



Klima- und Energiefonds
www.klimafonds.gv.at



Österreichische Forschungsfördergesellschaft mbH
www.ffg.at

Neue Energien 2020
publizierbarer Endbericht
31.01.2011

G-VOLUTION

Biomasse-Dampfvergaser der zweiten Generation

www.g-volution.at

Dipl.-Ing. (FH) Johannes **SCHMID**¹

Dipl.-Ing. Dr. Tobias **PRÖLL**¹

Dipl.-Ing. Ignacio **DIAZ**¹

Dipl.-Ing. Christina **HAFNER**²

Dipl.-Ing. Dr. Klaus **JÖRG**²

Dipl.-Ing. Dr. Christoph **PFEIFER**¹

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



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



² TECON Engineering GmbH
www.tecon.at

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Schwerpunkte des Projektes	5
1.3	Einordnung in das Programm	5
1.4	Verwendete Methode	6
1.5	Aufbau der Arbeit	7
2	Inhaltliche Darstellung	9
2.1	Arbeitspaket 1 (AP1): Untersuchung wesentlicher Reaktionen (Versuchsreihen)	9
2.2	Arbeitspaket 3 (AP3): Begleitende Modellierung und Simulation (Auswertungen)	13
3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	16
3.1	Resultate aus Arbeitspaket 1 und 3 (AP1 & AP3)	16
3.2	Resultate aus Arbeitspaket 2 (AP2): Design des 100 bis 200kW Gaserzeugers der zweiten Generation	19
3.3	Resultate aus Arbeitspaket 4 (AP4): Markterhebung und strategische Positionierung	29
3.4	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse	31
4	Ausblick und Empfehlungen	34
4.1	Erkenntnisse aus dem Projekt	34
4.2	Verwendung der Ergebnisse und weitere Vorgehensweise	35
4.3	Mögliche Anwendungen des G-VOLUTION Wirbelschichtsystems	35
5	Literaturverzeichnis	36

1 Einleitung

Die Vergasung von Biomasse stellt eine attraktive Technologie mit großem Potential für die Erzeugung von Strom und Wärme, sowie Synthesegas mit anschließender Veredelung zu flüssigen und gasförmigen Energieträgern (Fischer-Tropsch Treibstoffe, BioSNG) dar [1, 2]. Im Rahmen des Projektes G-VOLUTION wurde die Leistungsfähigkeit eines neuen Gaserzeugerdesigns mit expandierter (turbulenter/schneller) Wirbelschicht in Bezug auf den Abbau höherer Kohlenwasserstoffe an einer bestehenden Versuchsanlage für gasförmige Einsatzstoffe untersucht. Aufbauend auf aussagekräftige Versuchsergebnisse konnte das Design für eine neuartige Versuchsanlage erarbeitet und fluiddynamische Eigenschaften des neuen Designs anhand mehrerer adaptierter Kaltmodelle untersucht werden.

Die effiziente Nutzung von Biomasse als Energieträger verringert den Ausstoß von klimawirksamen Gasen, trägt zu einer Verkürzung der Transportwege für Energie bei und verringert die Abhängigkeit von Energieimporten. Die wesentliche Herausforderung dabei ist Nutzungsbereiche für Biomasse abseits der reinen Wärmenutzung zu erschließen. Hier hat die an der TU Wien entwickelte und erstmals in Güssing großtechnisch erfolgreich demonstrierte Wirbelschicht-Dampfvergasungstechnologie für holzartige Biomasse neue Maßstäbe gesetzt [3, 4]. Durch Umwandlung des Festbrennstoffes in ein hochwertiges Synthesegas steht eine Reihe von interessanten Verwertungsmöglichkeiten zur Verfügung. Von der einfachen Umwandlung zu Strom und Wärme in Gasmotoren oder Gasturbinen, über die gekoppelte Erzeugung von erneuerbaren synthetischen Erdgas oder Wasserstoff hin zur Bereitstellung hochwertiger flüssiger Kraftstoffe über die Fischer-Tropsch Synthese. Alle diese Verwertungslinien werden derzeit im Zuge laufender internationaler Projekte untersucht, bzw. bereits in relevantem Maßstab demonstriert [5, 6].

1.1 Aufgabenstellung

Neben der intensiven Forschung an Produktgasverwertungstechnologien stand der in den 1990-er Jahren an der TU Wien entwickelte und im Grunde funktionierende Gaserzeugungsreaktor in den letzten Jahren etwas abseits des Forschungsinteresses. Eine gestiegene Nachfrage aus der Industrie nach Erdgasersatztechnologien, sowie nach einer Erweiterung des Brennstoffspektrums in Bezug auf Korngrößenverteilung und Zusammensetzung (Sägespäne, Rinde, Abfallholz, etc.) rückt nun das eigentliche Herzstück der Technologie, den Gaserzeuger, wieder ins Zentrum des Interesses.

Wie in **Abbildung 1 (B)** dargestellt ist im klassischen System „Güssing“ der Gaserzeuger als stationäre (blasenbildende) Wirbelschicht ausgeführt. Dabei findet der für den Wärmeübergang und für die Teerabbaureaktionen wesentliche Gas/Feststoffkontakt im Wirbelbett statt während im darüber liegenden Freiraum die Feststoffkonzentration stark abgesenkt ist. Diese Aufteilung in „Wirbelbett“ und „Freiraum“ ist speziell bei inhomogenen Brennstoffen problematisch, da feinkörnige Anteile in den Freiraum ausgetragen werden und nur unvollständig reagieren. Dies kann dann zu Teerablagerungen im Produktgasweg führen und die Verfügbarkeit einer Anlage kritisch einschränken.

Untersuchungen an Zweibett-Wirbelschichtsystemen in verwandten Gebieten (Chemical Looping Prozesse), wie in **Abbildung 1 (A)** dargestellt, haben gezeigt, dass eine Erhöhung der Fluidisierungsgeschwindigkeit in den Bereich der turbulenten bis schnellen Wirbelschicht hinein den spezifischen Gas-Feststoffkontakt wesentlich verbessern kann. Dabei wird das Bettmaterial vom Gasstrom teilweise nach oben transportiert, in einer Abscheideeinrichtung wieder abgetrennt und in den unteren Apparateteil zurückgeführt. Dabei ist der Fluidisierungszustand und die einhergehende Zirkulation der Feststoffe innerhalb des Brennstoffreaktors (Vergasungsreaktors) größtenteils unabhängig von der globalen Feststoffzirkulation des Gesamtsystems, die über beide Reaktoren passiert [7].

Die Änderung der Fluidisierungsbedingungen im Gaserzeuger lässt nun folgende Vorteile in Bezug auf den Brennstoffumsatz erwarten:

1. Der Freiraum verschwindet zu Gunsten einer wesentlich mit Feststoff beaufschlagten Zone in der vom Feststoff katalysierte Reaktionen ablaufen können. Feinkörnige Brennstoffanteile sind dadurch nicht mehr problematisch.
2. Das notwendige Reaktionsvolumen des Gaserzeugers kann reduziert werden und eine Maßstabsvergrößerung wird leichter möglich.
3. Der Feststoffabscheider am Austritt des Gaserzeugers sorgt für eine geringe Staubbelastung des Rohproduktgasstromes und hält katalytisch aktive Brennstoffaschepartikel im Gaserzeuger zurück. Eine prinzipielle Effizienzsteigerung der Gaserzeugung ist durch einen selektiven Sauerstofftransport durch das Bettmaterial bei Verwendung geeigneter natürlicher Sauerstoffträger wie z.B. Ilmenit (eisenhaltiges Mineral) zu erwarten.

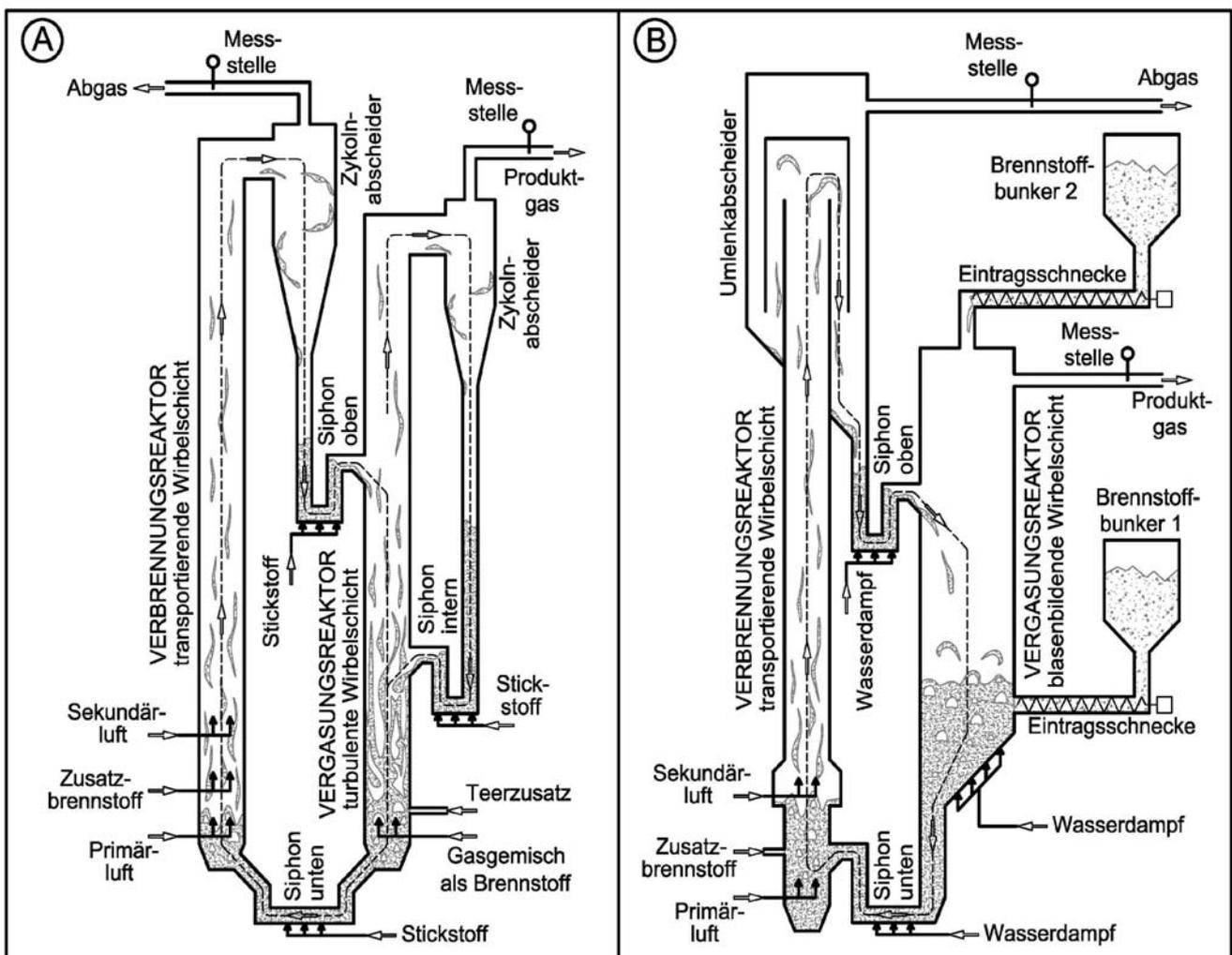


Abbildung 1: bestehende Versuchsanlagen der TU Wien,
 (A): 120kW CLC-Anlage, (B): 100kW DFB-Anlage (Güssing-Konzept)

1.2 Schwerpunkte des Projektes

Generelles Ziel des Projektes ist es, die als richtungsweisend angesehene Technologie der Biomasse-Dampfvergasung mittels Zweibett-Wirbelschicht zur effizienten Umwandlung von erneuerbaren Festbrennstoffen in Synthesegas und weiter zu hochwertigen Energieträgern (Erdgas-Ersatz, Synthetische Treibstoffe, etc.), sowie zu Strom und Wärme, in wesentlichen Punkten weiterzuentwickeln und die österreichische Führungsrolle in diesem Bereich weiter auszubauen. Forschungsergebnisse unterstreichen die Wichtigkeit des Gas-Feststoffkontaktes und vor allem die Anwesenheit von katalytisch wirksamen Feststoffen für gute Umsätze im Vergasungsreaktor **[8 bis 10]**. Im Einzelnen werden folgende Ziele angestrebt werden:

- Einsetzbarkeit einer breiten Brennstoffpalette (weit über Hackgut hinaus)
- Geringerer Teergehalt im Produktgas am Austritt aus dem Vergaser, um einen stabilen Betrieb für alle möglichen Biomassen (auch für feines Brennstoffkorn) zu gewährleisten
- Erhöhung der Gesamt-Effizienz durch niedrigeren Dampfbedarf
- Möglicher Sauerstofftransport mittels Bettmaterial zwischen der Verbrennungswirbelschicht und der Vergasungswirbelschicht
- Ermöglichung des Scale-Up zu großen Anlagenleistungen, wie sie für Syntheseanwendungen erforderlich sind

1.3 Einordnung in das Programm

Das Projekt zielt auf die Sicherstellung der Kriterien der Nachhaltigkeit im ökonomischen, ökologischen und sozialen Sinn ab. Durch Verwendung holzartiger Biomasse wird dem steigenden Importbedarf für Energie entgegengewirkt. Bei holzartigen Brennstoffen besteht in Österreich kein Importbedarf, Erdgas oder andere fossile Brennstoffe können ersetzt werden. Der Einsatz von holzartiger Biomasse ist bis zu einem gewissen, heute noch nicht ausgeschöpften Potenzial ökologisch. Damit die Wertschöpfung in der Region verbleibt werden vorwiegend dezentrale Lösungen favorisiert. Der Einsatz von Abfallbrennstoff ist ebenfalls grundsätzlich nachhaltig. Holzartige Biomasse wird derzeit zunehmend in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen eingesetzt, die auf den Dampfkraftprozess basieren. Dabei fällt ein überwiegender Teil der Energie als Wärme auf niedrigem, für die Industrie nicht nutzbarem Temperaturniveau an. Abhängig von der Anlagengröße sind nur 15-35% als elektrische Energie verfügbar. Die Technologie der Gaserzeugung umgeht dieses Problem und kann einen Großteil der im Primärbrennstoff enthaltenen Energie als wertvollen gasförmigen Brennstoff (ca. 70%) bereitstellen. Das erzeugte Produktgas kann anschließend industriell genutzt werden. Zudem entsteht Wärme auf hohem Temperaturniveau die ebenfalls gut nutzbar ist.

Die Ausrichtung auf eine innovative Biomassenutzung führt, wie am Beispiel Güssing gezeigt werden konnte, zu einer Stärkung der regionalen Wirtschaftsstrukturen und - und das ist weltweit noch nicht oft gelungen - zu einer Entkoppelung von Lebensstandard und CO₂-Fußabdruck. Hier ist die industrielle Nutzbarkeit der bereitgestellten Endenergie entscheidend, die bei der untersuchten Technologie gegeben ist. Durch die industrielle Ausrichtung scheint eine Anwendung im Bereich der Zellstoffindustrie naheliegend, da diese über ausreichende Logistik zur Bereitstellung der Einsatzstoffe verfügt. Durch die Erweiterung des Brennstoffspektrums werden neue Arten holzartiger Biomasse wie Sägemehl, Rinde oder Altholz für die Gaserzeugungstechnologie erschlossen. Der verfolgte Ansatz kann die derzeitige Gaserzeugungstechnologie in Zukunft ablösen. Das Projekt liefert damit einen Beitrag zur Optionenvielfalt für die industrielle Gas-, Wärme- und Stromproduktion.

In Bezug auf die internationale Positionierung des österreichischen Know-Hows ist bereits die klassische Gaserzeugungstechnologie weltweit führend. Die Entwicklung der zweiten technologischen Generation baut dieses Know-How aus und sichert den technologischen Vorsprung österreichischer Firmen und der österreichischen Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Das Projekt zielt auf einen Technologiesprung bei der bereits im klassischen Design innovativen Gaserzeugertechnologie ab. Die Gaserzeugertechnologie ist das Produkt einer Kooperation zwischen Wissenschaft und Wirtschaft, die auch in Zukunft weiter stattfinden soll.

1.4 Verwendete Methode

Innerhalb der Projektdauer waren im AP1 hauptsächlich Versuche im Technikum an der bestehenden Anlage für gasförmige Brennstoffe (vgl. Abb. 1: A), die Bilanzierung dieser Versuchsreihen und deren erweiterte Auswertung (AP3) geplant. Ziel der Technikumsversuche war es festzustellen, ob sich eine erhöhte Geschwindigkeit, mit Auswirkung auf den Strömungszustand im entsprechenden Reaktor positiv auf den Abbau höherer Kohlenwasserstoffe (Teere) auswirkt. Eine Übersicht von möglichen Strömungszuständen in einer Wirbelschicht, mit typischen Verläufen der Feststoffverteilung über die Reaktorhöhe, ist in **Abbildung 2** dargestellt. Die Abbildung 2 zeigt eine überarbeitete bzw. kombinierte Darstellung der Zustände in einer Wirbelschicht und ist aus verschiedenen Quellen entstanden [11 bis 13]. Abbildung 2 soll ein grundsätzliches Verständnis für die Strömungsdynamik in Wirbelschichten schaffen. Zu betrachten war auch, inwieweit ein möglicher Sauerstofftransport durch das Bettmaterial den Teerabbau beeinflusst. Zusätzlich wurde die Wirkung von Dolomit und Ilmenit auf den Teerabbau untersucht. Die verwendeten Bettmaterialien waren Olivin und ein mit Eisen angereicherter Olivin, der so wie Ilmenit einen erhöhten Sauerstofftransport erlaubt. Zuletzt konnten auch Versuchsergebnisse mit Quarzsand erhoben werden. Durch die Variation des Gaseintrages (Leistungsvariation) in den Brennstoffreaktor (Gaserzeuger) wurden grundsätzliche Aussagen zu Betriebspunkten mit erhöhten Fluidisierungszahlen (= erhöhte Gasgeschwindigkeit) im Gaserzeuger ermittelt. Diese Erkenntnisse sollten die Designvorschläge in AP2 beeinflussen.

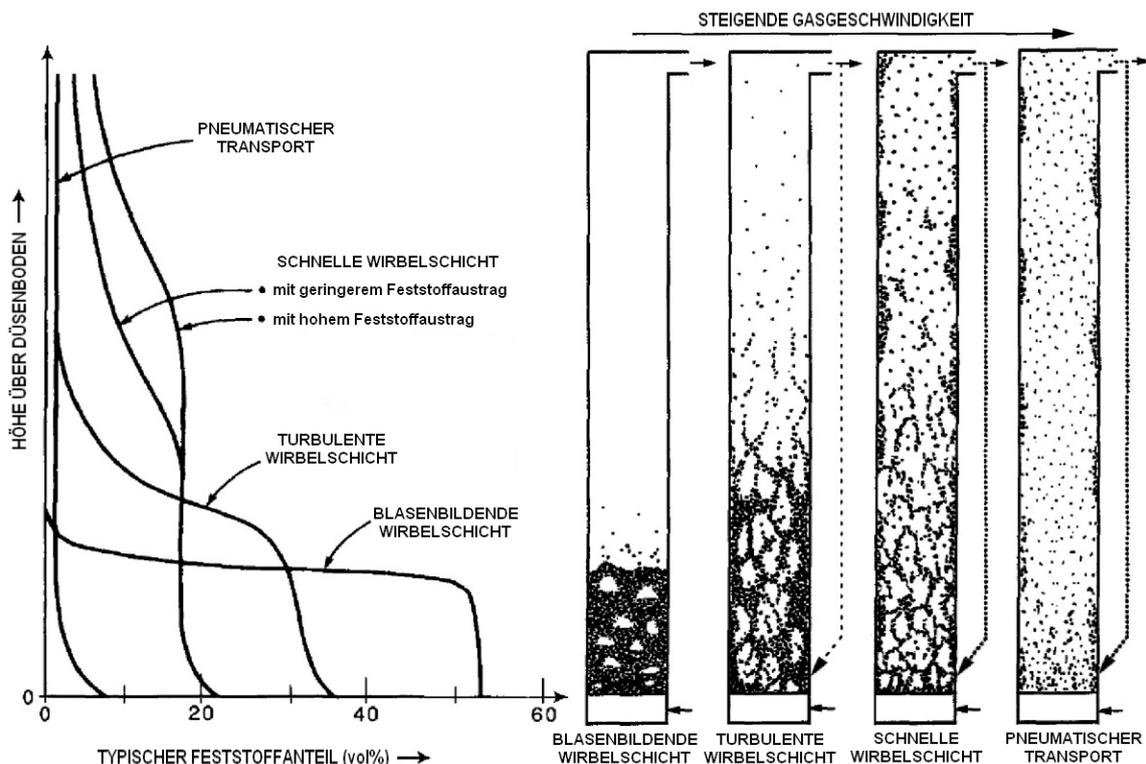


Abbildung 2: Feststoffverteilung und Strömungszustände in einer Wirbelschicht [11 bis 13]

Ab Mitte des Projektverlaufes war vorgesehen, die Aktivitäten des AP2: „Design der neuen Technikumsanlage“ zu beginnen. Hier war eine Konzeptfindung geplant, gefolgt von der Erstellung erster Grobstrukturen der Wirbelschichtgeometrie.

Im Rahmen von AP4 war geplant, erste Erhebungen zur möglichen Vermarktung der Technologie durchzuführen und ein marktstrategisches Konzept für einen geregelten Knowhow-Transfer zu entwickeln.

Ziele laut Projektaufbau:

- **Arbeitspaket 1 (AP1):** Die Auswirkung einer höher expandierten Wirbelschicht (turbulentes bis schnelles Regime) auf die Reaktionen von Kohlenwasserstoffen (Methan und Propan als Modellsubstanzen) im Vergleich zu blasenbildenden Regimen wird quantitativ ermittelt. Verschiedene, natürlich vorkommende Bettmaterialien wie Olivin und Ilmenit werden im Bezug auf Teerabbau und selektiven Sauerstofftransport charakterisiert.
- **Arbeitspaket 2 (AP2):** Eine 100 bis 200kW_{th} G-VOLUTION Wirbelschichtanlage wird konzipiert und das Design wird in einem ersten Schritt an verschiedenen adaptierten Kaltmodellen untersucht. Die gewonnenen Daten sind im zweiten Schritt die Grundlage für die Planung eines Kaltmodelles im Maßstab von 1:3 bis 1:4 zu einer fiktiven Heißeanlage. Fluiddynamische Optimierungen der Systemgeometrie können damit für das Design einer 100 bis 200kW_{th} Heißeanlage noch berücksichtigt werden.
- **Arbeitspaket 3 (AP3):** Sowohl ein Massen- und Energiebilanzmodell zur Messwertvalidierung als auch ein Parametermodell auf Basis der in den Parametervariationen ermittelten Zusammenhänge werden erstellt. Mit dem an der Technikumsanlage validierten Parametermodell steht ein wichtiges Werkzeug für das Basic Engineering industrieller Anlagen zur Verfügung.
- **Arbeitspaket 4 (AP4):** Es wird ein klares marktstrategisches Konzept für den geregelten Knowhow-Transfer bei nachfolgenden Industrieprojekten erstellt. Ziel ist die Bündelung von Detail-Knowhow der TU Wien und dem Umsetzungspotenzial von TECON Engineering. Es soll ein wesentlicher Beitrag zur nachhaltigen Sicherung der Energieversorgung geleistet werden.

1.5 Aufbau der Arbeit

In **Arbeitspaket 1** wurden wichtige Reaktionen des Gaserzeugers an einer bestehenden Versuchsanlage mit turbulenter Fluidisierung untersucht. Bei der für diese Untersuchungen verwendeten Anlage handelt es sich um ein zweifach zirkulierendes Wirbelschichtsystem für gasförmige Brennstoffe laut **Abbildung 1 (A)**. Als Vergleich ist das „alte“ Güssing äquivalente System für feste Brennstoffe, die eine blasenbildende Wirbelschicht beinhaltet, in **Abbildung 1 (B)** zu sehen. In den Versuchen konnten verschiedene natürliche Bettmaterialien in Bezug auf ihre Teerabbauaktivität verglichen werden. Des Weiteren konnte die Relevanz unterschiedlicher Reaktionsmechanismen zum Teerabbau quantifiziert werden (Katalyse an aktiven Zentren versus Teiloxidation nach Sauerstofftransport durch das Bettmaterial).

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Testserie wurde im **Arbeitspaket 2** das Design für eine 100 bis 200 kW_{th} Technikumsanlage erarbeitet und fluiddynamisch anhand von mehreren adaptierten Kaltmodellen untersucht. Nur durch diese umfangreichen Versuchsreihen war die Planung einer geometrisch genau definierten Versuchsanlage für weitere Untersuchungen zu den komplexen Strömungszuständen möglich.

Arbeitspaket 3 umfasst die begleitende Modellierung und Simulation, die einerseits eine akkurate Auswertung der experimentellen Ergebnisse ermöglicht und andererseits als anhand von Messdaten validiertes Parametermodell für das Basic Engineering zukünftiger Anlagen zur Verfügung steht. Im **Arbeitspaket 4** wurde ein marktstrategisches Konzept für den geregelten Knowhow-Transfer bei nachfolgenden Industrieprojekten erstellt. Ziel ist die Kombination von Detail-Knowhow und Umsetzungspotenzial der Projektpartner. Der zeitliche Aufbau bzw. Ablauf des Projektes ist in **Abbildung 3** ersichtlich.

Der Projektablauf als Gantt-Plan skizziert:

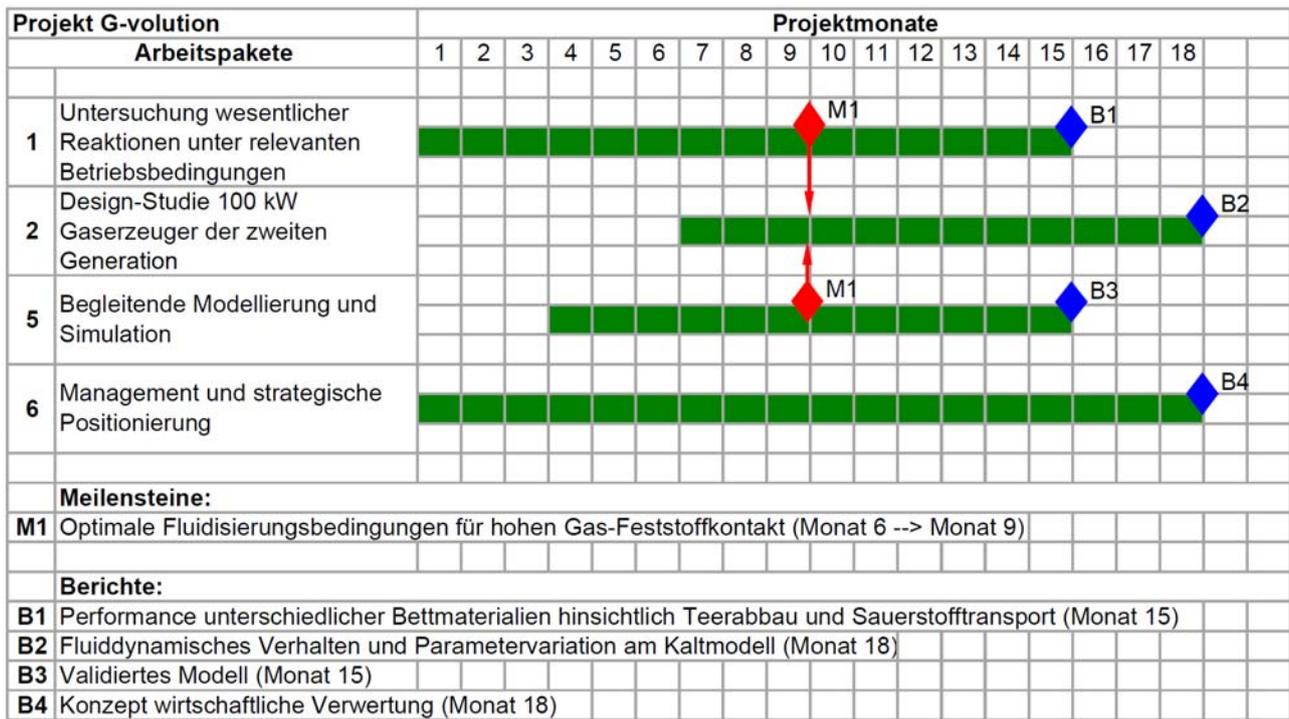


Abbildung 3: Projektablaufplan gemäß Einreichung.

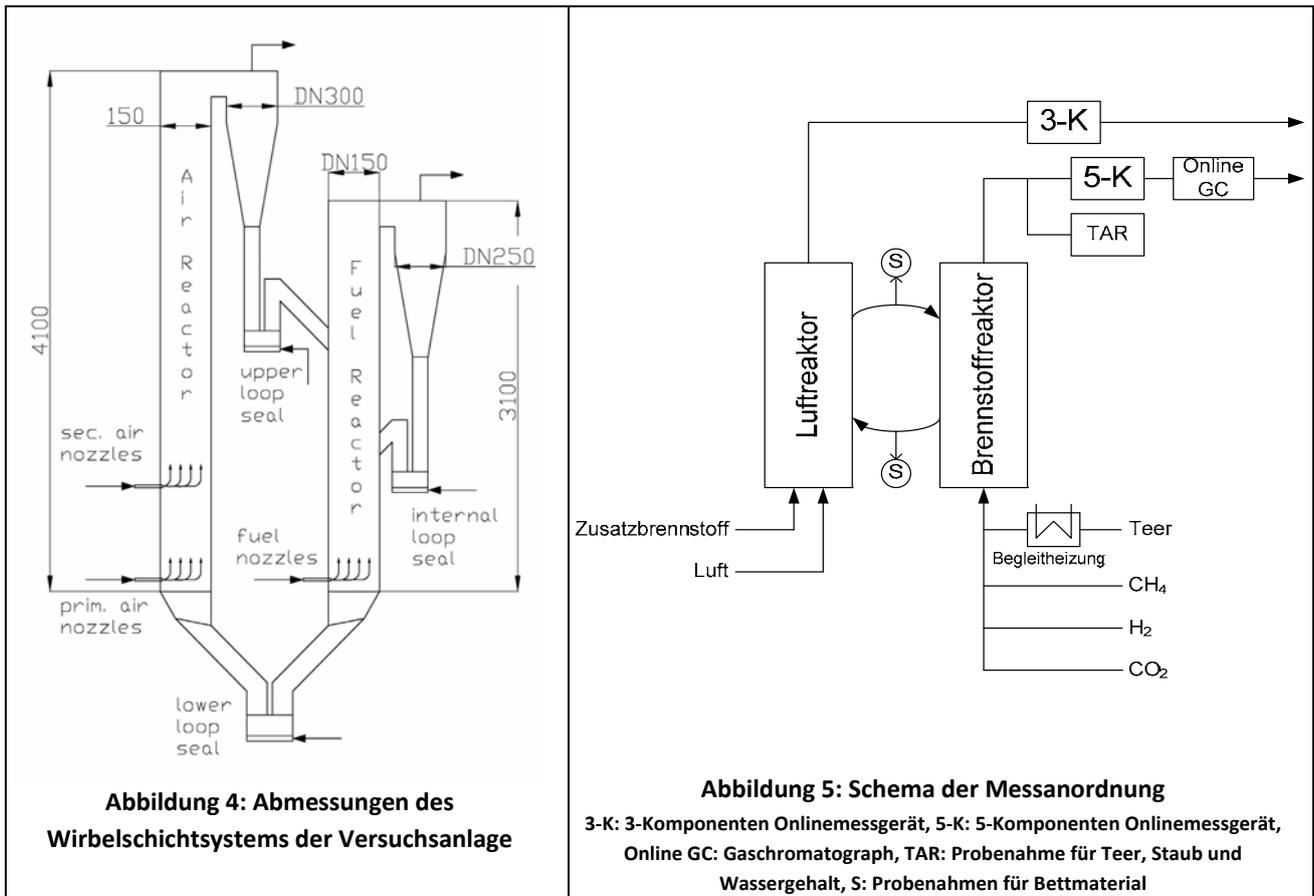
2 Inhaltliche Darstellung

2.1 Arbeitspaket 1 (AP1): Untersuchung wesentlicher Reaktionen (Versuchsreihen)

a.) Anlagenbeschreibung

Eine detaillierte Anlagenskizze mit den Abmessungen der Versuchsanlage ist in **Abbildung 4** zu sehen. Sie besteht aus zwei miteinander verbundenen zirkulierenden Wirbelschichten. Unterschieden wird dabei zwischen dem Luft- (Air-Reactor) und einem Brennstoffreaktor (Fuel-Reactor). In der gegenständlichen Betriebsweise entspricht also der Luftreaktor dem Verbrennungsteil und der Brennstoffreaktor dem Vergasungsteil. Das System besitzt zwei Feststoffumlaufsysteme. Die am Kopf des Luftreaktor austreten Feststoffpartikel werden in einem Zyklon vom Gasstrom getrennt und gelangen über den oberen Siphon (upper loop seal) in den Brennstoffreaktor. Durch den unteren Siphon, welcher für die Feststoffe eine hydraulische Verbindung zwischen den beiden Reaktoren herstellt, können die Partikel wieder in den Luftreaktor gelangen, womit sich der globale Feststoffumlauf schließt. Der Brennstoffreaktor besitzt ebenfalls einen Feststoffumlauf welcher sich über den Zyklon des Brennstoffreaktors und den internen Siphon (internal loop seal) ergibt. Obwohl die beiden Reaktoren und Umlaufsysteme miteinander verbunden sind bietet das Design den Vorteil, dass der globale Umlauf weitestgehend vom im Brennstoffreaktor intern umlaufenden Feststoff entkoppelt ist. Die globale Feststoffumlauftrate wird dabei hauptsächlich vom Fluidisierungsregime im Luftreaktor bestimmt. Der obere und untere Siphon verhindern eine Vermischung der Gasströme in den Reaktoren. Die Siphone können prinzipiell mit Luft, Stickstoff oder überhitztem Wasserdampf fluidisiert werden. Die genauere Vorstellung dieses Reaktordesigns ist in anderen Veröffentlichungen der TU Wien beschrieben [14, 15].

Bei den gegenständlichen Versuchsreihen wird der Luftreaktor mit gasförmigen Zusatzbrennstoff und der für die Verbrennungsreaktionen nötigen Luft fluidisiert. Das bedeutet die nötige hohe Geschwindigkeit, bzw. der nötige Strömungszustand im Luftreaktor entsteht durch die zugeführten Gasen und den sich bildenden Abgasen. Ein Transport der Feststoffteilchen über den Luftreaktor ist für den globalen Bettmaterialumlauf ausdrücklich gewollt. Im Brennstoffreaktor wird die Geschwindigkeit, bzw. der Strömungszustand mithilfe des eingeleiteten Gasgemisches aus Methan, Wasserstoff und Kohlendioxid erreicht. Je nach Brennstoffleistung (entspricht dem Volumenstrom des Gasgemisches), Korngröße und Art des Bettmaterials herrschen andere Fluidisierungsverhältnisse im Brennstoffreaktor vor (vgl. Abb. 2). Auch der Austrag von Bettmaterial über den Brennstoffreaktor ist von diesen Strömungszuständen abhängig. Die Siphone sind mit Stickstoff fluidisiert (vgl. Abb. 1: A). Es wird extern also kein Wasserdampf hinzugefügt. Mit dieser Anordnung wird sichergestellt, dass Wasserdampf, der üblicherweise als Fluidisierungsmedium Verwendung finden würde, die Betrachtung der Reaktionskinetik nicht stört oder beeinflusst. Es können somit aussagekräftige Messungen in Bezug auf die Aufgabenstellung realisiert werden. Auch weil der Wasserdampf der sich bei Reaktionen innerhalb des Systems bildet größtenteils im Luftreaktor entsteht und dieser Wasserdampfstrom somit den Brennstoffreaktor nicht passiert.



Der Versuchsaufbau besteht aus der vorher beschriebenen Versuchsanlage inklusive der entsprechend angeordneten Medienzuführungen, Dosiereinrichtungen, Messgeräte und Probenahmen. Ein Schema dazu ist in **Abbildung 5** zu sehen. Der Aufbau gestattet es unter anderem dem Brennstoffreaktor ein Gemisch aus Teer, Methan, Wasserstoff und Kohlendioxid zuzuführen. Dadurch kann die Brennstoffzusammensetzung variiert werden, wodurch sich ein hoher Grad an Flexibilität ergibt. Die Siphone werden mit Stickstoff fluidisiert. In der Durchführung der Experimente wurde der Brennstoff so zusammengesetzt, dass er einem typischen Vergaser-Produktgas entspricht, z.B. ähnlich wie in der 8,5MW_{th} Anlage Güssing, oder in der Vergaser-Technikumsanlage laut Abb. 1: B, jedoch ohne der Wasserdampffluidisierung. Die genaue Zusammensetzung ist in **Tabelle 2** gezeigt. Um ein Kondensieren des zudosierten Teers in den Leitungen zu verhindern ist eine Begleitheizung vorgesehen.

Da bei den Versuchen der Brennstoff im „Brennstoffreaktor“ bzw. „Vergasungsreaktor“ in Summe endotherm umgesetzt wird, muss dem „Luftreaktor“ bzw. „Verbrennungsreaktor“ neben Luft auch ein Zusatzbrennstoff zugeführt werden, der bei exothermen Reaktionen die nötige Wärmeenergie dafür erzeugt. Der Versuchsbetrieb ist also weitestgehend allotherm. Durch diese Betrachtung lässt sich die Energiebilanz um das Reaktorsystem schließen.

Neben einer Vielzahl von Temperatur- und Druckmessstellen wird die Gaszusammensetzung am Brennstoffreaktoraustritt mittels eines 5-Komponenten Rosemount NGA 2000 (CO, CO₂, H₂, O₂, CH₄) Messgerät und einem Syntech Spectras GC 955 Online Gaschromatograph bzw. am Luftreaktoraustritt mit einem 3-Komponenten Rosemount NGA 2000 (CO, CO₂, O₂) Messgerät erfasst. Außer der Gaszusammensetzung besteht auch die Möglichkeit die Teerbelastung im Produktgas des Brennstoffreaktors zu messen. Des Weiteren bietet die Anlage die Möglichkeit Feststoffproben des global umlaufenden Bettmaterials im laufenden Betrieb zu entnehmen. Der Aufbau und die Methoden der Messungen werden in einer anderen Veröffentlichung genauer beschrieben [16].

b.) Versuchsübersicht und Methodik

In Rahmen von Arbeitspaket 1 wurden mehrere Versuche durchgeführt. Die Experimente wurden in zwei Serien geteilt. In der ersten Serie (Versuche 1, 2 und 3) konnte der Sauerstofftransport von Eisen-Olivin und Olivin, sowie der Teeraubbau untersucht werden. Die zweite Versuchsserie (Versuche 4-7) diente dazu, den Einfluss der Fluidisierungsbedingungen auf den Abbau höherer Kohlenwasserstoffe zu untersuchen. Des Weiteren wurde die Wirkung von Ilmenit und Dolomit (Versuch 7 & 8), als Additiv zu Olivin und Quarzsand, zur Verbesserung der Umsetzung von Kohlenwasserstoffe ermittelt. **Tabelle 1** zeigt eine Übersicht zu den Versuchsreihen.

Datum	Name	Versuchsdauer [h]	Bettmaterial	Kurzbeschreibung
05.11.2009	Versuch 1	15	Olivin 200-300 µm	Temperaturvariation mit Olivin 200-300mm
19.11.2009	Versuch 2	18	Olivin 400-600µm	Luftreaktor Lambdavariation mit Teermessungen
27.11.2009	Versuch 3	18	10Fe/Oliv1000 400-600µm	Luftreaktor Lambdavariation mit Teermessungen
15.04.2010	Versuch 4	17	Olivin 100-200µm	Lambdavariation mit Olivin 100-200µm
20.04.2010	Versuch 5	16	Olivin 100-200µm	Lambda- und Temperaturvariation 100-200µm
23.04.2010	Versuch 6	17	Olivin 100-200µm & Dolomit 300µm	Leistungsvariation mit Brennstoffreaktor und Teermessungen, zuletzt: Zugabe von Dolomit
18.06.2010	Versuch 7	14	Olivin 100-200µm & Ilmenit 200µm	Leistungsvariation mit Brennstoffreaktor und Teermessungen, zuletzt: Zugabe von Ilmenit
24.06.2010	Versuch 8	16	Quarz 100-200µm & Dolomit 300µm	Versuch mit Quarzsand 100-200µm und Teermessungen, zuletzt: Zugabe von Dolomit

Tabelle 1: Tabellarische Übersicht Versuchsreihen.

Als Brennstoff wurde ein Gemisch aus CH₄, H₂ und CO₂, dessen elementare Zusammensetzung dem eines typischen Vergasungsproduktgases entspricht, dem Brennstoffreaktor zugeführt. Details zum Gasmisch sind in **Tabelle 2** angegeben.

CH ₄	CO ₂	H ₂
[vol%]	[vol%]	[vol%]
8.5 ± 0.4	36.3±0.5	55.2±0.7

Tabelle 2: Zusammensetzung des Brennstoffgemisches bei den Versuchen 1 bis 8

In mehreren Versuchen wurde 1-Methyl-Naphthalin (C₁₁H₁₀) als Modellsubstanz für Teer dem Brennstoff zugemischt. Als Bettmaterial kamen sowohl natürlicher Olivin, Eisen-Olivin, und Quarzsand zum Einsatz. Olivin ist ein natürlich auftretendes Mineral, das als Mischkristall, bestehend aus Fayalit (Fe₂[SiO₄]) und Forsterit (Mg₂[SiO₄]), vorliegt. Die auftretenden Fe- bzw. Mg-Konzentrationen sind dabei wesentlich von der Abbaustätte des Olivins abhängig. Der Quarzsand enthält vor allem folgende Mineralien: Quarz (SiO₂) 91%, Al₂O₃ 5.5%, Fe₂O₃ 0.3%. Die prozentualen Gehalte der obigen Mineralien sind den Datenblättern des Herstellers entnommen.

c.) Erste Versuchsserie (Versuche 1 bis 3): Auswirkungen des Sauerstofftransportes über das Bettmaterial

Der in den Versuchen verwendete Olivin stammt von der Firma Magnolithe GmbH (Österreich). Bei dem zweiten verwendeten Bettmaterial handelt es sich um Olivin dessen Eisengehalt in einem Sinterverfahren erhöht wurde. Dabei wurden dem natürlichen Olivin in einem 1000°C heißen Ofen 10 Gewichtsprozent Eisenoxid beigemischt. Dieses Bettmaterial wurde vom Laboratoire des Matériaux, Surfaces et Procédés pour la Catalyse an der Université Louis Pasteur - Strasbourg hergestellt und wird als 10Fe/Oliv 1000 bezeichnet. Die Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der verwendeten Bettmaterialien sind in **Tabelle 3** ersichtlich.

Bezeichnung	Anteile in Gewichtsprozent gew%			
	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO
Olivin	47.5 - 50.0	39.0 - 42.0	8.0 - 10.5	< 0.4
10Fe/Oliv 1000	43.0 - 49.0	35.3 - 41.2	16.3 - 20.1	< 0.4

Tabelle 3: Typische Zusammensetzungen von Olivin und mit Eisenoxid angereicherten Olivin.

Durch den höheren Eisengehalt des 10Fe/Oliv 1000 besitzt dieser ein höheres Potential Sauerstoff aufzunehmen und zu transportieren, als natürlicher Olivin [17]. Dem Effekt des Sauerstofftransportes durch verschiedene Bettmaterialien in Vergasungssystemen auf eine teerabbauende Wirkung ist Gegenstand anhaltender Untersuchungen [18, 19]. Die Auswirkungen der Fluidisierung wurden hingegen in der zweiten Versuchsserie untersucht. In der ersten Hälfte des Projektes (erste Versuchsreihe) wurden drei Versuche durchgeführt.

Der Versuch vom 05.11.2009 diente dazu, die Performance von natürlichem Olivin mit kleinerer Partikelgröße bei verschiedenen Temperaturen zu ermitteln. Bei den Versuchen am 19.11.2009 und 27.11.2009 wurde die Luftzahl im Luftreaktor (Verbrennungsreaktor) bei gleichbleibender Brennstoffreakortemperatur (Vergasungsreaktor) variiert. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Oxidationszustände des aus dem Luftreaktor austretenden Bettmaterials. Dies diente dazu den Einfluss auf den Teerabbau infolge des Sauerstofftransportes zu ermitteln. Diese beiden Versuche sind repräsentativ für die zuvor angeführte Aufgabenstellung. Die Ergebnisse dazu werden später näher erläutert. Ein Verweis zur tabellarischen Auflistung der Versuche in **Tabelle 1** sei angeführt.

d.) Zweite Versuchsserie (Versuche 4 bis 8): Auswirkungen des Fluidisierungszustandes des Brennstoffreaktors und von Additiven als Zugabe zum Bettmaterial

In dieser Serie wurde hauptsächlich Olivin mit einer Korngrößenverteilung von 100-200µm verwendet. Der natürliche Olivin als Bettmaterial wurde von der Firma Magnolithe GmbH (Österreich) geliefert. Die **Tabelle 4** zeigt die detaillierte chemische Zusammensetzung des verwendeten Bettmaterials. Im letzten Versuch wurde Quarzsand verwendet, der zum überwiegenden Teil (>90gew.%) aus Siliziumoxid (SiO₂) besteht.

Bezeichnung	Anteile in Gewichtsprozent [gew%]						
	Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	NiO	SiO ₂
Olivin	0.13	0.27	0.11	9.81	48.9	0.23	40.54

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung von natürlichen Olivin.

Das Hauptaugenmerk der zweiten Versuchsserie (Versuche 4 bis 8) lag auf der Betrachtung des Einflusses des Fluidisierungszustandes im Brennstoffreaktor (vgl. Abb.2). Damit bei gleicher Leistung bzw. annähernd gleichen Gasdurchsatz höhere Turbulenzen zwischen Gasphase und Feststoffpartikel erreicht werden können, wurde eine kleinere mittlere Korngröße beim Bettmaterial gewählt. Wie sich in vielen untersuchten chemischen Reaktionsabläufen in anderen Forschungsgebieten gezeigt hat, ist eine gute Gas- Feststoffdurchmischung

Grundvoraussetzung für hohe Umsätze bzw. für einen guten Stoff- und Wärmeaustausch im entsprechenden Reaktor. Während dieser Versuchsläufe wurden auch die Auswirkungen durch die Zugabe verschiedener Additive wie Ilmenit und Dolomit untersucht. Basierend auf aktuellen Ergebnissen und bekannten Erkenntnissen wurden in beiden Fällen bessere Umsätze von Kohlenwasserstoffen und Teeren erwartet. [8 bis 10, 19 bis 22]

Die Versuche 4 und 5 am 15.04.2010 und 20.04.2010 wurden mit einer Spitzenleistung von 48kW im Brennstoffreaktor, für verschiedene Lambda-Werte (λ : <1, =1 und >1) im Luftreaktor und Temperaturen durchgeführt. In den Versuchen 6 und 7 am 23.04.2010 und 18.06.2010 wurde der Abbau von Kohlenwasserstoffen (Methan und Propan als Modellsubstanzen) für verschiedene Leistungen im Brennstoffreaktor quantitativ ermittelt. In den Versuchen 6 bis 7 wurde die Leistungsfähigkeit des Ilmenits und des Dolomits als Additive in Bezug auf den Teerabbau, mit Olivin als Bettmaterial untersucht. Im letzten Versuch am 24.06.2010 wurden die Leistungsfähigkeit von Quarzsand als Bettmaterial bei 48kW Leistung im Brennstoffreaktor, und der Einfluss des Dolomits (in Folge des Prozesses Branntkalk) als Additiv, in Bezug auf den Teerabbau, ermittelt. Auch hier sei ein Verweis zur tabellarischen Auflistung der Versuche in **Tabelle 1** angeführt.

2.2 Arbeitspaket 3 (AP3): Begleitende Modellierung und Simulation (Auswertungen)

Da bei den Versuchen eine Vielzahl von zeit- und ortsabhängigen Messwerten entstehen, ist es sinnvoll aus den Daten während eines konstanten Betriebszustandes Durchschnittswerte zu berechnen, die den Versuch repräsentativ darstellen und Vergleiche ermöglichen. Zur Validierung der Messdaten wurde ein Modell des Versuchsaufbaus erstellt. Das Modell ermöglicht es durch Schließen der Massen- und Energiebilanz um das gesamte System den statistischen Vertrauensbereich der fehlerbehafteten Messungen zu verringern. Die grafische Abbildung des Modells ist in **Abbildung 6** zu sehen. Die Software IPSEpro zusammen mit der am Institut für Verfahrenstechnik entwickelten Bibliothek für Fortschrittliche Energiesysteme (AET-Lib) wurde zur Modellierung verwendet. Dies bietet folgende Vorteile:

- Sowohl Massen- als auch Energiebilanz sind immer für alle Prozesskomponenten erfüllt.
- Überbestimmte Systeme, wie sie bei der Validierung von Messdaten auftreten, lassen sich lösen.
- Vier Stoffklassen lassen sich modellieren:
 - Ideale Gase und deren Gemische
 - Wasser/Wasserdampf als reales Fluid
 - Organische Stoffe bestehend aus den Elementen C, H, O, N, S und Cl
 - Anorganische Stoffe wie zum Beispiel verschiedene Bettmaterialien, Staub, ...

a.) Messdatenvalidierung:

Bei der Messdatenvalidierung bilden die Messergebnisse zusammen mit den modellbeschreibenden Gleichungen ein überbestimmtes System. Dies heißt, mathematisch ausgedrückt, dass mehr Gleichungen als Variablen vorhanden sind. Solche Systeme können mit Hilfe der Methode der Lagrangeschen Multiplikatoren gelöst werden. Dabei wird das System in ein System quadratischer Abweichungen transformiert und der quadratische Fehler minimiert.

$$\sum_i \left(\frac{x_i - \bar{x}_i}{tol_{x_i}} \right)^2 \rightarrow Min \quad (G1)$$

Für einen bestimmten Messwert trägt tol_{xi} der zu erwartenden/auf tretenden Messgenauigkeit Rechnung und beinhaltet außerdem Informationen über den Messfehler der Werte. Der Vergleich zwischen berechneter Abweichung und der bekannten Messtoleranz ermöglicht es, systematische Mess- und Modellfehler zu eruieren. Wenn systematische Fehler ausgeschlossen sind und die Messtoleranzen sinnvoll gewählt wurden beschreibt die ausgeglichene Lösung den tatsächlichen Zustand des Systems am besten. Das Modell bietet neben der Messdatenvalidierung auch die Möglichkeit auf nicht messbare Größen zuzugreifen. So lässt sich auch der globale Bettmaterialumlauf über die Oxidationszustandsdifferenz des Bettmaterials zwischen oberem und unterem Siphon bestimmen.

b.) Umsatz von Kohlenwasserstoffen:

Der Umsatz von Kohlenwasserstoffen $X_{C_iH_j}$ ist definiert als das Verhältnis aus dem im Reaktor umgesetzten Kohlenwasserstoff zu jenem am Reaktoreintritt. Die Kohlenwasserstoffe werden dabei immer auf elementaren Kohlenstoff in den Molekülen bezogen. Er dient als Aussage darüber, wie Kohlenwasserstoffe im Brennstoffreaktor umgesetzt werden. Die Umwandlung erfolgt zu CO , CO_2 und H_2 und bildet ein wichtiges Maß für die katalytische Aktivität des Bettmaterials.

$$X_{C_iH_j} = 1 - \frac{\sum \dot{m}_C(C_xH_y)|_{Austritt}}{\sum \dot{m}_C(C_xH_y)|_{Eintritt}} \quad (G2)$$

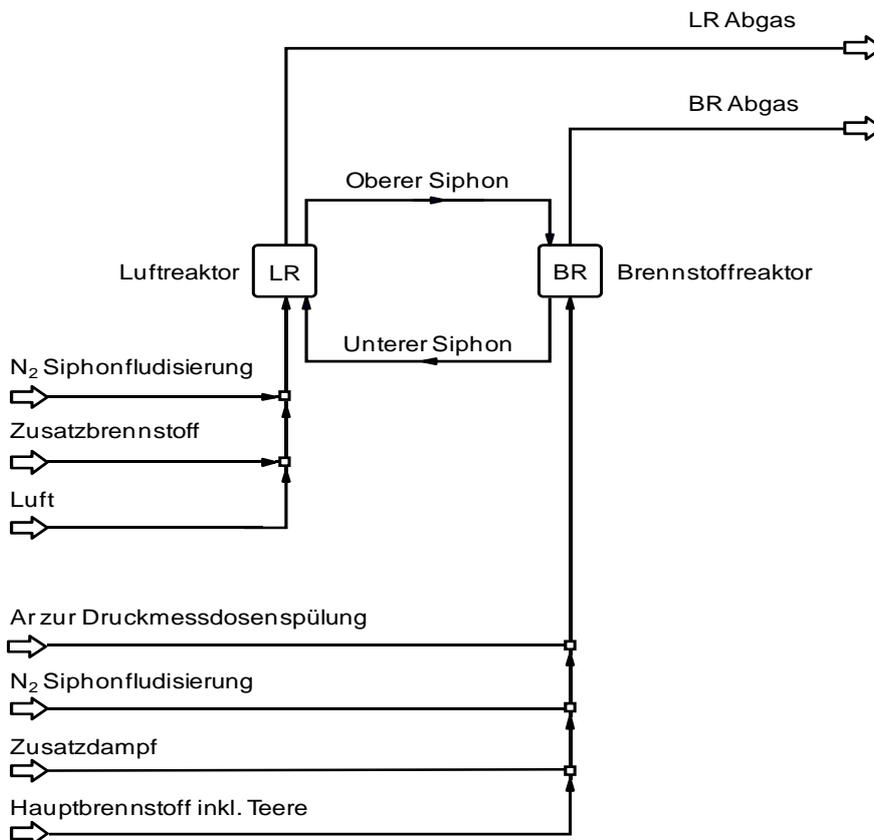


Abbildung 6: Simulationsmodell für die Evaluierung der Massen- und Energiebilanz

c.) Teerumsatz

Der Teerumsatz X_{Teer} ist wie in (G3) definiert und stellt das Verhältnis zwischen dem Teer, der im Reaktor umgewandelt wurde, zu jenem am Reaktoreintritt dar. Auch hier wird auf den elementaren Kohlenstoff im Teer bezogen. Im Unterschied zu $X_{C_{Hj}}$ bezieht sich X_{Teer} nur auf die Teere und liefert somit eine spezifische Kennzahl für den Teerabbau im Reaktor.

$$X_{Teer} = 1 - \frac{\sum \dot{m}_c(Teer)|_{Austritt}}{\sum \dot{m}_c(Teer)|_{Eintritt}} \quad (G3)$$

d.) Lambdawert/Luftzahl

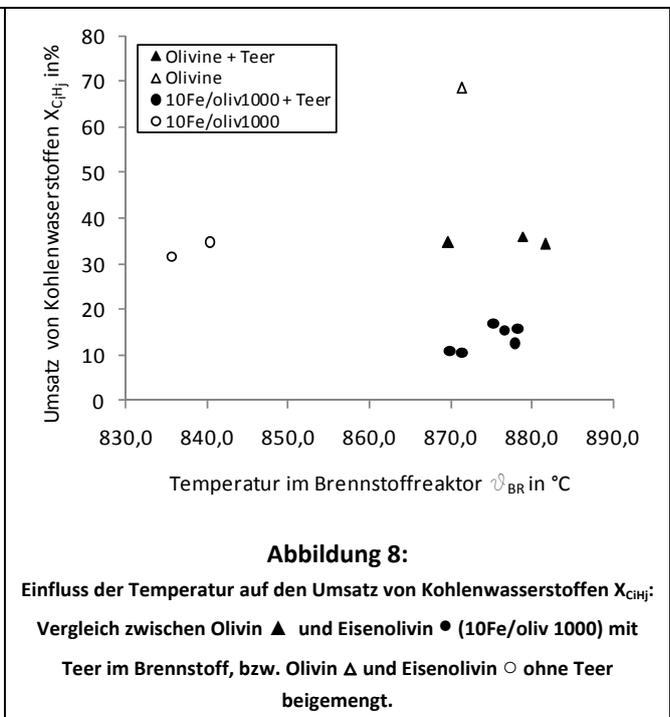
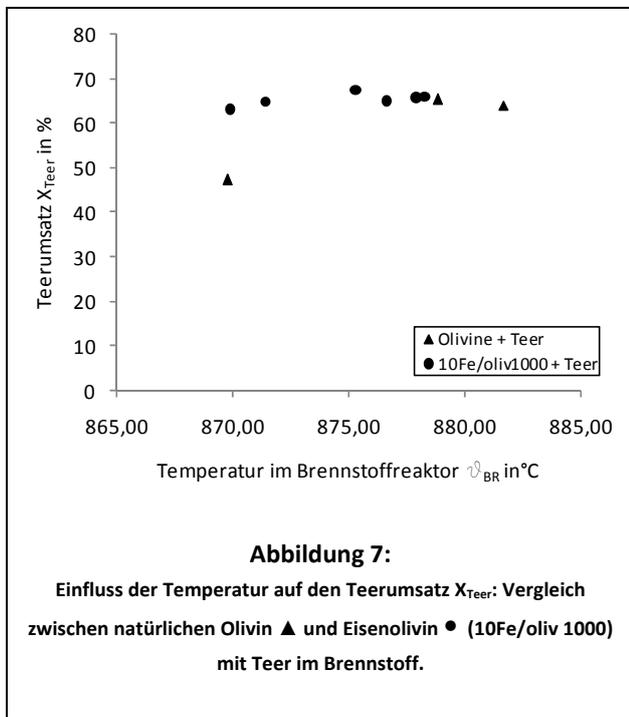
Da mit dem umlaufenden Bettmaterial Sauerstoff transportiert wird stellt die Luftzahl im Brennstoffreaktor eine weitere bedeutende Kennzahl dar. Sie setzt den tatsächlich im Brennstoffreaktor umgesetzten Sauerstoff zu dem theoretisch zur vollständigen Oxidation des Brennstoffs benötigten Sauerstoff ins Verhältnis.

$$\lambda_{BR} = \frac{O_2|_{umgesetzt}}{O_2|_{benötigt}} \quad (G4)$$

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

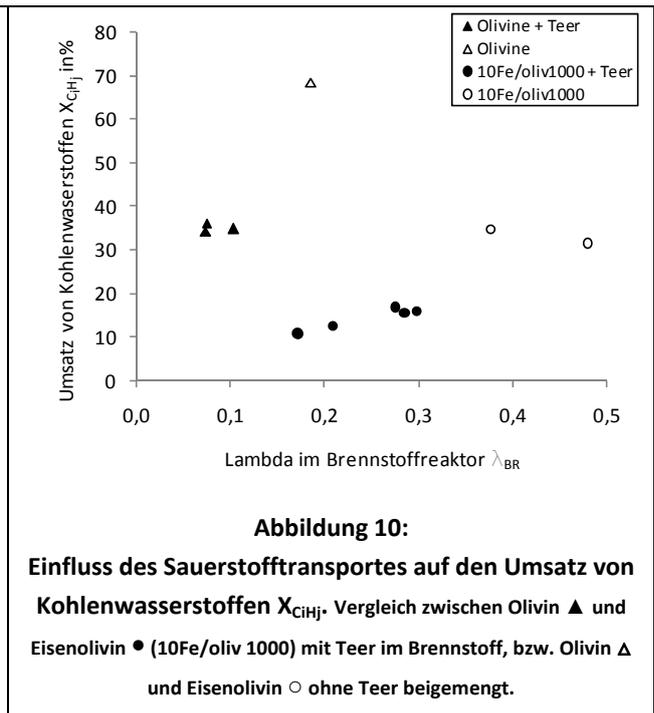
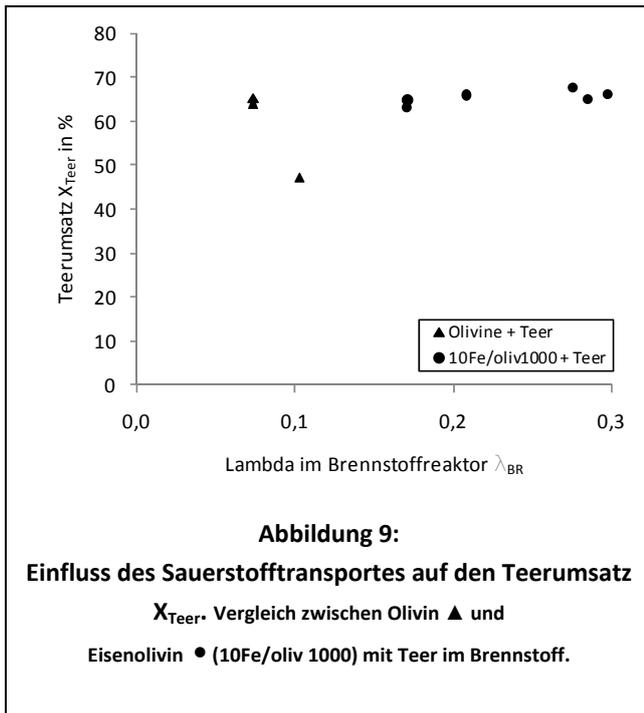
3.1 Resultate aus Arbeitspaket 1 und 3 (AP1 & AP3)

Die erste Versuchsserie (Versuch 1 bis 3) lässt einen quantitativen Vergleich zwischen reinem Olivin und Eisenolivin zu. Der Einfluss verschiedener Fluidisierungszustände im Brennstoffreaktor auf die Gas-Feststoffreaktionen wurde in der zweiten Versuchsserie (Versuch 4 bis 8) betrachtet. Des Weiteren konnte der Einfluss auf den Teerabbau und den Kohlenwasserstoffumsatz durch das Bettmaterial und Zusätzen wie Dolomit und Ilmenit in der zweiten Versuchsserie untersucht werden. Zum Abschluss der zweiten Versuchsserie wurde Quarz, mit und ohne Zugabe von Dolomit, als Bettmaterial verwendet.



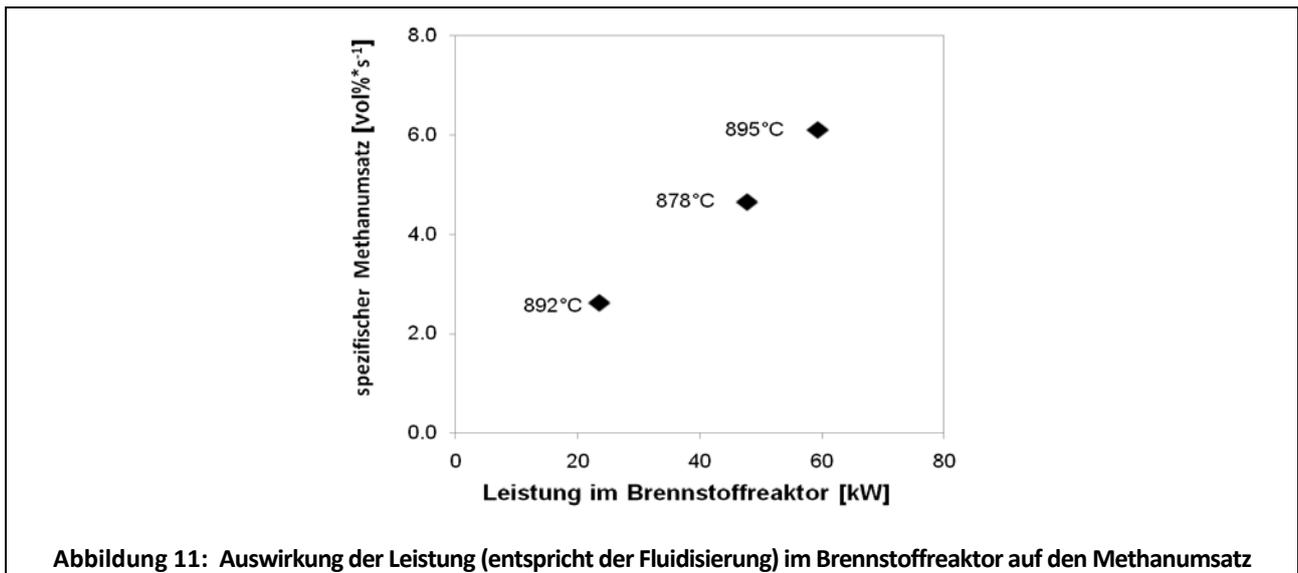
Der Einfluss der Temperatur auf den Teerumsatz X_{Teer} ist in **Abbildung 7** dargestellt. Die Auswertungen zeigen, dass sich kein bedeutender Unterschied bezüglich Teerabbauperformance von natürlichem Olivin verglichen mit Eisenolivin (10Fe/oliv 1000) ableiten lässt. In dem gemessenen Temperaturfenster hat auch die Temperatur auf den Teerumsatz keinen signifikanten Einfluss.

Anders verhält es sich mit dem Umsatz von Kohlenwasserstoffen wie in **Abbildung 8** dargestellt. Nicht mit Eisenoxid angereicherter, natürlicher Olivin zeigt eine wesentlich bessere Kohlenwasserstoffabbaurate als Eisenolivin. Dies gilt sowohl für den Fall in dem Teer dem Brennstoff beigemischt, als auch dann, wenn kein Teer zugegeben wurde.



Der Einfluss des Sauerstofftransportes auf den Teerabbau ist in **Abbildung 9** dargestellt. Die Versuche ergaben, dass sich der Teerumsatz X_{Teer} nur unwesentlich ändert, obwohl im Falle von Eisenolivin signifikant mehr Sauerstoff transportiert bzw. im Brennstoffreaktor umgesetzt wurde.

Ein deutlicher Unterschied lässt sich bezüglich des Umsatzes von Kohlenwasserstoffen X_{CiHj} , wie in **Abbildung 10** dargestellt, ableiten. Es zeigt sich, dass natürlicher Olivin die Kohlenwasserstoffe wesentlich besser abbaut als Eisenolivin. Entgegen der Erwartung geschieht dies, obwohl der natürliche Olivin wesentlich weniger Sauerstoff transportiert.



Die **Abbildung 11** zeigt die Auswirkung der Leistung (Fluidisierung bzw. Strömungszustand) im Brennstoffreaktor auf den spezifischen Methanumsatz. Eine signifikante Erhöhung des verweilzeitsspezifischen Methanumsatzes aufgrund

der stärkeren Fluidisierung ist gegeben. Die stärkere Fluidisierung bedeutet allerdings auch eine kürzere Gasverweilzeit im Reaktor. Es zeigt sich, dass die positiven Auswirkungen der stärkeren Fluidisierung (höhere Vermischung bzw. besserer Gas-Feststoffkontakt) überwiegen und den negativen Effekt der Verringerung der Verweilzeit im Reaktor mehr als kompensiert. Deshalb ist ersichtlich, dass der Umsatz von Methan pro Sekunde (spezifischer Methanumsatz) deutlich höher wird. Im Falle des ersten bis dritten Betriebspunktes um das Zwei- bis fast Dreifache.

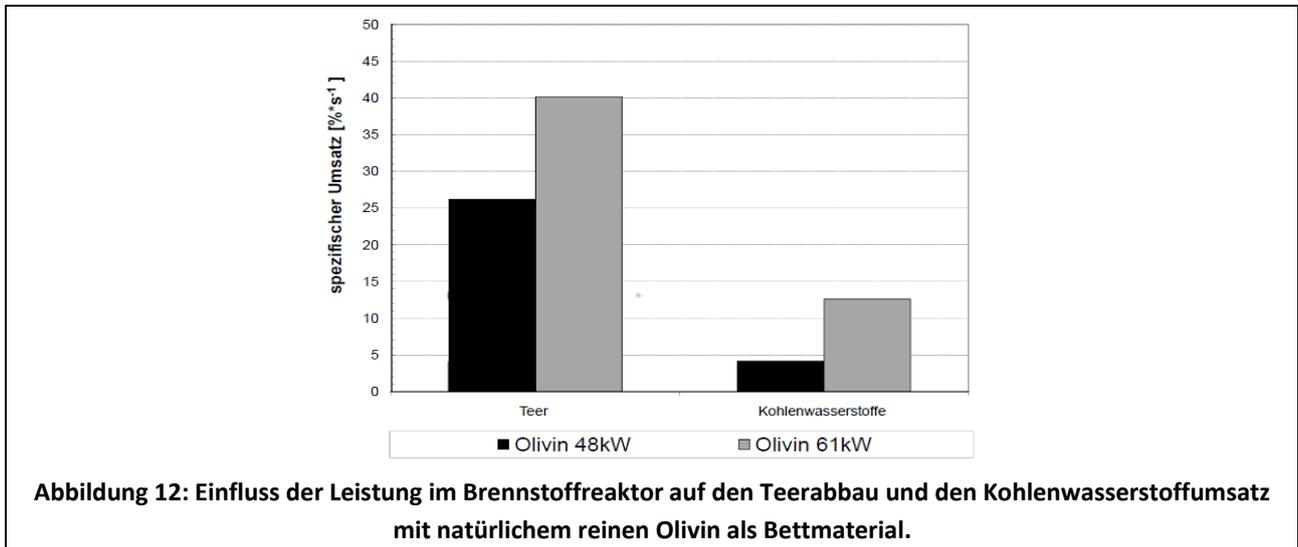


Abbildung 12 zeigt die Prozessperformance in Bezug auf den Teerabbau und den Kohlenwasserstoffumsatz mit Olivin als Bettmaterial. Für zwei verschiedene Leistungen im Brennstoffreaktor wurden die verweilzeitspezifischen Umsätze von Teer und Kohlenwasserstoffen verglichen. Analog zur Abbildung 11 zeigt sich ein wesentlich besserer Teer- und Kohlenwasserstoff-Abbau bei Leistungserhöhung, die eine Erhöhung der Turbulenz mit sich bringt und den Gas-Feststoffkontakt in der Wirbelschicht verbessert.

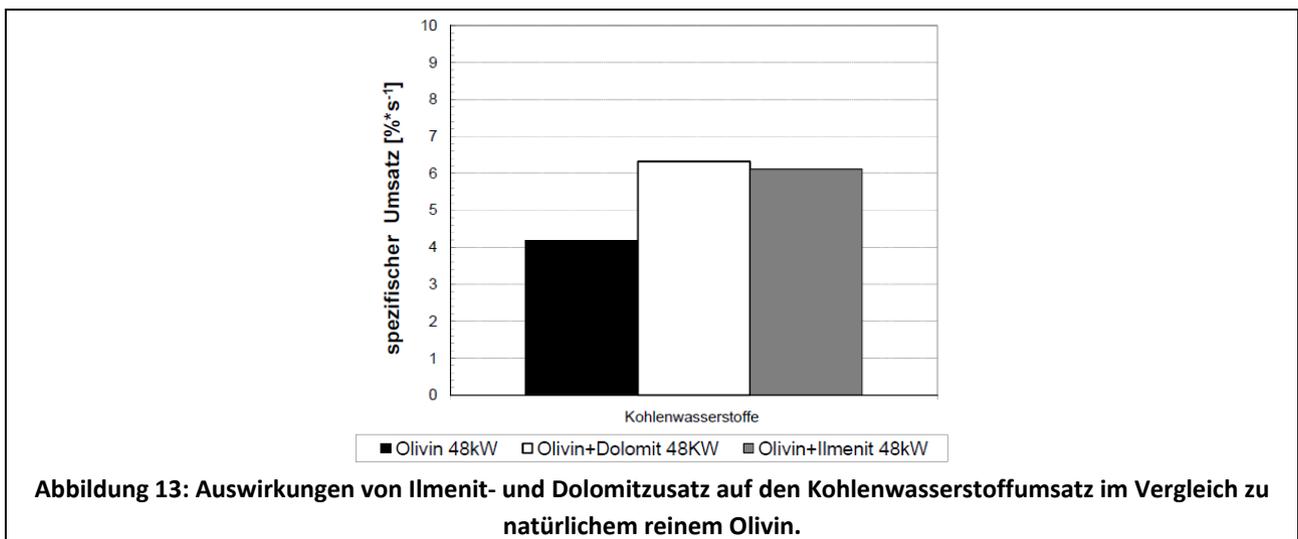


Abbildung 13 vergleicht die Auswirkung der Zugabe von Ilmenit und Dolomit als Additive in Bezug auf den Kohlenwasserstoffumsatz bei 48kW Leistung im Brennstoffreaktor. Durch die Zugabe von Ilmenit und Dolomit zum natürlichen Olivin wurden bessere Kohlenwasserstoff-Umsätze erzielt.

Ähnliche Effekte konnten auch beim Versuch mit Quarzsand und Dolomit in Mischung als Bettmaterial beobachtet werden. Der Teerumsatz wurde mit der Zugabe von Dolomit zum reinen Quarzsand deutlich erhöht, und auch der Umsatz der Kohlenwasserstoffe war höher.

3.2 Resultate aus Arbeitspaket 2 (AP2): Design des 100 bis 200kW Gaserzeugers der zweiten Generation

a.) Bestehende Anlagen der TU Wien als Vergleichssysteme

Die **Abbildung 14 (A)** stellt die an der TU Wien in Betrieb befindlichen 120kW_{th} CLC-Heißeanlage dar (CLC: Chemical Looping Combustion), zu der es auch ein Kaltmodell im Maßstab 1:3 gibt. Die vorhergehend ausgewerteten Versuchsergebnisse sind mithilfe dieser Anlage entstanden. Im Vergleich zum Güssing-Konzept, besteht der markante Unterschied im zweifach zirkulierenden Wirbelschichtsystem. In **Abbildung 14 (B)** wird schematisch das grundlegende Funktionsprinzip einer weiteren bestehenden Versuchsanlage gezeigt. Hier handelt es sich um die aktuelle Ausbaustufe der 100kW_{th} Vergaseranlage (DFB: Dual Fluidized Bed). Umgesetzt wurde dieses Prinzip bei mehreren Technikums-Heißeanlagen und Kaltmodellen an der TU Wien, sowie bei großtechnisch Anlagen wie in Güssing oder Oberwart im Burgenland.

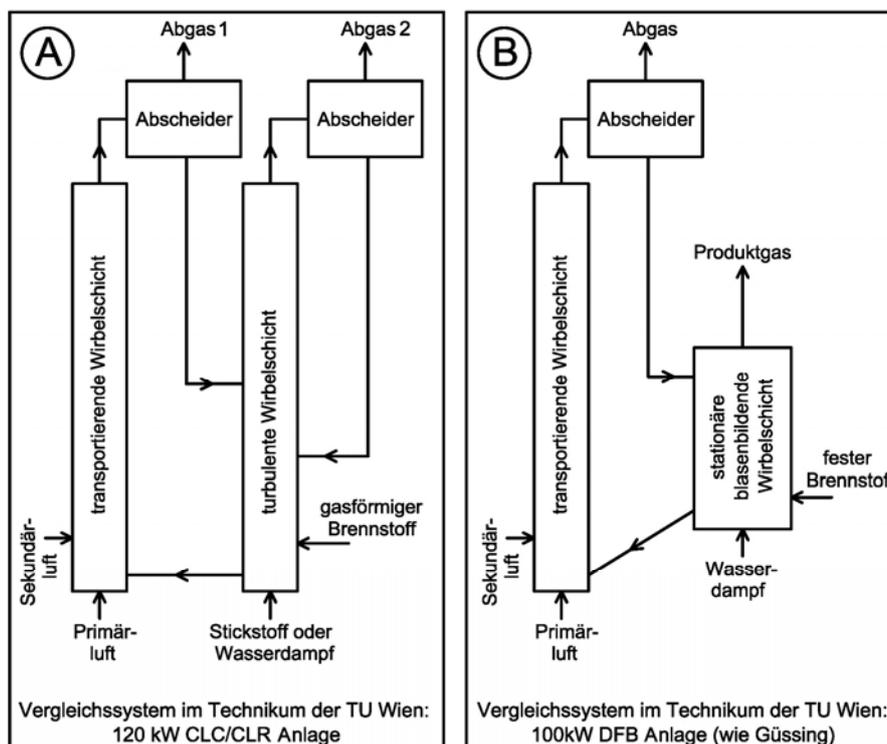


Abbildung 14: Anlagenkonzepte zu bestehenden Versuchsanlagen an der TU Wien

Beide Wirbelschichtsysteme haben als innovativen Teil eine unten liegende Verbindung zwischen den Reaktoren in dem das Bettmaterial, über eine Rutsche oder einen Siphon, von einer Seite zurück in die andere fließen kann. Im Sinne dieser Idee, deren Ursprung an der TU Wien zu finden ist, soll die Verbindung auch in der neuen Anlage erhalten bleiben [23 bis 26]. Diese unten liegende Verbindung gewährleistet die Entkoppelung des globalen Feststoffumlaufs von der internen Feststoffzirkulation des zweiten Reaktors laut Abb. 14 (A). Die Entkoppelung spielt für die Prozessregelung im System eine unverzichtbare Rolle. Dies ist sozusagen ein bereits fixierter Punkt beim Design der neuen Anlage.

b.) Brennstoffvariation und Scale-Up Kriterien

Aufgrund der Zielsetzung für die neu zu entwickelnde Anlage ist eine breite Brennstoffpalette anzustreben. In Bezug auf die Brennstoffart sowie die Stückgröße des Brennstoffes soll eine möglichst große Variabilität gegeben sein. Zusätzlich ist das Einbringen von flüssigen Brennstoffen in den Reaktor auch eine Möglichkeit. Aus den praktischen Erfahrungen der bestehenden Anlagen kann gesagt werden, dass ein optimaler Betrieb des stationären Vergasungs-Wirbelschichtreaktors laut Abb. 14 (B) nur bei gleich bleibender Brennstoffstückigkeit gegeben ist. Vor allem zu feine Brennstoffteilchen werden über das Freeboard ausgetragen und führen in den nachfolgenden Anlagenteilen zu Problemen und hohen Teergehalten im Produktgasstrom. Brennstoffe wie biogene Reststoffe, Altholz, Rindenmulch und verschiedenste Holzabfälle mit unterschiedlichster Stückigkeit sollen ohne entscheidende Nachteile in der Vergasungsanlage umgesetzt werden können, da diese als alternative Brennstoffe ein großes wirtschaftliches Potential aufweisen [27]. Mit Rücksicht auf das Scale-Up hin zu großen Industrieanlagen muss ebenfalls angemerkt werden, dass eine stationär betriebene Wirbelschicht ab einer gewissen Anlagengröße (ab ca. 170MW_{th}) nicht mehr zweckmäßig ist. Der Platz- bzw. Flächenbedarf steigt dazu in Bereiche, in denen ein notwendigerweise optimaler Betrieb der stationären (blasenbildenden) Wirbelschicht nicht mehr gewährleistet werden kann. Diese Erkenntnisse schränken die stationäre Wirbelschicht in ihren Anwendungsgebieten ein. Dies ist auch der Grund warum vermehrt zirkulierende Wirbelschichtsysteme mit Brennstoffleistungen bis zu 970MW_{th} gebaut werden [28, 29].

Um bei der grundlegenden Festlegung der Reaktortypen nicht von vornherein diese Einschränkungen einzubauen, liegt es auf der Hand den stationären Wirbelschichtteil zu hinterfragen und gegebenenfalls durch eine höher fluidisierte Wirbelschicht, ähnlich der CLC-Anlage der TU Wien, zu ersetzen. Damit wären die voran genannten Nachteile nicht mehr vorhanden. Ein schnell fluidisierter Wirbelschichtreaktor, der ja zweckmäßigerweise als zirkulierendes System ausgeführt wird, ist aufgrund seiner fluiddynamischen Charakteristik auch für feine Feststoffe geeignet. Ein großer Vorteil bietet zusätzlich die Tatsache, dass Brennstoffe mit höherem Heizwert problemlos in transportierende Wirbelschichten umgesetzt werden können. Mit Verweis auf **Abbildung 15** sind bei zirkulierenden Wirbelschichtsystemen, in Hinblick auf Industrieanlagen, auch große Leistungsbereiche möglich.

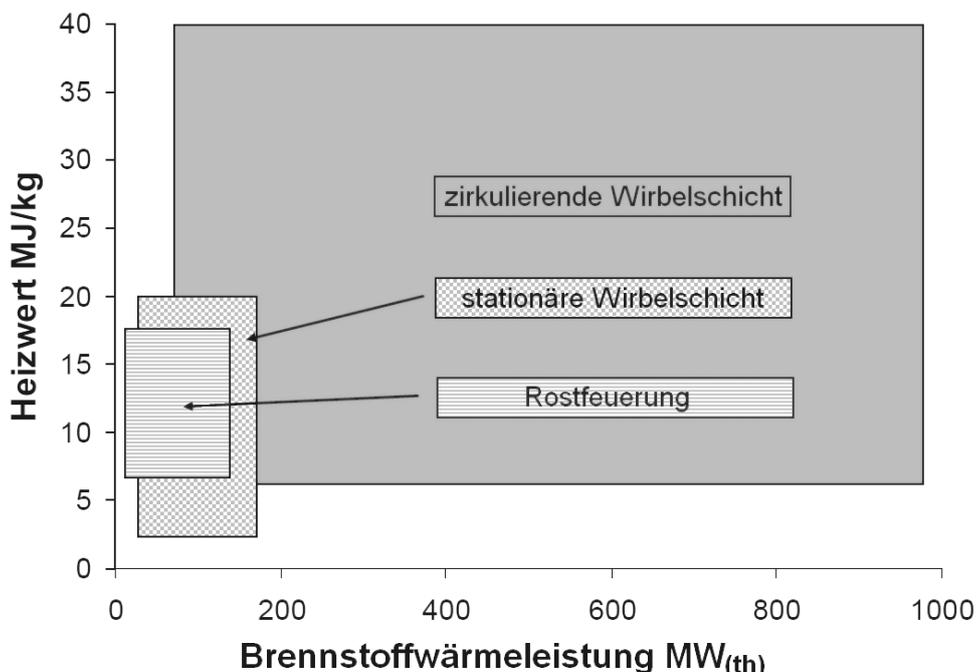


Abbildung 15: Typische Einsatzbereiche unterschiedlicher Feuerungsarten [29]

a.) Korngröße Bettmaterial

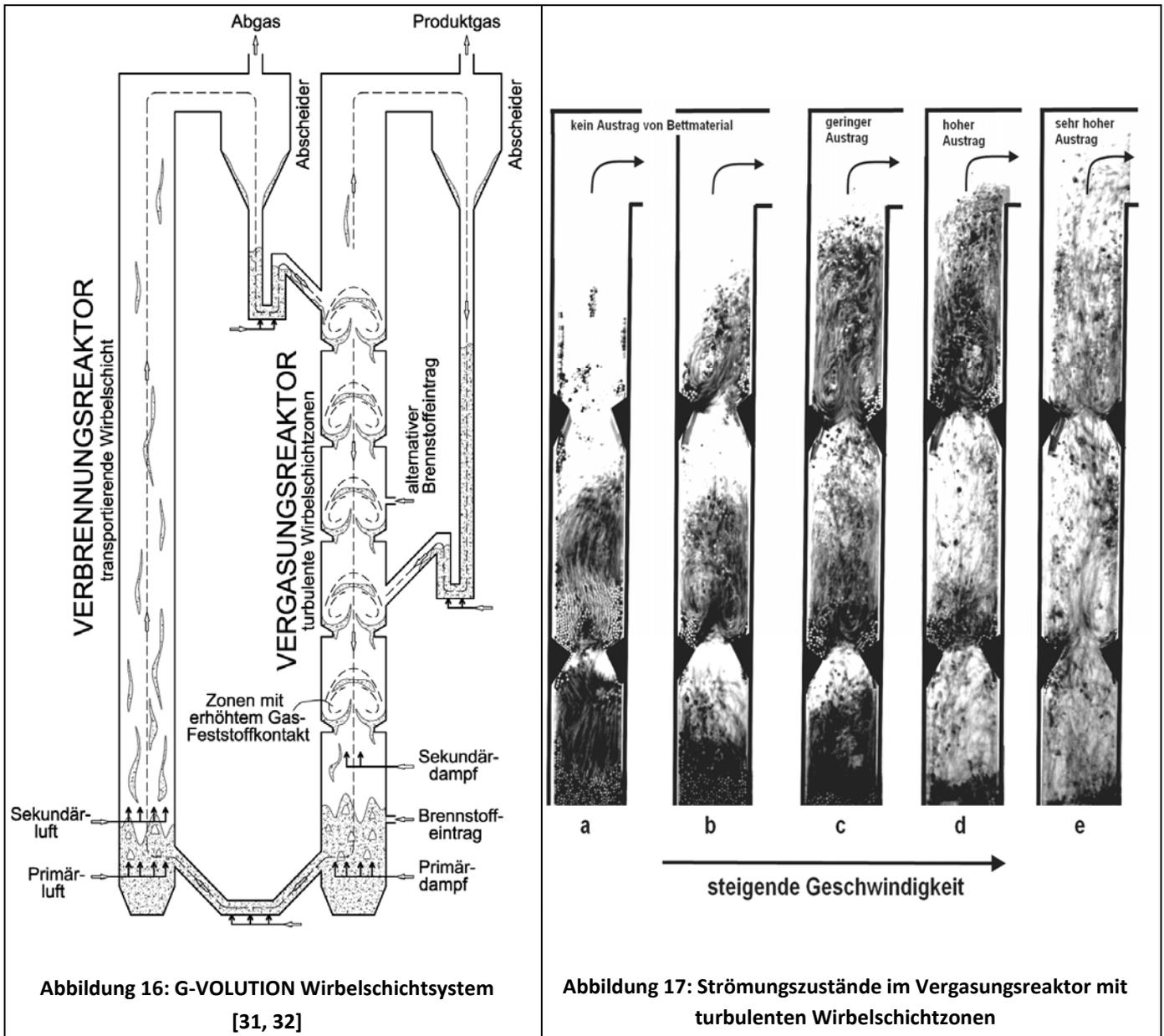
Auch hier ist eine Grundsatzentscheidung zu treffen. Die für eine gut funktionierende stationäre blasenbildende Wirbelschicht notwendigerweise größeren Partikel des Bettmaterials sind für ein turbulentes bis schnelles Wirbelschichtsystem nicht notwendig, ja sogar hinderlich. Hier soll mit Bettmaterial gearbeitet werden das kleinere Partikelgrößen aufweist. Damit würde auch pro Masse an bewegtem Bettmaterial eine größere Oberfläche zur Verfügung stehen, an der die besagten Gas/Feststoffreaktionen stattfinden. Des Weiteren darf nicht vergessen werden, dass bei feinerem Bettmaterial auch weniger stark fluidisiert werden muss, um den Transport des Betts zu bewerkstelligen. Es ist also so, dass mit geringeren Strömungsgeschwindigkeiten bei kleinerem Bettmaterial früher der angestrebte Strömungszustand erreicht wird, gleichzeitig geht das mit einer Erhöhung der Verweilzeit im Reaktor einher. Zudem ist der Abrieb des Bettmaterials im Betrieb mit kleineren Partikelgrößen geringer [30]. Und ein weiterer Vorteil liegt in der unproblematischeren Zugabe von Additiven wie Ilmenit oder Dolomit, da auf der Abgasseite, sowie auch der Produktgasseite, bei zweifach zirkulierenden Systemen mindestens je ein Feststoffabscheider vorgesehen ist (vgl. Abb. 14).

b.) Gas/Feststoffkontakt

Das Ziel bei der neuen Anlage geringere Teergehalte im Produktgas gewährleisten zu können bezieht sich vorrangig direkt auf den Reaktor als Herzstück der Anlage selbst. Das soll heißen, dass Teere bereits direkt am Ausgang des Reaktors in signifikant geringeren Mengen vorkommen sollen. Die Teere die im Reaktor nicht entstehen bzw. den Reaktor nicht als solche verlassen, müssen im späteren Verlauf auch nicht abgeschieden werden. Wie in den Versuchsreihen ersichtlich spielt beim Abbau von Teeren der Gas/Feststoffkontakt zwischen den entstehenden Produktgas und dem katalytisch wirksamen Bettmaterial eine wichtige Rolle. Bei ausreichender Dimensionierung (Verweilzeit, Höhe) ist dabei eine schnell fluidisierte gegenüber einer stationären Wirbelschicht vorteilhafter. Allgemein ist ein intensiver und entsprechend lang anhaltender Gas-Feststoffkontakt anzustreben. Aber auch in einer üblichen turbulent arbeitenden Wirbelschicht stellt sich eine gewisse Feststoffverteilung über die Höhe ein, die im unteren Bereich höher und im oberen Bereich niedriger ist (vgl. Abb. 2).

In **Abbildung 16** ist das festgelegte Prinzipdesign des neuen G-VOLUTION Vergasers dargestellt. Kern des Designs des neuen Wirbelschichtsystems ist es, den Feststoffanteil über den Großteil der Reaktorhöhe des Vergasers (Brennstoffreaktor) zu erhöhen. [31, 32]

Im folgenden Absatz wird näher auf das Design laut **Abbildung 16** eingegangen: In einem Zweizonen-Wirbelschichtsystem, bestehend aus zwei zirkulierenden Wirbelschichten, wird einer der beiden Reaktoren (in unserem Fall der Vergasungs- bzw. Brennstoffreaktor) durch Einschnürungen, Umlenkungen oder Kombinationen davon in vertikale Zonen unterteilt. Diese geometrischen Änderungen im Reaktordesign bedeuten eine Querschnittsverringerung, oder eine Umlenkung der Feststoff- und Gasbewegungsrichtungen. Die Strömungsgeschwindigkeit ist zB. in einer Einschnürung höher, als im folgenden größeren Querschnitt. Umlaufender Feststoff aus der transportierenden Wirbelschicht (Verbrennungsreaktor) wird im oberen Bereich der unterteilten Wirbelschicht (Brennstoffreaktor) zugeführt, verteilt sich in den vertikalen Abschnitten und gelangt schließlich über eine fluidisierte Verbindung im unteren Bereich des Systems wieder in den Verbrennungsteil zurück. Durch die Einschnürungen kommt es zur Ausbildung mehrerer Zonen mit jeweils charakteristischem Feststoffdichteverlauf (vgl. Abb. 19). Innerhalb jeder Zone entsteht eine sehr gut ausgebildete Gas/Feststoffmischung. Die Auslegung der Anlagengeometrie soll so sein, dass der Strömungszustand in jeder Stufe je nach Einschnürungsverhältnisse im oder um den turbulenten Strömungszustand laut Abbildung 2 pendelt.



Den Unterschied des Fluidisierungszustandes zwischen der vollen Querschnittsfläche im Reaktor mit dem Durchmesser D und der Freifläche im Bereich der Einschnürung mit dem Freiflächendurchmesser D_f kann im Zustandsdiagramm nach Grace [13] laut **Abbildung 18** dargestellt werden. Der turbulente Zustand kann grob in der Lücke zwischen Unterkante „schnelle Wirbelschicht“ und Oberkante „blasenbildende Wirbelschicht“ angenommen werden. Das Zustandsdiagramm nach Grace ist eine Modifikation des von Reh mit Hilfe von Ähnlichkeitskennzahlen entwickelten Diagramms zur Darstellung von Gas/Feststoffströmungen [33]. Natürlich hängt der Strömungszustand in diesen Zonen auch vom Gasvolumenstrom durch den Reaktor ab, wie dies an den Fotos eines Kaltmodells in **Abbildung 17** nachvollzogen werden kann. Ziel ist es den Zustand der optimalen Durchmischung in jeder Stufe zu gewährleisten. Durch die umfangreichen Untersuchungen an den Kaltmodellen war es möglich ein gutes Verständnis für die strömungstechnischen Gegebenheiten und somit die offensichtlich optimalen Strömungszustände für den Brennstoffreaktor zu finden. Diese augenscheinlich gute Durchmischung mit einer gleichmäßigen Aufteilung der Feststoffe auf die Zonen über die Höhe ist in **Abbildung 17** beim Zustand c gegeben, bei dem auch der Feststoffaustrag nach oben hin in einem akzeptablen Bereich liegt.

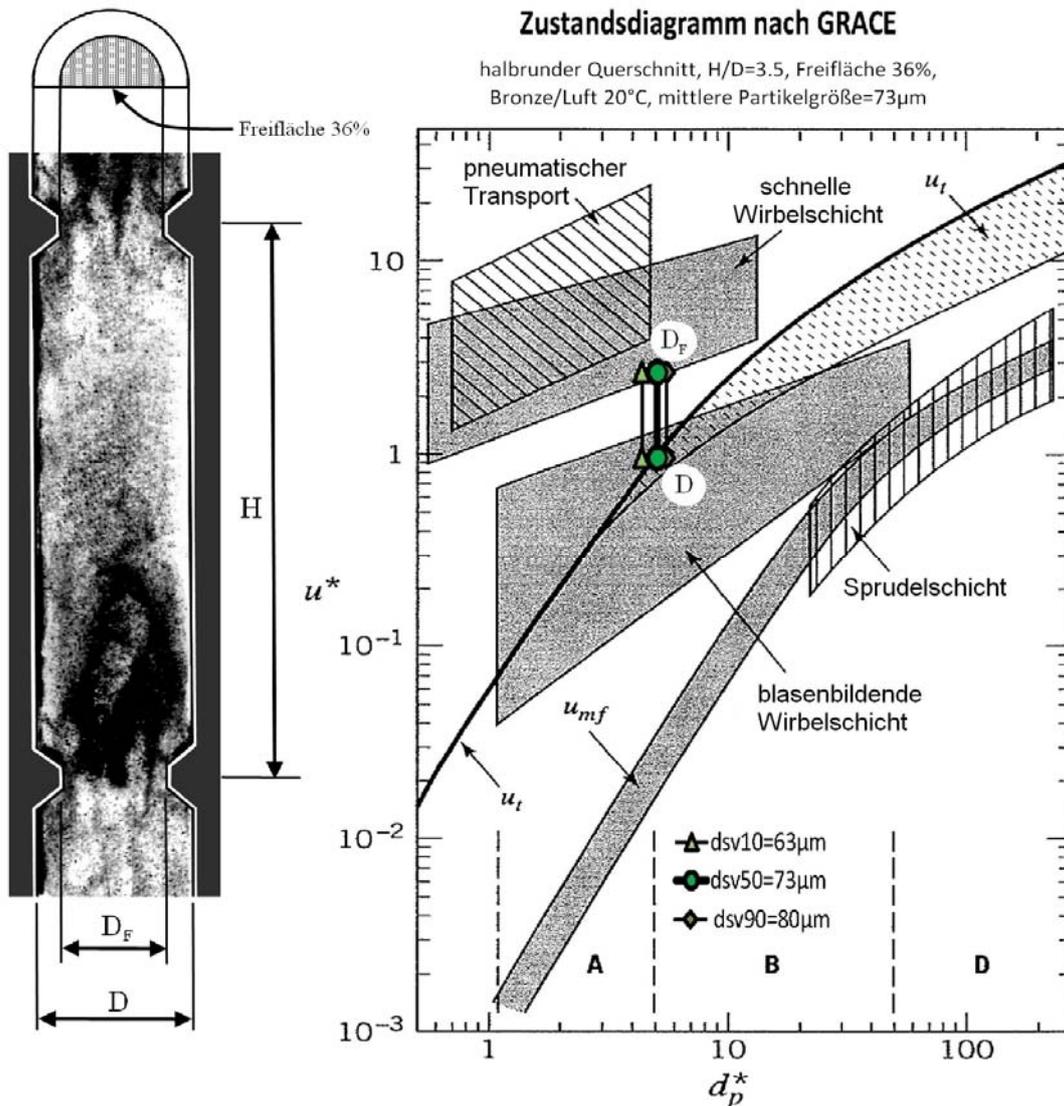


Abbildung 18: Strömungszustände im vollen Durchmesser D und dem Freifächendurchmesser D_F [11, 13]

Der charakteristische Betrieb des betrachteten Reaktors mit Gas/Feststoff-Gegenstromeffekt, bei dem annähernd kein Austrag von Bettmaterial mit dem Gasstrom nach oben erfolgt, ist in **Abbildung 19** dokumentiert. Die Diagramme in **Abbildung 19** sollen das Verständnis für die Feststoffverteilung über die Höhe des Vergasungsreaktors vertiefen und stellen eine rein qualitative Aussage dar, ohne konkrete Zahlenwerte zu nennen. Für den Teil des Vergasungsreaktors, der unterhalb der Feststoffeinbringung (solids INPUT) aus dem Verbrennungsreaktor liegt, ergibt sich ein Gegenstromregime von Fluidisierungsgas und Feststoffstrom. Nach unten hin gelangt immer nur ein bestimmter Teil des Feststoffs in die benachbarte Zone. Dadurch ergibt sich ein Verweilzeitverhalten für den Feststoff, der dem einer Kaskade ideal durchmischter Rührkessel nahekommt. Das System kann auch als Reaktor mit Pfropfenströmung für die Gasphase und gleichzeitig als Rührkesselnkaskade für die Feststoffe angesehen werden, aber mit der entscheidenden Eigenschaft, dass Gase und Feststoffe im Brennstoffreaktor über die gesamte Höhe entgegengesetzte Strömungsrichtungen haben. Dies ist eine Schlüsselfunktionalität für den hohen Umsatz von Kohlenwasserstoffen und Teeren im Gasstrom. Die Fläche oberhalb der gepunktete Linie im äußerst rechten Diagramm der **Abbildung 19** stellt die durch das G-VOLUTION System gewonnene Feststoffverteilung dar. Diese Funktionalität wird mit sehr geringem apparativen Aufwand erzielt, sie ist jedoch nur durch den untenliegenden Abgang der Feststoffpartikel bzw. des Bettmaterials aus dem Vergaser und den obenliegenden Eintrag der frischen heißen Bettmaterials in den Vergaser möglich. Der wesentliche und quantitative Vorteil des Designs liegt in der einfachen Ausführung, die eine Bedingung

für eine wirtschaftliche Umsetzung ist. Neue Technologien zur Brennstoffumwandlung (Chemical Looping Verbrennung von Festbrennstoffen und Gaserzeugung aus Biomasse) werden durch das G-VOLUTION System erst ermöglicht oder aber entscheidend verbessert.

Im Vergleich dazu ist die Ausführung von Wirbelschichten, in der der fluidisierte Feststoff der Flüssigkeit entspricht, als Siebbodenkolonne seit langem bekannt [34]. Das gegenwärtige Design entspricht in diesem Sinne aber einer gestuften Packungskolonnen und kommt ohne komplizierte Einbauten wie diskrete Böden und Überlaufanordnungen aus, die eine Anwendung wie hier in Hochtemperatur-Wirbelschichtreaktoren praktisch nicht ermöglichen würden.

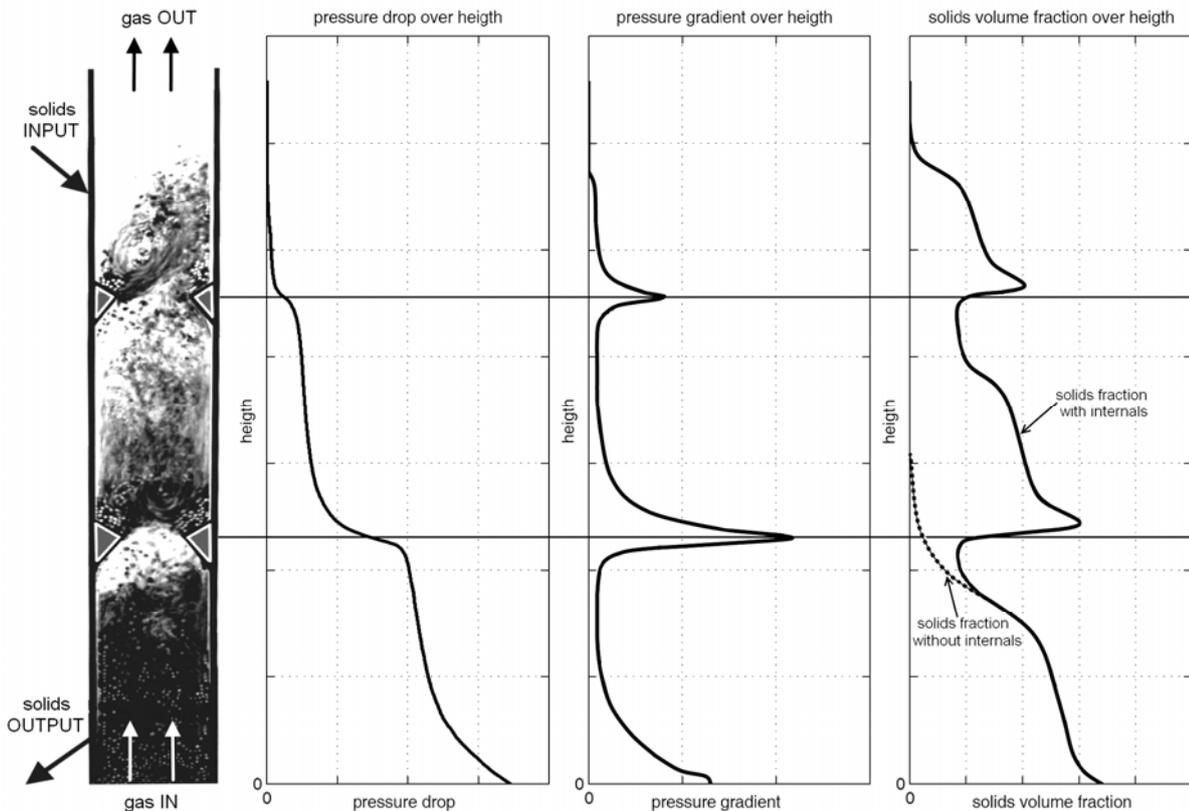
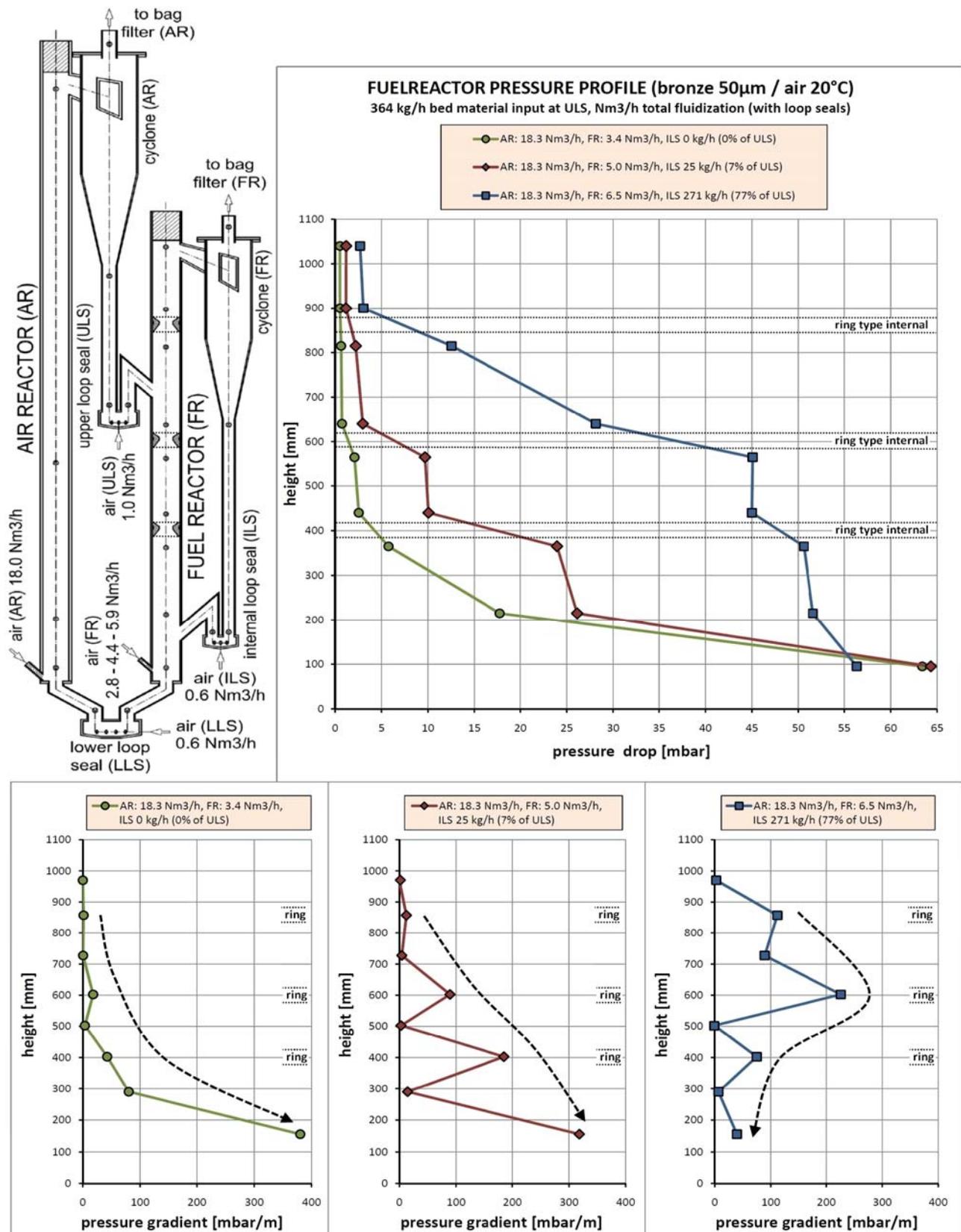


Abbildung 19: Feststoffdichteverlauf im G-VOLUTION-Brennstoffreaktor (height: Reaktorhöhe, pressure drop: Druckverlauf, pressure gradient: Druckgradient, solids volume fraction: volumetrischer Feststoffanteil)

Zum Vergleichen mit Abbildung 19 kann der Druckverlauf (pressure drop) des mit Einschnürungen adaptierten CLC-Kaltmodelles (1:3 zur Heianlage) in **Abbildung 20** (vgl. Verlauf: FR:5.0Nm³/h) gezeigt werden. Des Weiteren können die jeweiligen Feststoffverteilungskurven der turbulenten Wirbelschichtzonen der Abbildung 19 mit der typischen Feststoffverteilung laut Abbildung 2 verglichen werden. Interessant ist, dass im Querschnitt mit dem höchsten Druckanstieg (Druckgradienten) ein offensichtlich geringerer Feststoffanteil vorhanden ist. Dieser Effekt lässt sich mit den speziellen Strömungsbedingungen in der G-VOLUTION Wirbelschicht erklären. Herunter rutschende oder fallende Feststoffpartikel nehmen aus der aufsteigenden Gasphase kinetische Energie auf und werden grotenteils wieder nach oben umgelenkt. Das führt zu einem erhöhten Druckgradienten in der beobachteten Zone (Einschnürung). Ähnliche Phänomene konnten auch Bu und Zhu [35] bei Versuchen mit Einbauten in einer stark fluidisierten transportierenden Wirbelschicht (Riser), die unserem Verbrennungsreaktor entspricht, beobachten. In wie weit hier noch andere Einflüsse wie Gas/Feststoff-, Feststoff/Feststoff- und Feststoff/Wandreibungseffekte Einfluss auf den Druckverlauf haben, muss nach Klärung der Relevanz und vor allem der entsprechenden Verfügbarkeit von aussagekräftigen Messmethoden untersucht werden.



Während sich das Bettmaterial laut **Abbildung 20** im Brennstoffreaktor (FUEL REACTOR) bei einem Gasdurchsatz von $3.4\text{Nm}^3/\text{h}$ vorwiegend im unteren Bereich wiederfinden, verteilt es sich bei steigendem Gasdurchsatz über die Gesamthöhe und somit über die einzelnen Zonen immer besser. Bis hin zu einer Fluidisierung von $6.5\text{Nm}^3/\text{h}$, bei der bereits über drei Viertel (77%) der dem Brennstoffreaktor zugeführten Feststoffe (bei ULS = upper loop seal), über den internen Zyklon des Brennstoffreaktors (cyclone FR) abgeschieden werden müssen. Der Feststoffaustrag ist hoch, da das Bettmaterial hier vorwiegend im oberen Bereich des Brennstoffreaktors vorkommt. Der Betriebspunkt bei $6.5\text{Nm}^3/\text{h}$ im Brennstoffreaktor mit seinen turbulenten Wirbelschichtzonen entspricht am ehesten dem Verhalten einer Gas/Flüssigkeits-Packungskolonnen am Flutpunkt. Dieses Phänomen in Wirbelschichten konnte bereits bei Untersuchungen an Kaltmodellen zu FCC-Anlagen (FCC=fluid catalytic cracking) beobachtet werden [36]. Der Blick auf den Druckgradientenverlauf (pressure gradient) und die Messung der rückgeführten Feststoffmengen der Zyklone ermöglicht die Bestimmung der Strömungswege der Feststoffe. Die gestrichelten Kurven bei den Druckgradientenverläufen sollen dabei den typischen Verlauf der Maxima aufzeigen. Die äußerst rechte überhängende gestrichelte Kurve deutet dabei auf die oben beschriebenen „Flutung“ der Wirbelschicht hin. Vor allem die Druckmessungen werden wichtige Erkenntnisse zur Regelung von Prozessparameter beim Betrieb einer Heißeinlage ergeben. Ein Wirbelschichtbetrieb bei dem die Maxima (Spitzen) des Druckgradienten über die jeweiligen Einschnürungen im Brennstoffreaktor über die gesamte Reaktorhöhe annähernd denselben Wert besitzen, scheint ein optimaler Zustand zu sein. Hier kann davon ausgegangen werden, dass die Feststoffe gleichmäßig auf die jeweils sehr gut durchmischten Zonen verteilt sind. Die Diagramme in den Abbildungen 18, 19 und 20 ergeben aussagekräftige Erkenntnisse und finden dadurch in der weiteren Detailplanung für die neue 100 bis 200kW_{th} G-VOLUTION Technikums-Heißeinlage Verwendung.



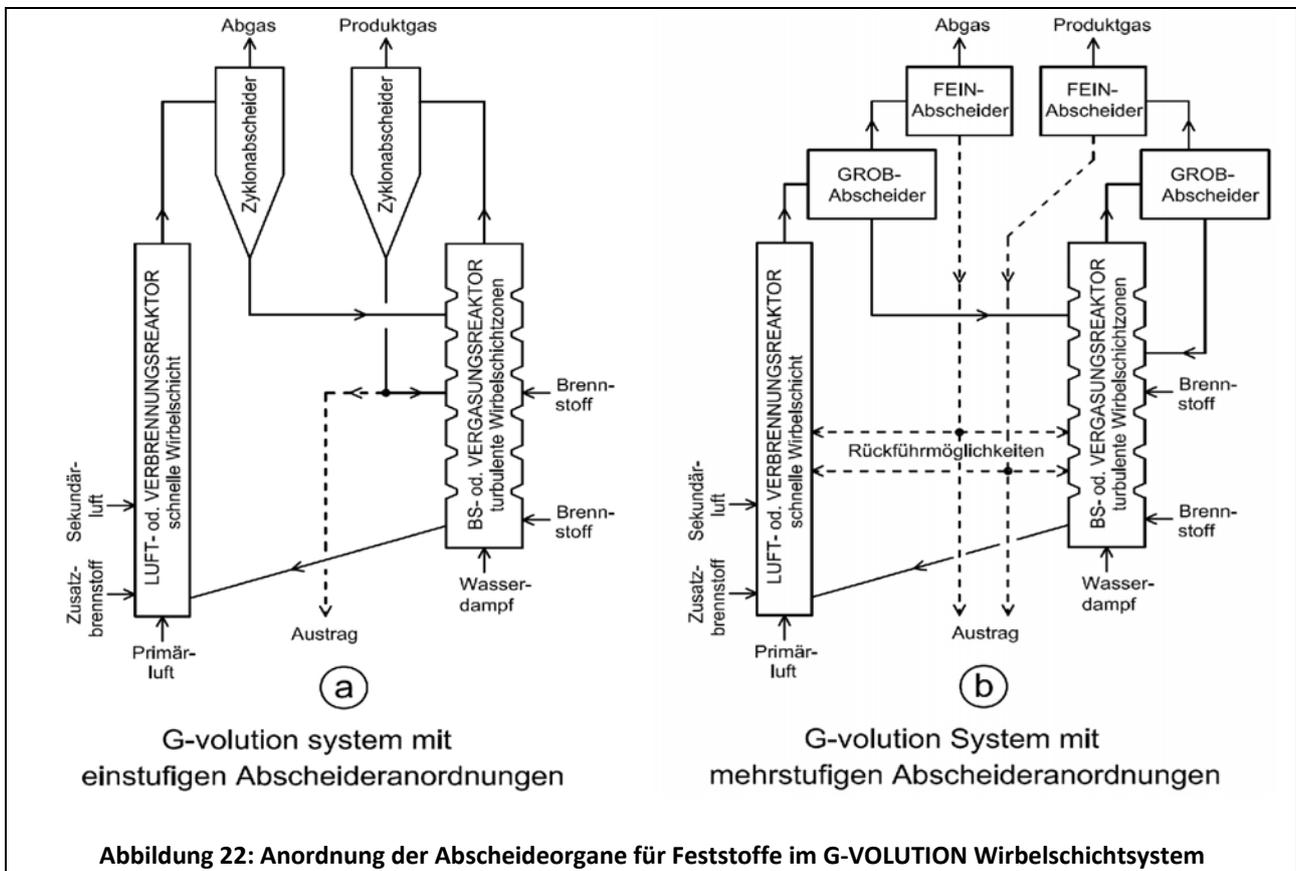
Abbildung 21: Detailaufnahme einer turbulenten Wirbelschichtzone mit erhöhtem Gas/Feststoffkontakt

Es werden noch umfangreiche Versuchsreihen nötig sein, um die komplexen fluiddynamischen Vorgänge im Bereich der Einschnürungen und darüber besser beschreiben zu können. Der Forschungsbereich in der Hochtemperatur-Wirbelschichttechnik mit geometrischen Änderungen des Reaktors, sowie in Kombination mit einem Gegenstromprinzip bei turbulenter Fluidisierung, ist noch sehr wenig bis gar nicht erschlossen. In der **Abbildung 21** können noch Detailaufnahmen mit Bronze als Bettmaterialien und Luft als Fluidisierungsmedium betrachtet werden. Die Aufnahmen stammen von einem weiteren Kaltmodell, das für die Untersuchungen adaptiert wurde. Unter

Berücksichtigung der Ähnlichkeitskriterien nach Glicksman [37] entsprechen die Zustände im Kaltmodell mit Bronzepartikel als Bettmaterial und Luftfluidisierung bei 20°C Raumtemperatur sehr gut den Strömungszuständen in einer Hochtemperaturwirbelschicht mit Olivin und Dampf/Produktgas bei 800 bis 900°C.

c.) Abscheideranlagen & Rückführung der Feststoffströme

Bei zirkulierenden Wirbelschichtsystemen ist eine umfangreiche Betrachtung der Abscheideorgane nötig. Einerseits soll die Abscheidung effektiv und auch großtechnisch umsetzbar sein, andererseits soll das Bettmaterial bei der Abscheidung geschont werden. Trotzdem wird sich nach entsprechender Betriebsdauer einer Heiße Anlage eine gewisse Korngrößenverteilung hin zu feineren Material bilden. In einer stationären Wirbelschicht führt dies zum vorher genannten Problem, dass Feinteile über das Freeboard in die Produktgasleitung ausgetragen werden. Bei einem zweifach zirkulierenden System ist es sowieso nötig eine vorangeschaltete Abscheideeinrichtung für das Bettmaterial zu installieren. Dabei könnte zum Beispiel wie in **Abbildung 22(a)** durch eine entsprechende Auslegung eines Zyklons gröberes Bettmaterial, sowie Feines wie Abrieb, Additive und Asche in ein und demselben Aggregat abgeschieden werden. Die Auslegung hochbelasteter Zyklonabscheider bei zirkulierenden Wirbelschichtsystemen unter hohen Temperaturen erfordert eine empirische Betrachtung, da die üblichen auf Feststoffabscheidung im Gaswirbel basierende Berechnungsmodelle bei hohen Beladungen versagen [38]. Bei dieser Auslegung dürfen auch die großen Belastungen bzw. der Abrieb des Bettmaterials und der Reaktorausmauerung nicht vernachlässigt werden [30]. Hierbei hätte eine zweistufige Abscheidung wie in **Abbildung 22(b)** gezeigt den Vorteil, dass das Bettmaterial als grober Festanteil in der ersten Stufe schonend separiert werden kann und die Feinteile in der zweiten Stufe anfallen. Prinzipiell kann über ein mehrstufiges Abscheidesystem nachgedacht werden, das speziell für den Betrieb mit Olivin bzw. Quarzsand in Mischung mit Dolomit (oder z.B. Branntkalk) äußerst vielversprechend scheint (vgl. Abb.13). Dies erfordert allerdings umfangreiche zusätzliche Untersuchungen, weshalb es im Rahmen des G-VOLUTION Projektes nicht weiter behandelt wurde.



d.) Brennstoffzufuhr

Die Brennstoffzufuhr ist gemäß dem Anspruch auf den Einsatz für eine breite Brennstoffpalette auszulegen. Es macht einen Unterschied ob man Holzhackschnitzel einer genau definierten Hackgutklasse fördert, oder ob man inhomogene Brennstoffe mit beispielsweise hohen Faser- oder Feinanteil in den Reaktor einbringen muss. Prinzipiell muss der Ort und die Art der Beschickung hinterfragt werden. Es wird oft notwendig sein für verschiedene Brennstoffarten eigens ausgelegte Zuführsysteme zu verwenden. Der Ort der Einführung des Brennstoffes kann prinzipiell zwischen mittlerer Höhe des Vergasungsreaktors und nahe am unten liegenden Siphon ausgeführt werden (vgl. Abb.16). Sinnvoll ist die Ausführung einer Zone in Bereichen des Vergasers, indem eingebrachte Brennstoffpartikel wie Holz genügend Verweilzeit bekommen um entsprechend lange entgasen zu können. Ein nicht unbedeutender Punkt betrifft die Abdichtung des Zuführsystems gegenüber dem im Reaktor entstehenden Gasen, der aber erst im Basic und vor allem Detailengineering für die Heißeinlage näher betrachtet wird. Speziell bei Großanlagen und bei druckaufgeladenen Vergasungssystemen rücken die Beschickungs- und Austragungssysteme immer wieder in das Zentrum detaillierter Betrachtungen [39].

e.) Versuche an Kaltmodellen als Grundlage für die Festlegung der Reaktorgeometrie

Bei den Untersuchungen der Fluidynamik hat man mit gutem Grund auf den vorschnellen Bau eines eigenen Kaltmodells verzichtet, da im Verlauf des Projektes klar wurde, dass durch die komplizierten strömungstechnischen Zustände umfangreiche Untersuchungen notwendig waren. Deshalb wurden vier bestehende Kaltmodelle umgebaut, um ein breiteres Grundverständnis für das Verhalten im Brennstoffreaktor zu erhalten. Es konnte also schrittweise der wissenschaftlich analytische Weg gewählt werden, um zum besten Ergebnis zu kommen. Was bedeutet, dass die Adaption der vier bestehenden Kaltmodelle für die Festlegung des Designkonzeptes mehr Aussagen zugelassen haben, als ein Neubau eines Kaltmodells ohne vorherige Untersuchungen. Die Ergebnisse aus den vier umgebauten Kaltmodellen waren für das Design mit den bei vier Modellen einhergehenden Variationsmöglichkeiten breiter bzw. umfangreicher, als sie es durch ein spezielles Modell hätten sein können. Dementsprechend aufwändiger waren die Arbeiten und Auswertungen dazu. Erst durch diese Ergebnisse (AP2) konnte die detaillierte geometrische Festlegung zum neuartigen G-VOLUTION Reaktordesign verwirklicht werden. Das neue Kaltmodell soll aber trotzdem Anpassungen der Reaktorabmessungen und Siphonausführungen zulassen. Damit kann gesagt werden, dass das Modell dem hohen Anspruch auf Flexibilität entspricht, um den Abschluss des endgültigen Detailengineerings für einen neuen G-VOLUTION-Technikumsvergaser zu ermöglichen.

f.) Detailkonzept der Technikumsanlage mit 100 bis 200kW Brennstoffwärmeleistung

Die Grundlage für das Detailkonzept zur Technikumsanlage besteht aus allen relevanten Massen- und Energieströmen, sowie genauen Vorgaben zu den benötigten geometrischen Abmessungen. Die Massen- und Energiebilanzen beruhen auf die über mehreren Jahren ausgewerteten Messwerte der 100kW_{th} Biomasse-Vergaseranlage der TU Wien. Diese Daten sind die Basis für die detaillierte Auslegung und Planung der Technikumsanlage und in Folge für das Down-Scale zum Kaltmodell. Die Brennstoffzufuhr kann an verschiedene Beschickungsstellen erfolgen. Durch die speziellen Druckverhältnisse des G-VOLUTION Systems besteht die Möglichkeit, gezielt gewisse Mengen an heißem Produktgas direkt über einen geregelten Bypass in den Verbrennungsreaktor zu leiten [40]. Ein Abkühlen des Produktgases mit den Folgen von Wirkungsgradverlusten und der Teerproblematik ist nicht notwendig. Bei vielen Anwendungen können deshalb das Eintragssystem und der Zusatzbrennstoff selbst für den Verbrennungsteil entfallen. Die Entnahme von Produktgas aus dem Brennstoffreaktor und die Rückführung in den Verbrennungsteil ermöglicht die gezielte Regelbarkeit des Gesamtprozesses ohne auf zusätzlichen Brennstoff zurück greifen zu müssen. Das Detailkonzept zum neuen Gesamtsystem konnte nur durch die Erfahrung der TU Wien mit wissenschaftlich betreuten Biomasse-Vergaseranlagen wie Güssing oder Oberwart entstehen. Die im Bericht angeführten Herausforderungen an eine Wirbelschichtvergaser- bzw. Wirbelschicht-CLC/CLR-Anlage sind bereits im Rahmen von Vorstellungen des neuen Reaktordesigns diskutiert worden [41, 42].

3.3 Resultate aus Arbeitspaket 4 (AP4): Markterhebung und strategische Positionierung

Um eine bestmögliche Vermarktung des G-VOLUTION Konzeptes zu erzielen, wurde eine Markterhebung durchgeführt. Daraus resultierend kann eine erfolgsversprechende Positionierung am Markt erfolgen.

Das Marktsegment „Energieversorgung“ ist ein stark wachsendes. Dies gilt vor allem für den Bereich der erneuerbaren Energien. Durch den steigenden Energiebedarf auf der gesamten Welt und der gleichzeitigen Verknappung der fossilen Rohstoffe etablieren sich alternative Energieträger am Markt immer stärker. Dies bietet eine große Chance, da als Rohstoffe für die Vergasung einerseits konventionelle, stückige Biomasse und andererseits auch industrielle Reststoffe eingesetzt werden können.

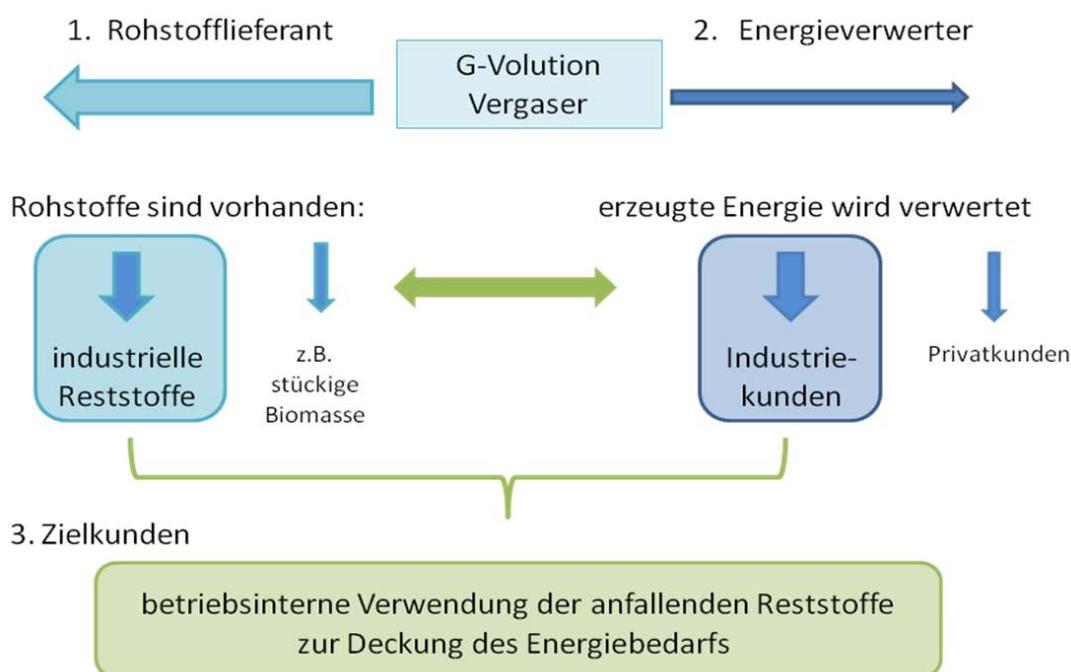


Abbildung 23: Markt für G-VOLUTION System

Wie **Abbildung 23** zeigt, kann man den potentiellen Markt für die neu entwickelte Anlagenart generell in zwei große Bereiche teilen. Diese haben unterschiedliche Potentiale und folgen auch verschiedenen Trends. Einerseits gibt es Kunden, welche Rohstoffe in diversen Formen zur Verfügung haben (Rohstofflieferanten) und andererseits solche die Energie benötigen (Energieverbraucher). Wobei gesagt werden muss, dass für Kunden oft auch beides zutrifft. Die einzelnen Segmente, sowie eine Kombination der beiden, werden in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben.

a.) Segment Rohstofflieferanten:

Als Rohstoffe bzw. Brennstoffe für die Umwandlung in ein hochwertiges Produktgas, kommen prinzipiell alle zur Vergasung einsetzbaren Stoffe in Frage. Eine weitere Unterteilung möglicher Rohstoffgruppen in klassische Vergasungseinsatzstoffe wie stückige Biomasse und industrielle Reststoffe ist sinnvoll. Der Zukauf von Biomasse

(Holzhackgut) schränkt jedoch die Rentabilität einer Vergaseranlage entsprechend ein. Aufgrund der derzeitigen Marktsituation kann davon ausgegangen werden, dass Holzhackgut mittel- bis langfristig in geringerem Maße als jetzt am Markt verfügbar sein wird. Damit werden gleichzeitig die Beschaffungskosten für diese Art Brennstoff steigen. Daher erscheint der wirtschaftliche Nutzen der durchaus komplexen G-VOLUTION-Technologie, für Kunden bei denen keine Reststoffe zur Verfügung stehen, entsprechend eingeschränkt. Im Gegenteil zu der in hohem Maße als konkurrenzfähig angesehenen Möglichkeit intern anfallende Reststoffe in ein Gas umzuwandeln. Ziel ist es einen größtmöglichen Anteil von hochwertigen Energieträgern wie Gas oder Strom zu erzeugen, anstatt den Energieinhalt des wertvollen Brennstoffes lediglich in einen Wärmeträger wie Wasser oder Dampf überzuführen. Dabei kommt eine breite Palette von Reststoffen wie zum Beispiel Altpapier, Sägespäne, Rindenabfälle über Altholz bis hin zu Ablaugen der Papierindustrie in Frage. Aus technischer Sicht sind jegliche Brennstoffe für den Prozess der thermochemischen Umwandlung einsetzbar. Vor allem wenn Unternehmen die Reststoffe sonst entsorgen müssten, wäre der beste Kundennutzen gegeben. Der Fokus liegt zurzeit aber klar auf erneuerbaren Ressourcen. Im Bereich der Reststoffverwertung ist die Konkurrenz im Gegensatz zur klassischen, thermischen Nutzung von Hackgut entscheidend niedriger, da es für die Verwertung von Reststoffen zu einem hochwertigen Produkt (Synthesegas, Strom), nur wenige Alternativen gibt. Bei einer etwaigen Verbrennung der Reststoffe zur reinen Wärmeerzeugung ergibt sich im Vergleich zur Vergasung mit der G-VOLUTION Technologie ein signifikant niedrigerer Gesamtwirkungsgrad. Des Weiteren entfällt bei einer reinen Wärmeerzeugung die Möglichkeit der effektiven Energiespeicherung. Andere Vergasungstechnologien können die vorhin angeführten Reststoffe nicht, oder nur bedingt als Brennstoffe einsetzen. Daher ist zu erwarten, dass die G-VOLUTION Gaserezeugungstechnologie eine dominierende Position in diesem Marktsegment einnehmen wird.

b.) Segment Energieverwerter:

Parallel zum weltweit stetig ansteigenden Energiebedarf wächst natürlich auch dieses Marktsegment mit. Es gibt viele am Markt etablierte Technologien die zur Deckung des Bedarfs herangezogen werden können und die als Stand der Technik anzusehen sind. Ein Nischenprodukt mit überschaubarer Konkurrenz erleichtert den Einstieg um sich erfolgreich positionieren zu können. Die Aufteilung in Industrie- und Privatkunden, wie in Abbildung 23 dargestellt, ist grundsätzlich sinnvoll. Durch das geplante Leistungsspektrum der G-VOLUTION-Vergaseranlagen im mittleren Leistungsbereich (10-100MW), sowie ausgeprägte Konkurrenztechnologien für kleine Leistungsbereiche (für Privatkunden) ist eine Fokussierung auf Industriekunden vernünftig. Wobei hier auch Kommunen mit ausreichend hoher Energieabnahme als industrielle Kunden angesehen werden. Hier muss zwischen verschiedenen Anwendungen unterschieden werden. Aktuelle Erhebungen ergeben den Bedarf an kleinen Fernwärmenetzen (als Kunde kommen private Investoren oder üblicherweise Energieversorger in Frage), als auch an eine Energiebereitstellung (Strom, Gas, Dampf, Heißwasser) für industrielle Anwendungen. Bei einer Marktpräsenz der G-VOLUTION Technologie können sich Kunden zudem bei einem Neubau einer Anlage für zwei Anlagenarten entscheiden. Entweder für die am Markt üblichen Wasser-Dampf Kreisläufe (reine Heizanlagen und KWK-Anlagen) mit den Endprodukten Wärme und Strom. Hier entfällt die Möglichkeit Energie auf Vorrat speichern zu können und diese Kreisläufe sind zudem durch einen theoretisch maximal möglichen Wirkungsgrad limitiert (Carnot-Wirkungsgrad). Oder aber man entscheidet sich für das neuartige G-VOLUTION Konzept bei dem größtenteils Energie in Form von Produktgas anfällt, das auch etwaig gespeichert werden kann. Ein zusätzlicher Vorteil dabei ist, dass die Verstromung des Produktgases prinzipiell nicht an den Betrieb der Anlage gebunden ist (durch Speichermöglichkeit). Eine potentielle Variante der Bereitstellung von Energie liegt auch in der Konzeption eines Ferngasnetzes bei dem, ähnlich wie bei einem Fernwärmenetz, umliegende Gebiete direkt mit dem Produktgas versorgt werden könnten. Dabei hätte dieses Produktgasnetz mehrere Vorteile. Eine Limitierung des Versorgungsumkreises ist in Bezug auf den Wirkungsgrad nicht vorhanden, im Gegensatz zu einem Fernwärmenetz durch Wärmeverluste. Es ist vor allem nur eine Rohrleitung zu den jeweiligen Abnehmern nötig. Das Gas kann vor Ort individuell, also je nach Bedarf abgenommen werden oder im Verlauf des Netzes z.B. unterirdisch gespeichert werden.

c.) Kombination beider Segmente

Durch das breite Spektrum der Anlagengröße von 10-100MW, kann auf die Bedürfnisse vieler Unternehmen individuell eingegangen werden. Einen besonderen Anreiz konventionelle Technologien durch die G-VOLUTION Technologie zu ersetzen bieten sich durch Synergien durch Kombination beider Marktsegmente (Rohstofflieferant und Energieverwertung). Aus den vorherigen Überlegungen ergeben sich eine optimale Positionierung am Markt und potentielle Zielkunden. Diese vereinen das Vorhandensein von Rohstoffen, im Idealfall geeignete Reststoffe und den Bedarf an Energie (Strom, Wärme, Synthesegas). Durch die Verbindung der beiden möglichen Segmente ergibt sich ein bestmöglicher Kundennutzen und in Folge der aussichtsreichste Markt. Generell ist eine Vielzahl an Industrieunternehmen aus diversen Branchen denkbar, wobei die Holzverarbeitende Industrie besonders hervorzuheben ist. Als Beispiele können Sägewerke oder Papierfabriken genannt werden. Holzabfälle oder Papierabläugen sind auf Grund ihres sehr hohen Heizwertes für die Erzeugung der für die Produktion notwendigen Energie (Strom und Wärme) gut geeignet. Als Beispiel sei hier der Energiebedarf der Papier- und Zellstoffindustrie erwähnt. Der spezifische Energiebedarf, d.h. die zur Produktion einer Tonne Papier, Pappe oder Karton benötigte Energie beträgt zurzeit etwa 2.700kWh. Damit entspricht der Energiekostenanteil in Bezug auf den Umsatz ca. 10 %, wobei diese benötigte Energie zu einem Drittel mit Strom und zu zwei Drittel durch Wärme gedeckt wird. Die damit verbundenen Energiekosten können durch den Einsatz einer entsprechenden G-VOLUTION Vergasungsanlage reduziert und der spezifische Energiekostenanteil des Endproduktes deutlich gesenkt werden. Es gilt die im Unternehmen anfallenden Reststoffe nutzbar zu machen. Im gleichen Maße sinkt die Notwendigkeit extern Energie zukaufen zu müssen. Eine geringere Abhängigkeit des Unternehmens von Energielieferanten und dem oft stark schwankenden Preisen des Energiemarktes ist die Folge. Des Weiteren kann eine selbstverantwortliche erhöhte Bereitstellungssicherheit gewährleistet und das Planungs- und Kalkulationsrisiko minimiert werden.

3.4 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Aus den Ergebnissen von AP1 & AP3 kann gefolgert werden, dass

- von natürlichem Olivin als Bettmaterial, bei Sauerstoffüberschuss im Verbrennungsteil Sauerstoff in den Vergasungsteil transportiert wird.
- bei eisenangereichertem Olivin (Eisenolivin) als Bettmaterial der Sauerstofftransport wesentlich höher ist.
- ein möglicher Sauerstofftransport durch das Bettmaterial den Methan- und Teerumsatz nicht signifikant beeinflusst.
- natürlicher Olivin als Bettmaterial Kohlenwasserstoffe besser abbaut als Eisenolivin.
- trotz kürzerer Verweilzeit, sowohl der Methanumsatz, als auch der Teerabbau bei höherer Leistung einhergehend mit einer stärkeren Fluidisierung (besserer Gas/Feststoffkontakt) deutlich höher ist.
- Zusätze wie Ilmenit und Dolomit zu Olivin als Bettmaterial zu einer Erhöhung des Kohlenwasserstoffumsatzes und Teerabbaus führen können.
- speziell bei der Kombination von Quarzsand mit Dolomit ein deutlich höherer Abbau von Teeren im Vergleich zu reinem Quarzsand als Bettmaterial erfolgt.

Aus den Ergebnissen von AP2 kann festgehalten werden, dass

- in Bezug auf eine Realisierung hin zu Großanlage das Grundsystem einer zweifach zirkulierenden Wirbelschicht heranzuziehen ist.
- das System mit einem unten liegenden Siphon ausgestattet sein muss, um den globalen Feststoffumlauf über den Verbrennungsteil in den Vergasungsteil vom internen Feststoffumlauf des Vergasungsreaktors zu entkoppeln.
- ein geringer Wasserdampfbedarf für die Fluidisierung durch das spezielle Design ohne Probleme möglich ist.
- die Verweilzeit des Brennstoffes im Brennstoffreaktor (Vergasungsreaktor) größtmöglich sein soll.
- die Verweilzeit des aus dem Brennstoff entstandenen Produktgases, durch Zonen mit erhöhtem Bettmaterialanteil, bei möglichst hoher Temperatur größtmöglich sein soll.
- die Verweilzeit von feinen Brennstoffpartikeln, die mit dem entstehenden Produktgas mitgerissen werden, in Zonen mit erhöhtem Bettmaterialanteil und hohen Temperaturen größtmöglich sein soll.
- Im Allgemeinen der Freiraum (Freeboard) einer stationären Vergasungswirbelschicht einem Bereich mit höherer Gas/Feststoffdurchmischung weicht.
- eine kleinere mittlere Partikelgröße des Bettmaterials einen entscheidenden Vorteil hat (z.B. größere katalitische spezifische Oberfläche, geringere absolute Gasgeschwindigkeiten und dadurch geringeres Abriebverhalten).
- zugegebene Additive wie Dolomit oder Ilmenit in feiner Form durch Abscheidesysteme wieder in den Reaktor zurückgeführt werden.
- die systembedingten Abscheideranlagen einen geringen Feststoffanteil im austretenden Produktgas garantieren.
- unterschiedlichste Bettmaterialien ohne Probleme im neuen System eingesetzt werden können.
- die Voraussetzungen geschaffen wurden, um unterschiedliche Beschickungseinrichtungen an unterschiedlichen Orten des Reaktorsystems für verschiedene Brennstoffe ausführen zu können.
- die Abrasionserscheinungen im Brennstoffreaktor noch genauer in der Technikumsanlage untersucht werden müssen. Die Geschwindigkeiten sind allerdings viel geringer als z.B. im Verbrennungsteil oder in einem Zyklonabscheider.
- grundsätzlich, durch einen Bypass von Produktgas zwischen den Reaktoren, ein zusätzlicher Brennstoffeintrag für den Verbrennungsteil entfallen kann.
- ein neuartiges Wirbelschichtsystem entwickelt werden konnte, das alle vorhin angeführten Punkte erfüllt.
- neben der Vergasung das G-VOLUTION Wirbelschichtsystem auch für andere sehr interessante Bereiche wie Chemical-Looping-Combustion, Chemical-Looping-Reforming, Two-Step-Watersplitting, Steamreforming, Fluid-Catalytic-Cracking usw. eine potente Anwendungsmöglichkeit findet.

Mit den Betrachtungen laut AP4 kann festgehalten werden, dass

- Unternehmen aus anfallenden Reststoffen ganz oder zum Teil ihren Energiebedarf decken könnten.
- dieser Vorteil vor allem für Produktionsbetriebe mit entsprechendem Energiebedarf interessant ist.
- mit dem G-VOLUTION System verschiedene und inhomogene Brennstoffe genutzt werden können.
- mit ein und derselben Anlage je nach Verfügbarkeit verschiedene Brennstoffe genutzt werden können.
- die Erschließung einer breiten Brennstoffpalette erhebliche Marktvorteile mit sich bringen.
- der Einsatz anfallender Reststoffe die Abhängigkeit vom Energielieferanten bzw. die negativen Auswirkungen von Energiepreisschwankungen verringert.
- ein größtmöglicher Anteil, der im Brennstoff enthaltenen Energie, in hochwertiges Produktgas umgewandelt wird und so eine Alternative zu üblichen Wasserdampf-Kreisläufen darstellt.
- die Verstromung prinzipiell unabhängig vom Betrieb der Vergaseranlage möglich ist (Speichermöglichkeit).
- ein Gasnetz möglich ist, das betriebsinterne aber auch externe Abnehmer mit dem Gas beliefert.
- auch ein Markt abseits der Vergasungstechnologie für das neuartige Wirbelschichtsystem existiert.
- eine begleitende wissenschaftliche Betreuung von Anlagen im Industriemaßstab die Verfügbarkeit erhöht.

Die tatsächlichen im Projekt G-VOLUTION erarbeiteten Designverbesserungen gehen über das im Projektantrag geplante Maß deutlich hinaus und ergeben zusätzliche Vorteile. Es sind daher mögliche Anwendungen im gesamten Gebiet der Wirbelschichttechnik denkbar, wo der erzeugbare Gegenstromeffekt von Gas und Feststoff potenziell Effizienzsteigerungen erlaubt. Unmittelbar ergibt sich die Anwendung im Bereich der Zweibett-Wirbelschicht-Dampfvergasung. Dafür gibt es mit drei in den vergangenen 10 Jahren errichteten Kraft-Wärmekopplungs-Anlagen speziell in Österreich bereits einen Markt (Güssing:8,5MW_{th}, Oberwart:9,0MW_{th}, Villach:15,5MW_{th}). Durch die mit dem verbesserten Design erwartete erhöhte Brennstoffflexibilität können neue Märkte abseits von Ökostrom-Kraft-Wärme-Kopplung erschlossen werden, speziell im Bereich industrieller Anwender zur Bereitstellung eines Erdgasersatzgases.

Ein Markt mit international sehr großem Potenzial ergibt sich im Bereich von Chemical-Looping Verbrennung zur inhärenten Bereitstellung eines konzentrierten CO₂-Stromes zur nachfolgenden Verbringung. Der in G-VOLUTION erarbeitete und zum Patent angemeldete Designvorschlag kann ein Schlüssel zum möglichen direkten Einsatz von festen Brennstoffen (Biomasse und Kohle) in Chemical-Looping Systemen sein. Damit würde der mit der Abscheidung von CO₂ aus Abgasströme verbundene Energieaufwand auf ein Minimum reduziert. Sollte sich die CO₂ Abscheidung im großen Stil (Europa, Südafrika, Australien, China, Indien) etablieren, entsteht ein beträchtliches Marktpotenzial für das G-VOLUTION Konzept.

4 Ausblick und Empfehlungen

Dem Projektteam der „TU-Wien“ und „Tecon Engineering“ ist es gelungen ein neues Vergasersystem zu entwickeln, das in Anlehnung an den Projekttitel „G-VOLUTION“ wohl tatsächlich eine Evolution im Bereich der Vergasungstechnik darstellen wird. Der erste Schritt hin zu aussagekräftigen Ergebnissen einer 200kW_{th} Technikumsanlage ist getan. Die Aussicht auf Ergebnisse, die die Biomasse-Vergasungstechnologie in großen Schritten voranbringt, ist hoch und in diesem Bericht wissenschaftlich fundiert dokumentiert. Doch der Anwendungsbereich des neuen G-VOLUTION Wirbelschichtsystems ist nicht nur auf das Gebiet der Vergasung beschränkt. Auch für andere sehr interessante Bereiche in der Energietechnik/Energiebereitstellung wie CLC, CLR, Two-Step-Watersplitting, Steamreforming, FCC usw. kann das System prinzipiell uneingeschränkt verwendet werden. Eine Feststoff-CLC-Wirbelschichtanlage mit inhärenter CO₂-Abscheidung ist dabei praktisch gesehen überhaupt nur mit dem neu entwickelten G-VOLUTION System möglich. Spezielle Erweiterungen des Systems, zum Beispiel durch verbesserte mehrstufige Abscheidungssysteme können zudem den Anwendungsbereich zusätzlich erweitern. Damit könnte man unterschiedliche Feststoffströme aus dem System generieren und in beliebige Teile des Wirbelschichtsystems rückführen, oder entsprechende Teilströme aus dem System ausschleusen. Hervorzuheben sind dabei die letzten Versuchsreihen bei der Olivin und Quarzsand in Kombination mit Dolomit als Bettmaterial herausragende Ergebnisse liefert. Das ist vor allem großtechnisch sehr interessant, da Quarzsand und Dolomit oder Kalkstein (im Verlauf des Prozesses Branntkalk) praktisch weltweit billig und unbegrenzt zur Verfügung stehen. Die Ergebnisse der Versuchsreihen AP1 & AP3 der adaptierten 120kW_{th} CLC-Technikumsanlage, die Erfahrungen und Ergebnisse vom bestehenden 100kW_{th} DFB-Technikumsvergaser und der seitens der TU Wien betreuten 8,5MW_{th} Großanlage in Güssing, waren in jedem Punkt die Grundlage für das festgelegte Design im Arbeitspaket 2 (AP2). Im dokumentierten Projekt konnte schlussendlich das Designkonzept (AP2) inklusive detaillierter Massen- und Energieströme für die Auslegung einer Technikumsanlage mit 100 bis 200kW_{th} erarbeitet werden.

Die Ergebnisse des Projektes G-VOLUTION haben die Erwartungen an das Potenzial der Designverbesserung aus derzeitiger Sicht bei Weitem übertroffen. Daher sind bereits drei auf dem Projekt G-VOLUTION aufbauende Nachfolgeprojekte mit dem Ziel einer konkreten Technologieentwicklung unterwegs – und zwar der Anwendung entsprechend mit unterschiedlichen österreichischen Firmenpartnern. Weitere Forschungen werden sich auf die Erforschung und Charakterisierung der Fluidodynamik im entwickelten Design sowie der Demonstration der G-VOLUTION-Technologie im Technikumsmaßstab als Schritt vor der möglichen Realisierung einer industriellen Demonstrationsanlage konzentrieren. Durch die bevorstehende Limitierung der Emissionszertifikate für die Industrie wird eine Nachfrage nach Erdgasersatztechnologien in der verarbeitenden Industrie (Papier- und Zellstoff, Stahlindustrie, Raffinerie) in den nächsten Jahren erwartet, was den Markt für Gaserzeugung aus Biomasse ankurbeln könnte. Für industrielle Nicht-Ökostromanwendungen ist die Erschließung kostengünstiger Brennstoffe, wie sie in G-VOLUTION angestrebt wird, aus wirtschaftlichen Gründen essentiell.

4.1 Erkenntnisse aus dem Projekt

Die zentrale Erkenntnis aus dem Projekt liegt in der Bestätigung der Annahme, dass durch gezielte Designänderungen des Gaserzeugers die Gasqualität und so die Technologie wesentlich verbessert werden kann. Dadurch kann eine neue Generation von Gaserzeugern entstehen, von denen erwartet wird, eine verbesserte Rohgasqualität gewährleisten zu können und ein größeres Brennstoffspektrum zu erschließen. Zusätzlich zum im Projekt geplanten Umstieg auf ein zirkulierendes Wirbelschichtregime im Gaserzeuger, das einen erhöhten Kohlenwasserstoffumsatz bringt, wurde eine zum Patent angemeldete Designvariante entwickelt, die verspricht den für den Kohlenwasserstoffumsatz kritischen Gas-Feststoffkontakt im Gaserzeuger noch weiter darüber hinaus zu verbessern (turbulente Wirbelschichtzonen mit

Gegenstromeffekt). Die Projektergebnisse sind nicht nur im Bereich der thermischen Gaserzeugung von Bedeutung, sondern eröffnen auch einen vielversprechenden Ansatz, die international intensiv diskutierte Chemical Looping Verbrennungstechnologie mit inhärenter CO₂ Abscheidung für feste Brennstoffe zu erschließen.

4.2 Verwendung der Ergebnisse und weitere Vorgehensweise

Das Projekt bildet die Basis für eine weiterführende, gezielte Entwicklung der hier erstmals erarbeiteten Designgrundlagen im bereits angelaufenen Folgeprojekt G-VOLUTION II. Prinzipiell wird diese neue Gaserzeugergeneration in zukünftigen Forschungsprojekten der TU Wien auf diesem Gebiet zur Anwendung kommen um so die Technologie immer weiter zu verbessern und in realistischem Zeitrahmen zur industriellen Demonstration zu kommen. TECON Engineering steht für das Engineering und die Koordination der Realisierung einer Demonstrationsanlage bereit. Es wurden im September 2010 zwei weitere Forschungsprojekte mit österreichischen Firmenpartnern eingereicht, die direkt auf die in G-VOLUTION erarbeiteten Grundlagen aufbauen: ERBA mit der Voest-Alpine Stahl GmbH und BioCLC mit AE&E Austria. Dabei wird einerseits die Integration einer Biomassegaserzeugung in den Roheisenproduktionsprozess untersucht und andererseits ein neuartiges Kraft-Wärme-Kopplungskonzept mit Bereitstellung von reinem CO₂ untersucht. Im Verlauf der genannten Projekte werden bei anerkannten wissenschaftlichen Konferenzen und Tagungen Publikationen und Vorträge mit den aktuellen Erkenntnissen zum Thema vorgetragen. Einige davon sind bereits im Verlauf dieses Jahres fixiert [43 bis 45].

4.3 Mögliche Anwendungen des G-VOLUTION Wirbelschichtsystems

Die möglichen Anwendungen des G-VOLUTION Gaserzeugers liegen in der Bereitstellung qualitativ hochwertiger Synthesegase im industriellen Maßstab. Wegen der erwarteten besseren Brennstoffflexibilität erhöht sich das Einsatzspektrum gegenüber der in Güssing, Oberwart und Villach realisierten ersten Generation von Gaserzeugern wesentlich. Ein strategischer Markt für solche neue Gaserzeuger liegt im Bereich der Industrie, die derzeit auf Erdgas zur Energiebereitstellung angewiesen ist. Durch einen Umstieg auf Biomasse-Synthesegas können effizient Treibhausgasemissionen eingespart werden. In Österreich wird hier ab 2013 mit der tatsächlichen Berechnung von Emissionszertifikaten für die Industrie mit einer gewissen Nachfrage gerechnet.

Abseits der Anwendung zur Gasbereitstellung birgt die G-VOLUTION Technologie einen Schlüssel für den direkten Einsatz von festen Brennstoffen in Chemical Looping Verbrennungsanlagen. Dabei fällt das bei der Verbrennung gebildete CO₂ ohne zusätzlichen Energieaufwand konzentriert an. Die im Projekt G-VOLUTION für Gaserzeugung aus Biomasse entwickelte Systemkonfiguration erlaubt in Feststoff-CLC-Anlagen die vollständige Oxidation flüchtiger Brennstoffbestandteile sowie einen weitgehenden Umsatz des festen Kohlenstoffs. International ist hier mit den jüngsten Entwicklungen speziell in Regionen mit großen Kohlereserven (China, Australien, Südafrika) im Zusammenhang mit Klimazielen eine starke Nachfrage nach Technologien zur CO₂ Abscheidung und Speicherung vorhanden. Die Hauptverwertungslinie der Projektergebnisse zeichnet sich in der aktiven Weiterentwicklung der Grunderkenntnisse ab, die zu bereits drei als direkte Nachfolgeprojekte zu bezeichnenden Forschungsprojekten geführt haben und abschließend nochmals genauer angeführt werden:

- G-VOLUTION II: Realisierung des in G-volution entwickelten Konzeptes an einer Technikumsanlage (NE2020, 3. Ausschreibung)
- ERBA: Erweiterung des G-volution-Konzeptes um partikelschonende Feststoffabscheider für den Einsatz reaktiver Bettmaterialien (NE2020, 4. Ausschreibung)
- BioCLC: Anwendung des in G-volution entwickelten Konzeptes auf Chemical Looping Verbrennung fester Brennstoffe (NE2020, 4. Ausschreibung)

5 Literaturverzeichnis

- [1] Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H., (2009) "Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren", 2. Auflage, Verlag: Springer
- [2] Bridgwater, A.V., (1995) "The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation", *Fuel*. 14: 631–65
- [3] Hofbauer, H., Veronik, G., Fleck, T., Rauch, R., (1997) "The FICFB gasification process", *Developments in Thermochemical Biomass conversion Vol.2* pp 1016-1025, Banff 1997
- [4] Rauch, R., Hofbauer, H., Bosch, K., Siefert, I., Aichernig, C., Tremmel, H., Voigtlaender, K., Koch, R., Lehner, R., (2004) "Steam Gasification of Biomass at CHP Plant Güssing – Status of the Demonstration Plant", *Proceedings of 2nd world conference and technology exhibition on biomass for energy, industry and climate protection Rome, Italy 2004*
- [5] 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*
- [6] Heyne, S., (2010) „Process Integration Opportunities for Synthetic Natural Gas (SNG) Production by Thermal Gasification of Biomass“, *Heat and Power Technology, Department of Energy an Environment, Chalmers University of Technology*
- [7] Pröll, T., Kolbitsch, P., Bolhàr-Nordenkampf, J., Hofbauer, H., (2009) "A novel dual circulating fluidized bed system for chemical looping processes", *AIChE Journal*, 55(12), 3255-3266
- [8] Delgado, J., Aznar, M. P., Corella, J., (1996) "Calcined Dolomite, Magnesite, and Calcite for Cleaning Hot Gas from a Fluidized Bed Biomass Gasifier with Steam: Life and Usefulness", *Ind. Eng. Chem. Res.* pp 3637-3643
- [9] Corella, J., Aznar, M. P., Gil, J., Caballero, M. A., (1999) "Biomass Gasification in Fluidized Bed: Where to Locate the Dolomite to Improve Gasification", *Energy Fuels* 1999, 13 (6), pp 1122-1127
- [10] Koppatz, S., Pfeifer, C., Rauch, R., Hofbauer, H., Marquard-Möllenstedt, T., Specht, M., (2009) "H₂ rich product gas by steam gasification of biomass with in situ CO₂ absorption in a dual fluidized bed system of 8 MW fuel input", *Fuel Process Technology*, Volume 90, Issues 7-8, July-August 2009, Pages 914-921
- [11] Kunii, D., Levenspiel, O., (1996) "Circulating fluidized-bed reactors", *Chemical Engineering Science*, Vol. 52, No. 15, pp 2471-2482
- [12] Lim, K. S., Zhu, J. X., Grace, J. R., (1995) "Hydrodynamics of gas-solid fluidization", *Int. J. Multiphase Flow* Vol. 21, Suppl. pp 141-193
- [13] Grace, J. R., (1986) "Contacting modes and behaviour classification of gas-solid and other two-phase Suspensions" *Can. J. Chem. Eng.* 64, pp 353-363
- [14] Pröll, T., Kolbitsch, P., Bolhàr-Nordenkampf J., Hofbauer, H., (2008) "A dual circulating fluidized bed (DCFB) system for chemical looping combustion", in: *Proceedings of the 2008 AIChE Annual Meeting, Philadelphia, PA, November 16-21, 2008*
- [15] Kolbitsch, P., Pröll, T., Bolhàr-Nordenkampf, J., Hofbauer, H., (2009) "Design of a chemical looping combustor using a dual circulating fluidized bed (DCFB) reactor system", *Chemical Engineering and Technology* 32, 3, 398-403
- [16] Wolfesberger, U., Aigner, I., Hofbauer H., (2009) "Content and composition in producer gas of fluidized bed gasification of wood—Influence of temperature and pressure", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Volume 28, Issue 3, pages 372–379, October 2009
- [17] Koppatz, S., Pfeifer, C., Hofbauer, H., (2009) "Primary Tar Reduction in a Dual Fluidised Bed Gasification System by means of Fe-supported Olivine", *17th European Biomass Conference & Exhibition, Hamburg, Deutschland; 29.06.2009 - 03.07.2009*

- [18] Pecho, J., (2007) "Oxygen transfer materials with catalytic properties for biomass gasification", dissertation submitted to ETH Zürich, Diss. ETH Nr. 17302
- [19] S. Koppatz, T. Pröll, Ch. Pfeifer, H. Hofbauer (2010) "Investigation of reforming activity and oxygen transfer of olivine in a dual circulating fluidized bed system with regard to biomass gasification" Fluidization XIII Conference 2010, Gyeong-ju, Korea 16.05.2010 - 21.05.2010, in: Fluidization XIII, S. 901 - 908
- [20] Grace, J. R., (1990) "High-velocity fluidized bed reactors", Chem. Eng. Sci. 45, 1990, pp 1953-1966
- [21] Pfeifer, C., Koppatz, S., Hofbauer, H., (2010) "Catalysts for fluidized bed biomass gasification - Overview on recent developments and applications", Proceedings of the International Conference on Polygeneration Strategies (ICPS), 7 - 9 September 2010, Leipzig, Germany
- [22] Reh, L., (2004) „Strömungs- und Austauschverhalten von Wirbelschichten“ Chemie Ingenieur Technik, Volume 46, Issue 5, pp 180-189
- [23] Hofbauer, H., Stoiber, H., Veronik, G., (1995) "Gasification of Organic Material in a Novel Fluidization Bed System", Proc. of the 1st SCEJ Symposium on Fluidization, Tokyo, pp. 291-299
- [24] Fercher, E., Mackinger, H., Voigtlander, K., Glasner, A., Obwaller, G., (1999) „Verfahren zur Erzeugung eines stickstoffarmen Gases und Vergasungsanlage“, österreichische Veröffentlichung, Patent-Nr.: AT 405 937 B, Anmelder: Austrian Energy & Environment SGP/Wagner-Biro GmbH, 03.11.1995
- [25] Pröll, T., Kolbitsch, P., Bohlar-Nordenkampf, J., Hofbauer, H., (2009) „Wirbeschichtreaktorsystem“, österreichische Veröffentlichung, Patent-Nr.: AT 505 526 A1 2009-02-15 , Anmelder TU Wien, 14.08.2007
- [26] Pröll, T., Kolbitsch, P., Bohlar-Nordenkampf, J., Hofbauer, H., (2009) „Wirbeschichtreaktorsystem“, internationale Veröffentlichung, Patent-Nr.: WO 2009/021258 A1, Anmelder (international) TU Wien, 14.08.2008
- [27] Wilk, V., Kitzler, H., Koppatz, S., Pfeifer, C., Hofbauer, H., (2010) "Gasification of residues and waste wood in a dual fluidised bed steam gasifier", ICPS 10 - International Conference on Polygeneration Strategies, Leipzig, Deutschland; 09-07-2010 to 09-09-2010, in: "ICPS 10 Proceedings"
- [28] Psik, R., Slomczynski, Z., (2008) "Final Stage of First Supercritical 460 MWe CFB Boiler Construction – Project Update", Power Gen International, Orlando, Florida, December 2-4 2008, Foster Wheeler Energia Polska, Lagisza Power Plant
- [29] Winter, F., Szentannai, P., (2009) "Brennstoffmix in Wirbelschichtfeuerungen: Status und Entwicklungstendenzen", 6. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, IEWT 2009
- [30] Werther, J., Reppenhagen, J., (1999) „Attrition in Fluidized Beds and Pneumatic Conveying Lines“, Fluidization Solids Handling and Processing, edited by Wen-Ching Yang, Noyes Publications, pp 435 ff
- [31] Pröll, T., Schmid, J., Pfeifer, C., Hofbauer, H., (2010) "Verbessertes Wirbelschichtreaktorsystem", Österreichische Patentanmeldung AT 964/2010, vom 21. 06.2010, Anmelder: TU Wien.
- [32] Pröll, T., Schmid, J., Pfeifer, C., Hofbauer, H., (2010) "Improved Fluidized Bed Reactor System", US Prov.Appl.Ser.No. 61/353,985 vom 23.07.2010, Anmelder: TU Wien.
- [33] Reh, L., (1961) „Das Wirbeln von körnigem Gut im schlanken Diffusor als Grenzzustand zwischen Wirbelschicht und pneumatischer Förderung“, Dissertation, Technische Hochschule Karlsruhe
- [34] Lewis, W.K., Gilliland, E.R., (1954) "Production of pure carbon dioxide", United States Patent No. 2,665,971, filed May 12. 1949
- [35] Bu, J., Zhu, J. X., (1999) "Influence of ring-type internals on axial pressure distribution in circulating fluidized bed", Canadian Journal of Chemical Engineering, 77(1), pp 26-34
- [36] Bi, H., Cui, H., Grace, J. R., Kern, A., Lim, C. J., Rusnell, D., Song, X., McKnight, C., (2004) "Flooding of Gas-Solids Countercurrent Flow in Fluidized Beds", Ind. Eng. Chem. Res., 43 (18), pp 5611–5619
- [37] Glicksman, L. R., Hyre, M. and Woloshun, K., (1993) "Simplified scaling relationships for fluidized beds," Powder Technology, 77, 177-199, 1993

[38] Hugi, E., (1997) "Auslegung hochbelasteter Zyklonabscheider für Gas/Feststoff-Wirbelschicht-Reaktorsysteme", Fortschr.-Ber. VDI Reihe3 Nr.502, VDI Verlag 1997

[39] Vogel, A., Bohlar-Nordenkamp, M., Kaltschmitt, M., Hofbauer, H., (2006) „ Analyse und Evaluierung der thermo-chemischen Vergasung von Biomasse“, Schriftreihe: Nachwachsende Rohstoffe, Band 29, Landwirtschaftsverlag

[40] Schmid, J., Pfeifer, C., Pröll, T., Kitzler, H., Hofbauer, H., (2010) "Entnahme und Rückführung von Synthesegas in einem Wirbelschichtsystem", Österreichische Patentanmeldung AT A964/2010, vom 06.08.2010, Anmelder: TU Wien

[41] Pröll, T., Schmid, J., Pfeifer, C., Hofbauer, H., 2010, "Design considerations for direct solid fuel chemical looping combustion systems", IEA GHG: 3rd High Temperature Solid Looping Cycles Network Meeting, Petten, The Netherlands, Sept. 15-17, 2010, available online at: www.ieaghg.org

[42] Schmid, J., 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?, D-85276 Pfaffenhofen, 29. November 2010

[43] Diaz-Castro, W.I., Mayer, K., Pröll, T., Hofbauer, H., 2011, "Influence of the fluidization velocity on the effectiveness of hydrocarbon conversion in a dual fluidized bed biomass gasifier", accepted for poster presentation at the 10th International Conference on Circulating Fluidized Beds, Sunriver, Oregon, U.S.A., May 1st-5th, 2011

[44] Guio-Perez, D.C., Marx, K., Pröll, T., Hofbauer, H., 2011, "Fluid dynamic effects of ring-type internals in a dual circulating fluidized bed system", accepted for oral presentation at the 10th International Conference on Circulating Fluidized Beds, Sunriver, Oregon, U.S.A., May 1st-5th, 2011

[45] Schmid, J., Pröll, T., Pfeifer, C., Hofbauer, H., 2011, "Improvement of Gas-Solid Interaction in Dual Fluidized Bed Systems", accepted for oral presentation at the International Conference on 9th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers (INFUB-9), Estoril, Portugal, 26 to 29 April 2011