

## **Dezentrale Biomassevergasung**

### **- Teerabbau durch primäre und sekundäre Maßnahmen-**

Dorith Böhning und Michael Beckmann

1	Einleitung.....	1
2	Prozessführung .....	1
2.1	Anforderungen an die Prozessführung.....	2
2.2	Teerabbau durch primäre Maßnahmen.....	3
2.3	Teerabbau durch sekundäre Maßnahmen .....	4
3	Theoretische und experimentelle Untersuchungen.....	6
3.1	Zielstellung und Lösungsweg .....	6
3.1.1	Primärmaßnahmen .....	7
3.1.2	Sekundärmaßnahmen .....	9
3.2	Versuchs- und Betriebsergebnisse.....	11
3.2.1	Primärmaßnahmen .....	11
3.2.2	Sekundärmaßnahmen .....	12
4	Zusammenfassung.....	15
5	Danksagung .....	18
6	Literaturverzeichnis .....	18

## **1 Einleitung**

Die Anwendung der **Vergasungstechnologie** zur **Strom- und Wärmeerzeugung** aus Biomasse ermöglicht es, kleine dezentrale Anlagen mit regionaler Versorgungsstruktur und den damit verbundenen energiesparenden kurzen Transportwegen zu realisieren und diesen Vorteil mit hohen Wirkungsgraden zu verbinden.

Entwicklungsbedarf besteht nach wie vor hinsichtlich der Bereitstellung einer Gasqualität durch Primär- und Sekundärmaßnahmen, die den Betrieb eines BHKW's in wirtschaftlicher Weise erlaubt.

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich insbesondere mit der **Teerreduzierung** im Vergasungsprozess durch Primärmaßnahmen und im **Vergasungsgas** durch Sekundärmaßnahmen. Dabei wird zunächst ein kurzer Überblick über die bestehenden Möglichkeiten der Umsetzung dieser Maßnahmen in die Praxis gegeben. Diese Darstellung orientiert sich an dem in der Literatur dargestellten Stand der Technik und den vielfachen Entwicklungsaktivitäten. Anschließend wird auf die theoretischen und experimentellen Arbeiten an zwei Versuchsvergäsern mit den entsprechenden **Gasaufbereitungstechniken**, welche an der TU Dresden durchgeführt wurden, und die zugehörige Ergebnisse eingegangen.

## **2 Prozessführung**

Wesentliche Beurteilungskriterien für Vergasungsprozesse von Biomasse zur Erzeugung eines Brenngases für die Strom- und Wärmeerzeugung mittels eines BHKW's sind Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit, Kaltgaswirkungsgrad, Ausbrandgrad, Aschequalität, Brenngasqualität, Schadstofffrachten und energiebezogene Emissionen. Mit einer optimierten Prozessführung sind diese Kenngrößen zielorientiert zu beeinflussen.

## 2.1 Anforderungen an die Prozessführung

Bei der Diskussion der Anforderungen an die Prozessführung sind

- die brennstofftechnischen Eigenschaften der Einsatzstoffe
- die Aufteilung der Reaktionsteilschritte,
- die Apparate und
- die zugehörigen Haupteinflussgrößen hinsichtlich Niveau und Steuerung entsprechend dem Reaktionsablauf

zu beachten.

### Brennstofftechnische Eigenschaften der Einsatzstoffe

Biomassebrennstoffe sind im Vergleich zu fossilen Regelbrennstoffen häufig durch:

- eine heterogene Zusammensetzung sowohl bezüglich der Inhaltsstoffe als auch hinsichtlich der Stückgröße,
- einen hohen Anteil
  - inerter Komponenten (Mineralien, Wasser),
  - flüchtiger Bestandteile, Alkali- und Erdalkaliverbindungen,
  - Chlor (in unterschiedlichen Verbindungen),
  - Schwermetallverbindungen,
- einen niedrigen Heizwert,
- geringe Schüttdichte und damit
- niedrige Energiedichte,
- schlechtes Schüttgutverhalten,
- usw.

gekennzeichnet. Diese Eigenschaften haben insbesondere Einfluss auf das Zünd- und Ausbrandverhalten, auf das Verschlackungs- und Korrosionspotenzial und letztlich auch auf den Wirkungsgrad der Energieumwandlung. Biomassebrennstoffe sind im Vergleich zu den fossilen Regelbrennstoffen als schwierige Brennstoffe zu bezeichnen [1]. Entsprechend hohe Anforderungen sind daher an die Prozessführung bei der Vergasung von stückigen Biomassebrennstoffen zu richten.

### Aufteilung der Reaktionsteilschritte

Der Reaktionsablauf bei der Vergasung von stückigen Brennstoffen lässt sich grob in die Teilschritte:

- Trocknung,
- Entgasung,
- Vergasung,
- Ausbrand des Feststoffes,
- Nachbehandlung der gasförmigen Bestandteile,
- Nachbehandlung von Flugstäuben, Koks usw.

aufteilen.

Sind die einzelnen Zonen, in denen die Teilschritte ablaufen, ungenügend voneinander getrennt, d.h. werden mehrere Zielstellungen in einem Reaktionsraum angestrebt, so sind eine Vielzahl von Ziel- und Einflussgrößen überlagert und damit eine Optimierung im Hinblick auf Ausbrand des Feststoffes und die Einstellung der Gasqualität durch die Prozessführung schwierig. Durch eine Auftrennung der Prozessführung wird eine Verkleinerung der Ziel- und Einflussgrößen in jeder einzelnen Prozesseinheit erreicht.

Mit der gezielten verfahrens- und apparatetechnischen Umsetzung der Unterteilung der einzelnen Reaktionsschritte im Prozess besteht die Möglichkeit wesentlichen Einfluss auf die Teerbildungsrate während des Vergasungsprozesses zu nehmen - *Primärmaßnahmen* -.

Ein weiterer Weg zur Bereitstellung eines motortauglichen Gases ist durch die Behandlung der Brenngase in einer der Vergasungsanlage nachgeschalteten Gasaufbereitungsanlage gegeben - *Sekundärmaßnahmen* -.

### Prozessbedingungen

Die Steuerungsmöglichkeiten der Haupteinflussgrößen Temperatur, Sauerstoffkonzentration usw. bestehen insbesondere durch:

- die Aufteilung der Prozessführung,
- die Entkopplung von Reaktion und Wärmeübertragung (Vermeidung von Quenchreaktionen),
- externe Abgasrückführung in einzelnen Zonen,
- Stufung des Vergasungsmittels,
- getrennte Verweilzeiteinstellung (bei getrennter Prozessführung).

## **2.2 Teerabbau durch primäre Maßnahmen**

Es sind aus dem Stand der Technik eine Reihe unterschiedlicher Vergasungsverfahren für feste, regenerative Brennstoffe bekannt, die eine Erzeugung eines teearmen Brenngases zum Ziel haben.

Vergaser im für dezentrale Anlagen interessierenden Bereich bis 1 MW sind im Regelfall einstufige **Festbettvergaser** (Gleich-, Gegenstrom und vereinzelt Querstrom). Diese produzieren Brenngase mit sehr hohen Teergehalten. So liegen die bei den bekannten einstufigen **Biomassevergaser** n erreichbaren Konzentrationen des Teers um mindestens eine Zehnerpotenz über der von Gasmotoren tolerierbaren Größe. Ein für eine wirtschaftliche Betriebsweise des Vergasungsverfahrens nicht zu unterschätzendes Problem unter Anwendung der bekannten Festbettvergassungsverfahren stellen die hohen Anforderungen, besonders der **Gleichstromvergaser**, an die Brennstoffqualität und die geringe Brennstoffvariabilität dar. Weiterhin erreichen Gleichstromvergaser nur relativ geringe Wirkungsgrade und sind mit einem Entsorgungsproblem belastet, da sie einen kohlenstoffreichen Reststoff erzeugen, der die TA Siedlungsabfall bei weitem nicht erfüllt.

Es ist davon auszugehen, dass selbst ein sehr gut arbeitender einstufiger Vergaser im genannten Leistungsbereich eine hocheffektive **Gasentteerung** benötigt, um ein hinreichend teearmes Gas zu erzeugen.

Eine Möglichkeit teearmes, qualitativ hochwertiges Brenngas herzustellen ist der Einsatz mehrstufiger Vergaser, deren wesentlicher Vorteil die getrennte Prozessführung darstellt.

Es ist zweckmäßig, den Vergasungsprozess in die selbständigen Teilsysteme

- Entgasung, d.h. Freisetzen der flüchtigen Bestandteile, Teilvergasung und –oxidation-Teilschritte

und - vollständig davon getrennt, in Reihe geschaltet

- Vergasung, Ausbrand des Feststoffes, Cracken des in der ersten Einheit erzeugten Gases Teilschritte

aufzuteilen, wobei die Einheiten ihrerseits wieder in entsprechende Teilsysteme zu untergliedern sind.

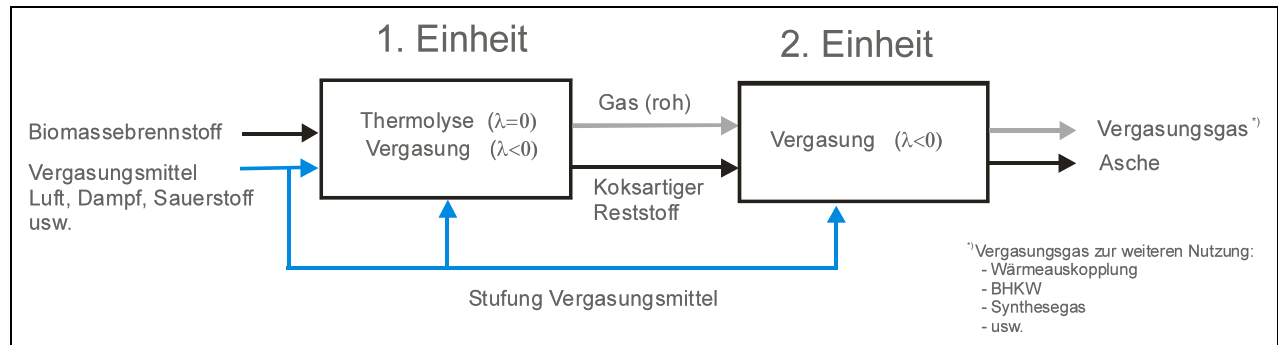


Bild 1: Schematische Darstellung der getrennten Prozessführung,  
Beispiel Thermolyse/Vergasung-Nachvergasungsverfahren

Die mehrstufige Ausführung des Verfahrensprozesses ist geeignet, zu kontrollierbaren Zuständen im Gaserzeuger und zu teerarmen Brenngas zu gelangen. Auch ist in manchen der mehrstufigen Anlagen der Einsatz problematischer Brennstoffe besser möglich als beispielsweise in einstufigen Festbettvergäsern.

Allerdings verschärfen viele der bekannten mehrstufigen Vergaser, bedingt durch ihren komplizierten Aufbau, die Kostensituation zusätzlich.

Bei der Entwicklung von Mehrstufenvergäsern sind die unter Abschnitt 2.1 genannten Punkte besonders zu beachten.

Auch der Einsatz der Wirbelschichttechnologie in Vergasungsprozessen für Biomasse ist eine erfolgversprechende Technologie zur Erzeugung eines teerarmen bzw. teerfreien Brenngases. Wirbelschichtvergaser sind für die Anwendung im dezentralen Bereich zu aufwändig und werden in diesem Beitrag nicht weiter betrachtet.

Eine weitere Möglichkeit der Teerbildung im Vergasungsprozess entgegen zu wirken ist der Einsatz von katalytisch aktiven Materialien. Diese Verfahrensvariante wurde bisher ausschließlich in der Wirbelschicht untersucht, da in diesem Fall durch den Einsatz eines Bettmaterials eine Dosierung der katalytisch wirkenden Substanzen einfach realisiert werden kann.

In einer von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe in Auftrag gegebenen Studie [2] und in einer Studie des Ökoinstitutes Darmstadt [3] sind eine Vielzahl von Vergasungsverfahren beschrieben. Insgesamt existieren dutzende der verschiedensten Ansätze, aber auch vielfache fast identische Wiederholungen einzelner Ansätze.

### 2.3 Teerabbau durch sekundäre Maßnahmen

Als sekundäre Maßnahmen für die Brenngasaufbereitung aus Biomassevergasungsanlagen stehen physikalische und chemische Methoden zur Verfügung. In [4] und [5] werden u.a. die verschiedenen zum Einsatz kommenden Reinigungstechniken detailliert dargestellt.

In Bild 2 sind in einer Übersicht die Prozesse, welche zur Teerabscheidung bzw. Umsetzung als Sekundärmaßnahme zur Verfügung stehen, zusammengefasst.

Teerentfernung		
	Physikalische Methoden	Chemische Methoden
Kaltgasreinigung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absorption (Wäsche, Quenche)</li> <li>• Adsorption</li> <li>• Naßelektrofilter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chemische Wäsche (Monoethanolamin – MEA, Pottasche - K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-Lsg.)</li> <li>• Katalytische Prozesse</li> </ul>
Heißgasreinigung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Heißgasfiltration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crackung</li> <li>• Hydrierung</li> <li>• Reformierung</li> <li>• Partielle Oxidation</li> </ul>

Bild 2: Technologien der Teerreduzierung und -entfernung

In Tabelle 1 sind ausgewählte **physikalischen Verfahren** mit ihren Vor- und Nachteilen dargestellt.

Tabelle 1: Physikalische Gasaufbereitungsverfahren mit Vor- und Nachteilen (Auszüge) [4]

Verfahren	Vorteile	Nachteile
• Gaswäsche mit wässrigen Medien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reinigung und Kühlung in einem Prozess</li> <li>• Integrierte Feststoffabscheidung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufwendige Aufbereitung des Waschwassers – Teere sind schwer bzw. nicht wasserlöslich</li> <li>• Restteergehalt im Gas abh. von Wäschertemperatur (Gleichgewichtsdampfdruck)</li> </ul>
• Gaswäsche mit organischen Medien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teere gut löslich in organischen Medien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gründliche Vorabscheidung der Flugasche (Verseifung Bioöl)</li> </ul>
• Abscheidung mittels Festbettfilter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abreicherung sehr hoch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beladenes Bettmaterial</li> </ul>
• Abscheidung mittels Nasselektrofilter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kombination Teer- und Staubabscheidung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abreinigung der Filter schwierig, da zähklebrige Konsistenz des Filterkuchens</li> </ul>

Die Wäsche ist die am häufigsten eingesetzte Methode, obwohl diese mit Wasser als Waschmittel keine guten Abscheidegrade erreicht. Für dieses Verfahren stehen Waschtürme, Rotationswäscher, Prallwäscher und Venturiwäscher zur Verfügung. Um die Abscheidegrade zu erhöhen wird statt Wasser Öl als Waschmittel eingesetzt. Das hat den Vorteil, dass sich der Teer in Öl lösen lässt. Es wurden Reingaswerte für die Teerkonzentration von 10 mg/Nm<sup>3</sup> erreicht. Auch Nasselektrofilter werden erfolgreich in Vergasungsanlagen eingesetzt. Für dieses Verfahren muss das Gas vor Eintritt in das Filter mit Wasser gesättigt werden, um so die entstehenden Tröpfchen und Partikel am Filter abscheiden zu können. Die Reinigung der Filterelektroden erfolgt wiederum mit Wasser.

Die zweite Gruppe der Gasaufbereitung (**chemische Methoden**) beruht auf der **thermochemischen** Umwandlung der Kohlenwasserstoffe. In den Teerabbauverfahren wird die Vergasung als Reaktion fester Brennstoffe zu gasförmigen Verbindungen vervollständigt. Dabei werden die den Teer bildenden Substanzen mit hohem Molgewicht mit oder ohne einen zugegebenen Reaktionspartner in einfache Verbindungen umgewandelt, die im Gas verbleiben.

Es ist dabei sowohl der Einsatz eines Katalysators als auch eine Reaktion ohne Katalysator möglich.

In Tabelle 2 werden die thermo-chemischen Umwandlungsprozesse der Teere mit einigen Vor- und Nachteilen beschrieben.

Tabelle 2: Chemische Gasaufbereitungsverfahren mit Vor- und Nachteilen (Auszüge)

Verfahren	Vorteile	Nachteile
• Cracken	• Kein Anfall von beladenen Reststoffen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ohne Einsatz von Katalysatoren hohe Temperaturen und Drücke erforderlich</li> <li>• Lange Verweilzeiten erforderlich</li> <li>• Unter Einsatz von Katalysatoren Katalysatordeaktivierung</li> </ul>
• Hydrierung	• Kein Anfall von beladenen Reststoffen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzierung des H<sub>2</sub>-Gehaltes im Gas</li> <li>• Koksbildung</li> </ul>
• Dampfreformierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe H<sub>2</sub>-Gehalte im Gas</li> <li>• Kein Anfall von beladenen Reststoffen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Allothermer Prozess</li> <li>• Erhöhte Drücke erforderlich</li> </ul>
• Partielle Oxidation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzung des Energiegehalts der Teere</li> <li>• Autothermer Prozess</li> <li>• Kein Anfall von beladenen Reststoffen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partielle Oxidation von CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub></li> <li>• Ohne Einsatz von Katalysatoren hohe Temperaturen erforderlich</li> <li>• Unter Einsatz von Katalysatoren Katalysatordeaktivierung</li> <li>• Unter Einsatz von Luft Gasverdünnung</li> </ul>

Rein thermische Prozesse (chemische Methoden ohne Katalysator) erfordern in der Regel Temperaturen von über 900°C. Durch den Einsatz von Katalysatoren (chemische Methoden mit Katalysator) beginnen die gewünschten Reaktionen durch die Herabsetzung der Aktivierungsenergie schon bei niedrigeren Temperaturen, so dass eventuell eintretende unerwünschte Zersetzungen der Reaktionspartner ausgeschlossen werden können. Des Weiteren können mit dieser Prozessweise Schwierigkeiten in der Materialwahl für den Apparatebau umgangen werden.

Der Nachteil dieser Verfahren ist zum einen, dass durch den Einsatz von Katalysatoren bzw. die Verwendung hochwertiger Materialien im Apparatebau mit einem enormen Anstieg der Investitionskosten bzw. der Betriebskosten zu rechnen ist.

### 3 Theoretische und experimentelle Untersuchungen

#### 3.1 Zielstellung und Lösungsweg

Es muss die Aufgabe sein, ein Gesamtsystem zur Biomassevergasung zu entwickeln, welches auf unterschiedliche Brennstoffeigenschaften flexibel reagieren kann, eine Verfügbarkeit von wenigstens 6.000 h/a realisiert und wirtschaftlich in der Investition und im Betrieb darstellbar ist. Daher bestehen die Aufgaben, sowohl primärseitig den Vergasungsprozess weiter zu optimieren und auch sekundärseitig die Gasqualität durch geeignete Verfahren zu verbessern. In [6] sind die Bedingungen, welche den Biomassevergasungsanlagen genügen sollen, wie folgt zusammengefasst:

- hohe Verfügbarkeit (> 90 %),
- Einsetzbarkeit eines breiten Brennstoffbandes,
- hohe Wirkungsgrade (elektrisch und Brennstoffausnutzung),
- reduzierte Investitionskosten (2,5 - 3,5 Mio. €/MW<sub>eI</sub>) und
- hohe Umweltverträglichkeit.

### 3.1.1 Primärmaßnahmen

Eine wesentliche Verbesserung der Gasqualität lässt sich durch konsequente Anwendung von **Primärmaßnahmen** im Vergasungsprozess erreichen.

An der Professur Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung steht ein Kombivergaser zur Verfügung, bei dem bereits sehr viele Optimierungsschritte durchgeführt wurden, wobei aber noch entsprechendes Potential besteht.

Der Vergaser stellt eine Kombination von Gegen- und Gleichstromreaktor dar. In den folgenden Ausführungen wird dieser Vergaser mit seinen Funktionseinheiten beschrieben. Detaillierte Ausführungen zu diesem sind in [7] zu finden. In Bild 3 ist der Apparat als Schnittzeichnung dargestellt. Bild 4 zeigt die einzelnen Prozessstufen mit den entsprechenden In- und Outputströmen.

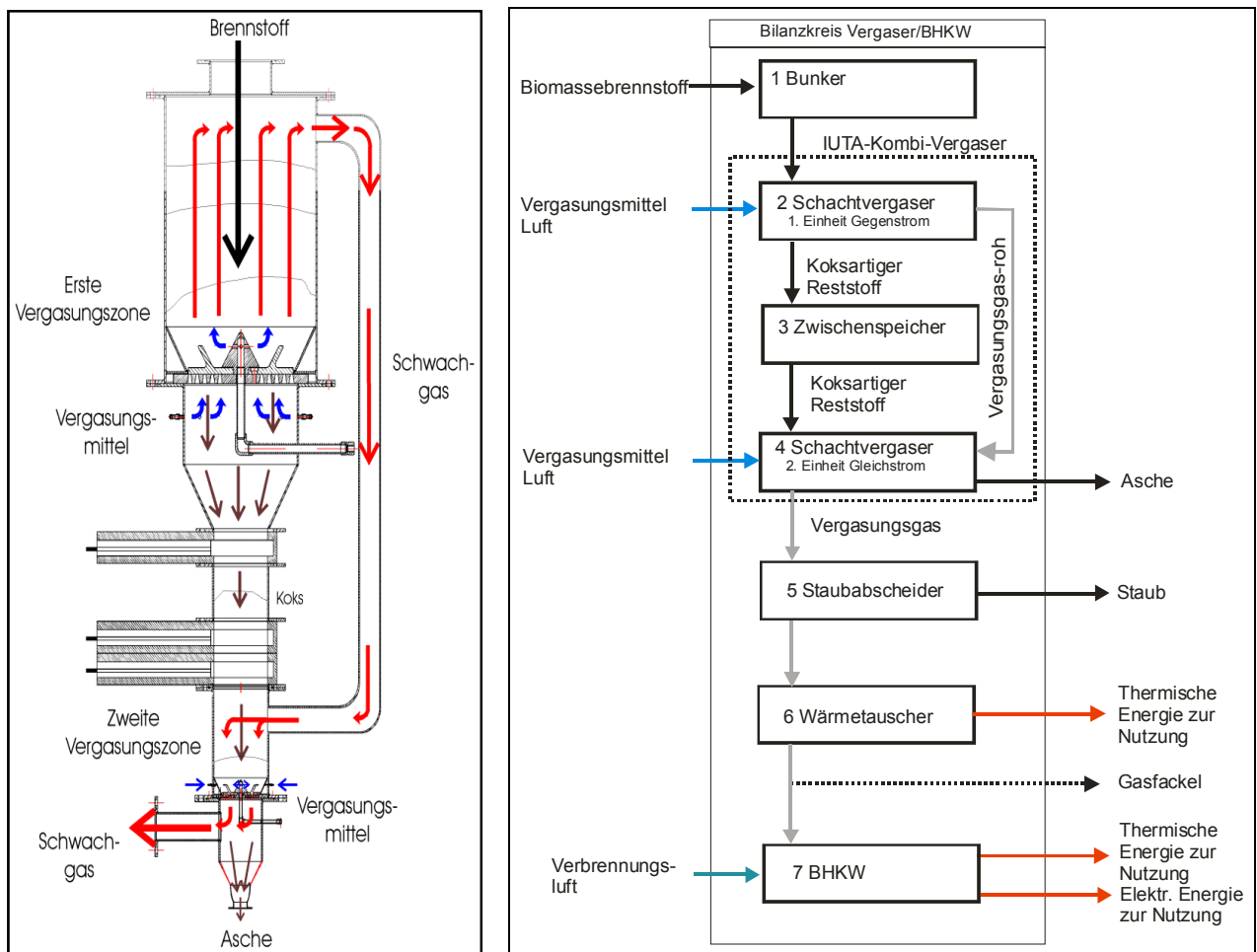


Bild 3: Kombi-Gegen-Gleichstromvergaser Bild 4: Schematische Darstellung des Prozesses

Der Brennstoff wird in den oben liegenden **Gegenstromreaktor**, welcher die erste Stufe des Vergasungsprozesses darstellt über ein Förderband dem Aufgabesystem zugeführt. Am unteren Ende dieser Prozesseinheit befindet sich ein Rost mit einer Rütteleinheit. Die Zufuhr des Vergasungsmittels erfolgt über eine Ringleitung und/oder durch die Rütteleinheit in dem Reaktor. Der Reaktor wird bei einer Temperatur von ca. 750 °C in der Oxidationszone betrieben. Das Produktgas wird am Kopf des Reaktors mit einer Temperatur von ca. 250 °C abgezogen. Der Gegenstromreaktor ist durch ein Doppelpendelklappensystem vom darunter liegenden **Gleichstromreaktor** getrennt, der die zweite Stufe des Kombivergasers bildet. Durch dieses Doppelpendelklappensystem wird der im Gegenstromreaktor entstehende Koks dem

Gleichstromreaktor zugeführt. Das am Kopf des Gegenstromreaktors abgezogene Schwachgas gelangt über die Verbindungsleitung der Anlage als Zyklonströmung in den Gleichstromreaktor. Der Gleichstromreaktor ist ebenfalls mit Rost und Rüttler ausgerüstet. Dem „Koks“ wird im Gleichstromreaktor nochmals Vergasungsmittel zugegeben, so dass sich Temperaturen von 800 bis 900 °C oberhalb des Betts einstellen. Das Schwachgas aus dem Gegenstromreaktor wird durch diese heiße Zone geleitet, wobei die hochmolekularen Kohlenwasserstoffe gecrackt und der Restkohlenstoff im „Koks“ vergast werden. Nach der Crackzone wird das Schwachgas durch die Schwachgasleitung aus dem Reaktor abgezogen. Die durch den zweiten Rost fallende Asche verlässt durch ein Ascheschleusensystem den Reaktor am Boden.

Die zweistufige Verfahrensauslegung erlaubt eine variable Temperaturführung und ist in der Wahl des Vergasungsmittels flexibel. So ist es z.B. möglich, den Gegenstromreaktor (erste Vergasungsstufe) mit Luft zu betreiben und in der zweiten Vergasungsstufe, dem Gleichstromreaktor, Sauerstoff einzusetzen, um einen höheren Wirkungsgrad zu erzielen.

Eine weitere Variationsmöglichkeit besteht beim Verhältnis der Volumenströme an Vergasungsmittel im Gleichstromreaktor und im Gegenstromreaktor, wodurch die Reststoffqualität verschiedener Einsatzmaterialien optimiert werden kann.

So ist es möglich den **Kohlenstoffumsatzgrad** in der ersten Stufe und somit die Menge an Holzkohle für die zweite Vergasungsstufe frei zu wählen. Beim Einleiten des teerreichen Brenngases aus der ersten in die zweite Stufe werden die Teere im Brenngas durch die katalytische Wirkung der Holzkohle gecrackt. Die für die Crackung notwendige Temperatur von ca. 800°C wird über die **Teilvergasung** der Holzkohle realisiert. Über eine Aufteilung der Vergasungsmittelzuführung in primär und sekundär, evtl. auch tertiär in den Gleichstromvergaser wird gewährleistet, dass die Verweilzeit zur Crackung der Teere genügend groß ist, aber auch die Holzkohle am Ende des Prozesses nahezu vollständig umgesetzt ist.

Die gestufte Prozessführung, die apparatetechnische Ausführung und die vorgesehenen Möglichkeiten zur getrennten Steuerung der Haupteinflussgrößen machen das große Potential dieser Technik aus.

Trotz der bisher schon erzielten positiven Ergebnisse im Hinblick auf die Erzeugung eines qualitativ hochwertigen **Brenngases** müssen weitere Anstrengungen zur Erhöhung der Standzeit und der Betriebssicherheit unternommen werden. Daneben besteht noch Potential in der Steigerung des Heizwertes und der Leistung der Anlage.

Die weiterführenden Arbeiten orientieren sich an den nachfolgend dargestellten Zielen:

- Ermittlung der Betriebscharakteristika des Kombivergasers für verschiedene Brennstoffe wie **Holzhackschnittel** und Kompostabsiebung,
- Ausnutzung des Potentials der Parameteroptimierung zur Verbesserung des Betriebsverhaltens des Vergasers,
- Maximierung des **Kaltgaswirkungsgrades** (Mindestanforderung größer 70%),
- Senkung des Teergehaltes im Gas am Vergaseraustritt (**Primärteer**),
- Minderung des Kohlenstoffgehaltes in der Asche, so dass die TA Siedlungsabfall eingehalten wird (sicher unter 5% **Glühverlust**) und
- Nachweis der Dauerbetriebsfähigkeit in einem wissenschaftlich begleiteten und transparenten Dauerversuch.

Um die definierten Ziele zu erreichen, werden zunächst wissenschaftlich-energietechnische Untersuchung sowie Test verschiedener Betriebsregime und Brennstoffe an der Basisanlage erfolgen. Auf den Testversuchen aufbauend werden entsprechend notwendige Umbauten am Vergaser vorgenommen. So erfolgt u.a. über die konstruktive Weiterentwicklung der zweiten



Vergaserstufe eine Effizienzsteigerung über die weitere Verminderung des Kohlenstoffgehaltes im Reststoff und mittels der optimierten örtlichen und mengenmäßigen Vergasungsmittelzugabe wird die Teerabbaurate positiv beeinflusst.

Die Funktionalität des zweistufigen Vergasers mit der Zielstellung der Erzeugung eines nahezu teerfreien Brenngases wird mit einem wissenschaftlich begleiteten und nachvollziehbaren Dauerversuch nachgewiesen.

### 3.1.2 Sekundärmaßnahmen

In Ergänzung zu den Primärmaßnahmen für die Erzeugung eines motortauglichen Brenngases ist eine Brenngasenteerung mittels **Sekundärmaßnahmen** teilweise unabdingbar. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit Verfahren zur Brenngasreinigung weiter zu optimieren und ggf. neu zu entwickeln.

In Bild 5 ist der Vergaser der Versuchsanlage, an der die Untersuchungen zum Teerabbau mittels Sekundärmaßnahmen durchgeführt werden, dargestellt.

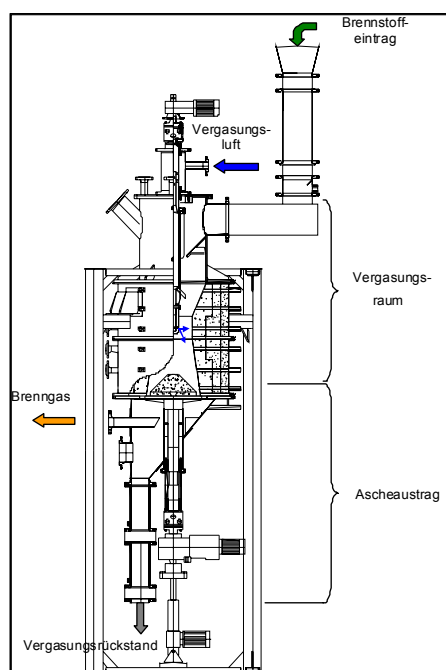


Bild 5: Gleichstromvergasers

Eine Möglichkeit zur Reinigung des Brenngases stellt die partielle Oxidation als Variante der Heißenteerung dar. Die partielle Oxidation an **Metallkatalysatoren** wurde untersucht und weiterentwickelt, wobei sich Palladium und Nickel als katalytisch aktive Komponenten als besonders geeignet erwiesen haben.

Ein Schwerpunkt derzeitiger und zukünftiger Forschungsaktivitäten ist auf die Weiterentwicklung und Optimierung dieses Verfahrens ausgerichtet. Die durchgeführten Tests in einer Versuchsanlage zur Reduzierung und zum Abbau der Teere auf Basis von katalytisch aktiven Komponenten haben gezeigt, dass eine Verringerung der **Teerkonzentration** möglich ist. Die Qualität des aufbereiteten Gases erfüllt jedoch bisher noch nicht die von den Motorenherstellern geforderten Kriterien.

Die Untersuchungen und die erzielten Ergebnisse sind in [8], [9], [10] und [11] ausführlich beschrieben.

Mit den aktuellen Forschungsarbeiten sollen die in den bisherigen Untersuchungen aufgetretenen Nachteile und Unzulänglichkeiten des Verfahrens beseitigt werden. Negative Nebenerscheinung

ist u.a. durch den Einsatz von Luft als Oxidationsmittel zum einen die qualitative Verschlechterung des Gases durch den mit dem Luftstickstoff hervorgerufenen Verdünnungseffekt. Zum anderen bilden sich im Reaktor durch das Einbringen der Luft von außen inhomogene Strömungsverhältnisse in der Gasphase bezogen auf das Volumen des **Katalysatorbettes** aus. Ein weiterer negativer Einfluss bei der Verwendung von Luft und dem Eintrag dieser von außen ist in der Unkontrollierbarkeit der chemischen Reaktionsabläufe mit dem  $O_2$  im System zu sehen.

Basierend auf den bisherigen Erfahrungen wird eine geeignete Kombination von Katalysator und **Sauerstoffspeicher** gesucht. Das zu entwickelnde System soll in der Lage sein, Teere und kondensierbare Kohlenwasserstoffe katalytisch partiell zu oxidieren, wobei der benötigte Sauerstoff für die thermochemischen Reaktionen aus dem System heraus zur Verfügung gestellt wird. D.h., der Katalysator und das **Trägermaterial** müssen neben der eigentlichen Aufgabe der Herabsetzung der **Aktivierungsenergie** den benötigten Sauerstoff, räumlich-, zeitlich- und prozessabhängig gesteuert, bereit stellen. Im Vergleich zu derzeitigen Konzepten muss die Neuentwicklung eine stark verbesserte **Langzeitbeständigkeit** aufweisen und im Verbund damit müssen eine optimale katalytische Wirkung und geeignete Redox- und strömungstechnische Eigenschaften erreicht werden.

Um die Anforderungen hinsichtlich Anpassung und Optimierung der  $O_2$ -Bereitstellung im Prozess erfüllen zu können, wird sich an den aus dem CLC-Prozess (**Chemical Looping Combustion**) gewonnenen Erfahrungen orientiert. In diesem Bereich gibt es eine Vielzahl von Untersuchungen zu Sauerstoffträgermaterialien. Die Besonderheit dieser Materialien ist die Fähigkeit Sauerstoff unter entsprechenden Betriebsbedingungen abzugeben bzw. wieder aufzunehmen.

Aufbauend auf den bereits erzielten Ergebnissen und weiterführender eigener Forschungsaktivitäten hinsichtlich sauerstoffübertragender Katalysatoren soll das Prinzip der CLC auf die partielle Oxidation teerhaltiger Brenngase angewandt und in einer Versuchsanlage getestet und demonstriert werden. In Bild 6 ist der Prozess der katalytisch partiellen Oxidation von teerhaltigen Brenngasen schematisch dargestellt.

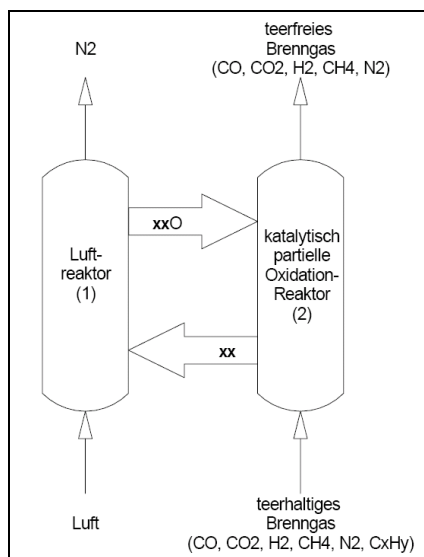


Bild 6: Katalytisch partielle Oxidation teerhaltige Brenngas und Regenerierung des Katalysators

Ein weiterer Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten hinsichtlich sekundärer Maßnahmen zur Brenngasaufbereitung aus Biomassevergasern unter Anwendung der partiellen Oxidation ist die Entwicklung eines Verfahrens ohne Einsatz einer katalytisch aktiven Komponente mit **regenerativer Wärmerückgewinnung**.

Eine Teerzerstörung ohne Katalysatoren erfordert in der Regel hohe Temperaturen. Es sind drei prinzipielle Varianten möglich:

- Erhöhung der Verweilzeit im Vergaser in geeigneten Bereichen,
- Nachgeschalteter Reaktionsraum mit externer Beheizung und
- interne Teilverbrennung, wobei je nach Ausführung die Temperaturerhöhung und der Teerabbau durch Reaktion mit dem zugegebenen Sauerstoff (der Luft) als partielle Oxidation parallel ablaufen.

Nach dem Stand der Erkenntnisse, der zur katalytisch partiellen Oxidation erreicht wurde, verspricht eine Durchführung dieses Gasreinigungsverfahrens ohne Katalysator darüber hinaus weitere Vorteile:

- höhere Robustheit und damit längere Standzeiten (keine **Katalysatoralterung**),
- Eignung für Brenngas, das reich an anderen Schadstoffen ist (keine **Katalysatorvergiftung**),
- Einsparung an Investitionskosten.

Allerdings sind hohe Reaktionstemperaturen von etwa 900°C für die nichtkatalytisch partielle Oxidation erforderlich. Dies führt bei herkömmlichen Verfahren zu einer deutlichen Verschlechterung des Wirkungsgrades bzw. macht aufwändige Reduktionsstufen und **Abwärmenutzungen** erforderlich.

Deshalb soll im geplanten Verfahren die Wärme des heißen Reingases zur regenerativen Rohgasvorwärmung genutzt werden. Durch die regenerative Wärmeübertragung vom Reingas auf das Rohgas wird der wesentliche Teil der Energie für die Erwärmung eingespart. Als Reaktor ist ein vom Brenngas durchströmtes, wärmespeicherndes Festbett vorgesehen. Diese einfache Apparatur ist gleichzeitig regenerativer Wärmeübertrager und Reaktor für die Entteerung. Nach einer Vorheizung zum Anfahren des Prozesses läuft der folgend beschriebene Vorgang ab.

Das Rohgas, dem die für die Entteerung und die Aufrechterhaltung der Betriebstemperatur notwendige Luftmenge zugesetzt wurde, strömt über heißes Bettmaterial. Dabei wird das Rohgas-Luft-Gemisch erhitzt. Nach Überschreiten einer Starttemperatur beginnt die exotherme Entteerung. Dabei werden bei 900 bis 1100°C die Teere abgebaut. Die Wärme des heißen Reingases wird im letzten Teil des Reaktors an das vergleichsweise kalte Bettmaterial abgegeben. Durch die Wirkung des Regenerators ist eine Abkühlung bis auf wenige Grad oberhalb der Rohgastemperatur möglich. Durch den ständigen Wärmeentzug im ersten Teil des Reaktors und die Wärmeabgabe im letzten Teil wandern die Temperaturzonen entlang des Reaktors. Nach einer Betriebsperiode muss die Strömungsrichtung umgekehrt werden, dann beginnt der Prozess von vorn. Dieses Verfahren wurde bereits in [11] beschrieben.

## 3.2 Versuchs- und Betriebsergebnisse

### 3.2.1 Primärmaßnahmen

Bisherige Untersuchungen haben die prinzipielle Möglichkeit aufgezeigt, mit verschiedenen Biomassebrennstoffen eine motortaugliche Gasqualität und einen hohen Ausbrandgrad (niedriger Glühverlust) der Asche zu erreichen.

Der Vergaser verspricht folgende Vorteile gegenüber dem Stand der Technik:

- einfacherer und damit robusterer Aufbau als bei anderen Mehrstufenvergasern,
- geringe Störanfälligkeit durch Gegenstromvergasen als erste Stufe,
- damit auch höhere Brennstoffflexibilität, insbesondere bezüglich schlechteren Holzqualitäten und variablen Korngrößen,
- geringer Teergehalt im Rohgas durch zweite Stufe und

- kohlenstoffarmer Reststoff, Einhaltung der TA Siedlungsabfall.

Die Konzeption des Vergasungsapparates, nämlich der Kopplung eines Gegenstromreaktors mit einem Gleichstromreaktor ermöglicht die Nutzung der Vorteile des jeweiligen Verfahrens. Durch den speziellen Prozessaufbau und der damit gewährleisteten thermischen Crackung des Gases aus der ersten Stufe im Gleichstromvergaser, kann die Teerbelastung stark vermindert werden.

Der Input des Gleichstromvergasers besteht bereits aus zwei homogenisierten Stoffströmen, dem Schwachgasstrom und der festen organische Substanz, die schon teilweise zersetzt ist. Im Vergleich zu einem einstufigen Prozess ist der Reaktorbetrieb gleichmäßiger und der Wirkungsgrad der thermischen Zersetzung höher.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden die Betriebsbedingungen ermittelt, unter denen ein praktisch von hochmolekularen Kohlenwasserstoffen freies Produktgas erzeugt werden kann. Der Nachweis eines langzeitstabilen Betriebes eines Verbrennungsmotors mit dem Gas steht noch aus.

In [13] werden die Ergebnisse der bisher durchgeführten Untersuchungen detailliert beschrieben.

Um die unter Abschnitt 3.1.1 definierten Ziele der Optimierung des Vergasungsprozesses in Bezug auf den Teerabbau im Brenngas durch Primärmaßnahmen und die Effizienzsteigerung zu erreichen, werden die notwendigen Voraussetzung zur Realisierung im Rahmen eines durch die Sächsische Aufbaubank gemeinsam mit einem Industriepartner geförderten Projektes geschaffen, die Anlagen- und Betriebskonzeption erarbeitet und in die Praxis umgesetzt.

### 3.2.2 Sekundärmaßnahmen

#### Katalytisch partielle Oxidation

Im Rahmen eines durch die AiF geförderten Forschungsprojektes wurde dieses Verfahren eingehend untersucht. Die in [9], [10] und [11] dargestellten Ergebnisse belegen, dass die katalytisch partielle Oxidation prozesstechnisch einen Lösungsansatz bietet, um die Konzentration an Kohlenwasserstoffen unter Ausnutzung ihres eigenen Energiegehalts zu minimieren.

Durch eine der partiellen Oxidation nachgeschaltete **Gaskühlung** in einer stationären **Wirbelschicht** lässt sich der Teergehalt im Brenngas durch Kondensation an dem Bettmaterial (Holzkohle) weiter reduzieren. Das hier angewandte Konzept und die im Rahmen eines durch die SAB geförderten Projektes in Experimenten gewonnenen Ergebnisse werden in [11] und [14] detailliert beschrieben.

Es wird aber auch festgestellt, dass durch den Einsatz von Luft als Oxidationsmittel ein hoher Anteil an Stickstoff im gereinigten Brenngas enthalten ist und somit der Gasheizwert wesentlich verringert wird. Zum anderen kommt es zu inhomogenen Strömungsverhältnissen in der Gasphase des Reaktors, insbesondere bezüglich der Durchströmung des Katalysatorbettes. Das führt auch zu **Reaktionsbedingungen**, welche in einem bestimmten Maß willkürlich ablaufen. Dadurch können **Gasqualität** und Energieinhalt nicht zielgerichtet beeinflusst werden.

Um die sich negativ auf den Prozess auswirkenden Reaktionsbedingungen zu beseitigen bzw. zu minimieren, wird der Ansatz des Einsatzes eines Oxidationskatalysators verfolgt.

Da wie oben erwähnt die O<sub>2</sub>-Abgabe und -Aufnahme der unterschiedlichen O<sub>2</sub>-Speichermaterialien (Oxidationskatalysatoren) von der Temperatur und vom O<sub>2</sub>-Partialdruck abhängig ist, muss der Wärmeübergang zwischen der gasförmigen Phase in Form des teerhaltigen Brenngases und der festen Phase, dem Katalysator-Sauerstoffträgersystem, berücksichtigt werden.

Die Lösung der instationären Wärmeleitprobleme erfolgte auf Grundlage eines impliziten Differenzenverfahrens. Da die Anwendung des Differenzenverfahrens für komplizierte

Geometrien weniger geeignet ist, wird für die ersten Berechnungen der Festkörper als Platte angenommen. In Bild 7 sind die Temperaturprofile unter der Annahme von Randbedingungen, welche den realen Bedingungen des Prozesses entsprechen, zu unterschiedlichen Zeitpunkten graphisch aufgetragen.

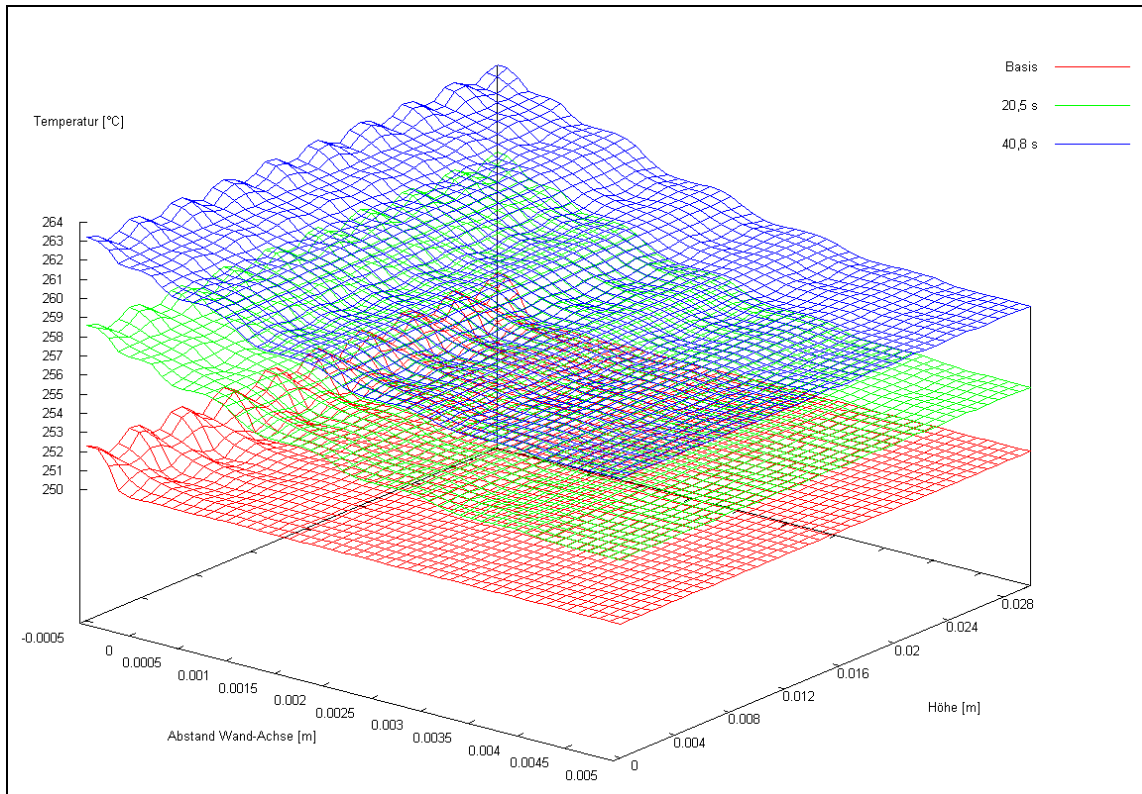


Bild 7.1: Temperaturprofile im Katalysator-Sauerstoffträgersystem am Beginn der Aufheizphase

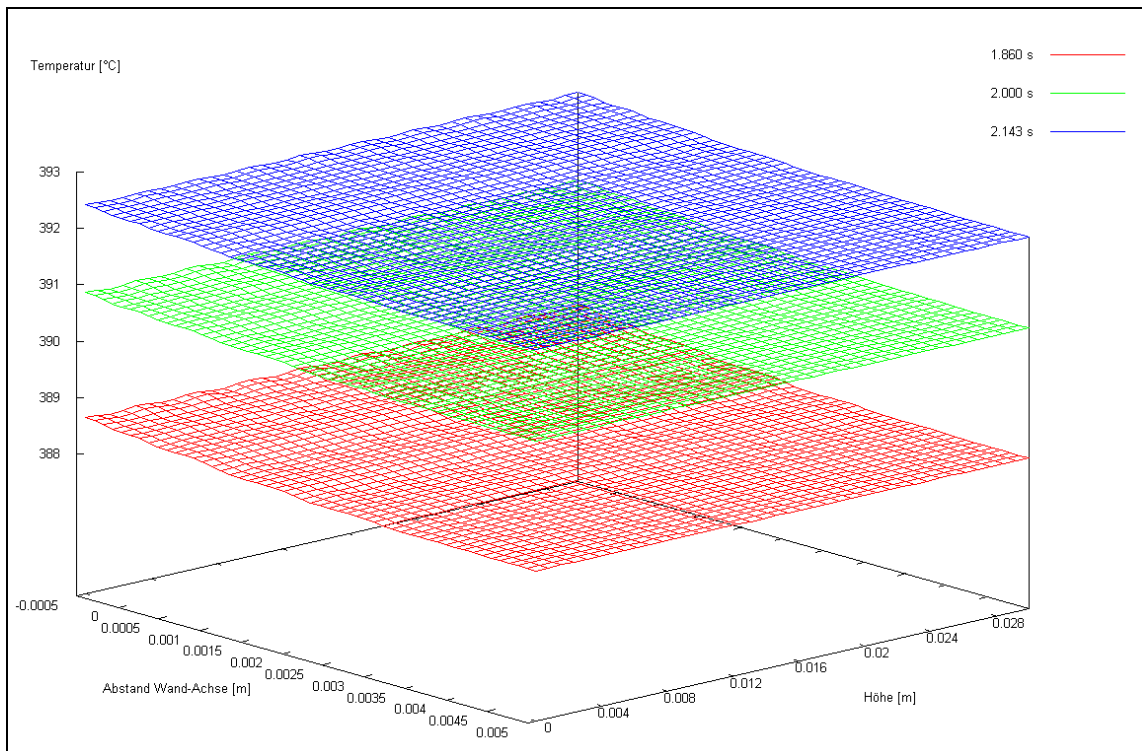


Bild 7.2: Temperaturprofile im Katalysator-Sauerstoffträgersystem zum Ende der Aufheizphase

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen zunächst, dass in einer Zeit von 30 Minuten das Feststoffsystem bis zum Kern mit dem ständig nachströmenden Brenngas vom Ausgangszustand auf das Temperaturniveau durchgewärmt ist, welches für den O<sub>2</sub>-Ausbau erforderlich ist. An dieser Stelle ist noch nicht die Temperaturveränderung im Gesamtsystem betrachtet, welche sich durch die exothermen Reaktionen des austretenden Sauerstoffs mit der gasförmigen Phase einstellt. Der Temperaturgradient über der Zeit wird sich dann deutlich vergrößern.

Um die Reaktionen mit dem im Katalysator-Sauerstoffträgersystem eingelagerten Sauerstoff mit den im Brenngas vorhandenen Teerbestandteilen örtlich und zeitlich im oben dargestellten Modell integrieren zu können, wurde auf Basis der Energiebilanzen und reaktionskinetischen Untersuchungen eine Grobdimensionierung des Systems vorgenommen. Mit der Festlegung eines Sauerstoffspeichermaterials und den damit definierten Material- und Reaktionseigenschaften werden die in Bild 8 dargestellten Parameter ermittelt.

<b>Partialoxidation Teer</b>			
Molvolumen		[l/mol]	24,79
<b>Verfahrensdaten</b>			
Durchsatz	Q <sub>BG</sub>	[Nm <sup>3</sup> /h]	35,0
		[Nm <sup>3</sup> /s]	0,0097
Raumgeschwindigkeit	v <sub>R</sub>	[l/h]	1250
Reaktorvolumen	V <sub>Kat</sub>	[m <sup>3</sup> ]	0,028
Durchmesser Reaktor	Ø <sub>Reaktor</sub>	[mm]	260,4
Querschnitt Reaktor	A	[m <sup>2</sup> ]	0,053
Gasgeschwindigkeit (Leerrohr)	v <sub>Gas</sub> (Leerrohr)	[m/s]	0,183
O <sub>2</sub> -Partialdruck Eintritt	p <sub>O2</sub> (ein)	[bar]	1,00E-05
O <sub>2</sub> -Partialdruck Austritt	p <sub>O2</sub> (aus)	[bar]	0,0141
Temperatur Eintritt	T (ein)	[°C]	600
Temperatur Austritt	T (aus)	[°C]	50
Reaktionsenthalpie pro mol O <sub>2</sub>	Δ <sub>R</sub> H	[kJ/mol O <sub>2</sub> ]	-295,9
O <sub>2</sub> -Bedarf	Q <sub>O2</sub>	[Nm <sup>3</sup> /h]	0,4935
		[Nm <sup>3</sup> /s]	0,000137
		[Nm/min]	8,225
<b>O<sub>2</sub>-Speichermaterial CSFM5555</b>			
Speicherkapazität	κ <sub>O2</sub>	[Ni O <sub>2</sub> /kg]	4,5
Reindichte	ρ	[g/cm <sup>3</sup> ]	4,95
Schüttdichte	ρ <sub>Schüttung</sub>	[g/cm <sup>3</sup> ]	3,8
O <sub>2</sub> -Speichermasse pro Laufzeit	m <sub>O2-Speicher</sub> pro Laufzeit	[kg/min]	1,828
O <sub>2</sub> -Speichervolumen pro Laufzeit	V <sub>O2-Speicher</sub> pro Laufzeit	[l/min]	0,481
<b>Reaktor</b>			
Laufzeit-Soll	t <sub>Soll</sub>	[min]	30,0
O <sub>2</sub> -Speichermasse	m <sub>O2-Speicher</sub>	[kg]	54,8
O <sub>2</sub> -Speichervolumen	V <sub>O2-Speicher</sub>	[l]	14,4
		[m <sup>3</sup> ]	0,014
Reaktorlänge	l <sub>Reaktor</sub>	[mm]	271

Bild 8: Grobdimensionierung des Katalysator-Sauerstoffträgersystems

Parallel zu den bisherigen Arbeiten wurden unabhängig von dem zuvor dargestellten Modell zur Untersuchung der Wärmeleitung, Berechnungen zur O<sub>2</sub>-Freisetzung aus dem Sauerstoffträgermaterial mittels FEM-Berechnungen durchgeführt.

Diese Rechnungen berücksichtigen ebenfalls noch nicht die chemischen Reaktionen des austretenden Sauerstoffs mit der gasförmigen Phase (Teere, CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>). Es ist zu erwarten, dass durch die thermochemische Umsetzung des Sauerstoffs im Gas eine Veränderung des Partialdruckes eintritt, der sich wiederum auf die Geschwindigkeit des Sauerstoffausbaus auswirkt.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen geben zunächst einen Aufschluss über die zeitlichen, räumlichen, stofflichen, thermodynamischen, energetischen und chemischen Gegebenheiten in dem hier doch sehr komplexen System.

Folgend besteht die Aufgabe die bisher aufgestellten Modelle mit allen in der praktischen Anwendung relevanten Randbedingungen (Betriebsbedingungen, Phasenänderungen, chemischen Reaktionen, thermodynamische Veränderungen, Stoffaustausch) zu erweitern und zu optimieren. Herausforderung ist die Entwicklung eines Modells, das alle angesprochenen Parameter integriert. Dieses Gesamtmodell wird mit Hilfe der experimentellen Untersuchungen im Labor- und Technikumsmaßstab validiert.

#### Nichtkatalytisch partielle Oxidation

Für die nichtkatalytisch partielle Oxidation mit regenerativer Wärmenutzung wurden umfangreiche theoretische Vorbetrachtungen durchgeführt.

Die Schwerpunkte dieser theoretischen Voruntersuchungen sind im Folgenden aufgeführt:

- mathematische Modellierung unter Berücksichtigung der Aspekte der Wärmeübertragung zwischen Gas und Schüttung und Temperaturentwicklungen durch chemische Reaktionen in den entsprechenden Zonen,
- Ermittlung der Abhängigkeit von Maximaltemperatur,
- Abhängigkeit der Gastemperatur am Austritt und des chemischen Wirkungsgrades von der Zeit,
- Abhängigkeit von der Rohgaszusammensetzung, der Luftzugabe und den Schaltzyklen,
- Ermittlung eines optimalen Betriebsregimes in Abhängigkeit der Rohgaszusammensetzung,
- Untersetzung mit am Versuchsvergaser und am Versuchsstand zur partiellen Oxidation gewonnenen Daten,
- Abschätzung des erreichbaren Reingasteergehaltes,
- Verfahrensbewertung und
- erste Aussagen zur Gestaltung eines Entteerungsreaktors.

Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse kann in diesem Beitrag nicht erfolgen. In [11] sind die Wesentlichsten beschrieben.

## **4 Zusammenfassung**

Die Vergasungstechnologie stellt eine etablierte Methode für die energetische Nutzung von Biomasse dar. Für die Nutzenergieerzeugung aus fester Biomasse im dezentralen Anwendungsbereich bietet die Vergasungstechnologie eine Reihe von Vorteilen. Besonders interessant sind dabei Anlagen mit bis zu einem oder wenigen MW thermischer Leistung, da

- in diesem Leistungsbereich die Kraftwärmekopplung besonders einfach ist, da eine Vielzahl von Objekten mit ganzjährigem oder saisonalem Wärmebedarf in diesem Leistungsbereich existiert,
- diese Anlagen bei kleinen Betreibern zum Einsatz kommen können, die Selbstversorger mit dem Brennstoff sind und
- in diesem Leistungsbereich die Wirkungsgrade gegenüber anderer Prozesse zur Strom- und Wärmeerzeugung hoch sind.

Das Entwicklungspotential von Biomassevergasern ist nicht ausgeschöpft, um die Aufgabe einer dezentralen Energieversorgung stabil zu realisieren. Ausschlaggebend für einen störungsfreien

und effizienten Betrieb eines Blockheizkraftwerkes unter vertretbaren Standzeiten sind die Beladung des Gases mit Verunreinigungen und der chemische Energiegehalt.

Vor einer breiten Umsetzung der Vergasungstechnik sind insbesondere zwei offene Fragen zu klären:

- die Bereitstellung eines betriebssicheren, kostengünstigen Vergasers für den interessanten Leistungsbereich bis 1 MW (einige wenige MW) thermische Leistung und
- die Gasreinigung, insbesondere die Entteerung.

Diese Probleme sollen zum einen durch die Weiterentwicklung eines mehrstufigen Vergasers und die Entwicklung und Optimierung von Brenngasreinigungstechniken gelöst werden. Dieser Beitrag beschäftigt sich im Wesentlichen mit dem Aspekt der Brenngasqualität, speziell der Teerproblematik und der Möglichkeiten zum Teerabbau für die Erzeugung eines qualitativ für den Einsatz im Verbrennungsmotor genügenden Brenngases.

Folgende Produktparameter sollen vom Gesamtsystem Vergaser – Gasaufbereitung erreicht werden:

- Stabiler Vergaserdauerbetrieb mit Holzhackschnitzeln,
- Kaltgaswirkungsgrad des Vergasers größer gleich 70%,
- Restteergehalt nach Entteerung stabil kleiner 50 mg/Nm<sup>3</sup>,
- Heizwert nach Entteerung größer gleich 3,5 MJ/Nm<sup>3</sup>,
- geringe Wirkungsgradminderung durch Entteerung und
- Stabiler Betrieb der Gesamtanlagentechnik.

Zur Darstellung des erfolgreichen Betriebes der optimierten und neu entwickelten Komponenten werden spezifische Untersuchungen zur BHKW-Fähigkeit des erzeugten Brenngases in einer Kompaktanlage durchgeführt. Dafür wird die Anlagentechnik mit einer Gaskühlstufe, einem BHKW und der erforderlichen Mess- und Regeltechnik komplettiert

### Primärmaßnahmen

Bei einstufigen Festbettvergasern treten Schwierigkeiten bei der direkten Nutzung des entstehenden Schwachgases auf. Das maßgebliche Problem ist der hohe Gehalt an hochmolekularen organischen Verbindungen im Schwachgas.

Das Ziel der Forschungsaktivitäten ist die Weiterentwicklung und Optimierung eines Vergasungsverfahrens, in dem die Prinzipien der Gegenstrom- und Gleichstromvergasung kombiniert sind (Kombi-Gegen-Gleichstrom-Vergaser). Mit dieser Apparatekonzeption gelingt es die jeweiligen Stärken beider Verfahren zu nutzen und ein Produktgas zu erzeugen, welches für eine direkte motorische Nutzung ohne aufwendige Gasreinigung geeignet ist.

Die Vorteile der Anwendung einer solch kombinierten Technik erlaubt eine variable Prozessführung hinsichtlich der Umsatzraten an Biomasse (Kohlenstoff) zu Brenngas. Durch die gestufte und jeweils flexibel einzustellende Vergasungsmittelzugabe gelingt es in die Teilreaktionen beim Vergasungsprozess zielgerichtet einzugreifen. Es können durch die Anwesenheit von Kohlenstoff in der zweiten Stufe die Crackreaktion der Teere realisiert werden und durch die gestufte Vergasungsmittelzugabe die Kontaktzeit zwischen Holzkohle und Brenngas und die vollständige Umsetzung des Kohlenstoffs gesteuert werden.

Die Anwendung dieser Verfahrenstechnik ist in Bezug auf die Erzeugung eines nahezu teerfreien Brenngases zur Nutzung in einem Verbrennungsmotor erfolgversprechend. Zur Erfüllung dieser Aufgabe ist eine zielorientierte Weiterentwicklung und Optimierung des Kombi-Gegen-Gleichstrom-Vergasers unerlässlich.



### Sekundärmaßnahmen

Als Ergänzung zur Verfahrens- und Anlagenoptimierung ist jedoch für alle kleineren Vergaser eine Brenngasenteerung erforderlich. Eine Möglichkeit zur Reinigung des Brenngases ist die partielle Oxidation.

Die zu entwickelnde Technik soll für alle Vergaser, die Teermengen zwischen 0,5 und 50 g/m<sup>3</sup> produzieren, wie Gleichstrom und Wirbelschichtvergaser, direkt einsetzbar sein. Für Gegenstromvergaser und Pyrolyseanlagen, die wesentlich teerreicher Gas erzeugen (>100 g/m<sup>3</sup>) wird die partielle Oxidation nach Modifikationen, etwa dem Einfügen einer Grobreinigung, anwendbar sein.

Bei der Anwendung der partiellen Oxidation für den Teerabbau in Brenngasen aus der Biomassevergasung als Sekundärmaßnahme stehen zwei Varianten im Fokus der Entwicklungsarbeiten: Katalytisch partielle Oxidation – nichtkatalytisch partielle Oxidation.

Beide Entwicklungen bauen auf den Erfahrungen zu den durchgeführten Untersuchungen zur katalytisch unterstützten Partialoxidation unter Einsatz von metallischen Materialien als katalytisch aktive Komponenten auf. Es stellten sich einige Nachteile heraus, welche es durch die Weiterentwicklung und Optimierung des Verfahrens zu beseitigen gilt.

Für die Anwendung eines Katalysators zur Unterstützung der Oxidationsvorgänge wird die Lösung der Unzulänglichkeiten in Gasqualität und Betrieb in der Anpassung und Optimierung der O<sub>2</sub>-Bereitstellung im Prozess gesehen. Es wird eine geeignete Kombination von Katalysator und Sauerstoffspeicher gesucht, welches in der Lage ist, die Teere partiell zu oxidieren, wobei der benötigte Sauerstoff durch keramischen Träger bereitgestellt wird.

Mit den bisher in den theoretischen Untersuchungen gewonnenen Ergebnissen kann nachgewiesen werden, dass der dargestellte Lösungsweg auf Basis der Erfahrungen im CLC-Prozess hinsichtlich der eingesetzten Materialsysteme vor dem Hintergrund der Anpassung und Optimierung auf den speziellen Anwendungsfall der Brenngasreinigung zum Gelingen des Projektes führt. Der in der Konzeption vorgeschlagene Weg, welcher im Ergebnis die Darstellung und den Betrieb einer Aufbereitungstechnik für Brenngase aus der Biomassevergasung zulässt, stellt sich zum heutigen Zeitpunkt als zielführend dar.

Aufschluss darüber geben im Speziellen die Ergebnisse der Masse- und Energiebilanzierung, einschl. Gleichgewichtsbetrachtungen und reaktionskinetische Untersuchungen, die der Berechnung der Wärmeleitprobleme im System Gasphase – Katalysator-Sauerstoffträger-System und die der Ermittlung der räumlichen und zeitlichen Prozessabläufe des O<sub>2</sub>-Aus- und Einbaus der festen Phase unter Berücksichtigung der entsprechenden Randbedingungen.

Die mit dem Modell ermittelten Prozess- und Betriebskennwerte müssen mittels Laboruntersuchungen und Tests an der Vergasungsversuchsanlage validiert werden.

Durch den Verzicht auf einen Katalysator im Prozess der partiellen Oxidation ergeben sich gewisse Vorteile gegenüber der Variante mit katalytisch aktiver Komponenten, u.a. höhere Robustheit und damit längere Standzeiten (keine Katalysatoralterung) und Eignung für Brenngas, das reich an anderen Schadstoffen ist (keine Katalysatorvergiftung).

Allerdings sind hohe Reaktionstemperaturen von etwa 900°C für die nichtkatalytisch partielle Oxidation erforderlich. Dies führt bei herkömmlichen Verfahren zu einer deutlichen Verschlechterung des Wirkungsgrades bzw. macht aufwändige Reduktionsstufen und Abwärmenutzungen erforderlich. Aus diesem Grund wird mit dieser Entwicklungslinie die Anwendung der regenerativen Wärmerückgewinnung angestrebt. Die Berechnungen haben ergeben, dass die bei den exothermen Reaktionen der partiellen Oxidation der Teere gebildete Wärme ausreicht, um die Temperaturen von ca. 900°C im System zu erreichen. Die gewonnenen Ergebnisse müssen noch in Experimenten validiert werden. Unter diesen Voraussetzungen aber

hebt sich dieses Verfahren hinsichtlich der Gasqualität bezogen auf den chemischen Energiegehalt deutlich positiv von dem Prozess mit Katalysator unter den derzeitigen Verfahrensvoraussetzungen ab. Zum Erreichen des dort benötigten Temperaturniveaus, was zwar deutlich unter 900°C liegt, müssen ca. 10 % des Gases bezogen auf dessen Heizwert mit Sauerstoff umgesetzt werden. Doch auch hier besteht die Möglichkeit bzw. Notwendigkeit einer entsprechenden Abwärmenutzung, um den Prozess energetisch optimal zu gestalten.

Der Stand der bisher in den untersuchten Verfahren und Verfahrenskombinationen, wie o.g., gewonnenen Erkenntnisse lässt den Schluss zu, dass eine Weiterführung dieser Entwicklungsrichtungen Erfolg versprechend ist.

## 5 Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen folgender Förderprojekte durchgeführt.

- Verbundvorhaben „Entwicklung und Erprobung der katalytisch spaltenden Hydrierung und der katalytisch partiellen Oxidation“; gefördert durch AiF/VEU; FZ: 14398 BG (Laufzeit: 05/2005 bis 12/2007)
- Verbundvorhaben „Brenngasaufbereitung für Biomassevergaser kleiner und mittlerer Leistung“; gefördert durch die Sächsische Aufbaubank; FZ: 12064/1868 (Laufzeit: 12/2006 bis 01/2008)
- Verbundvorhaben „Entwicklung einer Anlage zur Erzeugung eines hochwertigen Brenngases“; gefördert durch die Sächsische Aufbaubank; FZ: 13080/2204 (seit 04/2009)
- „Entwicklung und Erprobung eines kombinierten Katalysator- und Sauerstoffträgersystems zur Aufbereitung teerhaltiger Brenngase aus der Biomassevergasung mittels der partiellen Oxidation“; gefördert durch die Friedrich-und-Elisabeth-Boysen-Stiftung; FZ: Kz. BOY08-Nr.58 (seit 04/2009)
- Verbundvorhaben „Entwicklung und Erprobung eines kombinierten Katalysator- und Sauerstoffträgersystems zur Aufbereitung teerhaltiger Brenngase aus der Biomassevergasung mittels der partiellen Oxidation“; gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt; FZ: 27087 (seit 09/2009)

Für die finanzielle Unterstützung bedanken wir uns recht herzlich.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Beckmann, M.; Pohl, M.; Ncube, S.: Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen hinsichtlich brennstofftechnischer Eigenschaften. Energie aus Abfall – Band 3. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, ISBN 978-3-935317-30-6 S. 203 – 218. Tagung Berlin 24.09. – 25.09.2007
- [2] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe [Hrsg.] Analyse und Evaluierung der thermochemischen Vergasung von Biomasse. Landwirtschaftsverlag Münster 2006
- [3] Steinbrecher, N.; Walter, J.: Marktübersicht dezentrale Holzvergasung: Marktanalyse 2000 für Holzvergasersysteme bis 5 MW. Erstellt für das Ökoinstitut. Darmstadt 2001
- [4] Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse; Untersuchung im Auftrag von BGW und DVGW; Band 3: Biomassevergasung, Technologien und Kosten der Gasaufbereitung und Potenziale der Biogaseinspeisung in Deutschland; August 2005
- [5] Arbeitsbericht der Projektgemeinschaft Biomassevergasung; Hersteller und Marktbetrachtung der thermochemischen Umwandlung von Biomasse; gefördert durch die Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe

- [6] Vogel, A.; Hofbauer, H.: Dezentrale Vergasung biogener Festbrennstoffe: Herausforderungen und Perspektiven, Internationale Tagung Thermo-chemische Biomasse-Vergasung für eine effiziente Strom-/Kraftstoffbereitstellung-Erkenntnisstand 2007, Leipzig 27.-28.02.2007
- [7] Schmidt K. G., Erich E.: Patentschrift DE 197 18 184 C2 Institut für Energie und Umwelttechnik, Duisburg, 1997
- [8] Klemm, M.: Heißentteerung von Brenngas aus der Vergasung von Biomasse durch katalytische partielle Oxidation; Fortschritt-Berichte VDI; Reihe 6; Nr. 525; VDI Verlag 2005
- [9] Böhning, D.; Klemm, M.: Katalytische Gasaufbereitung von Brenngas aus der Biomassevergasung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg): Energie aus Abfall, Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 510-540
- [10] Abschlussbericht „Entwicklung und Erprobung der katalytisch spaltenden Hydrierung und der katalytisch partiellen Oxidation zur Aufbereitung teerhaltiger Brenngase aus der Biomassevergasung“, AiF-gefördertes Vorhaben; 2007
- [11] Böhning, D.; Klemm, M.; Beckmann, M.: Teerreduzierung im Vergasungsgas aus Biomasse durch katalytisch und nichtkatalytisch partielle Oxidation. Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz – Ersatzbrennstoffe, Biomassen und Biogas; 25./26.09.2008 Berlin
- [12] Epple, B.: CCS-CO<sub>2</sub> Capture & Storage – Optimierter Klimaschutz durch CO<sub>2</sub>-Abscheidung. 1. Darmstädter Energie-Konferenz – Energie und Klima; 18. April 2008
- [13] Abschlußbericht „Entwicklung eines Festbettvergasers mit kombinierter Gleichstrom- / Gegenstromführung zur energetischen Nutzung von Biomasse“, AiF-Vorhaben 11755 N
- [14] Schlussbericht 19/02-08 (1); Biogaserzeuger mit Thermostufe – Brenngasaufbereitung für Biomassevergaser kleiner und mittlerer Leistung; Projekt gefördert durch die Sächsische Aufbaubank – Abteilung Technologieförderung; 2008