

## **Abschlussbericht zum Forschungsprojekt**

### **Entwicklung eines innovativen Brennersystems zur energetischen Nutzung von Produktgas aus pyrolysierten Gärresten (ZIM-Projekt-Nr.: KF2517705CL2)**

Dr.-Ing. Anne Giese, Gas- und Wärme- Institut e. V. Essen

Dr.-Ing. Tim Nowakowski, Gas- und Wärme- Institut e. V. Essen

Dr.-Ing. Dieter Schillingmann, REW Regenis GmbH, Quakenbrück

Dipl.-Ing. (FH) Christian Hüwelmann, REW Regenis GmbH, Quakenbrück

## INHALTSVERZEICHNIS

### Inhaltsverzeichnis

1.	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	- 3 -
2.	Zielsetzung, Hintergrund des Projektes und Vorgehensweise.....	- 5 -
3.	Ergebnisse.....	- 6 -
3.1	Brenneruntersuchung und Brennerauslegung.....	- 6 -
3.2	Numerische Entwicklungsarbeiten.....	- 7 -
3.3	Konstruktion und Brennerfertigung.....	- 18 -
3.4	Experimentelle Untersuchungen am GWI-Versuchsstand.....	- 23 -
3.5	Untersuchungen am Gaserzeuger.....	- 35 -
3.6	Bewertung der Untersuchungen.....	- 46 -
4.	Zusammenfassung.....	- 48 -
5.	Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsprojektes.....	- 47 -
6.	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	- 48 -
7.	Gegenüberstellung von Forschungszielen und erzielten Ergebnissen.....	- 49 -
8.	Nutzen der Forschungsergebnisse und Marktchancen.....	- 50 -
8.1	Auswirkungen auf das Unternehmen REW.....	- 50 -
8.2	Marktchancen für das neue Konzept.....	- 50 -
9.	Danksagung.....	- 50 -

### 1. WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE PROBLEMSTELLUNG

Der beim Betrieb konventioneller Biogasanlagen anfallende Gärrest wird überwiegend als Düngemittel auf Ackerflächen ausgebracht, da die vergorenen Substrate in der Regel einen nicht unerheblichen Anteil an wertvollen Nährelementen, wie Stickstoff, Phosphor oder Kalium enthalten. Während der Vergärung der eingebrachten Substrate zu Biogas wird den in den Prozess eingebrachten Stoffen ein Teil der chemisch gebundenen Energie entzogen. Der Gärrest weist jedoch noch einen Restenergiegehalt auf, der eine weitere Nutzung zur Erzeugung eines Synthesegases durch einen nachfolgenden Vergasungsprozess ermöglicht. Durch die Kopplung von Vergärung und Pyrolyse zur Erzeugung regenerativer Gase lässt sich die Energiebilanz einer solchen Anlage entscheidend verbessern. Aus dem ansonsten energetisch nicht genutzten Gärrest wird ein Brenngas gewonnen, das die Anlage weitestgehend unabhängig von einer Versorgung mit fossilen Brennstoffen macht und zudem für den Betrieb dezentraler Einrichtungen der Wärme- und Stromerzeugung zur Verfügung steht. In dem Pyrolyseprozess wird ein heißes Produktgas gebildet, das neben CH<sub>4</sub>, CO und H<sub>2</sub> auch diverse höhere Kohlenwasserstoffe und einen größeren Anteil an gasförmigen Teer und Wasserdampf aufweist. Dieser Brennstoff ist unter den gegebenen Randbedingungen nicht unproblematisch und stellt an das Brennersystem und die Regelorgane hohe Anforderungen. Neben der Vermeidung einer Teer-Kondensation ist eine schadstoffarme Verbrennung dieses feuchten Pyrolysegases mit schwankender Zusammensetzung zu realisieren. Ein geeignetes Brennersystem für diesen speziellen Anwendungsfall ist der sog. COSTAIR-Brenner (CONTinuously STaged Air with Internal Recirculation), bei dem die Verbrennungsluft durch einen zentralen Luftverteiler und das Brenngas über kreisförmig um den Verteiler angebrachte Öffnungen in den Brennraum eingedüst wird. Aufgrund der kontinuierlichen Luftstufung stellt sich entlang des Luftverteilers stets ein zündfähiges Gemisch ein, sodass eine stabile Verbrennung möglich ist. Eine Besonderheit ist die Gaszuführung, bei der das heiße Produktgas nicht mittels eines Gebläses, sondern unter Verwendung von auf dem Injektorprinzip basierenden Lanzen in die Brennkammer geführt wird. Dabei dient ein Teil der zur Verbrennung erforderlichen Luft als Treibmedium für den Injektor, wobei das Brenngas aufgrund eines hohen Impulses stromab in die Brennkammer getrieben wird. Hieraus resultiert ein komplexes Regelsystem, bei dem die Volumenströme von Brennstoff und Verbrennungsluft miteinander gekoppelt sind.

Die Markteinführung solcher Anlagenkonzepte stellt ein gewisses wirtschaftliches Risiko dar, da potentielle Kunden eine gewisse Zurückhaltung gegenüber neuen Technologien ohne ausreichende zahlreiche Referenzanlagen haben. Deshalb liegen die wirtschaftlichen Risiken von REW in den zu tätigenden Investitionskosten zur Entwicklung und Bereitstellung eines solchen Konzeptes und der daran anschließenden Akzeptanz beim Kunden. Erst nach einer gewissen Laufzeit in einer Versuchs- oder Pilotanlage kann beziffert werden, inwiefern sich dieses Brennerkonzept in Kombination mit der geplanten Biogasverbundanlage technisch und wirtschaftlich bewährt. Da bereits mehrere Systeme zur energetischen Nutzung von Biomasse auf dem Markt vorhanden sind, ist ein erhöhter Konkurrenz- und Wettbewerbsdruck zur erfolgreichen Markteinführung von neuen Produkten im Bereich der Biomassenutzung und erneuerbaren Energien vorhanden. Deshalb müssen neue Technologien durch Innovation und Kosteneffizienz überzeugen.

Die wirtschaftlichen Risiken von REW liegen

1. in den Investitionskosten für die Entwicklung dieser innovativen Brennertechnik einschließlich der Einbindung in die Gesamtanlage,
2. der Entwicklung eines Integrationskonzeptes des Brenners für die Steuer und Regelungseinheit,
3. der anschließenden Akzeptanz beim Kunden sowie der Erschließung eines entsprechenden Absatzmarktes.

## 2. ZIELSETZUNG, HINTERGRUND DES PROJEKTES UND VORGEHENSWEISE

Das Ziel dieses Projektes lag in der Konzeptionierung, Herstellung und Erprobung eines Brennersystems für die Anwendung in einem Pyrolysegaserzeuger zur energetischen Nutzung des erzeugten Synthesegas. Die Nutzung der erzeugten Wärme dient u. a. dem Gaserzeugerprozess und verbessert somit die Energiebilanz der Anlage.

Im geplanten Projekt sind aufeinander abgestimmte numerische, konstruktive und experimentelle Entwicklungsarbeiten erfolgt. Die genauen Arbeitsschritte entsprechen den nachfolgenden Kapiteln des Berichtes.

Dabei ist zunächst eine numerische Lösung mit anschließender experimenteller Überprüfung an einem GWI-Versuchsofen gefunden worden. Da numerische Parametervariationen im Vergleich zum Experiment viel kostengünstiger und zeiteffektiver sind, ist die Strategie, möglichst viele sinnvolle Varianten numerisch zu erproben und Erfolg versprechende Varianten durch ausgewählte experimentelle Untersuchungen zu überprüfen und zu validieren. Anschließend sollte der Betrieb des neuentwickelten Brenners am Gaserzeuger über einen längeren Zeitraum unter realen Betriebsbedingungen überprüft werden. Abschließend sollte die Einbindung des Brennersystems in die Steuerung des Pyrolysereaktors erfolgen.

Bei der Entwicklung des Syngasbrenners sollten folgende Randbedingungen berücksichtigt werden:

- Entwicklung einer geeigneten Brennergeometrie für die Verbrennung von Syngas aus entgasten Gärresten
- Entwicklung einer Gas- und Luftregelstrecke zur Integration in die Anlage sowie Anpassung des Steuer- und Regelkonzeptes
- kompakte Bauform des Brenners, kostengünstige Realisierung, geringer Wartungsaufwand und großer Regelbereich
- Realisierung einer stabilen und schadstoffarmen Verbrennung innerhalb der Grenzen der TA Luft
- stabiles Verbrennungsverhalten auch bei schwankenden Gaszusammensetzungen
- Integration des Brenners in das Konzept des Gaserzeugers für Bereitstellung von Prozesswärme für z. B. nachgeschaltete KWK-Anwendung
- prozessinterne Nutzung der heißen Abgase für weitere Verfahrensschritte
- Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit und technische Realisierbarkeit eines solchen Anlagenkonzeptes

### 3. ERGEBNISSE

#### 3.1 Brenneruntersuchung und Brennerauslegung

Grundlage der Entwicklung eines Produktgasbrenners für die thermische Nutzung von pyrolysierten Gärresten stellt eine chemische Analyse des zu verbrennenden Produktgases dar, um auf diese Weise Auskunft über die chemische Zusammensetzung und wesentliche Stoffeigenschaften (Dichte, Heizwert, etc.) zu gewinnen. Diese Informationen sind unerlässlich für die Auslegung des Brenners, da sie sich zum einen unmittelbar auf die Geometrie niederschlagen, zum anderen aber insbesondere der im Produktgas in großen Mengen enthaltene gasförmige Teer sich als problematisch darstellt. REW ermittelte in Zusammenarbeit mit der Universität Kassel und dem GWI folgende typische Produktgas-Zusammensetzung, die der weiteren Auslegung des Brenners zugrunde gelegt wird:

*Tabelle 3-1: chemische Zusammensetzung Synthesegas*

Komponente	Summenformel	Anteil [Vol.-%]
Kohlenmonoxid	CO	1
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	4,8
Methan	CH <sub>4</sub>	2,2
Wasserstoff	H <sub>2</sub>	3,2
Ethan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,5
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,3
Teer	-	3,3
Wasser	H <sub>2</sub> O	84,7
Stickstoff	N <sub>2</sub>	0

Zwar macht der Teer nur etwas über 3 Vol.-% des Gemischs aus, trägt aber aufgrund seiner komplexen chemischen Zusammensetzung mit mehr als 20 % zur Gesamtmasse des Gases und etwa 80 % zum Heizwert bei. Auch die weiteren für die Brennerauslegung relevanten Randbedingungen, etwa die Temperatur des Produktgases, wurden festgelegt.

Da das Produktgas von allen Projektpartnern als herausfordernder Brennstoff eingestuft wird, war es naheliegend, das Brennerkonzept an bekannte und etablierte Brennersysteme für schwachkalorische Brenngase anzulehnen. Der sogenannte COSTAIR-Brenner (COntinuously STaged Air with Internal Recirculation) bietet sich in besonderer Weise für solch problematische Brenngase an und hat sich in vielen Schwachgas-Anwendungen bewährt. Der Luftverteiler selbst ist ein Zylinder, aus dem die Verbrennungsluft über zahlreiche auf der Mantelfläche angebrachte Bohrungen in den Brennraum eindringt. Der Vorteil dieser Konfiguration ist, dass sich aufgrund der kontinuierlichen Luftstufung selbst bei in ihrer Zusammensetzung schwankenden schwachkalorischen Brenngasen immer irgendwo entlang des Luftverters ein zündfähiges Gemisch einstellt, sodass eine stabile Verbrennung stattfinden kann. Dieser Brenner erscheint daher gerade für die thermische Nutzung von Biogasen mit schwankenden Verbrennungseigenschaften besonders geeignet.

Ein Alleinstellungsmerkmal des geplanten Brennersystems ist, dass das heiße Produktgas nicht mit Hilfe von Gebläsen in die Brennkammer gefördert wird, sondern mit Hilfe von auf dem Injektorprinzip basierenden Einzellanzen. Hierbei wird ein Teil der für die Verbrennung benötigten Luft mit hohem Impuls dergestalt durch ein Brenngas-Reservoir geführt, dass das Produktgas mitgerissen und in die stromab liegende Brennkammer eingebracht wird. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass dadurch auf ein kostspieliges Gebläse zur Förderung des heißen und staubeladenen Produktgases verzichtet werden kann. Problematisch hingegen ist, dass sich bei diesem Konzept ein teilvorgemischtes Brenngas-Luft-Gemisch unmittelbar hinter dem Lanzenkopf ergibt. Hier muss durch die Konstruktion sichergestellt werden, dass es weder zur verfrühten Zündung noch zur Ablagerung von Teer, der im Produktgas als Gasphase vorliegt, kommt. Auch die Regelung eines solchen Brenners ist komplexer, da Brenngas- und Luftströme nicht mehr komplett voneinander entkoppelt sind. Vielmehr ist der eingebrachte Brenngasvolumenstrom eine Funktion des Förderluftstroms. Aufgrund dieser komplexen Zusammenhänge ist es notwendig, bereits in einer frühen Entwicklungsphase besonderes Augenmerk auf die Auslegung der Einzellanzen zu legen.

## 3.2 Numerische Entwicklungsarbeiten

### 3.2.1 Erstellung von möglichen Brennergeometrien

Wie zuvor erwähnt, wird das Konzept einer Venturidüse zur Injektion des sich im Unterdruck befindenden Brennstoffmediums favorisiert. Nachfolgend ist der schematische Aufbau einer Düsengeometrie für den konkreten Anwendungsfall skizziert (Abbildung 3-1). Als Treibmedium dient Gebläseluft.

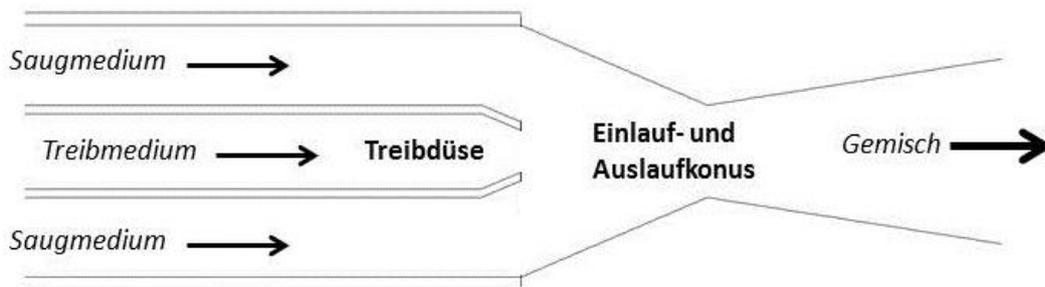
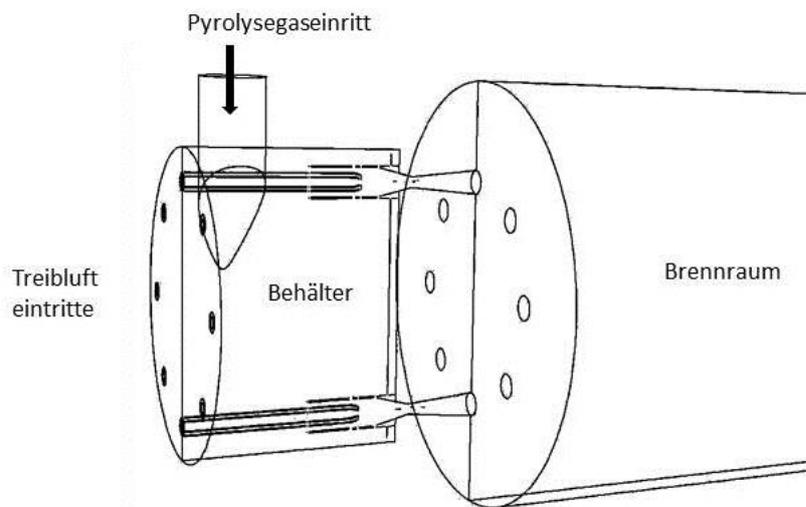


Abbildung 3-1: schematische Zeichnung von Injektordüse

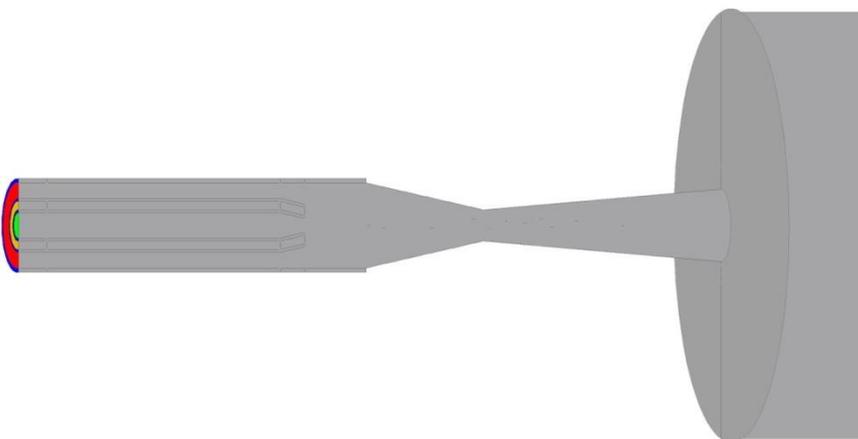
In der Abbildung 3-1 ist der gesamte Brenner einschließlich Brennraum dargestellt. Der Brenner besteht aus einem Brennstoffplenum, in dem sich die oben beschriebenen Venturidüsen befinden.



**Abbildung 3-2: schematische Darstellung Brennergeometrie**

Über zusätzliche, das Plenum durchdringende Rohrleitungen werden die Düsen mit der notwendigen Treibluft versorgt und injizieren so ein Gemisch aus angesaugtem Brenngas und Luft in den Brennraum. Die nötige Verbrennungsluftversorgung erfolgt über einen in der Abbildung 3-2 nicht dargestellten Luftverteiler.

Die Konzeptionierung der Einzeldüsen stellt bei der Entwicklung des Brenners eine Schlüsselkomponente dar. Somit bedarf es zunächst einer Einzelbetrachtung des Düsenkonzeptes. Die Einzeldüsen Simulationen wurden ohne die Einbeziehung der Wärmestrahlung durchgeführt, da hier aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus keine nennenswerten Einflüsse zu erwarten sind. Die Injektordüse besitzt eine mittig angeordnete Treibluftdüse, ummantelt von Stahlrohren und einer Isolationsschicht aus Kieselgur, um eine Abkühlung des heißen Produktgases (mit der damit verbundenen Gefahr dass Teer ausfällt) durch die kalte Treibluftdüse zu vermeiden. Umschlossen wird die Treibdüse durch ein Stahlrohr. Die genaue Geometrie zeigt die nachstehende Abbildung 3-3.

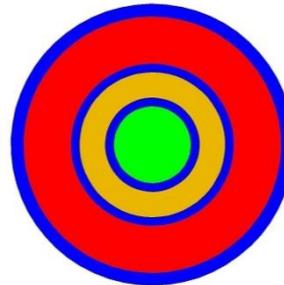


**Abbildung 3-3: CAD-Modell Injektordüse**

Zusätzlich sind in Abbildung 3-3 die Querschnittsflächen am Anfang des Rechenggebietes farblich markiert. Diese sollen die beiden Eintritte und die Positionen der Rohre verdeutlichen. Nachfolgend sind die Bezeichnungen vergrößert dargestellt.

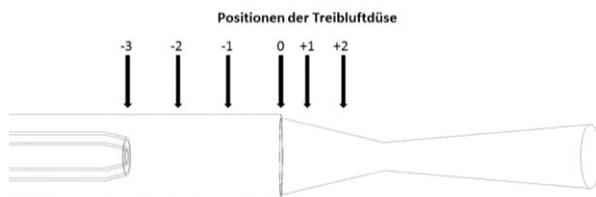
Querschnittsflächen:

- Grün → Treibluftrohrentritt
- Blau → Stahlrohre
- Orange → Kieselgur
- Rot → Pyrolysegaseintritt

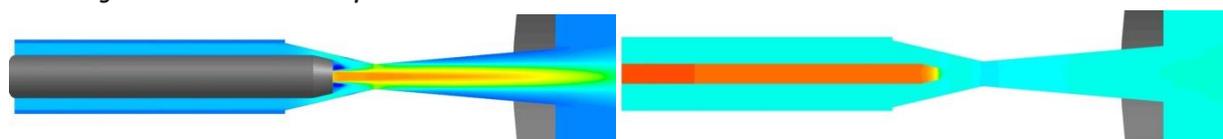


**Abbildung 3-4: Querschnittsflächen**

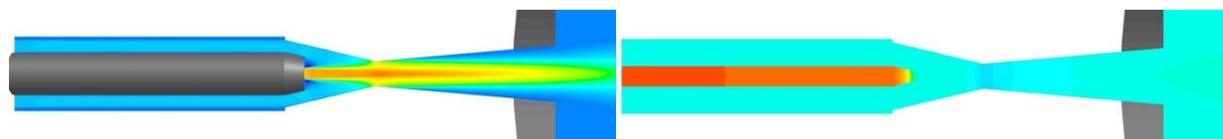
Zur Überprüfung des maximal erreichbaren Brenngasmassenstroms ist die Untersuchung der Düsenkonfiguration, insbesondere die Einflüsse der Positionierung der Düsenkomponenten zueinander von großer Bedeutung. Nachfolgend zeigen die Abbildungen eine Variation der Positionierung der Treibdüse in der Venturidüse und dessen Einfluss auf die Strömungsverhältnisse. Die Abbildung 3-5 zeigt analog zu der Abbildung 3-3 eine Venturidüse mit gekennzeichneten Positionen der Treibdüse mit einem festgelegten Bereich von -3 bis +2.



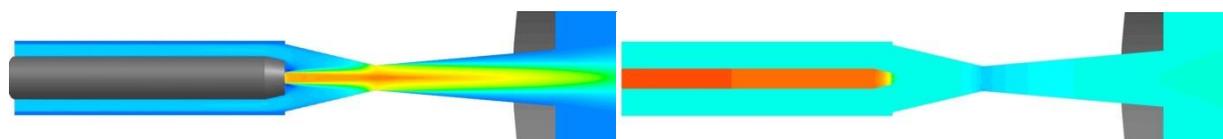
**Abbildung 3-5: Schema Treibdüsenposition**



**Abbildung 3-6: Axialgeschwindigkeit (links) und statischer Druck (rechts) bei Position „+2“**



**Abbildung 3-7: Axialgeschwindigkeit (links) und statischer Druck (rechts) bei Position „+1“**



**Abbildung 3-8: Axialgeschwindigkeit (links) und statischer Druck (rechts) bei Position „0“**

### 3 Ergebnisse

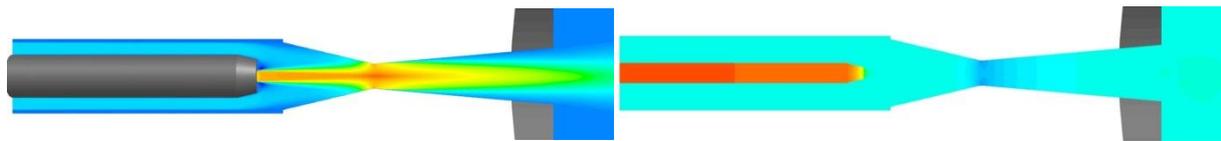


Abbildung 3-9: Axialgeschwindigkeit(links) und statischer Druck (rechts) bei Position „-1“

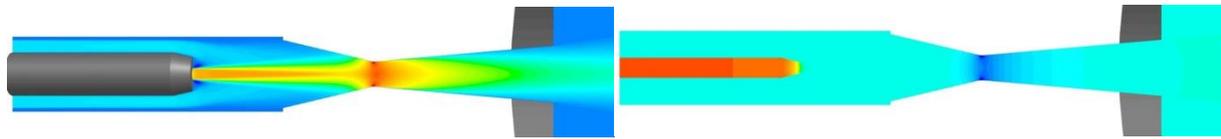


Abbildung 3-10: Axialgeschwindigkeit(links) und statischer Druck (rechts) bei Position „-2“

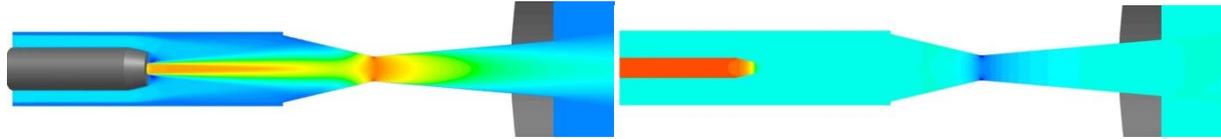


Abbildung 3-11: Axialgeschwindigkeit(links) und statischer Druck (rechts) bei Position „-3“

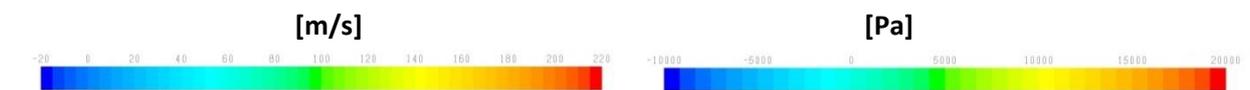


Abbildung 3-12: Skalen CFD-Ergebnisse

Wie in den Abbildungen 3-6 bis 3-11 erkennbar, übt die Variation der Treibdüsenposition einen erheblichen Einfluss auf die Geschwindigkeitsverteilung in der Düse aus. Zur Verdeutlichung des Einflusses auf den Brennstoffmassenstrom zeigen die weiteren Abbildungen 3-6 bis 3-12 der Ergebnisse der Simulation im Hinblick auf die Verteilung des statischen Drucks in der Düse.

Ein Vergleich der Geschwindigkeits- und Druckverteilung zeigt deutlich, dass die Position „-2“ den niedrigsten lokalen statischen Druck erzeugt und somit den größtmöglichen Massenstrom des anzusaugenden Brenngases ermöglicht. In dem Diagramm der Abbildung 3-13 ist der Brenngasmassenstrom über der Treibdüsenposition aufgetragen. Zur weiteren Variation der Parameter sind die Simulationen zusätzlich mit verschiedenen Treibluftdrücken durchgeführt worden.

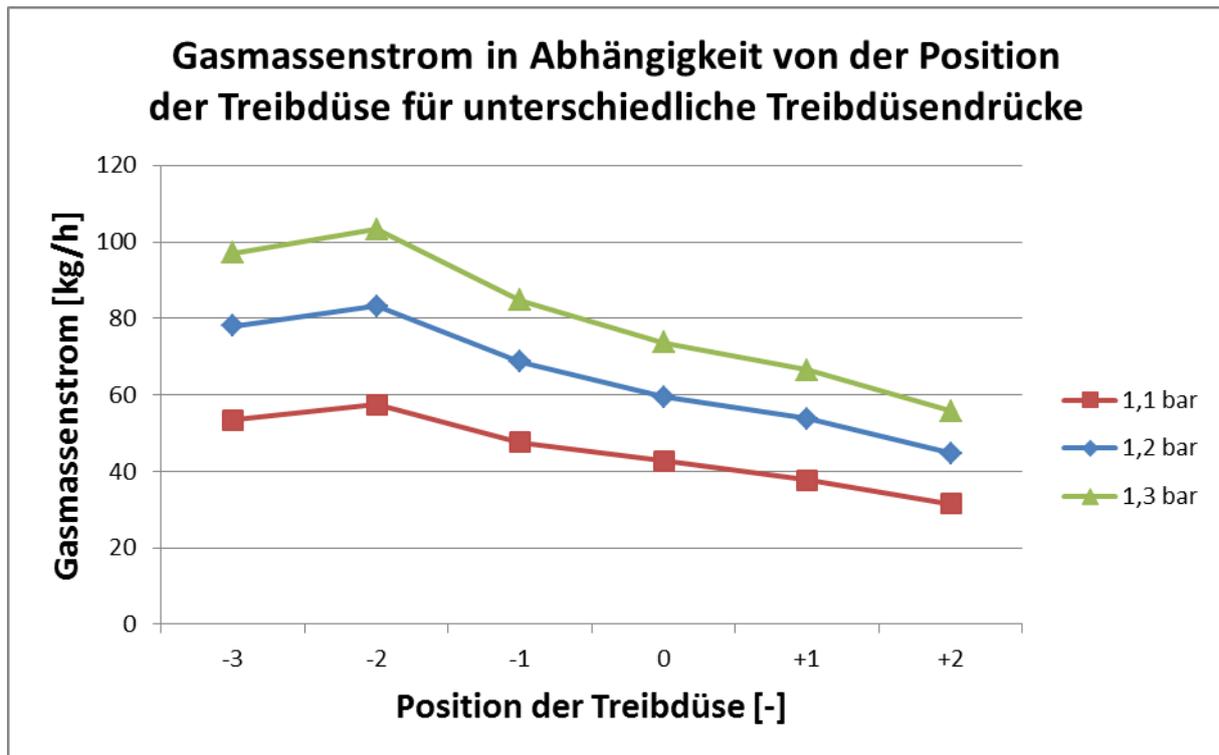
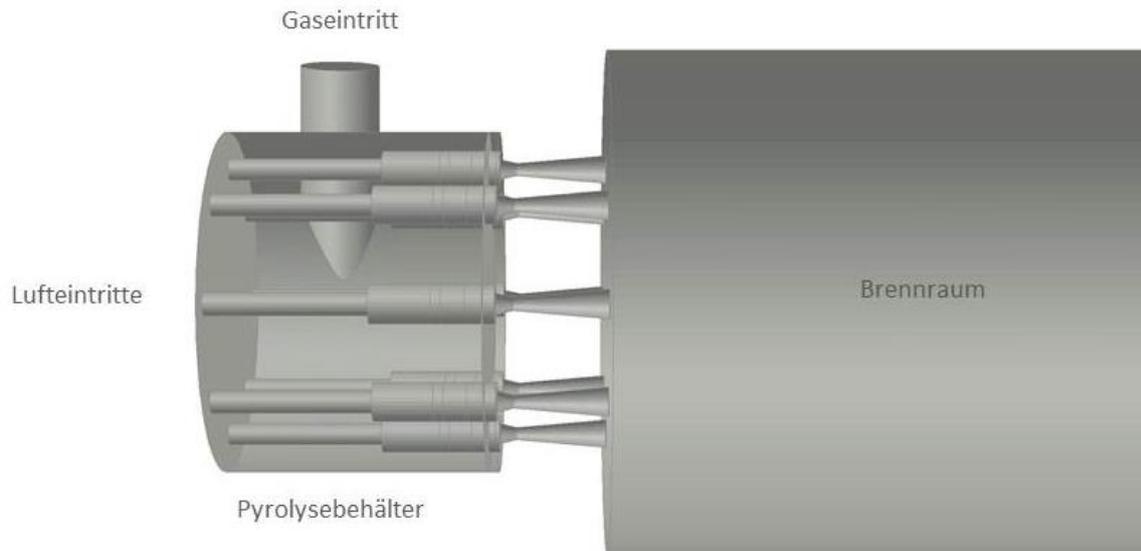


Abbildung 3-13: Einfluss Treibdüsenposition auf Gasvolumenstrom

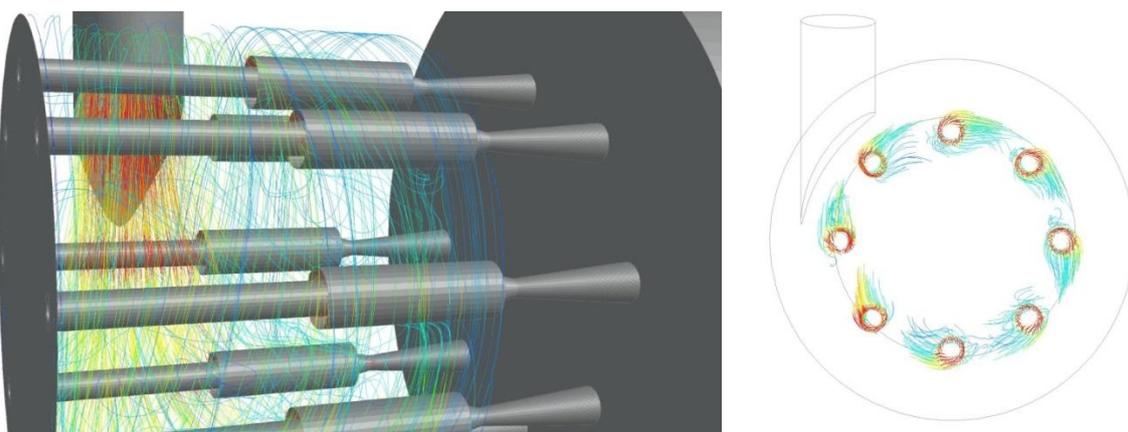
Das Diagramm gibt den oben bereits genannten Sachverhalt erkennbar wieder. Der Gasmassenstrom erreicht mit der Position „-2“ sein Maximum und steigt mit zunehmendem Treibluftdruck.

Neben den strömungstechnischen Vorgängen in den einzelnen Düsen sind ferner die Strömungsverhältnisse am Düsen Eintritt beziehungsweise in den vorgeschalteten Komponenten zu betrachten. Die Abbildung 3-14 liefert ein dreidimensionales Modell des Brennersystems. Wie zu erkennen ist, befinden sich die Gasdüsen zwischen dem Pyrolysegasbehälter und dem Brennraum. Die Treibluft wird über eine durchgehende Rohrleitung zur jeweiligen Düse geführt. Das Brenngas strömt - konstruktiv bedingt - tangential in das Pyrolysegasplenum und verteilt sich auf die acht Düsen.



**Abbildung 3-14: CAD Modell des Brennersystems**

Die nachfolgenden Abbildungen 3-15 und 3-16 zeigen links im Bild die Stromlinien der Gasströmung im Pyrolyseplenum. Die jeweils rechte Abbildung zeigt die Strömungsgeschwindigkeiten bezogen auf die Düsenringflächen. Der Unterschied beider Konfigurationen liegt in der Variation der Mantelrohrlänge der jeweiligen Düsenkonfiguration. In Abb. 3-15 sind die Mantelrohre deutlich länger ausgeführt als in Abbildung 3-16. Dies hat, wie in den Abbildungen ersichtlich, Auswirkungen auf die Geschwindigkeitsverteilung um die Düsen. Die jeweils rechten Darstellungen der Abbildungen zeigen, dass sich die Eintrittsgeschwindigkeit an der Düse durch ein kürzeres Mantelrohr reduziert.



**Abbildung 3-15: Stromlinien Version 1**

### 3 Ergebnisse

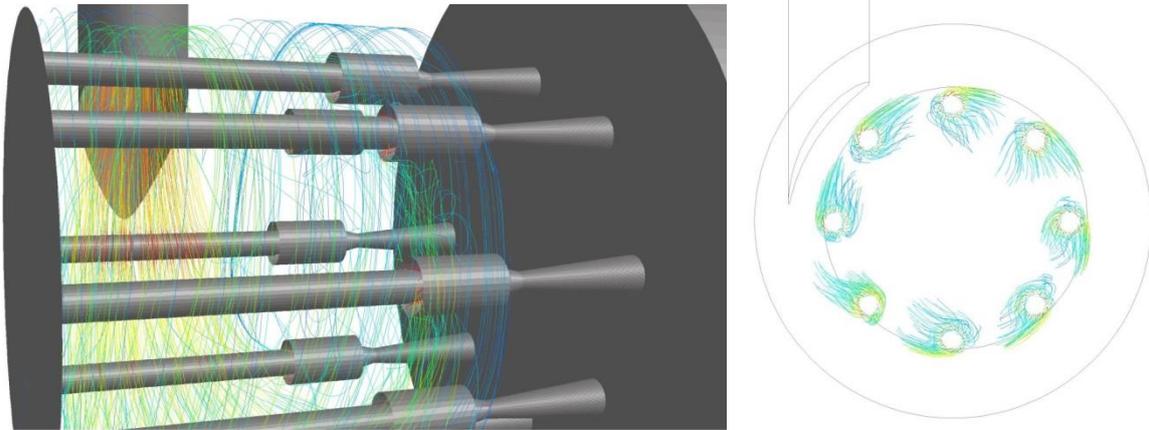


Abbildung 3-16: Stromlinien Version 2

[m/s]

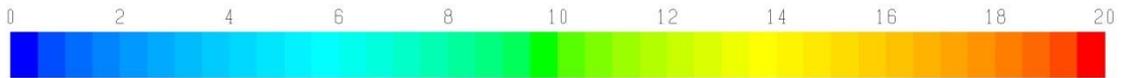


Abbildung 3-17: Skala der CFD-Ergebnisse

Zur Quantifikation der einzelnen Gasmassenströme an den jeweiligen Injektordüsen stellen die Abbildung 3-19 und 3-20 die jeweiligen Düsenströme sowie deren Abweichung vom arithmetischen Mittelwert dar. Die Kennzeichnung der jeweiligen Düse lässt sich aus der Abb. 3-18 entnehmen.

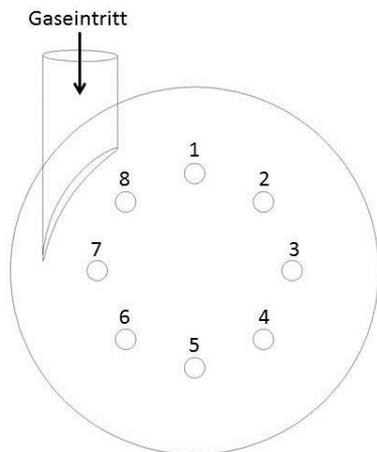


Abbildung 3-18: Kennzeichnung der Injektordüsen

Im Diagramm der Abbildung 3-19 sind die Gasmassenströme über den acht vorhandenen Düsen aufgetragen. Bei einem Vergleich beider Versionen untereinander werden deutliche Unterschiede sichtbar. Die Konfiguration mit langen Mantelrohren (Version 1) erreicht einen im Mittel höheren Gasmassenstrom als die Konfiguration mit gekürzten Mantelrohren. Auffallend ist in dem Diagramm 3-19 zudem die Verteilung der Gasströmung auf die acht Düsen. Die Düsenkonfiguration „Version 2“ zeigt im Vergleich mit Version 1 eine deutlich homogenere Verteilung der Gasmassenströme.

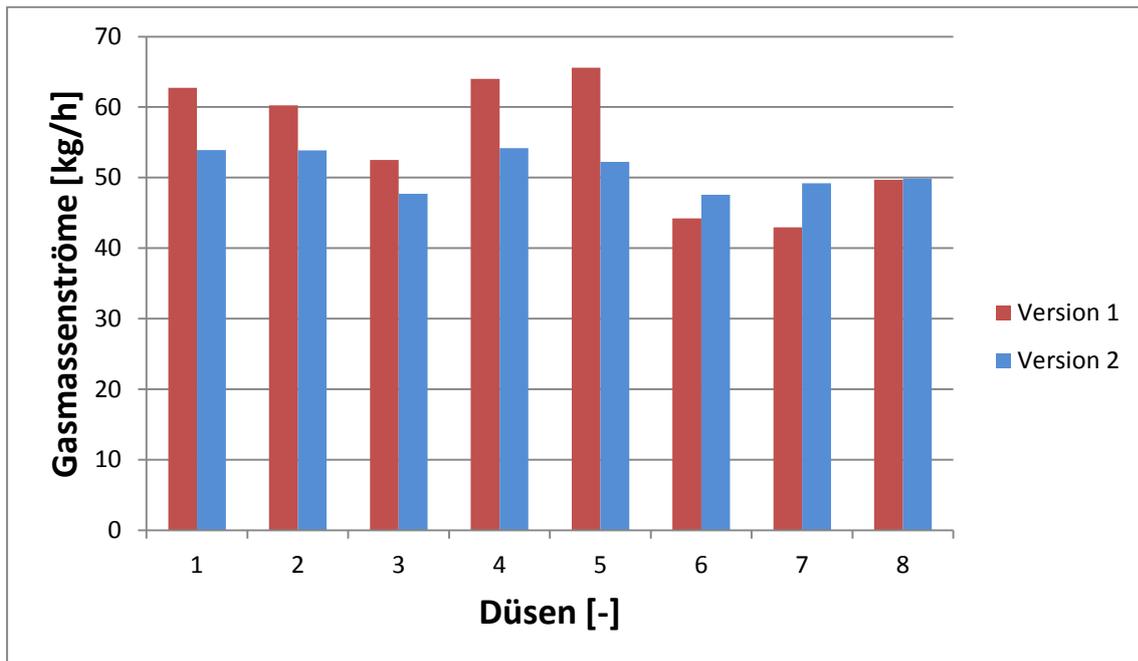


Abbildung 3-19: Gasmassenströme aller Düsen für beide Versionen

Zur Verdeutlichung der Differenzgasmassenströme ist im Diagramm 3-20 die Abweichung vom arithmetischen Mittel beider Versionen über den einzelnen Düsen aufgetragen.

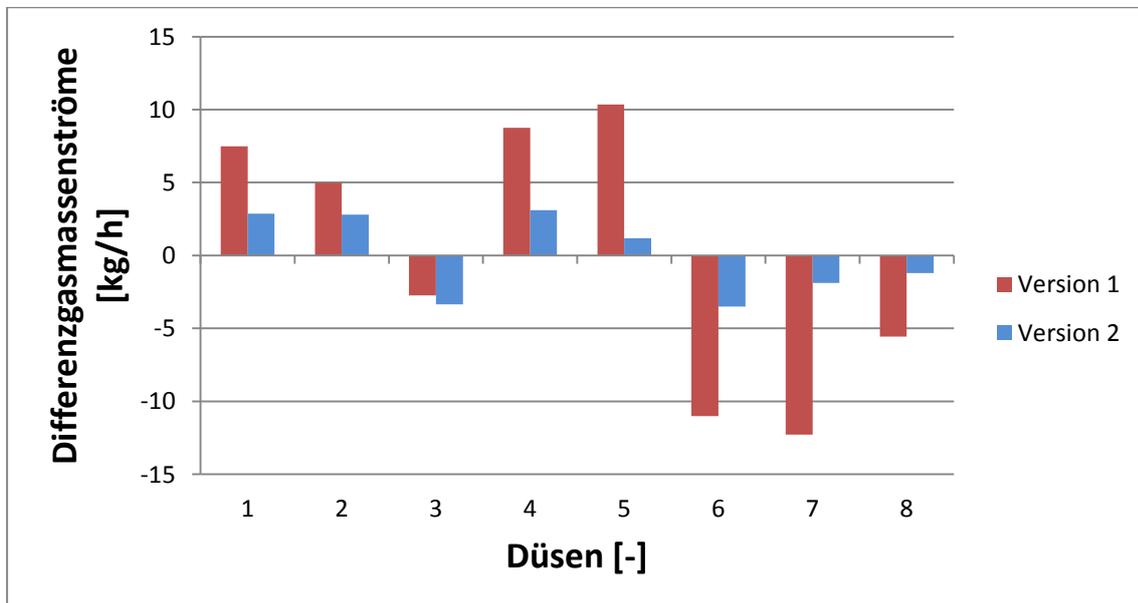


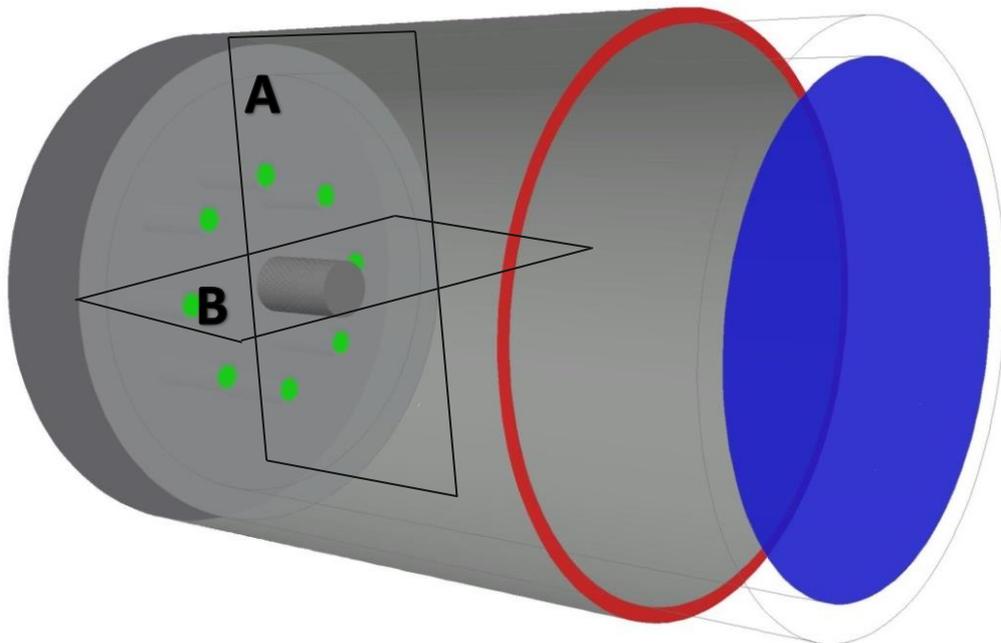
Abbildung 3-20: Differenzgasmassenströme aller Düsen für beide Versionen

### 3.2.2 Optimierung, Post-Processing und Auswertung der Ergebnisse

Nach der in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Optimierung der einzelnen Gasdüsen werden in diesem Abschnitt die physikalischen Vorgänge am Brenner beziehungsweise im Brennraum betrachtet.

Die zuvor genannten Randbedingungen werden beibehalten, sodass die aus der Simulation erworbenen Erkenntnisse und Ergebnisse in die Simulation des neuen Bereichs einfließen. In der Abbildung 3-21 ist

dieser Bereich schematisch dargestellt. Die Gasdüsen sind in dem Schema grün markiert und symmetrisch um den Luftverteiler positioniert. Der Brennraum wird von einer Ringfläche umhüllt. In dieser Ringfläche wird die Sekundärverbrennungsluft im Gegenstrom zur reagierenden Strömung geführt und strömt am Ende über den Luftverteiler in den Brennraum. Neben der Kühlung des Bauteils wird die Verbrennungsluft zusätzlich erwärmt und erhöht die Flammentemperatur. Zusätzlich sind in der Abbildung 3-21 zwei Mittelebenen skizziert, welche die Basis der Ergebnisdarstellung der Simulation bildet.



**Abbildung 3-21: Geometrie des hinteren Brennersystems und Darstellung der Mittelebenen A und B**

Die Abbildungen 3-22 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung für die Mittelebenen A und B. Der Sekundärluftmassenstrom wird entlang der Brennkammerwand geführt und anschließend im Luftverteiler beschleunigt. Die höchsten Geschwindigkeiten ergeben sich in der Nähe der Bohrungen des Luftverteilers. Die Skala der Geschwindigkeit wurde jedoch angepasst, um die unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereiche in der Brennkammer deutlich zu machen.

Erkennbar ist, dass die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten im vorderen und äußeren Bereich der Brennkammer vorzufinden sind. Das liegt u. a. daran, dass das aus den Injektordüsen austretende Gemisch, welches eine recht hohe Axialgeschwindigkeit besitzt, nach außen gedrängt wird und das Gemisch weiter an der Brennkammerwand entlang strömt.

### 3 Ergebnisse

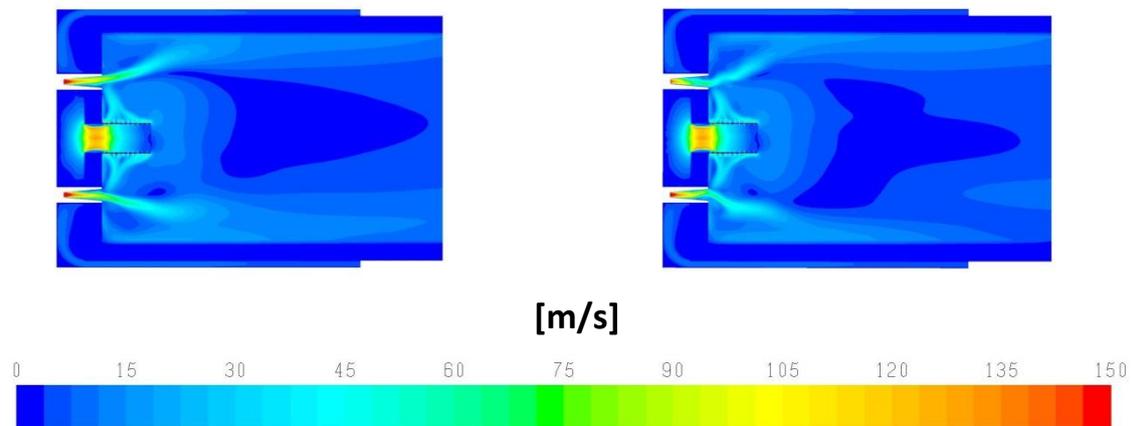


Abbildung 3-22: Geschwindigkeit, Mittelebene A (li.) und Mittelebene B (re.)

Die Abbildung 3-23 zeigt die negative Axialgeschwindigkeitsverteilung für die Mittelebenen A und B. Der Sekundärluftmassenstrom strömt zunächst gegen die Hauptströmungsrichtung.

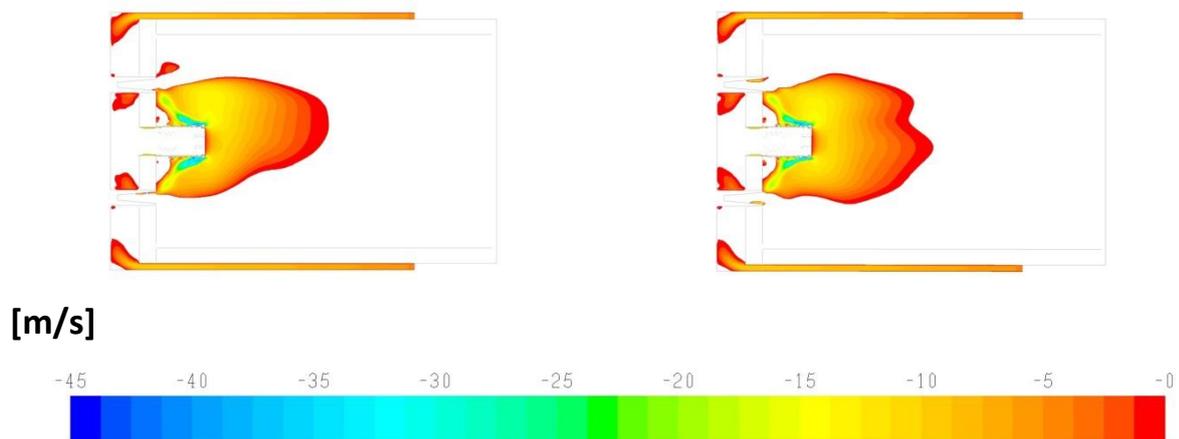


Abbildung 3-23: Axialgeschwindigkeit, Mittelebene A (li.) und Mittelebene B (re.)

Der vordere Teil der Brennkammer, insbesondere der Bereich um den Luftverteiler, weist ziemlich hohe Strömungsgeschwindigkeiten auf. Anhand der negativen Axialgeschwindigkeit lassen sich nun Rezirkulationszonen erkennen. Diese Rezirkulationszone nimmt einen großen Teil des Brennraumes ein und ist besonders im direkten Bereich am Luftverteiler mit hohen negativen Geschwindigkeiten gekennzeichnet. Anzumerken ist, dass die maximalen negativen Axialgeschwindigkeiten über  $-60$  m/s ansteigen, die Skala wurde jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit angepasst.

Die Abbildung 3-24 zeigt die Temperaturverteilung für die Mittelebenen A und B.

Der Sekundärluftmassenstrom wird entlang der Brennkammer transportiert, was ein Erwärmen des Fluides zur Folge hat. Die erwärmte Luft wird mittels Luftteiler der Brennkammer zugeführt. Die radial nach außen strömende Sekundärluft lenkt das aus den Düsen austretende Gemisch mit ab. Im vorherigen Kapitel wurde bereits gezeigt, dass sich die Gasmassenströme nicht gleichmäßig verteilen. Der Treibluftmassenstrom ist in allen Injektordüsen gleich groß. Die einzelnen Injektordüsen besitzen daher auch unterschiedliche Luftzahlen. Auch der zugeführte Sekundärluftmassenstrom verteilt sich durch den Luftverteiler symmetrisch in der Brennkammer. Die verschiedenen Bereiche mit unterschiedlich hohen

### 3 Ergebnisse

Luftzahlen innerhalb der Brennkammer führen letztlich zu in den Temperaturverteilungen zu sehenden unsymmetrischen Temperaturbereichen. Idealerweise würden sich die Mittelebenen A und B hinsichtlich der Temperatur, aber auch anderen verbrennungstechnischen Größen, nicht unterscheiden. Jedoch zeigt sich an dieser Stelle, dass der unsymmetrisch platzierte Gaseintritt wesentlichen Einfluss auf die gleichmäßige Verteilung innerhalb der Brennkammer besitzt. Da es gilt, diese unerwünschte Temperaturverteilung zu vermeiden, wird dazu geraten, den Gaseintritt symmetrisch anzuordnen. Die berechnete maximale Temperatur im Brennersystem liegt bei ungefähr 1800 °C. In der Realität ist eine niedrigere Temperatur zu erwarten. Zum einen wurde die Simulation adiabat durchgeführt. Zum anderen wurde eine Teerersatzspezies verwendet. Diese Teerersatzspezies weist einen circa 20 % höheren Heizwert auf, was dann auch zu höheren Verbrennungstemperaturen innerhalb der Brennkammer führt.

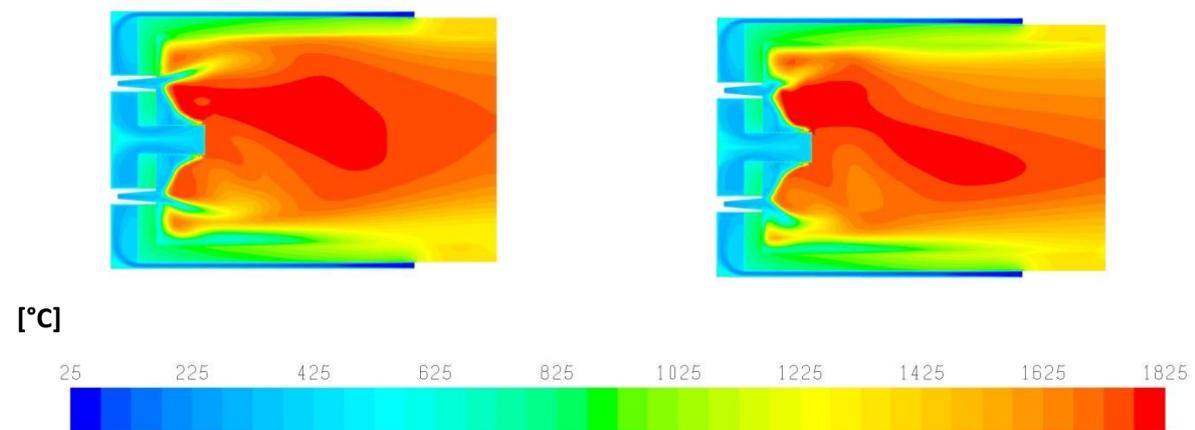


Abbildung 3-24: Temperatur, Mittelebene A (li.) und Mittelebene B (re.)

Die Abbildung 3-25 zeigt die CO-Verteilung für die Mittelebenen A und B. Erkennbar ist die ungleichverteilte Reaktionszone bei einer CO-Konzentration bis zu 5000 ppm. Die Ungleichverteilung der Gasmasenströme in den Injektordüsen und damit eine krumme und verschobene Flamme erschwert eine stabile und sichere Verbrennung. Dies kann in der Realität ein Problem darstellen und muss demnach berücksichtigt werden.

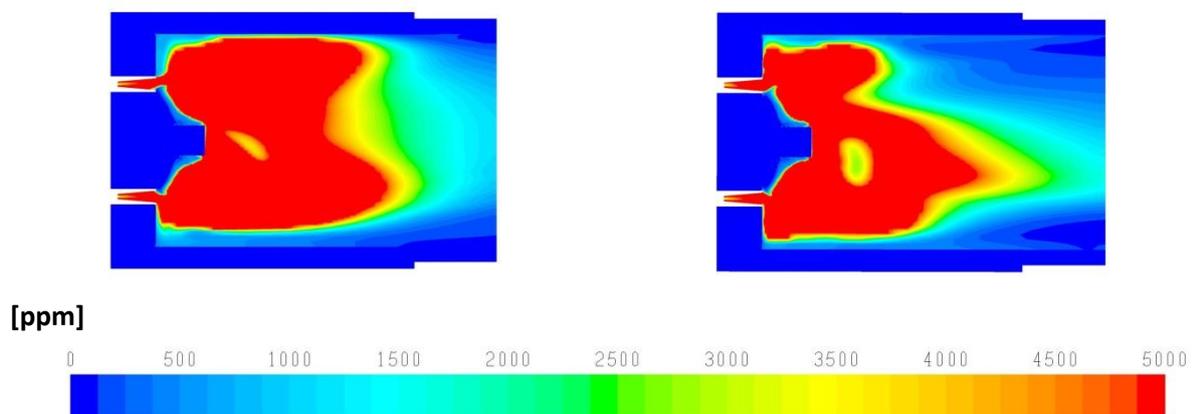


Abbildung 3-25: CO-Werte, Mittelebene A (li.) und Mittelebene B (re.)

Weiterhin wird in den Abbildungen deutlich, dass die Reaktionszone einen großen Bereich des Brennkammerraumes in Anspruch nimmt. Der gemittelte CO-Wert am Austritt beträgt ungefähr 500 ppm. Die

große Reaktionszone und die erhöhte CO-Konzentration am Austritt legen die Vermutung nahe, dass die Verbrennung noch nicht vollständig abgeschlossen ist.

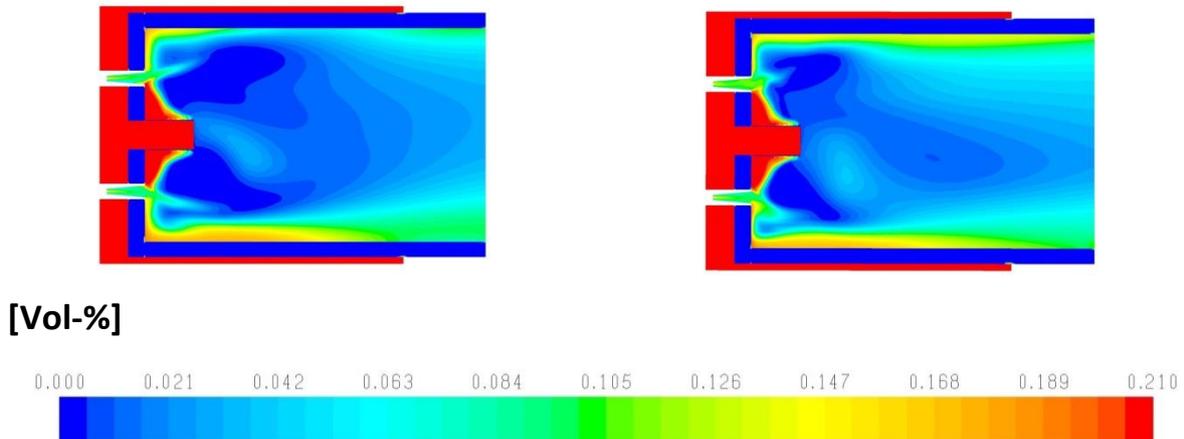


Abbildung 3-26: O<sub>2</sub>-Verteilung, Mittelebene A (li.) und Mittelebene B (re.)

Auch die Temperaturverteilungen zeigten, dass sogar der Rand im Brennraum erwärmt wird, was mit einer großen Reaktionszone einhergeht. Daher lässt sich u. a. anhand der CO-Verteilungen eine Verringerung der Gasmassenströme in Erwägung ziehen oder eine Vergrößerung der Brennkammer.

Abbildung 3-26 zeigt die O<sub>2</sub>-Verteilung für die Mittelebenen A und B. Die Ungleichverteilung der Gasmassenströme in den Injektordüsen ist auch hier erkennbar, d. h. es bilden sich Bereiche in der Brennkammer, die relativ stark unterschiedlich hohe O<sub>2</sub>-Konzentrationen aufweisen. Besonders in den äußeren Bereichen der Brennkammer ist eine hohe O<sub>2</sub>-Konzentration zu beobachten, was sich auch bis zum Brennkammeraustritt nicht wesentlich ändert. Insgesamt ist weiterhin zu sagen, dass ein Überschuss an O<sub>2</sub> zu erwarten war, da der Brenner mit einer Luftzahl von  $\lambda \approx 1,5$  simuliert wurde. Am Austritt beträgt der gemittelte O<sub>2</sub>-Anteil ungefähr 5 Vol-%. Die sehr große Reaktionszone weist darauf hin, dass die Verbrennung noch nicht abgeschlossen ist, da die Brennkammer offensichtlich zu klein ist. Da das CO nicht weiter zu CO<sub>2</sub> reagieren konnte, ist daher auch noch genug restlicher Sauerstoff im hinteren Teil der Brennkammer vorhanden.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bei der Auslegung des Brennersystems noch Modifikationen durchgeführt werden müssen. Die ungleichmäßige Verteilung der Gasmassenströme führt zu einer unsymmetrischen Verbrennung in der Brennkammer. Der unsymmetrisch platzierte Gaseintritt ist als Ursache für diese Ungleichverteilung aufzuführen. Dadurch entsteht ein Wirbel im Pyrolysebehälter, welcher möglicherweise zirkulierend ist. Dies zieht weitere Auswirkungen auf die Verteilung der Gasmassenströme und auf die Verbrennung in der Brennkammer mit sich.

### 3.3 Konstruktion und Brennerfertigung

#### 3.3.1 Erstellung der Konstruktionszeichnungen

Vorab zur Geschichte des ersten Rekuperatorbrenners, der wesentliche Elemente unseres neu entwickelten Pyrolysegasbrenner enthält. Es waren Versuche an einem Rekuperatorbrenner, die 1989 zu einer überraschenden Entdeckung führten. Bei einer Ofentemperatur von 1.000 °C und einer Luftvorwärmung von 650 °C zeigte das Überwachungsgerät für die Brennerflamme kein Signal mehr, und es war

auch kein Flammengeräusch mehr zu hören. Trotzdem verbrannte der Brennstoff vollständig. Der Kohlenmonoxid-Gehalt des Abgases lag unter 1 ppm und die  $\text{NO}_x$ -Emissionen waren so niedrig, dass zunächst von einer Fehlfunktion des Messgerätes ausgegangen wurde. Nichtsdestotrotz war die Verbrennung stabil und gleichmäßig, ohne dass sich eine Flamme ausbildete. Das Phänomen wurde „Flammenlose Oxidation“ genannt.

Die sogenannte „flammenlose“ Verbrennung ist zunächst ein Widerspruch in sich. Zu verstehen ist das so, dass eine Flamme zwar existent, aber auf den ersten Blick mit dem Auge nicht zu erkennen ist. Eine derart schwache Emissionsintensität sichtbaren Lichts deutet ihrerseits auf relativ geringe Verbrennungstemperaturen hin, womit bereits eine Grundvoraussetzung für niedrige Schadstoffbildungsraten erfüllt wird. Um die Verbrennung bei diesen relativ niedrigen Temperaturen zu betreiben, wird der Prozess durch einen entsprechenden Überschuss an Verbrennungsluft sozusagen von innen her gekühlt und das Brenngas flammenlos oxidiert. Die Technik der gestuften Verbrennung wurde ebenso wie die Rezirkulation des Rauchgases implementiert. In der Mischkammer findet zunächst eine unterstöchiometrische Voroxidation statt. Das teilweise verbrannte Gemisch und die Sekundärluft werden bei Eintritt in den Brennraum durch eine sekundäre Diffusionsverbrennung bei zeitgleicher Kühlung durch das Rauchgas vollständig umgesetzt. Der Luftmangel der Primärreaktion und die Rauchgaskühlung der Nachverbrennung resultieren bei beiden Reaktionsschritten in eine Absenkung der Temperatur, wodurch die  $\text{NO}$ -Bildung unterbunden wird. Aufgrund der langen Verweilzeit und der zusätzlichen Rückführung der Abgase in der heißen Verbrennungszone werden die Kohlenwasserstoffe und das Kohlenmonoxid vollständig abreagiert. Da bei diesem System keine Flamme vorhanden ist, finden die Kriterien der Flammstabilisierung keine Anwendung. Der Brenner kann somit mit hohen Brenngasgeschwindigkeiten und entsprechend hoher Wärmeleistung betrieben werden.

Zur Beschreibung von Strömungszuständen bei Verbrennungsvorgängen werden oftmals die idealisierten Modelle einer Rohr- oder Kolbenströmung sowie eines idealen Rührkessels herangezogen. Für die Beschreibung der flammenlosen Oxidation hat sich das Modell eines Schlaufenreaktors bewährt. In Abbildung 3-27 werden die verschiedenen Ausführungen von Schlaufenreaktoren gezeigt. Dabei können der Kolbenströmer ( $K_V \rightarrow 0$ ) und der ideale Rührkessel ( $K_V \rightarrow \infty$ ) als Grenzfälle eines Schlaufenreaktors angesehen werden.

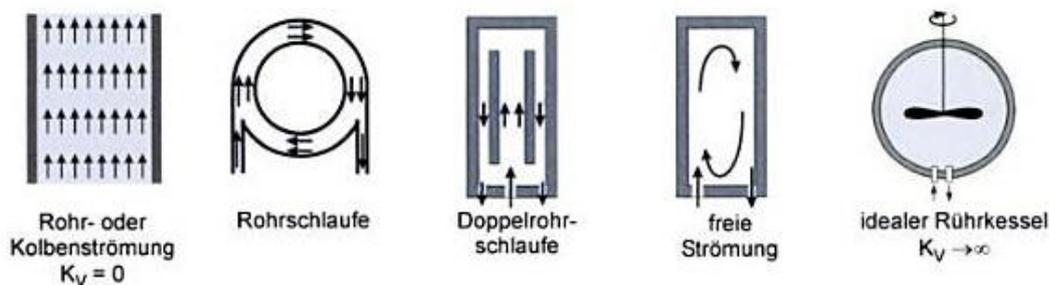


Abbildung 3-27: verschiedene Modelle von Schlaufenreaktoren

In Abbildung 3-28 wird gezeigt, wie die Rezirkulation des Abgases in der Brennkammer eingeleitet wird. Über die Brennstoffzufuhr (1) und die Brennstoffdüse (4) wird der Brennstoff in die Brennkammer eingeleitet. Über Verbrennungsluftzufuhr (3) wird die Luft in die konzentrisch um die Brennkammer (5) angeordneten Luftdüsen (6) in den Brennraum eingeblasen. Der Luftstrahl (A) saugt ebenso wie der Brenn-

stoffstrahl (B) Abgas aus dem umgebenden Brennraum (D) an. Erst nachdem die Strahlen in der Ebene E zusammengetroffen sind, kann eine Reaktion von Luft und Brennstoff im Bereich (C) stattfinden. Die geometrischen Verhältnisse bestimmen hierbei das Rezirkulationsverhältnis.

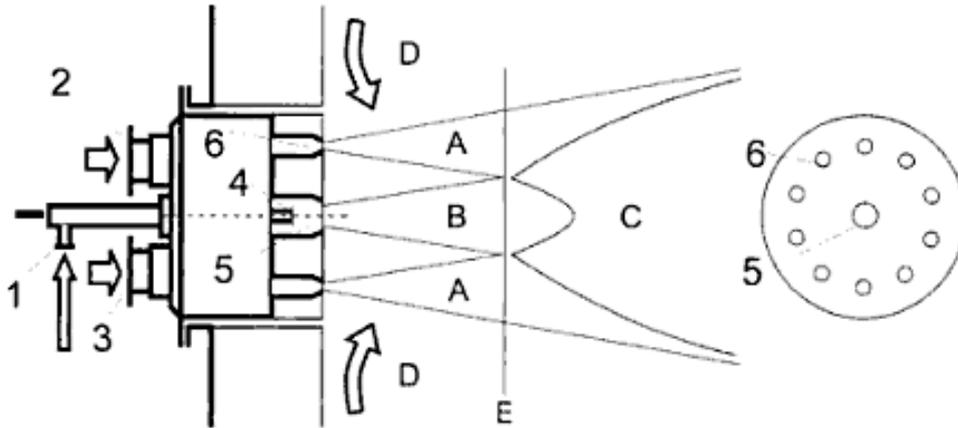


Abbildung 3-28: Rezirkulation des Abgases

### 3.3.1.1 Erstellung der Konstruktionszeichnungen für den Bau des Prototypen

Das Grundkonzept ist ein Brennergehäuse mit Brennerkopf. Im Brennerkopf laufen alle Medien zum Starten des Brenners und zum Verbrennen der Pyrolysegase zusammen. Das Grundkonzept ist so aufgebaut, dass im Gegenstrom der im Brenner erzeugten Rauchgase im Doppelmantel die Verbrennungsluft vorgewärmt wird. Dadurch wird die Verlustwärme in die Verbrennungsluft gekoppelt und für den Prozess genutzt, was den Gesamtwirkungsgrad verbessert, s. unten erstes Konzept Abbildung 3-29.

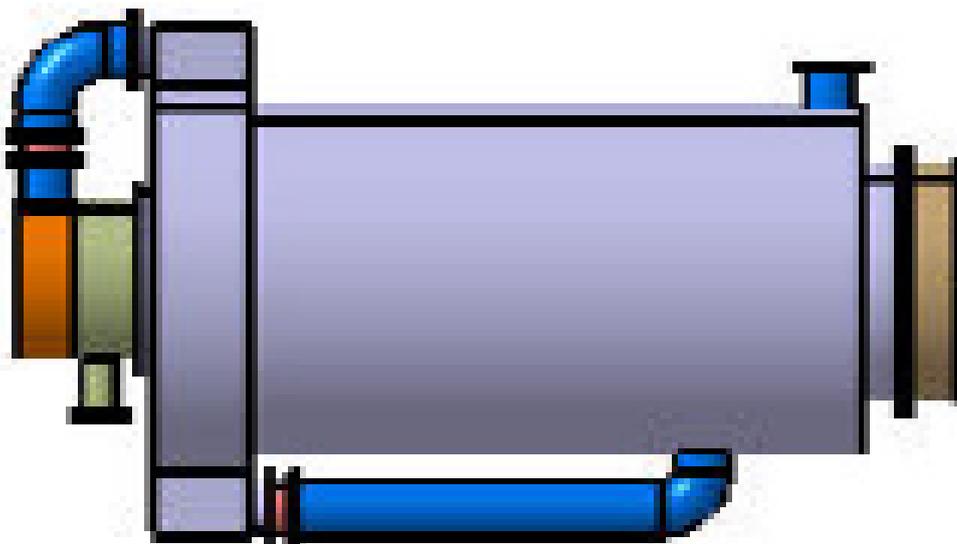


Abbildung 3-29: Prinzipskizze Brennerkopf und Brennergehäuse

Abbildung 3-29 zeigt die Prinzipskizze, der von uns vorgeschlagenen Lösung mit Injektordüsen zum Vermischen und Absaugen des Pyrolysegases, um

- a) ohne Gasgebläse die Pyrolysegase aus dem Reaktor zu saugen und
- b) bei relativ geringer Temperatur – flammenlos – zu verbrennen.

Die Verbrennungsluft wird über ein frequenzgeregeltes Hochdruck-Radialgebläse zur Verfügung gestellt und im Doppelmantel des Brenners vorgewärmt. Es ist vorgesehen, einen Teil der Verbrennungsluft direkt über ein zweites Verdichterluftgebläse zum Absaugen des Pyrolysegases zu verwenden. Der Brennerkopf mit den Injektordüsen ist zentrisch in den innen keramisch ausgekleideten Pyrolysegas-Brenner eingebaut, in den über einen Hochtemperaturflansch das extern erzeugte, heiße Pyrolysegas eingeleitet wird. Alle Teile sind leicht demontierbar und somit einer Reinigung und schnellem Austausch zugänglich. Die drei integrierten Öl-Flammenbrenner sind zum Aufheizen der Anlage vorgesehen, können aber auch als Stützfeuerung während des Betriebes bei sehr schlechtem Pyrolysegas genutzt werden. Nach Erreichen der Verbrennungs-Temperatur wird über den Brenner nur noch vorgewärmte Luft hinzudosiert. Durch die Ausführung der Brennerkombination in Injektor-Bauform wird erreicht, dass das Pyrolysegas abgesaugt wird.

Die über den Injektor-Brennerkopf mit hoher Geschwindigkeit eingedüste Pyrolysegas- und Verbrennungsluftmix vermischt sich in der Brennkammer mit intern rezirkuliertem heißem Abgas, die Verbrennung erfolgt quasi flammenlos. Dadurch wird eine hohe Stabilität und Unempfindlichkeit der Feuerung bei minimalen Emissionen erreicht. Das Pyrolysegas ist staubhaltig. Deshalb ist im Bereich der Injektordüsen unten ein Staubfang und hinter dem Brenner an diversen Stellen die Staubabsaugung möglich.

#### 3.3.1.2 Auswahl geeigneter Materialien für den Brennerbau

Das Material der Heißeile (Düsen, Flansche, Gehäuse usw.) besteht durchgehend aus Edelstahl 1.4841. Das Brennergehäuse ist zusätzlich noch komplett mit Schamotte ausgekleidet.

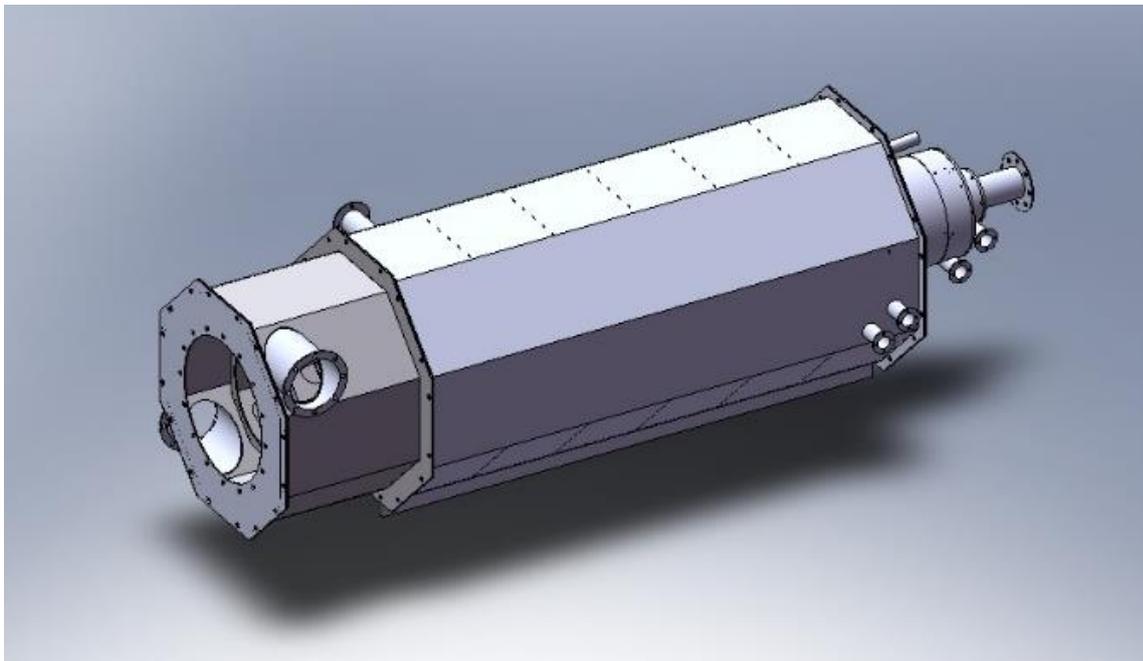


Abbildung 3-30: CAD-Modell der Verbrennungseinrichtung

#### 3.3.1.3 Festlegung geeigneter Überwachungs- und Zündvorrichtungen

Die Überwachung der Flamme ist in diesem Konzept von großer Wichtigkeit, da die Brennstoffzusammensetzung sehr stark vom Inputmaterial abhängig ist. Insbesondere bei hohen Feuchtigkeitsschwankungen entsteht sehr viel Wasserdampf (endotherm), was den spezifischen Heizwert erheblich reduziert. Das kann soweit gehen, dass der Brenner ausgeht und die Stützfeuerung angestellt werden muss. In diesem Fall wird ein UV-Flammenwächter eingesetzt, siehe Abbildung 3-31.



Abbildung 3-31: Flammenwächter

#### 3.3.1.4 Festlegung möglicher Geometrievariationen

Die Geometrie ist achteckig gewählt, weil dabei die Ausschamottierung aus Standardplatten relativ einfach erfolgen kann. Die Schamotteplatten werden auf Gärung geschnitten und so zu einem sich selbst tragenden Bauwerk verbaut. Die Abbildung 3-32 zeigt ein 3D-CAD-Modell der konstruierten Brennkammer. Der in der Abbildung gelb markierte Flansch dient dem Anschluss der Sekundärluft.

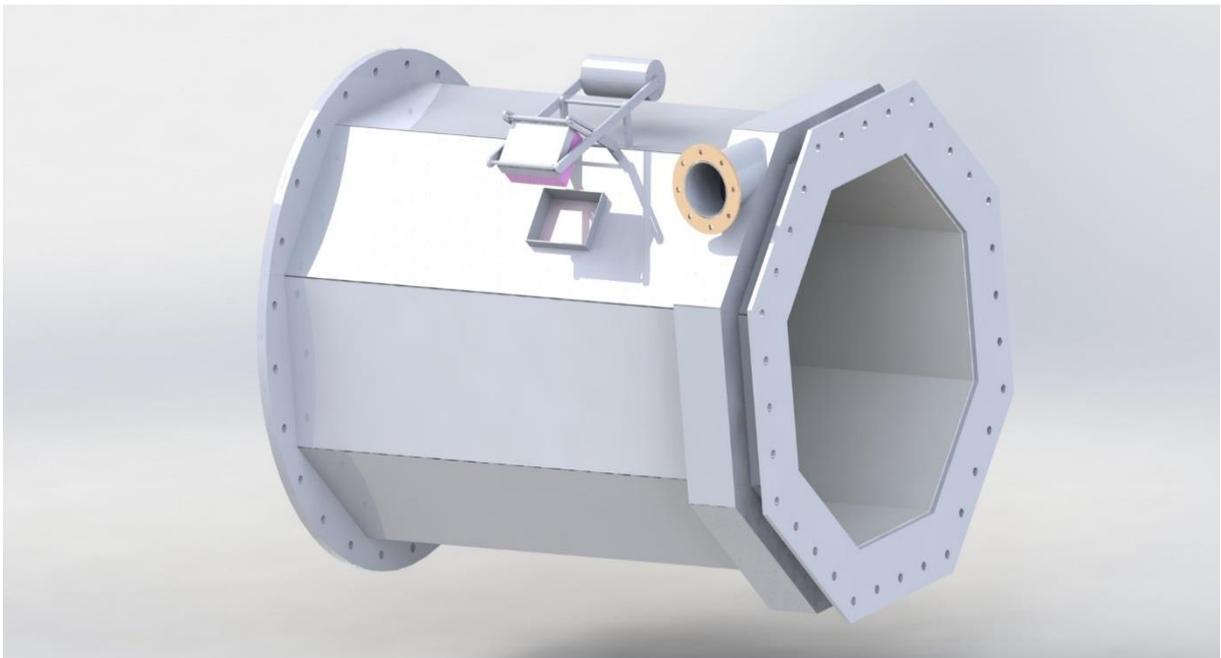


Abbildung 3-312: CAD-Modell der Brennkammer

### 3.3.2 Prototyp-Brennerfertigung

#### 3.3.2.1 Bau des Prototypen für die ersten Untersuchungen

Die nachfolgende Abbildung 3-33 zeigt eine fotografische Aufnahme der gefertigten Prototypbrennkammer. Wie zu erkennen ist, wurde die Brennerkammer mit zusätzlichen Stützen zur Instrumentierung der Messeinrichtungen ausgestattet.



Abbildung 3-323: Bau des ersten Prototypen mit Stützen

### 3.4 Experimentelle Untersuchungen am GWI-Versuchsstand

#### 3.4.1 Aufbau des Versuchsstandes

Die experimentellen Untersuchungen am GWI unterteilen sich in zwei Versuchsphasen. Die erste Phase dient der strömungstechnischen Untersuchung der Schlüsselkomponente, der Venturidüse und damit der Grundsteinlegung für die zweite Phase der experimentellen Untersuchungen. In der Phase 2 wird der Brenner komplett mit allen Komponenten, wie zum Beispiel Brennkammer in die GWI- Infrastruktur integriert.

##### 3.4.1.1 Aufbau einer Gasmisch- und Unterdruckerzeugungsdüse

Der in Abbildung 3-34 schematisch dargestellte Versuchsstand dient der Untersuchung der zuvor mittels CFD ermittelten Düsengeometrien. Wie auch bei der Simulation liegt das angestrebte Ziel der Untersuchung in der Erzeugung eines hohen Unterdrucks im engsten Querschnitt der Düse und in einem daraus resultierenden, für die Nennleistung des Brenners ausreichenden Gasvolumenstrom. Wie in der Abbildung erkennbar, besteht der Versuchsstand aus einer auswechselbaren Venturidüse, einer Treibluftdüse und diversen Messstellen. Über eine Rohrleitung wird die Treibdüse mit kalter Luft versorgt und von einem größeren Rohr umhüllt. Mittels Luftvorwärmer wird ein zusätzlicher Luftvolumenstrom auf eine Temperatur von ca. 500 °C erwärmt und in den Ringspalt zwischen dem Mantelrohr und der Treibluftrohrleitung geführt.

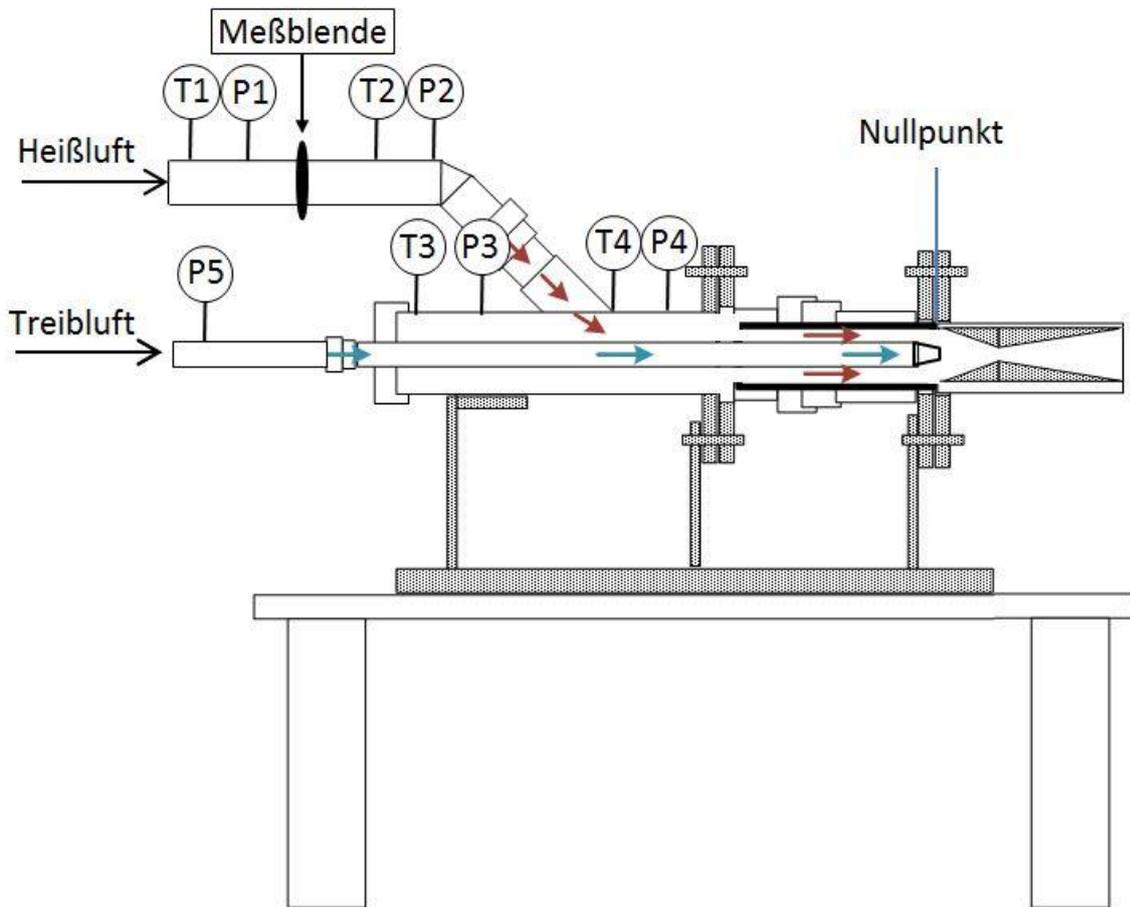


Abbildung 3-334: Versuchsstand Venturidüse

Zur Ermittlung der physikalischen Größen sind an insgesamt fünf Stellen Messpunkte vorgesehen. Eine heißluftseitig montierte Messblende ermöglicht das genaue Ermitteln des, durch die sich einstellenden Druckverhältnisse erzeugten Gasvolumenstromes. Zum Abgleich der Ergebnisse aus der CFD-Simulation besteht die Möglichkeit, die Position der Treiblufte Düse in axialer Richtung zu verändern. Ein weiterer Parameter liegt in der Verwendung zweier verschiedener Venturidüsen, die fertigungsbedingt aus verschiedenen Materialien bestehen. In der nachfolgenden Abbildung 3-35 sind diese beiden Düsen sowie eine Treibdüse schematisch dargestellt. Die aus dem Werkstoff Glas gefertigte Düse ist um 80 mm länger als die Metalldüse.

Fangdüse Metall:

Fangdüse Glas:

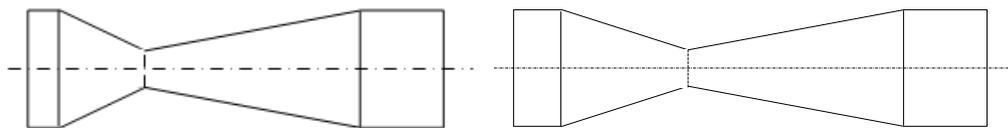


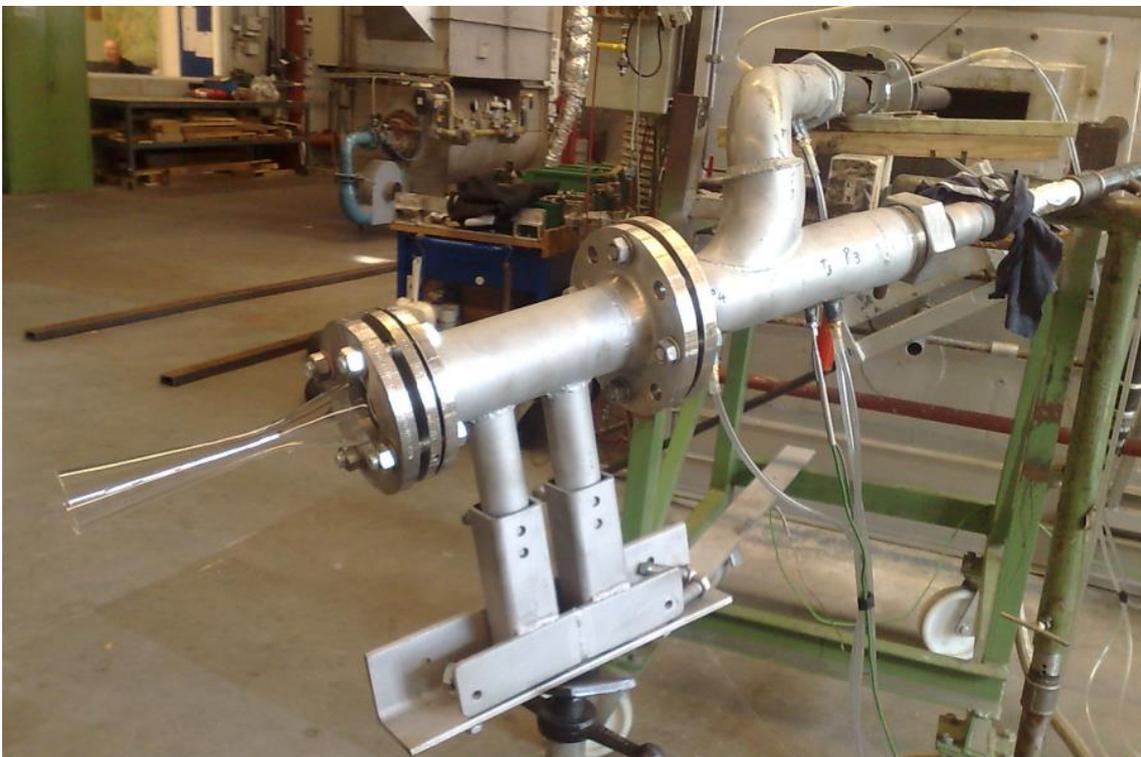
Abbildung 3-34: Übersicht Düsen

### 3 Ergebnisse

Die Abbildungen 3-36 und 3-37 zeigen fotografische Aufnahmen des realen Versuchstandes am GWI. Analog zu den schematischen Darstellungen sind die Versorgungsleitungen, das Mischmodul und die beiden zu untersuchenden Düsen zu sehen. In der Abb. 3-36 ist die metallische Düse und in Abb. 3-37 die aus Glas gefertigte Düse verbaut.



**Abbildung 3-36: Versuchsstand mit Metaldüse**



**Abbildung 3-37: Versuchsstand mit Glasdüse**

Die Abbildung 3-38 stellt die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchung an dem zuvor gezeigten Versuchsaufbau dar. Wie zu erkennen, liegt die optimale Treibdüsenposition circa 40 mm vor dem Nullpunkt. Des Weiteren stellt sich heraus, dass die Geometrie der Glasdüse einen höheren Gasvolumenstrom fördert als die Metalldüse. Diese Ergebnisse sind unabhängig von der Materialauswahl.

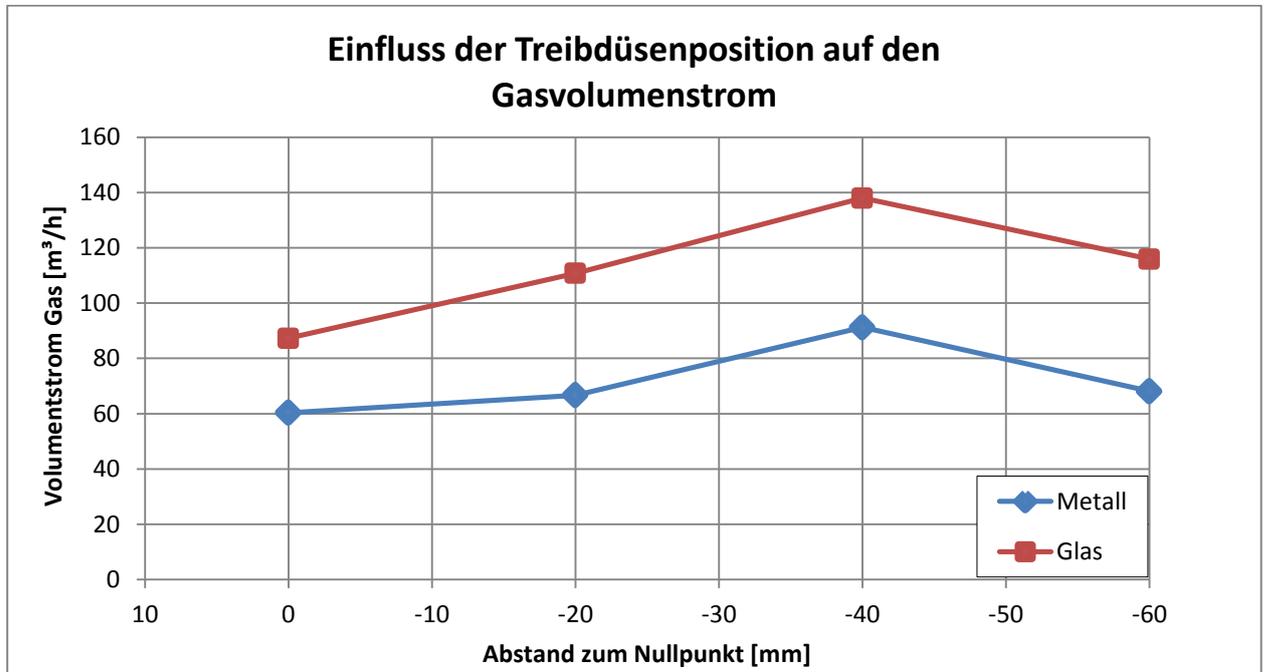


Abbildung 3-38: Einfluss Treibdüsenposition auf Gasvolumenstrom

### 3.4.1.2 Aufbau einer geeigneten Brennkammer zur Untersuchung der Brennergeometrie

Der Versuchsaufbau der zweiten Phase der experimentellen Untersuchungen am GWI besteht aus dem Prototypbrenner einschließlich der Brennkammer. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Versuchsaufbau während der Montage von Brenner und Brennkammer. Wie in der Abbildung 3-39 zu erkennen ist, bilden die beiden Komponenten im montierten Zustand eine Einheit, die an den Versuchsofen des GWI angeschlossen sind. Die Rauchgasführung nach der Prototypbrennkammer erfolgt über die Versuchsbrennkammer und dem nachgeschalteten Kamin.

Der Brenner wird mittels Zuleitungen mit allen erforderlichen Medien versorgt. Zudem erfolgt die Zugaube der Verbrennungsluft über eine Zuleitung an der Brennkammer.



Abbildung 3-39: Aufnahme des Versuchsstandes mit Brenner und Brennkammer

#### 3.4.1.3 Vorbereitung der Gasmischanlage und der Gasvorwärmung zur Bereitstellung der erforderlichen Gasmischungen und Betriebszustände

Zur Bereitstellung des Synthesegases wird die Gasmischanlage mit folgenden Gaskomponenten gespeist:

- Kohlendioxid
- Kohlenmonoxid
- Wasserstoff
- Erdgas H
- Propan
- Stickstoff



Abbildung 3-40: Bedienoberfläche Gasmischanlage im GWI

Mittels Gasmengenregler der Gasmischanlage können diese Komponenten in der gewünschten Zusammensetzung vermischt werden. In einem nachgeschalteten Gasvorwärmer kann dieses Gemisch auf eine Temperatur von bis zu 450 °C vorgewärmt werden. Durch die Eindüsung von Wasser in dem Gasvorwärmer wird dem Gasgemisch zusätzlich Wasserdampf hinzugefügt. Bedingt durch die Verdampfung des Wassers wird die Vorwärmtemperatur des Gases auf circa 200 °C sinken. Die Abbildung 3-40 zeigt die Bedienoberfläche der Gasmischanlage. Der Gasvorwärmer ist in der Abbildung 3-41 mit rot markiert. Zudem ist in der Bildmitte ein Luftvorwärmer zu sehen, der als Wärmeerzeuger für den Gasvorwärmer fungiert.



Abbildung 3-41: Versuchsstand, Gasvorwärmer und Luftvorwärmer

### 3.4.2 Messung und Inbetriebnahme des Prototypbrenners

Zur Untersuchung verschiedener Betriebszustände wurden neben dem Gasgemisch auch drei unterschiedliche Luftverteiler untersucht. In der Abbildung 3-45 werden alle drei Luftverteiler gezeigt.

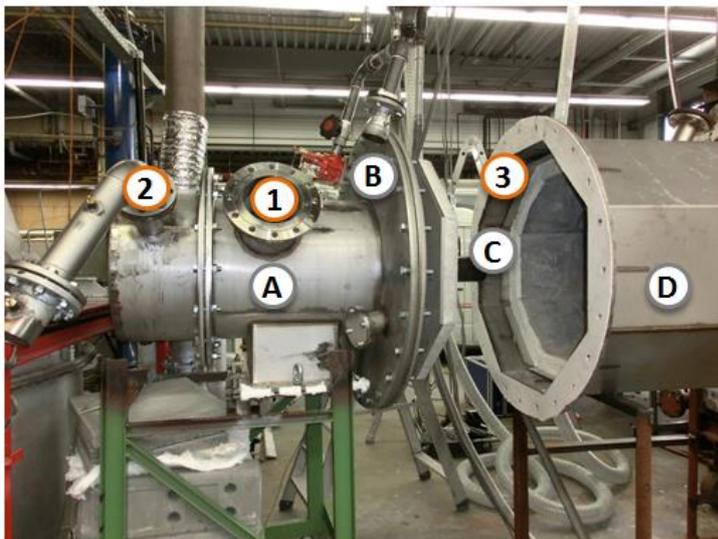


Abbildung 3-42: Komponenten Brennkammer und Brenner

#### Komponenten:

- A Brenner
- B Zündbrenner
- C Luftverteiler
- D Brennkammer

#### Zufuhr:

- 1 Gasgemisch
- 2 Treibluft
- 3 Hauptluft

In der Tabelle 3-2 wird die Variation des Gasgemisches aufgezeigt und analog zur Abbildung 3-42 eine Benennung für die in späteren Kapiteln folgende Auswertung der Messdaten verwendet.

Tabelle 3-2: Übersicht Gaszusammensetzung der verwendeten Gasgemische

	Vorgabe [Vol.-%]	Syngas 1 [Vol.-%]	Syngas 2 [Vol.-%]
CO	1	1	1
CO <sub>2</sub>	4,8	0,3	0,3
CH <sub>4</sub>	2,2	9,7	10,9
H <sub>2</sub>	3,2	2,5	2,4
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,2	0,6	0,7
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,3	0,1	1,8
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	3,3	0	0
H <sub>2</sub> O	84,7	28,6	27,6
N <sub>2</sub>	0	57,2	55,3
$\rho_N$ [kg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	1,03	1,05	1,06
H <sub>U</sub> [MJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	5,12	4,35	6,45

Wie in der Tabelle 3-2 zu sehen ist, bestehen Abweichungen in der Gaszusammensetzung des realen Synthesegases und den Gasgemischen für die experimentelle Untersuchung am GWI. Da die Verdampfung von Wasser nur in einer bestimmten Menge sicher funktioniert, wird der fehlende Volumenanteil der Vorgabe mit Stickstoff ersetzt. Die eingesetzte Wassermenge ist mit circa 50 l/h festgelegt. Der in dem realen Synthesegas enthaltene Teer ist ein langkettiger Kohlenwasserstoff, der den Großteil des Heizwertes verantwortlich ist. Ersetzt wird dieser Teer zum Teil durch Propan und Erdgas. Durch die Beimischung beider Komponenten ist es möglich, den Heizwert an das reale Synthesegas anzupassen. Das Erdgas enthält neben Methan u. a. auch geringe Mengen Ethan. Das Mischgas entspricht durch Anpassung des Heizwert und der Dichte in guter Näherung dem realen Synthesegas. Die Staubbelastung des realen Gases kann nicht simuliert werden. Die Tabelle 3-2 zeigt exemplarisch zwei Gasgemische, die unterschiedliche Mengen an Erdgas und Propan enthalten.

#### 3.4.2.1 Aufnahme der relevanten Betriebsparameter

Die relevanten Betriebsparameter sind in den entsprechenden Medienleitungen unmittelbar vor Eintritt in den Brenner messtechnisch erfasst worden.

Das Diagramm in der Abbildung 3-43 gibt exemplarisch die Messdaten der Betriebsparameter während einer Messung mit der Luftverteilerkonfiguration „langer Luftverteiler“ (siehe 3.4.4.9) an. Aufgetragen sind jeweils der Druck und der Volumenstrom von Hauptluft, Treibluft und Brenngas. Die Steigerung des Volumenstroms der Hauptluft erfolgte in dieser Messreihe in 100 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h –Schritten. Proportional zur Volumenstromsteigerung erhöht sich der statische Druck in der Hauptluftleitung. Bei der Volumenstromsteigerung von 600 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h auf 1000 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h erhöht sich der Druck von 0,7 mbar annähernd linear auf 1,7 mbar.

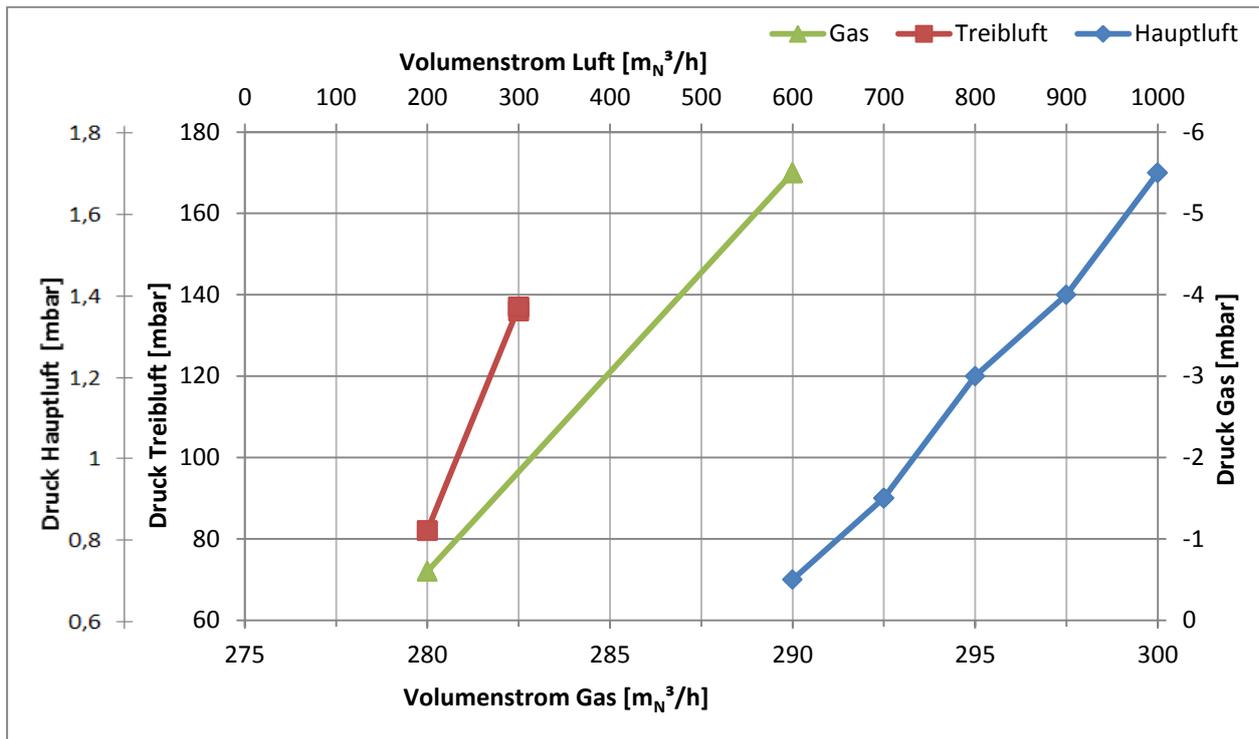


Abbildung 3-43: Einfluss der Treiblufte auf den Gasvolumenstrom

Wie in vorhergehenden Kapiteln bereits erwähnt, ist - bedingt durch die Venturidüse - der Gasvolumenstrom direkt abhängig vom Treibluftevolumenstrom. Das Diagramm veranschaulicht diesen Vorgang deutlich. Eine Erhöhung der Treiblufte menge um 50 % ergibt einen Anstieg des Gasvolumenstroms von ca. 4 % bei einer gleichzeitigen Druckänderung von -0,7 mbar auf -5,5 mbar. Die dargestellten Treiblufteparameter bilden das eingestellte Maximum und reichen aus, um den gewünschten Gasvolumenstrom zu fördern.

### 3.4.2.2 Messung der Abgastemperaturen und –Konzentrationen bei verschiedenen Einstellungen (Luftvorwärmung, Gaszusammensetzung, Teillast etc.)

Für die Messungen der Abgastemperaturen und Abgaskonzentrationen wurden insgesamt vier Messreihen durchgeführt, die jeweils mit drei unterschiedlichen Luftverteilerkonfigurationen stattfanden. Die Tabelle 3-3 liefert einen Überblick über die verwendeten Mengen an Gasen. Die Varianz der Messreihen kommt neben den steigenden Luftmengen der Treib- und Hauptluft zudem durch die unterschiedliche Beimischung der Komponenten Erdgas und Propan ins Syngasgemisch zustande. Die Erhöhung der Volumenanteile von Erdgas und Propan im Syngasgemisch hat eine direkte Leistungssteigerung der Verbrennung zur Folge. Ebenso ist in Tabelle 3-3 zu erkennen, dass im chronologischen Verlauf der Messreihen diese Volumenströme zunehmend erhöht wurden. Analog zur resultierenden Leistungssteigerung wurde auch die Verbrennungsluft erhöht.

Tabelle 3-3: Übersicht Messreihen

Messreihe	Erdgas [m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]	Propan [m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]	Hauptluft [m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]	Treibluft [m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]	Luft <sub>Gesamt</sub> [m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]
1	30	0	600	200	800
2	35	0	700	200	900
3	40	0	800	300	1100
4	35	5	1000	300	1300

Für die exemplarische Darstellung der Abgastemperaturen werden in diesem Abschnitt die Messdaten der Versuchsreihen 1 bis 4 mit der Luftverteilerkonfiguration „lang“ vorgestellt.

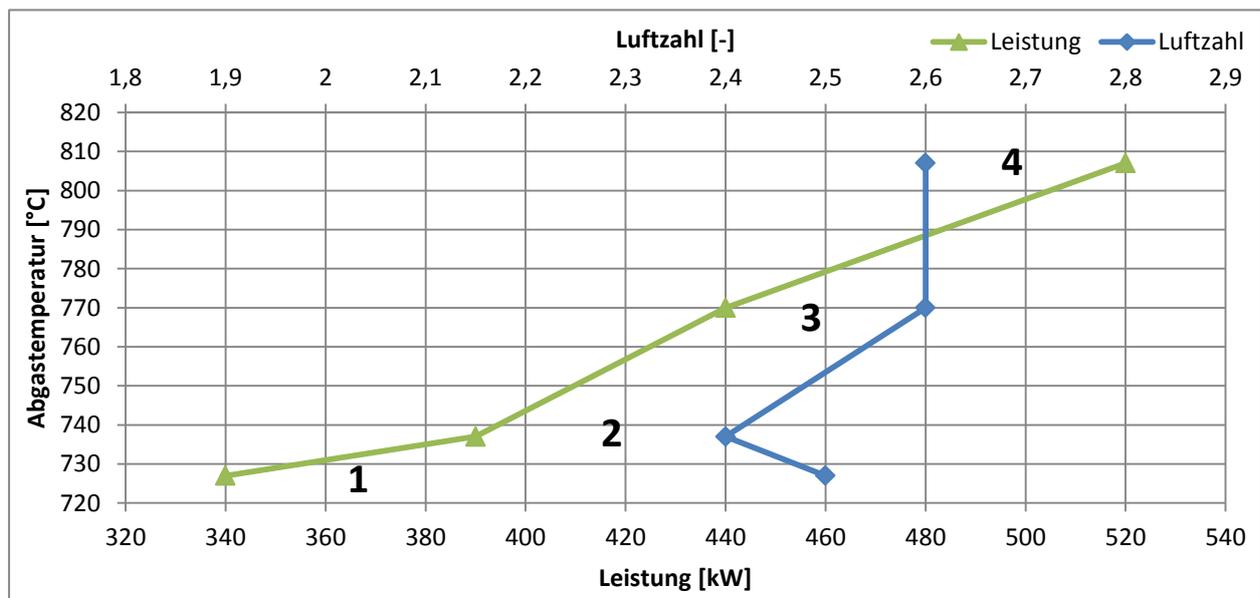


Abbildung 3-44: Abgastemperatur

Das Diagramm der Abbildung 3-44 zeigt den Verlauf der Abgastemperatur mit steigender Brennerleistung. Bei den dargestellten Messwerten handelt es sich um Mittelwerte der jeweiligen Messreihen. Die Temperaturdifferenz zwischen der ersten und der vierten Messreihe liegt bei ungefähr 80 °C bei einer Leistungssteigerung um circa 180 kW. Die größte Temperaturdifferenz liegt zwischen Messpunkt 3 und 4. Der Hintergrund liegt in der Variation des Gasgemisches. Wie in Tabelle 3-2 gezeigt, besteht das Gasgemisch in der Messreihe 3 aus 40 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h Erdgas. In der Messreihe 4 wurde dem Gasgemisch zusätzlich 5 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h Propan beigemischt und gleichzeitig das Erdgas um die gleiche Menge reduziert. Der deutlich höhere Heizwert des Propan bewirkt eine Leistungssteigerung von 80 kW bei gleichbleibender Luftzahl. Die Luftzahl ist in dem Diagramm aufgetragen über der Abgastemperatur, sodass die dargestellten Werte direkt den jeweiligen Messreihen entsprechen. Die Änderung der Luftzahl zwischen der Messreihe 1 und der Messreihe 2 ist mit der Einstellung der Luftmengen zu erklären. Erhöht wurde die Gesamtluft-

menge nur um  $100 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ . Zur Einstellung einer rechnerischen Luftzahl von 2,5 ist jedoch eine Steigerung der Gesamtluftmenge um circa  $124 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$  notwendig. Die Luftzahlen der Messreihen 3 und 4 liegen aufgrund einer deutlichen Luftmengensteigerung bei einer Luftzahl von 2,6.

#### **3.4.2.3 Aufnahme der Flammgeometrie mittels OH-Kamera**

Eine Aufnahme der Flammgeometrie mittels OH-Kamera war aufgrund konstruktiver Gegebenheiten nicht möglich.

#### **3.4.2.4 Messung von Temperaturen und Spezies an definierten Punkten in der Flamme**

Eine sogenannte Feldmessung in der Flamme fand nicht statt. Die Vorbereitung von notwendigen Messstutzen führte zu strömungstechnischen und konstruktiven Problemen und wurden aufgrund dessen nicht in der Prototypenbrennkammer verbaut.

#### **3.4.2.5 Überprüfung des Anfahrverhaltens mit einem externen Zündbrennstoff**

Das Anfahrverhalten mit einem externen Zündbrennstoff konnte erfolgreich überprüft werden. Gegen die vorherige Planung wurde jedoch auf Heizöl EL als Zündbrennstoff verzichtet und auf eine Zündvorrichtung mit Erdgas H ausgewichen. Die sichere Zündung des Hauptbrenners wurde ohne Komplikationen in mehreren Messreihen bestätigt.

#### **3.4.2.6 Modifikation der Brennergeometrie**

Wie in Abbildung 3-45 zu sehen ist, wurde die Brennergeometrie über eine Variation der Luftverteilerkomponente des Hauptbrenners verändert. Insgesamt kamen drei Luftverteiler zum Einsatz, wovon zwei eine ähnliche Geometrie aufwiesen (Luftverteiler 2 und 3). Die Luftverteiler 2 und 3 verfügen über Bohrungen verschiedener Durchmesser, die über den gesamten Mantel verteilt angeordnet sind. Durch eine anwendungsorientierte Wahl der verschiedenen Durchmesser wird die Luft ungleich über die Länge verteilt und ermöglicht so eine Luftstufung, das COSTAIR-Prinzip. Der Luftverteiler 2 verfügt in etwa über die halbe Länge des Luftverteilers 3. Der sogenannte Kiemenluftverteiler (1) ermöglichte neben einer radialen Luftströmung der zuvor genannten Luftverteiler eine tangentielle Strömung der Hauptluft. Die Abbildung 3-45 zeigt zudem eine Einbausituation des „langen“ Luftverteilers. Die in Abbildung eingeführte Benennung der Luftverteiler wird im weiteren Verlauf beibehalten.

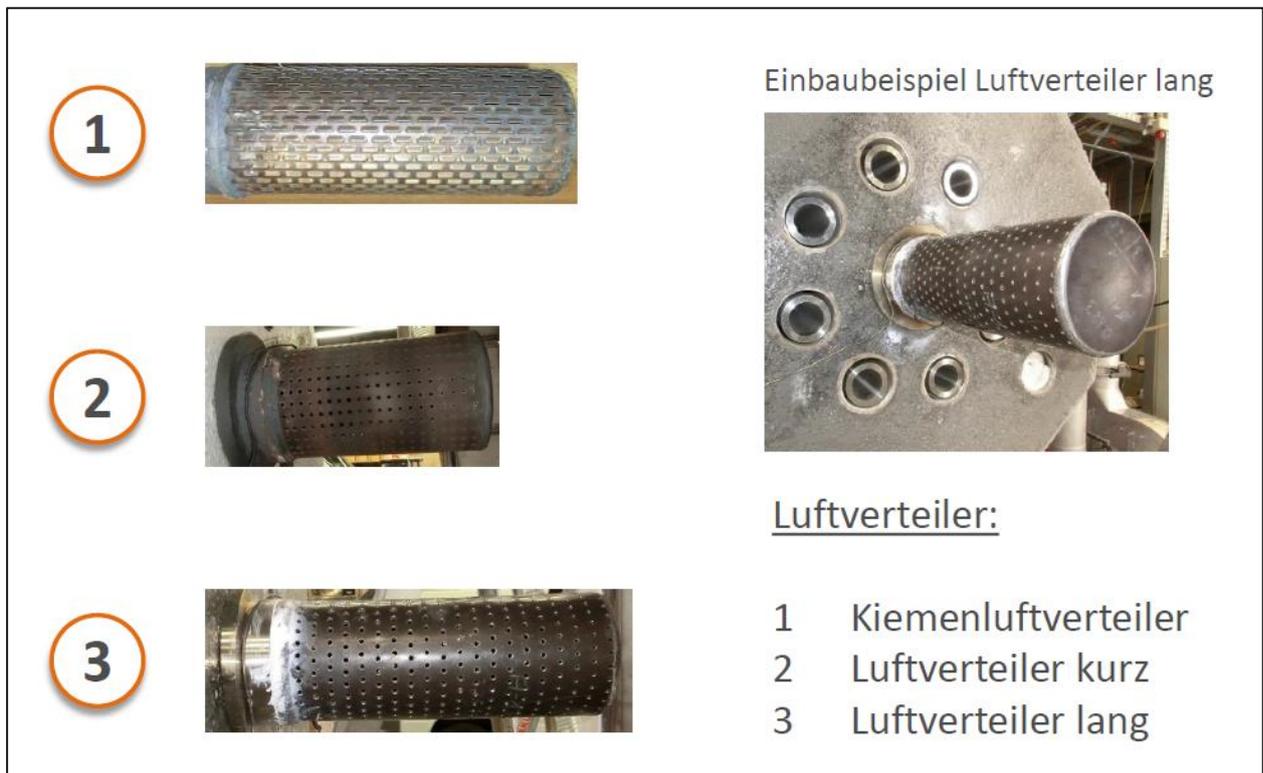


Abbildung 3-45: Übersicht verwendeter Luftverteiler

### 3.4.3 Auswertung der Versuchsergebnisse insbesondere $\text{NO}_x$ -Bildung, Flammenstabilität und Materialbeständigkeit des Brenners

Bedingt durch den hohen Anteil an inerten Gasen im Brenngasgemisch und der deutlich überstöchiometrischen Fahrweise (Luftzahl  $> 2,4$ ) sind die Flammentemperaturen gering. Die Bildung von thermischen  $\text{NO}_x$  ist so minimal. Die nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch die gemessenen Stickoxidemissionen während der vier Messreihen mit zwei unterschiedlichen Luftverteilern.

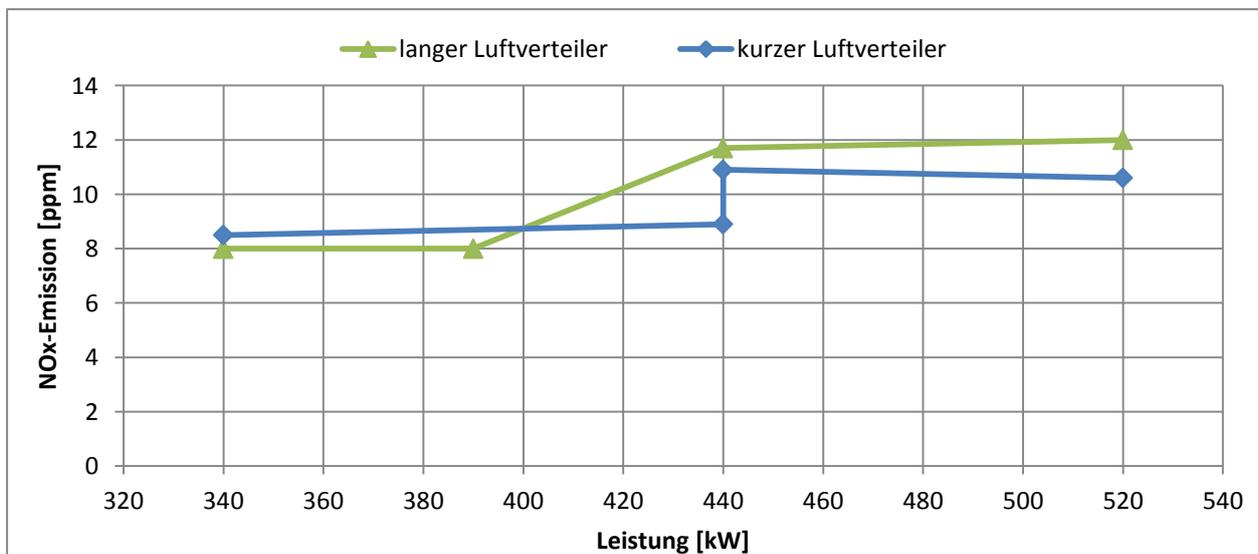


Abbildung 3-46:  $\text{NO}_x$ -Emission über der Leistung

Das Diagramm 3-46 zeigt, dass die  $\text{NO}_x$ -Emissionen marginal klein sind. Eine leichte Erhöhung der Emissionswerte ergibt sich durch die Steigerung der Leistung und somit der Abgastemperatur.

Die Flammenstabilität konnte durch den konstruktiven Aufbau der Brennkammer und der Wahl einer geeigneten Luftverteilergeometrie sichergestellt werden.

Die nachfolgende Abbildung 3-47 zeigt den Zustand des Brenners vor und nach der Versuchsdurchführung. Es ist keine Schädigung des Materials feststellbar. Die Materialbeständigkeit des Brenners über den Zeitraum der Versuchsdurchführung kann somit bestätigt werden.



Abbildung 3-47: Vorher-Nachher-Vergleich des Brenners

#### 3.4.3.1 Analyse der Messdaten

Die Analyse der Messdaten zeigte, dass die Funktionsfähigkeit den Anforderungen nach gegeben ist. Der Brenner und die Brennkammer können ohne konstruktive Änderungen in den Pyrolysegaserzeuger integriert werden.

#### 3.4.3.2 Erarbeitung eines Anfahr-, Teillast- und Abfahrkonzeptes für einen stabilen Brennerbetrieb zur Einbindung in die Regel- und Steuerungstechnik des Pyrolysereaktors

Angefahren wird grundsätzlich über die drei Stützbrenner. Die drei Stützbrenner fahren die Reaktortemperatur auf ca. 500 °C hoch. Das Hochfahren geht in Etappen, sodass das Material des Brenners selber und insbesondere des Reaktors sich langsam ausdehnt und somit beim Hochfahren geringen spezifischen und geringen örtlichen Wärmespannungen im Material ausgesetzt sind. Sobald die Reaktortemperatur von ca. 700 °C erreicht ist, wird sehr langsam bei noch weiter steigender Reaktortemperatur die erste Biomasse in den Reaktor gefahren, wodurch dann relativ schnell das erste eigenerzeugte Pyrolysegas (Öl und Syngas) entsteht. Mit diesem ersten Gas wird der Hauptbrenner aktiviert und entsprechend die Stützbrenner mit größer werdender Hauptbrennerflamme heruntergefahren, bis der Reaktor seinen Betriebspunkt erreicht hat und die Stützfeuerungen komplett ausgestellt wird.

#### 3.4.4 Festlegung der Position für die Zünd- und Überwachungsvorrichtungen

Die Zündvorrichtungen sind in den Stützbrennern integriert, und die Überwachungsvorrichtungen werden schräg von vorne durch den Doppelmantel im Brennergehäuse gesetzt.

#### 3.4.5 Materialbeständigkeit und Staub im Pyrolysegas

Pyrolysegas beinhaltet nach dem Zyklon immer noch relativ viel Feinstaub. Der Feinstaub mineralisiert in der Flamme und sedimentiert dann überwiegend im Brennergehäuse, s. Abb. 3-48 (Bild aus einem der Vorversuche). Die Materialbeständigkeit der Injektordüsen ist dann gegeben, wenn das Material 1.4841 gewählt wird.



Abbildung 3-48: Staubproblematik und Materialbeständigkeit

#### 3.5 Untersuchungen am Gaserzeuger

##### 3.5.1 Vorbereitende Arbeiten zum Aufbau des Versuchsstandes

Der Versuchsstand wurde im GWI Essen aufgebaut. Ein Übergangsflansch zwischen Brennkammer und Brenner musste angefertigt werden. Die Ver- und Entsorgungsleitungen wurden ebenfalls vor Ort im GWI installiert.



Abbildung 3-49: Versuchsstand am GWI

##### 3.5.1.2 Erarbeitungen des Konzeptes zur Realisierung des Gastransports zum Brenner

Das im Pyrolysereaktor erzeugte Pyrolysegas wird kontinuierlich abgesaugt, damit der Reaktor immer im Unterdruck betrieben werden kann, denn es soll in keinem Fall - unkontrolliert - Pyrolysegas austreten. Da Gebläse sehr wartungsanfällig sind, haben wir das Konzept der Injektordüsen gewählt. Mit Treibluft werden mehrere Injektordüsen betrieben und saugen das grob vorentstaubte Pyrolysegas in den Brenner.

### 3.5.1.3 Berechnungen und Auslegung der Luftzumischung

Läuft der Verbrennungsvorgang so ab, dass alle reaktionsfähigen Bestandteile des Brennstoffes mit genügend Sauerstoff in Berührung kommen und in ihre höchsten Oxidationsstufen  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{SO}_2$  überführt werden, so spricht man von vollständiger, vollkommener Verbrennung.

Treten dagegen in den Verbrennungsgasen noch brennbare Komponenten, wie z. B. Kohlenmonoxid auf, so liegt eine unvollständige Verbrennung vor. Sie ist eine Folge ungenügender Luft- bzw. Sauerstoffzufuhr an den Brennstoff oder ungenügender Aufenthaltszeit und im Sinne der energetischen Ausnutzung des Brennstoffes ein verlustbehafteter Vorgang, der daher möglichst vermieden werden muss.

Wesentliche Voraussetzungen hierzu sind die technisch einwandfreie Gestaltung der Feuerungsanlage und ihre sachgemäße Bedienung.

Ob die Verbrennung vollständig oder unvollständig abläuft, kann in einfacher Weise durch die Abgasanalyse ermittelt werden. Im Folgenden soll die Berechnung des Luftbedarfes und der Abgasbestandteile für das Synthesegas aufgeführt werden.

#### Brennstoffanalyse des Pyrolysegases / Synthesegases

Im Weiteren wird nun auf die einzelnen Produkte der Pyrolyse / Vergasung eingegangen sowie auf die Zusammensetzung des Produktgases. Das Diagramm in Abbildung 3-50 zeigt die einzelnen Massenanteile der bei der Pyrolyse / Vergasung entstandenen Produkte (hier beispielhaft aus Vorversuchen ermittelt).

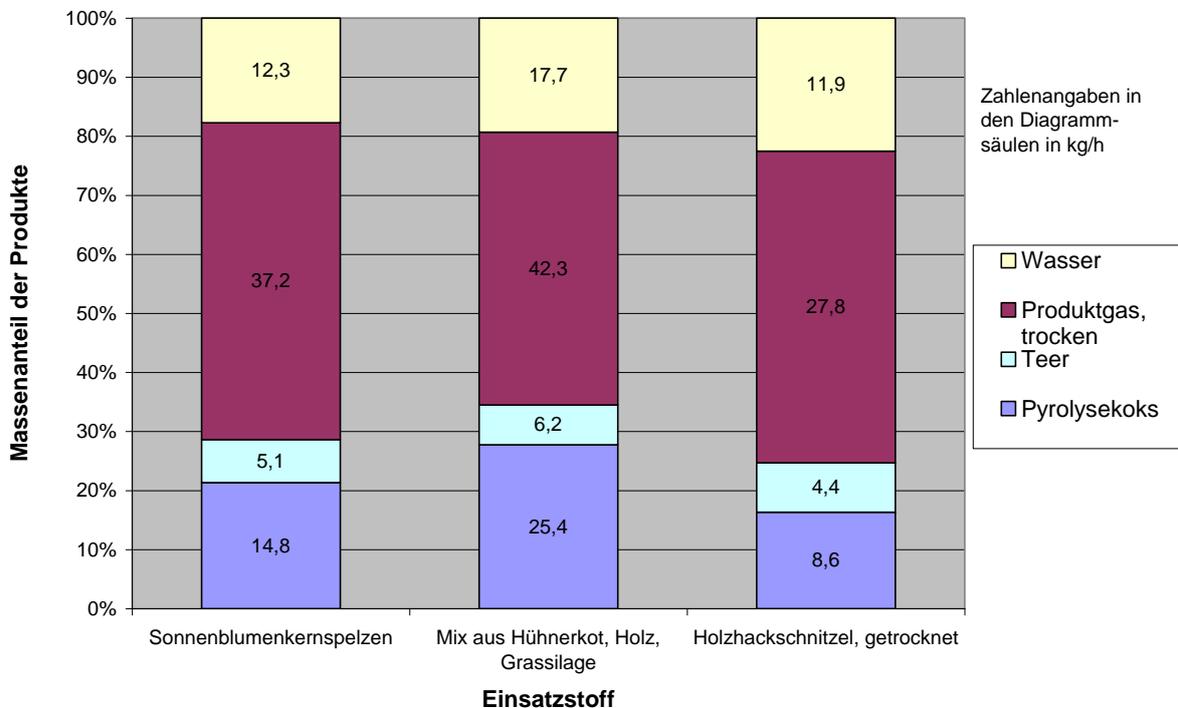


Abbildung 3-50: Massenaufteilung der Vergasungsprodukte

### 3 Ergebnisse

Wie aus dem Diagramm zu entnehmen, fallen bei den Sonnenblumenkernspelzen 14,8 kg/h Pyrolysekoks an. Bei einem Eingangsmassenstrom von 69,4 kg/h entspricht das einem Anteil von 21,3 %. Des Weiteren entstehen 7,4 % Teer, 53,6 % Produktgas trocken und 17,7 % Wasser.

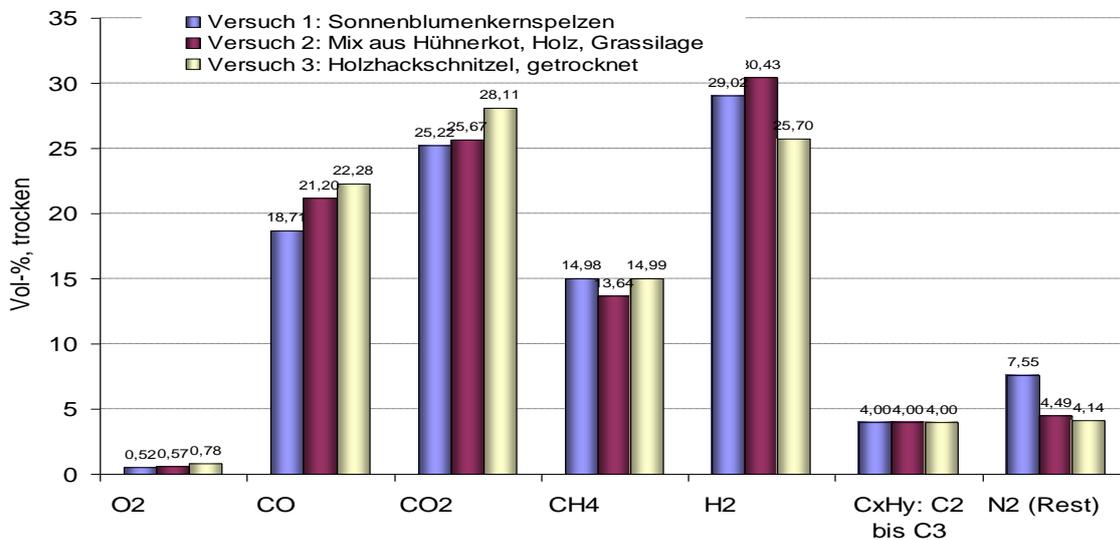
Für den in dieser Arbeit vorliegenden Eingangsmassenstrom wurde ein Wert von 100 kg/h gewählt. Durch den volumetrischen Anteil der einzelnen Produkte können damit die Massenanteile der Vergasungsprodukte berechnet werden. Anteilmäßig fallen somit an:

**Tabelle 3-4: Zusammensetzung Gas**

Biokoks:	21,3 kg/h
Teer/Öl:	7,4 kg/h
Produktgas trocken:	53,6 kg/h
Wasser:	17,7 kg/h

Im vorliegenden Fall bleiben das Wasser und die Teere/Öle, welche sich in kondensierter Form im Synthesegas befinden, erhalten. Wir kommen so zu einem Massenstrom des komplexen Gases von 78,7 kg/h.

Die nachfolgende Grafik in Abbildung 3-51 zeigt die Zusammensetzung des trockenen Produktgases mit seinen brennbaren und nicht brennbaren Inhaltsstoffen.



**Abbildung 3-51: Zusammensetzung des trockenen Produktgases**

Für den Fall der Sonnenblumenkernspelzen teilt sich das trockene Gas folgendermaßen in seine chemischen Elemente auf:

**Tabelle 3-5: Gaszusammensetzung Sonnenblumenkernspelzen**

O <sub>2</sub>	=	0,52 %
CO	=	18,70 %
CO <sub>2</sub>	=	25,22 %

### 3 Ergebnisse

CH4	=	14,89 %
H2	=	29,02 %
CxHy	=	4,00 %
N2	=	7,55 %

Da sich in diesem Fall aber noch 17,7 % Wasser und 7,4 % Teer/Öl im Produktgas befindet, ändert sich die prozentuale Aufteilung wie folgt:

**Tabelle 3-6: Gaszusammensetzung mit Teer und Wasser**

O2	=	0,39 %
CO	=	14,01 %
O2	=	18,89 %
CH4	=	11,15 %
H2	=	21,74 %
CxHy	=	3,00 %
N2	=	5,65 %
H2O	=	17,70 %
Teer	=	7,40 %

Bei den Teeren handelt es sich um Phenantreen oder Naphtalin. Für die weiteren Berechnungen wurde mit Phenantreen - C<sub>14</sub>H<sub>10</sub> gerechnet. Für die Stöchiometrieberechnung macht es keinen Unterschied, mit welchem der beiden Teere gerechnet wird, da diese denselben Sauerstoffbedarf bei der Verbrennung haben. Die Stöchiometrieberechnung gilt für die Ermittlung der für die Verbrennung benötigten Luftmenge. Zunächst wurde bei der Berechnung das Phenantreen im Gas ausgelassen. Anschließend wurde die benötigte Sauerstoffmenge separat berechnet und dem Ergebnis hinzuaddiert. Durch die Brennstoffanalyse des Synthesegases wurde der prozentuale Anteil der sich im Gas befindlichen Stoffe sowie der Massenstrom ermittelt.

Für die Berechnungen wurden folgende Konstanten und Werte gewählt:

$p_{\text{Gas}} = 1 \text{ bar}$	$m_{\text{H}_2} = 2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
$p_{\text{Luft}} = 1 \text{ bar}$	$m_{\text{N}_2} = 28 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
$T_{\text{Gas}} = 773 \text{ K}$	$m_{\text{CO}} = 28 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
$T_{\text{Luft}} = 293 \text{ K}$	$m_{\text{CH}_4} = 16 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
$R = 0,083145 \frac{\text{m}^3 \cdot \text{bar}}{\text{K} \cdot \text{Kmol}}$	$m_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
	$m_{\text{CO}_2} = 44 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
	$m_{\text{C}_2\text{H}_4} = 28 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
	$m_{\text{C}_{14}\text{H}_{10}} = 178 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$

$$m_{\text{Luft}} = 28,96 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

Über die Massen der einzelnen Elemente lässt sich nun mit folgender Formel ihre Dichte ermitteln und über die volumetrischen Anteile anschließend die Dichte des Synthesegases errechnen:

$$\rho_0 = \frac{P * M}{R * T} \quad (\text{Gl. 3-1})$$

Somit erhalten wir für die Dichte des Synthesegases einen Wert von:

$$\rho_{0\text{Gas}} = 0,34 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Aus der Dichte und dem Massenstrom von 71,3 kg/h kann nun der Volumenstrom des Synthesegases bestimmt werden.

$$V = \frac{M}{\rho_{0\text{Gas}}} = 210,91 \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{Gl. 3-2})$$

Über den Volumenstrom und die volumetrische Aufteilung der Gaskomponenten wird anschließend der Volumenstrom der einzelnen Elemente berechnet.

**Tabelle 3-7: errechnete Volumenströme**

$V_{\text{H}_2} =$	50,37	$\text{m}^3/\text{h}$
$V_{\text{N}_2} =$	13,08	$\text{m}^3/\text{h}$
$V_{\text{CO}} =$	32,46	$\text{m}^3/\text{h}$
$V_{\text{CH}_4} =$	25,84	$\text{m}^3/\text{h}$
$V_{\text{H}_2\text{O}} =$	37,33	$\text{m}^3/\text{h}$
$V_{\text{CO}_2} =$	43,79	$\text{m}^3/\text{h}$
$V_{\text{C}_2\text{H}_4} =$	6,96	$\text{m}^3/\text{h}$

Aus der Formel  $p * V = n * R * T$  erhalten wir durch Umstellen „n“, um somit die Stoffmengenströme zu berechnen:

$$n = \frac{p * V}{R * T} \quad (\text{Gl. 3-3})$$

**Tabelle 3-8: errechnete Stoffmengenströme**

$n_{\text{H}_2} =$	0,7836	kmol/h
$n_{\text{N}_2} =$	0,2035	kmol/h
$n_{\text{CO}} =$	0,5050	kmol/h
$n_{\text{CH}_4} =$	0,4020	kmol/h
$n_{\text{H}_2\text{O}} =$	0,5808	kmol/h

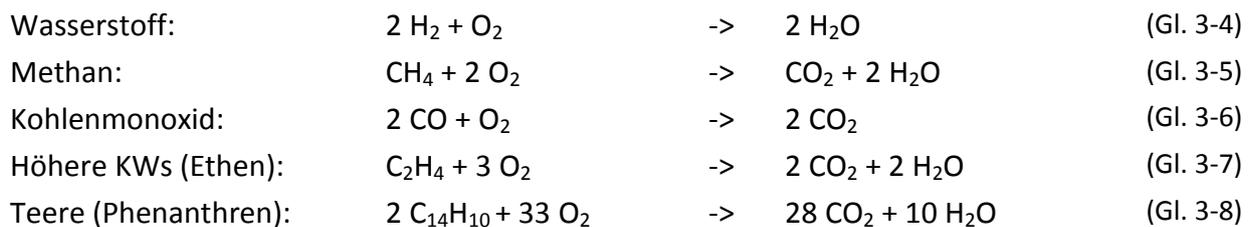
### 3 Ergebnisse

$n_{\text{CO}_2=}$	0,6813	kmol/h
$n_{\text{C}_2\text{H}_4=}$	0,1083	kmol/h
$n_{\text{C}_{14}\text{H}_{10}=}$	0,0416	kmol/h

Den Stoffmengenstrom des Phenantrens errechnen wir durch den gegebenen Massenstrom von 7,4 kg/h und seiner molaren

Masse von  $178 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$ .

Im nächsten Schritt werden die Reaktionsgleichungen für die brennbaren Komponenten Wasserstoff, Methan, Kohlenmonoxid, Ethen und Phenantreen aufgestellt.



Aus den Reaktionsgleichungen der brennbaren Komponenten, erhalten wir die stöchiometrischen Faktoren zur Verbrennung der Gaskomponenten. Es wird z. B. ein halbes kmol  $\text{O}_2$  benötigt, um ein kmol  $\text{H}_2$  zu verbrennen, zwei kmol  $\text{O}_2$  werden für die Verbrennung von einem kmol  $\text{CH}_4$  benötigt usw. Damit kann die Stoffmenge an reinem Sauerstoff, welcher für die Verbrennung notwendig ist, berechnet werden:

**Tabelle 3-9: benötigter Sauerstoffstrom**

Durch Wasserstoff:	0,3918	kmol/h
Durch Methan:	0,8040	kmol/h
Durch Kohlenmonoxid:	0,2525	kmol/h
Durch Ethen:	0,3249	kmol/h
Durch Teere:	0,6860	kmol/h
Summe=	2,4592	kmol/h

Zur Verbrennung des Synthesegases benötigen wir also 2,4592 kmol/h reinen Sauerstoff  $\text{O}_2$ . Da uns reiner Sauerstoff nicht zur Verfügung steht (und es wahrscheinlich auch ein wenig gefährlich wäre), verwenden wir Umgebungsluft. Luft besteht aus 79 % Stickstoff und zu 21 % aus Sauerstoff. Es muss also der Sauerstoffanteil der Luft auf den benötigten Sauerstoff hochgerechnet werden. Um eine vollständige Verbrennung sicherzustellen, wird mit einem  $\lambda = 1,3$  weiter gerechnet. Damit ergibt sich für den benötigten Sauerstoff bzw. für die Verbrennungsluft ein Wert von:

$$n_{\text{O}_2} = 3,1969 \text{ kmol/h}$$

$$n_{\text{Luft}} = 15,22 \text{ kmol/h}$$

Angewendet auf die Formel  $V = \frac{n \cdot R \cdot T}{p}$  erhalten wir den Luftvolumenstrom:

Luftvolumenstrom = 370,87 m<sup>3</sup>/h

### 3.5.2 Einbindung des Prototypen in die Vergasungsanlage

Der Brenner (mit Brennerkopf, Startbrenner, Injektordüsen, Brennergehäuse usw.) wird stirnseitig vor dem Pyrolysereaktor montiert. Nachfolgende Abbildung zeigt eine Prinzipskizze der Pyrolyseanlage. Das Brennersystem mit Brennkammer ist mit einem roten Kreis markiert.

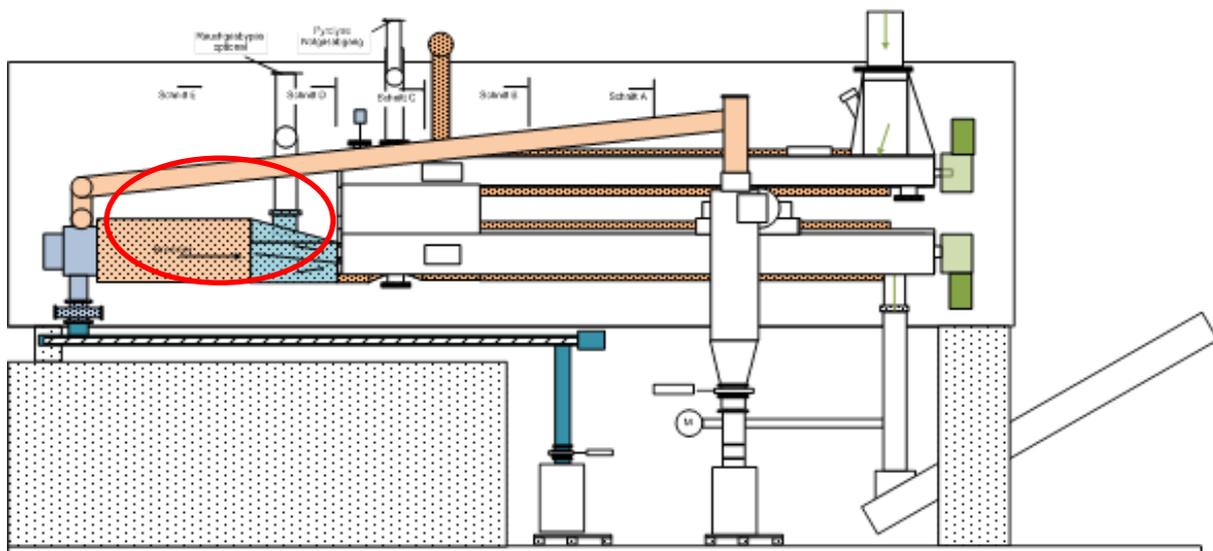


Abbildung 3-52: Einbau Brennersystem in Pyrolyseanlage

#### 3.5.2.1 Aufbau der Brennkammer und des Syngasbrenners sowie Einbindung in die Infrastruktur des Pyrolysereaktors

Die nachfolgende Abbildung 3-53 stellt den Aufbau der Gesamtanlage schematisch dar. Zu erkennen sind neben dem Brenner auch die dem Brenner vorgeschalteten Zyclone zur Staubabscheidung.

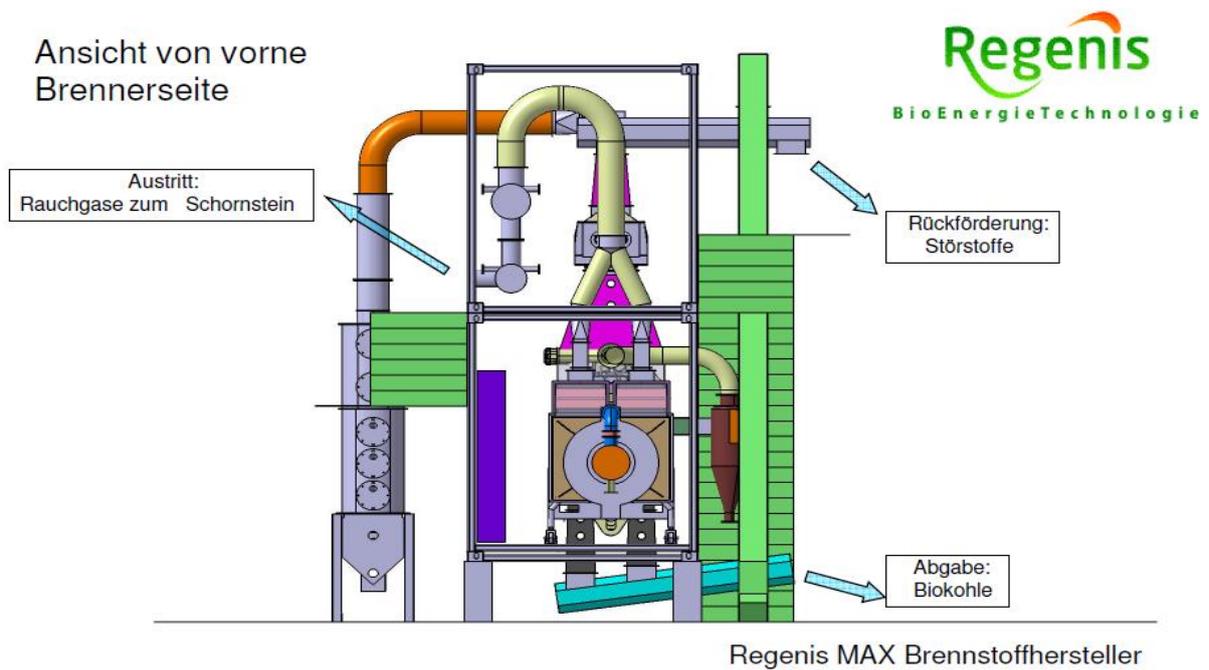
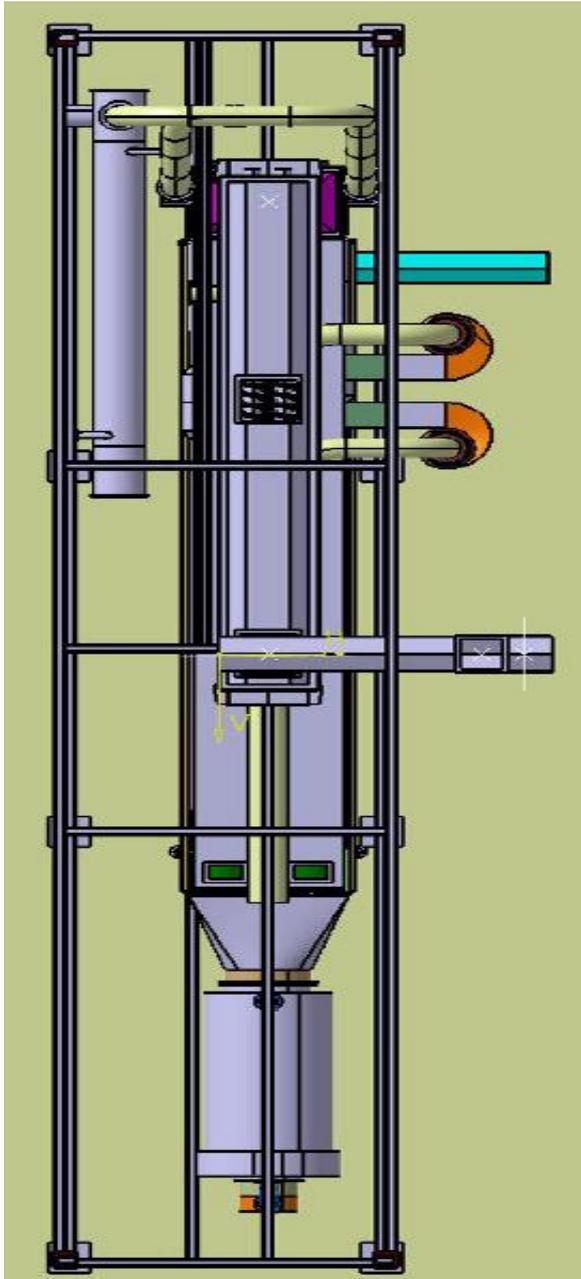


Abbildung 3-53: CAD-Modell der Pyrolyseanlage

### 3.5.2.2 Aufbau der Gas- und Luftregelstrecke inklusive der zusätzlichen Anlagenkomponenten (Zyklon, Sauggebläse etc.)

Die Pyrolyseanlage verfügt über eine DIN EN 746-2 konforme Gasregelstrecke und über eine Luftregelstrecke mit mehreren Gebläseeinrichtungen. Auf ein Sauggebläse zur Förderung des Synthesegases konnte aufgrund der erfolgreichen Entwicklung eines Injektordüsenkonzeptes gänzlich verzichtet werden. Die Abbildung 3-54 zeigt einen Aufstellungsplan der Pyrolyseanlage.



*Abbildung 3-54: Aufstellungsplan Pyrolyseanlage*

Analog zur dieser Abbildung sind das Brennersystem und weitere Anlagenkomponenten deutlich in der fotografischen Abbildung 3-55 erkennbar. Wie zu erkennen, handelt es sich um das entwickelte Brennersystem, welches direkt an die Anlage angeschlossen ist. Zudem sieht man die Zuleitungen für das Synthesegas und die Treibluft.



Abbildung 3-55: Einbau Brennersystem in Anlage

#### **3.5.3 Experimentelle Untersuchungen mit Gärresten weiterer biogener Stoffe**

Ergebnisse zu den geplanten experimentellen Untersuchungen mit Gärresten weiterer biogener Stoffe können zum Zeitpunkt der Abschlussberichterstellung noch nicht geliefert werden. Aufgrund von zeitlichen Verschiebungen werden die Ergebnisse erst in späteren Veröffentlichungen bekannt gemacht.

#### **3.5.4 Integration die Mess-, Regelungs- und Steuerungsstrecke des Gaserzeugers**

##### **3.5.4.1 Erarbeitungen geeigneter Steuer- und Regelstrategien zur Einbindung des Brenners in den Anlagenbetrieb des Pyrolysereaktors**

Die Regelung und Steuerung der Pyrolyseanlage werden komplett über eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) realisiert. Als Endprodukt wird ein maximal möglicher Ertrag an Biokohle erzielt. Die robuste und stabile Regelung erhält kontinuierlich ausführliche Messdaten über den gesamten Prozesszustand. Diese können direkt über Sensoren geliefert und indirekt durch eine logische Auswertung mehrerer Sensordaten realisiert werden. Die dadurch erfasste Ist-Situation des Prozesses kann anschließend durch die Regelung mit Hilfe von Stellgrößen an die Soll-Situation angepasst werden.

Eine zuverlässige Informationsquelle über den gesamten Ablauf der Pyrolyse stellen die Messdaten der Prozesstemperatur dar. Diese Daten werden mit Hilfe von Temperatursensoren erfasst und anschließend von der SPS ausgewertet.

Die für einen reibungslos laufenden Pyrolyseprozess erforderlichen Temperaturmessungen werden ständig abgefragt und ausgewertet. Die Solltemperatur basiert auf einer genauen Analyse der von der REW GmbH gesammelten Erfahrungen und davon abgeleiteten Berechnungen.

#### 3.5.4.2 Umsetzungen der Steuer- und Regelungsstrategien nach erfolgreichen ersten Untersuchungen

Es gibt einen Hauptregelkreis nämlich zur Regelung des Inputs bzw. des Unterdrucks im Reaktor. Primär wird die Gebläsedrehzahl variiert und sekundär die Inputmenge. Nachfolgende Abbildung 3-56 zeigt eine Logikskizze der Anlagenregelung.

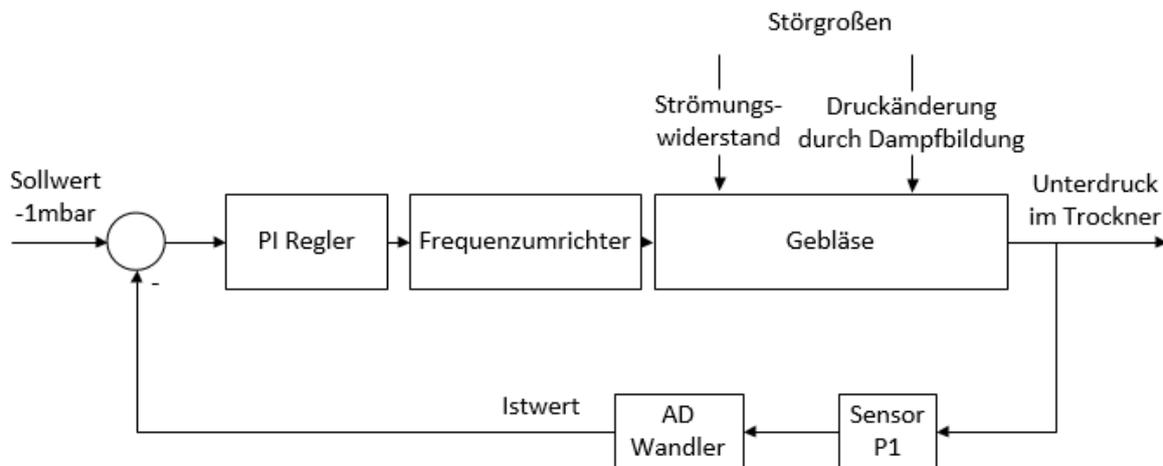


Abbildung 3-56: Logikskizze Anlagenregelung

#### 3.5.4.3 Konzepte zur Auskopplung der überschüssigen Wärme in nachgeschaltete Anwendungen, z. B. Wärmeauskopplung

Die erzeugte Rauchgaswärme wird vollständig genutzt. Es findet eine gestufte Wärmeverwendung auf unterschiedlichen Temperaturen statt. Der Pyrolysereaktor wird mit relativ hoch temperierten Rauchgasen beheizt, während die Wärmeauskopplung in Form von heißem Thermal Öl von ca. 230 °C bzw. Warmwasser bei 90 °C erfolgt. Die Abbildung 3-57 zeigt eine fotografische Aufnahme des Wärmeübertragungssystems.



Abbildung 3-57: Wärmeübertragungssystem

## 3.6 Bewertung der Untersuchungen

### 3.6.1 Beurteilung des Anlagen- und Brennerbetriebs

Durch einen hohen Grad der Prozessüberwachung auf der einen Seite und Steuerung/Regelung auf der anderen Seite ist so ein Pyrolyse-Contireaktor im Bereich des Betriebspunktes zu fahren, um eine gute Biokohle bei optimaler Wärmeausnutzung zu erzeugen.

#### 3.6.1.1 Festlegung der Einsatzparameter und -grenzen für den Syngasbrenner

Die Grenzen des Pyrolysegas- bzw. Synthesegasbrenners werden im Wesentlichen von der Zusammensetzung ( $\sigma_{TS}$ ,  $\alpha_{TS}$ , Körnung usw.), der Inputmenge und dem Heizwert der Inputstoffe bestimmt.

Abbildung 3-58 zeigt die vollständig instrumentierte Verbrennungseinrichtung.

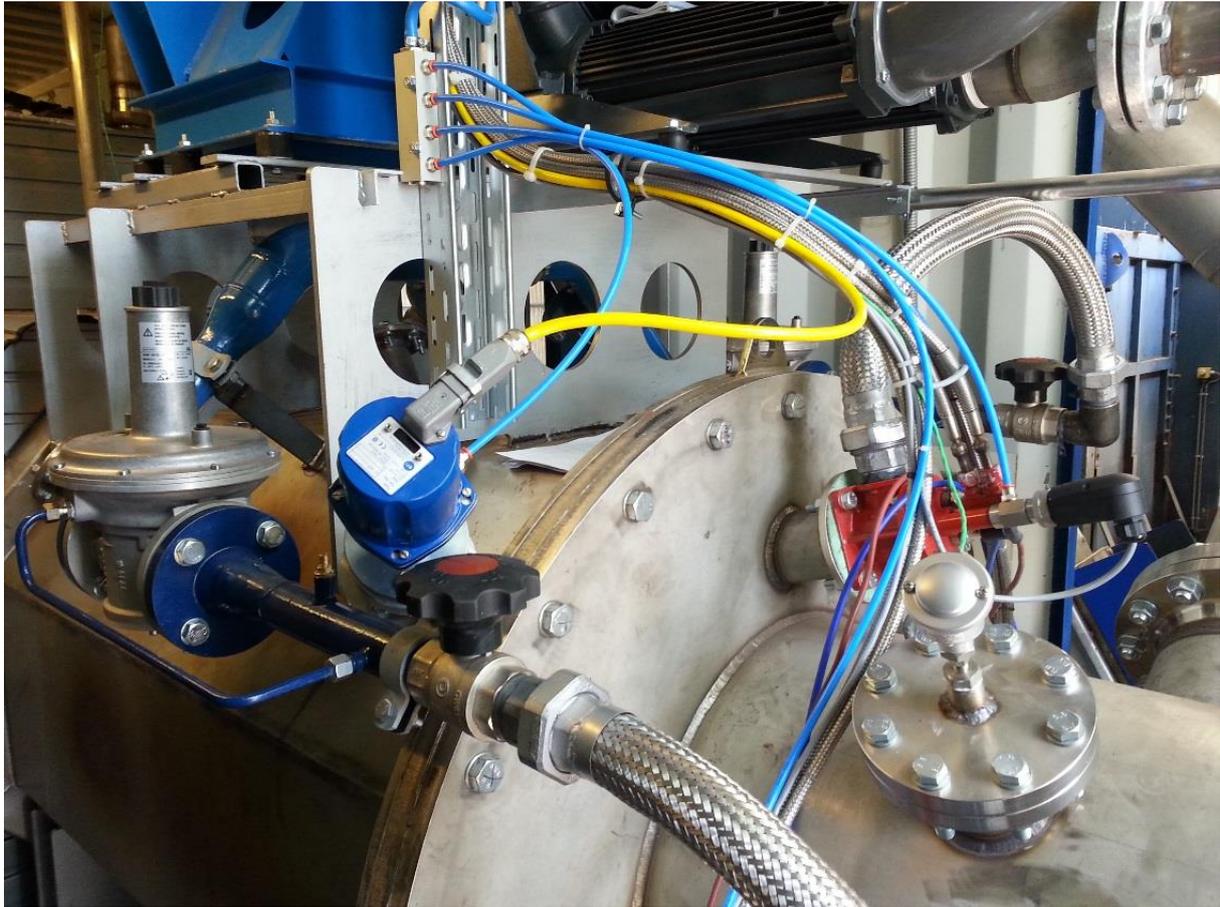


Abbildung 3-58: integrierter Brenner

#### 3.6.1.2 Erarbeitung der Fahr- und Regelstrategien für einen stabilen und schadstoffarmen Brenner- und Anlagenbetrieb

Die Inputzusammensetzung sollte möglichst gleichmäßig sein und sich nur langsam ändern, um über geeignete Regelstrategien auf Inputschwankungen zu reagieren. Sollte der Input beispielsweise feuchter werden, ist die Inputmenge zu reduzieren, um besser zu trocknen und nicht zu viel Wasserdampf zu erzeugen.

#### 3.6.2 Gesamtanalyse und Bestimmung des Einsatzpotentials

Das Einsatzpotential ist extrem hoch, da sich aufgrund von niedrigen Ascheerweichungstemperaturen ligninreiche Reststoffbiomassen nicht sinnvoll verbrennen lassen. Diese Stoffe (Gärreste, Kompost, Produktionsreste, Siebreste, Straßenbegleitgrün, Grünschnitt usw. ) lassen sich am sinnvollsten pyrolysieren (Biokohle und Wärme) oder später, wenn regeneratives Vergasungsmittel zur Verfügung steht, auch in sauberes Synthesegas überführen. Daher sehen wir für Biogas und Wasserstoff aus Elektrolyseanlagen neben der klassischen Biokohle und Wärmeproduktion auch sehr gute Möglichkeiten, Synthesegas als speicherbare Energie zu erzeugen und damit ein hohes Potential für erneuerbare Energien.

## 4 ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel, ein Brennersystem für die Integration in eine Pyrolyseanlage zu entwickeln, konnte erreicht werden. Die anspruchsvollen Anforderungen an das Brennersystem konnten durch die vorhergehenden Entwicklungsarbeiten eingehalten werden. Die Versorgung des Brenners mit dem im Unterdruck vorliegenden Synthesegas konnte durch den Einsatz numerisch optimierter Injektordüsen realisiert werden. Eine Verbrennung des Synthesegases erbrachte nachweislich geringe NO<sub>x</sub>-Emissionen. Ergebnisse des tatsächlichen Anlagenbetriebes werden weiteren Aufschluss darauf geben, inwieweit die realen Bedingungen Einfluss auf das Brennersystem haben werden. Zu diesem Zeitpunkt liegen keine Ergebnisse des Brennerbetriebs in der realen Pyrolyseanlage vor.

## 5 WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG DES FORSCHUNGSPROJEKTES

Die Erzeugung von Strom und Wärme aus Biomasse und Windenergie ist bereits heute Stand der Technik. Dennoch müssen neue innovative Technologien entwickelt werden, um die Nutzung von erneuerbaren Energien weiter auszubauen. Eine Möglichkeit, um die Effizienz der Biomassenutzung zu erhöhen wäre, eine Biogasanlage mit einem nachfolgenden Pyrolyseprozess zu kombinieren. Dies hat den besonderen Vorteil, dass die vergärten Substratstoffe effizienter genutzt werden. Der neuartige Pyrolyseprozess von REW wurde konzipiert, um den restlichen Energiegehalt aus den Gärresterückständen einer Biogasanlage für die Bereitstellung von Wärme und Strom zu nutzen. Die wirtschaftliche Bedeutung liegt in der Energiegewinnung aus zurzeit noch ungenutzten Stoffen. Die entwickelte Pyrolyseanlage in Kombination mit dem in diesem Projekt entwickelten Brennersystem könnte somit eine Nischenrolle in der Energiewirtschaft einnehmen.

## 6 PLAN ZUM ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT

Das GWI ist seit Jahren ein etabliertes Mitglied der Gaswirtschaft und Veranstalter von Kursen, Seminaren und Kolloquien zu aktuellen Problemstellungen. Mitarbeiter des GWI sitzen in den Ausschüssen des DVGW, der DVV, des VDMA und des VDEh. Des Weiteren werden die Ergebnisse auf nationalen und internationalen Tagungen sowie in Fachzeitschriften veröffentlicht. Damit ist insgesamt ein schneller und direkter Transfer der Ergebnisse in die Industrie gewährleistet. Nachfolgend sind in Tabelle 6-1 die bisher erfolgten und noch geplanten Veröffentlichungen aufgeführt.

*Tabelle 6-1: Veröffentlichungen*

Zeitraum/ Termin	Maßnahme	Ziel/Bemerkung
2013	Tätigkeitsbericht in der Zeitschrift GAS-WÄRME International	Bericht über den Fortschritt öffentlich geförderter Projekte am Gaswärme-Institut e. V. Essen
2014	Abschlussbericht	Zusammenstellung der Ergebnisse und Bereitstellung für interessierte KMU
2015	Flammentag, Clausthal	Vorstellung der erzielten Ergebnisse

		„Entwicklung eines innovativen Brennersystems zur energetischen Nutzung von Produktgas aus pyrolysierten Gärresten“
2015	Veröffentlichung in Fachzeitschriften GASWÄRME International, DGG-Journal	Vorstellung der erzielten Ergebnisse
2015	Homepage des GWI	Abschlussbericht

## 7. GEGENÜBERSTELLUNG VON FORSCHUNGSZIELEN UND ERZIELTEN ERGEBNISSEN

Forschungsziel	Erzielte Ergebnisse
<ul style="list-style-type: none"> <li>Entwicklung einer Treibstrahldüse zur Sicherstellung des Reaktorunterdrucks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Auswahl und Simulation einer geeigneten Düsengeometrie am GWI</li> <li>Aufbau und Messung der Düse in einem Versuchsstand</li> <li>Integration der Düsen in den Brennerkopf</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Entwicklung eines Brennersystems im CAD</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Entwicklung konnte erfolgreich abgeschlossen werden</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Integration von Start-/Zündbrennern für den Pyrolyseprozess</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Drei Öllanzbrenner wurden in den Brennraum integriert und dienen nach Aufbringung der Startenergie für den Pyrolyseprozess als Zündbrenner für das Synthesegas.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Bau des Brennersystems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abgeschlossen</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Test des Brenners am GWI</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zur Messung der Abgasemissionen wurde ein Mischgas erzeugt, welches dem Synthesegas sehr ähnlich ist. Die Messergebnisse lagen hierbei weit unter den gesetzlichen Grenzwerten.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Inbetriebnahme des Brenners am Vergaser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erfolgreich abgeschlossen</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Messungen der Abgaswerte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Messungen stehen noch aus</li> </ul>

---

## **8. NUTZEN DER FORSCHUNGSERGEBNISSE UND MARKTCHANCEN**

### **8.1 Auswirkungen auf das Unternehmen REW**

In der Laufzeit des Projektes konnte REW in Kooperation mit Projektpartnern und dem GWI ein innovatives Brennerkonzept für die Verbrennung von Synthesegas aus Gärresten entwickeln und herstellen. Im Laufe des Projektes konnte ein neuer Auftrag akquiriert werden.

### **8.2 Marktchancen für das neue Konzept**

Wir sehen die Einsatzgebiete der Pyrolyseanlagen hinter Biogasanlagen zur Wärme und Düngerproduktion als hervorragend an. Ein weiterer Anwendungsbereich für die Kombination aus Brenner und Pyrolyse ist die kommunale Klärschlammverwertung in Verbindung mit Kläranlagen.

## **9. DANKSAGUNG**

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Förderung des ZIM-Projektes im Förderprogramm "Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)- Fördermodul Kooperationsprojekte (KF)".