfahrenstechnisch sehr viel weniger komplex. Grund hierfür ist unter anderem die Art und Weise, wie Wasser im Reaktor vorliegt bzw. in den Reaktor eingebracht wird. Während ursprünglich und gemäß Projektantrag Wasser an einer Stelle des Reaktors verdampfen und an einer anderen Stelle als Gashydrat abgeschieden werden sollte, wird in der alternativen Ausführung ein Festbett aus hochporösem Eis verwendet, mit welchem über sehr viele Prozesszyklen eine stabil hohe Wachstumsrate erreicht werden konnte.

Anstatt das Gashydrat zur Abscheidung aus der Gasphase zu formen, und dabei sehr viel Wärme abführen zu müssen, wird in der neu entwickelten und bevorzugten Ausführungsvariante mit minimalen Wärmeeaufwand das Gashydrat direkt aus dem Eis geformt. Aufgrund der temperaturbedingt langsamen Dynamik wurde dieser Ansatz zur hydratbasierten CO₂-Abscheidung bisher nicht in Betracht gezogen. Das Projektteam konnte durch Ausnutzung der großen spezifischen Oberfläche des Festbetts sowie durch die gezielte Ausbildung von Porenräumen im Festbett bei der Regeneration des abgeschiedenen Gases aber auch dieses Problem lösen und somit das große Potential dieser Prozessführung aufzeigen. Dabei sind die erreichten Indikatoren Separationsfaktor und Splitanteil ca. zehnmal bzw. zweimal so hoch wie jene von konkurrierenden hydratbasierten Verfahren. Der ermittelte Energieaufwand für die Abscheidung liegt zudem bei ca. 5 % der bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern gewonnenen Energie. Das ist sehr nahe dem thermodynamisch erreichbaren Minimum von ca. 3 % und macht das im Projekt entwickelte Verfahren somit zu einem der vielversprechendsten Verfahren zur CO₂-Abscheidung überhaupt.

Das Potential der entwickelten Technologie stellt sich infolgedessen als sehr viel größer heraus, als dies zu Projektbeginn absehbar war. In Konsequenz wurde das Verfahren Ende Februar 2023 zum Patent angemeldet, welches den Grundstein für alle folgenden wirtschaftlichen Verwertungsaktivitäten bildet.

Zusammenfassend kann daher gesagt werden, dass das Sondierungsprojekt seinen Zweck vollkommen erfüllt hat. Dies begründet sich auch dadurch, dass sehr viel deutlicher wird, welche Kompetenzen nötig sind, um das Verfahren in die industrielle Forschung bzw. experimentelle Weiterentwicklung zu überführen.

5 Ausblick und Empfehlungen

Durch die Einreichung des Patents haben sich einzelne kleine Verwertungsansätze verschoben und konnten nicht während der Projektlaufzeit durchgeführt werden. Stattdessen werden diese durch Eigenmittel der FHV derzeit noch weiterverfolgt. Die Einreichung der wissenschaftlichen Publikation ist dabei im Endstadium und soll bis 31.7.2023 in der renommierten Fachzeitschrift Energy and Environmental Science (Editorial Board Chair: Jenny Nelson, Impact factor: 39,7) erfolgen.

Zusätzlich sind konkrete Verwertungspläne in Entwicklung. Zum einen möchte der Projektleiter Stefan Arzbacher, der nach Projektende als Entwicklungsleiter zu einem amerikanischen Energy Tech Startup wechselte, das dort bestehende Investorennetzwerk nutzen, um eine Anschubfinanzierung für eine Verwertung der Technologie, auch in Kooperation mit der FHV, einzuwerben. Auch FHV-intern werden weitere Verwertungsmöglichkeiten ergebnisoffen diskutiert. Das kann zum Beispiel die Ausgründung eines Spin-Offs sein oder auch ein weiterführendes Großprojekt in Kooperation mit Industriepartnern. Hierzu wäre es aus Sicht der FHV aber nötig, zu eruieren, ob die Industriepartner ein Interesse am Erwerb oder der Nutzung des Patentes bereits in einer frühen Phase haben.

Die Zukunft wird zeigen, ob eine Hochskalierung und industrielle Umsetzung möglich ist. Wenn ja, würde sich ein Win/Win/Win für Forscher:innen/Fördergeber/Industrie ergeben. Doch selbst ohne eine industrielle Umsetzung in den nächsten 1-2 Jahren liefern die einzureichende Publikation und das Patent an sich wichtige Impulse für eine der größten Herausforderungen der Energiewende: die Reduktion des CO₂ Gehalts in der Atmosphäre.

6 Literaturverzeichnis

- [1] C. Song u. a., „Alternative pathways for efficient CO₂ capture by hybrid processes—A review“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 82, S. 215–231, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.040.
- [2] F. M. Baena-Moreno, M. Rodríguez-Galán, F. Vega, B. Alonso-Fariñas, L. F. Vilches Arenas, und B. Navarrete, „Carbon capture and utilization technologies: a literature review and recent advances“, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Bd. 41, Nr. 12, S. 1403–1433, Juni 2019, doi: 10.1080/15567036.2018.1548518.
- [3] N. N. Nguyen, V. T. La, C. D. Huynh, und A. V. Nguyen, „Technical and economic perspectives of hydrate-based carbon dioxide capture“, *Applied Energy*, Bd. 307, S. 118237, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118237.
- [4] R. Ben-Mansour u. a., „Carbon capture by physical adsorption: Materials, experimental investigations and numerical modeling and simulations – A review“, *Applied Energy*, Bd. 161, S. 225–255, Jän. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.10.011.
- [5] R. Khalilpour, K. Mumford, H. Zhai, A. Abbas, G. Stevens, und E. S. Rubin, „Membrane-based carbon capture from flue gas: a review“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 103, S. 286–300, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.10.050.
- [6] C. Font-Palma, D. Cann, und C. Udemu, „Review of Cryogenic Carbon Capture Innovations and Their Potential Applications“, *C*, Bd. 7, Nr. 3, S. 58, Juli 2021, doi: 10.3390/c7030058.
- [7] M. Najera, R. Solunke, T. Gardner, und G. Veser, „Carbon capture and utilization via chemical looping dry reforming“, *Chemical Engineering Research and Design*, Bd. 89, Nr. 9, S. 1533–1543, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.cherd.2010.12.017.
- [8] X. Wang und C. Song, „Carbon Capture From Flue Gas and the Atmosphere: A Perspective“, *Front. Energy Res.*, Bd. 8, S. 560849, Dez. 2020, doi: 10.3389/fenrg.2020.560849.
- [9] E. D. Sloan, „Fundamental principles and applications of natural gas hydrates“, *Nature*, Bd. 426, Nr. 6964, S. 353–359, Nov. 2003, doi: 10.1038/nature02135.

7 Kontaktdaten

Prof. (FH) Dr.-Ing. Markus Preißinger

FHV – Vorarlberg University of Applied Sciences

Hochschulstraße 1

6850 Dornbirn

www.fhv.at

www.fhv.at/forschung/energie

<https://www.fhv.at/forschung/energie/projekte/laufende-projekte/hbcc>