

BMWK-Forschungsvorhaben im Rahmen des Verbundvorhabens VERENA  
„Vergasungsprozesse mit integrierter Überschussstromeinbindung zur flexiblen  
Stromerzeugung und Herstellung synthetischer Energieträger aus Reststoffen“

Förderkennzeichen: 03EE5044J



**Teilvorhaben: Entwicklung eines Heißgasfilters**

## Schlussbericht

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Das Verbundvorhaben bezieht sich auf die Bekanntmachung des BMWK zur angewandten  
nichtnuklearen Forschungsförderung im 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die  
Energiewende“.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

**Ausführende Stelle:** GKN Powder Metallurgy GmbH  
Pennefeldsweg 11-15, 53177 Bonn  
Werk Filters  
Dahlienstrasse 43, 42477 Radevormwald

**Autoren:** Dr. Harald Balzer, Product Engineering Manager Filters  
Dipl.-Ing. Astrid Wierhake, Product Engineer

**Projektlaufzeit:** 01.10.2020 – 31.12.2024

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Bonn, 21.06.2025

# Inhalt

1. AUFGABENSTELLUNG .....	3
1.1. Ziel des Verbundvorhabens .....	3
1.2. Aufgabenstellung des Teilvorhabens und Einordnung in das Gesamtziel.....	3
2. VORAUSSETZUNGEN .....	4
3. PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS.....	4
4. STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK ZU BEGINN DES PROJEKTS.....	5
5. VERWENDUNG DER ZUWENDUNG UND ERZIELTE ERGEBNISSE .....	5
6. NOTWENDIGKEIT, ANGEMESSENHEIT UND NUTZEN DER GELEISTETEN ARBEIT .....	12
7. VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE.....	13
7.1. Konferenzbeiträge .....	13
7.2. Publikationen .....	13
7.3. Dissertationen.....	13
8. ANDERWEITIGER FORTSCHRITT AUF DEM GEBIET DES VORHABENS .....	13
9. GESAMTFAZIT DES PROJEKTS.....	13
10. KOORDINATION UND KOMMUNIKATION .....	24
11. LITERATURVERZEICHNIS .....	25

# 1. Aufgabenstellung

## 1.1. Ziel des Verbundvorhabens

Übergeordnetes Ziel des Verbundvorhabens ist die Entwicklung und Bewertung von Technologien zur flexiblen Herstellung (Polygeneration) von Strom und synthetischen Energieträgern (z.B. Fischer-Tropsch-Kraftstoff, Methan, Methanol) basierend auf der Vergasung von Reststoffen (Biomasse, Abfälle, etc.). Die gesamte Prozesskette ist in Abbildung 1 dargestellt. Kern des Prozesses ist die Vorbehandlung und Vergasung der Reststoffe zur Erzeugung eines hochkalorischen Rohgases sowie dessen Aufbereitung zur Bereitstellung eines Synthesegases in der erforderlichen Qualität. Je nach Strombedarf im Netz wird das Synthesegas mittels eines kombinierten Gas- und Dampfturbinenprozesses (GuD) effizient in Strom umgewandelt und ins Netz eingespeist oder mittels katalytischer Synthese in flüssige oder gasförmige Energieträger umgewandelt.

Zur Konditionierung des Synthesegases kann Wasserstoff verwendet werden, welcher in Zeiten von Überschussstrom aus regenerativen Energiequellen mittels Elektrolyse hergestellt wird. Der Sauerstoff als Nebenprodukt der Elektrolyse kann als Vergasungsmittel verwendet werden.

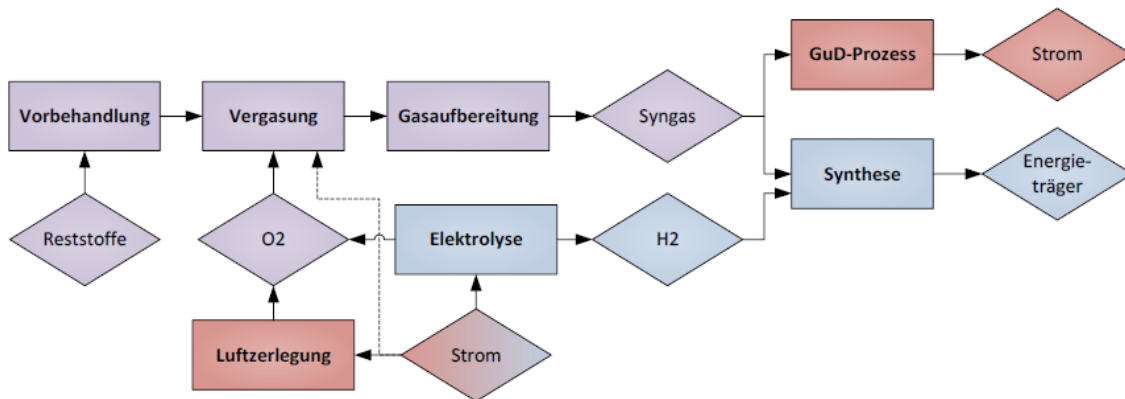


Abbildung 1: Prozesskette einer Polygeneration-Anlage. Violett: ständig in Betrieb, Rot: bei Strombedarf in Betrieb, Blau: bei Stromüberschuss in Betrieb

## 1.2. Aufgabenstellung des Teilvorhabens und Einordnung in das Gesamtziel

Das Ziel des Teilvorhabens ist die Entwicklung von metallischen Heißgas-Filterelementen auf Basis der FeCrAl-Werkstoffklasse. Dies beinhaltet die Prozessentwicklung der pulvermetallurgischen Fertigungsroute (Pressen und Sintern) sowie zusätzlich die Ermittlung der optimalen Prozessparameter für die Oxidschichtbildung zur Passivierung gegen Schwefel- und Alkalimetallchloridverbindungen.

Die spezifischen wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele sind:

### AP1: Voruntersuchungen zur Partikelabtrennung

Zur Ermittlung des geeigneten Filtergrades werden zunächst unterschiedliche Metallpulverabsiebungen zu Filterscheiben unterschiedlicher Filterfeinheit hergestellt. Anschließend wird an Filterprüfständen der Fraktionsrückhaltegrad an realen Stäuben aus dem HTW-Vergaser der TU Darmstadt bestimmt und der geeignete Filtergrad ausgewählt.

## **AP2: Versuche zur HTW Vergasung**

Hier wird ein neues Filterdesign entwickelt, welches an das bestehende Filtergehäuse an der TU Darmstadt adaptiert werden kann, ohne massive bauliche Veränderungen an Filtergehäuse, Filterplatte und Rückspüleinheit vornehmen zu müssen.

Der entwickelte Filterwerkstoff ist für unterschiedliche Gaszusammensetzungen und korrosive Spezies wie Schwefelverbindungen und Alkalihalogenide die ideale Werkstoffwahl für eine flexible Herstellung von Strom und synthetischen Energieträgern mit der Basis unterschiedlichster Rest- und damit Gasinhaltsstoffe.

## **2. Voraussetzungen**

2015 startete GKN mit der Materialentwicklung für einen neuen Heißgasfilter. Basis des Werkstoffes ist ein Aluminiumhaltiger Chromstahl. Nach der Pulverentwicklung mit einem Lieferanten stand ein Material zur Verfügung mit exzellenten Eigenschaften in Schwefel und CO<sub>2</sub> haltigen Heißgasen. Nach Hochtemperatur Korrosionstests und dem Einsatz von Filter Prototypen beim Finnischen VTT Institut in Biorukki konnte das Material für die Vergasung von Holzabfällen bei 750°C validiert werden. Es folgte die Anpassung der vorhandenen Produktionsmittel auf das neue Material. Zudem musste nach dem Diffusionsverschweissen der Pulverpartikel ein Wärmebehandlungsprozess zur Ausbildung einer geschlossenen Cr- Al- Mischoxidschicht entwickelt werden.

Die notwendige Ausstattung für die anstehenden F&E Arbeiten steht bei der GKN Powder Metallurgy, Standort Filters sowie in dem benachbarten Zentrallabor der Sinter Metals Gruppe im sogen. „Innovation Center“ zur Verfügung. Für die Charakterisierung der Ausgangsmaterialien und der daraus hergestellten porösen Musterbauteile, kann auf folgende Geräte zur Eigenschaftsbestimmung zurückgegriffen werden: Sympatec Laserbeuger zur Partikelgrößenbestimmung (für die Metallpulver Rohmaterialien sowie die Stäube aus den Vergasungsprozessen), Textest (Durchflussbestimmung bei verschiedenen Vordrücken), Porometer (Messung der Porengrößenverteilung gesinterter Filterelemente). Im Zentrallabor, können metallographische Untersuchungen mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie, sowie mechanische Untersuchungen und chemische Analysen durchgeführt werden.

Die Produktionskapazitäten zur Herstellung der Filterelemente (Scheiben sowie Filterkerzen) stehen am Standort Filters ebenfalls zur Verfügung: Axiale Pulverpressen zum Verdichten von Filterscheiben sowie kaltisostatische Pressen für die Herstellung poröser Filterrohre (double open end oder mit poröser Kappe). Für die Sinterprozesse stehen kontinuierliche Öfen und auch Vakuum-Kammeröfen zur Verfügung.

## **3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

GKN Filters hat im Bereich des AP1 an Task 1.10 den „Voruntersuchungen der Partikelabtrennung“ gearbeitet. Ziel war es innerhalb der ersten 1,5 Projektjahre eine Filterfeinheit für die Filtrationsaufgabe in Task 2.2 (AP2) „Versuche zur HTW-Vergasung“ zu ermitteln. Hierzu standen unterschiedliche Gasfiltrationsprüfstände bei GKN Filters zur Verfügung. Nach erfolgter Ermittlung des Filtergrades wurden die Produktionsparameter auf die entsprechende Metallpulverfraktion angepasst und das Design der Filterelemente an den vorhandenen Filterbehälter und Filterplatte der TU Darmstadt angepasst. Die Arbeiten hierzu sollten bis zum Ende des ersten Quartals des 3. Projektjahres abgeschlossen sein. Die erste Vergasungs Kampagne mit Holzpellets verlief erfolgreich auch hinsichtlich der

Filtrationsstabilität. Da bei einer zweiten Vergasungskampagne mit SRF Pellets jedoch ein instabiles Filterverhalten zu beobachten war, wurde zum Ende der Projektlaufzeit eine metallographische Post-Mortem-Analyse durchgeführt, um der Ursache für dieses Verhalten auf den Grund zu gehen.

#### **4. Stand der Wissenschaft und Technik zu Beginn des Projekts**

Das Interesse an Hochtemperatur-Filtration hat in den letzten Jahren mit der Verfügbarkeit effizienter und temperaturfester Filterelemente erheblich zugenommen. Im Allgemeinen spricht man von Heißgasfiltration / Hochtemperaturentstaubung bereits bei Betriebstemperaturen oberhalb von 260°C, bei denen der Einsatz konventioneller Filtermedien aus synthetischen Fasern aufgrund der nicht ausreichenden Temperaturbeständigkeit bzw. Brennbarkeit nicht mehr möglich ist. Diese Filtermedien stoßen im Hochtemperaturbereich an ihre Leistungsgrenzen.

Heißgasfilter werden unter anderem aus metallischen Werkstoffen, aus Hochtemperaturwolle und aus keramischen Feingranulaten hergestellt und bieten für diesen Anwendungsfall die optimale Lösung.

Die selbsttragenden Elemente sind temperaturbeständig bis 1100°C, unempfindlich gegenüber Funkenflug, nicht brennbar und weisen eine gute Temperaturwechselbeständigkeit auf.

Mit hohen Filtrationstemperaturen lassen sich Kondensations- oder Desublimationsvorgänge vermeiden und bei gekoppelten und nachgeschalteten Prozessen Kosten sparen, da die im heißen Abgas abgeschiedenen Feststoffe nicht nachfolgende Anlagenteile wie z.B. Wärmetauscher, Katalysatoren und Gaswäscher belasten. Erfolgreich betriebene Anlagen (u.a. Entstaubungsanlagen in der Farbpigment-Produktion, der Calciumcarbid-Produktion und in Anlagen zur Vergasung von Biomasse) dokumentieren den Stand der Technik. <sup>1)</sup>

Keramische Werkstoffe weisen ein sprödes Verhalten auf und neigen bei dynamischen Wechsellasten zum Bruch. Dies kann durch metallische Filterelemente umgangen werden. Bei vielen Hochtemperatur-Entstaubungsaufgaben sind jedoch hohe Schwefelgehalte und/ oder Alkalien und Chloride im Heißgas vorhanden die zu Lochfraß oder Verzundern der metallischen Werkstoffe und damit zur Degradation führen können.

Bei der Werkstoffklasse der MCrAlY-Verbindungen (hier z.B. die Werkstoff-Nr. 1.4767) kann mittels gezielter Oxidation eine geschlossene Deckschicht (Yttrium stabilisierte Cr-Al-Mischoxidbildung) erzeugt werden, die den Werkstoff gegen korrosive Angriffe passiviert. <sup>2)</sup>

Die Ergebnisse aus dem Projekt sollen unmittelbar in die Umsetzung von technischen Produkten für die Heißgasfiltration einfließen. Durch die Entwicklung neuer leistungsfähiger und langzeitstabiler Filterelemente kann ein wichtiger Beitrag zu grundlegenden Forschungs- und Entwicklungsthemen im Bereich erneuerbarer Energien und Luftreinhaltung geleistet werden.

#### **5. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse**

##### **AP1: Voruntersuchungen zur Partikelabtrennung (Task 1.10)**

Zu Beginn des Projektes wurden erste Filtrationsversuche mit realen Stäuben der TU Darmstadt durchgeführt. Hierzu wurden axialverpresste Filterscheiben aus dem Werkstoff 1.4767 in den Prüfstand eingesetzt. Das Maß für eine geeignete Filterfeinheit ist der sogenannte Fraktions-Rückhaltegrad / Trenngrad. Dieser Wert gibt eine Partikelgröße an, bei der 95% aller Partikel die größer sind als dieser Wert abgeschieden werden. Hierbei wird folgendermaßen vorgegangen:

Zunächst werden Rohgasmessungen zur Ermittlung der Partikelgrößenverteilung des eingesetzten Staubes. Anschließend wird das Filterelement in den Gasstrom eingebracht und die Reingasseite gemessen; schließlich wird die Differenz beider Messungen zum Rückhaltegrad bestimmt. Als geeignete Filterfeinheit wurde eine Qualität mit 12µm mittlerer Porengröße gewählt.

Diese hat bereits im Neuzustand einen Rückhaltegrad von  $X_{95}=0,83\mu\text{m}$  und nach dreimaligem Einsatz mit manueller Reinigung einen Rückhaltegrad von  $X_{95}=0,5\mu\text{m}$ . Weitergehende Messungen in einem Alterungsprüfstand unter zyklischer Abreinigung mittels Jet-Pulse lieferte ebenfalls einen Wert von  $X_{95}=0,5\mu\text{m}$  nach 10maliger Abreinigung. Der anfängliche Wert liegt mit  $1,18\mu\text{m}$  für den Rückhaltegrad  $X_{95}$  etwas höher als beim Teststaub.

	Zeit [s]	Beladung [mg/cm <sup>2</sup> ]	Sum(dN)	x80 [µm]	x95 [µm]	Retention [%]	Druck [Pa]
1	50	0.03	16391	0.49	1.18	81.7811	733
2	110	0.06	14037	0.40	1.06	84.4003	753
3	171	0.09	10875	0.20	0.82	87.9305	772
4	231	0.12	9325	0.20	0.74	89.7042	797
5	290	0.15	8639	0.20	0.69	90.4460	816
6	350	0.17	7897	0.20	0.63	91.2799	836
7	411	0.21	6839	0.20	0.57	92.4167	865
8	470	0.24	6250	0.20	0.56	93.0847	889
9	530	0.27	5834	0.20	0.53	93.6030	929
10	590	0.30	5275	0.20	0.49	94.1996	968

Tabelle 1: Messung am Alterungsprüfstand, 10 Rückpuls-Zyklen, Staub aus dem HTW Vergaser TU Darmstadt

Die Messung der Partikelgrößenverteilung des Staubes ergab einen  $X_{10}$ -Wert von etwa  $1,5\mu\text{m}$  (lediglich 10% der Partikel sind  $<1,5\mu\text{m}$ ), so dass hier kaum Partikel  $<0,5\mu\text{m}$  zu erwarten sind.

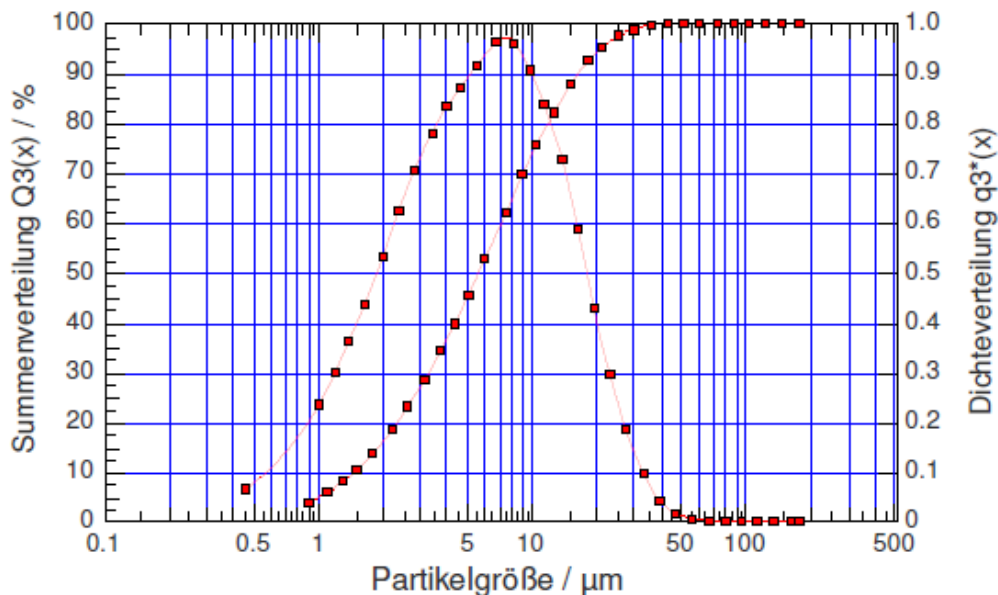


Abbildung 2: Partikelgrößen Verteilung des Teststaubs der TU Darmstadt

x10 =	1,48 µm	x50 =	5,64 µm	x90 =	16,52 µm
x16 =	2,00 µm	x84 =	13,42 µm	x99 =	31,45 µm
M1,3 =	7,63 µm	Sv =	1,75 m <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup>	c_opt =	10,10 %

Tabelle 3: Kennwerte der Partikelgrößenverteilungsmessung des Staubs der TU Darmstadt

### AP2: Versuche zur HTW Vergasung (Task 2.2)

In der folgenden Abbildung sind die einzelnen Fertigungsschritte zur Herstellung der Filterelemente dargestellt. Der wichtigste Input für die pulvermetallurgische Verfahrensrouten stellt die Verfügbarkeit des Metallpulvers dar. Die folgenden Schritte ähneln sich ebenfalls: Das Verpressen des Pulvers dient der Formgebung des Filterelementes. Außerdem werden hierbei auf den Pulverkörnern befindliche Oxidschichten aufgebrochen und dadurch, für den Sinterprozess wichtige metallische Oberflächen, hergestellt. Bei dem noch nicht gesinterten Teil spricht man auch von einem Grünling. Hierbei sollte die Festigkeit des Grünlings groß genug sein, um das Handling während des Chargierens in die Öfen zu gewährleisten.

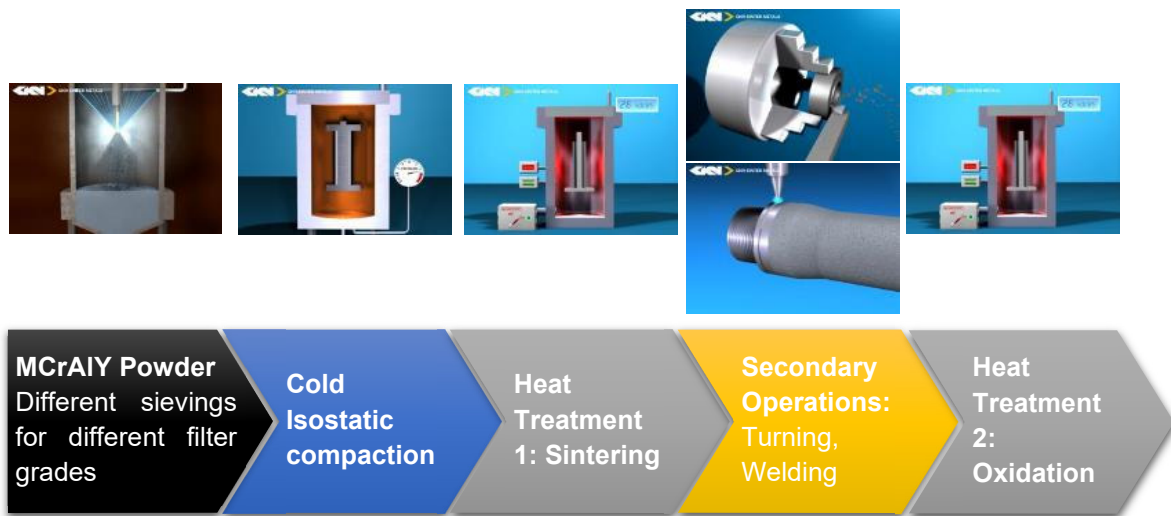


Abbildung 3: Pulvermetallurgische Fertigungsschritte für poröse Metallfilterkerzen

In diesem Arbeitspaket wurde das finale Triaden-Design der Filterelemente zur Integration des bei der TU Darmstadt vorhandenen Filtergehäuses entworfen und mit der TU Darmstadt abgestimmt. Hierbei sind jeweils drei Filterelemente in eine kleine Filterplatte mit 190mm Durchmesser eingeschweißt und am Filterende mit einer zentralen Fixierscheibe verbunden. Dazu werden an jedem Filterende Stahllaschen verschraubt die anschließend an die Fixierplatte geschweißt werden. Dieses Design soll eine zu große schwingende Belastung der 1,55m langen Filter an der Filterplatte und damit ein Ausbrechen vermeiden.

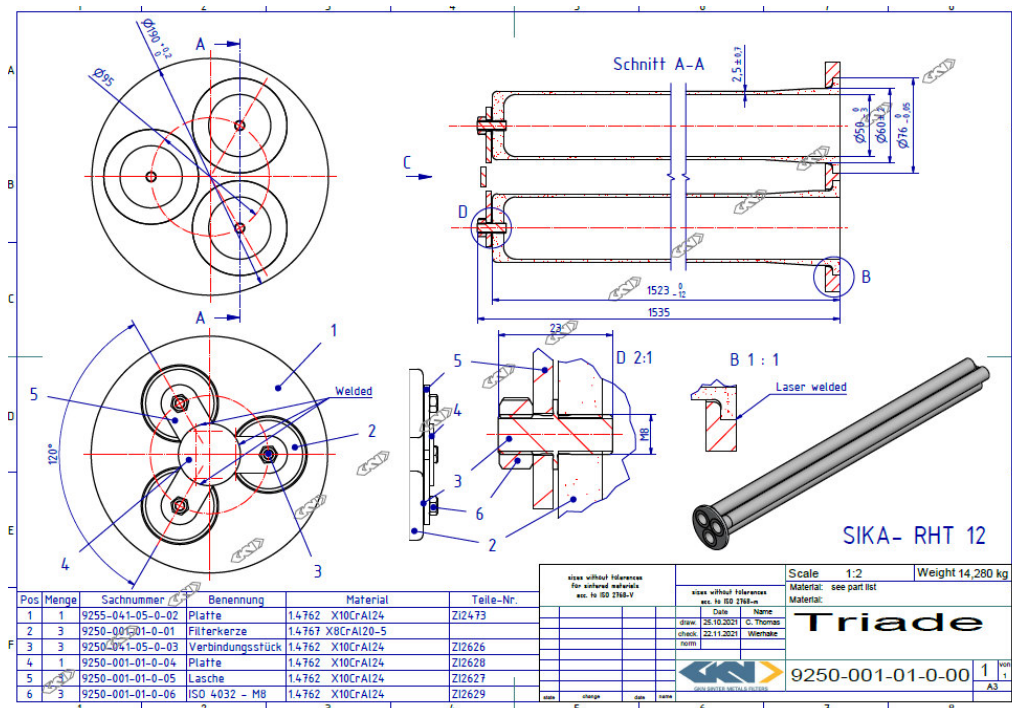


Abbildung 4: GKN Triaden Design zur Integration der Filterelemente in das vorhandene Filtergehäuse

Das Triaden Design soll einen einfachen Austausch der vorhandenen Filterelemente gewährleisten. Schließlich sind nur die Rückpulsrohre oberhalb der Filterelemente minimal anzupassen; Hauptfilterplatte und Gehäuse können nahezu unverändert eingesetzt werden. Die entsprechenden Materialien sind bestellt, die Arbeitspläne (interne und externe Dienstleister) wurden erstellt und sind im ERP-System hinterlegt.

### Filter-Performance und Post-Mortem-Analyse

Die Filterelemente kamen in zwei Vergasungs-Kampagnen zum Einsatz: Einmal im April/ Mai 2023 mit Holzpellets und ein weiteres Mal einmal im September 2023 mit SRF-Pellets. Der Temperaturbereich des Filters lag bei beiden Kampagnen bei ca. 200 °C. Während bei der ersten Kampagne ein robustes Filter und Rückpulsverhalten zu beobachten war, konnte bei dem Vergasungsversuch mit SRF-Pellets kein stabiler Filtrationszyklus eingestellt werden. Die Dauer bis zum Rückpulsen musste stetig verkürzt werden (in Abbildung 6 ist zu erkennen das die Zeit bis zum Rückpulsen nur etwa 10% beträgt, verglichen mit der Kampagne mit Holzpellets) und der Anfangsdruckverlust stieg um 15-20mbar an.

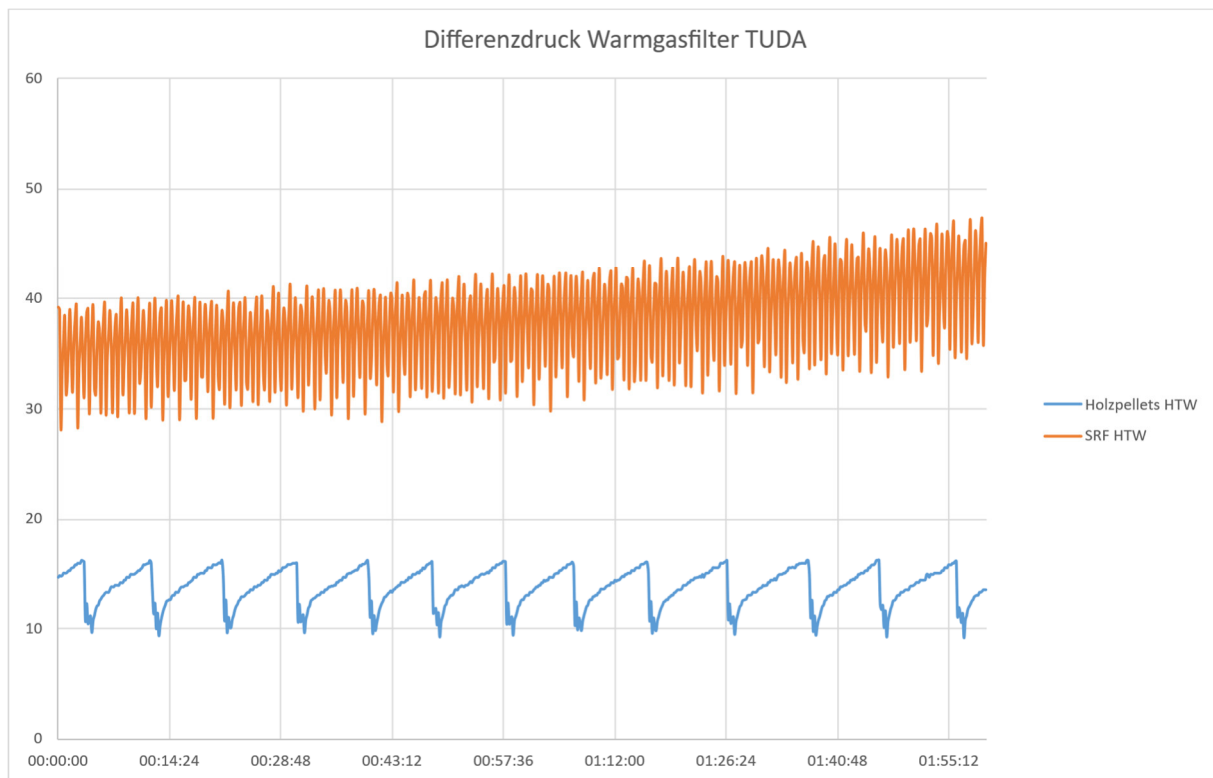


Abbildung 5: Rückpulsverhalten der Filterelemente bei 2 Kampagnen

Dies spricht für ein Verblocken der Filterporen, die durch das Rückpulsen nicht gereinigt werden können und so der Durchfluss sinkt bzw. der Druckverlust der Filteranlage ansteigt. Um dies zu verifizieren und um die Ursache der Verblockens zu ermitteln, wurde eine metallographische Analyse an einem künstlich erzeugten Bruchbild durchgeführt.

Vorgangs Nr.: 2024120031



Bildnummer: 2024120031-007, Probe: Filterkerze  
Bildkommentar: , Präparation: Anlieferzustand

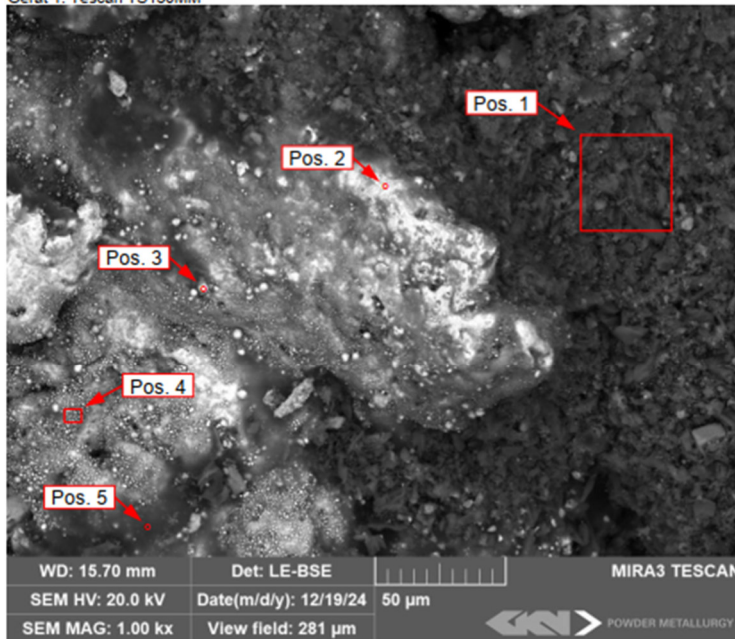


Bildnummer: 2024120031-010, Probe: Filterkerze  
Bildkommentar: Seitenwand, Präparation: Anlieferzustand

Abbildung 6: künstlich erzeugte Bruchfläche durch die Filterkappe

So können Partikel im inneren der Poren detektiert und mittels REM/EDX auch chemisch analysiert werden. Die metallographische Untersuchung weist eindeutig auf eine Verblockung durch Rußbildung hin. Hauptsächlich wird Kohlenstoff detektiert, der sowohl im Innen als auch Außenbereich des Filterelements zu finden ist. Die Rußschicht liegt zum Teil auf den Metallpulverpartikeln und auch in den Poren zwischen den Pulverpartikeln. Zum Teil finden sich auch Schlacke bildende Elemente wie Ca, Zn, Na und Schwefel. Bei der niedrigen Temperatur ist ein korrosiver Angriff durch Schwefel-Verbindungen auszuschließen. Eine Versinterung der Schlacke ist bei 200°C ebenfalls nicht zu erwarten. Es ist daher davon auszugehen, dass Ruß und Teer die Verblockung der Filterelemente ausgelöst hat.

In Abbildung 7 bestehen die dunklen Rückstände in der EDX-Position „1“ fast vollständig aus Kohlenstoff.



Vorgangsnr.: 2024120031

Ausgabevergrößerung:  
1000xBildkommentar:  
Oberfläche, außenPräparation: gebrochenes  
Segment  
Probe: Filterkerze,  
Seitenwand

WD: 15.70 mm	Det: LE-BSE	MIRA3 TESCAN
SEM HV: 20.0 kV	Date(m/d/y): 12/19/24	50 µm
SEM MAG: 1.00 kx	View field: 281 µm	POWDER METALLURGY

Bildnummer: 2024120031-030

Pos. 1

Element	Mass %	Atom %
C	78.18	86.97
O	10.86	9.07
Na	0.05	0.03
Mg	0.38	0.21
Al	0.23	0.11
Si	0.37	0.17
P	0.21	0.09
S	1.00	0.42
Cl	2.18	0.82
K	0.90	0.31
Ca	4.64	1.55
Ti	0.22	0.06
Cr	0.14	0.04
Fe	0.64	0.15
Gesamt	100.00	100.00

Pos. 2

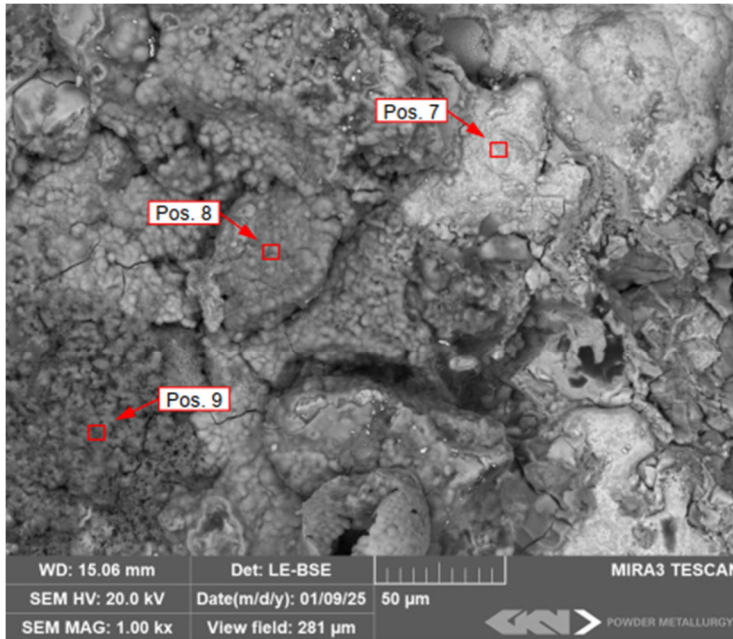
Element	Mass %	Atom %
C	14.06	38.37
O	4.27	8.76
Al	4.06	4.93
Si	2.81	3.28
S	0.10	0.10
Cl	0.08	0.07
Ca	0.14	0.12
Cr	15.08	9.51
Fe	59.39	34.86
Gesamt	100.00	100.00

Pos. 3

Element	Mass %	Atom %
C	15.69	40.75
O	4.88	9.51
Al	3.91	4.52
Si	4.76	5.28
Cr	10.01	6.00
Fe	60.75	33.93
Gesamt	100.00	100.00

Abbildung 7: Chemische, halbquantitative EDX-Analyse an der äußeren Oberfläche der Filterkerze

Abbildung 8 zeigt beispielhaft die Analyse von Fremdpartikeln auf der Filterinnenseite auch hier ist der Hauptanteil Kohlenstoff. Es ist daher von sehr feinen Rußpartikeln auszugehen, die durch die Poren von der Außenseite des Filters nach innen nahezu ungehindert durchgetreten sind. Da sich vermutlich immer mehr Partikel in den Poren ansammelten und dort zum Teil verklebten ist davon auszugehen, dass auf Grund dieser Verblockung ein Rückpulsen und damit ein Befreien von den Partikeln nicht mehr möglich war.



Vorgangsnr.: 2024120031

Ausgabevergrößerung:  
1000x

Bildkommentar:  
Oberfläche, innen

Präparation: nass  
getrennt, gereinigt in  
Ethanol  
Probe: Filterkerze, Kappe

Bildnummer: 2024120031-107

Pos. 7

Element	Mass %	Atom %
C	16.57	41.42
O	4.97	9.33
Na	1.79	2.34
Al	6.33	7.04
Si	1.43	1.53
S	2.46	2.31
Cl	0.90	0.76
Cr	13.30	7.68
Fe	45.76	24.61
Zn	6.50	2.99
Gesamt	100.00	100.00

Pos. 8

Element	Mass %	Atom %
C	21.78	38.16
N	4.11	6.18
O	28.22	37.11
Al	0.83	0.65
Si	0.28	0.21
S	1.83	1.20
Cl	2.82	1.68
Cr	2.98	1.21
Fe	30.12	11.35
Zn	7.03	2.26
Gesamt	100.00	100.00

Pos. 9

Element	Mass %	Atom %
C	28.07	44.73
N	6.49	8.87
O	24.71	29.55
Na	1.67	1.39
Al	1.87	1.32
Si	0.72	0.49
S	3.02	1.80
Cl	3.92	2.11
Cr	5.12	1.88
Fe	14.13	4.84
Zn	10.29	3.01
Gesamt	100.00	100.00

Abbildung 8: Chemische, halbquantitative EDX-Analyse an der inneren Oberfläche der Filterkerze

## 6. Notwendigkeit, Angemessenheit und Nutzen der geleisteten Arbeit

Mit der Ausrüstung der GKN Filters GmbH konnte eindeutig der notwendige Filtergrad für die Anwendung HTW-Vergaser ermittelt werden. Die Erkenntnisse aus AP1 flossen dann in das Filterdesign für die Filteranlage der TU Darmstadt ein und führten bei der ersten Vergasungskampagne zu einem robusten Vergasungs und Filtrationsprozess. Bei der Verwendung von SRF-Pellets ist aber auf eine stabilere Prozessführung zu achten, damit während der Vergasung die Rußentwicklung, die offensichtlich zu einem Verblocken der Filterelemente führte, minimiert wird.

Somit war die stabile Prototypen-Anwendung der Filterelemente in natürlicher Umgebung eines TRL7 zumindest teilweise erreicht. Eine längere Testphase und höhere Gastemperaturen an den Filterelementen wären als zusätzliche Entwicklung sinnvoll um hier auch die Eignung des Filtermaterials unter Schwefeleinfluss bei höheren Temperaturen zu bestätigen.

Ein weiteres Problem für die Herstellung der Filter stellt die Verfügbarkeit des Pulvers der Werkstoff-Nr. 1.4767 dar. Aufgrund der geringen Abnahmemengen dieser Pulverqualität hält sich das Interesse der Pulverhersteller zur Produktion dieser Materialien bisher in Grenzen. Daher ist es sinnvoll auch einen Metallpulverlieferanten in weitere mögliche Forschungsvorhaben mit einzubeziehen.

Das in AP2 entwickelte Triaden-Design konnte für eine Gasfiltrationsanwendung im ersten Quartal 2025 erstmalig erfolgreich angeboten werden. Als Material für den mehrere Tausend Filterkerzen umfassende Auftrag kommt der Werkstoff 1.4404 zum Einsatz.

## 7. Verwertbarkeit der Ergebnisse

### 7.1. Konferenzbeiträge

An Konferenzen zur Heißgasreinigung wurde nicht teilgenommen.

### 7.2. Publikationen

Publikationen fanden nicht statt.

### 7.3. Dissertationen

Dissertationen wurden nicht durchgeführt.

## 8. Anderweitiger Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Ergebnisse von anderen Stellen sind dem Zahlungsempfänger nicht bekannt geworden.

## 9. Gesamtfazit des Projekts

BMWK-Forschungsvorhaben im Rahmen des Verbundvorhabens VERENA  
„Vergasungsprozesse mit integrierter Überschussstromeinbindung zur flexiblen  
Stromerzeugung und Herstellung synthetischer Energieträger aus Reststoffen“

Förderkennzeichen: 03EE5044



### Projektfazit

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Das Verbundvorhaben bezieht sich auf die Bekanntmachung des BMWK zur angewandten nichtnuklearen Forschungsförderung im 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Projektkonsortium.

**Projektkonsortium:** Technische Universität Darmstadt

Technische Universität München  
Technische Universität Bergakademie Freiberg  
Forschungszentrum Jülich  
RWE Power AG  
Air Liquide Forschung und Entwicklung GmbH  
GTT Technologies  
Schmidtsche Schack | ARVOS GmbH  
GKN Powder Metallurgy GmbH  
VER Verfahrensingenieure GmbH  
Clariant Produkte GmbH

**Projektlaufzeit:** 01.10.2020 – 31.12.2024

11.06.2025

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Im VERENA-Verbundprojekt wurde das Konzept der Polygeneration von Chemikalien/ Kraftstoffen und Strom auf Basis der Vergasung von Reststoffen evaluiert. Hierfür wurden die vier verschiedenen Vergasungsverfahren Flugstromvergasung, Hochtemperatur-Winkler-Vergasung (HTW®), Chemical-Looping-Vergasung (CL) und COORVED-Vergasung für verschiedene Reststoffe (Waldschadholz, Gärreste, Klärschlamm, Ersatzbrennstoff) untersucht. Im Rahmen des FuE-Projekts hat sich der fachübergreifende Forschungsansatz, welcher Laboranalysen, experimentelle Methoden hinsichtlich Umsatzverhalten, Asche-Schlacke-Eigenschaften und Korrosionsverhalten, Versuchskampagnen im Labor- und Pilotmaßstab sowie CFD- und Aspen-gestützte Prozessskalierung kombiniert, bewährt. Basierend darauf konnten die industriellen Vergaserkonzepte zur Herstellung von Chemikalien und Strom sowie das Konzept der Polygeneration techno-ökonomisch bewertet und eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt werden. Ergänzend wurde das Konzept der Polygeneration in Bezug auf die Integration in das deutsche Energiesystem technisch optimiert und wirtschaftlich bewertet.

### Einsatzstoffcharakterisierung

Die Einsatzstoffe wurden hinsichtlich ihrer Proximat- und Ultimatzusammensetzung sowie ihrer physikalischen und chemisch-mineralogischen Eigenschaften charakterisiert. Die eingesetzten analytischen Methoden, welche ursprünglich häufig für die Analyse von fossilen Einsatzstoffen entwickelt wurden, wurden für die Anwendung an Reststoffen, insbesondere für Ersatzbrennstoff, gegenseitig validiert. Zur Ermittlung des Sinterbereiches sowie zur Aufklärung der Sintermechanismen wurden umfangreiche Temperreihen (inkl. XRD, HT-XRD, SEM) durchgeführt. Zur Bestimmung der Sintertemperatur auf Basis der Wirbelschicht wurde eine neue Methode entwickelt. Dadurch konnten detaillierte Kenntnisse des Versinterungs- und Verschlackungsverhaltens gewonnen sowie Versinterungsmechanismen aufgeklärt werden. Basierend auf den Ergebnissen ist eine potenziell starke Versinterung und gegebenenfalls Verschlackung für die Gärreste erwartbar, sodass der Einsatz in der COORVED, HTW®-Vergasung und CL-Vergasung kritisch ist. Für Flugstromanwendungen zeigen alle Projekteinsatzstoffe geeignete Fließtemperaturen. Ein Vergleich der Analyseergebnisse zwischen den einzelnen Projektpartnern konnte grundsätzlich eine gute Übereinstimmung belegen und gewährt damit die Plausibilität und Reproduzierbarkeit. In einigen Fällen ließ der Vergleich aber auch Rückschlüsse auf methodische Unterschiede zwischen den Laboratorien zu, die zu Abweichungen bei den Ergebnissen führen könnten. Dadurch konnten Faktoren identifiziert werden, die für Durchführung von vergleichenden Analysen zu berücksichtigen sind (Bsp. Einhaltung genau gleicher Veraschungsbedingungen). Auch konnte gezeigt werden, dass bei Biomassen mit sehr geringem Ascheanteil mit einer größeren Schwankungsbreite insbesondere bei der Mineralphasenanalytik zu rechnen ist.

### Thermochemische Datenbank

Basierend auf der Einsatzstoffcharakterisierung wurde die thermochemische Datenbank GTOx erweitert, um Aschen mit höheren Gehalten an Kalium und Chlor beschreiben zu können. Zusätzlich wurden die flüssigen Phasen der Datenbank (Schlacke, Metallschmelze, Sulfidschmelze, Salzsäure) in eine einzige flüssige Phase überführt, was eine deutlich robustere Einschätzung des Ascheverhaltens bezüglich des Aufschmelzens sowie der Spurenstoff-Freisetzung und -Kondensation ermöglicht. Diese Arbeiten sind direkt übertragbar auf Reststoffe jenseits der im Projekt untersuchten Reststoffe.

### Reaktivität und Umsatzkinetiken

Zur Bestimmung der Reaktivität der Einsatzstoffe und der Ableitung einer Umsatzkinetik, welche in Modellierungen eingeht, wurden die experimentellen Methoden erfolgreich weiterentwickelt und durch Methodenvergleich validiert. Dabei hat sich verdeutlicht, dass die Methodik aus den jeweiligen Vergasungsprozess beispielsweise in Hinblick auf die Probenvorbereitung und die Temperaturen ausgerichtet sein muss, um diesen möglichst gut abzubilden. Für die verschiedenen Einsatzstoffe wurden die Reaktivitäten für die Vergasung des Pyrolysekoks unter den Bedingungen der Flugstromvergasung und Wirbelschichtvergasung bis zu 40 bar ermittelt und ein Partikelmodell einbezogen. Die höchste Reaktivität der betrachteten Einsatzstoffe besitzen die Gärreste. Aus Sicht der ermittelten Kinetik bzw. Vergasungsreaktivität sind alle betrachteten Einsatzstoffe vergasungsfähig. Die Reaktivität nimmt ab über den Klärschlamm, die Referenzbraunkohle, das Waldschadholz und den Ersatzbrennstoff. Die intrinsische Reaktivität wird dabei maßgeblich vom Aschegehalt und der -zusammensetzung bestimmt. Der Einfluss der Aschekomponenten auf die Reaktivität und der tatsächliche Grund für deren katalytische Aktivität ist noch nicht vollständig geklärt und sollte systematisch untersucht werden. Biogene Reststoffe zeigen deutlich geringere Oberflächen gegenüber der Referenzbraunkohle und lassen daher geringere Umsatzraten in Großanlagen vermuten, allerdings gleichen hohe intrinsische Reaktivitäten die fehlende Oberfläche wieder aus bzw. zeigen sogar einen positiven Effekt.

#### Flüchtigenfreisetzung

Die untersuchten biogene Reststoffe und Ersatzbrennstoffe weisen einen hohen Flüchtigengehalt gegenüber konventionellen Einsatzstoffen auf, sodass Pyrolyseexperimente zur Flüchtigenfreisetzung von großer Relevanz sind und im Rahmen des Projekts durchgeführt wurden. Im Vergleich zu konventionellen Einsatzstoffen, zeigen die Reststoffe unter den hohen Temperaturen der Flugstromvergasung ähnliche Freisetzungskinetiken, aber erhöhte Umsätze, obwohl die Partikelgröße etwas größer ist. Die Flüchtigenfreisetzung stellt damit einen höheren Anteil am Gesamtumsatz dar und bedarf daher zukünftig einer detaillierteren Untersuchung wie etwa: Einfluss der Reaktionsbedingungen auf die Produktverteilung, Gaszusammensetzung und Koksstruktur. Für den Temperaturbereich der Wirbelschichtvergasung wurden Flüchtigenfreisetzungsversuche mit Waldrestholz unter inerter Atmosphäre in einem Laborwirbelschichtreaktor durchgeführt. Diese bestätigen die Freisetzung von relevanten Mengen an insbesondere Ethen, BTEX, Phenol und Naphthalin, welche bei der Vergasung nicht vollständig abgebaut werden und im Synthesegas verbleiben.

#### Verhalten flüchtiger anorganischer Spurenstoffe

Flüchtige anorganische Spurenstoffe können einerseits zu Problemen führen, z.B. Belagsbildung, Korrosion, Vergiftung von Katalysatoren, Umweltprobleme etc., oder wertvolle Nebenprodukte darstellen, die zurückgewonnen werden sollten. Die Freisetzung aus dem Einsatzstoff hängt dabei sowohl von den Prozessbedingungen als auch der Art und Menge des betrachteten Spurenstoffes und anderer Aschekomponenten ab. Neben der von Regeleinsatzstoffen bekannten Freisetzung von Alkaliverbindungen und Sauer gasen, muss bei Reststoffen, wie z.B. kontaminiertem Altholz auch die Freisetzung von Spurenmetallen berücksichtigt werden. Während Cr und Cu unter den im Projekt betrachteten Vergasungsbedingungen nicht flüchtig sind, zeigen Zn, Sb, Pb, Cd, und Sn hohe Flüchtigkeiten. Phosphor, der in Klärschlamm in relativ großen Mengen vorhanden ist und zurückgewonnen werden muss, zeigt unter keinen relevanten Vergasungsbedingungen ausreichende Flüchtigkeit, um ihn über die Gasphase zu separieren. Die höchste Freisetzung erreicht man unter Pyrolysebedingungen bei  $\gg 1000$  °C.

### Flugstromvergasung:

Für die Flugstromvergasung eignen sich aufgrund ihrer Förderbarkeit mittels industrienaher Dichtstromförderung die Einsatzstoffe Referenzbraunkohle, Gärreste, Klärschlamm und Waldschadholz. Ersatzbrennstoff und Schredderleichtfraktion konnten aufgrund der stark heterogenen und faserigen Eigenschaften sowie der unzureichenden Partikelgrößenverteilung nicht für die Flugstromvergasung zugänglich gemacht werden. Gärreste zeigen zudem im Gegensatz zu den anderen Einsatzstoffen unter Zugabe von  $\text{SiO}_2$  ausreichendes Viskositätsverhalten. Kombiniert mit der höchsten Reaktivität und dem kompatiblen Schlackeverhalten wurden sie daher für die Pilotversuche im Flugstromvergaser ausgewählt. Trotz des niedrigen Heizwerts und des hohen Ascheanteils wurde erstmals ein stabiler autothermer Betrieb von unvorbehandelten Gärresten im Pilotmaßstab erfolgreich unter industrienahen Bedingungen demonstriert. Die Synthesegasreinigung konnte erfolgreich mit dem Vergaser gekoppelt werden. Dabei wurden die Betriebsparameter durch Parameterstudien optimiert, wobei die Dampfzugabe vermutlich durch den niedrigeren Heizwert weniger bedeutend ist. Gegenüber kommerziell genutzten Einsatzstoffen konnte eine überdurchschnittliche Synthesegasqualität ( $\text{H}_2/\text{CO}$ -Verhältnis von 1,6) bei akzeptablem Kaltgaswirkungsgrad (60-65 %) erreicht werden. Aufgrund des stark schlackenden Betriebs sind aber Anpassungen wie Additive für großtechnische Versuche notwendig. Der hohe Aschegehalt und vergleichsweise niedrige Heizwert kann außerdem zukünftig durch eine Einsatzstoffmischung ausgeglichen werden. Einsatzstoffspezifische Spurengase wie etwa  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  und  $\text{HCN}$  konnten in einer gekoppelten Gasreinigung erfolgreich durch ad- und absorptive Trenntechniken ausreichend entfernt werden.

Die Modellansätze des CFD-Modells der konventionellen Einsatzstoffe auf biogene Reststoffe übertragen werden. Das Modell wurde mithilfe der Daten aus den Pilotversuchen erfolgreich validiert. Basierend darauf wurde ein ressourcen-optimiertes Reaktordesign für den Biomasse-Flugstromvergaser Industriemaßstab entwickelt. Im Vergleich zu konventionellen Einsatzstoffen kann bei gleicher Baugröße eine höhere Leistungsdichte und ein höherer Durchsatz erzielt werden. Das Modell erlaubt außerdem eine Optimierung der Prozessführung. Zur weiteren Verbesserung des Modells wäre eine Implementierung der detaillierten Betrachtung des Wand- und Schlackeverhaltens erforderlich. Außerdem ist die CFD als Auslegungs- bzw. Skalierungstool nur dann final belastbar, wenn die Validierung im relevanten Maßstab durchgeführt wird.

### COORVED-Vergasung:

Die COORVED-Vergasung wurde erfolgreich für die Einsatzstoffe Klärschlamm und Referenzbraunkohle gezeigt. Gärreste zeigten starke Agglomerationen, weshalb sie für die COORVED-Vergasung aufgrund der Verschlackungsneigung nur bedingt geeignet sind. Durch zahlreiche Reaktoroptimierungen (z.B. Eintragsschnecke, Geometrie Anpassung) konnte die Prozessstabilität deutlich verbessert werden. Zusätzliche Probenahmestellen ermöglichten eine detailreiche Bilanzierung. Die Einordnung der COORVED-Aschen in die Deponieverordnung (auf Basis entsprechender DIN-Analysen) erfordert entweder eine weitere Optimierung der Sekundärvergasungszone des COORVED-Vergasers zur Senkung Restkohlenstoffgehalts oder eine Nachbehandlung der Asche. Ausgehend von der für die COORVED-Aschen von Klärschlamm und Gärreste bestimmten Reaktivitäten und Schlackeviskositäten wäre eine unproblematische Nachbehandlung als Co-Feed in einer zentralen Flugstromvergasung möglich. Das CFD-Modell des COORVED-Vergasers wurde erfolgreich um Teilmodelle für die Partikelgrößenverteilung, die Partikelfragmentierung und die Partikelkonversion erweitert. Ein Vergleich des Modells mit einer 3D-Simulation zeigt, dass die Vereinfachung auf ein 2D-Gitter

zulässig ist und die Rechenzeit um ein Vielfaches verringert werden kann. Die Modellergebnisse zur Hydrodynamik bestätigen das Trennkzept des COORVED-Reaktors und zeigt das Auftreten von Segregation größerer Partikel in der Sekundärvergasungszone und der Partikelaustrag kleiner Partikel in der Primärvergasungszone. Die Nachberechnung der COORVED-Versuche für KSK bestätigen die Ausbildung einer Flammenzone im Bereich der Primärvergasungsdüse sowie die gemessenen Reaktoraustrittstemperaturen. Das COORVED-Verfahren konnte wesentlich optimiert werden und das grundlegende Verfahrensprinzip (Agglomeratbildung in Primärzone als Voraussetzung zur Umsatzsteigerung durch Sekundärvergasungszone) wurde bestätigt.

#### Wirbelschichtvergasung:

Die Einsatzstoffe Waldschadholz, Ersatzbrennstoff, Gärreste, und Klärschlamm wurden erfolgreich in der Wirbelschichtvergasung im Pilotmaßstab untersucht und damit unter anderem die Flexibilität der Technologie in Bezug auf den verwendeten Einsatzstoff gezeigt. Der Einsatzstoff kann häufig direkt als getrocknetes Granulat, Hackschnitzel oder Fluff verwendet werden. Falls notwendig, kann durch Pelletierung die Fließfähigkeit verbessert und die Energiedichte erhöhte werden.

#### HTW<sup>®</sup>-Vergasung:

Für die HTW<sup>®</sup>-Technologie lagen bereits umfassende Betriebserfahrung an der Pilotanlage für den Einsatz von fossilen Einsatzstoffen sowie erste Versuche mit Holz vor. Dies erlaubte eine gezielte Prozesssteuerung und Optimierung der Prozessbedingungen und dadurch einen stabilen Betrieb für die Demonstration des Full-Chain-Betriebs inklusive der Synthese von Methanol mit Waldschadholz. Ebenso zeigten die Pilotversuche die Eignung des HTW<sup>®</sup>-Verfahrens für die Vergasung des Ersatzbrennstoffs, dessen Inhomogenität durch geeignete Prozessführung erfolgreich ausgeglichen werden konnte. Allerdings führte die Beschaffenheit und der hohe Flüchtiganteil des Ersatzbrennstoffs zu einer deutlich höheren Beladung des Synthesegases mit Kohlenwasserstoffen und Teeren sowie einer Ablagerung dieser auf dem Flugstaub. Dies erfordert eine aufwendigere Gasaufbereitung und beansprucht, insbesondere im experimentellen Umfeld, den Rohgaskühler und das Messequipment stark. Grundsätzlich konnte auch die HTW<sup>®</sup>-Vergasung von Klärschlamm gezeigt werden, jedoch musste das Reaktorinventar aufgrund des hohen Aschegehalts kontinuierlich abgezogen werden. Dies führte zu einer geringen Verweilzeit des Kohlenstoffs und folglich geringerem Kohlenstoffausbrand, dem mit einer Rezirkulation des Bettinventars entgegengewirkt wurde. Insbesondere in Hinblick auf die Anforderungen zur Rückgewinnung von Phosphor, ist eine weitere Evaluation der Klärschlamm-HTW<sup>®</sup>-Vergasung sinnvoll.

#### Chemical-Looping-Vergasung:

Die Chemical-Looping-Vergasung im Pilotmaßstab wurde erstmals 2022 erfolgreich mit Waldrestholz demonstriert, sodass die Weiterentwicklung der Technologie und die Betriebserfahrung im Fokus standen. Die CL-Vergasung von Gärresten zeigte zwar stabile Betriebsbedingungen und eine gute Synthesegasqualität, jedoch führten kurzzeitige Temperaturspitzen zu Aufschmelzen des Reaktorinventars und zu einer Verblockung des Reaktors. Mit geeigneter Prozessführung und einer Beimischung von Additiven zur Erhöhung der Ascheschmelztemperatur könnte der Prozess für Gärreste möglicherweise dennoch Potenzial haben. Die CL-Vergasung von Ersatzbrennstoff benötigt aufgrund des hohen Flüchtigen- und geringen Fixkohlenstoffanteils deutlich länger, um einen stabilen Betriebspunkt > 850 °C zu erreichen. Probleme in der sicherheitsrelevanten Peripherie führten jedoch dazu, dass der Betrieb häufig unterbrochen werden musste und nur durch Zufeuerung im Air Reactor

hohe Temperaturen erreicht werden konnten. Daher konnten keine aussagekräftigen Ergebnisse generiert werden.

CFD-Modelle für die HTW<sup>®</sup>- und CL-Vergasung wurden erfolgreich entwickelt. Durch den Einsatz des Grafikprozessors (GPU) für die Partikelberechnung konnte eine wesentliche Steigerung der Effizienz der Simulation erreicht werden, wodurch CL-Anlagen im industriell relevanten Maßstab mit vertretbarem Aufwand simuliert werden können. Für die HTW<sup>®</sup>-Vergasung sind die Simulationen deutlich rechenintensiver aufgrund der benötigten hohen Auflösung um die Zweistoffdüsen.

#### Korrosionsmessungen und Fouling in der Wirbelschicht:

Im Rahmen der Wirbelschicht-Pilotversuche wurde die korrosive Wirkung des Rohgases je nach Einsatzstoff auf Werkstoffcoupons im Rohgaskühler untersucht. Hierzu wurden Probenhalter in der Gas-Ein- und Austrittskammer des vorhandenen Rohgaskühlers eingebaut. Weiterhin wurde zusätzliche Messtechnik installiert, um die Betriebsbedingungen bestmöglich erfassen zu können und gemeinsam mit den Ergebnissen der Gasanalysen die vorgefundenen Korrosionsangriffe auszuwerten. Die gefahrenen Kampagnen ermöglichen wegen zeitlicher Einschränkungen mehr qualitative Aussagen zum Korrosionsverhalten. Zusätzlich wurden deshalb Auslagerungsversuche für ausgesuchte Werkstoffe in synthetischer Synthesegasatmosphäre erfolgreich durchgeführt. Ebenso bestätigten Online-Korrosionsmessungen nach dem Zyklon einen hohen Korrosionsangriff bei der Verwendung von Ersatzbrennstoff und Waldschadholz, sowohl bei der CL- als auch der HTW<sup>®</sup>-Vergasung. Das wärmetechnische Verhalten des Rohgaskühlers konnte mit Hilfe der Messdaten aus den Pilotversuchen verifiziert werden. Es wurden Foulingfaktoren für den Apparat ermittelt, welche zukünftig für die Auslegung für den vorliegenden Prozess verwendet werden können. Die entstandenen Algorithmen können ebenfalls zur Onlineüberwachung verwendet werden. Ebenfalls wurde das erosive Verhalten verschiedener Aschen aus den Vergasungsprozessen detailliert untersucht. Für die Ausführung der Erosionsversuche wurden dieselben Werkstoffcoupons wie in den Pilotversuchen verwendet und ihr jeweiliger Massenverlust bei Variation der Einflussparameter ermittelt. Abschließend wurden Vorhersagen des erosiven Verhaltens durch aus der Literatur bekannte Erosionsmodelle mit den Versuchsergebnissen verglichen. Für einige der Asche-Werkstoff- Kombinationen konnte eine Übereinstimmung von angepasstem Rechenmodell und Versuchsergebnis festgestellt werden, andere hingegen ließen sich nicht abbilden.

#### Staubfiltration:

Filterkerzen aus verpresstem und anschließend wärmebehandeltem Metallpulver wurden anstelle der zuvor verwendeten Keramikfilz-Filterelemente in der Gasaufbereitung unter den Versuchsbedingungen der HTW<sup>®</sup>-Vergasung in einer neu designten Filtertriade bestehend aus jeweils 3 Filterelemente in eine kleine Filterplatte mit 190 mm Durchmesser getestet. Der Temperaturbereich des Filters liegt bei beiden Kampagnen bei ca. 200 °C. Hierfür wurde in Vorversuchen mit Staub aus der Pilotanlage eine Filterfeinheit von 12 µm mittlerer Porengröße und Rückhaltegrad (X95) von 0,83 µm (Neuzustand) bzw. 0,5 µm nach Alterungsversuchen ausgewählt. Anschließend wird durch eine Voroxidation oberhalb 1000 °C eine geschlossene Cr-Al Mischoxidschicht gebildet, die einem korrosiven Angriff von Chloriden und Schwefelverbindungen bei hohen Temperaturen standhalten soll.

Während bei der ersten Kampagne mit Holz ein robustes Filter und Rückpulsverhalten zu beobachten war, konnte bei dem Vergasungsversuch mit Ersatzbrennstoff kein stabiler

Filtrationszyklus eingestellt werden. Die Dauer bis zum Rückpulsen musste stetig verkürzt werden und der Anfangsdruckverlust stieg um 15-20 mbar an. Dies spricht für ein Verblocken der Filterporen, die durch das Rückpulsen nicht gereinigt werden können und so der Durchfluss sinkt bzw. der Druckverlust der Filteranlage ansteigt. Die metallographische Untersuchung an einem künstlich erzeugten Bruchbild weist eindeutig auf eine Verblockung durch Rußbildung hin. Hauptsächlich wird Kohlenstoff detektiert, der sowohl im Innen- als auch Außenbereich des Filterelements zu finden ist. Die Rußschicht liegt zum Teil auf den Metallpulverpartikeln und auch in den Poren zwischen den Pulverpartikeln. Zum Teil finden sich auch Schlacke bildende Elemente wie Ca, Zn, Na und Schwefel. Bei der niedrigen Temperatur ist ein korrosiver Angriff durch Schwefel-Verbindungen auszuschließen. Eine Versinterung der Schlacke ist bei 200 °C ebenfalls nicht zu erwarten. Es ist daher davon auszugehen, dass Ruß und Teer die Verblockung der Filterelemente ausgelöst haben.

#### Gasreinigung:

Die an die Wirbelschicht-Pilotanlage gekoppelte Gasaufbereitungsanlage ermöglicht die Untersuchung von realem Synthesegas und kombiniert kommerzielle Technologien mit innovativen Neuentwicklungen. Komponenten wie der Heißgasfilter, der Rohgaswäscher, die Hydrolyse und das Aminsistem sind technisch ausgereift und bewährt. Ergänzt wird das System durch eine physikalische Teerabscheidung mittels einer neu entwickelten Biodieselwäsche. Diese Technologie befindet sich noch in der Entwicklungsphase und ist derzeit nicht kommerziell verfügbar. Die Gasaufbereitung wurde mit Hilfe des Simulationstools ChemCad nachsimuliert und eine Materialbilanz erstellt. Die Validierung mit den in den Pilotversuchen generierten Daten, zeigt, dass die rechnerische Abbildung der Versuchsanlage erfolgreich war.

Im Betrieb zeigte sich ein insgesamt stabiler Verlauf der Gasaufbereitungsanlage bei der Nutzung von Waldschadholz als Einsatzstoff. Dabei konnten unabhängig vom Roh-Synthesegas die gewünschte Reinheit des Synthesegases erreicht werden. Darüber hinaus konnte die neu entwickelte Biodieselwäsche erfolgreich für Waldschadholz als Einsatzstoff getestet werden. Bei der Regeneration des Biodiesels wurde ein Gemisch aus Benzol, Toluol und Xylol gewonnen, welches als Wertprodukt weiterverwendet werden kann. Dies unterstreicht die grundsätzliche Eignung der Anlage für biogene Reststoffe.

Die Verwendung alternativer Einsatzstoffe wie Ersatzbrennstoff stellt hingegen eine deutliche Herausforderung dar. Der hohe und stark schwankende Gehalt an Kohlenwasserstoffen führt zu einer zusätzlichen Belastung der Gasaufbereitung, da es durch die starke Abkühlung des Synthesegases vermehrt zur Auskondensation von Kohlenwasserstoffen kommt, welche den Wärmetauscher vor dem Rohgaskompressor verblocken, was die Verfügbarkeit der Anlage verkürzt. Trotzdem konnte gezeigt werden, dass die anderen Aggregate das Roh-Synthesegas zuverlässig reinigen. Durch Optimierung des Wärmetauschers konnte die Anlage für alternative Einsatzstoffe umgerüstet werden. Großtechnisch würde der Reaktor im Überdruck betrieben werden. Abhängig vom Druck des Vergasers kann auf die Zwischenkompression vor der Biodieselwäsche und dem Aminsistem verzichtet werden, sodass erst vor der Synthese der Druck erhöht werden muss und somit keine kondensierbaren Kohlenwasserstoffe mehr im Synthesegas vorhanden sind.

An dem Pilot-Flugstromvergaser konnte erfolgreich eine neu aufgebaute ad- und absorptive Gasreinigungsanlage gekoppelt werden. Zudem konnten geeignete Adsorber für die eintrittsstoffspezifische Abreinigung von Spurenelementen wie H<sub>2</sub>S, HCl oder HCN über einen Teststand identifiziert und charakterisiert werden.

## Synthese

Zur Demonstration der vollständigen Prozesskette von der Vergasung bis zur Synthese wurde an der Wirbelschichtpilotanlage eine Methanolanlage mit Produktkondensation und Reaktanten-Recycling aufgebaut und zunächst mit dem Einsatz von Flaschengas validiert. Im Betrieb mit aufgereinigtem Synthesegas aus der Vergasung von Waldschadholz zeigte sich eine Akkumulation von Inerten im Kreislaufstrom, wobei dennoch ein näherungsweise vollständiger Umsatz von  $\text{CO}_x$  beobachtet werden konnte. Die schwankende Zusammensetzung des Synthesegases zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die Methanolproduktion unter den gewählten Reaktionsbedingungen. Neben höheren Alkoholen, die als Nebenprodukte in der Methanolsynthese anfallen, konnten des Weiteren Cyclopentan und verschiedene Aromaten (Benzol, Toluol, Xylol) als Nebenprodukte der Vergasung und der Gasaufbereitung im flüssigen Methanol nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse der Langzeittest zur Methanolsynthese bei Air Liquide zeigten gute Aktivitäten und Stabilitäten der eingesetzten Katalysatoren, auch für  $\text{CO}_2$ -reiche unterstöchiometrische Synthesegase. Die Desaktivierungsraten waren vergleichbar mit denen für konventionelle, stöchiometrische Mischungen. Da die Anlagenkosten ein starker Kostentreiber bei solch geringen Anlagenkapazitäten sind, wird empfohlen, alternative Konzepte mit Zwischenkondensation und geringem oder ohne Recycle weiterzuentwickeln, um die Kosten für Kompressoren, Wärmetauscher und Reaktoren zu reduzieren.

## Auslegung eines industriellen Vergasers:

Auf Basis der Pilotversuche und der Modellierungen wurden für die verschiedenen Vergasertechnologien Großanlagen mit einer Kapazität von  $100 \text{ MW}_{\text{th}}$  ausgelegt. Dabei müssen verschiedene Annahmen getroffen werden wie beispielsweise zur Skalierung der Wärmeverluste. Für die COORVED-Vergasung wurde ein bei 11 bar betriebener Reaktor für Klärschlamm ausgelegt. Die Flugstromvergasung wurde für den Einsatz von Gärresten bei 25 bar betrachtet. Für die HTW<sup>®</sup>-Vergasung wurde ein Reaktor für verschiedene Einsatzstoffe bei einem Betriebsdruck von 12 bar ausgelegt.

Für den Rohgaskühler eines industriellen Wirbelschichtvergasers wurde die Anströmung mit Hilfe von CFD detailliert betrachtet, um die durch die Verbindungsleitung zum Reaktor hervorgerufene ungleiche Verteilung von Gas- und Partikelstrom zu minimieren. Die erzielten Verbesserungen müssen im Einzelfall mit dem erhöhten Konstruktions- und Fertigungsaufwand abgewogen werden. Auf Basis der zusätzlich installierten Messinstrumente und der Betriebsdaten des Pilotvergasers konnte außerdem das wärmetechnische Verhalten des Rohgaskühlers verifiziert werden. Es wurden Foulingfaktoren für den Apparat ermittelt, welche zukünftig für die Auslegung für den vorliegenden Prozess verwendet werden können. Die entstandenen Algorithmen können ebenfalls zur Onlineüberwachung verwendet werden.

Für den CLG-Prozess wurde eine zweiteilige Abhitzestrecke erarbeitet: Für die Rohgaskühlung des Gases aus dem Fuel Reactor wurde gemäß den Prozessanforderungen ein Doppelrohr-Synthesegaskühler als Dampferzeuger inklusive Dampftrommel ausgelegt und designt. Diese Bauform ist erprobt und ist in der Lage, alle gestellten Anforderungen zu erfüllen. Zur Nutzung der Abwärme aus dem Air Reactor wurde eine Apparatekette bestehend aus 2 Verbrennungsluftvorwärmern und 2 Dampferzeugern, jeweils bestehend aus einem Nieder- und einem Hochtemperaturvorwärmer. Die Aufteilung erfolgte dabei basierend auf dem geforderten Temperaturprofil zur Kostenminimierung der Apparate. Die Apparate erfüllen alle Anforderungen und erhöhen durch die zurückgewonnene Wärme die thermische Effizienz des Prozesses.

### Auslegung einer industriellen Synthese:

Basierend auf den Materialbilanzen der Gasreinigungsanlagen der Flugstrom- und der Wirbelschicht-Pilotanlagen wurden zwei Syntheseverfahren ausgelegt. Für das sehr saubere Synthesegas der Flugstromvergasung (keine Kohlenwasserstoffe enthaltene Synthesegas) zeigte sich Methanol (thermodynamisch, Produkteffizienz, CO<sub>2</sub>-Emissionen, ...) als vielversprechendste Produkt der flugstrombasierten Polygeneration und wurde daher in industriellem Maßstab ausgelegt. Das einen hohen Kohlenwasserstoffanteil enthaltene Rohgas der Chemical-Looping-Vergasung, eignet sich für ein Syntheseverfahren, für das sinnvollerweise ein Reformersschritt notwendig ist. Daher wurde für das Rohgas eine FT-Synthese incl. Reformer ausgewählt und ausgelegt. Für das Rohgas ex Flugstromvergasung wäre eine FT-Synthese mit oder ohne Reformer ebenfalls geeignet gewesen, wohingegen die Methanolsynthese mit einem Rohgas ex CLG nur sinnvoll gewesen wäre, wenn in das Prozessschema Upstream der Synthese ein POX oder Reformersschritt aufgenommen worden wäre.

### Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage:

Alle Kostenschätzungen der verschiedenen Partner, welche innerhalb des Projektes angefertigt wurden, wurden miteinander verglichen und zeigten eine gute bis sehr gute Übereinstimmung. Entsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die nachfolgenden Schlussfolgerungen zur Wirtschaftlichkeit zuverlässig sind. Die Investitionskosten für einen 100 MW<sub>th</sub>-Vergaser wurden zwischen 75 Mio. bis 170 Mio. Euro je nach inkludierter Peripherie (Luftzerlegung, Einsatzstoffaufbereitung) geschätzt. Eine Methanolanlage kostet nach Einschätzung der Projektpartner zwischen 200 Mio. und 250 Mio. Euro und eine Polygenerationsanlage ungefähr 500 Mio. Euro.

Da die Anlagenkapazitäten aufgrund der geringen Verfügbarkeit der Reststoffströme gering sind (typischerweise 100-200 MW<sub>th</sub> Einsatzstoffleistung), stellen die Anlagen-Investitionskosten einen klaren Kostentreiber dar. Aus wirtschaftlicher Sicht sollten daher die Anlagen so groß wie möglich gebaut werden. Anlagenkapazitäten < 100 MW<sub>th</sub> (Einsatzstoffleistung) führen zu einer deutlichen Erhöhung der Produktionskosten. Die Bewertung zur Methanol- und Stromproduktion sowie zur Polygeneration haben folgende Schlussfolgerungen ergeben:

1. Eine Abfall-basierte Produktion von Methanol ist kommerziell attraktiv und erlaubt geringere Produktionskosten (~ 750-900 €/t) als eine Produktion auf Basis von CO<sub>2</sub> und Wasserstoff (e-Methanol, ~ 1100-1400 €/t), führt aber dabei zu höheren Emissionen. Möglichst hohe Anteile an biogenem Einsatzstoff würden hierbei helfen, die Emissionen zu reduzieren.
  - Die Produktion von Methanol aus Abfall macht aus Sicht von Privatunternehmen Sinn, da gleichzeitig Emissionen eingespart werden und die Anlagen bestmöglich ausgenutzt werden können (Dauerbetrieb, niedrige Rohstoffkosten, geringe Marktschwankungen). Wichtig hierfür ist jedoch eine geeignete CAPEX-Förderung oder entsprechende finanzielle Anreize für die Vermeidung einer Müllverbrennung. So würden Mechanismen zur sektorübergreifenden Anrechnung von Emissionseinsparungen aus der vermiedenen Müllverbrennung helfen, um die höheren Produktionskosten rechtfertigen zu können.
2. Eine Produktion von Strom im Grundlast-Betrieb führt zu deutlich höheren Produktionskosten (~ 90-40 ct/kWh Strom, 5-20 % Split) als auf Basis von fossilen

Einsatzstoffen. Das Potenzial liegt entsprechend eher bei einer flexiblen Betriebsweise zur Abdeckung von Spitzenlasten.

- Die Produktion von Strom erfordert eine gezielte Unterstützung von Unternehmen, die Spitzenlastkraftwerke zur Sicherung der Netzversorgung bauen und betreiben wollen. Aus der Perspektive von Privatunternehmen, die durch ihre Investitionen einen Erlös erzielen müssen, ist dies aufgrund geringer Anlagenauslastungen bei gleichzeitig hohem Investment eher schwierig. Aus der Perspektive von Netzbetreibern mit Fokus auf Strominfrastruktur und Versorgungssicherheit kann dies anders sein. Hierfür ist die Bewertung auf Basis von reinen Produktionskosten nicht aussagekräftig. Derzeit werden Gaskraftwerke typischerweise mit ca. 3200 Volllaststunden gefahren (Daten von 2021<sup>1</sup>), da sie aufgrund der Nutzung von teurem Erdgas relativ hohe Grenzkosten<sup>2</sup> verglichen mit anderen Kraftwerkstypen (Wind / Solar / Kohle) aufweisen (siehe Tabelle). Wenn nun Erdgas durch Synthesegas aus einer der im Projekt entwickelten Vergasungstechnologien ersetzt wird (z.B. im Rahmen eines Abnahmevertrags zwischen Betreiber der Vergasungsanlage und dem Kraftwerksbetreiber), sind die Grenzkosten durch die Vergasung noch deutlich höher. Für einen Netzbetreiber kann eine solche Investition trotz der 2 – 2,7 Mal höheren Grenzkosten trotzdem ausreichend attraktiv sein, wenn die Alternative eine unzureichende Stromversorgung oder eine Produktion von Strom aus Wasserstoff ist. In diesem Fall kann eine Produktion von Strom aus Synthesegas also eine Rolle spielen, wenn Netzbetreiber oder Regierung die entsprechenden Mehrkosten für Synthesegas und das Gaskraftwerk trotz geringer Auslastungen übernehmen wollen.

Prozess	Erdgas-Kraftwerk	Abfall-basierte CoGen-Anlage	H2-basiertes Gaskraftwerk
Grenzkosten	70 - 90 €/MWh <sub>el</sub>	130 -240 €/MWh <sub>el</sub>	275 - 305 €/MWh <sub>el</sub>
Ergänzung	- 20 - 30 €/MWh Erdgas - 100 €/t CO <sub>2</sub> -Steuer	- 200 - 50 MW <sub>th</sub> Einsatzstoff - 80-20 MW <sub>el</sub> Stromproduktion - Grenzkosten beinhalten die Investkosten für Vergasung und Gasreinigung	- 5.5 - 6.1 €/kg H <sub>2</sub> - 60% Effizienz

3. Flexible Coeneration-Anlagen für Methanol und Strom sind technisch umsetzbar und unabhängig von der Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien, führen aber wegen der geringen Anlagengrößen und der entsprechend hohen Investkosten zu hohen Produktionskosten (TCO > 200-300 €/MWh). Wenn passende Finanzierungsmodelle für Reservekraftwerke und entsprechende Förderungen von Neuanlagen vorliegen, könnten flexible Cogeneration-Anlagen einen Beitrag zur Sicherung der

<sup>1</sup> Next Kraftwerke, <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/volllast-teillast-nulllast>, last retrieved May 7th, 2025

<sup>2</sup> Grenzkosten: minimaler Verkaufspreis, bei dem kein Verlust erzielt wird (Investitionskosten sind hierbei ausgeschlossen); entspricht also den reinen Betriebskosten.

Stromversorgung liefern. Für Privatunternehmen ist dieses Geschäftsmodell aufgrund hoher Investitionskosten und geringer Anlagenauslastung weniger attraktiv.

Diese Analyse zeigt die große Schwierigkeit, auf Basis von Produktionskosten eine Handlungsempfehlung für einen Sektor auszusprechen, für den weitere Aspekte (Versorgungssicherheit, Netzstabilität, Unabhängigkeit von Energieimporten etc.) ggf. eine größere Rolle spielen. Entsprechend kann auf Basis des vorliegenden Forschungsprojektes keine abschließende Empfehlung ausgesprochen werden. Eine Analyse des langfristigen Potenzials aus Sicht eines Netzbetreibers, inkl. Vergleich mit anderen technischen Optionen (Batteriespeicherung, H<sub>2</sub>-Kraftwerke, CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus Kraftwerksabgasen etc.) und in Abhängigkeit vom zukünftigen Strommix, ist hierzu notwendig und sollte in Folgeprojekten durchgeführt werden. Der Einfluss der Einsatzstoffstrategie auf die Wirtschaftlichkeit scheint gegenüber der Skalierung der Anlage einen weniger relevanten Einfluss zu haben.

#### Lebenszyklusanalyse:

Abfall-basierte Routen zur Produktion von Methanol und/oder Strom zeigen ein Potenzial zur Emissionseinsparung, wenn vermiedene Emissionen aus Müllverbrennungsanlagen berücksichtigt werden. Wenn das Hauptziel eine Reduktion von direkten und indirekten Emissionen ist, sollte eine Nutzung von Biomasse oder Biomasse-reichen Abfallfraktionen als Einsatzstoff erwogen werden. Wenn eine Herstellung von zirkulären / recycelten Chemieprodukten angestrebt wird, werden zusätzliche Emissionskredite aus der vermiedenen Müllverbrennung oder bindende Recyclingziele benötigt, um die höheren Produktionskosten zu decken und einen Anreiz für Investoren zu schaffen.

## **10. Koordination und Kommunikation**

Die Technische Universität Darmstadt war für die Koordination und Kommunikation (AP6) des VERENA-Gesamtprojekts verantwortlich. Der Lead für die grundlegenden Untersuchungen (AP1) lag bei der TU München, für die Arbeitspakete AP2 Untersuchungen im Pilotmaßstab und AP3 Modellentwicklung bei der TU Darmstadt, für AP4 Auslegung der Großanlagen zunächst bei MHPSE und anschließend bei der TU München und für AP5 Bewertung des Prozesses bei der TU München. Zur Kommunikation zwischen den Projektpartnern fanden halbjährliche, 2-tägige Projekttreffen statt, während der die aktuell bearbeiteten Arbeitspakete präsentiert und diskutiert wurden. Für jedes Projekttreffen wurde ein Protokoll angefertigt sowie die Folien auf einer geteilten Plattform („Hessenbox“ der TU Darmstadt) allen Projektbeteiligten bereitgestellt.

- 02.06.2021 – online
- 02./03.12.2021 – online
- 02./03.06.2022 – TU Darmstadt, Darmstadt
- 24./25.11.2022 – TU München, München
- 22./23.05.2023 – TU Bergakademie Freiberg, Freiberg

- 14./15.11.2023 – Air Liquide, Frankfurt
- 19./20.06.2024 – Schmidtsche Schack Arvos, Kassel
- 04./05.12.2024 – TU Darmstadt, Darmstadt

## 11. Literaturverzeichnis

- 1) VDI Richtlinie 3677, Blatt 3, „Filternde Abscheider, Heißgasfiltration“
- 2) Engkvist, J. et al., *Alumina Scale Formation on a Powder Metallurgical FeCrAl Alloy (Kanthal APMT) at 900–1,100 C in dry O<sub>2</sub> and in O<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O*, in: Oxid Met (2010) 73:233–253