



## H<sub>2</sub>Mare-Projekt PtX-Wind

**Entwicklung einer offshore PtG-Prozesskette aus katalytischer Wabenmethanisierung, Gasaufbereitung und direkt gekoppelter Methanverflüssigung**

### Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil II: Langfassung

---

Stand:	31.03.2026
Einreichungsdatum (TIB):	31.03.2026
Partnerin/Partner:	Karlsruher Institut für Technologie - Engler-Bunte-Institut (KIT-EBI)
Autorin/Autor:	Martin Kansy, Dr.-Ing. Siegfried Bajohr
Fördertitel:	Verbundvorhaben H2Mare_VB2: PtX-Wind – Offshore Power-to-X-Prozesse
Förderkennzeichen:	03HY302L
Laufzeit:	01.04.2021 – 31.12.2025
Disclaimer:	<i>Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor/den Autoren.</i>

---

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt



Finanziert von der  
Europäischen Union  
NextGenerationEU

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	6
I. Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse im Vergleich zur ursprünglichen Vorhabensbeschreibung .....	7
I.1 Grundlagenuntersuchungen zur Offshore-Methanisierung.....	8
I.2 Reaktordesign zu Offshore-Methanisierung .....	17
I.3 Übertragung in den 100 kW Maßstab /Basic Engineering einer offshore PtM-Prozesskette.....	22
II. Verwendung der Zuwendung.....	24
II.1 Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	24
II.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....	24
III. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans .	24
IV. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens während der Laufzeit.....	24
V. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen nach Nr. 5 der NKBF/NABF .....	26
VI. References.....	27

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Ethan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
Cu	Kupfer
DAC	Direct-Air-Capture, CO <sub>2</sub> -Gewinnung
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
PEM	Proton Exchange Membrane, Elektrolyseverfahren
SiC	Siliziumcarbid
SOEC	Solid Oxide Electrolysis Cell, Elektrolyseverfahren

## Variablen

Variable	Einheit	Bezeichnung
<b>A</b>	m <sup>2</sup>	Fläche
<b>c<sub>Kat</sub></b>	kg/m <sup>3</sup>	Beladung der Wabenstruktur mit Katalysator pro Volumen
<b>ε</b>	-	Hohlraumanteil
<b>F</b>	m <sup>-1</sup>	Wellenzahl
<b>GHSV</b>	h <sup>-1</sup>	Gas Hourly Space Velocity (modifizierte Verweilzeit)
<b>ΔH<sub>R</sub></b>	kJ/mol	Reaktionsenthalpie
<b>l</b>	mm	Länge (Messung)
<b>λ</b>	W/(m · K)	Wärmeleitfähigkeit
<b>L</b>	mm	Länge (Modellierung, konstant)
<b>Pr</b>	-	Prandtl-Zahl
<b>Q̇</b>	W	Wärmestrom
<b>r</b>	mm	Radius
<b>r<sub>CO2</sub></b>	mol/s	Reaktionsgeschwindigkeit
<b>Re</b>	-	Reynoldszahl
<b>s</b>	mm	Dicke
<b>T</b>	°C	Temperatur
<b>u</b>	m/s	Geschwindigkeit
<b>ṽ</b>	m <sup>3</sup> /s	Volumenstrom
<b>y</b>	-	Stoffmengenanteil

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wabenreaktor.....	7
Abbildung 2: Faseroptischer Messsensor (links), isolierter Reaktorkopf mit eingesetzten Messsensoren (rechts)	8
Abbildung 3: Vergleich der Temperaturmessungen mit einem Thermoelement, der im faseroptischen Messsystem hinterlegten und der angepassten Kalibrierung .....	9
Abbildung 4: Angepasste Kalibrierfunktion für die verwendeten faseroptischen Messsensoren .....	10
Abbildung 5: Anspringverhalten der Methanisierungsreaktion; Temperaturdifferenz im Festbett zur Tarierung ( $T = 200\text{ °C}$ ), GHSV $600\text{ h}^{-1}$ , $H_2/CO_2 = 4$ , $\gamma_{N_2} = 0,05$ , $T_{Kühlung} = 240\text{ °C}$ .....	10
Abbildung 6: Untersuchungen zur Verbesserung der Wärmeabfuhr und Nachweis der Radialsymmetrie.....	14
Abbildung 7: Radiale Temperaturverteilung während der Methanisierung; radial interpoliert, axiale Auflösung der Messpunkte: $1,3\text{ mm}$ ; GHSV: $1800\text{ h}^{-1}$ $H_2/CO_2 = 4,1$ ; $\gamma_{N_2} = 0,05$ .....	15
Abbildung 8: Axiales und radiales Temperaturprofil in der Wabenstruktur (ohne Reaktion), $T_{Öl} = 300\text{ °C}$ ; $T_{Luft,ein} = 50\text{ °C}$ ; $V_{Luft,ein} = 2,2\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .....	16
Abbildung 9: Untersuchte Wabenstrukturen, (a) Ringwabe mit CAD-Skizze, (b) "S-Wabe" mit CAD Skizze .....	16
Abbildung 10: Vergleich der nach eigenen Korrelationen berechneten effektiven Wärmeleitfähigkeit mit experimentellen Daten und Literatur [8, 9].....	17
Abbildung 11: Skizze zur Reaktormodellierung, vgl. Tabelle I-2.....	18
Abbildung 12: Variation des Volumenstroms in Abhängigkeit von der Kühltemperatur $T_{Öl}$ ; $L = 300\text{ mm}$ ; $c_{Kat} = 100\text{ kg/m}^3$ .....	19
Abbildung 13: Variation des Volumenstroms in Abhängigkeit von der Reaktorlänge $L$ ; $T_{Öl} = 280\text{ °C}$ ; $c_{Kat} = 100\text{ kg/m}^3$ .....	20
Abbildung 14: Variation der Feedzusammensetzung; $L = 700\text{ mm}$ ; $T_{Öl} = 280\text{ °C}$ ; $c_{Kat} = 100\text{ kg/m}^3$ .....	21
Abbildung 15: Schematischer Aufbau des Reaktors der 100 kW Demonstrationsanlage am KIT Energy Lab .....	21
Abbildung 16: Detailfoto des Aufbaus mit zwei Waben und zwischengeschalteter Mischpackung, Temperaturmesslanzen und Weichmetallblechhülle zur Gewährleistung eines hohen Wärmeaustauschs mit dem äußeren Reaktorrohr (hier nicht gezeigt).....	22
Abbildung 17: Methanisierungs-Anlagenverbund am KIT Energy Lab, a: Methanisierung; b: Gasaufbereitung; c: Verflüssigung; d: Leitwarte. ....	22
Abbildung 18: Skizze der verbindenden Rohrleitungen, rot markiert: Wärmeübertrager. Aufbau der Prozesskette (von links nach rechts): Gasreinigung – Methanisierung – Verflüssigung. ....	23
Abbildung 19: Aufbau des Wärmeübertragers und der Rohrleitungen zwischen Methanisierungsanlage (rechts) und Verflüssiger (links). ....	23

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle I-1: Übersicht der zu erwartenden Feedkomponenten in einer Offshore-Umgebung</i> .....	13
<i>Tabelle I-2 Beschreibung der in der Modellierung verwendeten Variablen</i> .....	19
<i>Tabelle V-1: Erfolgte Veröffentlichungen</i> .....	26

## I. Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse im Vergleich zur ursprünglichen Vorhabensbeschreibung

Im Rahmen des Unterarbeitspakets sollten theoretische und experimentelle Arbeiten zur Wabenmethanisierung am KIT-EBI durchgeführt werden. Die hierbei betrachtete Methanisierungsreaktion nach Gl. 1 beschreibt die katalytisch aktivierte, stark exotherme Gleichgewichtsreaktion von Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) zu den Produkten Methan (CH<sub>4</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O). Analog dazu kann die Reaktion von Kohlenstoffmonoxid (CO) nach Gl. 2 beschrieben werden [1]. Auf Grund der vorgesehenen Verwendung von CO<sub>2</sub> in der Offshore-Prozesskette ist dessen direkte Nutzbarkeit bei der katalytischen Methanisierung ein wesentlicher Vorteil zu den weiteren im Projekt betrachteten kohlenstoff-haltigen PtX-Produkten, welche vor der eigentlichen Synthese eine Umwandlung von CO<sub>2</sub> zu CO integrieren müssen.



Typischerweise wird die katalytische Methanisierung in Festbettreaktoren durchgeführt [2]. Durch die starke Wärmefreisetzung beim Abfließen der exothermen Reaktion kann es im eingesetzten Reaktor zu unzulässig hohen Temperaturen kommen. Diese stellen einerseits ein sicherheitstechnisches Risiko dar, da es zu Materialversagen der drucktragenden Anlagenteile kommen kann, andererseits kann es durch Sintern und andere thermisch induzierte Effekte zum Absinken der Katalysatoraktivität und damit der Prozesseffizienz kommen. Zusätzlich führen hohe Temperaturen zu einer Limitierung des möglichen Umsatzes, da bei exothermen Reaktionen sich das Gleichgewicht mit steigender Temperatur zunehmend auf die Eduktseite verschiebt [2]. Am KIT-EBI wird daher die Untersuchung des Reaktorkonzepts der Wabenmethanisierung forciert, welches die genannten Probleme durch Intensivierung des Wärmetransports aus der heißen Reaktionszone durch eine gut wärmeleitende Trägerstruktur löst. Der verwendete Methanisierungs-Katalysator wird mit einem selbstentwickelten Verfahren auf einen metallischen Träger, die Waben, aufgetragen. Die Waben bestehen aus metallischen, kontinuierlichen und wärmeleitenden Metallblechen, welche für eine gute Wärmeabfuhr aus der heißen Reaktionszone sorgen und darin einer konventionellen Schüttung aus Katalysatorpellets überlegen sind. Auf Grund der hohen Verfügbarkeit dieser Strukturen (Verwendung als Abgaskatalysatorträger in der Automobilindustrie) und dem Einsatz eines kommerziellen Methanisierungs-Katalysators bieten diese im folgenden Wabenreaktoren (vgl. Abbildung 1) genannten Strukturen eine vielversprechende, schnell verfügbare Alternative zu den herkömmlichen Reaktorkonzepten. Zur Verbesserung der Auslegung der Wabenreaktoren wird die Untersuchung und mathematische Beschreibung der ablaufenden Wärme- und Stofftransportvorgänge vorangetrieben, um das weitere Scaleup und damit die Überführung in den technisch relevanten Maßstab zu verbessern. Zur Generierung der experimentellen Daten, anhand derer die Modelle aufgestellt und/oder validiert werden, wurde am KIT-EBI in der Vergangenheit eine Laborapparatur aufgebaut.

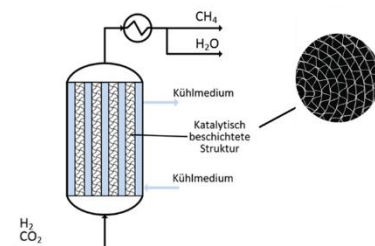


Abbildung 1: Wabenreaktor

Zur Verbesserung der Auslegung der Wabenreaktoren wird die Untersuchung und mathematische Beschreibung der ablaufenden Wärme- und Stofftransportvorgänge vorangetrieben, um das weitere Scaleup und damit die Überführung in den technisch relevanten Maßstab zu verbessern. Zur Generierung der experimentellen Daten, anhand derer die Modelle aufgestellt und/oder validiert werden, wurde am KIT-EBI in der Vergangenheit eine Laborapparatur aufgebaut.

Diese vorhandene Laborapparatur zur Wabenmethanisierung soll im Rahmen des Projekts um eine faseroptische hochauflösende Temperaturmessung erweitert werden, die bisher nicht messbare 3D-Temperaturverteilungen im Wabenreaktor erfassbar macht. Durch die Einbindung der Prozesskette in

die Offshore-Umgebung ist zu erwarten, dass Begleitstoffe aus z.B. der Meerwasserelektrolyse einen Einfluss auf die Katalysatoraktivität haben. Ebenfalls kann es durch die Rückführung von Gas im Prozess zur Akkumulation von Inertkomponenten oder höheren Kohlenwasserstoffen im Gaskreislauf kommen. Die Einflüsse dieser Begleitstoffe auf die katalytischen Methanisierung sollten systematisch untersucht werden. Durch Untersuchungen der Temperaturverteilung in den Wabenkörpern sollen Daten gewonnen werden, welche für die Validierung einer Reaktormodellierung genutzt werden sollen. Mit dem Modell sollte im ersten Schritt die Auslegung des Reaktors einer 100 kW-Methanisierungsanlage am KIT Energy Lab erfolgen, und eine weitere Validierung im industriellen Maßstab durchgeführt werden. Die Methanisierungsanlage soll Teil eines Anlagenverbunds mit Gasaufbereitung und Verflüssigung, betrieben durch DVGW-EBI sein, die Infrastruktur wird seitens KIT-EBI als Teil des KIT Energy Lab bereitgestellt. Mittels der bereitgestellten Daten soll abschließend ein Up-Scaling des Konzepts auf eine Anlagengröße von 100 MW el. Anschlussleistung der Wasserelektrolyse erfolgen.

## I.1 Grundlagenuntersuchungen zur Offshore-Methanisierung

### *Inbetriebnahme der Labor-Methanisierung*

Für den gleichzeitigen Einsatz von vier Temperatur-Messfühlern, welche auf verschiedenen Radien im Reaktor eingesetzt werden, wurde am KIT-EBI ein doppelwandiger Druckbehälter (Reaktor) ausgelegt und gefertigt. Mit Hilfe dieses Aufbaus können hochaufgelöste achsiale und radiale Temperturverteilungen im Methanisierungsreaktor bestimmt werden, die anschließend in die weitere Modellbildung einfließen. In Abbildung 2 auf der linken Seite beispielhaft ein Sensor dargestellt. Durch das gelbe Kabel, das Stahlrohr und die Stahlkapillare zieht sich ein durchgängiges Glasfaserkabel, durch welches ein Lichtsignal läuft. Die auftretende Rayleigh-Streuung wird als rückläufiges Signal gemessen und für die hochauflösende Temperaturmessung verwendet. Dabei wird das Prinzip ausgenutzt, dass jede Position der Glasfaser auf Grund der amorphen Struktur ein charakteristisches Signal zurückgibt. Die Position wird aus der Laufzeit des Signals berechnet. Verschiebt sich diese Position durch die Wärmeausdehnung beim Anlegen einer Temperatur, kann über den Zusammenhang von angelegter Temperatur und der ausgedehnten Strecke die am Sensor vorliegende Temperatur bestimmt werden [3]. Da die Methanisierungsapparatur unter erhöhtem Druck (bis zu 30 bar) betrieben wird, wurde das reaktorseitige Ende der Stahlkapillare verschweißt, ebenso die Verbindung zum Stahlrohr, sodass eine herkömmliche Rohrverschraubung genutzt werden kann. Dies hat den Vorteil, dass der Sensor relativ einfach in die Anlagenperipherie integriert werden kann. Der Aufbau mit vier Sensoren ist auf der rechten Seite von Abbildung 2 dargestellt.

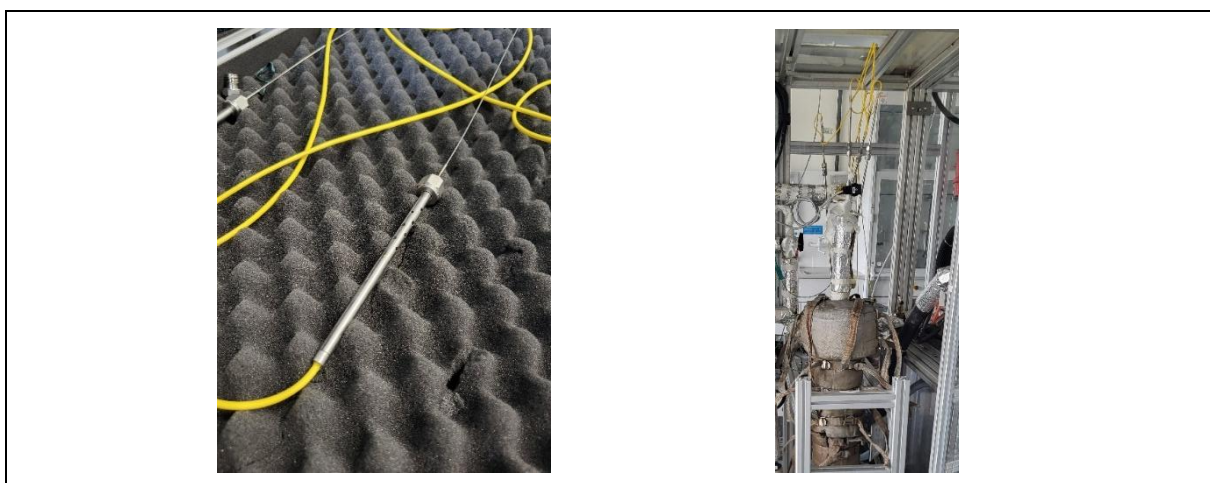


Abbildung 2: Faseroptischer Messsensor (links), isolierter Reaktorkopf mit eingesetzten Messsensoren (rechts)

Die Methanisierungsapparatur wurde ursprünglich für die Untersuchung der katalytischen Methanisierung in Festbetten aufgebaut. Sie zeichnet sich durch die Möglichkeit aus die Gase CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> und über einen integrierten Verdampfer auch H<sub>2</sub>O zu dosieren und in den gewünschten Stoffmengenanteilen zu mischen. Für den erstmaligen Einsatz der neuartigen Temperatur-Messtechnologie wurde zunächst eine mit Siliziumkarbid (SiC) verdünnte Katalysatorschüttung in den Reaktor eingefüllt. Hierbei wurde exemplarisch ein Messsensor zentrisch platziert, und durch einen Dreifuß mit Lochplatte in Position gehalten. Gleichzeitig wurde ein Führungsrohr von der anderen Seite des Reaktors eingeführt, welches nach außen hin offen und zum Reaktorinneren verschweißt ist. In diesem Führungsrohr wurde ein kalibriertes Thermoelement eingeführt, welches als Referenztemperatur in der Schüttung dient. Der Reaktor wird von außen über einen Doppelmantel mit Thermalöl aufgeheizt, welches über einen Hochtemperaturthermostaten temperiert wird. In Abbildung 3 ist der Vergleich der Messung der Temperatur im Zentrum des Reaktors mittels kalibriertem Thermoelement und den Ergebnissen des Messensors dargestellt. Die vom Hersteller hinterlegte Kalibrierfunktion, welche die beschriebene Änderung der Messposition im Zusammenhang mit der angelegten Temperatur beschreibt, erwies sich für den für die Methanisierung relevanten Temperaturbereich von bis zu 550 °C als zu unpräzise.

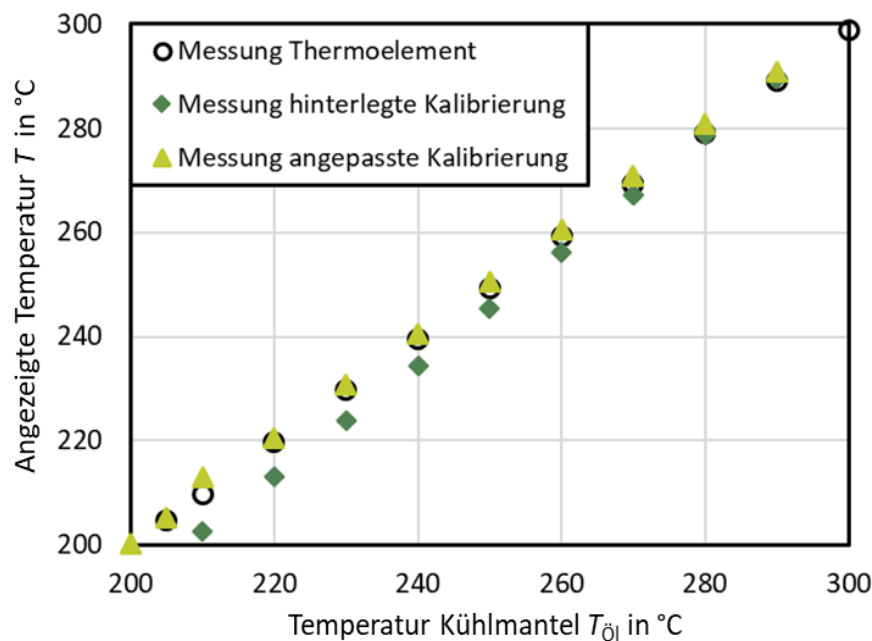


Abbildung 3: Vergleich der Temperaturmessungen mit einem Thermoelement, der im faseroptischen Messsystem hinterlegten und der angepassten Kalibrierung

In Folge dessen wurde in weiteren Arbeiten eine eigene Kalibrierfunktion, dargestellt in Abbildung 4, entwickelt, welche einen Gültigkeitsbereich von 50 bis 550 °C abdeckt. Hierfür wurde eine weitere Versuchsanlage des KIT-EBI mit einem elektrisch beheizten Ofen verwendet, die Kalibriermethode wurde dabei gleich gehalten.

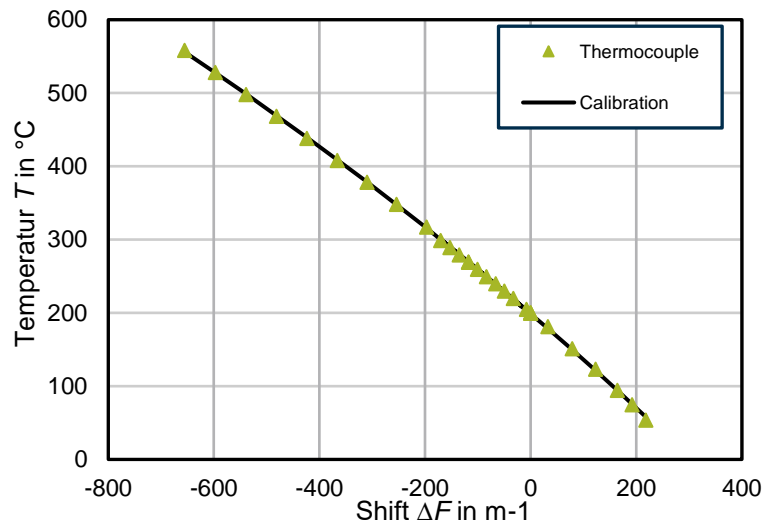


Abbildung 4: Angepasste Kalibrierfunktion für die verwendeten faseroptischen Messsensoren

Für die Inbetriebnahme der Methanisierungsapparatur mit neuartiger Temperatur-Messtechnologie wurde zunächst die Dichtigkeit überprüft, hierfür wurde ein Überruck von 7 bar mit Wasserstoff aufgebaut und über eine Stunde nach Abschließen der Zuleitung erfolgreich gehalten. Nach dem Aktivieren der erwähnten Katalysatorschüttung mit H<sub>2</sub> wurde der Reaktor für die Methanisierung eingesetzt. In Abbildung 5 ist die resultierende Temperaturdifferenz zum Ausgangszustand ( $T = 200\text{ }^{\circ}C$ ) als Funktion der Länge des Messensors zeitlich aufgelöst dargestellt. Der Versuch beginnt mit der Zugabe von CO<sub>2</sub> zum H<sub>2</sub>-reichen Feedstrom, sodass die Methanisierungsreaktion ablaufen kann. Es ist deutlich zu sehen, dass der Messsensor in der Lage ist, sekundengenau und mit einer Auflösung von 1.3 mm zwischen den Messpunkten das Ausbilden der charakteristischen Hotspot Profile aufzuzeichnen. Es scheint so, als wenn die Reaktion im Einlassbereich des Reaktors vorrangig abläuft, und durch die Verteilung der Gasströmung in der Schüttung die Reaktionswärme an die gekühlten Reaktorwände abgeführt wird. Mit den beschriebenen Arbeiten konnte der Meilenstein im UAP 1.5 M1 „Inbetriebnahme der Labor-Methanisierung (0,5 kW)“ erfolgreich abgeschlossen werden.

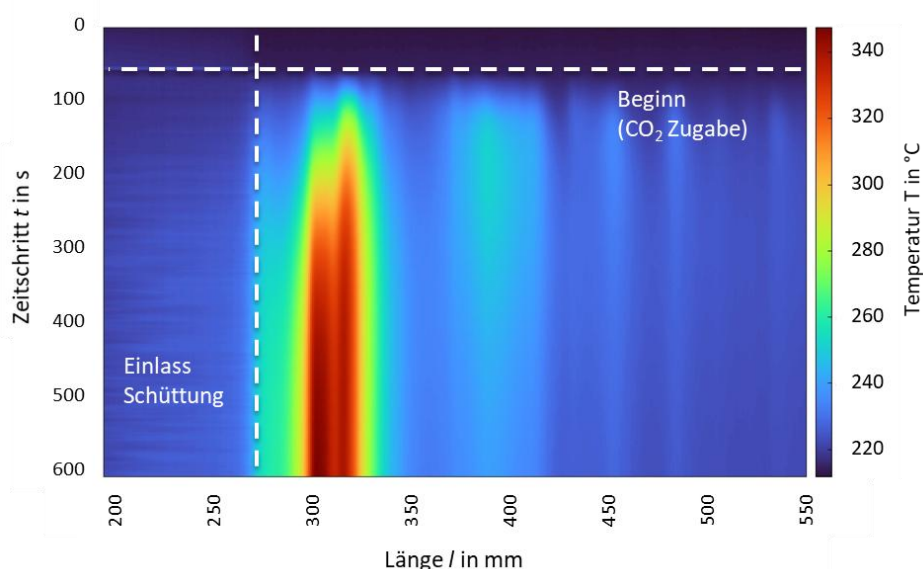


Abbildung 5: Anspringverhalten der Methanisierungsreaktion; Temperaturdifferenz im Festbett zur Tarierung ( $T = 200\text{ }^{\circ}C$ ),  $GHSV\ 600\ h^{-1}$ ,  $H_2/CO_2 = 4$ ,  $y_{N_2} = 0,05$ ,  $T_{K\ddot{u}hlung} = 240\text{ }^{\circ}C$

### *Quantifizierung des Einflusses von Spurengasen und weiteren Begleitkomponenten aus der Wasserelektrolyse auf die Methanisierung*

Auf Grund des geplanten Offshore-Einsatzes der Prozesskette von der Energieerzeugung (Windturbine) bis zum Produkt LNG wurde mit Einflüssen auf die Gasqualität der Feedströme für die Methanisierung gerechnet. Unerwünschte Begleitstoffe, wie z. B. Chlor oder langkettige Kohlenwasserstoffe, können zu einer chemischen Reaktion auf dem eingesetzten Katalysator führen und diesen schädigen, was wiederum die Aktivität und damit die Prozesseffizienz senkt. Zur Untersuchung der zu erwartenden Komponenten wurde am KIT-EBI in Rücksprache mit den Projektpartnern DLR, DVGW-EBI und TKIS ein Screening der zu erwartenden Feedzusammensetzung durchgeführt. Die Ergebnisse des Screenings sind in Tabelle I-1 dargestellt. Im Laufe des Projekts hat sich durch die Arbeiten der genannten Projektpartner herausgestellt, dass sich die Begleitkomponenten weniger kritisch als zunächst angenommen erweisen. Die Permanentgase CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> sowie H<sub>2</sub>O sind als Hauptkomponenten der Reaktion in höchster Konzentration enthalten. Das Wasser kann theoretisch zur Reoxidation, und damit Desaktivierung, des Katalysators führen, wurde jedoch im Verlauf der am KIT-EBI Versuchskampagnen nicht beobachtet und dieser Desaktivierungsmechanismus wird bei der katalytischen Methanisierung normalerweise auch nicht beobachtet. Bei Temperaturspitzen ( $T > 500\text{ °C}$ ) kann sich aus dem CO<sub>2</sub> nach Gl. 3 CO in relevanten Mengen bilden, welches sich wiederum über die endotherme Reaktion vgl. Gl. 4 (= reverse Boudouard-Reaktion), zu festem Kohlenstoff umwandeln kann und die Aktiven Zentren des Katalysators blockiert (= Desaktivierung) [4]. Über die Wärmeabfuhr der Waben werden jedoch diese Temperaturspitzen begrenzt, und durch die Zugabe eines geringen Wasserstoffüberschusses kann die Präsenz von CO durch die schnelle Abreaktion nach Gl. 2 limitiert werden. Der Einfluss von CH<sub>4</sub> als Produktgas in hohen Konzentrationen zeigt sich in erster Linie im thermodynamischen Gleichgewicht und Methan dadurch theoretisch den Umsatz von CO<sub>2</sub>. Durch eine Anpassung der Betriebsparameter kann diese Limitierung durch eine weitere Verschiebung des Gleichgewichts zu den Produkten umgangen werden.



Intensiv diskutiert wurde im Projekt die direkte Nutzung von Meerwasser in der Wasserelektrolyse zur Erzeugung von H<sub>2</sub>, welches im Vorfeld als Hauptquelle für Verunreinigungen identifiziert wurde. Auf Grund der weiterhin erfolgenden Grundlagenarbeiten zur Untersuchung der Degradation der Elektrolysezelle, der Wahl der Materialien und der möglichen Elektrolyseleistung wurde diese Option für die großskaligen Auslegungen im Arbeitspaket „Herstellung von verflüssigtem Methan“ nicht weiter betrachtet. Die Alternativen, eine Proton Exchange Membrane (PEM) oder Feststoff Elektrolyse (SOEC), bieten hohe H<sub>2</sub>-Produktreinheiten von. Metallische Verunreinigungen können wegen der hohen Einsatztemperaturen der SOEC auftreten, sind jedoch in der ersten Annahme zum Betrieb als nicht nachweisbar einzustufen.

Eine wesentliche Herausforderung stellt der Umgang mit O<sub>2</sub> dar. Eine Literaturrecherche, welche auf Grund mangelnder Erfahrung im Betrieb von derartigen Anlagen im offshore Betrieb, zu Direct-Air-Capture (DAC)-Verfahren zur Gewinnung von CO<sub>2</sub> aus der Luft durchgeführt wurde zeigte, dass ein relativ hoher Anteil von Sauerstoff im abgeschiedenen CO<sub>2</sub> und damit im Feedgas der Methanisierung enthalten sein kann [5]. Der O<sub>2</sub> könnte ein sicherheitsrelevantes Problem durch die explosive Reaktion mit H<sub>2</sub> darstellen, und er kann bei Kontakt mit dem Katalysator diesen reoxidieren (= Desaktivierung). Da aus dem Projekt die Frage der Machbarkeit, Skalierbarkeit und der Produktqualität von DAC-Prozessen in der Offshore Umgebung nicht abschließend beantwortet werden konnte, wird unter anderem in den Prozessbetrachtungen und -modellierungen auf diesen Bereitstellungspfad als Option verzichtet. Alternativ wird im Arbeitspaket CO<sub>2</sub> aus z.B. biogenen Quellen betrachtet, welches dem technischen Standard entspricht und z.B. per Schiffstransport oder Pipeline bereitgestellt werden

kann. Der Anteil an O<sub>2</sub> aus der Erzeugung von H<sub>2</sub> in der Wasserelektrolyse stellte sich als vernachlässigbar klein heraus und wurde auf Grund der deutlich unterhalb der Explosionsgrenzen liegenden zu erwartenden Konzentrationen nicht näher betrachtet.

Nebenprodukte, welche bei der Methanisierungsreaktion entstehen können, wie z. B. Ethan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) und CO, könnten durch das Rückführen von Produktgas oder unreaktierten Produktgaskomponenten in Spuren auch im Feedgasstrom auftreten. Wie bereits diskutiert, ergeben sich hieraus jedoch keine relevante Einschränkungen für die Methanisierung. Das C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> kann über die Hydrogenolyse mit H<sub>2</sub> zu CH<sub>4</sub> abgebaut werden, was experimentell am verwendeten Katalysator bestätigt werden konnte [6, 7]. Da C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> einen höheren Siedepunkt als CH<sub>4</sub> vorweist, ist es zu erwarten, dass der Großteil nach der Verflüssigung im LNG-Tank wiederzufinden ist. Experimentelle Untersuchungen zur Methanisierung haben gezeigt, dass mit ca. 0,2 % nur geringe Stoffmengenanteile an C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> zu erwarten sind .

Durch den intensiven Austausch mit den Projektpartnern konnten die in der Vorhabensbeschreibung definierten Ziele schnell und zufriedenstellend erreicht werden. Die Anforderungen der katalytischen Methanisierung an die Gasqualität werden bereits durch die Wahl der einzelnen Prozesskomponenten (z. B. CO<sub>2</sub>- Bereitstellung und Wasseraufbereitung) übererfüllt.

Tabelle I-1: Übersicht der zu erwartenden Feedkomponenten in einer Offshore-Umgebung

Komponente	Erwartbarer Anteil im Feed	Herkunft	Bewertung
H <sub>2</sub>	75 - 80 %	Wasser-Elektrolyse	unkritisch
CO <sub>2</sub>	18 - 20 %	Nutzung technisches CO <sub>2</sub>	unkritisch
H <sub>2</sub> O	< 0,2 %	Gasrecycle, CO <sub>2</sub> -Quelle	unkritisch
CH <sub>4</sub>	< 5 %	Gasrecycle	Einfluss auf das thermodynamische Gleichgewicht zu erwarten
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	< 10 ppm	Gasrecycle	unkritisch, Abbau zu CH <sub>4</sub>
CO	< 0,03 %	Gasrecycle	Verkokungen am Katalysator möglich, unwahrscheinlich bei ausreichend H <sub>2</sub> im Feedgas
O <sub>2</sub>	< 2 % < 10 ppm < 10 ppm	DAC Elektrolyse Nutzung technisches CO <sub>2</sub>	sicherheitstechnisches Risiko, Reoxidation des Katalysators bei hohen Partialdrücken möglich, DAC Daten aus Demonstrationsanlagen fehlen
Ni-, Si-, Fe-, V-Oxide Ni(OH) Si-Verbindungen	nicht nachweisbar	SOC-Elektrolyse	unkritisch

## Quantifizierung der Einflüsse der Wabendurchmesser und -geometrie, Katalysatorbeladung; Optimierung Wärmeabfuhr

Die bereits erwähnte Laborapparatur mit verbesserter Temperatur-Messtechnik wurde im weiteren Projektverlauf für die Untersuchung der Temperaturverteilung in den katalytisch beschichteten Wabenreaktoren für die Methanisierung genutzt. Einer der Untersuchungspunkte war die Quantifizierung des Einflusses des technisch bedingten Spaltes zwischen der Wabenwand und der Reaktorinnenwand auf den Wärmetransport. Dieser Spalt ist in der technischen Anwendung auf Grund von Fertigungstoleranzen des Reaktorrohrs und der Wabenstrukturen nicht zu vermeiden. Es konnte festgestellt werden, dass die Positionierung der Wabe im Reaktor einen wesentlichen Einfluss auf das thermische Profil im Reaktor hat. Durch das Einbringen eines Weichmetallbleches, welches den Kontakt zwischen Wabenwand und Reaktorinnenrohr sicherstellt, konnte ein gleichmäßiges Temperaturfeld erzeugt werden. In den Vorversuchen, in denen die Wabenstruktur „lose“ im Reaktor und damit mit undefiniertem Spalt platziert wurde, wurde die Temperatur der Wabenstruktur beim Ablaufen der Methanisierungsreaktion am Rand und in zentraler Position gemessen. Es ist zu beobachten, dass in einem solchen Aufbau die erfasste Maximaltemperatur am Rand sich um bis zu 120 °C unterscheiden. Weiterhing wurde die Maximaltemperatur in Randzonen, und nicht wie erwartet im Zentrum der Wabenstruktur, gemessen. Eine deutliche Verbesserung zeigte die Verwendung eines Weichmetalls. In Abbildung 6 ist dargestellt, wie das Temperaturprofil durch die Anpassung des Aufbaus homogenisiert wird. So wurden die Temperaturdifferenzen am Rand auf ca. 10 K reduziert. In diesem Fall weist das Zentrum die höchste Temperatur auf. Dies entspricht der zu erwartenden Abweichung durch die Wabenstruktur, Beschichtung, Anströmung und weiterer Effekte.

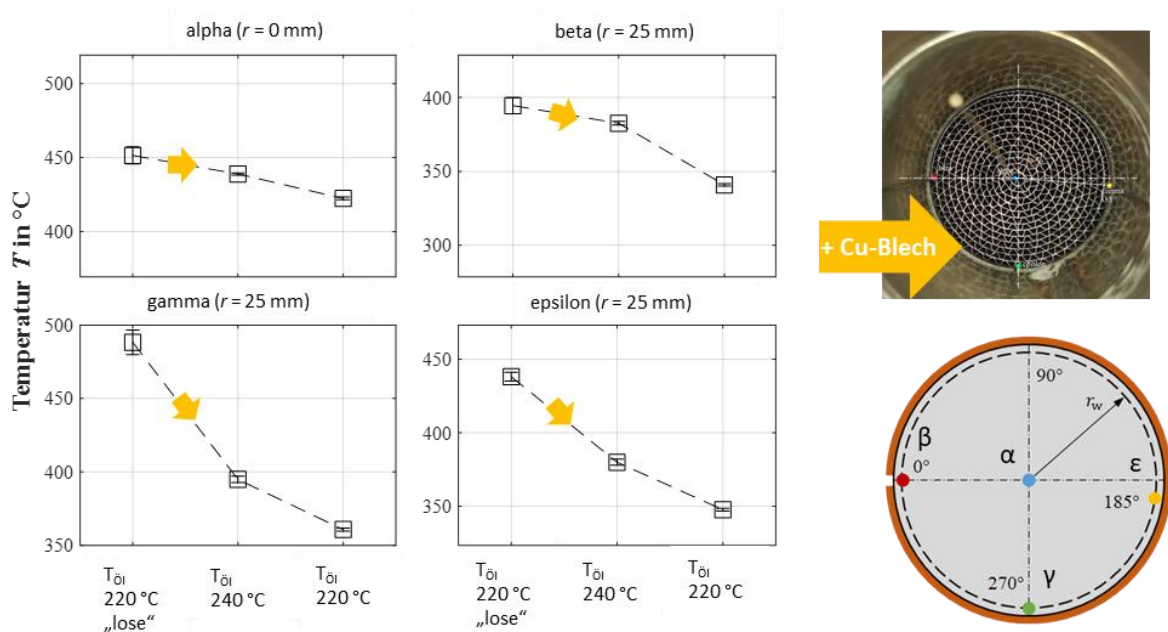


Abbildung 6: Untersuchungen zur Verbesserung der Wärmeabfuhr und Nachweis der Radialsymmetrie

In weiteren Versuchen wird der Einfluss der Anströmung der Wabe mit Feedgas untersucht. Naturgemäß bildet sich bei den Strömungsgeschwindigkeiten von 0,1 – 1 m/s in den verwendeten Reaktordurchmessern ein laminares Strömungsprofil aus. Zusätzlich kommt es im Laboraufbau auf Grund einer starken Querschnittsänderung von Rohrleitung zu Reaktor zu weiteren hydrodynamischen Inhomogenitäten. Beide Effekte führen dazu, dass eine ungleiche Gasbelastung über den Wabenquerschnitt zu einer Verzerrung des Temperaturprofils führt, welche im technischen Maßstab

so nicht auftreten würde. Um die Gleichverteilung der Gasströmung zu optimieren, wurden Gewebepackungen im Anströmbereich der Wabe platziert. Durch die Querverteilung der Strömung und der Wärmeleitung des Packungsmaterials können diese auch die Temperatur des anströmenden Gases auf die Kühltemperatur (= Außentemperatur des Reaktionsrohrs) bringen. Wie diese Vorwärmung aussehen kann, ist in Abbildung 7 dargestellt.

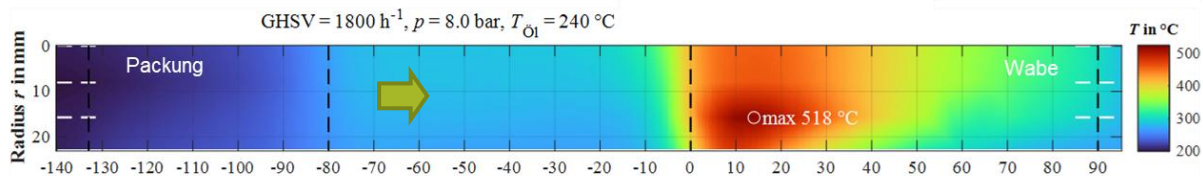


Abbildung 7: Radiale Temperaturverteilung während der Methanisierung; radial interpoliert, axiale Auflösung der Messpunkte: 1,3 mm; GHSV: 1800 h<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> = 4,1; y<sub>N<sub>2</sub></sub> = 0,05

Zu sehen ist die interpolierte Temperaturverteilung im Anströmbereich und innerhalb der Wabe während der Methanisierung. Die Stützstellen sind mit der weißen gestrichelten Linie markiert. Es ist zu erkennen, dass im Auslassbereich der Packung die Kühltemperatur T<sub>Öl</sub> erreicht wurde. Eine leichte Überhitzung vor der Wabe kann auf die Wärmeleitfähigkeit der zur Messung der Temperatur verwendeten Stahlkapillaren zurückgeführt werden. Die Maximaltemperatur innerhalb der Wabe wurde bei ca. 2/3 r der Wabe mit 518 °C gefunden. In Messungen ohne Packungen wurde ein ca. 50 K niedrigerer Hotspot gemessen, was auf den Effekt der verbesserten Vorwärmung zurückzuführen ist. Zu erwarten wäre eine axial zentrierte Hotspotposition. Dass dieser Effekt durch einen systematischen Fehler, wie beispielsweise durch eine ungleichmäßige Beschichtung oder eine ungleichmäßige Kühlung am Rand verursacht werden könnte, wurde mit dem Nachweis der Symmetrie widerlegt.

Zur detaillierten Ursachenforschung wurden die Wärmetransporteigenschaften der metallischen Wabenstrukturen genauer betrachtet. Über den Umfang des Projektantrags hinaus wurde hierfür eine weitere Versuchsapparatur umgebaut und ebenfalls für den Einsatz der faseroptischen Temperaturmessung umgerüstet. Hiermit können charakteristische Temperaturprofile aufgeprägt werden, in dem die Wabenstrukturen von außen über ein Ölbad temperiert und innen mit Luft durchströmt werden, welche wiederum auf eine definierte Temperatur geregelt wird. Ein solches Profil ist in Abbildung 8 dargestellt. Es ist zu erkennen, wie im Einlaufbereich der Wabe (z = 0 mm) die einströmende Luft die Wabenstruktur im Vergleich zur außen angelegten Öltemperatur von 300 °C abkühlt. Im weiteren Strömungsverlauf der Wabe wird bis zum Auslass der Wabe (z = 90 mm) Wärme über die Reaktorwand eingetragen und das Temperaturfeld zunehmend homogener. Das Temperaturprofil wird hierbei aus den vier Messpositionen (schwarze gestrichelte Linie) radial und axial interpoliert. Die axiale Auflösung der Messpunkte entspricht 1,3 mm.

Die Profile wurden mit eingestellten Temperaturen von T<sub>Öl</sub> = 300 °C und T<sub>Luft</sub> = 50 °C sowie T<sub>Öl</sub> = 50 °C und T<sub>Luft</sub> = 400 °C aufgenommen. Die eingestellte volumenspezifische Verweilzeit entspricht der an der Demonstrationsanlage am KIT Energy Lab (siehe Kapitel I.3), sodass die gewonnenen Erkenntnisse direkt übertragen werden können.

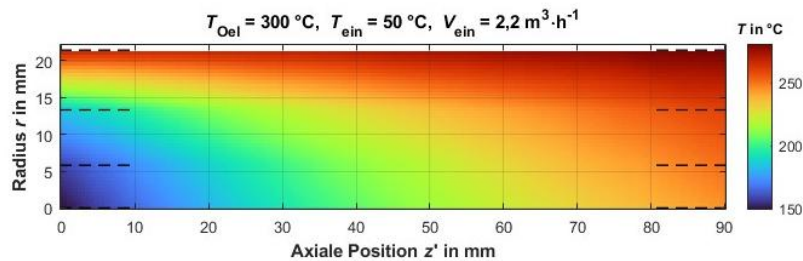


Abbildung 8: Axiales und radiales Temperaturprofil in der Wabenstruktur (ohne Reaktion),  $T_{Oel} = 300 \text{ °C}$ ;  $T_{Luft,ein} = 50 \text{ °C}$ ;  $\dot{V}_{Luft,ein} = 2,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Die aufgenommen Temperaturprofile wurden mittels eines CFD-Modells nachgebildet, welches die eingestellten Randbedingungen abbildet. Innerhalb der Modellierung wurde die effektive radiale Wärmeleitfähigkeit variiert. So konnte durch die Suche nach dem Minimum der Abweichung von modelliertem und gemessenen Temperaturprofile die Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Struktur zuverlässig bestimmt werden.

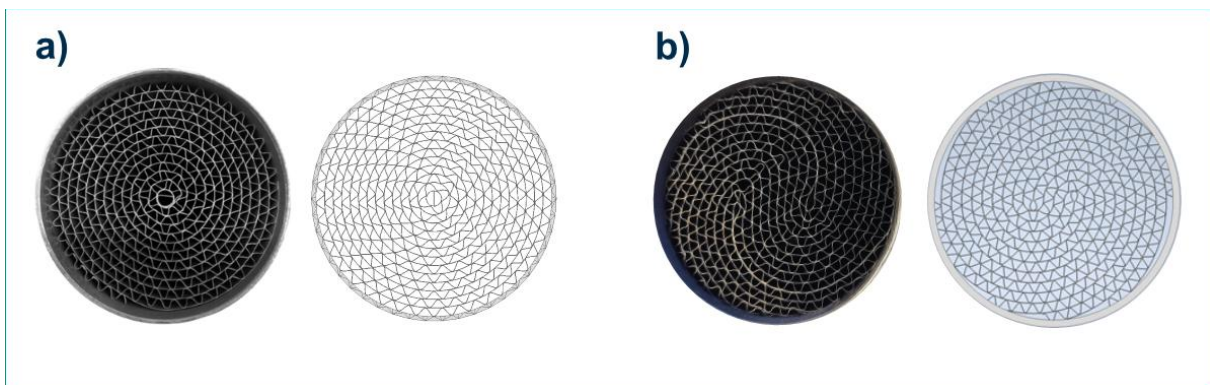


Abbildung 9: Untersuchte Wabenstrukturen, (a) Ringwabe mit CAD-Skizze, (b) "S-Wabe" mit CAD Skizze

Parallel zu den experimentellen Arbeiten wurden numerische Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit der gewickelten Wabenstrukturen durchgeführt. Es wurden die beiden verfügbaren gewickelten Geometrien, welche sich in ihrer Grundform unterscheiden, in ein vereinfachendes CFD-Modell überführt (vgl. Abbildung 9). Mittels einer Modellierung der Wärmeströme durch die zueinander gekrümmten und verschobenen glatten und gewellten Blechlagen konnten die Hauptwärmestransportpfade identifiziert werden. Da das Setzen der Randbedingungen in der Modellierung den Wärmestrom durch die Struktur beeinflusst, wurden repräsentative Volumenausschnitte definiert. Dieser Volumenausschnitte wurden im Model variiert, und in den resultierenden Geometrien numerisch durch Anlegen eines Temperaturgradienten die effektive Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Diese Methode wurde für eine zylindrische Form (entspricht einem Kreisausschnitt) und eine rechteckige Form durchgeführt. Anhand der Modellierungen konnten zwei mathematische Modelle zur Beschreibung der effektiven Wärmeleitfähigkeit abgeleitet werden. Diese sind als Grenzwerte zu verstehen, die die vorteilhafteste und unvorteilhafteste Ausrichtung der einzelnen Wellblechlagen zueinander beschreibt. Durch die hierbei erfolgende Verschaltung der Einzelwiderstände der glatten und gewellten Blechlage ergibt sich ein Gesamtwiderstand, welche eine auf den Feststoff bezogene effektive Wärmeleitfähigkeit ergibt.

Der Vergleich der Ergebnisse der experimentelleren und mathematischen Betrachtungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit zu den gewickelten Strukturen sind Abbildung 10 dargestellt. Die

aufgestellten Modelle „fluchtend“ und „entgegengesetzt“ beschreiben die effektive Wärmeleitfähigkeit in Abhängig von der verwendeten Blechdicke. Es ist zu beachten, dass diese Gleichungen nicht physikalisch konsistent und nur für den Anwendungsbereich der Waben gültig sind. Eine weitere Verdickung der Blechlagen würde zu einer Überschneidung der Transportpfade in der Realität führen, sodass das mathematische Model versagt. Verglichen werden die berechneten Kurven mit den experimentellen Ergebnissen der Untersuchungen zu den Wabenstrukturen. Die beiden untersuchten Geometrien sind anhand ihrer Blechdicke charakterisiert. Beide Geometrien wurden systematisch auf Rotationssymmetrie untersucht, welche auch nachgewiesen werden konnte. Im Vergleich dazu ist ein Literaturmodell dargestellt, welches vom Leerraumanteil der Körper abhängt. Hiermit kann gezeigt werden, dass Modelle aus der Literatur, welche die Kanäle beispielsweise mit Rechtecken annähern, nicht ausreichend präzise für die Beschreibung der in diesem Fall vorliegenden Waben geeignet sind. Die durchgeführten Arbeiten verbessern das Verständnis der Wärmetransportvorgänge, die aufgestellten Modelle können für die Auslegung der Wabenreaktoren genutzt werden. In Kopplung der Stofftransportvorgänge, sowie die Beschreibung der ablaufenden Methanisierungsreaktion ist es möglich, genauere Vorhersagen zum sich ausbildenden Temperaturprofil zu treffen. Auftretende Maximaltemperaturen können sicherheitstechnische Probleme, wie eine unzureichende Materialstabilität, hervorrufen, sodass diese zu einer gezielten Auslegung vermieden werden können.

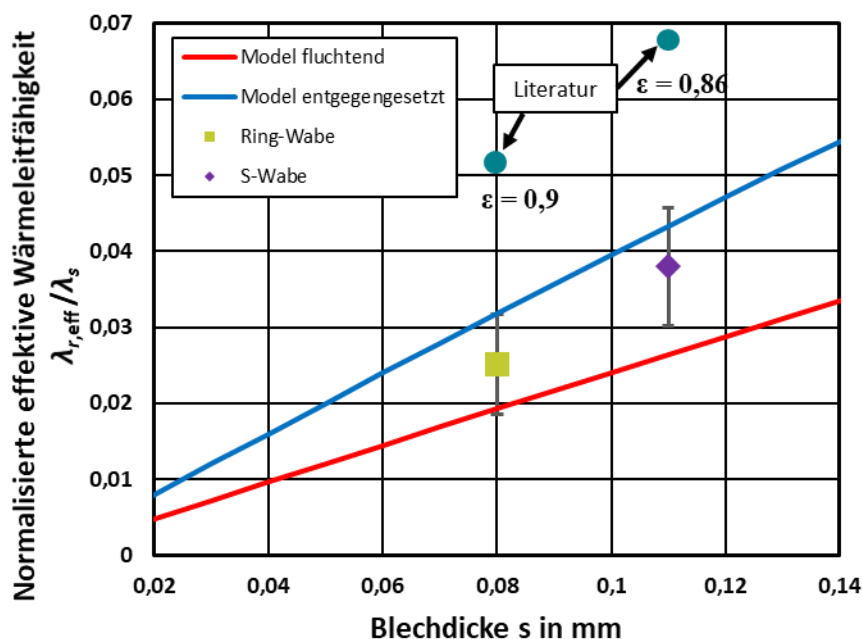


Abbildung 10: Vergleich der nach eigenen Korrelationen berechneten effektiven Wärmeleitfähigkeit mit experimentellen Daten und Literatur [8, 9]

## I.2 Reaktordesign zu Offshore-Methanisierung

Zur Auslegung des Reaktors der 100 kW Demonstrationsanlage im Energy Lab des KIT wurden in COMSOL Modellierungen mit den erstellten Modellgleichungen für den Wärmetransport durchgeführt. Orientiert wurde sich an einem Reaktorinnendurchmesser von 81 mm (= Außendurchmesser der metallischen Wabe darin). Es wurde eine Parameterstudie durchgeführt mit dem Ziel, geeignete Betriebsparameter zu finden, um einen möglichst breiten Lastbereich ohne Überschreiten der zulässigen Höchsttemperaturen zu gewährleisten. Das verwendete Modell ist in

Abbildung 11 dargestellt. Der Modellierung vorausgegangen ist die Betrachtung des Wärmeübergangs an das Kühlmedium. Zum Einsatz kommen soll der durch den Retro-Fit bereits an der Demonstrationsanlage vorhandene Hochtemperaturthermostat, wodurch die Kühlleistung und der Volumenstrom an Kühlmedium (= Öl) vorgegeben sind. Die Spaltbreite im Doppelmantel des Reaktors, durch welchen das Kühlmedium strömt, wurde deshalb so gewählt, dass sich durch die resultierende Strömungsgeschwindigkeit ein ausreichend guter Wärmeübergang bei vertretbarem Druckverlust einstellt. Eine Abschätzung ergab, dass unter Vollast (ca. 18 kW Wärmefreisetzung) sich das Kühlmedium im Mittel um ca. 10 K erwärmt, was innerhalb der Spezifikationen des verwendeten Thermalöls liegt. In der Modellierung wurde die Annahme getroffen, dass der Aufbau „spaltfrei“ realisiert wird. Dies bedeutet, dass für die Auslegung des Demonstrationsreaktors der Aufbau aus der Laboranlage, in welcher eine Weichmetallblechlage zwischen Wabenkörper und Reaktionsrohr eingeführt wurde, ebenfalls umgesetzt wird.

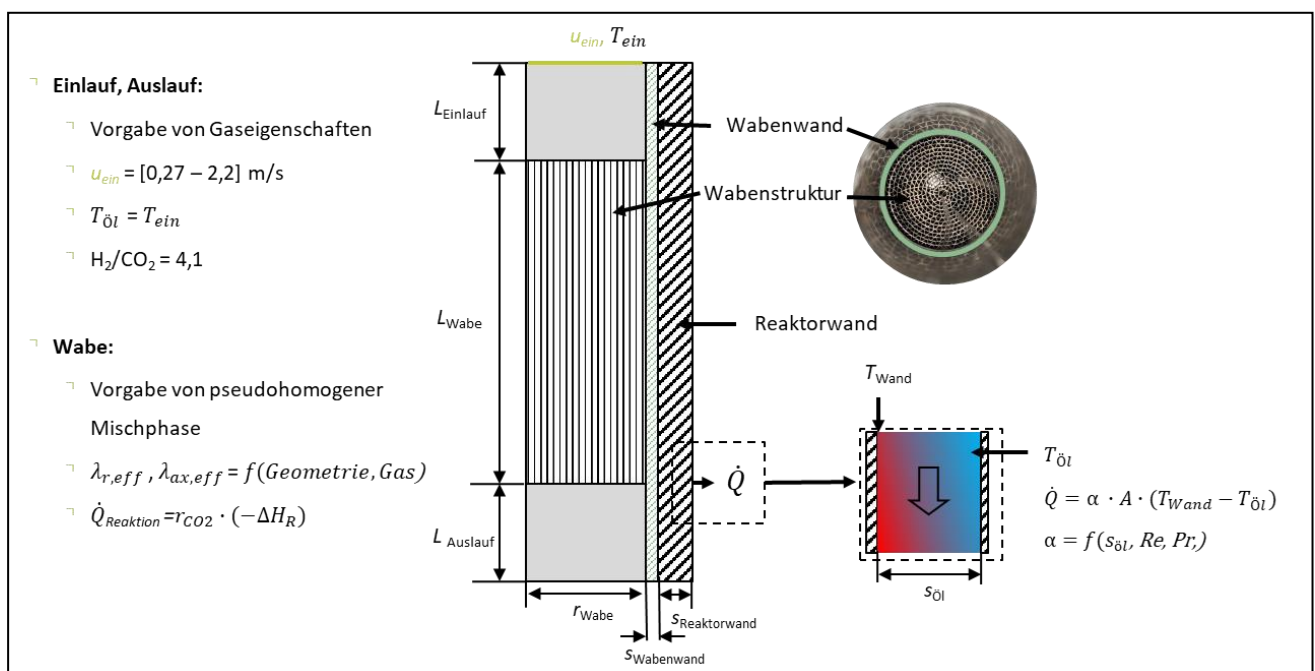
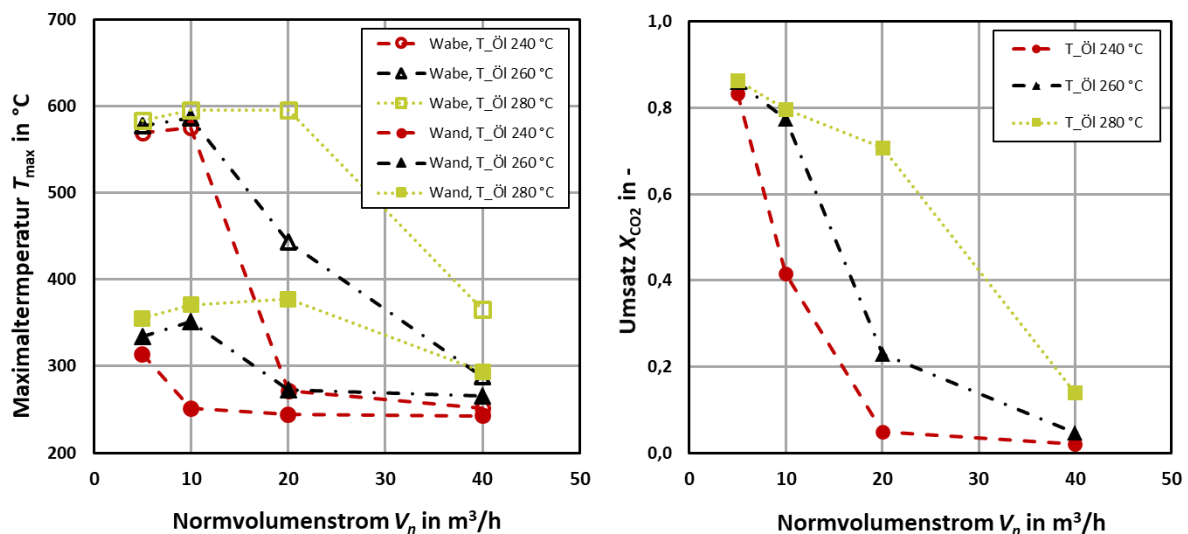


Abbildung 11: Skizze zur Reaktormodellierung, vgl. Tabelle I-2

Tabelle I-2 Beschreibung der in der Modellierung verwendeten Variablen

Variable	Wert	Einheit	Bezeichnung
<b>GHSV</b>	1400 - 26500	1/h	Raumgeschwindigkeit
<b><math>p_{abs}</math></b>	16,0	bar	Absolutdruck
<b><math>T_{öl}, T_{ein}</math></b>	220 - 300	°C	Temperatur der Ölkühlung
<b><math>\alpha</math></b>	350	W/(m <sup>2</sup> ·K)	Wärmeübergangskoeffizient (Reaktionsrohr-Ölkühlung)
<b>H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub></b>	4,1	-	Verhältnis Wasserstoff zu Kohlendstoffdioxid
<b><math>L_{Einlauf/Auslauf}</math></b>	100	mm	Länge der modellierten Einlauf- und Auslaufstrecke
<b><math>L_{Wabe}</math></b>	300 - 700	mm	Länge der katalytisch aktiven Wabenstruktur
<b><math>s_{Wabenwand}</math></b>	1,5	mm	Wandstärke Wabenwand
<b><math>s_{Reaktorwand}</math></b>	2,9	mm	Wandstärke Reaktorwand
<b><math>r_{Wabe}</math></b>	41,5	mm	Radius Wabenstruktur
<b><math>s_{öl}</math></b>	8	mm	Spaltdicke Doppelmantel (Kühlung)

Abbildung 12: Variation des Volumenstroms in Abhängigkeit von der Kühltemperatur  $T_{öl}$ ;  $L = 300$  mm;  $c_{Kat} = 100$  kg/m<sup>3</sup>

Ein Teil der Ergebnisse der Studie zum Reaktordesign sind in Abbildung 12 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im unteren Lastbereich ( $< 10$  m<sup>3</sup>/h (NTP)) ausgeprägte Hot-Spottemperaturen innerhalb der Wabenstruktur auftraten. Ein ausgeprägter Hotspot führt ebenfalls zu hohen CO<sub>2</sub>-Umsätzen, da auf Grund der erhöhten Reaktionsgeschwindigkeit der Feed fast vollständig zum Produkt CH<sub>4</sub> umgesetzt wird. Mit steigendem Volumenstrom nimmt die Verweilzeit im Reaktor ab, sodass beginnend mit der niedrigsten Kühltemperatur ( $T_{öl}$ ) die Reaktion nicht mehr „zündet“ damit unzureichende Umsätze ( $< 80$  %) erzielt werden. Eine weitere Erhöhung der Kühltemperatur ist auf Grund der thermischen Stabilität des Thermalöls nicht empfehlenswert. Durch die gute Wärmeabfuhr außen und den Wärmetransport im Reaktor kann die Wandtemperatur niedrig gehalten werden. Für die weitere Untersuchung ist das Ziel, auch den Umsatz bei hohen Volumenströmen gleichbleibend hoch zu halten.

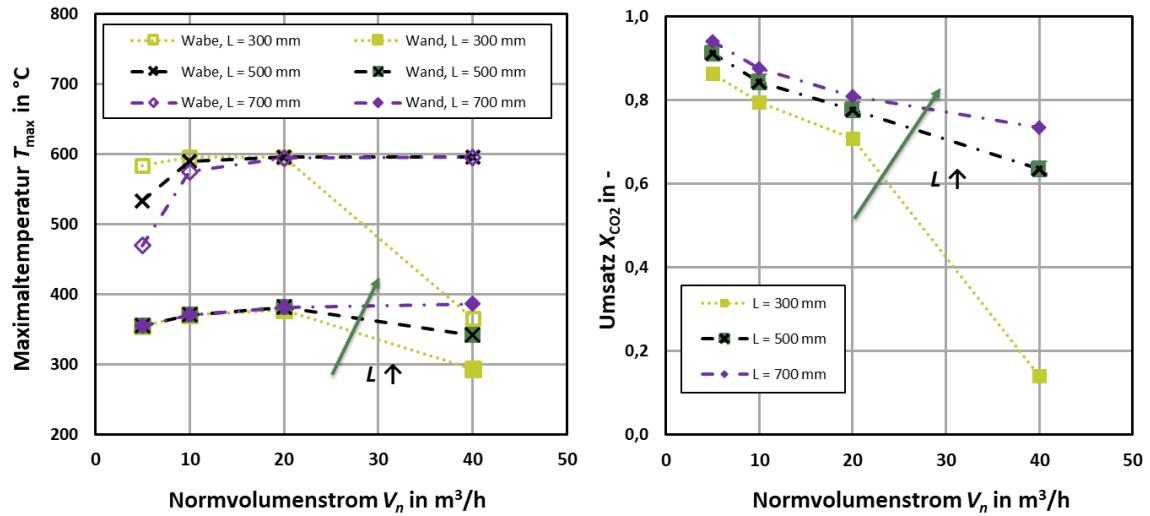


Abbildung 13: Variation des Volumenstroms in Abhängigkeit von der Reaktorlänge  $L$ ;  $T_{öl} = 280 \text{ °C}$ ;  $c_{Kat} = 100 \text{ kg/m}^3$

Eine untersuchte Maßnahme zur Steigerung des Umsatzes ist die Verlängerung der katalytisch aktiven Zone und damit der Verweilzeit durch den Einsatz von weiteren Wabenstrukturen. Das Ergebnis ist in Abbildung 13 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Betriebsbedingungen aus dem Betriebspunkt „ $T_{öl} = 280 \text{ °C}$ “ konstant gehalten. Eine Verlängerung des Reaktors führt bei hohen Temperaturen zu einer Erhöhung der Maximaltemperatur an der Wand. Dies lässt sich dadurch erklären, dass Wärme, welche über die Gasphase am Reaktoraustritt austreten würde, nun über die Reaktorwände abgeführt wird. Die Maximaltemperatur in der Struktur bleibt bei allen 3 vorgestellten Betriebspunkten bei hohen Volumenströmen konstant, hier wird das thermodynamische Gleichgewicht in Abhängigkeit von der Wärmeabfuhr erreicht. Eine adiabate Reaktionsführung (= keine Wärmeabfuhr) würde zu weit höheren Temperaturen führen, konkret für diesen Betriebspunkt wäre eine Maximaltemperatur von ca.  $730 \text{ °C}$  zu erwarten gewesen [10]. Wie gewünscht, erhöht sich der erreichte Umsatz bei der Verlängerung des Reaktors. Einerseits wird dies ermöglicht durch das Erhöhen der Verweilzeit, andererseits wird durch das Erhöhen der Wärmeabfuhr durch das Bereitstellen von mehr Wärmeübertragungsfläche. Das thermodynamische Gleichgewicht wird durch diese Maßnahmen über die Länge des Reaktors wieder hin zu den Produkten verschoben.

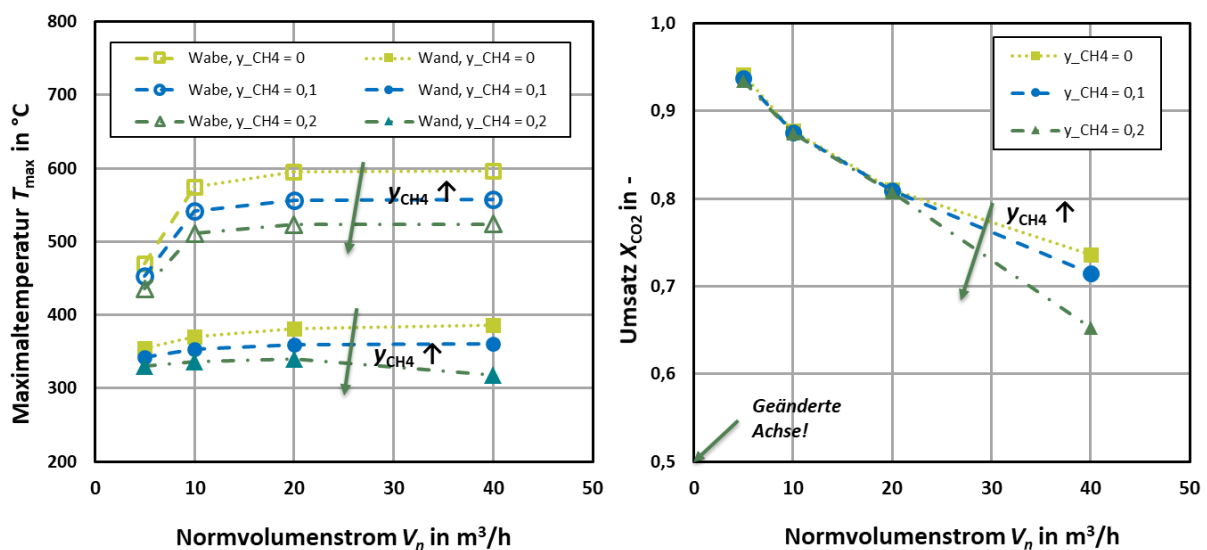


Abbildung 14: Variation der Feedzusammensetzung;  $L = 700 \text{ mm}$ ;  $T_{\text{OI}} = 280 \text{ °C}$ ;  $c_{\text{Kat}} = 100 \text{ kg/m}^3$

Zuletzt wird die geplante Rückführung von im Produktgas enthaltenen Feedgasen diskutiert. Bei der Verflüssigung in Methan zu „Liquefied Natural Gas“ (LNG) kommt es zu einer Ansammlung von nicht umgesetzten Komponenten im Verdichterkopf (vgl. Bericht DVGW-EBI). Diese können abgetrennt und als Feed wiederum dem Reaktor zugeführt werden. Vorrangig handelt es sich dabei um H<sub>2</sub>, da es einen niedrigeren Siedepunkt als CH<sub>4</sub> besitzt. allerdings sind auch Spuren an CH<sub>4</sub> in diesem Gasstrom vorhanden und werden somit wieder in den Methanisierungsreaktor rückgeführt. Eine weitere Quelle für Produktgasbestandteile im Feedgas ist die Rückführung von Gas aus der Sorptionstrocknung vor der Verflüssigung. Als trockenes Spülgas kann hier Produk-CH<sub>4</sub> eingesetzt werden, welches danach mit Wasser beladen in den Methanisierungsreaktor rückgeführt wird. In Abbildung 13 sind die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt, in welchen die Feedzusammensetzung durch die Zugabe von Methan bei gleichbleibenden Volumenstrom angepasst wurde. Mit steigendem CH<sub>4</sub>-Anteil ist zu erkennen, dass die Maximaltemperaturen innerhalb der Wabenstruktur und an der Reaktorwand abnehmen. Dies liegt an der thermischen Masse, da das Gas zusätzlich erwärmt werden muss. Zusätzlich wird durch die Anwesenheit von CH<sub>4</sub> als Produkt das thermodynamische Gleichgewicht schneller erreicht, sodass die Reaktionsgeschwindigkeit zum Zielprodukt gehemmt wird. Bei niedrigeren Konzentrationen an CH<sub>4</sub> ist der Effekt weniger stark ausgeprägt. Hohe Umsätze werden bei ausreichender Reaktorlänge erreicht, da die Wärmeabfuhr das Gleichgewicht vorteilhaft begünstigt. Bei großen Volumenströmen ist festzustellen, dass der Umsatz am deutlichsten abfällt, was auf die Reduktion der Verweilzeit im Reaktor zurückgeführt werden kann. Als Fazit gilt, dass eine ausreichend große Reaktorlänge die größte Robustheit gegenüber wechselnden Feedgaszusammensetzungen gewährt und darüber hinaus sogar hinsichtlich der Moderierung der Reaktortemperatur von Vorteil sein kann.

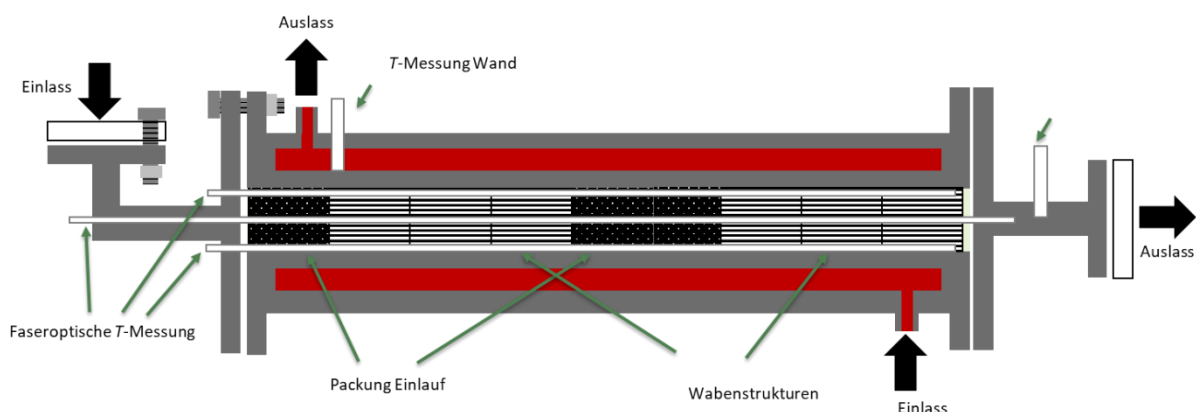


Abbildung 15: Schematischer Aufbau des Reaktors der 100 kW Demonstrationsanlage am KIT Energy Lab

Mit den gesammelten Erfahrungen aus der experimentellen Untersuchung und den Erkenntnissen aus der Modellierung wurde ein Vorschlag für ein Reaktorkonzept erarbeitet, welcher in Abbildung 15 dargestellt ist. Die Umsetzung des Konzeptes erfolgte als Teil des Projektes (vgl. hierzu Abbildung 16). Auch in diesem Reaktor wird die zuvor beschriebene die faseroptische Temperaturmessung genutzt, die hierfür in Überlänge angeschafft wurde. Mit dem in Abbildung 15 gezeigten Reaktoraufbau wird ausreichend Wabenlänge zur Verfügung gestellt, um in der Theorie einen ausreichen hohen Umsatz von mind. 80 % zu erzielen. Die Packungen in der Mitte des Reaktors dienen zur Homogenisierung der Konzentrationsverteilung über den Querschnitt. Es ist zu erwarten, dass die Kanäle am Rand, welche näher an der Kühlung sind, auf Grund der niedrigeren Temperatur einen niedrigeren Umsatz als die heißen Kanäle in der Mitte der Struktur erzielen. Durch die zwischen den Waben platzierte Packung kann der Stoffaustausch gefördert und somit frisches, unreaktiertes Gas ins Zentrum rückgeführt und umgesetzt werden.



Abbildung 16: Detailfoto des Aufbaus mit zwei Waben und zwischengeschalteter Mischpackung, Temperaturmesslanzen und Weichmetallblechhülle zur Gewährleistung eines hohen Wärmeaustauschs mit dem äußeren Reaktorrohr (hier nicht gezeigt).

Leider konnte eine experimentelle Validierung der Modellierungsergebnisse und damit des vorgeschlagenen Reaktorkonzepts auf Grund der bis zum Zeitpunkt der Berichtserstellung 03/2026 nicht erfolgten Inbetriebnahme der Energy Lab Anlage nicht erfolgen. Es ist geplant, hierzu eine umfassende Veröffentlichung in der zweiten Jahreshälfte 2026 nachzureichen.

### I.3 Übertragung in den 100 kW Maßstab /Basic Engineering einer offshore PtM-Prozesskette

Das KIT-EBI hat innerhalb des Arbeitspakets den Projektpartner DVGW-EBI beim Aufbau des gekoppelten Anlagenbetriebs der Gewerke Methanisierung, Gasaufbereitung und Verflüssigung am KIT Energy Lab unterstützt, der Aufbau ist in Abbildung 17 dargestellt. In der Reallabor Umgebung ist es möglich, unter technisch relevanten Versuchsbedingungen die einzelnen Anlagenteile zu erproben.



Abbildung 17: Methanisierungs-Anlagenverbund am KIT Energy Lab, a: Methanisierung; b: Gasaufbereitung; c: Verflüssigung; d: Leitwarte.

Damit der gekoppelte Betrieb demonstriert werden kann, wurden seitens KIT-EBI die verbindenden Rohrleitungen ausgelegt und in Auftrag gegeben. Mit ihnen ist es möglich, alle drei Anlagenteile gemeinsam oder auch einzeln zu betreiben. Damit das tiefkalte Gas, welches aus dem Verflüssiger zurückgeführt wird, auf Umgebungstemperatur aufgewärmt wird, wurde ein Luftwärmeübertrager ausgelegt und mit integriert, vgl. dazu Abbildung 18 und Abbildung 19.

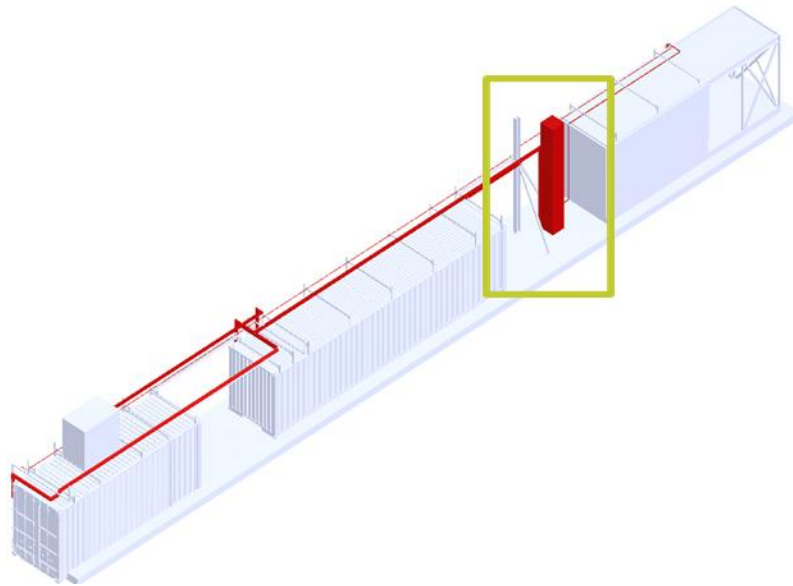


Abbildung 18: Skizze der verbindenden Rohrleitungen, rot markiert: Wärmeübertrager. Aufbau der Prozesskette (von links nach rechts): Gasreinigung – Methanisierung – Verflüssigung.



Abbildung 19: Aufbau des Wärmeübertragers und der Rohrleitungen zwischen Methanisierungsanlage (rechts) und Verflüssiger (links).

## II. Verwendung der Zuwendung

### II.1 Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für den Umbau der Laborapparatur zur Durchführung der Methanisierungsversuche wurde eine neuartige Messtechnik angeschafft, welche zahlenmäßig die größte Investition für die Laboruntersuchungen darstellte. Die Anschaffung war notwendig, da übliche Messmethoden wie die bislang eingesetzten Thermoelemente in Führungsrohren sich als unpräzise hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Auflösung erwiesen haben. Zur Durchführung der Versuche mussten darüber hinaus metallische Wabenkörper und Methanisierungs-Katalysator beschafft werden. Die Beschichtung der Strukturen erfolgte in einem dafür aufgebauten Arbeitsplatz (Glovebox), sodass sicherheitstechnische Standards und Arbeiterschutz gegeben waren. Für die Bereitstellung der Infrastruktur am KIT Energy Lab für den Betrieb der Demonstrationsanlagen waren Investitionen für die Bereitstellung der Gas- und Elektroanschlüsse nötig, sowie der Aufbau der verbindenden Rohrleitungen zwischen Infrastruktur und Methanisierungsanlage als auch zwischen den einzelnen Anlagenkomponenten der Methanisierungsprozesskette.

### II.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Bearbeitung der Teilprojekte mit KIT-EBI-Beteiligung erfolgte durch die direkt beteiligten Projektingenieure und unter Mithilfe weiterer KIT Projektingenieure und Techniker, speziell beim Anlagenaufbau. Die hierfür notwendigen Stellen für zwei qualifizierte Projektingenieure und einen Techniker sind am KIT-EBI nicht vorhanden und mussten daher vollständig aus den Projektmitteln finanziert werden. Weiterhin waren der Aufbau der nötigen Versuchsapparaturen für die experimentellen Untersuchungen am Institut und für den Aufbau der Infrastruktur der 100 kW PtG-Prozesskette mit erheblichem finanziellem Aufwand verbunden.

Die mit der Durchführung des Projektes verbundenen Kosten konnten daher nicht direkt von KIT-EBI übernommen werden.

## III. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans

KIT-EBI verfolgt keine primären wirtschaftlichen Interessen und ist daher nicht direkt an der Vermarktung von technologischen Ergebnissen beteiligt. Durch Forschung und Lehre werden jedoch „human resources“ aufgebaut und das erarbeitete Wissen über Absolventen und Publikationen breit in der Fachwelt und in der Industrie gestreut.

## IV. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens während der Laufzeit

Auf Basis des in dem beantragten Projekt zu bearbeitendem AP wurden die für die technische Umsetzung nötigen Erkenntnisse und Daten signifikant erweitert. Speziell das Verständnis der bei der Wabenmethanisierung ablaufenden Wärmetransportvorgänge konnte signifikant vertieft werden. Die

damit erstellten mathematischen Modelle sind nun von solcher Qualität, dass in einem nächsten Schritt der Übergang zu einem größeren Demonstrationsmaßstab oder zu einer industriellen Anwendung im Bereich von ca. 50 MW Methanleistung möglich sein wird.

Durch die Dissemination der Ergebnisse und durch den Ausbau bereits bestehender Industriekontakte und der Kontakte zu und durch die Projektpartner ergeben sich weitere Möglichkeiten zur Umsetzung der untersuchten PtX-Konzepte. Mit den Projektergebnissen können direkt anknüpfende Demoprojekte mit den bekannten oder neuen Industriepartnern angestoßen werden, die weitere Wege zu einer möglichen Markteinführung öffnen können.

## V. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Tabelle V-1: Erfolgte Veröffentlichungen

Datum	Art der Veröffentlichung	Titel	Autoren
27.08.2024	Poster	Determination of the temperature distribution in technical honeycomb reactors for the catalytic methanation	M. Kansy, S. Bajohr, T. Kolb
15.01.2025	Pitch	Power-to-Methane: Novel honeycomb reactors for catalytic methanation	M. Kansy
27.05.2025	Poster	Determination of concentration- and temperature profiles in honeycomb reactors for catalytic methanation	M. Kansy, S. Bajohr, F. Scheiff, T. Kolb
13.06.2025	Kurzvortrag	New Insights in HC-Methanation	M. Kansy, S. Bajohr, F. Scheiff, T. Kolb
11.03.2026	Vortrag	Innovative Fiber-Optic Measurement Method for Determining the Thermal Conductivity Properties of Honeycomb Reactors	M. Kansy, S. Bajohr, F. Scheiff, T. Kolb
<b>Eingereicht</b>	Paper	Dynamic behavior of a monolithic CO <sub>2</sub> methanation reactor to H <sub>2</sub> load disturbance. Experimental validation.	D. E. Pérez-Vilela, M.Kansy, S. Bajohr, T. Kolb, X. García
<b>Geplant</b>	Paper		M. Kansy, S. Bajohr, T. Kolb
<b>Geplant</b>	Paper		M. Kansy, S. Bajohr, T. Kolb
<b>Geplant</b>	Dissertatiton		M. Kansy

## VI. References

- [1] P. Sabatier and J. B. Senderens, "Nouvelles synthèses du méthane," no. 82, pp. 514–516, 1902.
- [2] S. Rönsch *et al.*, "Review on methanation – From fundamentals to current projects," *Fuel*, vol. 166, pp. 276–296, 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2015.10.111.
- [3] J. Schwarz and D. Samiec, "B3.4 - Fiber-Optic Measurement of Temperature Profiles," in *Proceedings Sensor 2017*: AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf, Germany, 2017, pp. 212–216.
- [4] C. H. Bartholomew, "Carbon Deposition in Steam Reforming and Methanation," *Catalysis Reviews*, vol. 24, no. 1, pp. 67–112, 1982, doi: 10.1080/03602458208079650.
- [5] D. W. Keith, G. Holmes, D. St. Angelo, and K. Heidel, "A Process for Capturing CO<sub>2</sub> from the Atmosphere," *Joule*, vol. 2, no. 8, pp. 1573–1594, 2018, doi: 10.1016/j.joule.2018.05.006.
- [6] M. Kansy, R. Schlautmann, and F. Mörs, *Roadmap Gas 2050 „Technologische und ökonomische Bewertung der lokalen katalytischen Methanisierung an H<sub>2</sub>-sensiblen Gasinfrastrukturen und -anwendungen"*
- [7] E. Bauwe and G. Rasch, "Elementarprozesse der Ni-katalysierten Ethan-Hydrogenolyse – eine CNDO-Studie," *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 2650, no. 1, pp. 1009–1019, 1984, doi: 10.1515/zpch-1984-265130.
- [8] C. G. Visconti, G. Groppi, and E. Tronconi, "Accurate prediction of the effective radial conductivity of highly conductive honeycomb monoliths with square channels," *Chemical Engineering Journal*, vol. 223, pp. 224–230, 2013, doi: 10.1016/j.cej.2013.02.095.
- [9] M. Kansy, "Innovative Fiber-Optic Measurement Method for Determining the Thermal Conductivity Properties of Honeycomb Reactors," Luzern, Schweiz, Mar. 9 2026.