



Klima- und Energiefonds
www.klimafonds.gv.at



Österreichische Forschungsfördergesellschaft mbH
www.ffg.at

Neue Energien 2020
publizierbarer Endbericht
30.01.2015

G-VOLUTION II

Zweibettwirbelschicht Biomasse-Dampfvergaser der zweiten Generation – II

Univ.Ass. Dipl.-Ing.(FH) Dr.techn. Johannes Christian **SCHMID**¹

Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan **MÜLLER**¹

Dipl.-Ing. Maximilian **KOLBITSCH**¹

Dipl.-Ing. Dr.mont. Walter **TESCH**²

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann **HOFBAUER**¹



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



¹ Technische Universität Wien
Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik
Und Technische Biowissenschaften
www.vt.tuwien.ac.at

² TECON Engineering GmbH
www.tecon.at

Mit wertschätzendem Dank für die Mitarbeit bei den vorangegangenen Zwischenberichten an Roland DIEM, Klaus JÖRG, Herbert PASTEINER, Martin HAMMERSCHMID, Michael FUCHS und Christoph PFEIFER.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Schwerpunkte des Projektes	4
1.3	Einordnung in das Programm	4
1.4	Verwendete Methodik & Aufbau der Arbeit	4
2	Inhaltliche Darstellung	6
3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	8
3.1	AP1: Planung & Konstruktion der Vergaseranlage als Gesamtsystem	8
3.2	AP2: Bau 100 kW „Next Generation Gasifier“	13
3.3	AP3: Heißversuche & Inbetriebnahme 100 kW Vergaser	18
3.4	AP4: Begleitende Modellierung und Simulation	25
4	Erkenntnisse aus dem Projekt	27
4.1	Zusammenfassende Ergebnisse und Schlussfolgerungen zu den Arbeitspaketen	27
4.2	Im Rahmen des Projektes G-volution II entstandene Publikationen	28
4.3	Im Rahmen des Projektes G-volution II veröffentlichte Patente	30
5	Ausblick und Empfehlungen	31
5.1	Mögliche Anwendungen und Zielgruppen	31
5.2	Verwendung der Ergebnisse und weitere Vorgehensweise	31
6	Literaturverzeichnis	32

1 Einleitung

Für die zukünftige Energiebereitstellung erscheint die Nutzung biogener, alternativer, billiger und gut verfügbarer Festbrennstoffe aussichtsreich. Die Nutzung dieser biogenen Festbrennstoffe verringert den Ausstoß von klimawirksamen Gasen und verringert die Abhängigkeit von Energieimporten. Die wesentliche Herausforderung dabei ist, Nutzungsbereiche für Biomasse abseits der reinen Wärmenutzung zu erschließen. Kostengünstige Festbrennstoffe, wie biogene Reststoffe, Reststofffraktionen aus der Industrie, Klärschlamm, oder anderer kommunaler Abfall sind jedoch oft inhomogen und unterscheiden sich stark durch ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften. Des Weiteren beinhalten derartige Brennstoffe in der Regel erhöhte Grobasche und Feinascheanteile, sowie unerwünschte Begleitstoffe. Die Nutzung oben genannter Brennstoffe setzt jedoch spezifische Anforderungen an das Design geeigneter Wirbelschichtsysteme voraus [1, 2].

Das Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der TU Wien ist seit den 90iger Jahren, unter der Federführung von Professor Hermann Hofbauer, maßgeblich an der Entwicklung der Dampfvergasung von Biomasse beteiligt [3]. Ziel ist es, ein stickstofffreies Produktgas (Synthesegas) zu erzeugen. Dazu sind zwei separate Reaktionszonen vorgesehen, in denen zwei Gasströme getrennt voneinander entstehen. In der mit Wasserdampf fluidisierten Vergasungszone entsteht das Produktgas. Nach entsprechenden Gasreinigungsschritten kann dieses stickstofffreie Produktgas als Synthesegas zur Herstellung von gasförmigen und flüssigen Treibstoffen verwendet werden [4, 5]. Die Verbrennungszone stellt die für die Vergasung benötigte Wärmeenergie zur Verfügung, die über umlaufendes Bettmaterial transportiert wird.

1.1 Aufgabenstellung

Durch die gestiegene Nachfrage aus der Industrie nach Erdgasersatztechnologien, sowie nach einer Erweiterung des Brennstoffspektrums in Bezug auf Korngrößenverteilung und Zusammensetzung (Klärschlamm, Hausmüll, Sägespäne, Rinde, Abfallholz, etc.) rückt aktuell das eigentliche Herzstück der Technologie, der Gaserzeuger, wieder ins Zentrum des Interesses. Großtechnisch ausgeführte Anlagen wie in Güssing [6] oder Oberwart [7] beweisen, dass das Anlagenkonzept mit hochwertigen Festbrennstoffen wie Holzhackschnitzel einwandfrei funktioniert. Ziel des vorgestellten Projektes ist jedoch, das Zweibett-Wirbelschicht-Gaserzeugerdesign grundlegend hinsichtlich Brennstoffflexibilität und Wirtschaftlichkeit zu verbessern. Der Gaserzeuger, im klassischen System als stationäre Wirbelschicht ausgeführt, soll durch einen schnell fluidisierten Apparat ersetzt werden. Dabei wird der für die katalytischen Teerabbaureaktionen notwendige „Gas-Feststoffkontakt“ entscheidend gesteigert. Die konkrete Zielsetzung ist es deshalb, ein neu entwickeltes Analgensystem zu planen, detailliert zu konstruieren und als Laboranlage aufzubauen, damit diese in Zukunft für die Forschungsarbeit zur Vergasung von alternativen Brennstoffen bereit steht. Die Simulation von Anlagenbetriebsweisen anhand geeigneter Modelle werden diese Arbeiten unterstützen. Wie bereits mehrfach bewährt, sollen die Ergebnisse aus der Entwicklung von Simulationsmodellen auch Aussagen für Anlagen im industriellen Maßstab ermöglichen [8]. Im Rahmen von G-volution II soll also eine neue Laboranlage am Institut für Verfahrenstechnik der TU Wien entwickelt, geplant, konstruiert und gebaut werden. Mit dem anschließenden Versuchsbetrieb der Anlage werden folgende Verbesserungen in Bezug auf den Vergasungsprozess von schwierigen/alternativen Brennstoffen angestrebt:

- Einsetzbarkeit einer breiten Brennstoffpalette (weit über Hackgut hinaus).
- Geringerer Teergehalt im Produktgas trotz schwieriger Brennstoffe.
- Erhöhung des Kohlenstoffumsatzes im Vergasungssystem.
- Erhöhung der „Gesamt-Effizienz“ durch niedrigeren Dampfbedarf.
- Erstellung eines geeigneten Simulationsmodells mittels Softwaretool IPSE-Pro
- Ermöglichung des Scale-up zu großen Anlagenleistungen, wie sie für Syntheseanwendungen erforderlich sind.

1.2 Schwerpunkte des Projektes

Die Schwerpunkte des Projektes können wie folgt zusammengefasst werden. Im Rahmen des Projektes werden der Bau und die Inbetriebnahme einer 100 kW Versuchsanlage angestrebt. Das Projekt soll somit die Umsetzung der nächsten Generation der Zweibettwirbelschichtvergasung als Versuchsanlage ermöglichen. Die angestrebten Entwicklungsziele lagen dabei in der Verbesserung der Brennstoffflexibilität des eingesetzten Systems sowie in der Verbesserung des Prozessverständnisses durch den Einsatz umfangreicher Messtechnik. Als Ergebnis des Projektes wird die realisierte Versuchsanlage in Zukunft umfangreiche Versuchskampagnen mit unterschiedlichen Brennstoffen ermöglichen.

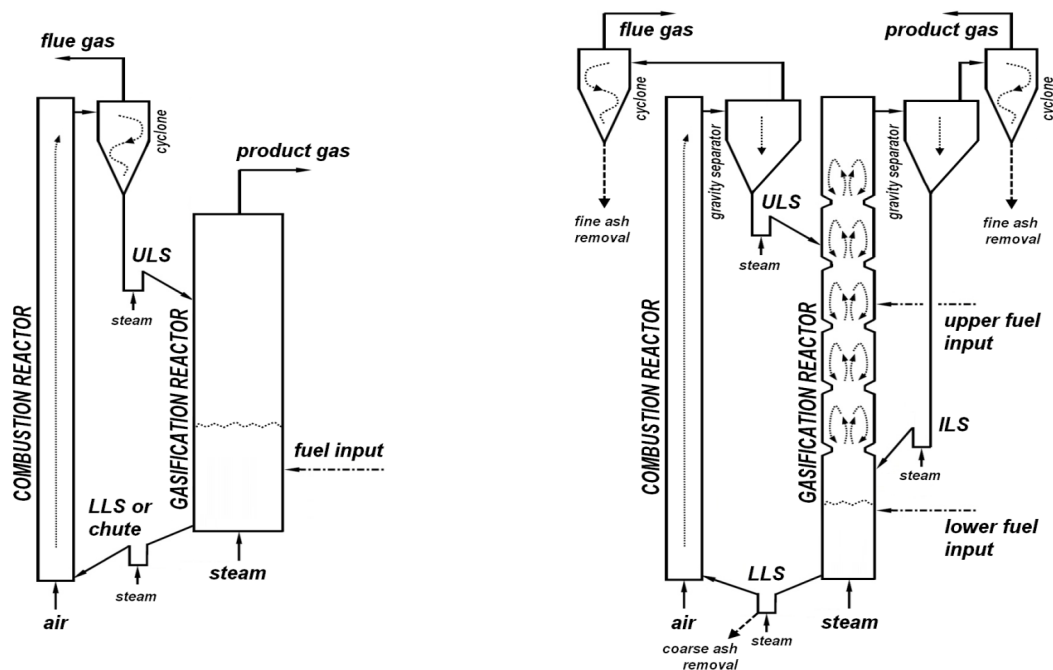
1.3 Einordnung in das Programm

G-volution II ist dem Themenfeld „Bioenergie und fortgeschrittene Umwandlungstechnologien“ zugeordnet. Das vorliegende Projekt leistet mit den folgend dargestellten Ergebnissen einen wertvollen Beitrag zu Programmzielen der 3. Ausschreibung von NEUE ENERGIEN 2020:

- Erhöhung des Anteils an erneuerbarer Energie,
- Verbesserung der Wirkungsweise und Effizienz der eingesetzten Umwandlungstechnologie,
- sowie Nutzung lokal anfallender Rohstoffe,
- Erhöhung der Versorgungssicherheit.

1.4 Verwendete Methodik & Aufbau der Arbeit

Gerade wenn es darum geht alternative und schwierige Brennstoffe einer thermischen Nutzung oder Umwandlung zuzuführen, werden bevorzugt Wirbelschichten eingesetzt. Basierend auf Vergasungs-Untersuchungen mit Vorgängergenerationen von Wirbelschichtanlagen innerhalb des Projektes, Kaltmodelluntersuchungen zur Fluidodynamik und Versuchsdaten und Ergebnisse des Vorgängerprojektes G-volution (821954) wurde die nächste Generation der Vergasungstechnologie konzipiert [9]. Auch Daten von bestehenden Großanlagen wurden genutzt. Motivation war die umfangreiche Verbesserung des Reaktordesigns und des Gesamtanlagenkonzeptes.



LLS = lower loop seal, ULS = upper loop seal, ILS = internal loop seal

Abbildung 1: Klassisches (links) und neuentwickeltes Reaktorkonzept (rechts) [10]

Hauptaugenmerk wurde hierbei auf die Anlagengeometrie, wie auch auf die Downstream-Anlagenteile gelegt. Basierend auf einem „alten/klassischen“ Vergaserdesign mit stationärer Wirbelschicht wird bei der neuen Konstruktion auf eine transportierende/turbulente Wirbelschicht im Vergaser umgestellt. In **Abbildung 1** sind die wesentlichen Unterschiede des Reaktorkonzeptes ersichtlich. Für hohe Umwandlungsraten sind ein guter Kontakt zwischen dem heißen Bettmaterial und dem Brennstoff und lange Brennstoffverweilzeiten im Vergasungsreaktor nötig. Um eine hohe Produktgasqualität gewährleisten zu können, sollen die entstehenden Gase aus dem Brennstoff zudem möglichst lange mit dem katalytisch wirksamen Bettmaterial in Interaktion bleiben. Die turbulente Durchmischung von Brennstoffpartikel, der Gasphase und der heißen Bettmaterialpartikel im Vergasungsreaktor stehen deshalb im Fokus des neuen Konzeptes. Ein möglichst intensiver Gas-Feststoff-Kontakt ist anzustreben. [10]

Die Methodik für die Technologieentwicklung beschreibt den Weg von der Idee zur Demonstration im Technikumsmaßstab. Vorstudien beleuchteten das Potenzial und untersuchten die technische Machbarkeit, was zu einem ersten Designvorschlag führte [9]. Ausgehend davon folgt der nächste logische Schritt, die Umsetzung. Hierzu sind vier Arbeitspakete (AP) vorgesehen:

- AP1** Konstruktion 100kW Next Generation Gasifier und Kaltmodellversuche
- AP2** Bau 100kW Next Generation Gasifier
- AP3** Inbetriebnahme 100kW Next Generation Gasifier und Heißversuche
- AP4** Begleitende Modellierung und Simulation

Der Projektablauf ist als Gantt-Plan in **Abbildung 2** skizziert:

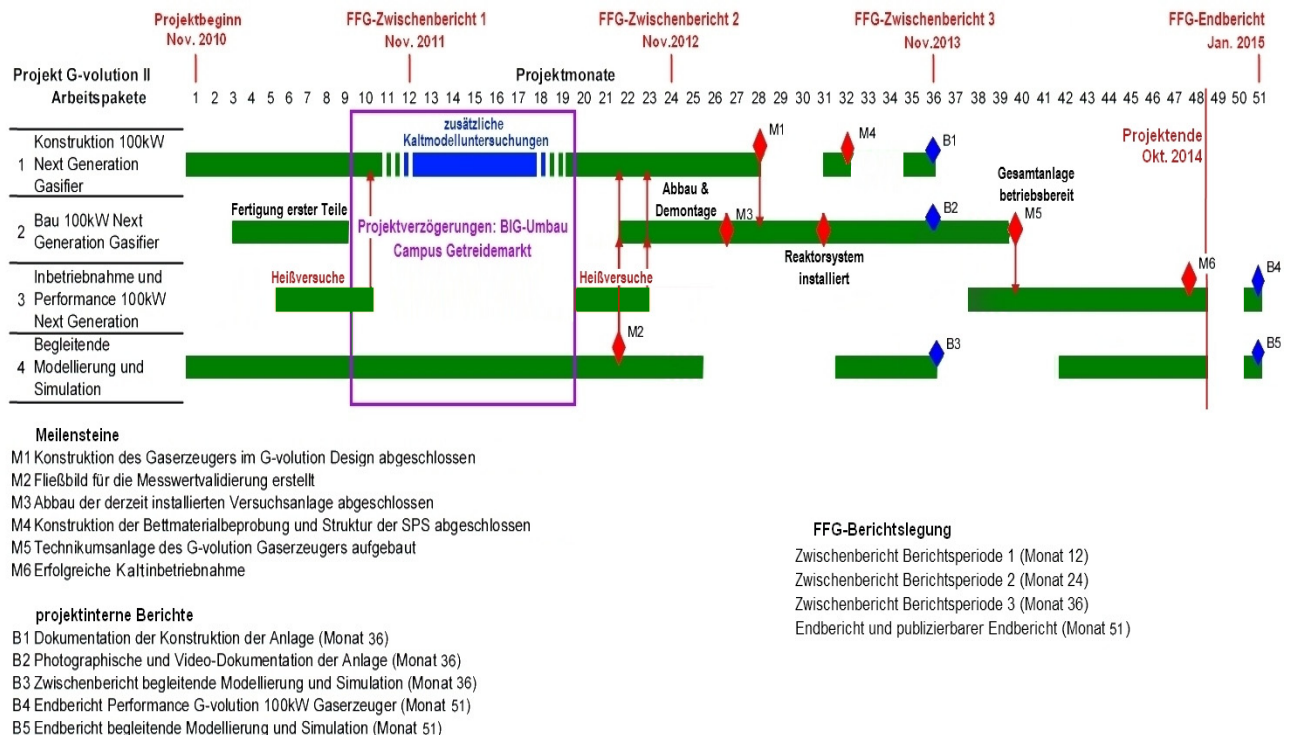


Abbildung 2: Projektablaufplan

2 Inhaltliche Darstellung

Im Vorprojekt (FFG-Projekt G-volution - Biomasse Dampfergaser der zweiten Generation, FFG-Projektnummer: 821954) wurden Studien zu Teerabbaumechanismen im turbulenten bis schnellen Wirbelschichtregime mit unterschiedlichen Bettmaterialien durchgeführt. Die Ergebnisse liefern Eingangsparameter für das Design der 100 kW Technikumsanlage nach dem G-volution Design. Des Weiteren wurden im Vorprojekt umfassende Untersuchungen an bestehenden Kaltmodellen durchgeführt. Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigten die grundsätzliche Funktionalität der Anordnung. Auf dieser Basis wurde ein Designvorschlag für ein fluiddynamisches Modell (Kaltmodell) der zukünftigen Technikumsanlage erstellt. Die spezielle Dimensionierung des Kaltmodells nach anerkannten Kriterien ermöglicht außerdem quantitative Schlüsse auf das fluiddynamische Verhalten der Heißanlage und erlaubt die Optimierung der Systemgeometrie, bevor der Bau der Heißanlage beauftragt wird. Die Heißanlage wird aufbauend auf den Erfahrungen im Bereich Technikumsanlagen, die in der Arbeitsgruppe gesammelt wurden dimensioniert und ausgeführt. Dabei werden sowohl prozesstechnische als auch sicherheitstechnische Aspekte beachtet. Die Anlage wird mit Hilfe eines computergestützten Prozessleitsystems angesteuert, das auch die Dokumentation der Messdaten übernimmt und im Notfall automatisierte Abschaltvorgänge auslösen kann. Das Projekt wird durch eine begleitende Modellierung und Simulation unterstützt. Auch hier handelt es sich um bewährte Methoden. Einerseits werden die Versuchsanlagen im Simulationsprogramm abgebildet und die Massen- und Energiebilanzen auf Basis von Messwerten geschlossen. Dies erlaubt eine vollständige Bestimmung aller Größen und sorgt für eine solide Datenbasis zur Interpretation von Experimente. Die Heißversuch-Experimente (Parametervariationen) im Projektzeitraum mit der Vorgängergeneration der neu zu errichteten Vergasungsanlage ergeben wichtige Informationen. Es können somit Modelle für die prädikativen Berechnungen erarbeitet werden, die einen unverzichtbaren Input für die korrekte Auslegung und Planung liefern. Zusätzlich können in der Inbetriebnahmephase zur neuen Anlage Kaltversuche (Parametervariationen) die Eignung des neuen Systems für die gewünschte Betriebsweise belegen. In Zukunft werden mit Hilfe der Technikumsanlage ermittelten Performancedaten Gesamtkonzepte im industriellen Maßstab entworfen und evaluiert werden. Die wirtschaftliche Verwertbarkeit der Projektergebnisse wird eruiert, ebenso werden geeignete Maßnahmen wie Schutz von Erfindungen oder Etablierung einer Marke gesetzt.

Das **Arbeitspaket AP1** beinhaltet die Konzeption, das Basic und Detailengineering der Gesamtanlage und die detaillierte Konstruktion des Gaserzeugers (Reaktoren als Herzstück). Die Mess-, Steuer-, und Regeltechnik wird geplant und die Struktur der SPS wird festgelegt. Die durch Untersuchungen am Kaltmodell gewonnenen fluiddynamischen Erkenntnisse, wie auch Erfahrungen basierend auf Versuchen am alten Vergaser und an konventionellen Anlagen in Güssing und Oberwart sollen in die Konzipierung der Versuchsanlage mit einfließen. Gleiches gilt für die Konstruktion der Bettmaterialprobennahme und des Messstellenaufbaus für Temperatur und Druck.

In **Arbeitspaket AP2** liegen die Ziele im Abbau der alten Versuchsanlage und im Aufbau des neuen Vergasers samt umfangreicher vor- und nachgeschalteter Anlagenkomponenten, MSR Technik, SPS Implementierung, fix installierter Gaswarngeräten usw... Zu achten ist auf die korrekte Ausführung und Beschriftung der Medienversorgung innerhalb des Labors. Sicherheitstechnische Vorgaben und Arbeitsrichtlinien während der Montage im Labor müssen beachtet werden.

In **Arbeitspaket AP3** wird die neue Anlage in Betrieb genommen. Dichtheitstests und Druckproben einzelner Anlagenabschnitte, Überprüfung der einzelnen Anlagenteile, Aufheiztests zu den Heizungen, Prüfung der Programmierung/Funktionalität der SPS, Prüfung von großen Apparaten und neu entwickelter Komponenten, sowie die Nachbesserungsarbeiten dazu sind Teil der Inbetriebnahmephase. Zum Abschluss werden Inbetriebnahme-Kaltversuche durchgeführt, um das nötige Betriebskennfeld zu ermitteln. Dazu müssen die eingehenden Fluidisierungsvolumenströme in den beiden Reaktoren variiert werden. Für den korrekten Betrieb (sowie der

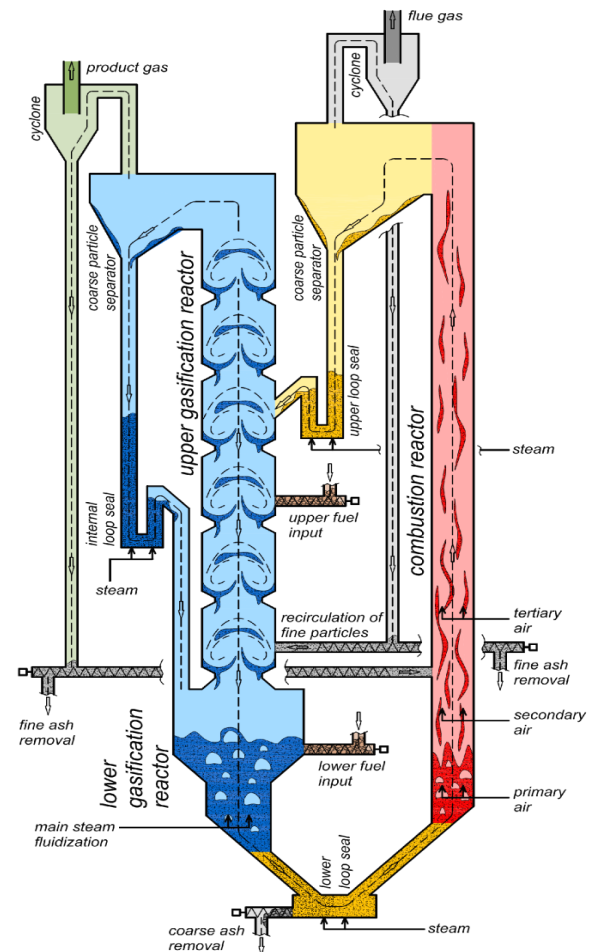
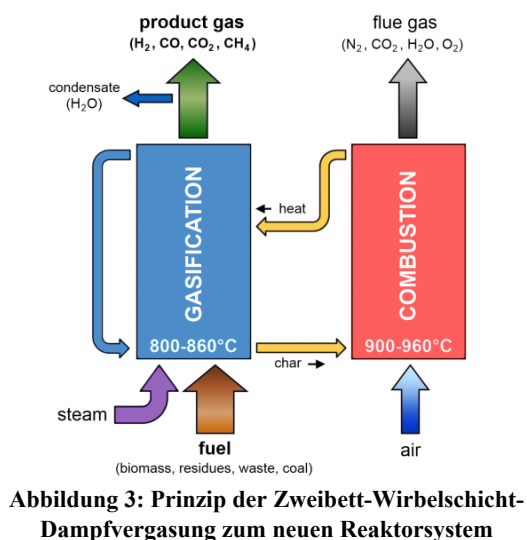
kritischen Planung laut AP1) der neuen Anlage, sind vorab umfangreiche Heißversuche notwendig. Parametervariationen von Dampf-Brennstoffverhältnis, Bettmaterialien, Brennstoffen usw. ergeben unterschiedliche Gaszusammensetzungen, Teerwerte, Anlagenwirkungsgrade, sowie fluiddynamische Gegebenheiten. Diese Variationen mit der klassischen (alten) Versuchsanlage ergeben einen wichtigen Input für die Planung, den Bau und die Inbetriebnahme phase.

In **Arbeitspaket AP4** wird die begleitende Simulation und Modellierung durchgeführt. Diese dient einerseits zur Erstellen einer Massen- und Energiebilanz der neuen Anlage zur Auslegung der Geometrien, aber auch zur Validierung der entstandenen und zukünftigen Versuchsergebnisse. Dieses erarbeitete Simulationsmodell wird zudem die Möglichkeit besitzen, die neuartige Technologie in den industriellen Maßstab umzulegen. Großanlagen-technische Konzepte und Massen- & Energiebilanzen dazu werden dadurch möglich.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

3.1 AP1: Planung & Konstruktion der Vergaseranlage als Gesamtsystem

Nach einer Konzeptphase wurde das Basic-Engineering durchgeführt. Dabei konnten die zusätzlichen Ergebnisse aus aktuellen Heißversuchen [10] und Kaltversuchen [11, 12] in der Planung noch berücksichtigt werden. Im Basic Engineering wurden auch die bestehende Stahlkonstruktion des Technikumlabs aufgemessen und Aufstellungspläne gezeichnet, um den zu Verfügung stehenden Platz optimal zu nützen [13]. Darauf folgte das Detail-Engineering. Im Zuge der voranschreitenden Planung galt es die beschränkten Platzverhältnisse im Labor und die Fluchtwegsituation zu berücksichtigen und zudem hohe Sicherheitsstandards zu erfüllen [12]. Parallel zum Reaktorsystem wurden die Stahlbau-Ausführungspläne erstellt. Für die Zusammenstellung inklusive Kollisionsabfrage der Bauteile und die Abschätzung zum Platzbedarf wurden auch 3D-Pläne erstellt. Zum einen wurde von der alten Anlage ein bestehender Brennstoffbunker wiederverwendet, zum anderen wurde ein zweiter Bunker geplant. Damit können Mischungen verschiedener Brennstoffarten variabel erzeugen werden. Die detaillierten Konstruktionspläne der Reaktoren konnten mit Erreichen des Meilensteines M1 fertiggestellt werden. Mitte 2013 war das Herzstück der Anlage, das Vergasungs-Reaktorensystem, innerhalb des Stahlbaus fertig montiert. Zeitgleich wurde der Bedarf an elektrischen Komponenten für die Mess- und Steuerungstechnik der Laboranlage erhoben [12, 14]. Die Planung der gesamten Laboranlage, samt MSR-Technik und der SPS-Systematik, konnte mit Erreichen des Meilensteines M4 abgeschlossen werden. In **Abbildung 3** ist das Grundprinzip des Vergasungsprozesses der neuen Versuchsanlage dargestellt. **Abbildung 4** zeigt alle wichtigen Einzelkomponenten des Reaktorkonzeptes.



Im Zuge der Planungen wurde ein detailliertes Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild (R&I) erstellt. Dieses Fließbild stellt alle einzelnen Komponenten (inklusive wichtigen Detailinformationen) schematisch dar und ist die wichtigste Planungsunterlage, auch in Bezug auf eine übersichtliche Darstellung der Gesamtanlage. Alle erstellten Pläne dienen unter anderem als Grundlage für die Erstellung der Beschaffungsunterlagen, damit die notwendigen Anlagenkomponenten rechtzeitig für den Bau der Laboranlage (AP2) bereitgestellt werden konnten.

Das R&I unterliegt der Geheimhaltung. Mit **Abbildung 5** kann jedoch ein grobes Grundfließbild gezeigt werden, das einen guten Überblick über die Gesamtanlage gibt. Die wesentlichen Baugruppen sind:

- Die Brennstoffbeschickung (braun)
- Das eigentliche Reaktorsystem (grau)
- Gaskühlung, Gasreinigung, und Gasverwertung (blau)
- Sicherheitstechnik, Medienversorgung, Leitwarte und MSR-Technik (grün)

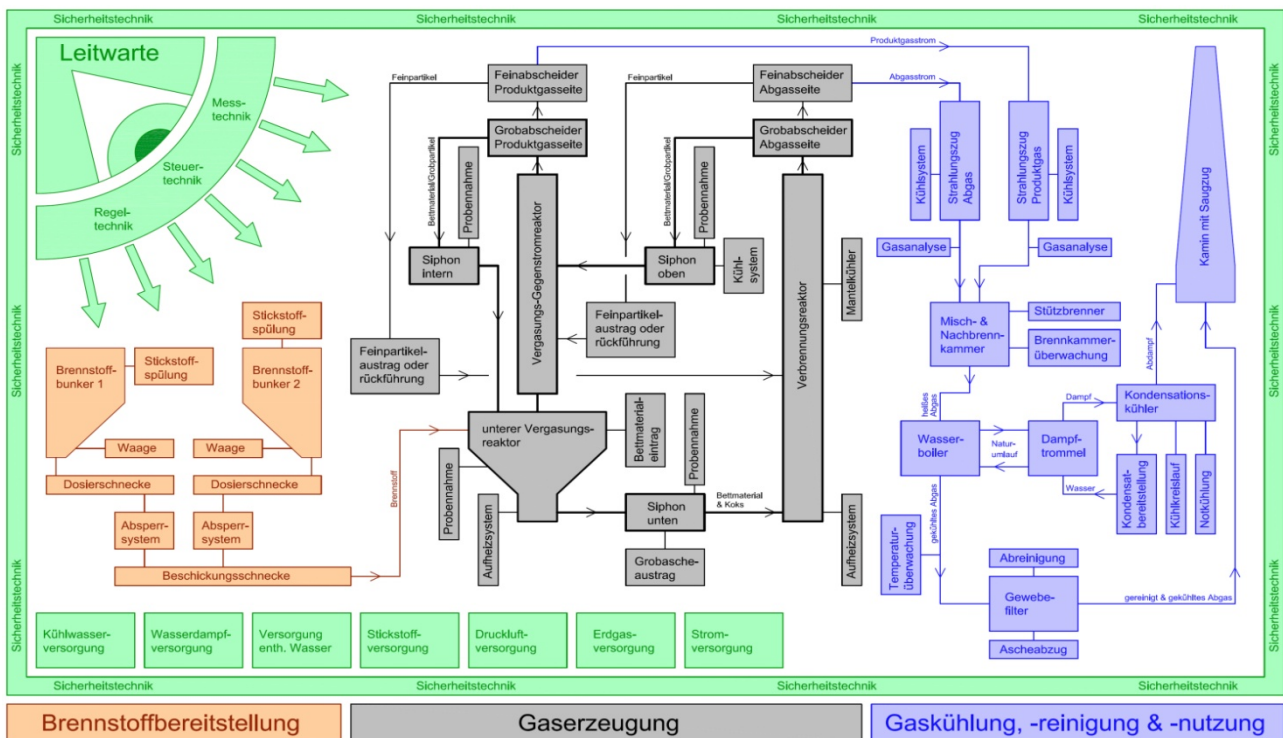


Abbildung 5: Grundfließbild der Gesamtanlage zur neuen Versuchsanlage [10]

Für die Gasentnahme, die zur Gasanalytik führt, wurden Gasentnahmestellen für die Produktgasstrecke und die Abgasstrecke vorgesehen. **Abbildung 6** zeigt ein grobes Schema zur Gasanalytik und dem Datentransfer über die SPS und LAN zum File-Server. Die Bettmaterialprobennahme konnte durch Erfahrungen aus dem Versuchsbetrieb von Vorprojekten und anderen Arbeitsgruppen wie in **Abbildung 7** dargestellt konstruiert und gefertigt werden. Es wird somit die Möglichkeit geschaffen, aus den Siphonen im laufenden Betrieb unter inerten Bedingungen repräsentative Bettmaterialproben zu entnehmen. Als weitere Ergebnisse des Projekts sind das Mess-, Steuerungs- und Regelungskonzept [14], sowie die dazugehörigen Elektroschaltpläne und ein Sicherheitsbetrachtung/FMEA angeführt [12]. Das zur Verwendung kommende SPS System in **Abbildung 8** ermöglicht den Betrieb der Anlage unabhängig von den Computern in der Leitwarte und garantiert somit sicherheitstechnisch den höchsten Standard.

In **Abbildung 9 bis 11** werden die Übersicht und Bilder zum Kaltmodell gezeigt, das für die zusätzlich durchgeführten fluiddynamischen Untersuchungen verwendet wurde. Die Ergebnisse aus den Messungen mit diesem Kaltmodell sind in **Abbildung 12** für zwei verschiedene Bettmaterialpartikelgrößen dargestellt. Die Ergebnisse waren eine wichtige Grundlage für die Detailauslegung des Vergasungsreaktors für die neue 100kW Versuchsanlage [10 – 12].

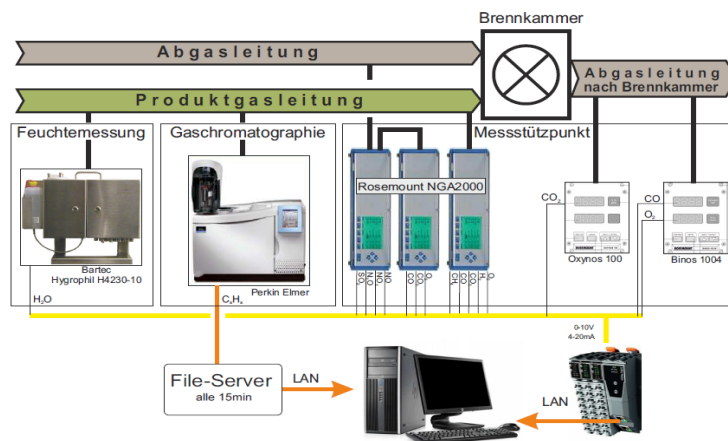


Abbildung 6: Schema zur Gasanalytik und Datentransfer zum File-Server [14]

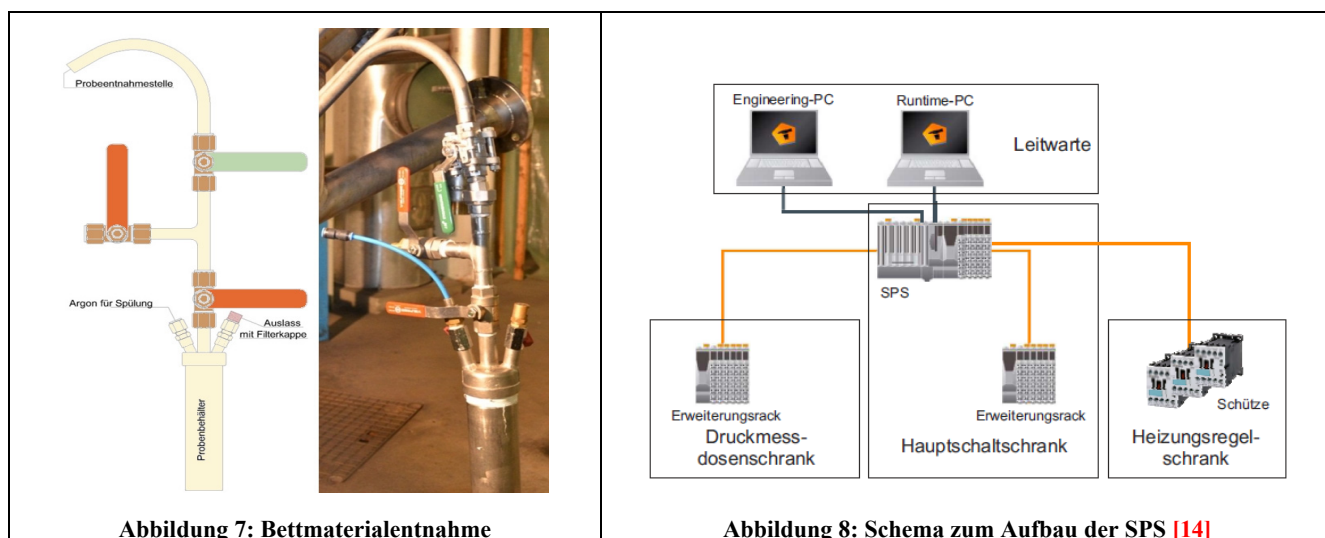


Abbildung 7: Bettmaterialentnahme

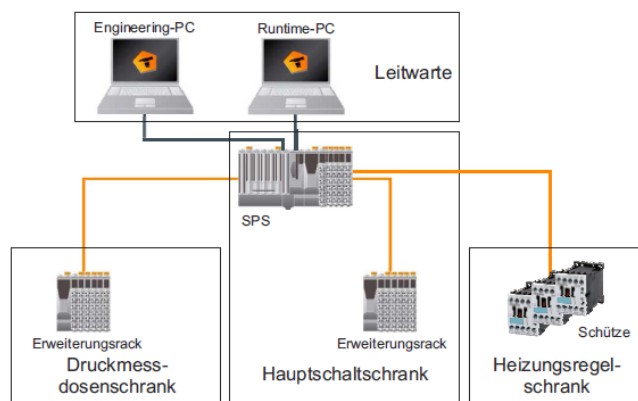


Abbildung 8: Schema zum Aufbau der SPS [14]

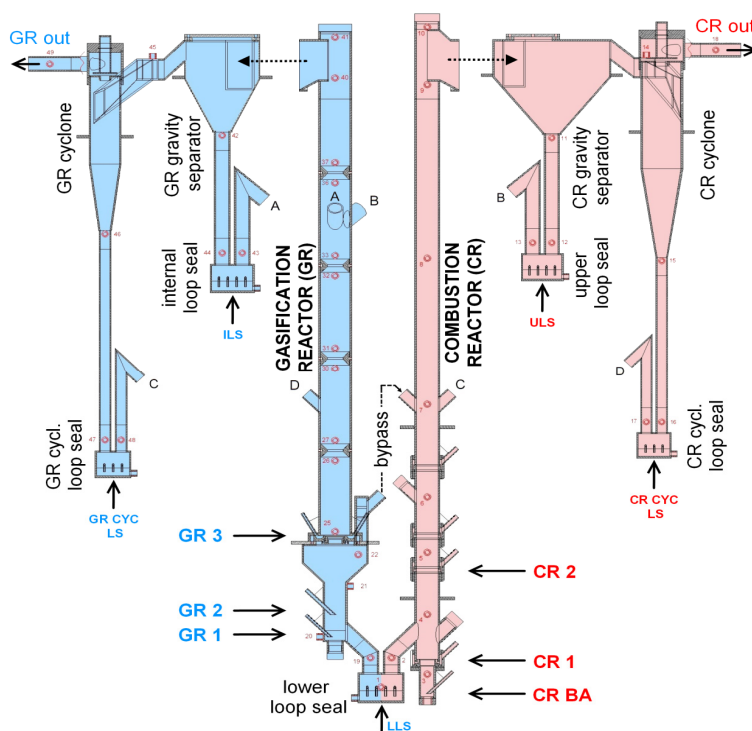


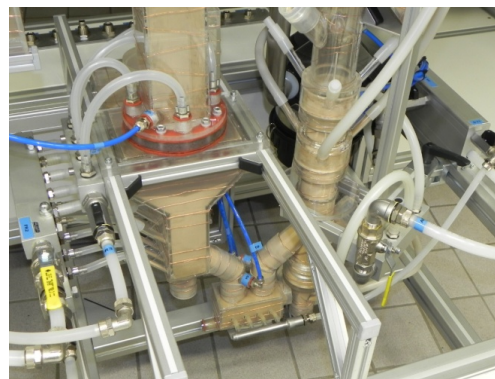
Abbildung 9: Darstellung der Reaktorkomponenten des G-volution Kaltmodells [10]



Oberer Teil des neuen Kaltmodells mit
Schwerkraftabscheider und Zyklone



Steuereinheit zu den
Fluidisierungs-Volumenströmen



Unterer Teil des Kaltmodells
mit Siphon unten

Abbildung 10: Bilder zum G-volution Kaltmodell



Abbildung 11: Bild des Druckmesskoffers (einer von zwei Racks) samt Elektronik

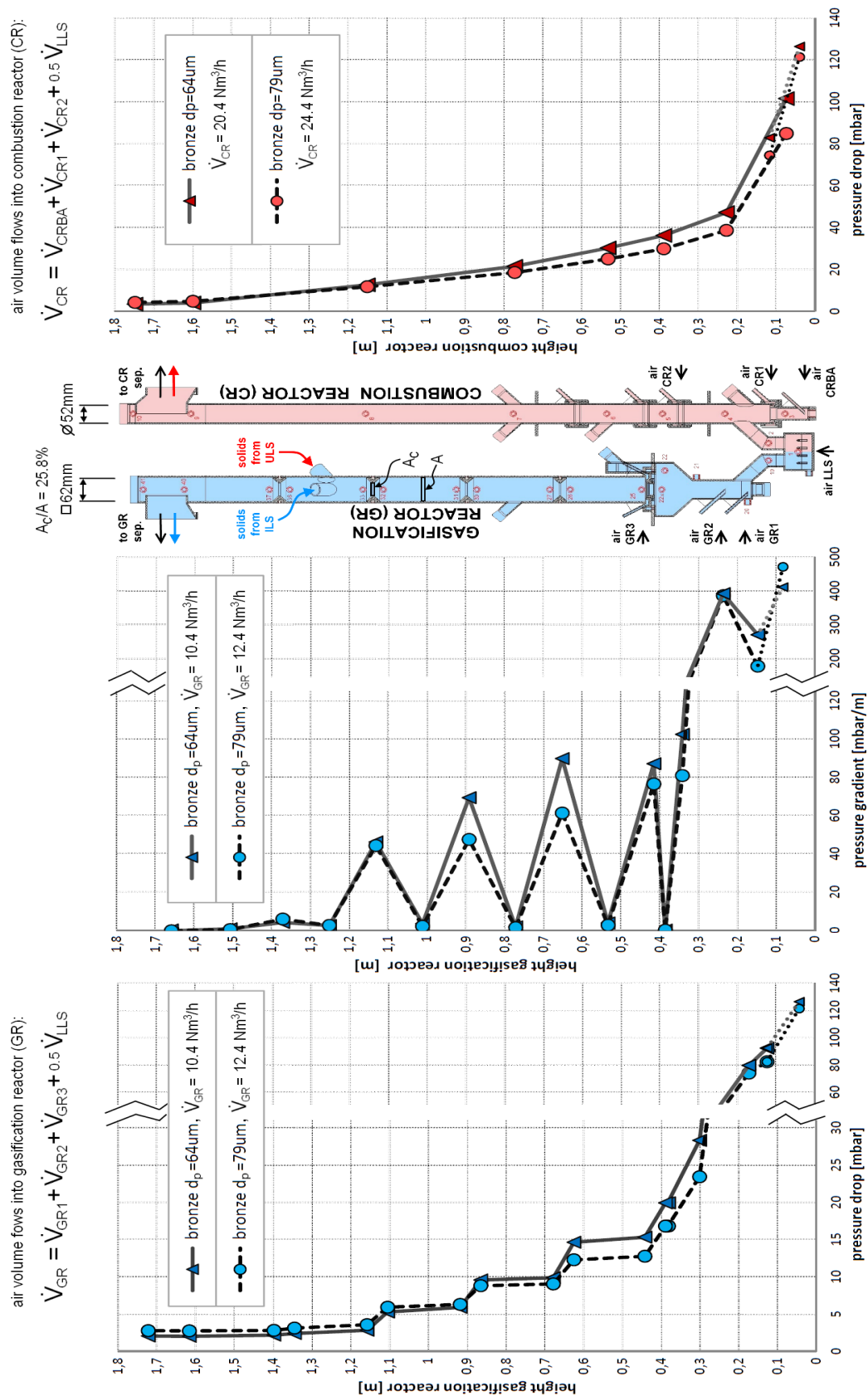
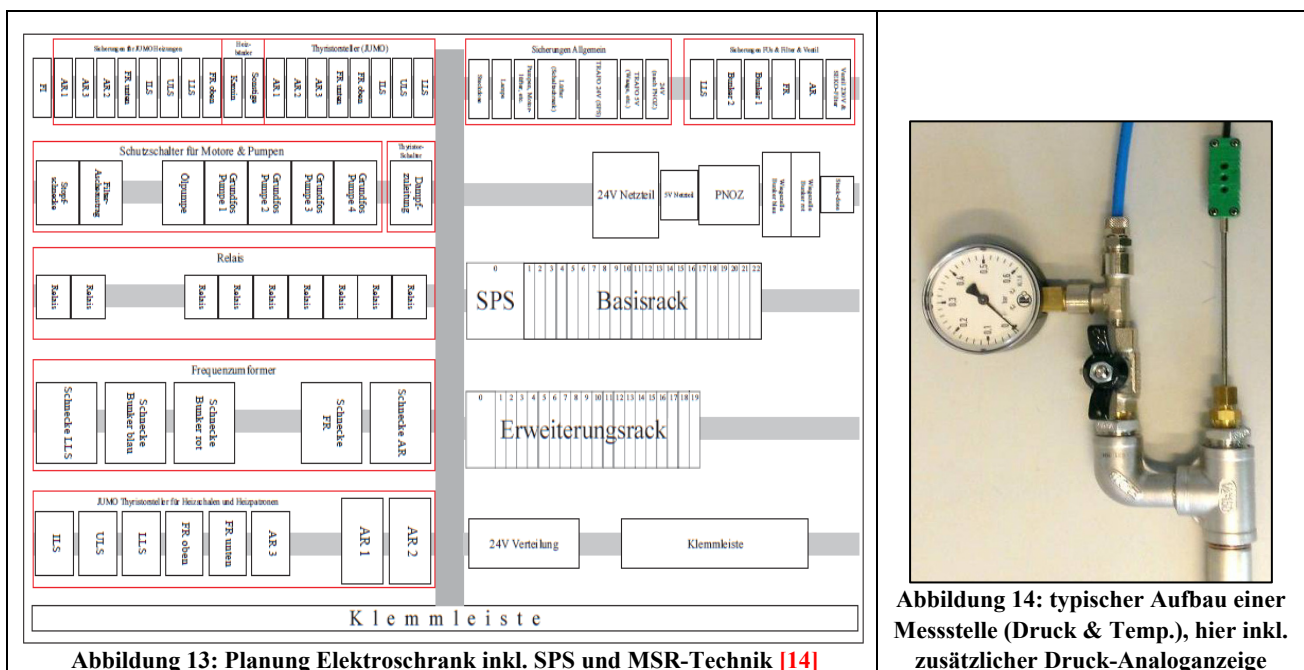


Abbildung 12: Profil des Druckverlaufs und des Druckgradientens des G-volution Kaltmodells [10]

3.2 AP2: Bau 100 kW „Next Generation Gasifier“

Vor Baubeginn mussten die Beschaffung wesentlicher Anlagenkomponenten sowie notwendiger Materialien eingeleitet werden. Die Beschaffungsaktivitäten mussten des Weiteren zeitgleich mit dem Bau weitergeführt werden. Der Abbau der alten Anlage wurde Anfang 2013 mit Meilenstein M3 abgeschlossen. Anlagenteile, welche für die neue Anlage wiederverwendet wurden, wurden gereinigt und eingelagert. Während des Abbaus der alten Vergaseranlage konnten parallel Formrohre und Stahlteile für den Stahlbau zugeschnitten werden. Nach dem Abschluss des Abbaus der alten Anlage wurde unverzüglich mit dem Aufbau, insbesondere mit dem Stahlbau begonnen. Der montierte und verschweißte Stahlbau, als Tragwerkskonstruktion, wurde detailliert dokumentiert [13]. Somit konnte bis Mitte 2013 die Fertigung und Montage des Reaktorsystems und aller großen Apparatebauteile abgeschlossen werden. Danach konzentrierten sich die Montagearbeiten auf die Elektro- und MSR-Technik inkl. SPS, sowie dem restlichen Rohrleitungsbau samt Armaturen. Der Aufbau des Elektroschranks wurde genau geplant (**Abbildung 13**) und parallel mit dem Druckmessdosenschrank, wie in **Abbildung 15** gezeigt, ausgeführt. **Abbildung 14** zeigt die Ausführung der kombinierten Druck- und Temperaturmessung. Bei über 70 solcher Messstellen werden mit diesem System die Anzahl der nötigen und aufwändigen Einschweißungen in das Wirbelschichtsystem minimiert. Mit M5 konnte der Aufbau der Gesamtanlage abgeschlossen werden. Der Druck wird über größtenteils inert gespülte Druckmessleitungen zum Druckmessdosenschrank geführt, damit eine Verunreinigung der Druckmessdosensensoren und eine Kondensation in den Messleitungen ausgeschlossen werden kann. Um eine maximale Sicherheit zu gewährleisten, wurde die Steuerung der Anlage mittels SPS mit einer implementierten Notfallroutinen ausgestattet. Der Druckmessdosenschrank kann ohne großen Zeitaufwand um weitere 12 Druckmessungen erweitert werden. Am bestehenden Rack der SPS finden weitere Eingänge für Temperatursignale Platz (weitere Racks können zusätzlich angehängt werden). Die Endmontage der Messsensoren wurde mit März 2014 abgeschlossen. Wie bereits in AP1 dargestellt, wurde im Zuge der Anlagenplanung eine umfangreiche Messtechnik entlang der gesamten Anlage vorgesehen. Diese wurde im AP2 im Bereich des Vergasersystems, wie auch in Downstream-Anlagenteile und Kühlkreisläufen implementiert. In Summe wurden 105 Temperatur- und 70 Drucksensoren von der Brennstoffbeschickung bis zum Kamin realisiert. Um die Montage des Vergasersystems zu ermöglichen wurde ein Montagekran angebracht. Parallel dazu wurde ein zweiter Kran installiert um ein sicheres Brennstoffhandling zu realisieren. Berechnungen zum Festigkeitsnachweis des Kranstahlbaus wurden dokumentiert [13].



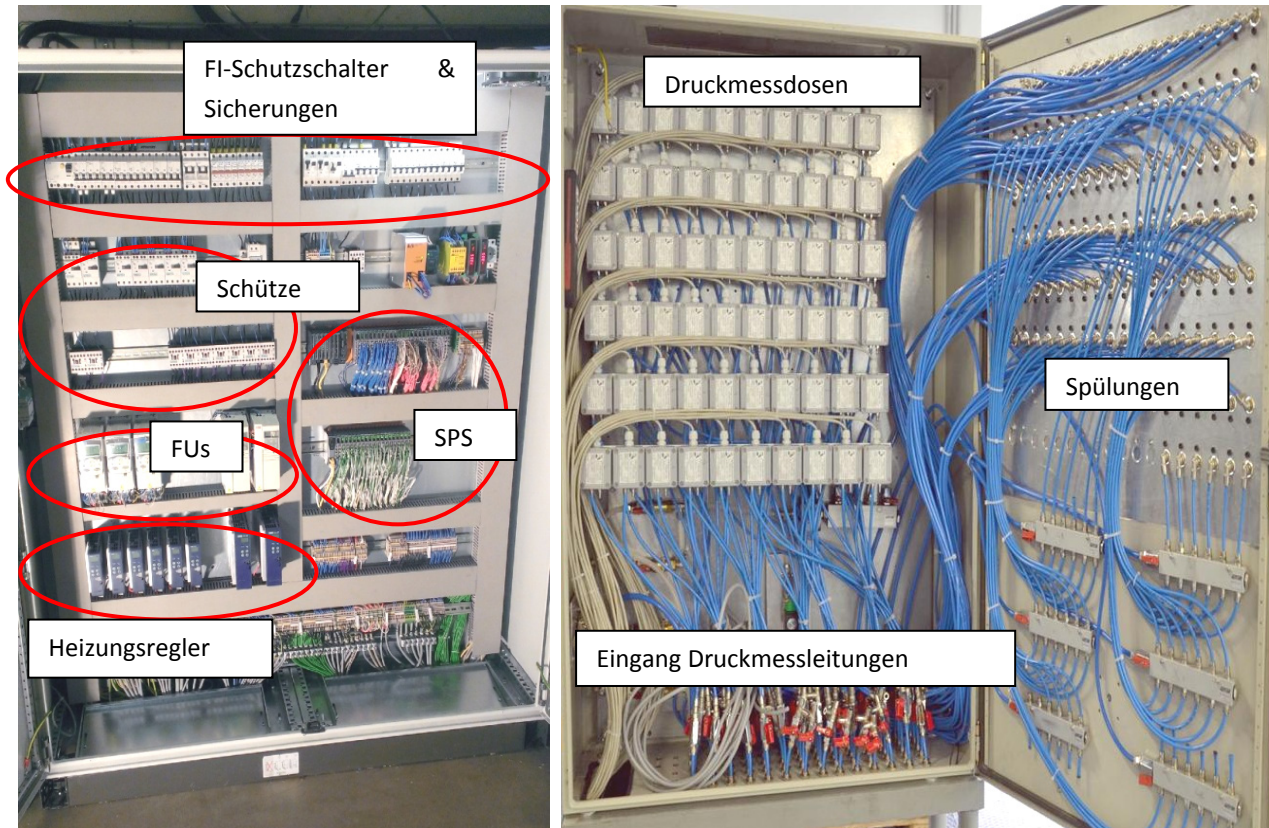


Abbildung 15: Elektroschrank (links) und Druckmessdosenschrank (rechts)

Nach der Fertigstellung des Stahlbaus erfolgte die Montage des Vergasersystems. Die einzelnen Komponenten wurden vorgefertigt und anschließend montiert. Großer Wert wurde bei der Planung auch auf das Sicherheitskonzept gelegt [12]. Dabei wurde das gesamte Technikum im Oktober 2014 mit fix installierten Gaswarnsensoren für die Detektion von O_2 , H_2 und HCl ausgerüstet (Abbildung 16). Ergänzend sind mobile Gaswarngeräte zur weiteren Erhöhung der Sicherheit zugekauft worden (Abbildung 17). Diese müssen bei Versuchen pro Stockwerk in der Nähe der Anlage stehen (Detektion: CO_2 , CH_4 , SO_2 , NH_3 , H_2S & CO). Die Gaswarneinrichtungen wurden nicht über das Projekt G-volution II finanziert. Die Kosten wurden als Investition in die Sicherheitstechnik direkt vom Institut getragen.



Abbildung 16: Fix installiertes Gaswarnsystem



Abbildung 17: Mobiles Gaswarngerät

Die **Abbildungen 18 bis 20** zeigen das finale Reaktorsystem inklusive Verrohrung und Messtechnik. Im Zuge des Stahlbaus und des Aufbaus des Reaktorsystems wurde parallel an der Fertigstellung des Kontrollraumes (der Leitwarte) gearbeitet. Dieser liefert eine leise und angenehme Arbeitsumgebung während der Versuchsdurchführung. Wie in AP1 angeführt wurden Gaszähler für alle relevanten Inputströme geplant und im AP2 bestellt und installiert. Alle relevanten Parameter können während eines Versuches innerhalb der Warte variiert werden und werden kontinuierlich abgespeichert und archiviert. **Abbildung 21** zeigt den Kontrollraum mit Prozessleitsystem und Gaszähler für Wasserdampf und Luft.

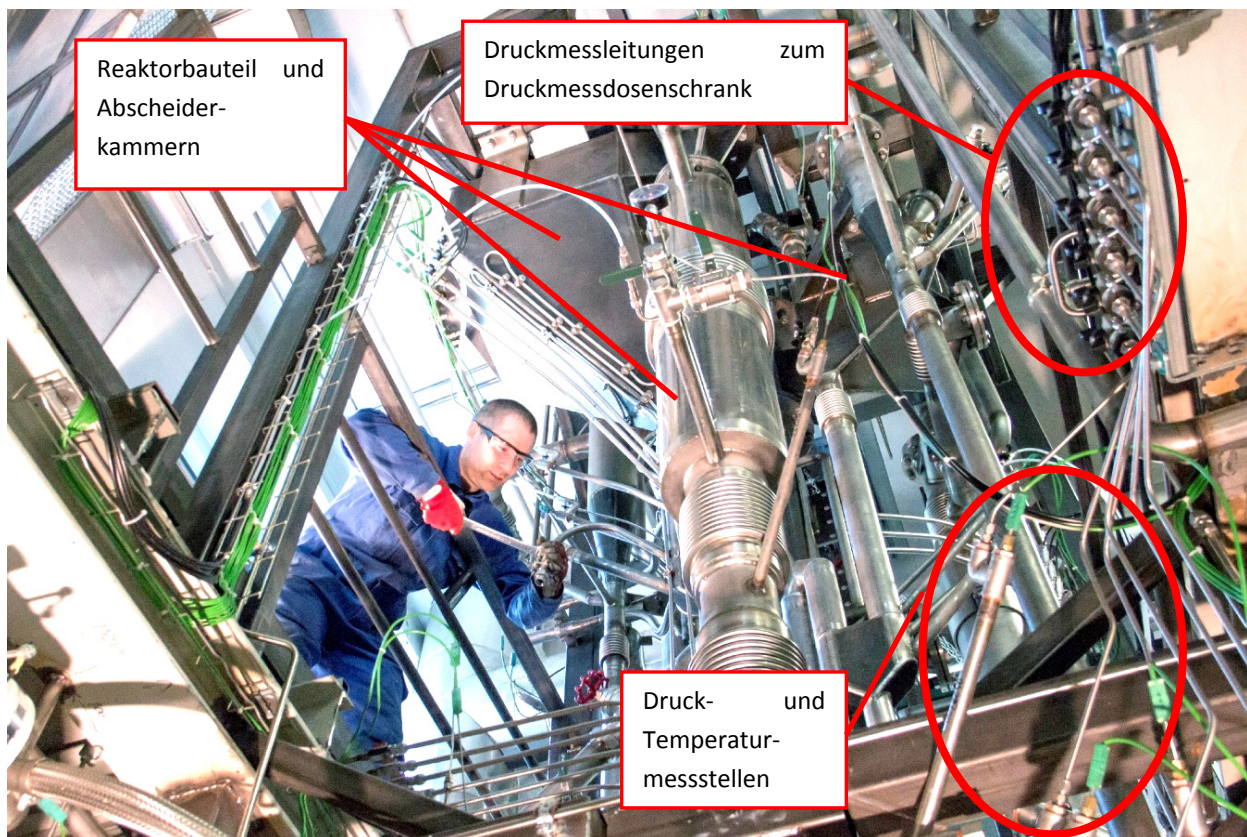


Abbildung 18: Vergasersystem mit implementierten Messsensoren

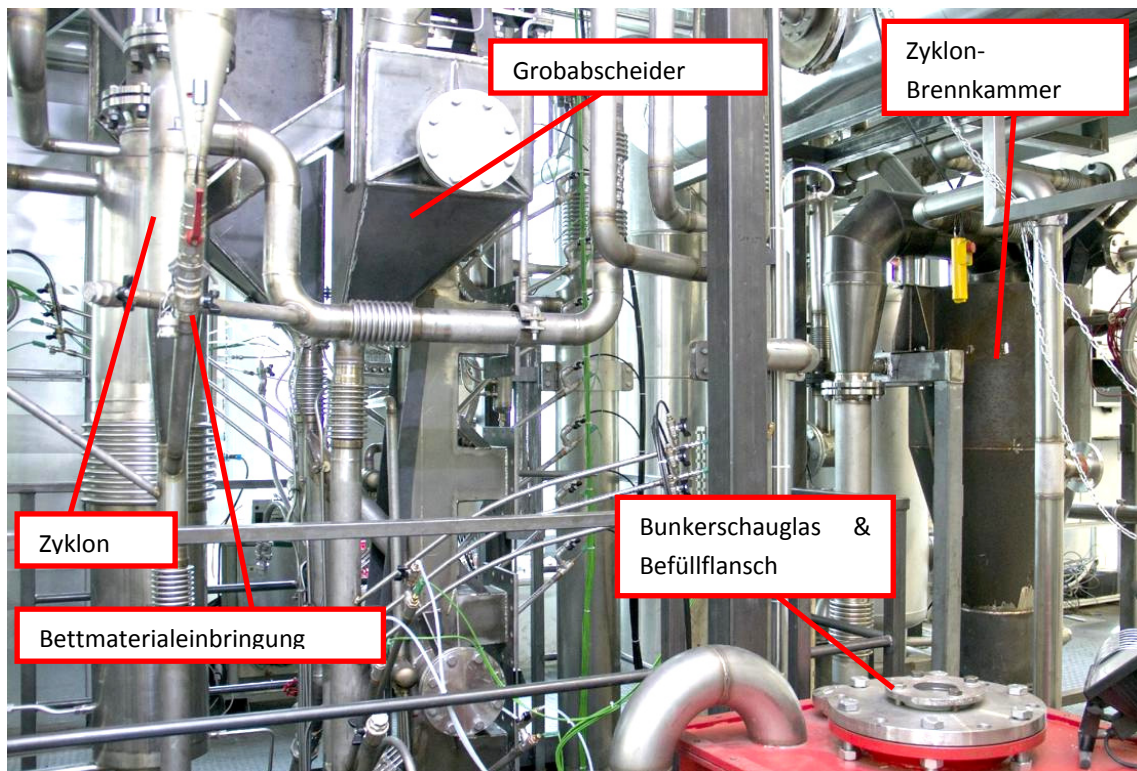


Abbildung 19: Obere Teil des Vergasersystems inkl. Brennstoffbunker

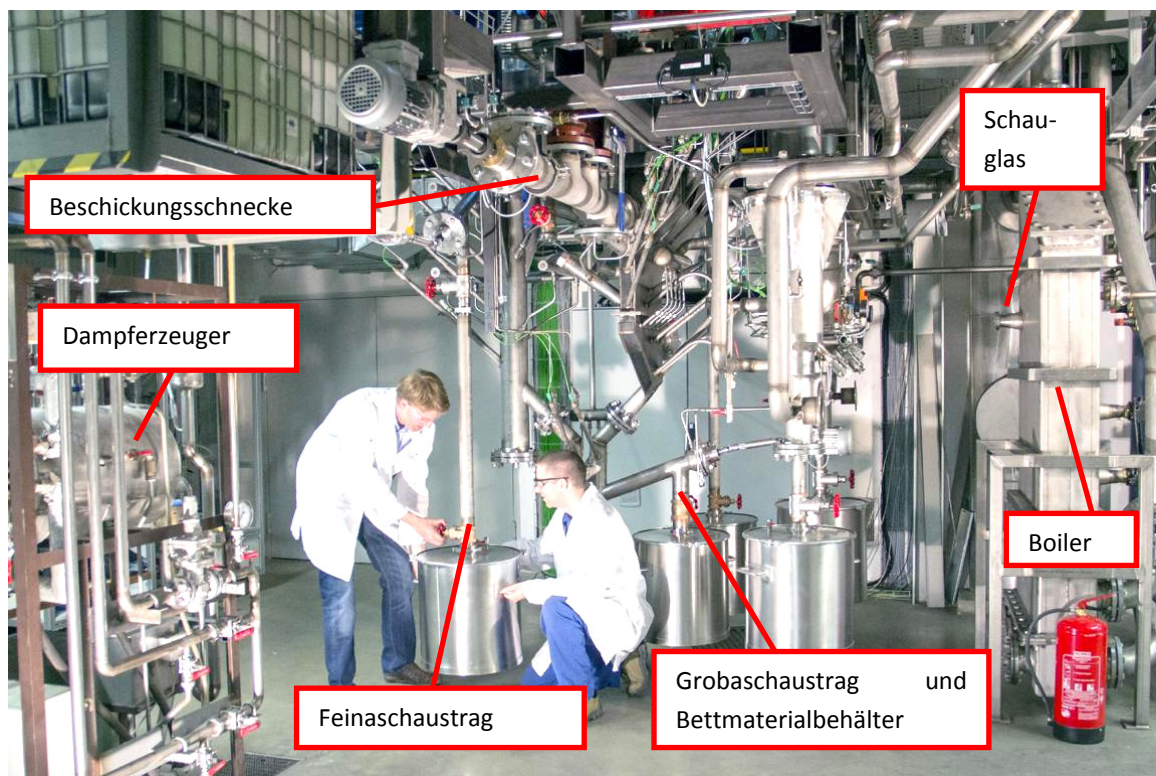


Abbildung 20: Untere Teil des Vergasersystems inkl. Rohrleitungsbau

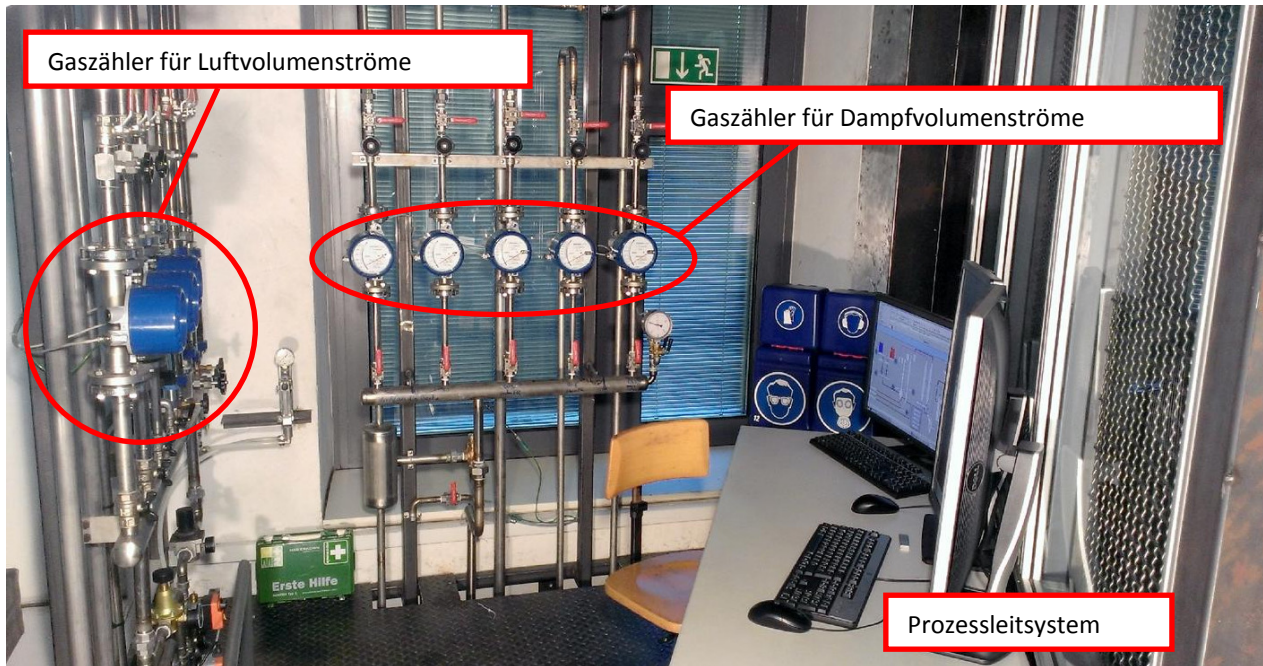


Abbildung 21: Kontrollraum mit Prozessleitsystem und Gaszähler für Dampf und Luft

Zu dem vorherig in Bildern & Text Erklärtem, können zusätzliche Details aufgelistet werden:

- Bettmaterialprobenentnahmen sind in allen Siphonen und dem Vergasungsreaktor vorgesehen (in Summe 5).
- Da bei schwierigen bzw. alternativen Brennstoffen oft hohe Aschegehalte vorliegen, wurden Austragsysteme für Feinasche und Grobasche vorgesehen. Die Flugasche wird vom installierten Schlauchfilter aus dem Abgasstrom abgeschieden.
- Das System wurde mit einer geschlossenen Bettmaterialeinbringung und auch Entleerung ausgeführt. Diese ermöglicht es, bei Bedarf, kontinuierlich Bettmaterial ohne Staubbelastung zuzuführen bzw. zu entnehmen, ohne den Betrieb zu stoppen.
- Um den Anfahrprozess der kalten Anlage vor einem stationären Betrieb zu beschleunigen, wurden elektrische Heizungen installiert. Diese dienen zur Erwärmung von Luft, Dampf und dem unteren Teil der Reaktoren und dem Bettmaterial beim Anfahrprozess.
- Bei der Konzeptionierung der Anlage wurden Schaugläser an wesentlichen Positionen eingeplant. Diese wurden in der Fertigungsphase realisiert um im Betriebsmodus Einblick in die Reaktoren zu ermöglichen. In Summe wurden sieben Schaugläser installiert (Bunker, Vergasungsreaktor, Grobabscheider, Brennkammer und Boiler).
- Die den Reaktorsystem nachgeschalteten Anlagenteile der Kühlung und Gasverwertung wurden umfangreich ausgeführt, auch um das produzierte Produktgas (nach den Analysen und Gaskomponentenmessungen) sicher verbrennen zu können und gekühlt und gefiltert dem Kamin zuzuführen.
- Ein eigener druckloser Wasserdampfkreislauf inklusive Dampftrommel, Boiler und Kondensator wurde gebaut. Die Sekundärkühlung übergibt die aufgenommene Wärme über Wärmetauscher dem Kühlsystem der Gebäudetechnik. Eine Notkühlung wurde aus Gründen der Redundanz zusätzlich ausgeführt.
- Die Rohre, Armaturen und Ventile der Wasserdampfversorgung sind mit einer Begleitheizung ausgerüstet um Kondensationseffekte in den Leitungen entgegenzuwirken.
- Die Betriebsdrücke innerhalb der Reaktoren und in den nachgeschalteten Anlagenteilen sind unterhalb 500mbar.
- Sowohl der Abgasweg, als auch der Abdampfweg aus der Dampftrommel über den Kondensator sind als offene (drucklose) Systeme ausgeführt und enden direkt in den Kamin.
- Zusätzlich sind trotzdem Sicherheitsventile und wenn sinnvoll Berstscheiben vorgesehen worden.

3.3 AP3: Heißversuche & Inbetriebnahme 100 kW Vergaser

Zu Anfang der Ergebnisbeschreibung des Arbeitspaketes AP3 werden die Paramtervariationen von durchgeführten Heißversuchen vor der Inbetriebnahme dargestellt, die im Rahmen des Projektes G-volution II entstanden sind. Diese waren eine wichtige Basis für Publikationen, die Planung, den Bau und die detailliert durchzuführenden Inbetriebnahmeschritte. Informationen zum Ablauf sind in Kap.1.4 in **Abbildung 2** gezeigt. Die Ergebnisse sind in vollem Umfang mit einer Dissertation [10] und in weiteren Publikationen (siehe Kap.4.2) dokumentiert. In den folgenden Abbildungen sind die Versuchsergebnisse für folgende Variationen präsentiert:

- Variation des Dampf-Brennstoffverhältnisses (steam to fuel ratio), **Abbildung 22**
- Variation der Materialart der Bettmaterialpartikel, **Abbildung 23**
- Variation der Vergasungstemperatur, **Abbildung 24**
- Variation der Bettmaterial-Partikelgröße, **Abbildung 25**
- Variation der Brennstoffart bei gleicher Vergasungstemperatur, **Abbildung 26 & 27**

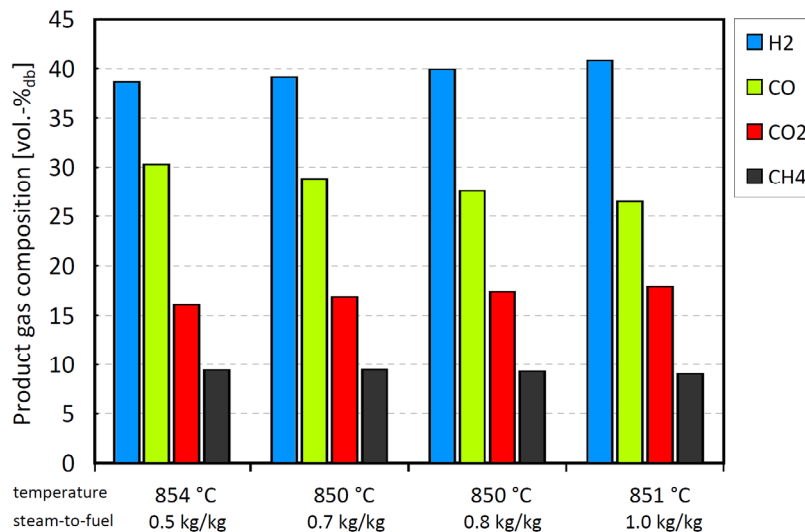


Abbildung 22: Variation Dampf/Brennstoffverhältnis der Vergasung von 0,5-1,0 kg/kg [10, 15]

In **Abbildung 22** ist ersichtlich, dass bei steigenden Dampf/Brennstoffverhältnis und gleicher Vergasungstemperatur von 850°C der Wasserstoffanteil im Produktgas etwas erhöht wird. Die Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit publizierten Versuchsergebnissen und Berechnungen aus der Literatur [16, 17]. Jedoch hat der hohe Dampfbedarf auch Nachteile in Bezug auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

Abbildung 23 zeigt Ergebnisse mit unterschiedlichen Bettmaterialien. Ergänzend zu den Bettmaterialvariationen aus dem Vorgängerprojekt [9] konnten damit zusätzliche Datensätze für die Auslegung und Planung gewonnen werden. Die Produktgaszusammensetzungen variieren zum Teil stark, auch weil mit Kalzit der sogenannte „Sorption Enhanced Reforming (SER)“ Prozess mit selektiven CO₂ Transport durchgeführt werden konnte. Dieser funktioniert auch bei einer niedrigeren Vergasertemperatur. Der SER-Prozess ist eine sehr aussichtsreiche Technologie um ein wasserstoffreiches Produktgas erzeugen zu können [8]. Auch für die Inbetriebnahme der Anlage sind diese Versuchsergebnisse überaus wichtig, da die Fluidisierungsbedingungen im oberen Teil des neuen Vergasungskonzeptes wesentlich von der Produktgaszusammensetzung, der Vergasungstemperatur und der Produktgasmenge abhängen.

Mit **Abbildung 24** können auch aktuelle Versuchsergebnisse in Bezug auf ein definiertes Temperaturfenster im Vergasungsreaktor gezeigt werden. Die Ergebnisse zur Produktgaszusammensetzung, den Teerbestandteilen und dem Teergehalt im erzeugten Gas belegen die Erfahrungen und die publizierten Ergebnisse aus der Literatur [16, 17].

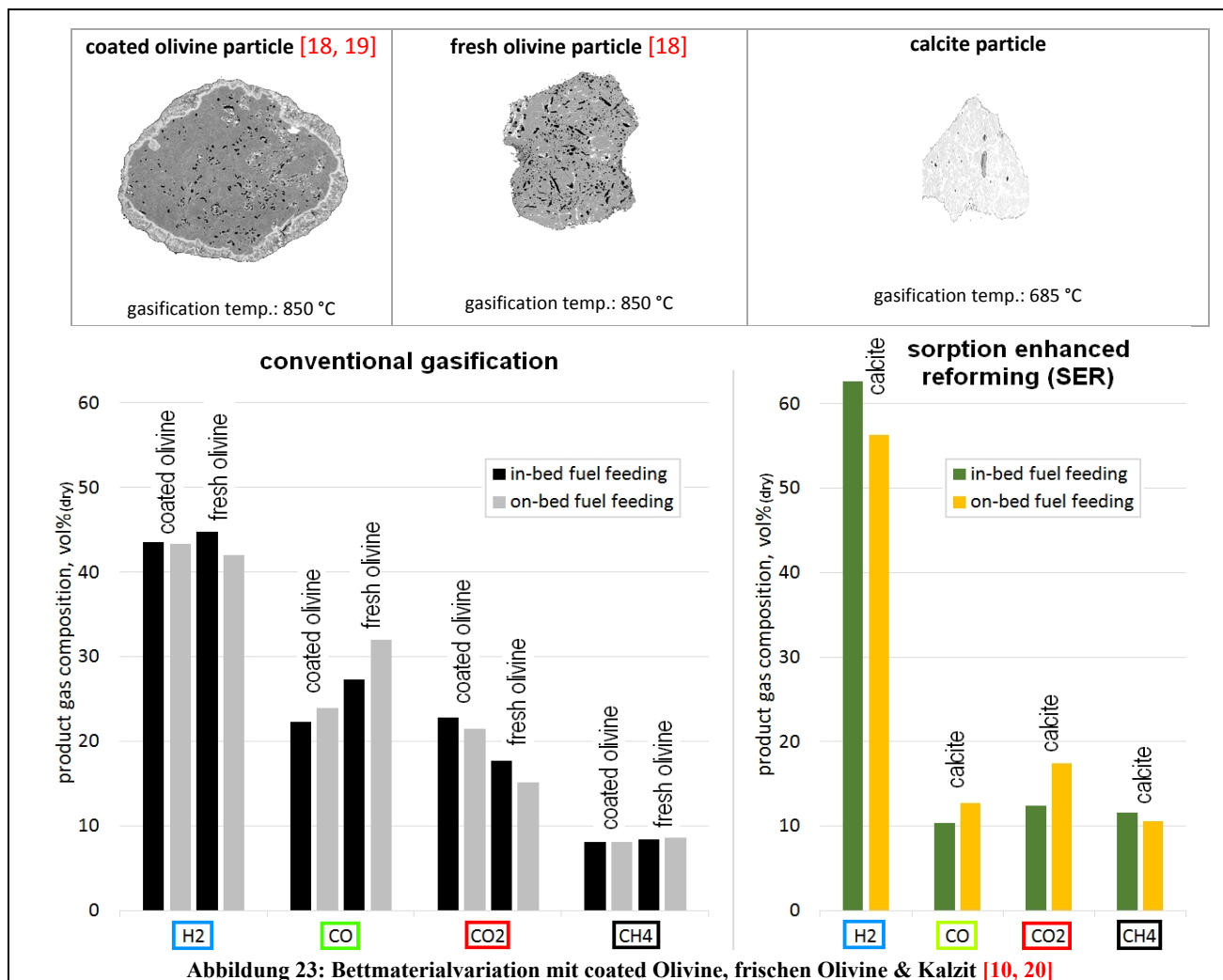


Abbildung 23: Bettmaterialvariation mit coated Olivine, frischen Olivine & Kalzit [10, 20]

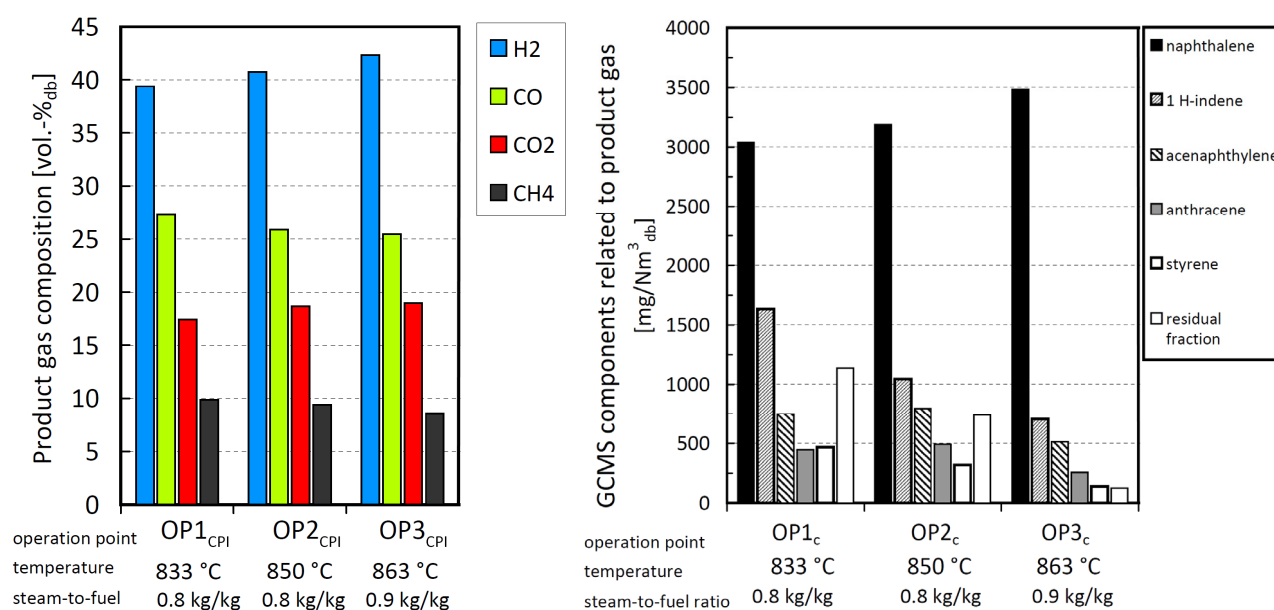
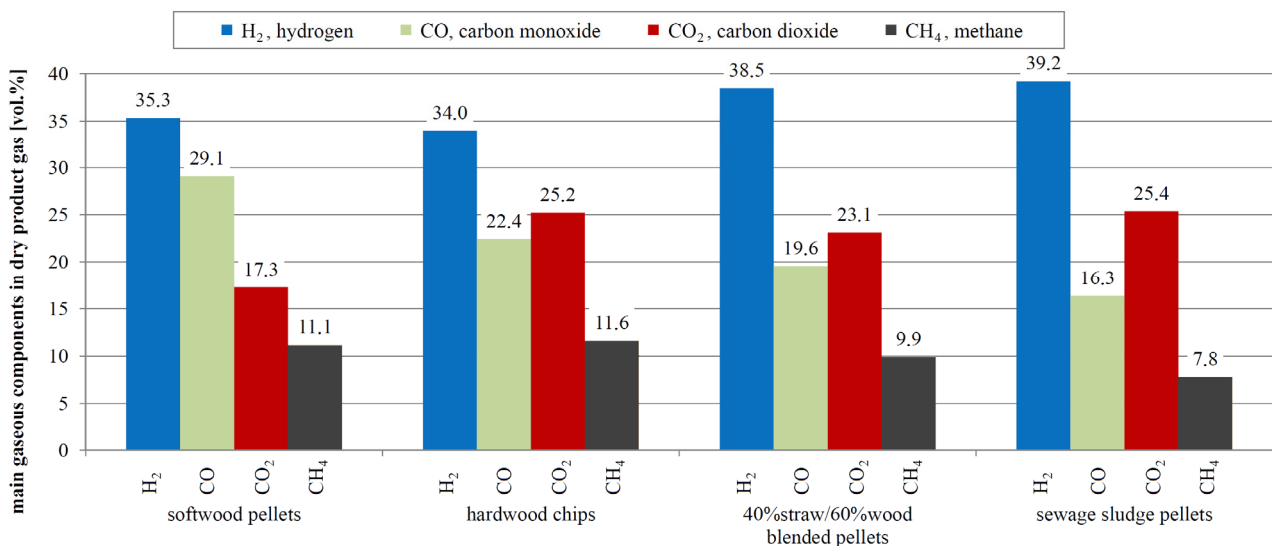
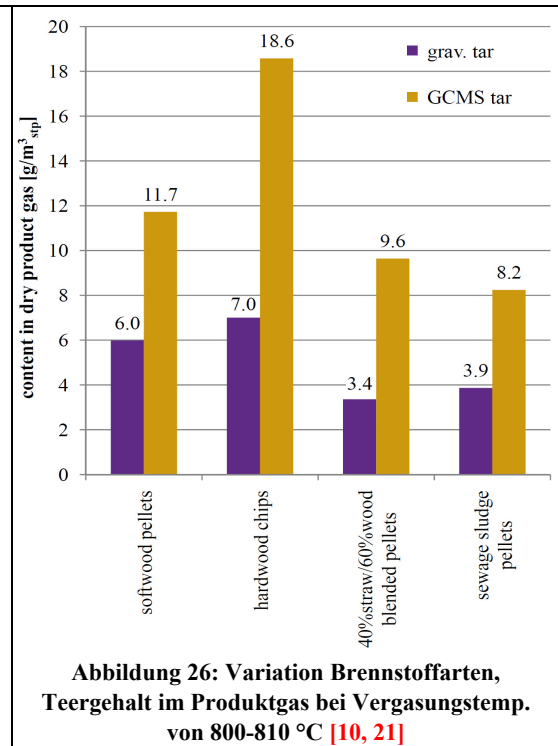
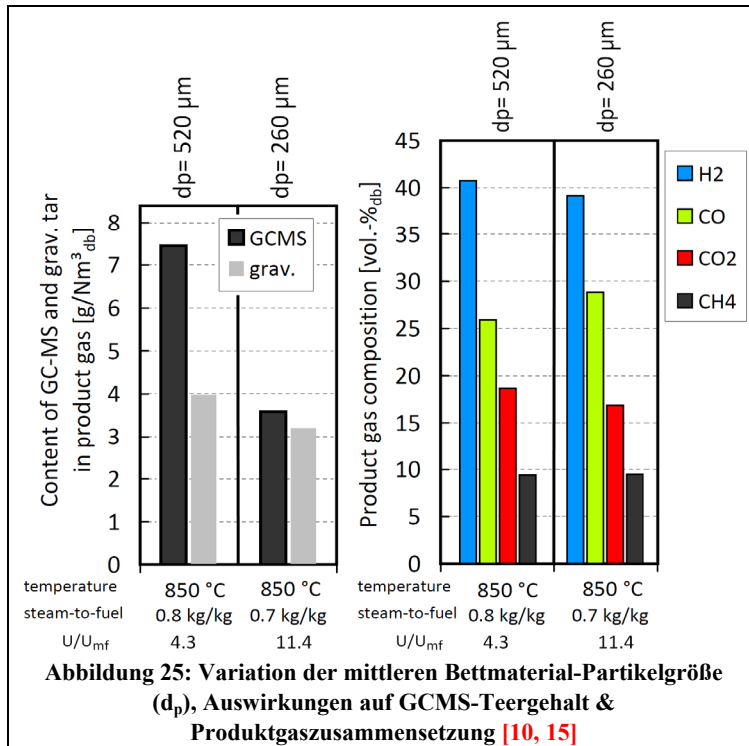


Abbildung 24: Temperaturvariation im Vergasungsreaktor, Auswirkungen auf Produktgaszusammensetzung und GCMS-Teerkomponenten [10, 15]

Versuche bei denen die mittlere Partikelgröße des Bettmaterials (Olivin: 260 & 520 μm) variiert wurde (**Abbildung 25**) geben einen interessanten Einblick in die Turbulenz der Fluidisierungszustände (U/U_{mf}) der Vergaser-Wirbelschicht und deren Auswirkungen auf die in-situ Teerkonversion im Wirbelbett und die Produktgaszusammensetzungen [10, 15]. Wobei gesagt werden kann, dass sich die Zusammensetzung des Produktgases in Bezug auf die gasförmigen Brennstoffe nur wenig ändert, aber der Teergehalt im Gas bei kleinerem Bettmaterialpartikel signifikant niedriger ist.

Ergänzend zu Ergebnissen der Literatur [22 – 24] wurden weiterführende Versuche mit verschiedenen Brennstoffarten ausgewertet (**Abbildung 26 & 27**). Die Ergebnisse zeigen, dass die Brennstoffart einen signifikanten Einfluss auf die Produktgaszusammensetzung, die Teergehalte und den Staub- und Koksgehalt im erzeugten Gas hat [21].



Seit Anfang 2014 wurde die in AP3 verankerte Inbetriebnahme durchgeführt. Die installierte SPS, Messstellen, Druckmessdosenschrank und Ventile wurde auf ihre Funktionalität überprüft. Einzelne Anlagenkomponenten wurden einer Dichtheitsprobe/Druckprobe unterzogen. Motoren (Förderschnecken, Austragsschnecken, Verdichter), wie auch Heizungen wurden getestet. Versuche zeigten die Funktionalität der Abscheidesysteme und des Filters. In der Inbetriebnahme wurden die Schneckenförderer der Fein- und Grobascheaustrag die Absperrwirkung der Siphone und die Funktion der Fluidisierungsdüsen für Luft und Wasserdampf überprüft. Dabei sind auch die Volumenstrommessungen und die Datenübertragung zur SPS gecheckt worden. Die Dosierschnecken der Brennstoffbunker konnte kalibriert und die Stopfschnecke direkt in den Vergasungsreaktor wurde in Betrieb genommen. Die Abscheideleistungen/wirkungsgrade der Schwerkraft-Abscheiderkammern sowie der beiden Zykclone wurden detailliert mittels Messungen zur Korngrößenverteilung bestimmt. Vor allem die Inbetriebnahme der sehr umfangreiche Mess- und Regeltechnik und die Implementierung und Programmierung der SPS war ein großer Aufwand. Durch institutsinternen Sicherheitsanforderungen war eine umfangreiche Programmierung der SPS und Nachbesserungsarbeiten während der Inbetriebnahme von Nöten. Nur durch den aktiven Arbeitsinput von erfahrenen Mitarbeitern der Firma Tecon Engineering GmbH war es möglich die Anlage samt Mess- Steuer und Regeltechnik in einen versuchsbereiten Zustand zu bringen. Nach dem Kalibrieren der Sensoren konnten die ersten Kaltversuche samt Messdatenerfassung durchgeführt werden. Diese werden nun im nächsten Abschnitt vorgestellt.

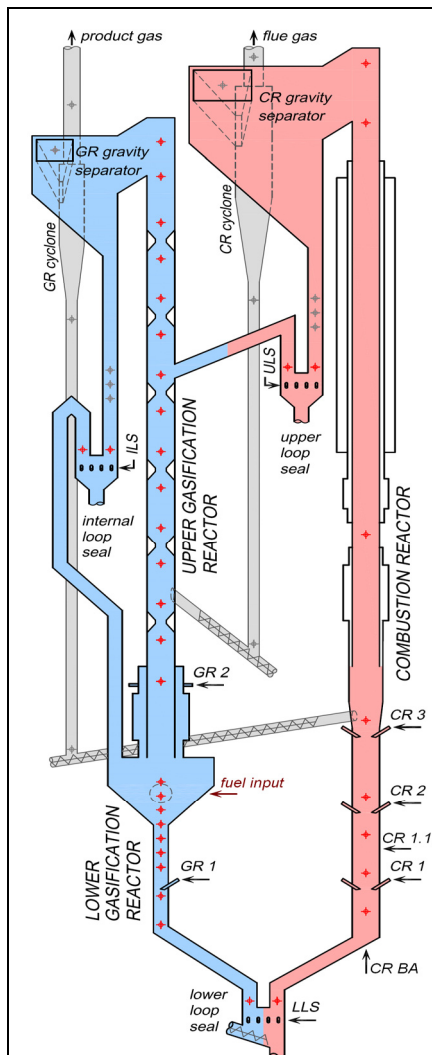


Abbildung 28: Darstellung der Reaktorkomponenten der 100 kW G-volution Versuchsanlage [10]

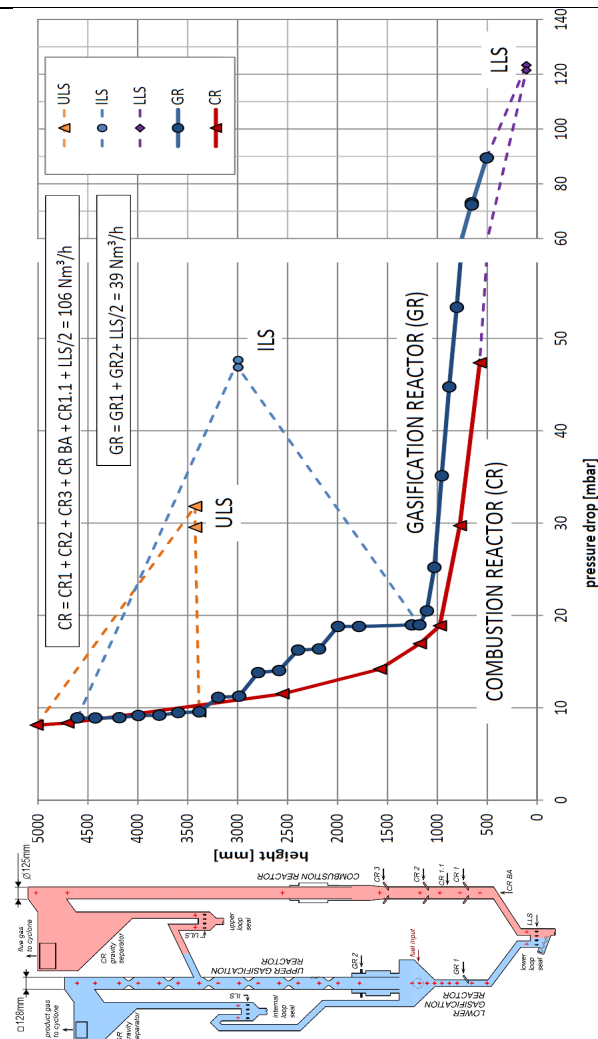


Abbildung 29: Gesamt-Druckprofil der Inbetriebnahmephase für eine optimale Betriebsweise, Bettmaterial Olivin ($d_p = 118 \mu\text{m}$, $\rho_p = 2850 \text{ kg/m}^3$), Fluidisierungsgas Luft (20 °C), Bettmaterialmenge: 80 kg

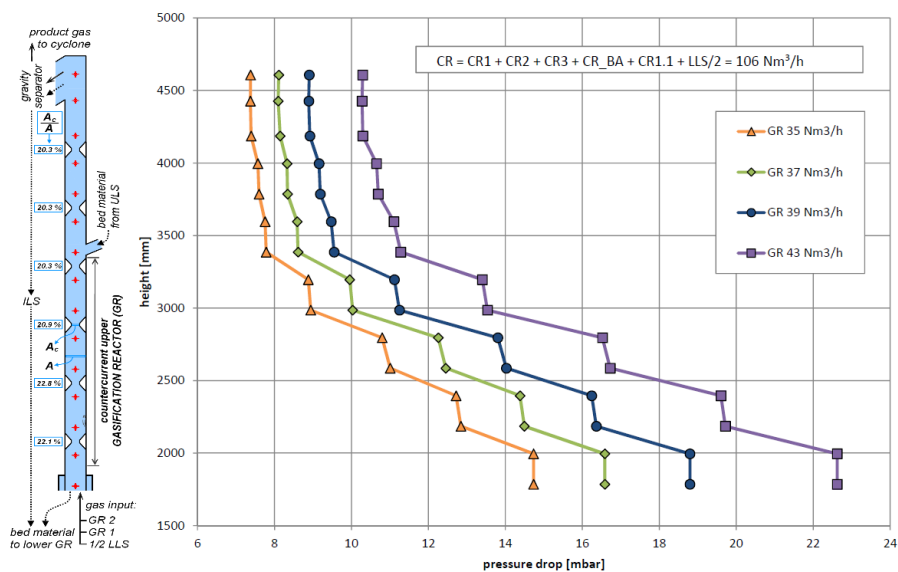


Abbildung 30: Variation der Fluidisierung (über GR2), Druckverlauf des oberen Vergasungsreaktors GR

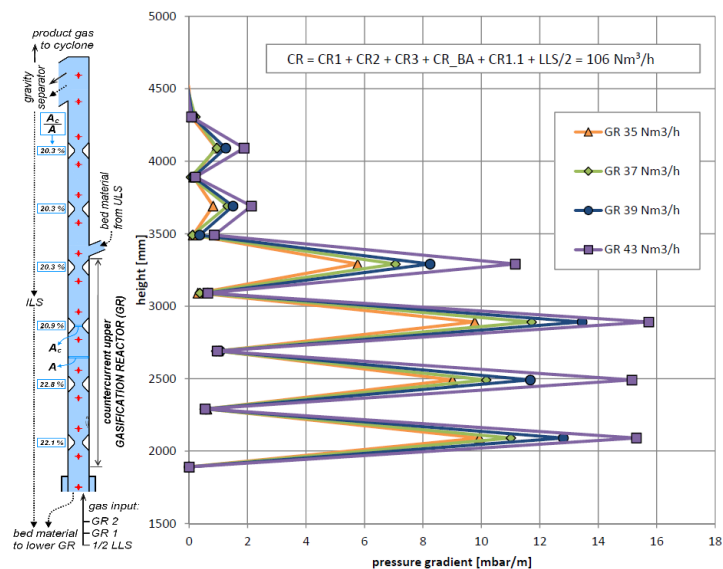


Abbildung 31: Variation der Fluidisierung (über GR2), Druckgradientenverlauf des oberen Vergasungsreaktors GR

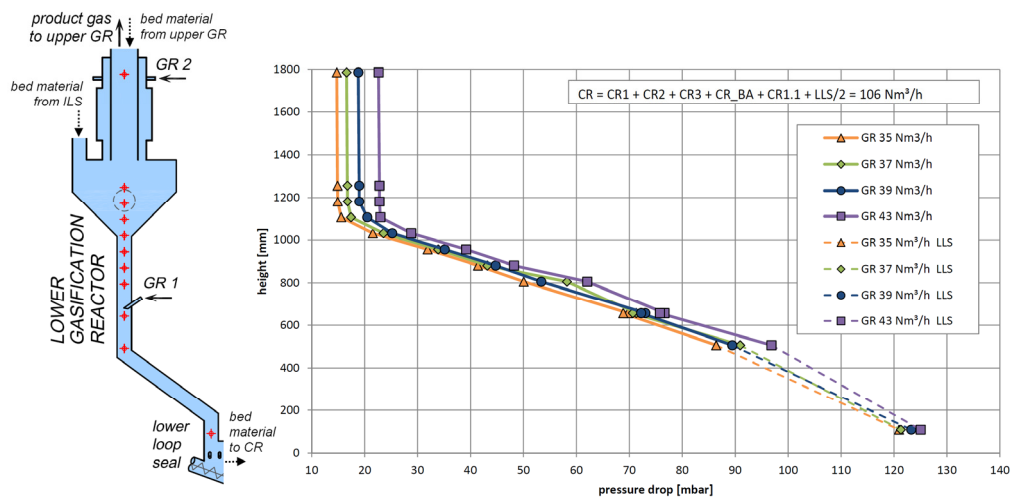


Abbildung 32: Variation der Fluidisierung (über GR2), Druckverlauf des unteren Vergasungsreaktors GR

Ausgewählte Ergebnisse der umfangreichen Parametervariationen der Inbetriebnahme mit Olivin-Sand (118 μm) werden zusammengefasst dargestellt. Der Aufbau des Reaktorsystems und die Anordnung der Fluidisierungsdüsen über die Höhe sind in **Abbildung 28** zu sehen. Die Messungen zum Gesamtsystem für einen Betriebspunkt (GR = 39 Nm^3/h , CR = 106 Nm^3/h) im optimalen Bereich des Betriebsfensters werden in **Abbildung 29** gezeigt. Die Variation der Vergaserfluidisierung (über GR2) und die Auswirkungen auf die Drücke des innovativen oberen Gegenstromreaktors der Vergasungsseite sind in **Abbildung 30 & 31** zu sehen. **Abbildung 32** zeigt dabei die Betriebsdrücke im unteren Teil des Vergasungsreaktors für dieselbe Versuchsreihe. Im unteren Bereich ändert sich dabei der Druckverlauf nur wenig. Die Daten können vorzüglich mit den zusammengefassten Ergebnissen aus den durchgeführten Kaltversuchen verglichen werden (**Abbildung 12**). Es kann eine gute Übereinstimmung der bevorzugten Betriebsweise zwischen der neuen 100kW Versuchsanlage aus der Inbetriebnahme und dem Ergebnisses des Kaltmodells gezeigt werden.

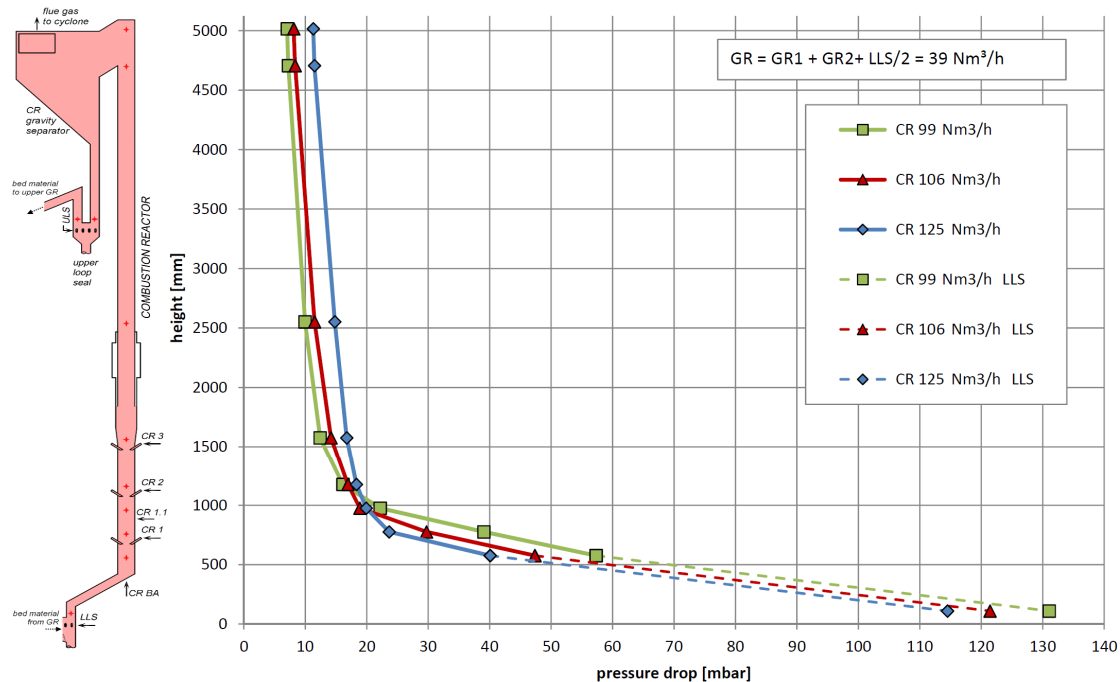


Abbildung 33: Variation der Fluidisierung im Verbrennungsreaktor (CR)

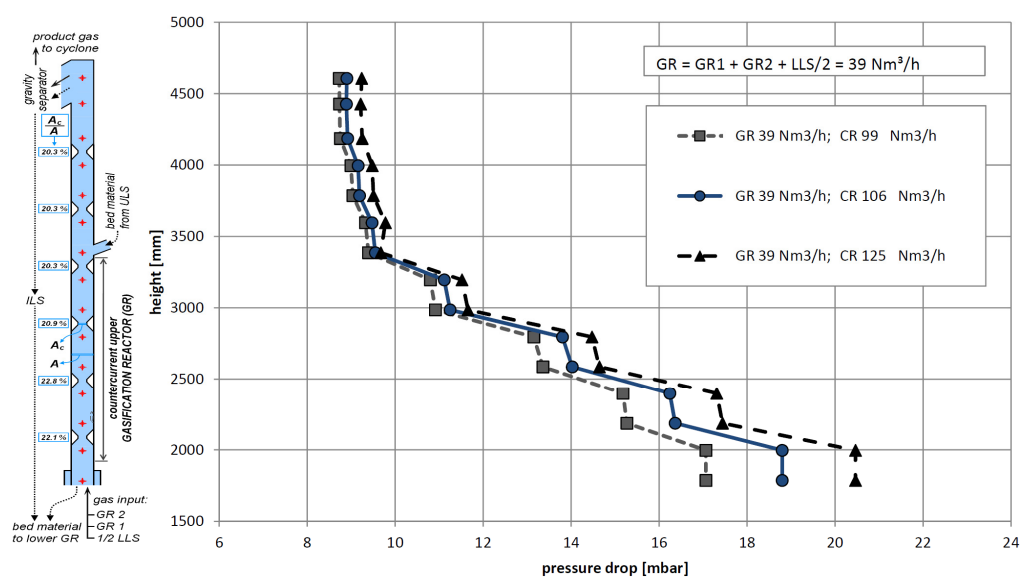


Abbildung 34: Auswirkungen der Fluidisierungsvariation des Verbrennungsreaktors CR (des Bettmaterial-Umlaufes) auf den Druckverlauf im oberen Vergasungsreaktor GR

Die Fluidisierung des Verbrennungsreaktors (**Abbildung 33**) bzw. die einhergehende Variation des Bettmaterialumlaufs und ihre Auswirkungen auf den Vergasungsreaktor sind ebenfalls detailliert dargestellt (**Abbildung 34**). Alle bis jetzt vorgestellten Versuche zur Variation der Volumenströme der Fluidisierungen sind mit 80 kg Bettmaterial-Füllmenge durchgeführt worden.

Es wurde eine eigene Versuchsreihe durchgeführt, bei der die eingefüllte Bettmaterialmenge anstatt 80 kg nun 105 kg betragen hat. In **Abbildung 35** wird die Auswirkung der Variation der Bettmaterialmenge auf den unteren Vergasungsreaktor gezeigt. Diese hat vorrangig Auswirkungen auf den Druckverlauf im unteren Teil des Wirbelschichtsystems. Hier ist vor allem der Vergasungsreaktor wichtig, in dem sich das Wirbelbett bei größerer Füllmenge merklich höher ausbildet. Die Drücke dieser Wirbelschichtzone steigen damit, bei gleichbleibender Fluidisierung über GR1 und LLS. Als ein wichtiges Ergebnis dieser Arbeit wird in **Abbildung 36** das Betriebskennfeld der Anlage für alle durchgeführten Kaltversuchsreihen präsentiert. In jedem Fall muss der Betrieb unterhalb der roten Zone stattfinden, da sonst eine Flutung des oberen Gegenstrom-Vergasungsreaktors sehr wahrscheinlich ist. Alle Betriebspunkte innerhalb des optimalen, grünen Betriebsfensters wurden übersichtshalber nicht eingezeichnet. Es ist lediglich ein exemplarischer „optimaler“ Betriebspunkt (GR = 39 Nm³/h, CR = 106 Nm³/h) hervorgehoben.

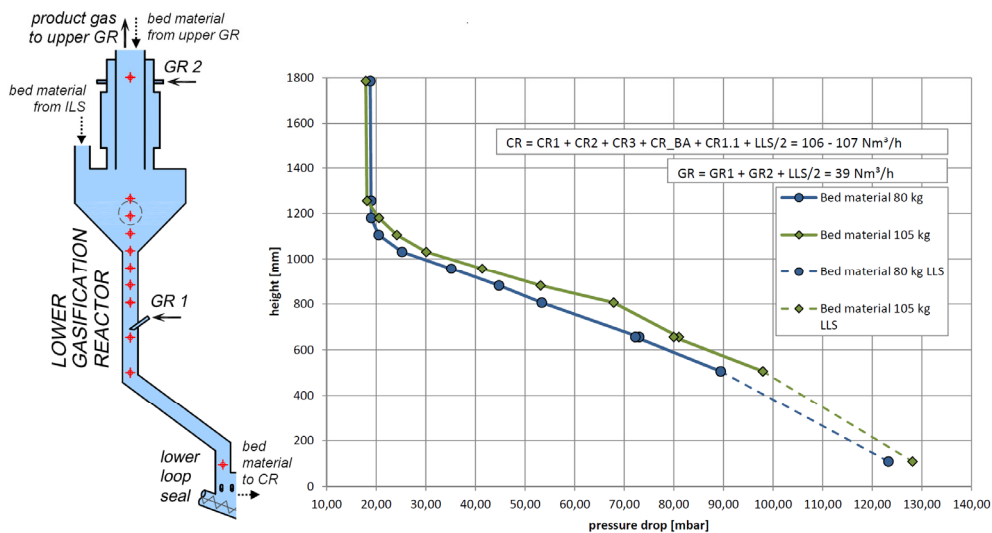


Abbildung 35: Einfluss der Füllmenge an Bettmaterial mit 80 bzw. 105 kg auf den unteren Teil des Vergasungsreaktors GR

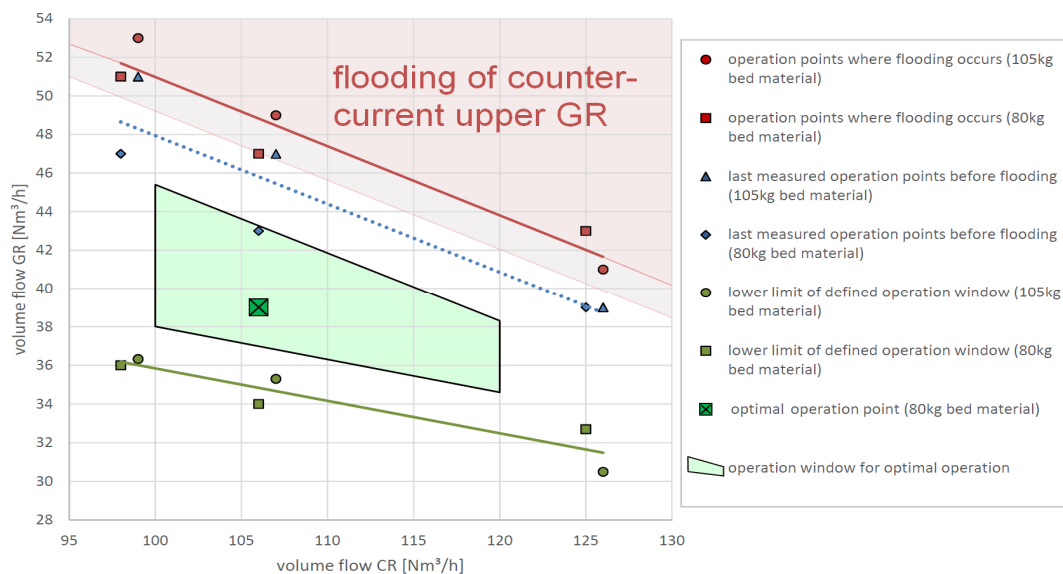


Abbildung 36: Optimales Betriebskennfeld zu den Inbetriebnahmeversuchen der neuen 100 kW G-volution Versuchsanlage

3.4 AP4: Begleitende Modellierung und Simulation

Im Zuge von Arbeitspaket 4 wurde die begleitende Modellierung und Simulationen durchgeführt. Ein wichtiger Teil dieser Arbeit umfasst die Interpretation der Versuchsergebnisse der Parametervariation mit der klassischen 100 kW Vergasungsanlage. Des Weiteren wurden die gewonnenen Erkenntnisse für die Erstellung eines Simulationsmodells zur Auslegung der neuen Versuchsanlage verwendet. Die Simulation unterstützte in weiterer Folge das Engineering mit der Berechnung der notwendigen Massen- und Energieströme. Das erstellte IPSE-Fließbild wurde schließlich für die Auswertung von Versuchen bereitgestellt. Neben den angeführten Tätigkeiten wurde die Performance einer 10 MW Referenzanlage kalkuliert um einen Ausblick auf die großtechnische Anwendung geben zu können [8]. Die im Bericht inkludierten folgenden Abbildungen zeigen:

- Auslegungsberechnung für das Vergasersystem als Performancesheet, **Abbildung 37**
- und ein Abbild des Layouts für die Berechnung der 10 MW Referenzanlage, **Abbildung 38**

Der zugehörige Modellierungen mittels IPSE-Pro, für einen charakteristischen Betriebspunkt der neuen 100 kW Vergasungsanlage, waren wichtige Auslegungsgrundlagen für das Basic- und Detailengineering. Es wurden projektintern 9 solcher verschiedenen Betriebsweisen modelliert, um den optimale Betriebspunkt für typische zukünftige Heißversuche finden zu können. Ohne diese Vorausschau wäre die Dimensionierung der Reaktorteile innerhalb des Arbeitspakets 1 nicht möglich gewesen.

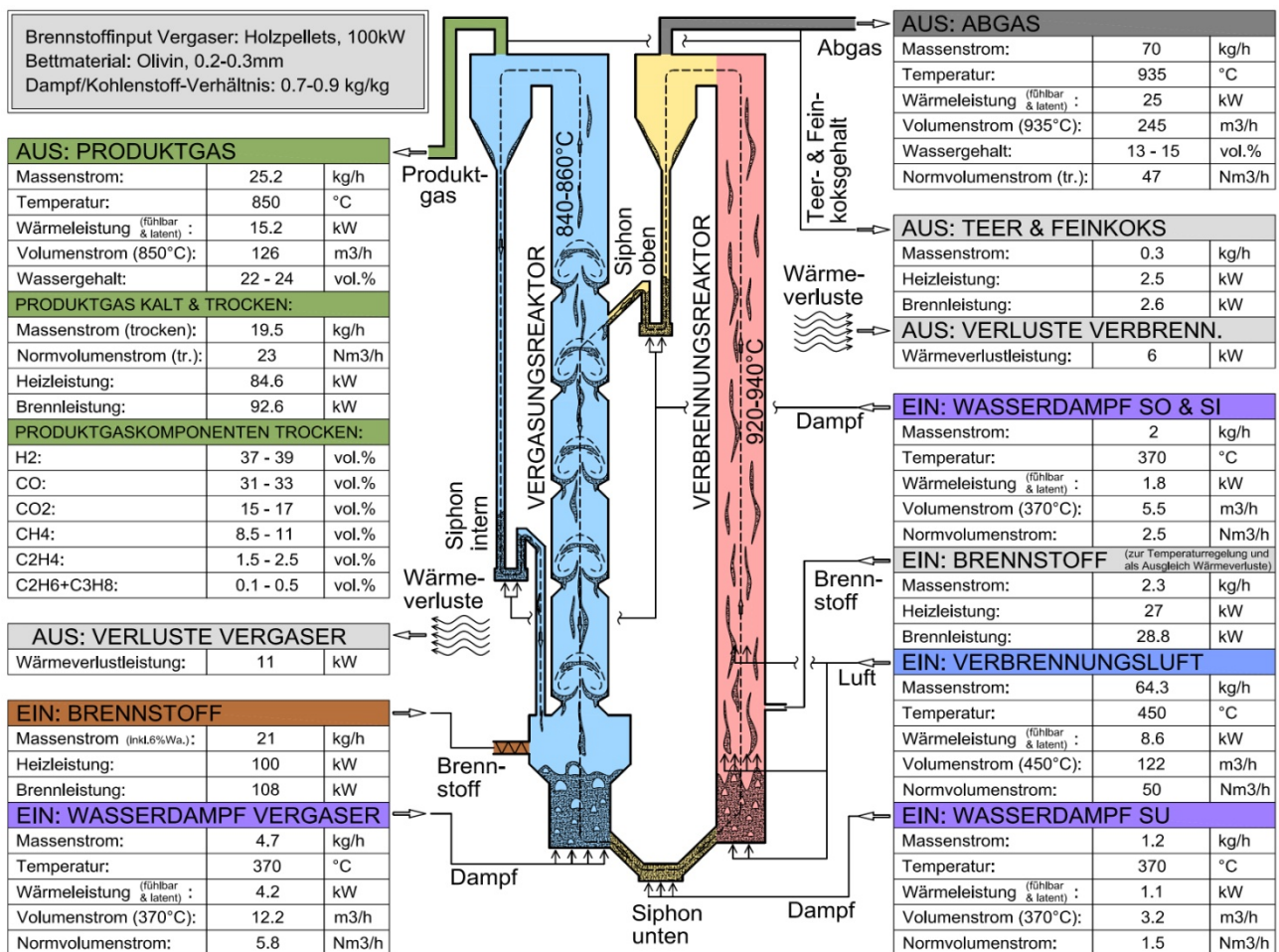


Abbildung 37: Auslegungsberechnung Vergasersystem als Performancesheet [10]

Für die in **Abbildung 38** dargestellte Referenzanlage wurden die zugehörigen Massen- und Energiebilanzen berechnet um Referenzwerte für die Leistungsfähigkeit einer derartigen Anlage zu erhalten. Für die Berechnung der Referenzanlage wurden bisherige Betriebserfahrungen kommerzieller Anlagen, sowie umfassende Versuchsdaten von der klassischen 100 kW Anlage der TU Wien herangezogen. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass für die neue Anlage eine Verbesserung des Kaltgaswirkungsgrades knapp über 70 % möglich scheint. Mit Hilfe der Berechnungsergebnisse kann somit die Leistungsfähigkeit einer derartigen Anlage prognostiziert werden und ermöglicht die Technologieevaluierung in einem frühen Stadium der Entwicklung. Die erzielten Berechnungsergebnisse wurden in [8] detailliert dokumentiert und kommentiert.

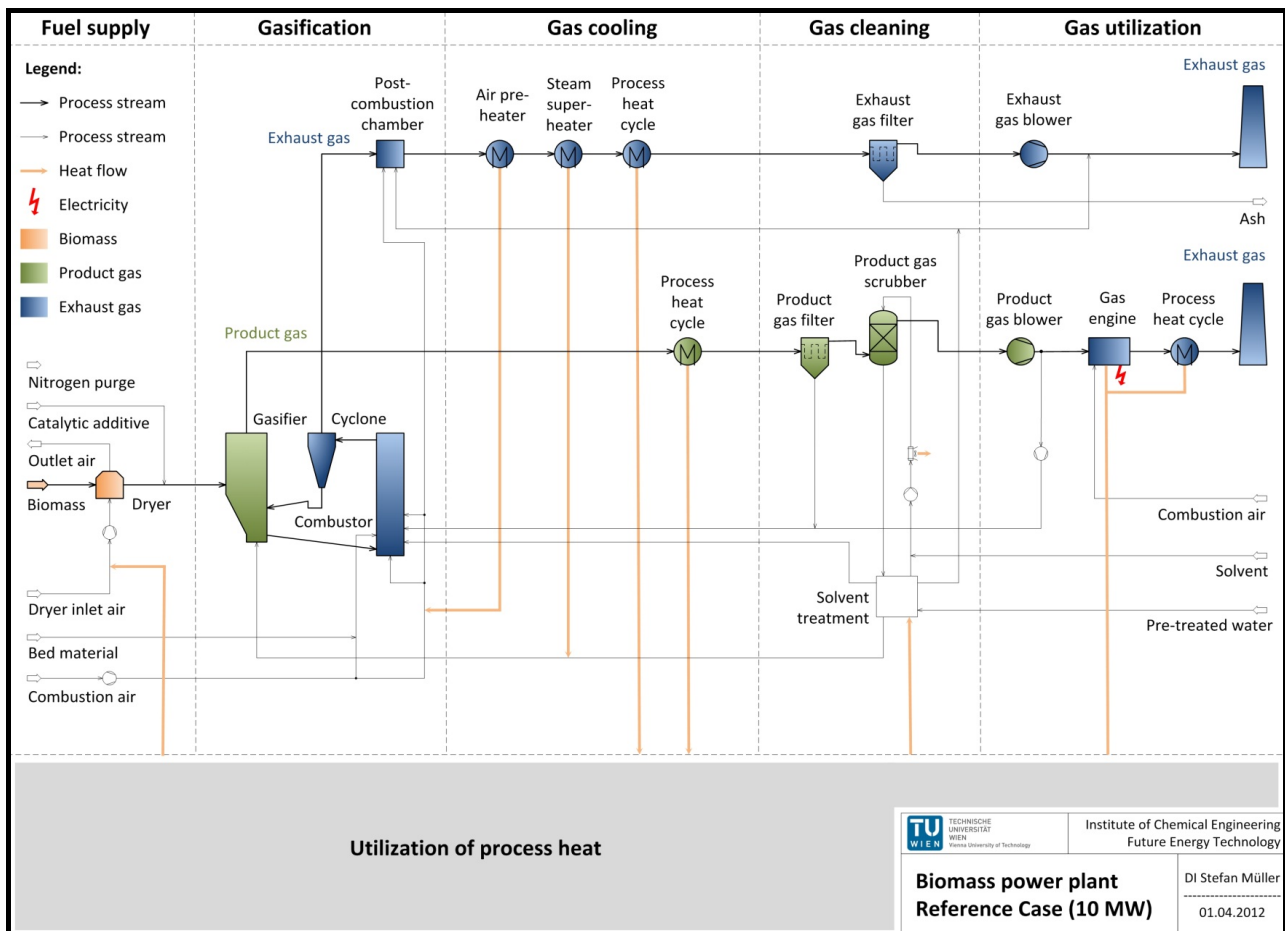


Abbildung 38: Layout für die Simulation einer fiktiven 10 MW Anlage [8]

4 Erkenntnisse aus dem Projekt

Im Zuge des Projektes hat sich gezeigt, dass die zukünftige Anwendung der Vergasungstechnologie mit erhöhten Anforderungen hinsichtlich Brennstoffflexibilität konfrontiert sein wird. Diese Tatsache wurde in den Planungsprozess mit einbezogen und somit steht am Ende des Projektes eine Versuchsanlage zur Verfügung, die auf Versuchsläufe mit alternativen Brennstoffen wie biogenen Reststoffen oder Reststofffraktion von Kommunen sowie aus der Industrie vorbereitet ist. Die hochwertige Ausführung der Versuchsanlage ermöglicht dabei die Ermittlung aussagekräftiger Daten für das „Scale-up“ des Verfahrens mit unterschiedlichen Brennstoffen.

Mit der innovativen Ausführung des Vergasungsteils, als Wirbelschicht mit mehreren Reaktionszonen mit Gegenstromführung von Gasen und Partikel, wird den zuvor genannten Anforderungen Rechnung getragen. Dadurch kann der Partikelanteil an sich und damit auch der katalytisch aktive Bettmaterialanteil innerhalb des Vergasungsreaktors signifikant erhöht werden. Um optimale Reaktionsbedingungen einstellen zu können, ermöglicht die neu gebaute Pilotanlage zudem die gezielte Veränderung dieser Taillierungen während des laufenden Betriebes. In Abhängigkeit der Brennstoffeigenschaften ist es zusätzlich möglich Brennstoffe an verschiedenen Stellen in den Vergasungsreaktor zu fördern. Grobe Bettmaterialpartikel werden über einfache Kammerabscheider schonend von den Gasströmen getrennt und rezirkuliert. Damit können auch relativ weiche Bettmaterialien wie Kalkstein/Kalzit verwendet werden. Katalytisch hoch wirksame Feinpartikel, die durch den Abrieb des Bettmaterials entstehen können, sollen im Reaktorsystem gehalten werden. Im Verlauf des Produktgasweges, als auch im Verlauf des Abgasweges sind dazu zusätzliche Feinabscheider (Zyklone) angeordnet. Diese Feinfraktionen können bei hohen Feinascheanteilen auch ausgeschleust werden. Ebenso wie der Grobascheanteil von Brennstoffen im untersten Teil des Systems. Ergebnisse von wissenschaftlichen Experimenten mit mehreren Kaltmodellen haben die Eignung des neuartigen Reaktorkonzeptes, in Hinblick auf die Fluidodynamik, gezeigt. Auch die neue 100 kW Vergaseranlage zeigt die gewünschten fluidodynamischen Betriebsweisen. Die neuen Ideen wurden durch mehrere Patenterteilungen als Innovationen im Bereich Wirbelschichttechnik gewürdigt (siehe Kap.4.2).

Neben der Inbetriebnahme der neuen Versuchsanlage konnten weitere wichtige Ergebnisse durch Versuche mit Parametervariationen innerhalb des Projektes G-volution II erzielt werden. Die Auswertung unterschiedlicher Versuchsläufe konnte wesentliche Erkenntnisse zur Verbesserung des Verfahrens liefern. Die gewonnenen Ergebnisse von Kalt- und Heißversuchen wurden in zahlreichen Publikationen (vgl. Kap.4.2) veröffentlicht und umgehend bei der Planung berücksichtigt. Dies löste reges Interesse an dem patentierten Verfahren in der wissenschaftlichen Community sowie in unterschiedlichen Industriebranchen aus. Die Patentrechte an dem Verfahren liegen bei der Technischen Universität Wien, die sich stark für die kommerzielle Verwertung der erzielten Ergebnisse einsetzt. Die Ermöglichung zahlreicher wissenschaftlicher Abschlussarbeiten in Form von Bachelorarbeiten, Diplomarbeiten und Dissertation zeigen auch den akademischen Erfolg des Projektes im Bereich der Lehre. Der anerkannte Erfolg des Projektes hat die Unterstützung im Projektumfeld für weiterführende Entwicklungs- und Kommerzialisierungsschritte abgesichert.

4.1 Zusammenfassende Ergebnisse und Schlussfolgerungen zu den Arbeitspaketen

AP1 beinhaltet als Ergebnis die gesamte Konstruktionsarbeit des neuartigen Vergasersystems als Laboranlage. Im Zuge des „Basic- & Detailengineerings“ wurden die Planunterlagen erstellt. Dazu wurden bis zum Ende des Projektes 70 detaillierte Einzelteilzeichnungen und 20 Übersichts- und sonstige Pläne erstellt. Ein Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild wurde über 20-mal an den Projektfortschritt angepasst und aktualisiert. Mit Hilfe der Pläne wurden Unterlagen erstellt, um die Fertigung des Vergasersystems sicher zu stellen. Detaillierte Pläne, Konstruktionszeichnungen der Apparate und Reaktorteile und das R&I unterliegen der Geheimhaltung und dürfen nicht veröffentlicht werden. Als **Schlussfolgerung** dazu kann gesagt werden, dass die Arbeiten nur möglich waren, weil

berufserfahrene Mitarbeiter der TU Wien die Planung und Konstruktion und das Projektmanagement bedient haben. Zusätzlich war der Input von Mitarbeiter des Projektpartners Tecon Engineering GmbH unverzichtbar.

AP2 beinhaltet als Ergebnis den Bau des neuartigen Vergasersystems als Laboranlage mit einer Brennstoffwärmeleistung von 100 kW. Vor Baubeginn musste die alte Anlage demontiert werden. Bereits vorhandene und wiederverwertbare Komponenten wurden sorgsam eingelagert. Der abgeschlossene Bau der neuen Versuchsanlage umfasst den Aufbau der tragenden Stahlkonstruktion, die Fertigung und Montage der Reaktoren, die nachgeschalteten Anlagenapparate, den notwendigen Rohrleitungsbau, die Elektro- und Regeltechnik, sowie die Instrumentierung der Anlage für den Versuchsbetrieb. Die Programmierung der SPS wurde abgeschlossen. Die Gesamtanlage hat eine Höhe von 7m und erstreckt sich über zwei Stockwerke. Die benötigte Laborfläche beträgt je Stock 35m². Als **Schlussfolgerung** dazu kann gesagt werden, dass die Fertigung einer solch komplexen Anlage nur möglich war, weil Anlagenbauprofis als direkte Mitarbeiter für den Stahlbau und der MSR- und Elektrotechnik gewonnen werden konnten. Zusätzlich war es unabdingbar Spezialfirmen für die Fertigung der hochlegierten Reaktorteile und der wichtigen und SPS-Programmierung zu beauftragen.

AP3 beinhaltet als Ergebnis die umfangreichen Inbetriebnahmeschritte der komplexen Versuchsanlage. Diese erfolgte in den letzten Monaten und umfasst Dichtheitsproben, Test von Einzelkomponenten, die Inbetriebnahme der Mess-, Steuer-, und Regelungstechnik, sowie die Kaltinbetriebnahme mit Parametervariationen. Die Parametervariation für Heißversuche wurde vorab noch mit dem klassischen Vergasersystem durchgeführt, da diese Ergebnisse wichtige Auslegungsdaten für die Modellierung und die Konstruktion der Reaktoren lieferten. Zusammen mit Ergebnissen der zusätzlich durchgeführten Kaltmodellversuche waren diese Daten unabdingbar für den erfolgreichen Anlagenbau und die Inbetriebnahme. Als **Schlussfolgerung** dazu kann gesagt werden, dass das sicherheitskritischste Arbeitspaket AP3 und die Bestimmung des Betriebsfensters nur deshalb möglich war, weil innerhalb der Projektlaufzeit zusätzliche Versuchsergebnisse vom Kaltmodell und eine umfangreiche Heißtest-Parametervariation mit der klassischen Vergaseranlage durchgeführt wurden. Der Versuchsbetrieb und die zeitlich sehr engagierte Inbetriebnahmephase war nur durch die umfassende Unterstützung von Mitarbeiter der Firma Tecon Engineering GmbH zu bewältigen.

AP4 beinhaltet als Ergebnis die Erstellung von Massen- und Energiebilanzmodellen für die Auslegung und die Versuchsauswertungen. Es wurden bestehende Modelle für die Auslegung des neuen Vergasersystems weiterentwickelt. Die Erstellung eines neuen Simulationsmodells zu Abbildung der neuen Laboranlage konnte erfolgreich erarbeitet werden. Mit Hilfe des erstellten Modells können nun die erzielten Messdaten ausgewertet und interpretiert werden. Der genaue Aufbau des Modells mit dem Softwaretool IPSE-Pro unterliegt der Geheimhaltung und darf nicht veröffentlicht werden. Als **Schlussfolgerung** dazu kann gesagt werden, dass mit Hilfe der jetzt vorhandenen Simulationsmodelle und der gewonnenen Versuchsdaten das Scale-Up hin zu industriellen Anlagengrößen mit größtmöglicher Sicherheit durchgeführt werden kann.

4.2 Im Rahmen des Projektes G-volution II entstandene Publikationen

1. Schmid, J.C., Rauch, R., Pfeifer, C., Pröll, T., Hofbauer, H., 2010, "G-volution: Weiterentwicklung der Zweibett-Wirbelschicht-Dampfvergasung", Tagung organisiert durch die Fördergesellschaft Erneuerbare Energie e.V. (FEE), Thema: Biomasse-Wirbelschichtvergasung – dezentral oder zentral?, 29. November 2010, Pfaffenhofen, Deutschland
2. Schmid, J.C., Pröll, T., Pfeifer, C., Hofbauer, H., 2011, "Improvement of gas-solid interaction in dual circulating fluidized bed systems", in: Reis, A. et al. (Eds.), Proceedings of the 9th European Conference on Industrial Furnances and Boilers (INFUB-9), 26 - 29 Apr. 2011, Estoril, Portugal
3. Pfeifer, C., Schmid, J.C., Pröll, T., Hofbauer, H., 2011, "Next Generation Biomass Gasifier", in: Proceedings of the 19th European Biomass Conference, 6 - 10 June 2011, Berlin, Germany
4. Hofbauer, H., 2011, "Dual Fluidized Bed Systems for Gasification and Looping Cycles", at: 3rd IEAGHG High Temperature Solids Looping Cycles Network Meeting, 30 - 31 Aug. 2011, Vienna, Austria

5. Schmid, J.C., Pfeifer, C., Kitzler, H., Pröll, T., Hofbauer, H., 2011, "A new dual fluidized bed gasifier design for improved in situ conversion of hydrocarbons", in: Hofbauer, H., Fuchs, M. (Eds.), Proceedings of the International Conference on Polygeneration Strategies (ICPS11), 30 Aug. - 1 Sept. 2011, Vienna, Austria
6. Pfeifer, C., 2011, "Dual fluidised bed steam gasification of solid biomass coupled with in-situ CO₂ capture", at: 3rd IEAGHG High Temperature Solids Looping Cycles Network Meeting, 30 - 31 Aug. 2011, Vienna, Austria
7. Schmid, J.C., 2011, "Dual fluidized bed investigations at the Vienna University of Technology", at: Joint workshop of Vienna University of Technology and Chalmers University of Technology, 02 Sept. 2011, Vienna, Austria
8. Schmid, J.C., 2011, "Variation of Feedstock in a Dual Fluidized Bed Steam Gasifier", at: International Conference on Thermochemical Conversion Science (tcbiomass2011), 28 - 30 sept. 2011, Chicago, USA
9. Schmid, J.C., Schöny, G., Fuchs, M., 2011, "Prinzip und Anwendungsmöglichkeiten der Zweibett-Wirbelschichttechnik", Public-Relations Meeting mit Der Standard, 18. November 2011, Wien, Österreich
10. Markus Böhm, 2011, „Future Energy Technology - Poppen und heizen mit wirbelnden Schichten“, Artikel vom 23.11.2011, Wissenschaft/Forschung Spezial, Der Standard, Österreich
11. Schmid, J.C., 2012, "G-volution I+II: Zweibettwirbelschicht Biomasse-Dampfvergasung der zweiten Generation" Vortrag beim Sience Brunch des Klima- und Energiefonds, 18.01.2012, Wien
12. Schmid, J.C., Wolfesberger, U., Koppatz, S., Pfeifer, C., Hofbauer, H., 2011, "Variation of Feedstock in a Dual Fluidized Bed Steam Gasifier - Influence on Product Gas, Tar Content and Composition", Environmental Progress & Sustainable Energy, Vol. 31 (2), pp. 205-2015, July 2012, Wiley, doi:10.1002/ep.11607
13. Schmid, J.C., Hofbauer, H., 2012, "G-volution: Ein innovatives Zweibettwirbelschichtsystem zur Dampfvergasung von Biomasse", Sience Brunch Broschüre, Bioenergie plus: Wege für Ressourceneffizienz und Klimaschutz, 03/2012, Textbeitrag Seite 20-21, Klima und Energiefonds, Wien, Österreich
14. Schmid, J.C., Pröll, T., Kitzler, H., Pfeifer, C., Hofbauer, H., 2012, "Cold flow model investigations of the countercurrent flow of a dual circulating fluidized bed gasifier", Biomass Conversion and Biorefinery, Vol. 2(3), April 2012, pp 229-244, doi:10.1007/s13399-012-0035-5
15. Schmid, J.C., Müller, S., Jörg, K., 2012, "Ein innovatives DUAL FLUID Wirbelschichtkonzept zur Dampfvergasung von biogenen Reststoffen", in: SAVT-Zeitschrift: Der Reaktor, Ausgabe 98-2/2012, ISSN 2070-873, <http://www.savt.at/reaktor.asp>
16. S. Koppatz, M. Fuchs, S. Müller, J. Schmid: "Join the research platform FUTURE ENERGY TECHNOLOGY to bring visions to life"; TU Wien, Inst.für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, Wien, 2012, ISBN: 978-3-9502754-3-8; Handbuch - 28 Seiten.
17. Koppatz, S., Schmid, J.C., Pfeifer, C., Hofbauer, H., 2012, "The effect of bed particle inventories with different particle sizes in a dual fluidized bed pilot plant for biomass steam gasification", Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 51(31), June, 2012, pp10492-10502, DOI: 10.1021/ie202353b
18. Schmid, J.C., Hofbauer, H., 2012, "The Dispersed Hold Up of Solids Caused by Simple Constrictions in a Dual Fluidized Bed System", at: 3rd International Symposium on Gasification and its Applications (iSGA-3), October 14-17, 2012, Vanvouver, British Columbia, Canada
19. Groihofer, B., Holzinger, S., 2012, "Wiener Ingenieurpreis - Kaltmodell für Biomassevergaser", in: Beilage zur Tageszeitung Der Standard, 30.Nov.2012, Standard Verlagsgesellschaft m.b.H., Österreich
20. Fuchs, J., 2013, "Ermittlung eines Betriebskennfeldes einer innovativen Zweibettwirbelschicht anhand von Kaltmodelluntersuchungen" Masterarbeit, 31. Jänner 2013, Institut für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben, 8700 Leoben
21. Müller, S., 2013, "Hydrogen from Biomass for Industry - Industrial Application of Hydrogen Production Based on Dual Fluid Gasification", PhD thesis, Vienna University of Technology.
22. Fuchs, J., Schmid, J.C., Hofbauer, H., 2013, "Kaltmodelluntersuchungen zu einer innovativen Zweibettwirbelschicht", in: Tagungsband zum 9. Minisymposium der Verfahrenstechnik, 17.-18. April 2013, Leoben, Österreich

23. Martinovic, D., 2013, "Kaltmodellversuche und MSR-Konzept einer Zweibett-Wirbelschicht-Vergasungsanlage", Diplomarbeit, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, TU Wien, August 2013
24. Diem, R., Müller, S., Fuchs, S., Schmid, J.C., Hofbauer, H., 2013, "Experimental Investigation of Sorption Enhanced Reforming with Limestone from Iron Production", in: Proceedings of the International Conference on Polygeneration Strategies (ICPS13), 3-5 Sept. 2013, Vienna, Austria, ISBN: 978-3-9502754-8-3
25. Müller, S., Koppatz, S., Fuchs, M., Pröll, T., Hofbauer, H., 2013, "Hydrogen Production Based on Conventional Dual Fluid Gasification versus Sorption Enhanced Reforming", in: Proceedings of the International Conference on Polygeneration Strategies (ICPS13), 3-5 Sept. 2013, Vienna, Austria, ISBN: 978-3-9502754-8-3
26. Schmid, J.C., Hofbauer, H., 2013, "Current Scientific Results as Basis for Dual Fluid Technology Development", at: International Conference on Polygeneration Strategies (ICPS13), 3-5 Sept. 2013, Vienna, Austria
27. Weitzer, M., 2014, "Stahlbau einer Zweibettwirbelschicht-Versuchsanlage", Bachelorarbeit, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, Technische Universität Wien, Jänner 2014
28. Kolbitsch, M., Schmid, J.C., Diem, R., Müller, S., Hofbauer, H., 2014, "Influence of Fuel Feeding Position on Sorption Enhanced Reforming in a Dual Fluid Gasifier" in: Proceedings of the 11th International Conference on Circulating Fluidized Bed Technology (CFB11), 14-17 May 2014, Beijing, China
29. Schmid, J.C., Müller, S., Hofbauer, H., 2014, "A Novel Dual Fluid Gasifier at Vienna University of Technology", in: Proceedings of the 1st International Conference on Renewable Energy Gas Technology (REGATEC), 22-23 May 2014, Malmö, Sweden
30. Schmid, J.C., Müller, S., Hofbauer, H., 2014, "Eine neue Generation der DUAL FLUID Dampfvergasung als Versuchsanlage an der TU Wien", in: Tagungsband zum 10. Minisymposium der Verfahrenstechnik, 17.-18. Juni 2014, Wien, Österreich
31. Schmid, J.C., 2014, "Development of a novel dual fluidized bed gasification system for increased fuel flexibility", doctoral thesis, Institute of Chemical Engineering, Vienna University of Technology, August 2014, ISBN 978-3-9502754-6-9
32. Schmalzl, M., 2014, "Implementierung der MSR-Technik einer 100 kW DUAL FLUID Versuchsanlage zur Vergasung von Festbrennstoffen", Diplomarbeit, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, TU Wien, August 2014
33. Diem, R., Schmid, J.C., Hofbauer, H., 2014, "Next Generation Dual Fluid Gasifier: Realization of Technical Measures for the Improvement of a Gasification Test Plant", in: Proc. of the 4th International Symposium on Gasification and its Applications (iSGA-4), 2-5 Sept. 2014, Vienna, Austria
34. Kolbitsch, M., Müller, S., Hofbauer, H., 2014, "State of the Art Measurement Methods for the Evaluation of Experiments with Dual Fluid Gasification Systems", in: Proc. of the 4th International Symposium on Gasification and its Applications (iSGA-4), 2-5 Sept. 2014, Vienna, Austria
35. Schmalzl, M., Müller, S., Hofbauer, H., 2014, "Start-Up of the Automation Control System of a New Dual Fluid Test Plant for the Gasification of Solid Fuels", in: Proc. of the 4th International Symposium on Gasification and its Applications (iSGA-4), 2-5 Sept. 2014, Vienna, Austria
36. Schmid, J.C., Müller, S., Hofbauer, H., 2014, "Test Plant Engineering and Construction of a Dual Circulating Fluidized Bed System for the Conversion of Solid Fuels", in: Proc. of the 4th International Symposium on Gasification and its Applications (iSGA-4), 2-5 Sept. 2014, Vienna, Austria

4.3 Im Rahmen des Projektes G-volution II veröffentlichte Patente

- Pröll, T., Schmid, J., Pfeifer, C., Hofbauer, H., 2011, "Verbessertes Wirbelschichtreaktorsystem", Patent: AT509586A4 & AT509586B8, Veröffentlichung: 15.10.2011, Patentinhaber: Technische Universität Wien
- Schmid, J., Pfeifer, C., Pröll, T., Kitzler, H., Hofbauer, H., 2012, "Wirbelschichtreaktorsystem", Patent: AT510228A1, WO2012/009737A1, Veröffentlichung: 15.02.2012, Patentinhaber: Technische Universität Wien
- Schmid, J., Pröll, T., Hofbauer, H., 2014, "Wirbelschichtreaktorsystem", Patent: AT513490A4 & AT513490B1, Veröffentlichung: 15.05.2014, Patentinhaber: Technische Universität Wien

5 Ausblick und Empfehlungen

Das Projekt G-volution II ermöglichte die Fortführung des im Projekt G-volution formulierten Ansatzes zur Verbesserung der Fluidodynamik der Zweibettwirbelschichtdampfvergasung. Im Projektes G-volution II konnte die verbesserte Fluidodynamik im Vergasersystem mit Hilfe eines neuen Kaltmodelles und durch Versuche mit der neuen 100 kW Versuchsanlage demonstriert und experimentell bestätigt werden. Die Projektergebnisse liefern somit einen strategisch wichtigen Beitrag zum Scale-Up der patentierten Technologie für kommerzielle Anwendungen.

Die zukünftigen Forschungsaktivitäten zielen somit auf die kommerzielle Verwertung der Technologie ab. Die Verwertungsaktivitäten der Patentrechte wird von Seiten der TU Wien mit großen Engagement fortgeführt. Zum Beispiel wurden bereits in Ländern mit aussichtreichen Marktchancen, wie Brasilien, USA und Australien, Patente angemeldet. Weitere Versuchskampagnen sollen zu aussagekräftige Daten mit unterschiedlichen Brennstoffen führen, die das „Scale-up“ des Verfahrens, je nach alternativer Brennstoffart, mit größtmöglicher Sicherheit vorbereiten. Derzeit läuft die Suche nach potenziellen und nachhaltigen Kooperationspartnern aus der Industrie, für die die Vergasungstechnologie einen wertvollen Beitrag hinsichtlich Ressourceneffizienz und Erhöhung des Anteils an erneuerbarer Energie leisten kann. Die Forschungsaktivitäten der Technischen Universität Wien konzentriert sich dabei auf die tiefgehende experimentelle Untersuchung des Verfahrens, sowie die wissenschaftliche Begleitung des „Scale-up“ mittels Modellierung & Simulation. Ein herausragender Punkt ist, dass die im Projekt G-volutioun II neu gebaute Forschungsanlage mit 100kW Brennstoffleitung eine signifikante Größe besitzt. Damit sind die Messdaten und Ergebnisse des Versuchsbetriebes belastbar für die Vorausschau auf industriell großtechnisch ausgeführte Anlagen, im Gegensatz zu üblichen Versuchsdaten kleineren Laborapparaturen. Unverzichtbar ist dabei aber begleitende Simulationsarbeit, um die gewonnenen Daten mit größtmöglicher Sicherheit auf industriell relevante Prozesse umlegen zu können. Auf diesem Wege soll sichergestellt werden, dass die Forschungsaktivitäten der Technischen Universität Wien den größtmöglichen Beitrag zur Erreichung der energiepolitischen Ziele auf österreichischer und europäischer Ebene leisten.

5.1 Mögliche Anwendungen und Zielgruppen

Das untersuchte Verfahren eignet sich für die Einbindung unterschiedlicher Festbrennstoffe in das bestehende Energiesystem. Festbrennstoffe wie Biomasse, biogene Reststoffe, Industrieabfälle aus regenerativen Quellen können zur Bereitstellung eines heizwertreichen Gases genutzt werden. Die Versuchsanlage kann aber auch dazu herangezogen werden, CO₂ aus fossilen Festbrennstoffen (Kohle) für die Abscheidung vorzubereiten. Somit ergibt sich ein weites Anwendungsspektrum. Wichtigste Zielgruppe stellen energieintensive Betriebe dar, bei denen entsprechende Reststofffraktionen anfallen, die sich für energetische Wiederverwertung eignen. Das verbliebene Projektkernteam ist bemüht, weitere Anwendungsideen durch kompetente Forschungsarbeit wissenschaftlich zu begleiten und die Umsetzung in unterschiedlichen Anwendungsfällen zu unterstützen.

5.2 Verwendung der Ergebnisse und weitere Vorgehensweise

Die neu errichtete Versuchsanlage wird in weiterer Folge für weitere experimentelle Kampagnen eingesetzt. Dabei sollen unterschiedliche kostengünstige Festbrennstoffe untersucht werden. Die gewonnenen Daten können mit dem erstellten Simulationsmodell validiert und in weiterer Folge für die Umsetzung industrieller Anlagen herangezogen werden. Auf diesem Wege kann die Versuchsanlage einen wertvollen Beitrag leisten, fossile CO₂-Emissionen zu reduzieren und den Anteil erneuerbarer Energie in der industriellen Anwendung zu erhöhen. Das Kernprojektteam konnte für Folgeprojekte gehalten werden und begleitet die weiteren Forschungsaktivitäten. Aus dem Umfeld werden zahlreiche Interessensbekundungen an die Universität herangetragen. Die Technische Universität Wien hat Interesse die Verwertung der gesicherten „Know-How-Rechte“ voranzutreiben.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Anthony, E.J., 1995, "Fluidized bed combustion of alternative solid fuels; status, successes and problems of the technology", Prog. Energy Combust. Sci. Vol.21, pp.239-268
- [2] Basu, P., 2006, "Combustion and Gasification in Fluidized Beds", CRC Press
- [3] Hofbauer, H., Veronik, G., Fleck, T., Rauch, R., 1997, "The FICFB gasification process", Developments in Thermochemical Biomass conversion Vol.2 pp 1016-1025
- [4] Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H., 2009, "Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren", 2. Auflage, Verlag: Springer
- [5] Bridgwater, A.V., 1995, "The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation", Fuel. 14: 631–65
- [6] Hofbauer, H., Rauch, R., Fürnsinn, S., Aichernig, C., 2006, "Energiezentrale Güssing – Energiezentrale zur Umwandlung von biogenen Roh- und Reststoffen einer Region in Wärme, Strom, BioSNG und flüssigen Kraftstoffe", Projektbericht, Energiesysteme der Zukunft, September 2005, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 79/2006
- [7] Kotik, J., 2010, "Über den Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf Basis der Wirbelschicht-Dampfvergasung fester Biomasse am Beispiel des Biomassekraftwerks Oberwart", Dissertation, Technische Universität Wien.
- [8] Müller, S., 2013, "Hydrogen from Biomass for Industry - Industrial Application of Hydrogen Production Based on Dual Fluid Gasification", PhD thesis, Vienna University of Technology, ISBN: 978-3-9502754-5-2.
- [9] Schmid, J.C., Pröll, T., Diaz, I., Hafner, C., Jörg, K., Pfeifer, C., Hofbauer, H., 2011, "G-VOLUTION: Biomasse-Dampfvergasung der zweiten Generation", Neue Energien 2020, publizierbarer Endbericht, Klima und Energiefonds managed by FFG, Technische Universität Wien, TECON Engineering GmbH, 31.01.2011
- [10] Schmid, J.C., 2014, "Development of a novel dual fluidized bed gasification system for increased fuel flexibility", doctoral thesis, Institute of Chemical Engineering, Vienna University of Technology, August 2014, ISBN 978-3-9502754-6-9
- [11] Fuchs, J., 2013, "Ermittlung eines Betriebskennfeldes einer innovativen Zweibettwirbelschicht anhand von Kaltmodelluntersuchungen", Masterarbeit, Institut für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben, 31. Jänner 2013
- [12] Martinovic, D., 2013, "Kaltmodellversuche und MSR-Konzept einer Zweibett-Wirbelschicht-Vergasungsanlage", Diplomarbeit, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, Technische Universität Wien, August 2013
- [13] Weitzer, M., 2014, "Stahlbau einer Zweibettwirbelschicht-Versuchsanlage", Bachelorarbeit, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, Technische Universität Wien, Jänner 2014

- [14] Schmalzl, M., 2014, "Implementierung der MSR-Technik einer 100 kW DUAL FLUID Versuchsanlage zur Vergasung von Festbrennstoffen", Diplomarbeit, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, TU Wien, August 2014
- [15] Koppatz, S., Schmid, J.C., Pfeifer, C., Hofbauer, H., 2012, "The effect of bed particle inventories with different particle sizes in a dual fluidized bed pilot plant for biomass steam gasification", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 51(31), June, 2012, pp10492-10502, DOI:10.1021/ie202353b
- [16] Hofbauer H., Rauch R., (2000), "Stoichiometric water consumption of steam gasification by the FICFB-gasification process", in: *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*, Vol. 1, pp.199–208, ISBN 0-632-05533-2
- [17] Koppatz S., Pfeifer C., Hofbauer H., (2012), "Comparison of the performance behavior of silica sand and olivine in a dual fluidized bed reactor system for steam gasification of biomass at pilot plant scale", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 175, pp.468–483, doi:10.1016/j.cej.2011.09.071
- [18] Kirnbauer, F., Hofbauer, H., 2011, "Investigations on Bed Material Changes in a Dual Fluidized Bed Steam Gasification Plant in Güssing, Austria", *Energy & Fuels* (2011), 25, 3793-3798, doi: 10.1021/ef200746c
- [19] Kirnbauer, F., Hofbauer, H., 2013, "The Mechanism of Bed Material Coating in Dual Fluidized Bed Biomass Steam Gasification Plants and its Impact on Plant Optimization", *Powder Technology* (2013), 245, 94-104. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.04.022.
- [20] Kolbitsch, M., Schmid, J.C., Diem, R., Müller, S., Hofbauer, H., 2014, "Influence of Fuel Feeding Position on Sorption Enhanced Reforming in a Dual Fluid Gasifier" – Poster presentation at: 11th International Conference on Circulating Fluidized Bed Technology (CFB11), 14-17 May 2014, Beijing, China
- [21] Schmid, J.C., Wolfesberger, U., Koppatz, S., Pfeifer, C., Hofbauer, H., 2011, "Variation of Feedstock in a Dual Fluidized Bed Steam Gasifier - Influence on Product Gas, Tar Content and Composition", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 31 (2), pp. 205-215, July 2012, Wiley, DOI:10.1002/ep.11607
- [22] Kitzler H., 2013, "Zweibettwirbelschicht-Dampfvergasung von biogenen, ascheintensiven Brenn- und Reststoffen – Einfluss der Asche auf den Prozess ", doctoral thesis, Vienna University of Technology, Austria
- [23] Wilk, V., 2013, "Extending the range of feedstock of the dual fluidized bed gasification process towards residues and waste", doctoral thesis, Vienna University of Technology, Austria
- [24] Kern S., 2013, "Gasification and co-gasification of coal, biomass and plastics in a dual fluidized bed system", doctoral thesis, Vienna University of Technology, Austria