

Technische Universität München · Lehrstuhl für Energiesysteme  
Boltzmannstraße 15 · 85747 Garching · Germany

**Prof. Dr.-Ing.  
Hartmut Spliethoff**  
Tel +49.89.289.16272  
Fax +49.89.289.16271  
[www.es.mw.tum.de](http://www.es.mw.tum.de)

Projektträger Jülich (PTJ)  
Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ),  
Transfer und Markteinführung  
Postfach 60 02 47  
10923 Berlin

**Kontaktperson:**  
Dr. Matthias Gaderer  
Telefon-Durchwahl  
+49.89.289.16272  
[gaderer@tum.de](mailto:gaderer@tum.de)

[j.kreitz@fz-juelich.de](mailto:j.kreitz@fz-juelich.de)  
Fax: 030 20199-3100

Garching, 29.04.2014

Seiten: insgesamt 8

**Betreff: 2. Zwischenbericht, Projekt FLUHKE**

**Förderkennzeichen FKZ: 03KB074B**

**TUM-Fonds-Nummer: 5071285**

Sehr geehrte Frau Kreitz,

anbei finden Sie den 2. Zwischenbericht des Lehrstuhl für Energiesysteme der TU München für das Projekt FLUHKE in vierfacher Ausführung.

Mit freundlichen Grüßen

Dr. Matthias Gaderer

## Zwischenbericht

Zuwendungsempfänger: <b>TU München, Lehrstuhl für Energiesysteme</b>	Förderkennzeichen: <b>03KB074B</b>
Vorhabenbezeichnung: <b>FLUHKE – Trockene Niedertemperatur-Flugstromvergasung mit Bio-Kohlen aus der hydrothermalen Karbonisierung zur dezentralen Energiebereitstellung von Strom und Wärme mit einem Motor-BHKW</b>	
Laufzeit des Vorhabens: <b>01.10.2012 – 30.09.2015</b>	
Berichtszeitraum: <b>01.01.2013 – 31.12.2013</b>	

### 1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse.

Für das Arbeitspaket 2 wurden mit den Versuchsanlagen am Lehrstuhl für Energiesysteme (LES) sowohl grundlegende Arbeiten zur Vergasungskinetik durchgeführt, als auch der im Projekt bearbeitete Gesamtprozess simuliert. Es konnten weiterhin erste Versuche mit HTC-Kohle von Suncoal an einem autothermen Flugstromvergaser am Energy Technology Centre (ETC) in Schweden durchgeführt werden.

#### 1.1 Erstellung eines Simulationsmodells des Gesamtprozesses in Aspen Plus (s. Anhang 1)

- Abbildung der Einzelkomponenten (HTC-Anlage, Flugstromvergaser, Wärmetauscher, Gasmotor-BHKW)
- Bilanzierung der Massen- und Energieströme
- Berechnung von Teil- und Gesamtwirkungsgraden
- Ableitung von Prozessparametern für einen effizienten Betrieb

**Tabelle 1: Mit Aspen Plus simulierte Gaszusammensetzung des Produktgases aus dem Flugstromvergaser**

Molekül	Vol.-Anteil [%]	Molekül	Vol.-Anteil [%]
H <sub>2</sub>	13	COS	2,31E-03
CO	21	H <sub>2</sub> O	4,5
CO <sub>2</sub>	8	NH <sub>3</sub>	7,66E-04
N <sub>2</sub>	53	HCN	4,32E-05
CH <sub>4</sub>	8,41E-04	O <sub>2</sub>	4,37E-16
H <sub>2</sub> S	3,10E-02	S	2,21E-19

Tabelle 1 zeigt die Simulationsergebnisse aus Aspen Plus für die erwartete Zusammensetzung des Produktgases.

Die Vergasung mit Luft (und der daraus resultierend hohe N<sub>2</sub>-Gehalt) führt zu vergleichsweise geringen Anteilen von H<sub>2</sub> und CO und bedingt damit einen niedrigen Heizwert des Gases. Für die Verstromung im Kolbenmotor wird daher ein Zündstrahlmotor vorgeschlagen. Ungewünschte Gase (NH<sub>3</sub>, COS etc.) liegen nur als Spurengase vor und sind daher als für den Motor unschädlich einzustufen.

Die Auswertung ergab mit einem erreichbaren elektrischen Gesamtwirkungsgrad von über 32 % einen hohen Wert im Bereich kleiner KWK-Anlagen. Dabei wird von einem vollständigen Umsatz der Kohle ausgegangen. Mit dem erstellten Aspen Plus Modell können Limitierungen eines realen Vergasungsprozesses, z.B. hinsichtlich eines unvollständigen Kohleumsatzes, nicht erfasst werden.

## 1.2 Versuche zur Vergasungskinetik

Für eine weitergehende Untersuchung der Flugstromvergasung wurden daher Experimente zur Vergasungskinetik durchgeführt. Ziel ist die Modellierung der Kinetik heterogener Vergasungsvorgänge. Die relevanten Reaktionen für die Feststoffvergasung sind in Tabelle 2 aufgeführt.

**Tabelle 2: Relevante heterogene Vergasungs- und Verbrennungsreaktionen für die Vergasung fester Brennstoffe**

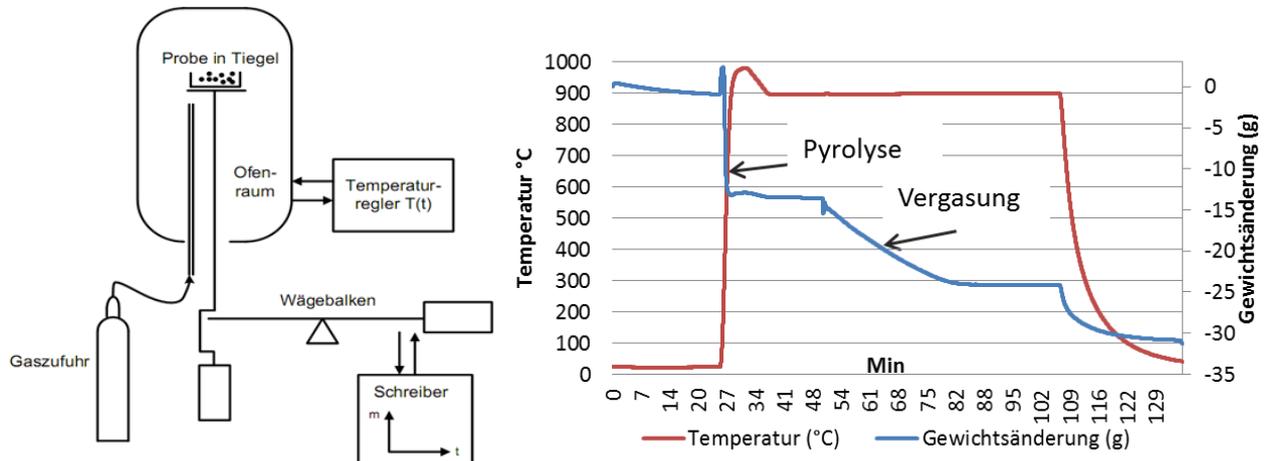
1)	Heterogene Verbrennungsreaktion	$C + 1/2 O_2 \rightleftharpoons CO$
2)	Boudouard-Reaktion	$C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$
3)	Wassergas-Reaktion	$C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$

Als Versuchsanlagen wurden hierfür verwendet:

- Atmosphärische TGA (thermogravimetrische Analyse): Zur Bestimmung der Kinetikparameter unter definierter Gasatmosphäre,
- Druckflugstromreaktor PITER: Zur Erzeugung von Pyrolysekoxen und Koksproben unter verschiedenen Gasatmosphären

In der TGA wurden Versuche in Sauerstoff- und CO<sub>2</sub>-Atmosphäre durchgeführt, um die Boudouard- und die Verbrennungs-Reaktion zu untersuchen. Aus der zeitlichen Gewichtsabnahme der Probe lässt sich eine Rate des Koksumsatzes unter definierten Bedingungen (Temperatur, Druck etc.) berechnen. Das Messprinzip ist in Abbildung 1 dargestellt.

Als Ergebnis dieser Versuche wurden brennstoffspezifische Faktoren (Aktivierungsenergie, präexponentielle Faktoren) gewonnen, die sowohl für eine einfache 1D-Modellierung, als auch für CFD-Berechnungen verwendet werden können.



**Abbildung 1: Schematische Darstellung der thermogravimetrischen Analyse (links). Typischer Verlauf einer TGA-Messung (rechts)**

Da Sauerstoffreaktionen um Größenordnungen schneller ablaufen als die  $\text{CO}_2$ -/  $\text{H}_2\text{O}$ -Reaktionen, wird die C-Umsetzung durch diese kaum begrenzt. Der Fokus der Untersuchungen wurde daher auf die  $\text{CO}_2$ -Reaktionsraten gelegt. Für die  $\text{H}_2\text{O}$ -Vergasung standen noch keine geeigneten Versuchsanlagen zur Verfügung. Die Ergebnisse zeigen, dass die Reaktivität der HTC-Kohle oberhalb der von Braunkohle liegt. Damit ist ein hoher Umsatz bei der Flugstromvergasung zu erwarten.

Zur weiteren Untersuchung des Brennstoffes wurden am Druckflugstromreaktor PITER Versuche unter kontrollierter Pyrolyse-,  $\text{O}_2$ -/  $\text{CO}_2$ -Atmosphäre bei unterschiedlichen Drücken und Verweilzeiten (zwischen 0,69 – 2,5 s) durchgeführt.

Um eine letztendliche Eignung der HTC-Kohle für die industrielle Flugstromvergasung beurteilen zu können, zeigte sich, dass Versuche an einem autothermen Flugstromvergaser notwendig sind. Es wurden daher für die Validierung der Grundlagen im Arbeitspaket 3 an der neuen Flugstrom-Technikumsanlage am LES, die sich derzeit im Aufbau befindet, umfassende Vorbereitungen getroffen. Die Erkenntnisse aus den Vorversuchen am ETC fließen in die Planung mit ein.

Im Rahmen des Projekts FLUHKE sind die wesentlichen Punkte hierbei:

- Eine Dosiereinrichtung mit besonderem Augenmerk auf einem gleichmäßigem Eintrag der Kohle (um der Teerproblematik entgegen zu wirken) und einem geringen Traggasbedarf (um die Verunreinigung durch Stickstoff gering zu halten). Es wurde daher eine Dosieranlage mit pneumatischer Förderung im Dichtstromverfahren angeschafft und installiert.
- Vorheizung der Reaktionsgase auf eine Temperatur von ca.  $500^\circ\text{C}$ , um ausreichend hohe Prozesstemperaturen (ca.  $1.000^\circ\text{C}$ ) bei geringem  $\lambda$  (ca. 0,35-0,4) im autothermen Betrieb erreichen zu können. Die Vorheizung wird über einen elektrischen Strömungserhitzer erreicht.
- Analysemöglichkeit des Prozessgases hinsichtlich Gasqualität und Teerentstehung: Hierfür ist eine Heißgasprobenahme für verschiedene Verweilzeiten vorgesehen. Damit kann teerbeladenes Gas ohne Kondensation abgezogen und analysiert werden. Für die Teeranalytik und die Hauptgaskomponenten soll eine Gaschromatographie (GC) in Verbindung mit einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD) und einem Massenspektrometer (MS) angewendet werden.

In Abbildung 2 ist die Flugstrom-Technikumsanlage mit den relevanten Anlagenteilen, Prozessmedien und vorhandenen, sowie geplanten Analysemethoden dargestellt.

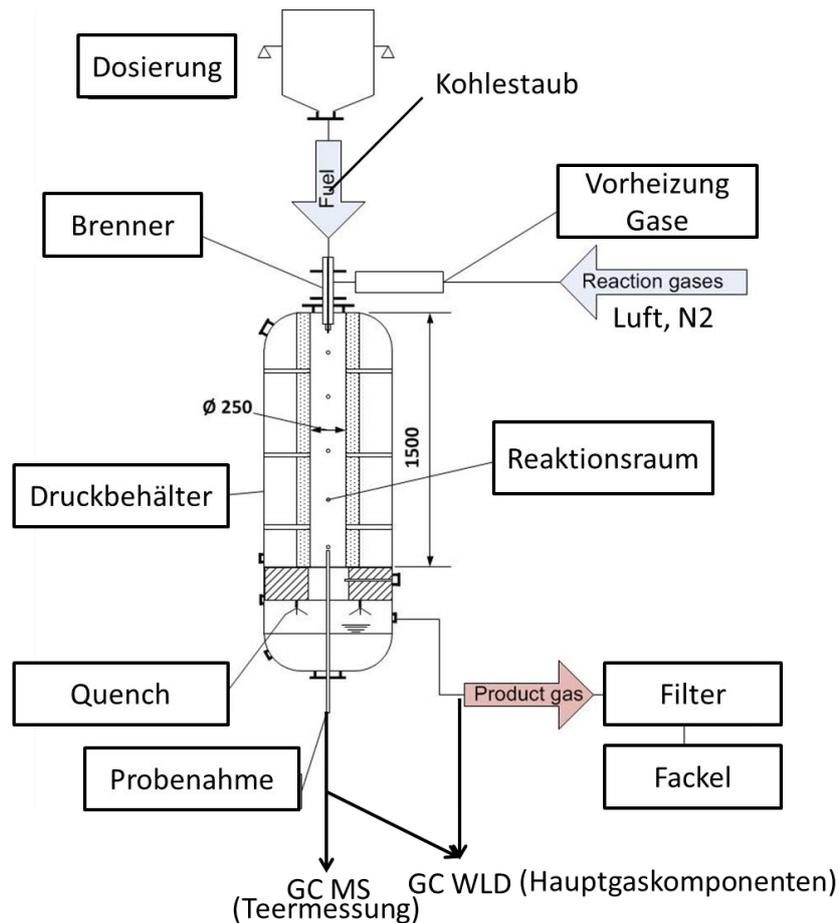


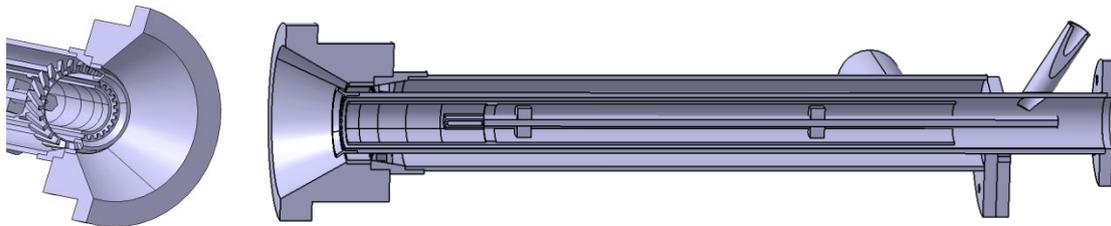
Abbildung 2: Skizze der neuen Flugstrom-Technikumsanlage am LES

### 1.3 Simulation und Weiterentwicklung eines Vergasungsbrenners

Neben dem gleichmäßigen Kohleeintrag durch die Dosierung ist insbesondere eine gute Durchmischung mit den Reaktionsgasen für den Prozess entscheidend. Diese wird durch den Brenner sichergestellt. Die folgenden Arbeiten werden in diesem Zusammenhang durchgeführt:

- Für die Vergasung mit Luft als Reaktionsgas wird zunächst ein vorhandener Drallbrenner verwendet, der für die Verwendung mit dem Vergaser angepasst wird.
- Eine weitere Aufgabe des Brenners ist es die Partikelverweilzeit im heißen Reaktionsraum durch die Beeinflussung der Partikel-Flugbahn zu erhöhen. Eine Optimierung der Einsatzparameter soll vorab in bereits laufenden CFD-Simulationen erreicht werden. Dazu sollen Leistung und Luftzahl, sowie die Aufteilung der Luft auf die verschiedenen Brennerregister variiert werden.

Abbildung 3 zeigt die Geometrie des verwendeten Brenners.



**Abbildung 3:** Schnittbild des Kohlebrenners mit den drei Registern und dem nicht geschnitten dargestellten Drallerzeuger (links). Rechts der Brenner im Längsschnitt mit dem zentralen Gaszündbrenner und den Zuleitungsstutzen der Medien.

## **2. Vergleich des Stands des Vorhabens mit der ursprünglichen (bzw. mit Zustimmung des Zuwendungsgebers geänderten) Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung.**

### **Personalplanung**

Das Projekt wird seit dem 19.11.12 von Herrn Ludwig Briesemeister bearbeitet. Seit 2014 wird das Projekt außerdem von Herrn Moritz Gleinser bearbeitet, der die zweite E13 Stelle besetzt. Die Projektleitung obliegt weiterhin Herrn Dr. Gaderer.

### **Ausgabenplanung**

Die Ausgaben entsprechen weitgehend der Planung, alle vorgesehenen Personalstellen sind besetzt.

### **Zeitplanung**

Die Planung zur Bearbeitung der Arbeitspakete entspricht der Beschreibung im Projektantrag.

## **3. Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert?**

Nein, die Aussichten für die Erreichung der Ziele entsprechen weiterhin denen des Antrages.

## **4. Sind inzwischen von dritter Seite Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind?**

Nein.

## **5. Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig?**

Nein.

## 6. Fortschreibung des Verwertungsplans.

- Die Ergebnisse aus der Untersuchung des spezifischen Brennstoffs HTC-Kohle fließen in bereits vorhandene Modelle zur Berechnung des Flugstromverfahrens ein. Deren Anwendungsbereich kann durch die gewonnenen kinetischen Daten erweitert werden.
- Die CFD-Berechnung von autothermen Flugstromvergasungsprozessen führt zu neuen Erkenntnissen bezüglich der Brennerauslegung.

Die Methodenentwicklung und Ergebnisse der Arbeiten im Rahmen des Projekts fließen in die Lehre am Lehrstuhl in mehrerer Hinsicht ein:

- Bei der Bearbeitung des Projektes sind Studierende eng eingebunden, die sich in ihrer Semester-, Master- oder Diplomarbeit intensiv mit der Thematik der Flugstromvergasung bzw. der Hydrothermalen Karbonisierung auseinandersetzen.
- Die im Verlaufe der Projektbearbeitung gewonnenen Erkenntnisse werden im Rahmen von Vorlesungen zu den Themen „energetische Biomassenutzung“ oder „Grundlagen der Energiewandlung“ dargestellt und an die Studierenden weitergegeben.

Die Veröffentlichung der Ergebnisse wird ebenfalls durchgeführt:

- Seit Projektbeginn wurde das Projekt bereits in Kopenhagen auf der European Biomass Conference im Rahmen einer gemeinsamen Veröffentlichung mit dem DBFZ vorgestellt.
- Auf der diesjährigen European Biomass Conference werden die bisherigen Ergebnisse aus dem AP 2 im Rahmen eines Vortrags dargestellt.

Das Projekt wird seit Beginn an von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter (Ludwig Briesemeister) bearbeitet, der im Rahmen des Projektes seine Promotion durchführen wird.

Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in den laufenden Habilitationsprozess von Herrn Dr. Gaderer ein, der das Projekt seitens des LES leitet.

## Anhang 1

### Systembetrachtung mittels Simulationssoftware AspenPlus:

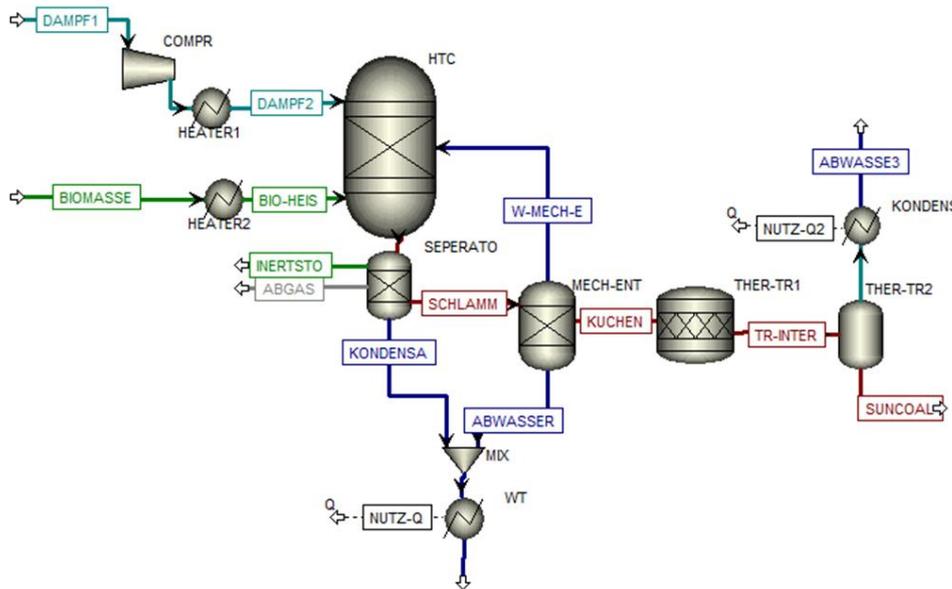


Abbildung 4: Aspen Plus-Simulationsmodell der CarboREN-Anlage

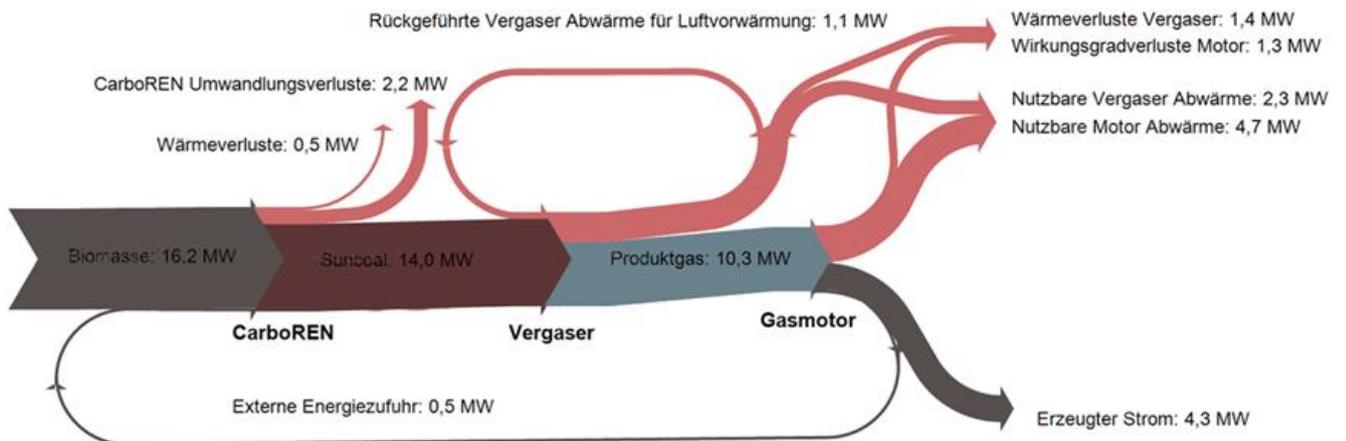


Abbildung 5: Energiebilanz des simulierten HTC-Kohle Vergasungskraftwerks