

# Vergasung von getrocknetem Klärschlamm und aufbereitetem Restmüll

Projekt-Nr.: 3806  
Auftraggeber: VER / SAB  
Bearbeitungsstand: 05 12 2000

---

**VER** Verfahrensingenieure GmbH  
Breitscheidstr. 78  
01237 Dresden

---

## Inhalt

|       |                                                                                         |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Aufgabenstellung .....                                                                  | 4  |
| 2     | Technikumanlage als Voraussetzung zur Durchführung des Vorhabens.....                   | 5  |
| 2.1   | Vergasungsapparat.....                                                                  | 5  |
| 2.2   | Wärmeübertrager .....                                                                   | 7  |
| 2.3   | Rauchgasreinigung .....                                                                 | 7  |
| 3     | Planung und Ablauf des Vorhabens.....                                                   | 8  |
| 4     | Wissenschaftlich-technischer Stand zu Beginn des Vorhabens.....                         | 12 |
| 4.1   | Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte.....                                | 12 |
| 4.2   | Fachliteratur .....                                                                     | 14 |
| 5     | Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....                                                | 15 |
| 6     | Darstellung der Ergebnisse.....                                                         | 15 |
| 6.1   | Technische Optimierung der vorhandenen Vergasereinheit .....                            | 15 |
| 6.2   | Beschaffung und Installation von Analysentechnik .....                                  | 16 |
| 6.3   | Vergasungsversuche mit Holz als Brennstoff.....                                         | 16 |
| 6.4   | Technologische Anpassung .....                                                          | 16 |
| 6.4.1 | Primärmaßnahmen zur NO <sub>x</sub> -Reduzierung bei der Vergasung von Klärschlamm..... | 16 |
| 6.4.2 | Versuche zur Brenngasaufbereitung mittels PCR-Brenngaswäsche .....                      | 19 |
| 6.4.3 | Konzeption, Projektierung einer Brenngasreinigung mit Dieselwäscher .                   | 23 |
| 6.5   | Vergasungsversuche mit getrockneten Schlämmen .....                                     | 29 |
| 6.5.1 | Klärschlamm .....                                                                       | 29 |
| 6.6   | Vergasungsversuche mit aufbereitetem Restmüll .....                                     | 31 |
| 6.6.1 | Mechanisch-Biologisches-Stabilat (MBS) .....                                            | 31 |
| 6.6.2 | Contec-Stabilat .....                                                                   | 33 |
| 6.7   | Auslegungsversuche.....                                                                 | 44 |
| 6.7.1 | Vergleich von Versuchsergebnissen mit chemisch-thermodynamischer Modellierung.....      | 44 |
| 6.7.2 | Projektierung und Konstruktion der Vergasungsanlage VA 200 .....                        | 45 |
| 6.7.3 | Konzeption für einen 1 MW-Vergaserbaustein.....                                         | 46 |
| 7     | Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit.....                                        | 49 |
| 7.1   | Technische Optimierung der vorhandenen Vergasereinheit .....                            | 49 |
| 7.2   | Beschaffung und Installation von Analysentechnik .....                                  | 49 |
| 7.3   | Technologische Anpassung .....                                                          | 49 |

---

|     |                                                                  |    |
|-----|------------------------------------------------------------------|----|
| 7.4 | Vergasungsversuche mit aufbereitetem Restmüll .....              | 49 |
| 7.5 | Auslegungsversuche .....                                         | 49 |
| 8   | Bekannte Fortschritte auf diesem Gebiet an anderen Stellen ..... | 50 |
| 9   | Veröffentlichungen .....                                         | 50 |
| 9.1 | Vorträge .....                                                   | 50 |
| 9.2 | Publikationen.....                                               | 50 |
| 9.3 | Sonstige Veröffentlichungen .....                                | 51 |
| 10  | Quellenverzeichnis.....                                          | 52 |

## Anlagen

## **1 Aufgabenstellung**

Die Versuche zur Vergasung von getrocknetem Klärschlamm und aufbereitetem Restmüll dienen der Weiterentwicklung des LQV-Verfahrens (Luft-Querstrom-Vergasung) der VER zur energetischen Verwertung nicht mehr nutzbarer Abfälle.

Bei diesen Versuchen werden die Einsatzstoffe mit Luft unterstöchiometrisch umgesetzt, wobei ein Brenngas mit Kohlenmonoxid und Wasserstoff als den wesentlichen brennbaren Komponenten entsteht. Dieses Schwachgas kann energetisch in einer Feuerung oder in einem Gasmotor genutzt werden.

Das Vorhaben umfaßt folgende Arbeitsschritte:

1. *Technische Optimierung der vorhandnen Vergasereinheit:*  
Konstruktive Optimierung der Technikumanlage einschl. Realisierung auf Grundlage bisher durchgeführter Versuche zur Verbesserung der Betriebsstabilität und der Brenngasqualität
2. *Beschaffung und Installation von Analysentechnik:*  
Analystechnik zur Messung der Rauchgaskomponenten nach Verbrennung des Brenngases wird zur Optimierung des Betriebes und zur Einhaltung der Grenzwerte entsprechend 17. BImSchV benötigt.  
Bestimmung von Komponenten im Brenngas.
3. *Vergasungsversuche mit Holz als Brennstoff:*  
Test von Komponenten der Technikumanlage, wie Rauchgasreinigung, Meßtechnik, optimierte Teile der Vergasereinheit.
4. *Technologische Anpassung:*  
Technische Änderungen am Verbrennungssystem und der Rauchgasreinigung auf Grundlage von Emissionsmessungen, gegebenenfalls Maßnahmen zur Reinigung des Brenngases.
5. *Vergasungsversuche mit Klärschlamm:*  
Durchführung von Vergasungsversuchen mit granuliertem und pelletiertem Klärschlamm aus einer Klärschlamm-trocknungsanlage
6. *Vergasungsversuche mit aufbereitetem Restmüll:*  
Vergasungsversuche mit aufbereitetem Restmüll (ohne Metalle, frei von mineralischen Beimengungen, auf 60....100 mm zerkleinert) in loser und in brikettierter Form.
7. *Auslegungsversuche:*  
Versuche mit Klärschlamm und aufbereitetem Restmüll zur Parameteruntersuchung und zur Ermittlung von Auslegungsdaten und Emissionswerten für den Genehmigungsantrag nach BImSchG für industrielle Anlagen.

## **2 Technikumanlage als Voraussetzung zur Durchführung des Vorhabens**

Die VER GmbH hat für die energetische Verwertung organischer Produkte eine Technikumanlage zur Vergasung fester Stoffe 1994 in Freital errichtet. Das Prinzip der Querstromvergasung wurde gewählt, um die Hauptnachteile der Gegenstromvergasung (hoher Teergehalt im Brenngas) und der Gleichstromvergasung (schlechter Ausbrand der Asche, hoher Staubgehalt im Brenngas) weitgehend auszuschließen. Die Anlage hat eine Kapazität von 15 bis 30 kg/h Brennstoff und dient dazu, die Eignung unterschiedlicher Vergasereinsatzstoffe hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Aufbereitung zu testen, Auslegungsdaten für die Projektierung und den Bau größerer Vergasungsanlagen, bezogen auf konkrete Einsatzstoffe, zu ermitteln und Daten für das eventuell erforderliche Genehmigungsverfahren für solche Anlagen zu erarbeiten. Sie ist für den Einsatz von ca. 100 Abfallarten (nach Bundes-Immissionschutzgesetz) zugelassen. [1]

### **2.1 Vergasungsapparat**

Der Vergasungsapparat ist in Abbildung 1 dargestellt. Er besteht aus den 3 Modulen:

- Vergasungsraum
- Brennkammer
- Ascheauffangbehälter.

#### *Vergasungsraum*

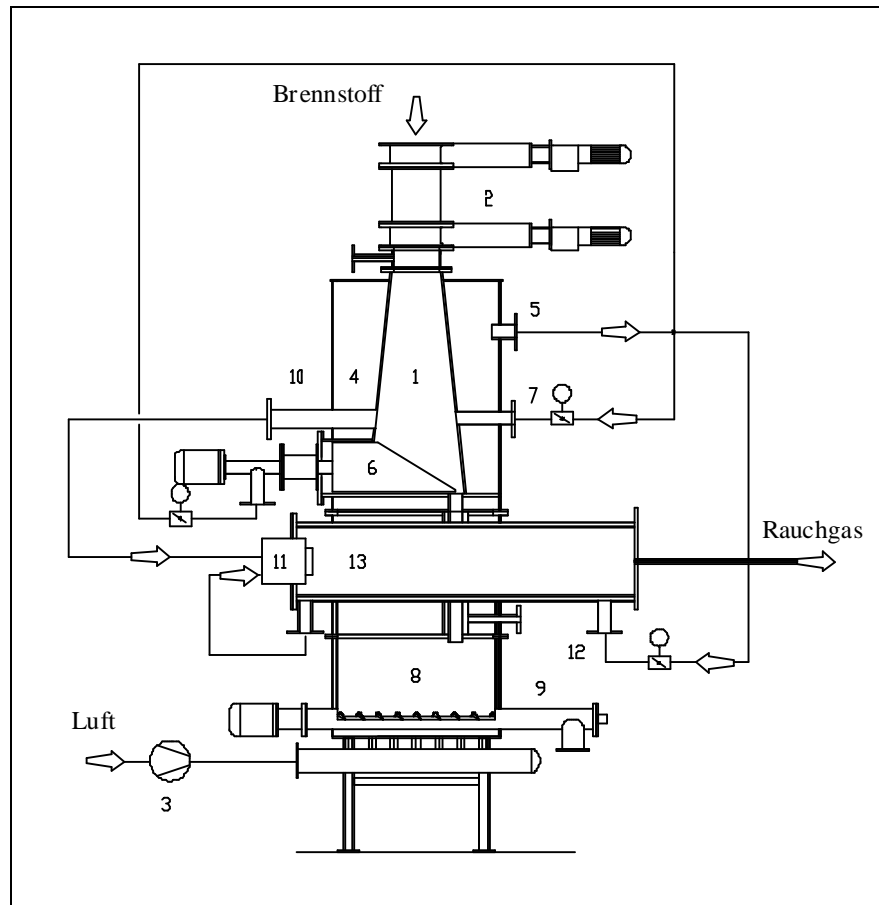
Der Vergasungsraum ist ein sich konisch nach unten erweiternder Schacht mit einem Volumen von 130 l (VA 130). Den oberen Abschluß bildet eine Kammerschleuse, durch die die Beschickung mit dem zu vergasenden Gut erfolgt. Den unteren Abschluß des Vergasers bildet der Rost. Dieser ist als beweglicher Stufenrost ausgebildet und hat zwei Aufgaben: Einerseits wird durch die Schubbewegung die Asche des Brennstoffs zu dem seitlich angebrachten Ascheaustragskanal befördert, andererseits dient der Rost der Zuführung der unteren Vergasungsluft.

Die Zuführung der Vergasungsluft bzw. des Vergasungsmittels erfolgt an zwei unterschiedlichen Stellen. Die Hauptmenge wird seitlich eingeblasen, wodurch ein sogenannter Querstrom realisiert wird.

Der zweite geringere Anteil der Vergasungsluft wird durch den Rost zugeführt. Die Aufgabe dieser sogenannten Rostluft ist es vor allem, für einen weitgehenden bzw. praktisch vollständigen Ausbrand des zu vergasenden Brennstoffes zu sorgen.

Der Austritt des Brenngases befindet sich gegenüber der seitlichen Luftzuführung.

Die Kühlung des Vergasers erfolgt durch ein zweischichtiges Kühl-Isolier-System. Durch dieses System wird die Gesamtluft (Vergasungs- und Verbrennungsluft) geleitet, die sich dabei erwärmt. Auf diese Weise werden die Wärmeverluste reduziert.



**Abbildung 1: Schema Vergasungsapparat der Technikumanlage**

- 1-Vergasungsraum, 2-Eintragsschleuse, 3-Gebläse,  
 4-Kühl-Isolier-System, 5-Luftaustritt, 6-Rost,  
 7-Vergasungsluftzuführung, 8-Ascheauffangbehälter,  
 9-Ascheförderschnecke, 10-Brenngastutzen, 11-Brenner,  
 12-Berbrennungsluftzuführung, 13-Brennkammer

### *Brennkammer*

Die Brennkammereinheit ist unter der Vergasereinheit angeordnet. Das aus dem Vergaser austretende Gas wird dem Brenner zugeleitet. Die Verbrennungsluft dient zunächst zur Kühlung der Brennkammer und wird dabei weiter aufgewärmt, bevor sie ebenfalls dem Brenner zugeführt wird. Die Brennkammer ist so dimensioniert, daß bei einem durchschnittlichen Brennstoffdurchsatz die Verweilzeit des Verbrennungsgases von 2 s eingehalten wird, was beim Einsatz belasteter Brennstoffe nach der 17. BImSchV gefordert ist.

Die Brennkammereinheit umfaßt ebenfalls den Ascheschacht, durch den die Brennstoffasche aus dem Vergaser in den Ascheauffangbehälter fällt. Eine Verbindung zwischen Ascheschacht und Brennkammer besteht nicht, so daß es zu keinem Ascheaustrag durch die Verbrennungsgase kommen kann.

### *Ascheauffangbehälter*

Der unterste dritte Teil des Vergasungsapparates ist der Ascheauffangbehälter. In diesem wird die aus dem Vergaser durch den Ascheschacht der Brennkammereinheit fallende Brennstoffasche gesammelt. Der Ascheauffangbehälter ist konisch nach unten verjüngt und besitzt in der unteren Rinne eine Schnecke zum Ascheaustrag. Durch einen Doppelmantel wird der Ascheauffangbehälter mittels der Gesamtluft gekühlt.

## **2.2 Wärmeübertrager**

Das Verbrennungsgas aus der Brennkammer gelangt in den Wärmeübertrager, wo dem heißen Gas die fühlbare Wärme entzogen wird. Als Kühlmedium in diesem Wärmeübertrager dient der Rücklauf des Raumheizungssystems am Anlagenstandort. Das Rauchgas verläßt den Wärmeübertrager mit etwa 100 °C. Wenn die erzeugte Wärme nicht vollständig vom Heiznetz aufgenommen werden kann, erfolgt eine Wärmeabgabe über einen luftgekühlten Wärmeübertrager ins Freie.

Dem Wärmeübertrager nachgeschaltet ist ein Saugzuggebläse, das über den Wärmeübertrager, die Brennkammer und den Vergaser die gesamte Gasströmung bewirkt und das Rauchgas durch die anschließende Reinigungsstufe fördert.

## **2.3 Rauchgasreinigung**

An den Wärmeübertrager schließt sich eine zweistufige Rauchgasreinigung an, die bei der energetischen Verwertung von kontaminierten Abfällen notwendig ist. Beim Einsatz von unbelastetem Holz ist eine Rauchgasreinigung normalerweise nicht erforderlich.

Die erste Reinigungsstufe ist ein Aktivkohlefilter mit integriertem Staubfilter. In dieser Reinigungsstufe werden sowohl der Staub und die daran gebundenen Schadstoffe, das sind in erster Linie die Schwermetalle, als auch eine Reihe anderer Verunreinigungen aus dem Rauchgas weitgehend entfernt. Das sind zum einen die organischen Rauchgasverunreinigungen wie PAK (polykondensierte aromatische Kohlenwasserstoffe), HKW (Halogen-Kohlenwasserstoffe), PCB (polychlorierte Biphenyle) und PCDD/F (polychlorierte Dibenzodioxine und -furane), zum anderen aber auch flüchtige Schwermetalle wie Quecksilber. Verbrauchte Aktivkohle, die mit den genannten Schadstoffen beladen ist, wird dem Vergasungsapparat als Brennstoff zugeführt, so daß diese im Normalfall nicht als Abfall entsorgt werden muß. Die adsorbierten organischen Schadstoffe werden durch die Vergasung und anschließende Verbrennung des Gases zerstört und die anorganischen Schadstoffe weitgehend in die Brennstoffasche eingebunden. Nur in den Fällen, in denen der eingesetzte Brennstoff größere Mengen der leichtflüchtigen Schwermetalle Quecksilber und Arsen enthält, die nur in ungenügendem Maß in die Brennstoffasche eingebunden werden, ist eine Entsorgung der beladenen Aktivkohle erforderlich.

Die zweite Rauchgasreinigungsstufe ist der HCl-Wäscher. Bei der Verarbeitung chlorhaltiger Einsatzstoffe, z.B. durch darin enthaltenes PVC, in der Vergasungsanlage kommt es zur Bildung von Chlorwasserstoff. Da der Aktivkoksadsorber nicht in

der Lage ist, den Chlorwasserstoffgehalt im Rauchgas auf den in der 17. BImSchV vorgeschriebenen Grenzwert zu reduzieren, ist eine Naßwäsche nachgeschaltet. Dort wird mittels einer etwa 5-%igen Natriumhydrogencarbonat-Lösung das im Rauchgas enthaltene HCl und SO<sub>2</sub> entfernt. Dabei entsteht eine Natriumchlorid-/sulfatlösung, die keinen Schadstoff darstellt.

### **3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Die Planung für den Ablauf des Vorhabens entsprechend der beantragten Arbeitsschritte ist in Abbildung 2 dargestellt.

| Arbeitsetappe            | 1997 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1998 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1999 |    |    |    |    |  |
|--------------------------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------|----|----|----|----|--|
|                          | 02   | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 01 | 02   | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 01 | 02   | 03 | 04 | 05 | 06 |  |
| Technische Optimierung   |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| Analysentechnik          |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| Versuche Holz            |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| Technologische Anpassung |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| Versuche Klärschlamm     |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| Versuche Restmüll        |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| Auslegungsversuche       |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| Schlußbericht            |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |

**Abbildung 2:** Balkenplan für Planung des Vorhabens

Die geplanten Arbeiten mußten teilweise verschoben werden. Es wurden dementsprechend Änderungsanträge gestellt und auch gewährt :

- Antrag vom 07.11.97 auf Änderung der Zuwendungen und Aufstockung des Personals
- Antrag vom 31.07.98 auf Verlängerung bis 31.12.98
- Antrag vom 11.11.98 auf Verlängerung bis 30.06.99
- Antrag vom 21.07.99 auf Verlängerung bis 31.12.99

Der Gesamtumfang der Arbeiten im Förderungszeitraum und der dafür erforderlichen Mittel sollte von der zeitlichen Verschiebung nicht beeinflusst werden.

Folgende Gründe führten zu Verzögerungen bei der Bearbeitung des Vorhabens:

- Der ursprünglich geplante Zeitpunkt für die notwendigen Anpassungsarbeiten konnte nicht realisiert werden. Das Teilvorhaben „Technische Optimierung der vorhandenen Vergasereinheit“ wurde durch den Umstand behindert, daß die im Antrag vom 27.01.97 für Umbauarbeiten angegebene Firma LM Lufttechnik und Metallbau GmbH Freital Gesamtvollstreckung zum 01.07.97 beantragt hat. Damit ist auch der Standort der Technikumsanlage gefährdet.
- Die VER hat 1997-98 eine eigene Anlage zur Trocknung von Lackschlamm errichtet und in Betrieb genommen. Durch die Aufgabenbündelung in Reichstädt verzögerte sich die Bearbeitung am Vorhaben Vergasung.



- Im Verlauf der Bearbeitung des Themas hatte sich ergeben, daß die technische Optimierung des Vergasungsapparates nicht mehr sinnvoll war, sondern ein Neubau des Vergasungsapparates erforderlich war. Entsprechende Konstruktionsunterlagen wurden erstellt. Diese Arbeiten haben einen entsprechenden Zeitraum in Anspruch genommen und die Fertigung des Apparates konnte wegen beschränkter Möglichkeiten noch nicht in Auftrag gegeben werden.
- 1999 und 2000 mußten andere dringende Projekte vorgezogen werden, so daß zur Bearbeitung des Förderprojektes keine finanziellen und personellen Kapazitäten blieben.

Der folgende Balkenplan gibt eine Übersicht zum tatsächlichen Ablauf des Vorhabens:

| Arbeitsetappe                  | 1997 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1998 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1999 |    |    |    |    |  |
|--------------------------------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------|----|----|----|----|--|
|                                | 02   | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 01 | 02   | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 01 | 02   | 03 | 04 | 05 | 06 |  |
| Technische Optimierung:        |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| - Brenngasaustritt             |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| -Brennkammerauskleidung        |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| -Saugzuggebläse                |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| -Schaltschrank                 |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| -Rostantrieb                   |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| -Wärmeübertrager               |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| Analysentechnik                |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| Versuche Holz                  |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| Technologische Anpassung:      |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| -NOx-Reduzierung               |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| -PCR-Brenngaswäsche            |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| -Projekt Brenngas-Dieselwäsche |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| Versuche Klärschlamm           |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| Versuche Restmüll:             |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| -MBS                           |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| -Contec-Stabilat               |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| Auslegungsversuche:            |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| -Vergleich Messung/Rechnung    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| -Konstruktion VA200            |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |
| -Konzept 1 MW-Vergaserbaustein |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |    |    |  |

**Abbildung 3:** Balkenplan zum tatsächlichen Ablauf des Vorhabens

Bemerkungen zum Ablauf der einzelnen Arbeitsschritte:

**1. Technische Optimierung der vorhandenen Vergasereinheit:**

- Konstruktive Veränderung des Brenngasaustrittes aus dem Vergaser:  
Im Rahmen von Anpassungsarbeiten an der Technikumanlage wurde der Austritt des Brenngases aus dem Vergaser konstruktiv verändert. Ziel war die Verringerung des Partikelgehaltes des Gases und die Verbesserung der Strömungsverhältnisse im Vergasungsraum.
- Variation von Materialien für innere Brennkammerauskleidung:  
Die Beständigkeit der inneren Brennkammerauskleidung ist bei den teilweise hohen Brennkammertemperaturen um 1400°C und bei chlorhaltigen Rauchgas problematisch. Bei Erneuerung wurde deshalb der Materialeinsatz aus der Produktpalette der Fa. VGT-DYKO Industriekeramik variiert.
- Wechsel des Saugzuggebläses:  
Das Saugzuggebläse hatte mit seinem Alu-Gehäuse Korrosionsprobleme und

nach längeren Stillständen war das Laufrad am Gehäuse festkorrodiert. Deshalb wurde das Gehäuse erneuert und ein Gehäuse aus Grauguß gewählt.

- Verlegung des Schaltschranks:  
Ursprünglich war der Schaltschrank der Technikumanlage mit der Steuerung unmittelbar neben der Brennkammer angeordnet, was aber bei längeren Versuchsfahrten zu Überhitzung des Schaltschranks und zu Störungen der Elektronik führte. Deshalb wurde der Schaltschrank innerhalb der Technikumanlage an eine andere Stelle versetzt.
- Erneuerung Rostantrieb:  
Ersatz des Rostantriebes des Vergasers durch einen stärkeren Linearantrieb.
- Erneuerung Wärmeübertrager:  
Austausch des Wärmeübertragers nach der Brennkammer mit geänderter Rohrteilung, um die Verschmutzung zu verringern und die Reinigungsmöglichkeiten zu verbessern.

## *2. Beschaffung und Installation von Analysentechnik:*

Bisher erfolgte nur die Messung des O<sub>2</sub>-Gehaltes in der Brennkammer. Diese Messung war aber nicht mehr ausreichend:

- Zur Beurteilung der Verbrennung sind die Messungen von CO und NO<sub>x</sub> notwendig.
- Die O<sub>2</sub>-Messung in der Brennkammer mit der Ursalyt-Meßsonde in der Brennkammer zeigte wegen der hohen Temperaturbelastung und dem Chlorgehalt im Rauchgas keine reproduzierbaren Meßergebnisse mehr an.

Ursprünglich war die Rauchgasmessung entsprechend der 17. BImSchV zur Messung der Komponenten NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HCl und O<sub>2</sub> mit Emissionsrechner vorgesehen. Doch mit der immissionsschutzrechtlichen Einstufung der Vergasungsanlage als Technikumanlage war die Rauchgasmessung nach 17. BImSchV nicht zwingend erforderlich und auch wirtschaftlich nicht sinnvoll.

Es wurde deshalb ein tragbarer Gasanalysator PG-250 der Fa. Horiba für die Komponenten NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> und eine tragbare Meßgasaufbereitung der Fa. M&C einschl. beheizten Meßgasschlauch und Entnahmesonde beschafft. Die Aufzeichnung der Meßwerte erfolgt auf einem vorhandenen PC.

Die Messung der Brenngaszusammensetzung ist damit allerdings nicht möglich. Das Problem ist hierbei die Aushaltung der Teerbestandteile aus dem Meßgas. Es konnte kein geeignetes Meßsystem gefunden werden, daß unseren preislichen und technischen Möglichkeiten entsprach.

## *3. Vergasungsversuche mit Holz als Brennstoff:*

Versuche mit Holz zum Test neuer Komponenten der Technikumanlage wurden im Zusammenhang mit den Vergasungsversuchen mit Klärschlamm und Restmüll gefahren. Ergebnisse dieser Versuche wurden auch zum Vergleich der Versuchswerte mit Klärschlamm und Restmüll herangezogen.

#### 4. Technologische Anpassung:

Zur technologischen Anpassung der Vergasereinheit an die vorgeschriebenen Emissionswerte sowie zur Ankopplung an eine motorische Nutzung des Brenngases wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Umbau der Brennkammer zur primären NO<sub>x</sub>-Reduzierung bei Einsatz von Klärschlamm
- Versuche zur Brenngasreinigung mittels PCR-Brenngaswäsche
- Konzeption, Projektierung und Konstruktion einer Brenngasreinigung mit Dieselwäscher.  
Diese Brenngasreinigung konnte aber noch nicht realisiert werden.

#### 5. Vergasungsversuche mit Klärschlamm:

- Durchführung von Vergasungsversuchen mit pelletiertem Klärschlamm zur Ermittlung von Brenngaswerten.
- Vorversuche zur Entstehung von NO<sub>x</sub> bei Vergasung von Klärschlamm.

#### 6. Vergasungsversuche mit aufbereitetem Restmüll:

Umfangreiche Vergasungsversuche für 2 Restmüllstoffe mit Vorversuchen, 24 h-Stabilitätsversuchen und einem 150 h-Versuch

#### 7. Auslegungsversuche:

- Versuche mit Klärschlamm und aufbereitetem Restmüll wurden auch zu Parameteruntersuchungen und zur Ermittlung von Auslegungsdaten und Emissionswerten genutzt.
- Vergleich von Meßwerten mit Berechnung, um Sicherheit für die Auslegung von Vergaserapparaten zu gewinnen.
- Auf Grundlage von Versuchsergebnissen erfolgte die Projektierung und Konstruktion der Vergasereinheit VA 200
- Erreichter Stand:
  - Konstruktion eines Querstromvergaser Typ VA200
  - technologisches Schema VA200
  - Aufgabenstellung MSR für VA200
  - Der Aufbau der VA200 konnte nicht realisiert werden
  - Konzeptstudie für einen 1 MW-Vergaserbaustein

## **4 Wissenschaftlich-technischer Stand zu Beginn des Vorhabens**

### **4.1 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte**

Eine Reihe von Firmen und Instituten befassen sich mit der Vergasung. Hauptsächliches Ziel dieser Vorhaben ist jedoch die Vergasung von Holz oder Holzabfällen und die Brenngasaufbereitung, um ein motorfähiges Gas zur Stromerzeugung zu erhalten.

Es sind folgende Stellen bekannt:

| <b>Firma/Hochschule/Institut</b>                | <b>Projekte/Bemerkungen</b>             |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Ing.-Büro Ferges, Bergisch Gladbach             | Gleichstromvergaser                     |
| Arcus-Recycling Systeme GmbH, Freren            | Gleichstromvergaser                     |
| Border Blofuels Ltd., Duns, GB                  | Gleichstromvergaser                     |
| Coal Resaerch Establishment, Chellham, GB       | Gleichstromvergaser                     |
| Easymod Energiesysteme GmbH, Barth              | Gleichstromvergaser                     |
| Enshofer SA, Curlo, CH                          | Gleichstromvergaser                     |
| MHB GmbH, Fürstenwale                           | Gleichstromvergaser                     |
| HTV Energietechnik, Gunzgen, CH                 | Juch-Gleichstromvergaser, Espenhain     |
| DASAG, Seuzach, CH                              | open top, Gleichstromvergaser           |
| Imbert GmbH für Energie und Umwelt, Weilerweist | Gleichstromvergaser                     |
| KARA, Almelo, NL                                | Gleichstromvergaser                     |
| Inhelder-Trading AG, Reinach, CH                | Gleichstromvergaser, Gegenstromvergaser |
| Power Managment Associates, Henshaw, GB         | Gleichstromvergaser                     |
| Power Gasifiers, Sandy, GB                      | Gleichstromvergaser                     |
| Pyroban, Shoraharn, GB                          | Gleichstromvergaser                     |
| SMT, Goes, NL                                   | Gleichstromvergaser                     |
| Stalens Maskin Provingar, Umea, S               | Gleichstromvergaser                     |
| Ling Development Ltd., Nary, GB                 | Gleichstromvergaser                     |
| VØlund R&D Center, Esbjerg, DK                  | Gegenstromvergaser                      |
| Wellmann Process Engineering, Smelhwick, GB     | Gegenstromvergaser                      |
| Ahlstrom Corp., Kaarina, SF                     | Gegenstromvergaser                      |
| UET GmbH, Freiberg                              | 2-stufige Vergasung, Carbo-V            |
| TU Dänemark, Lingby, DK                         | 2-stufige Vergasung                     |
| Ahlströmföretagen Svenska, Stockholm, S         | Wibelschichtvergasung                   |
| Condens Oy, Hameenlinna, SF                     | Wibelschichtvergasung                   |
| TPS Termiska Processor AB, Nyköping, S          | Wibelschichtvergasung                   |

| Firma/Hochschule/Institut                                      | Projekte/Bemerkungen  |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Uni Magdeburg, Inst. f. Apparate- und Umwelttechnik, Magdeburg | Wibelschichtvergasung |
| RWTH Aachen, Inst. f. Eisenhüttenkunde, Aachen                 | Güllevergaser         |

**Tabelle 1:** Bekannte Projekte zur Vergasung

Mit der Vergasung von Müll oder Klärschlamm befassen sich nach unserer Kenntnis folgende Stellen:

| Firma/Hochschule/Institut                       | Projekte/Bemerkungen                                                                                                       |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Max Aicher Umwelttechnik GmbH, Hammerau         | gekoppelter Prozeß mit Trocknung, Nieder-temperatur-Pyrolyse, Vergasung für Klärschlamm                                    |
| Siemens KWU, Erlangen                           | Schmel-Brenn-Verfahren für Hausmüll<br>Pyrolyse im Drehrohr mit anschließender Hochtemperaturverbrennung des Pyrolysegases |
| UEC GmbH, Potsdam                               | Theroselet-Verfahren für Hausmüll<br>Kombination von Pyrolysekanal und Hochtemperaturvergasung                             |
| Noell Abfall- und Energietechnik GmbH, Freiberg | Noell-Konversionsverfahren für Restmüll<br>Kombination von Pyrolyse im Drehrohr und anschließender Flugstromvergasung      |
| Ing.-Büro Ferges, Bergisch Gladbach             | Gleichstromvergaser für Biomassen und Abfallstoffe mit Brenngasausbreitung und Gasmotor                                    |
| Wamsler Umwelttechnik GmbH                      | Wamsler Thermo-Prozessor<br>Schwefelgasreaktor mit anschließender Hochtemperaturverbrennung des Prozeßgases                |
| Arcus-Recycling Systeme GmbH, Freren            | Gleichstromvergaser für Klärschlamm, Kompostreste, Papier, sortierten Hausmüll, Gülle u.a.<br>mit Gasmotor                 |

**Tabelle 2:** Bekannte Projekte zur Vergasung von Müll oder Klärschlamm

Es sind folgende Schutzrechte zu Vergasern bekannt:

| Patentinhaber | Patent Nr. / Land / Titel                                                                    |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Josef Münster | 926 978 / BRD / Gaserzeuger                                                                  |
| C. Deilmann   | DE 35 43 424 C2 / BRD / Verfahren und Vorrichtung zum Erzeugen von Gas                       |
| Bernhard Bode | DE 42 06 725 A1 / BRD / Vergasungsanlage für Feststoffe mit nachgeschalteter Brennkammer.... |
| Bernhard Bode | DE 42 06 758 A1 / BRD / Vergasungsreaktor zur Erzeugung von Brenngas...                      |
| Josef Martin  | 377 222 / Deutsches Reich / Treppenrost mit bewegten Schürrosten für Gaserzeuger             |
| VER GmbH      | DE 43 44 569 C2 / BRD / Verfahren und Vorrichtung zur Brenngasherstellung                    |
|               |                                                                                              |

#### 4.2 Fachliteratur

- Buttker, Rabe: Festbettdruckvergasung gekoppelt mit Flugstromvergasung im SVZ Schwarze Pumpe.  
VIK Berichte Nr. 208, Okt. 1996
- Rapp: Kurzüberblick über den heutigen Stand der Holzvergasung.  
Informationsschrift des Landesgewerbeamtes Baden Württemberg, Direktion Karlsruhe 1996
- Carl, Fritz: Noell-Konversionsverfahren zur Verwertung und Entsorgung von Abfällen.  
Berlin, EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik 1994
- Tagungsband: Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe.  
Bergakademie Freiberg 1996
- Schulungsmaterial zum ATES-Seminar: Energieträger Holz.  
ATES Fürstenwalde 1996
- Tagungsband: Stand der Holzvergaserentechnik.  
Landesgewerbeamt Baden Württemberg, Direktion Karlsruhe 1998

## **5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

- FEE Förderverein Erneuerbare Energien:
  - Informationsaustausch zum Stand der Vergasertechnik
  - Durchführung von 150h-Versuchen zum Vergleich der Vergasertechnik (mit Holzbriketts)
- Stork Comprimo SKL (heute Jacobs Compimo Deutschland GmbH)
  - Zusammenarbeit bei Erstellung der Studie für einen 1 MW-Vergaserbaustein
- TU Dresden, Institut für Energietechnik
  - Zusammenarbeit bei thermischer Verwertung von Klärschlamm

## **6 Darstellung der Ergebnisse**

### **6.1 Technische Optimierung der vorhandenen Vergasereinheit**

Konstruktive Änderungen an der Technikanlage zur Verbesserung der Betriebsstabilität brachten folgende Ergebnisse:

#### *1. Konstruktive Veränderung des Brenngasaustrittes aus dem Vergaser:*

Versuche mit aschereichen Einsatzstoffen wie Klärschlamm und Restmüll bestätigten, daß diese Maßnahme zu einem geringeren Partikelaustrag führt.

#### *2. Variation von Materialien für innere Brennkammerauskleidung:*

Endgültige Aussagen über die Beständigkeit der verschiedenen Materialien können wegen der geringen Betriebsstundenzahl nach dem Wechsel noch nicht gemacht werden.

#### *3. Wechsel des Saugzuggebläses:*

Die Korrosionsprobleme wurden behoben.

#### *4. Verlegung des Schaltschranks:*

Keine Störungen der Steuerung durch Überhitzung.

#### *5. Erneuerung Rostantrieb:*

Die Rostbewegung ist auch bei leichten Verschlackungen im Vergaser möglich und die Betriebsstabilität verbessert.

#### *6. Erneuerung Wärmeübertrager*

Längere Reinigungszyklen des Wärmeübertragers wurden erreicht.

## 6.2 Beschaffung und Installation von Analysentechnik

Die Analysentechnik wird zur Protokollierung der Rauchgasemissionen und zur Regelung des O<sub>2</sub>-Gehaltes im Rauchgas erfolgreich genutzt.

## 6.3 Vergasungsversuche mit Holz als Brennstoff

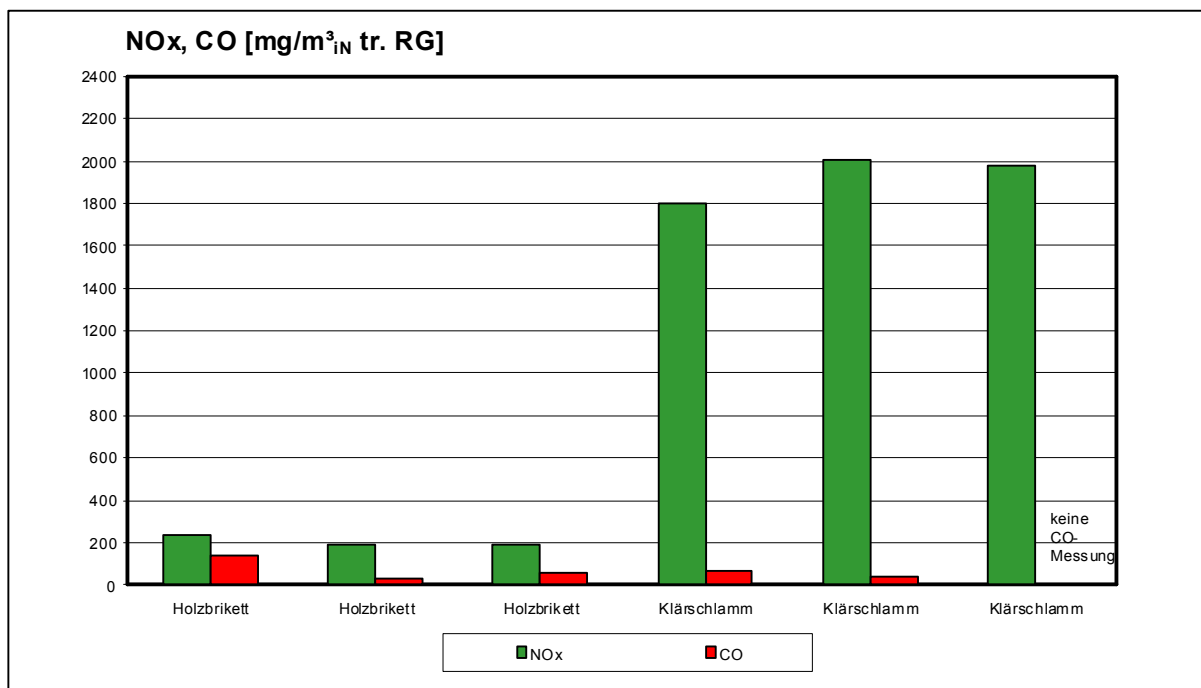
Versuche mit Holz zum Test neuer Komponenten der Technikanlage wurden im Zusammenhang mit den Vergasungsversuchen mit Klärschlamm und Restmüll gefahren. Ergebnisse dieser Versuche wurden auch zum Vergleich der Versuchswerte mit Klärschlamm und Restmüll herangezogen. Sie sind deshalb in den entsprechenden Abschnitten mit aufgeführt.

## 6.4 Technologische Anpassung

### 6.4.1 Primärmaßnahmen zur NO<sub>x</sub>-Reduzierung bei der Vergasung von Klärschlamm

Es wurden zunächst Basisversuche mit Holzbrikett und Klärschlamm durchgeführt, um die Höhe der NO<sub>x</sub>-Emissionen und die Art der Entstehung zu bestimmen.

Für Klärschlamm ergeben sich sehr hohe NO<sub>x</sub>-Emissionen, die ca. das 10-fache des Grenzwertes und der Emission bei Holzbrikett betragen:



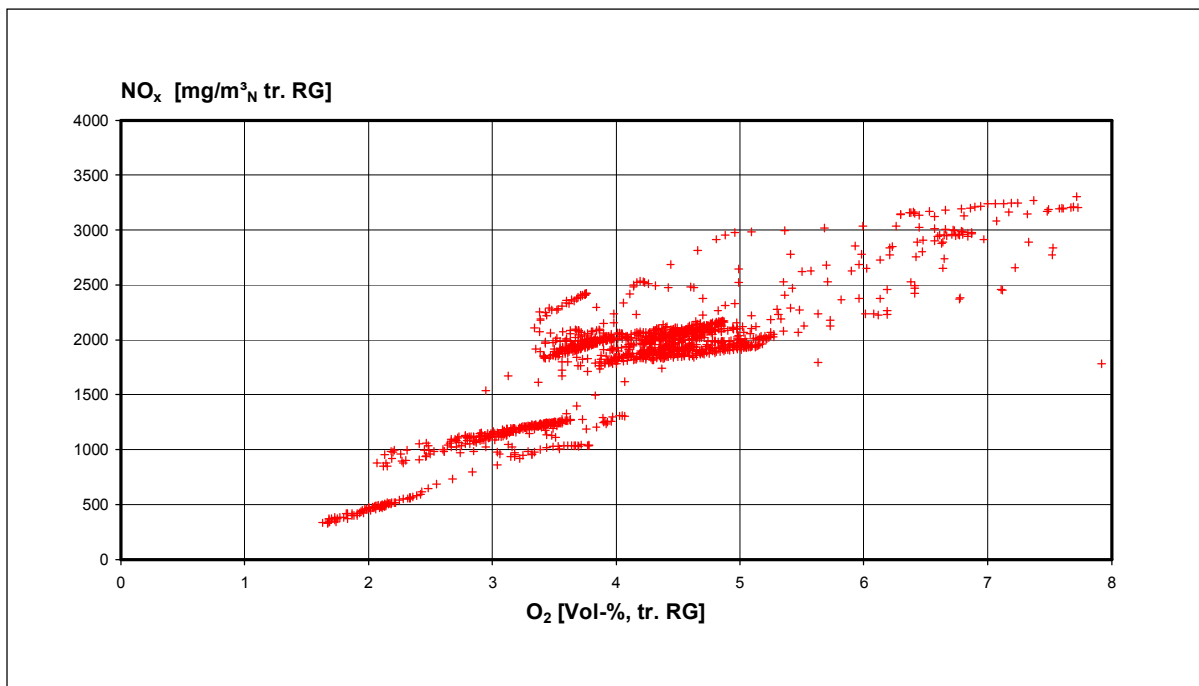
**Abbildung 4:** NO<sub>x</sub>-Emissionen bei der ungestuften Verbrennung von Brenngas aus Holzbrikett und Klärschlamm



Wie in Abschnitt 6.5 ausführlicher dargestellt wird, entsteht das  $\text{NO}_x$  hauptsächlich bei der Verbrennung des Brenngases und nur zum geringen Teil bei der Vergasung.

Die Stickoxidbildung ist nicht mit dem Temperatureinfluß der Bildung von sogenanntem „thermischem  $\text{NO}_x$ “ erklärbar, da die Brennkammertemperaturen bei der Vergasung von Klärschlamm nicht höher gemessen wurden als bei Holzbrikett. Die deutlich höheren  $\text{NO}_x$ -Emissionen im ersteren Fall sind daher auf die Bildung von sogenanntem „Brennstoff- $\text{NO}_x$ “ (hervorgerufen durch den hohen Stickstoffgehalt im Klärschlamm) zurückzuführen. Die Bildung von  $\text{NO}_x$  auf diesem Wege nimmt zu mit steigendem Sauerstoffangebot in der Verbrennungszone und ist in Flammen nur in geringem Maße von der dort vorherrschenden Temperatur abhängig.

Aus Abbildung 5 ist zu entnehmen, daß eine Abnahme der  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei Restsauerstoffgehalten unterhalb von 2 bis 3 Vol-% eintritt. Demnach sollte die Verbrennung mit möglichst niedrigen Restsauerstoffgehalten, d.h. mit möglichst niedrigen Luftüberschuß ablaufen. Die Verminderung des Luftverhältnisses ist aber durch die steigende  $\text{CO}$ -Bildung bei geringen Luftverhältnissen begrenzt.

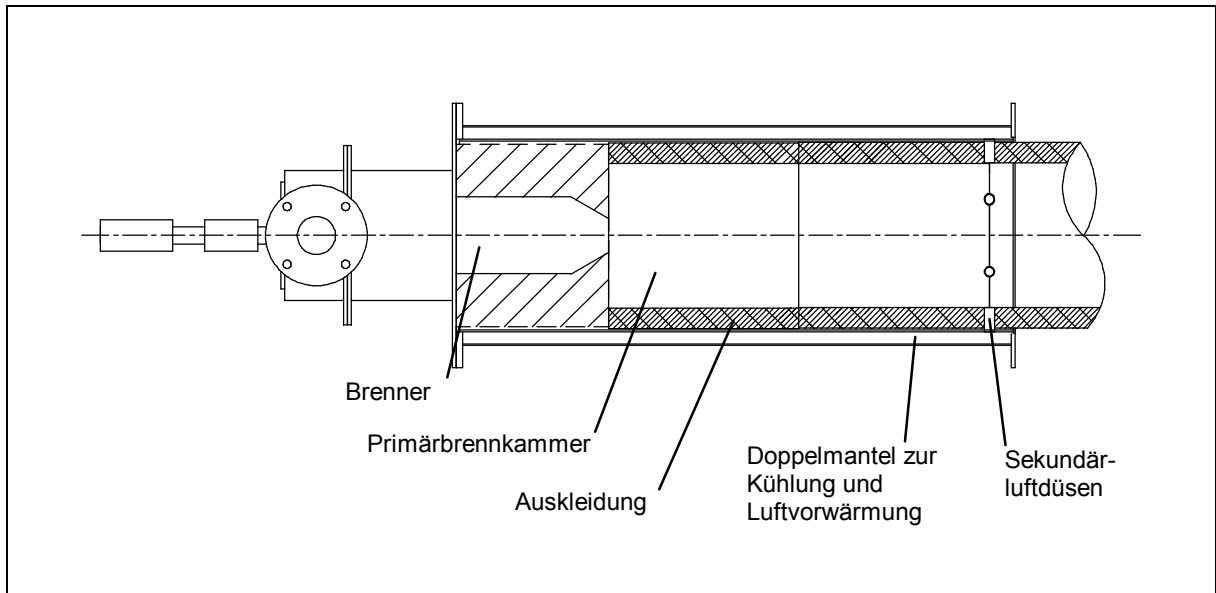


**Abbildung 5:**  $\text{NO}_x$ -Emission über dem Restsauerstoffgehalt bei der Verbrennung von Brenngas aus Klärschlamm

Als Maßnahme zur Reduzierung der  $\text{NO}_x$ -Emission wurde auf Basis dieser Versuche die Luftstufung ausgewählt. Dabei wird in der Primärzone die Verbrennung mit Luftmangel durchgeführt, um gebildete Stickoxide zu reduzieren. Anschließend, in der sekundären Verbrennungszone, muß weitere Luft zugemischt werden, damit der vollständige Ausbrand gewährleistet ist und die  $\text{CO}$ -Emission begrenzt wird.

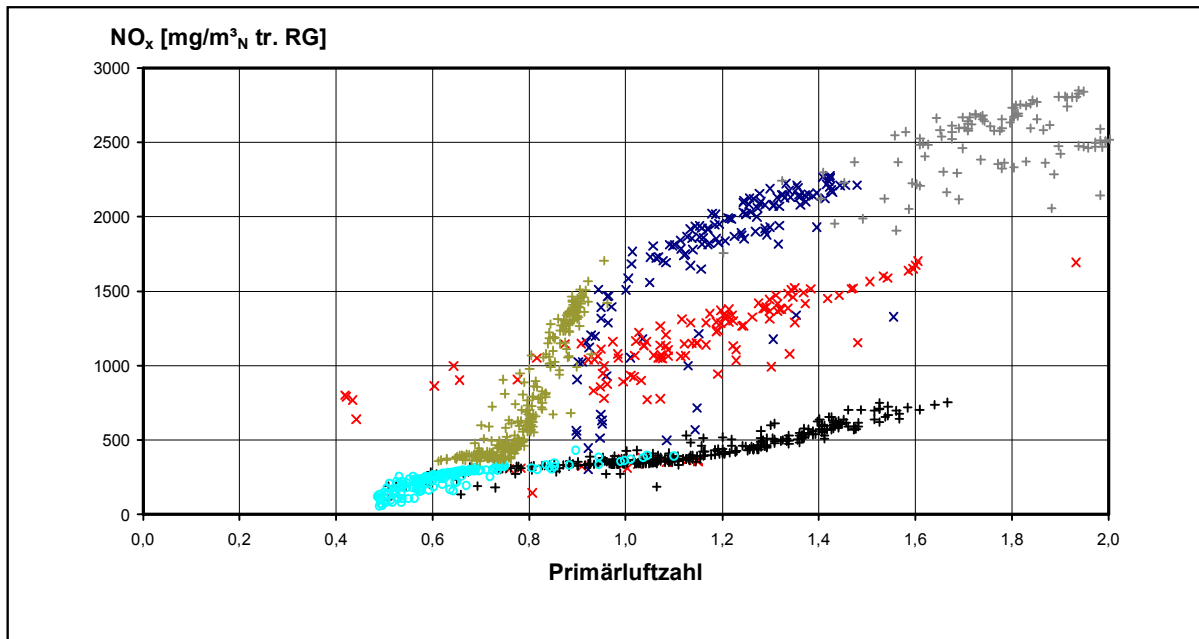
Die Brennkammer wurde auf der Brennerseite um die sogenannte Primärbrennkammer verlängert. Durch die Aufteilung des Verbrennungsluftstromes in zwei Teilströme - Primär- und Sekundärluft - wurde eine gestufte Verbrennung (Luftstufung) realisiert.

Die Primärluft wird dabei, wie bis zu diesem Zeitpunkt die gesamte Verbrennungsluft, zum Brenner geführt, während die Sekundärluft durch spezielle Öffnungen (Sekundärluftdüsen) ausgangs der Primärbrennkammer der Verbrennung zugeführt wird. Die Messung dieser zwei Teilströme erfolgt über Meßblenden.



**Abbildung 6:** Skizze zum Aufbau der Primärbrennkammer

Die Versuche mit gestufter Verbrennung zeigten den deutlichen Einfluß der Primärluftzahl auf die  $\text{NO}_x$ -Emission (s. Abbildung 7). Demnach müssen für die primäre Verbrennungszone Luftverhältnisse  $<0,8$  gewählt werden, um eine deutliche Reduzierung zu erreichen.



**Abbildung 7:** Einfluß der Primärluftzahl auf die  $\text{NO}_x$ -Emission bei der luftgestuften Verbrennung von Brenngas aus Klärschlamm

Bei höheren Primärluftzahlen ergeben sich starke Streuungen der  $\text{NO}_x$ -Emissionen, deren Einflüsse nicht alle bestimmbar sind.

Abschließend kann eingeschätzt werden, daß bei sorgfältiger Auslegung der luftgestuften Verbrennung die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte für  $\text{NO}_x$  möglich ist.

[4]

#### 6.4.2 Versuche zur Brenngasaufbereitung mittels PCR-Brenngaswäsche

Das in der Luft-Querstrom-Vergasungsanlage der VER GmbH gebildete Schwachgas enthält Teer- und partikelförmige Bestandteile. Diese Komponenten stellen Verunreinigungen dar, die besonders im Hinblick auf eine motorische Nutzung des Gases unerwünscht sind.

Der Stand der Technik erfordert für einen kontinuierlichen störungsfreien Betrieb in Verbrennungsmotoren geringere Gehalte der genannten Schadkomponenten als sie gegenwärtig mit dem LQV-Verfahren erreicht werden.

Ziel der beschriebenen Versuche war es, das PCR-Verfahren der Fa. FWS auf seine Eignung zur Verminderung der Teer- und Partikelgehalte im Brenngas zu untersuchen.

Zu diesem Zweck wurde ein Testlauf der Vergasungsanlage über 48 h mit SGF-Holzbrickett durchgeführt. Durch die Firma Stork Comprimo wurden Brenngasanalysen auf Roh- und Reingasseite vorgenommen.

Das PCR-Verfahren (Physikalisch-chemische Reinigung) dient zur Abscheidung von Schadstoffen aus Gasströmen.

In einem Prozeßbehälter, der mit der Prozeßflüssigkeit (Reaktionsmittel in wäßriger Lösung) gefüllt ist, wird über ein System rotierender Walzen ein Schaum gebildet, der von dem beladenen Gas durchströmt wird. Dabei werden Schadstoffe aus dem Gas herausgewaschen. Die beladene Prozeßflüssigkeit wird nach einer definierten Verweilzeit ausgeschleust und in den Trennbehälter geleitet. Durch Ausflockung bildet sich ein Sumpf im Trennbehälter, der abgezogen und gegebenenfalls in einer Kammerfilterpresse o.ä. weiter entwässert wird. Die Prozeßflüssigkeit wird am Kopf des Trennbehälters abgezogen und in den Kreislauf zurückgeführt.

Die Abscheidewirkung wird durch die Art, Menge und Konzentration des Reaktionsmittels, den pH-Wert der Prozeßflüssigkeit und weitere Faktoren beeinflusst.

Der Gasstrom wird mittels eines eingangsseitig installierten Gebläses gefördert.

Im betrachteten Fall wurde eine PCR-Demonstrationsanlage mit nachfolgender Spezifikation eingesetzt:

|                                    |                                 |
|------------------------------------|---------------------------------|
| Druckverlust                       | 500 Pa                          |
| Volumenstrom                       | ca. 200 - 600 m <sup>3</sup> /h |
| Abmessungen                        | 1,50 x 1,10 x 2,30 m            |
| Füllmenge                          | ca. 500 l Wasser                |
| Konzentration des Reaktionsmittels | ca. 0,2 Vol-%                   |

**Tabelle 3:** Parameter der PCR-Anlage

Eine Ausschleusung des abgeschiedenen Reststoffes ist bei der Kürze des Versuches nicht vorgesehen.

#### *Betriebsstabilität:*

Durch zu hohe Schaumbildung kam es wiederholt zum Überlaufen der Waschflüssigkeit aus der PCR-Anlage. Die relativ geringen Gastemperaturen, die teilweise Umgebungstemperatur erreichten, führten zur Kondensatbildung in der Verbindungsleitung zwischen Brenngaswäsche und Gasbrenner. Beide Erscheinungen führten zum Flüssigkeitseinbruch in die Brennkammer bzw. zu einem raschen Rückgang der Verbrennungstemperatur mit teilweisem Erlöschen der Flamme. Durch die eingetretene Feuchtigkeit kam es zu Zündschwierigkeiten des Stützbrenners.

Während der Probenahme in Roh- und Reingas traten derartige Unterbrechungen nicht auf.

Anfängliche Störungen des Gebläses an der PCR-Anlage wurden vermutlich durch die Teer- und Partikelanteile im Rohgas in Verbindung mit Kondensatbildung hervorgerufen. Ab dem zweiten Tag wurde der rohgasseitige Eintrittsstutzen in unregelmäßigen Abständen gereinigt.

*Abscheidegrad:*

Bei allen Messungen war eine Verringerung der Partikelkonzentrationen zu verzeichnen. Die Reingaskonzentrationen lagen zwischen 27 und 95 % unter denen des Rohgases.

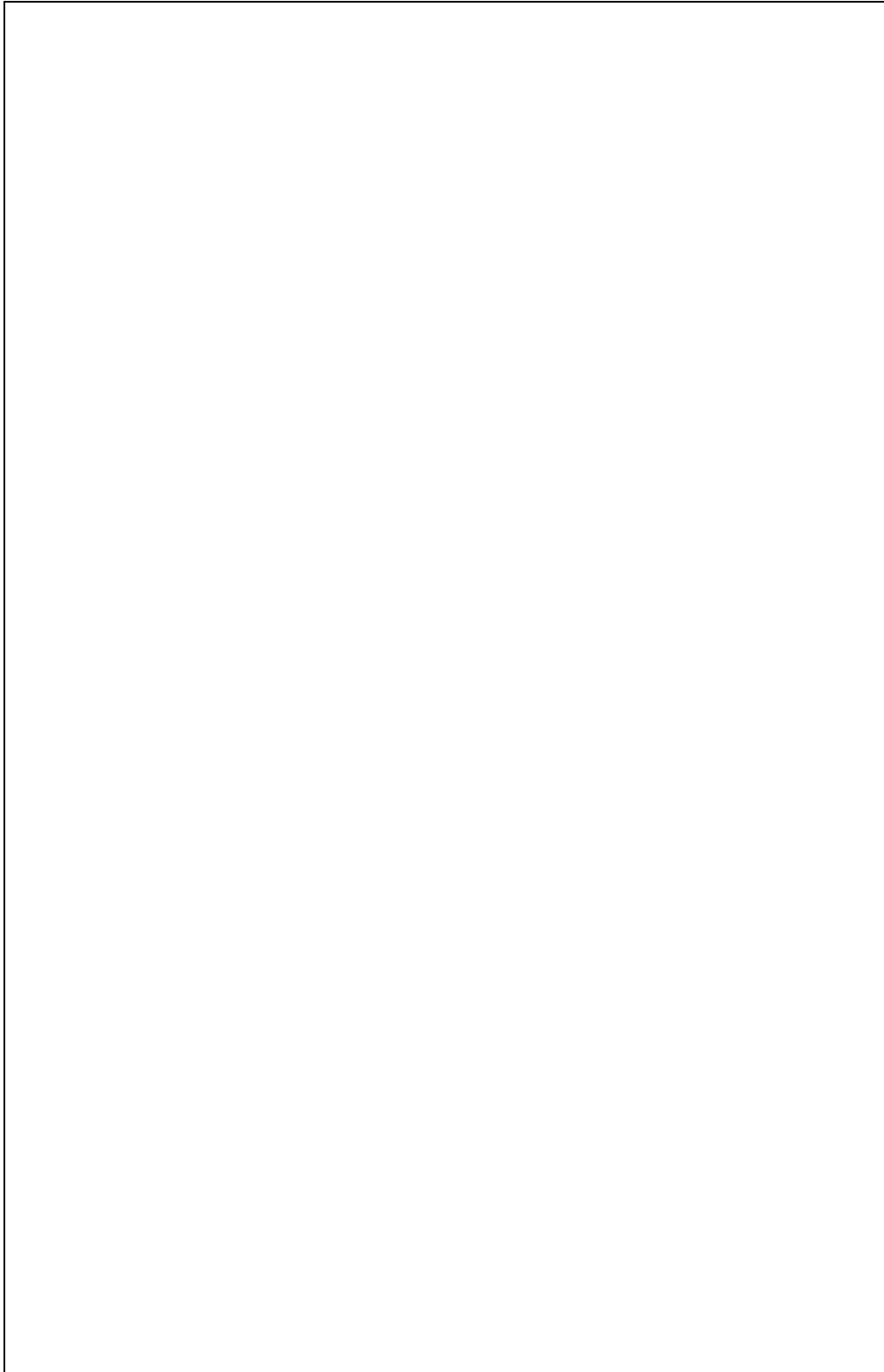
Bei den gemessenen Teerkonzentrationen ergeben sich für die einzelnen Stoffgruppen keine Trends. Nicht nachzuvollziehen sind beispielsweise die bei allen Messungen gegenüber dem Rohgas höheren Gehalte an PAK und Naphthalenen. Bei den Gruppen der schweren Teere und Phenole liegen die Rohgaskonzentrationen teilweise über, teilweise unter denen des Reingases. Eine Anreicherung mit den jeweiligen Komponenten in der PCR-Reinigungsstufe ist unwahrscheinlich, so daß diese Daten nur mit einer starken Schwankungsbreite der Eintrittskonzentrationen oder mit Meßfehlern bei der Probenahme/-analyse zu erklären sind.

Der Einsatz des Reaktionsmittels RM 4 deutet auf Vorteile gegenüber RM 1 hin. Der Partikelgehalt, der Gehalt an schweren Teeren sowie Phenol wurde auf mindestens die Hälfte reduziert, wohingegen die Konzentrationen an PAK und Naphthalin nahezu unverändert blieben.

Eine signifikante Reduzierung der gesamten Verunreinigungen ist nicht festzustellen.

Die allgemeine Zusammensetzung des Brenngases und der daraus resultierende Heizwert verhalten sich relativ konstant und bestätigen damit Erkenntnisse aus vergangenen Testläufen mit dem Brennstoff SGF.

Rückschlüsse auf eine Beziehung zwischen der Konzentration von Brenngasverunreinigungen und den Vergasungsverhältnissen lassen sich nicht ziehen. Die der Berechnung des Heizwertes zugrundeliegende Zusammensetzung des Brenngases ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ) ändert sich erwartungsgemäß während der Reinigungsstufe nicht.



**Abbildung 8:** Staub- und Teerkonzentrationen im Brenngas vor und nach PCR-Anlage, Konzentrationen in  $\text{mg}/\text{m}^3$   
Teergehalt beinhaltet die Gesamtmenge an Schweröl, Phenolen, Naphthalenen und PAK

### *Zusammenfassung:*

Die gemessenen Konzentrationen an Teer und Partikeln lassen keinen eindeutigen Schluß über die Effizienz des PCR-Verfahrens im betrachteten Anwendungsfall zu.

Der Partikelgehalt des Reingases lag bei allen 3 Messungen unter dem des Rohgases. Der Abscheidegrad variierte dabei zwischen 27 % und 95 %. Hingegen war bei verschiedenen Teerbestandteilen keine Verminderung zu verzeichnen.

Hervorzuheben sind Reingaskonzentrationen, die teilweise noch über denen des Rohgases liegen. Das läßt auf eine breite Schwankungsbreite der Eingangskonzentrationen schließen.

Insgesamt betrachtet erscheint das Reaktionsmittel RM 4 für diesen Anwendungsfall geeigneter als RM 1. Eine signifikante Verbesserung der Brenngasqualität ist bei keinem der eingesetzten Reaktionsmittel festzustellen.

In der Literatur werden als Empfehlung für den Betrieb von Gasmotoren ein Partikelgehalt  $< 50 \text{ mg/m}^3$  i.N. und ein Teergehalt von  $< 100 \text{ mg/m}^3$  i.N. angegeben. Insgesamt ist einzuschätzen, daß diese Richtwerte während des betrachteten Versuches nicht erreicht wurden.

[8]

### **6.4.3 Konzeption, Projektierung einer Brenngasreinigung mit Dieselwäscher**

Das Brenngas, das in einer Luft-Querstrom-Vergasungsanlage erzeugt wird, muß für eine energetische Nutzung in einem Gasmotor bestimmte Reinheitskriterien erfüllen. Das aus dem Vergaser austretende Brenngas genügt diesen Anforderungen ohne Zusatzbehandlung nicht. Als Verunreinigungen sind Teere und partikelförmige Bestandteile enthalten.

Als Teere werden zusammenfassend die folgenden Stoffgruppen bezeichnet:

- Hochsiedende Teere: (Gesamtheit aller hochmolekularen organischen Verbindungen, deren Siedepunkt typischerweise  $> 200 \text{ °C}$  liegt)
- PAK: Polyaromatische Kohlenwasserstoffe, z.B.: Naphthalen, Phenanthren
- Phenole: aromatische organische Verbindungen mit mind. 1 OH-Gruppe, z.B.: Phenol, Kresol

Ein Brenngas gilt dann als motorfähig, wenn folgende Bedingungen eingehalten werden:

- Partikelgehalt  $< 50 \text{ mg/m}^3$
- Teergehalt  $< 100 \text{ mg/m}^3$

*Projektumfang:*

Die Brenngaswäsche umfaßt die folgenden Einzelpositionen (s. auch Anlage 1):

- Rohgaskühler
- Brenngaswäscher:
  - Waschölauführung
  - Mischeinrichtung
  - Demister
  - Druckentlastung
- Waschölkreislauf:
  - Waschöltank
  - Waschölfiler
  - Waschölpumpe
  - Waschölkühler
- Reingaskühler
- Meß- und Sicherheitstechnik
- Automatisierungstechnik

*Grundgedanke der Dieselwäsche:*

Zur Reinigung des Brenngases aus dem LQV-Verfahren soll eine Gaswäsche mit Heizöl EL (bzw. Dieselkraftstoff) an Stelle des bislang in anderen Verfahren verwendeten Wassers angewendet werden.

Grundgedanke dieses Lösungsansatzes ist es, Teerbestandteile im Brenngas abzukühlen, zu kondensieren und zusätzlich soweit möglich in der Waschflüssigkeit (Heizöl) zu lösen.

Damit sind folgende Vorteile verbunden:

- abwasserfreie Wäsche, sofern das Brenngas nicht unter den Gastaupunkt abgekühlt wird
- Anfettung des Brenngases (heizölgesättigt) und damit Verbesserung (Stabilisierung) des Motorbetriebes



### Auslegungsgrößen:

Bei der Vergasung von Holzbrikett sind folgende spezifische Brenngasvolumina zu erwarten:

| Brennstoff-durchsatz [kg/h] | thermischer Wirkungsgrad | Spez. Gasvolumen [m <sup>3</sup> Brenngas/kg Brennstoff] | Brenngasvolumenstrom [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h] |
|-----------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 20                          | 0,95                     | 2,52                                                     | 50                                                    |
|                             | 0,70                     | 3,05                                                     | 61                                                    |

**Tabelle 4:** Abschätzung der Brenngasvolumenstromes für Vergasung von Holzbrikett

Gewählt als Auslegungsgröße des Gaswäschers wurde ein Brenngasvolumenstrom von 75 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/h.

Aus Vergasungsversuchen mit Holzbrikett sind folgende Rohgasparameter bekannt:

- Partikel: 1120 mg/Nm<sup>3</sup>
- Teer: 1470 mg/Nm<sup>3</sup>

Für den Betrieb des Gaswäschers ist außerdem die Kenntnis des Taupunktes des Brenngases erforderlich, um die Kondensation des Wasseranteiles auszuschließen. Aus früheren Berechnungen und praktischen Untersuchungen wurde ein maximaler Wassergehalt von 12 Vol-% im Brenngas für Holzbrikett ermittelt. Bei einem Partialdruck von etwa 0.12 bar ergibt sich der Taupunkt zu 50 °C. Daraus folgt mit entsprechendem Sicherheitszuschlag eine Brenngasmindesttemperatur von 60 °C. Andere bereits getestete Brennstoffe, wie MBS oder Lackschlamm wiesen keine höheren Anteile an elementarem Wasserstoff und Wasser auf, so daß keine signifikante Verschiebung des Taupunktes nach oben zu erwarten ist.

### Verfahrensüberblick

Das heiße Rohgas strömt abwärts gerichtet durch die Waschsäule. Im Gleichstrom dazu wird Heizöl EL als Kühlmedium über eine Düse eingespritzt.

Das gekühlte und gereinigte Brenngas (Reingas) wird am Boden der Waschsäule seitlich abgezogen. Es ist zu diesem Zeitpunkt ölgesättigt. Ein nachfolgender Tropfenabscheider (Drahtgestrick) dient zum Rückhalten mitgerissener Waschöltropfen.

Um die Kondensation im weiteren Verlauf so gering wie möglich zu halten und den Verlust der Waschflüssigkeit (als Dampfanteil) zu begrenzen, wird das Brenngas nach der Wäsche mit Wasser abgekühlt.

Das Waschöl wird am Kopf der Waschsäule im Gleichstrom zum eintretenden heißen Brenngas eingespritzt. Ziel ist es, eine ausreichend hohe Relativgeschwindigkeit zwischen flüssiger und gasförmiger Phase zu erreichen. Es ist daher nicht sinnvoll,

das Waschöl fein zu zerstäuben. Es ist ausreichend, die Flüssigkeit gleichmäßig über den Wäscherquerschnitt zu verteilen und somit eine vollständige Benetzung des Mischbleches sicher zu stellen.

Das Waschöl wird am Boden der Waschsäule (Sumpf) abgezogen und in einen nachgeordneten Tank geleitet. Das verunreinigte Waschöl wird im Ölfilter gereinigt und anschließend in einem wassergekühlten Wärmeübertrager auf die Ausgangstemperatur gebracht. Für die Zirkulation des Waschöls sorgt eine Ölpumpe, wobei die Kreislaufmenge durch ein Drosselventil eingestellt werden kann.

### Meß- und Automatisierungskonzept

Folgende Meßstellen sind vorgesehen:

| Meßstelle | Meßort                          | Medium    | Meßbereich | Typischer Meßwert | Gerät                   |
|-----------|---------------------------------|-----------|------------|-------------------|-------------------------|
| FR 170    | Waschflüssigkeit                | Heizöl EL | 0-2000 l/h | 1000 l/h          | Schwebekegel            |
| PDRA 270  | Differenzdruck Filter 1         | Heizöl EL |            |                   |                         |
| PDRA 271  | Differenzdruck Filter 2         | Heizöl EL |            |                   |                         |
| TR 305    | Austritt Vergaser               | Brenngas  | 0-800 °C   | 600 °C            | NiCr-Ni                 |
| TR 370    | Gaseintritt am Wäscher          | Brenngas  | 0-800 °C   | 350 °C            | NiCr-Ni                 |
| TR 371    | Gasaustritt am Wäscher          | Brenngas  | 0-800 °C   | 70 °C             | NiCr-Ni                 |
| TR 372    | vor Gasnutzung                  | Brenngas  | 0-800 °C   | 50 °C             | NiCr-Ni                 |
| TR 373    | Behälter Waschflüssigkeit       | Heizöl EL | 0-120 °C   | 60 °C             | Pt 100                  |
| TR 374    | Einspritzung Waschflüssigkeit   | Heizöl EL | 0-120 °C   | 40 °C             | Pt 100                  |
| TR 375    | Vorlauf Rohgaskühler            | Wasser    | 0-120 °C   |                   | Pt 100                  |
| TR 376    | Vorlauf Waschflüssigkeitskühler | Wasser    | 0-120 °C   |                   | Pt 100                  |
| TR 377    | Vorlauf Reingaskühler           | Wasser    | 0-120 °C   |                   |                         |
| TR 378    | Rücklauf Kühlwasser             | Wasser    | 0-120 °C   |                   |                         |
| LRA 470+  | Boden Gaswäsche                 | Heizöl EL |            |                   | Vibrationsgrenzscharter |

| Meßstelle | Meßort                     | Medium    | Meßbereich | Typischer Meßwert | Gerät                   |
|-----------|----------------------------|-----------|------------|-------------------|-------------------------|
| LRA 470+  | Füllstand Waschflüssigkeit | Heizöl EL |            |                   | Vibrationsgrenzscharter |
| QRA 570   | Sauerstoffkonzentration    | Brenngas  |            | 0 Vol-%           | O2-Transmitter          |

**Tabelle 5:** Meßstellenliste Brenngasreinigung mit Dieselwäscher

Bei Überschreitung werden eine Alarmmeldung ausgelöst und die Magnetventile des Ölkreislaufes geschlossen. Folgende Grenzwerte werden von der Steuerung überwacht:

| Meßstelle | Bezeichnung                         | Grenzwerte |
|-----------|-------------------------------------|------------|
| TR 370    | Temperatur Gaseintritt am Wäscher   | 450 °C     |
| TR 371    | Temperatur Gasaustritt am Wäscher   | 80 °C      |
| TR 373    | Temperatur im Wäschersumpf          | 70 °C      |
| TR 374    | Temperatur der Öleinspritzung       | 70 °C      |
| QRA 570   | Sauerstoffkonzentration im Brenngas | 0,5 Vol-%  |

**Tabelle 6:** Grenzwertüberwachung der Brenngasreinigung mit Dieselwäscher

### Antriebe und Stellorgane

| Bezeichnung | Beschreibung               | Anschlußleistung [kW] | Betriebsart  |
|-------------|----------------------------|-----------------------|--------------|
| P 01        | Kreislaufpumpe Waschlösung | 0,2                   | Dauerbetrieb |
| P 03        | Kühlwasserpumpe            | 0,2                   | Dauerbetrieb |
| MV1         | Magnetventil 1             |                       | Dauerbetrieb |
| MV2         | Magnetventil 2             |                       | Dauerbetrieb |

**Tabelle 7:** Antriebe und Stellorgane der Brenngasreinigung mit Dieselwäscher

### Sicherheitsbetrachtungen

Bei der Dieselwäsche treffen zwei leicht entzündliche Medien aufeinander, es sind daher hohe Sicherheitsvorkehrungen zu treffen. Die Abwesenheit von Sauerstoff muß zu jedem Zeitpunkt während des Betriebes gewährleistet sein, um die Bildung zündfähiger Gemische zu unterbinden. Ein Sensor auf der Reingasseite mißt konti-

nuierlich den Sauerstoffgehalt im Brenngas. Damit wird gleichzeitig eine bessere Beurteilung des Brennstoffumsatzes in der Vergasungszone möglich.

Als Sauerstoff-Sensor ist der Sauerstoff-Transmitter O<sub>2</sub>X1 in Ausführung OX4 der Fa. Panametrics vorgesehen.

Eine Überwachung der Temperaturen von Waschöl und Brenngas ist unerlässlich. Ein allmählicher Temperaturanstieg zeigt Vergasungsstörungen oder geringfügige O<sub>2</sub>-Anstiege an. In diesem Fall bleibt nach dem Auslösen der Alarmmeldung genügend Zeit, den Wäscher außer Betrieb zu nehmen und den Bypass zuzuschalten.

Bei Detonation oder Verpuffung erfolgt der Druckabbau über eine Berstscheibe, deren Ansprechdruck relativ niedrig (< 100 kPa) liegen muß, um Beschädigungen des Vergasers oder der nachfolgenden Anlagenteile zu vermeiden.

### *Anlagenbetrieb*

Der Gaswäscher läßt sich 'trocken' (ohne Waschflüssigkeit) oder 'naß' (mit Waschflüssigkeit) betreiben. Ein Wechsel zwischen beiden Betriebsformen muß jederzeit und ohne Einschränkungen möglich sein.

Während des Inbetriebsetzens des Vergasers läuft die Gaswäsche trocken, die Waschsäule stellt in diesem Fall lediglich eine „verlängerte Rohrleitung“ dar. Nach Erreichen der Betriebstemperatur (Temperatur am Vergaseraustritt bleibt konstant) wird die Waschölauführung eingeschaltet. Bei Überschreiten der zulässigen Gaseintrittstemperatur in den Wäscher oder bei anderen Störungen wird automatisch in den „trockenen“ Betrieb gewechselt.

Ist der Waschölfiter beladen und muß erneuert werden, wird ebenfalls in den „trockenen“ Betrieb umgeschaltet.

Anschließend werden das Ausgangs- und das Eingangsventil des Filterbehälters manuell abgesperrt und die Umgehung des Behälters geöffnet. Der angeflanschte Deckel des Filterbehälters wird gelöst, der Filtereinsatz entnommen und das beladene Filtermaterial erneuert. Nach Schließen des Filterbehälters wird das Eingangsventil geöffnet und die Ölleitung entlüftet.

### *Weitere Ausbaustufen*

Das Verfahren kann durch einen zweiten parallel geschalteten Waschölfiter ergänzt werden. Das würde Stillstandszeiten der Brenngaswäsche vermeiden.

Für den längerfristigen oder kontinuierlichen Anlagenbetrieb muß das Kühlwasser über einen Luftkühler abgekühlt und im Kreislauf geführt werden.

Im größeren Maßstab müßte das Handling des Filtermaterials automatisiert werden (Wechsel des angesteuerten Filters, Entnahme des beladenen Filtermaterials und Zugabe zum Vergaserbrennstoff), da die anfallende Menge Filtermaterial proportional zur Vergaserleistung (bzw. der Brenngasmenge) ansteigt.

Findet das Verfahren in größeren Vergasungsanlagen mit motorischer Gasnutzung Anwendung, so ist untrennbar mit dem Gasmotor auch eine Möglichkeit zur geson-

dernten Verbrennung des Gases (z.B. während des Anfahrbetriebs) vorzusehen. Dafür kommen entweder eine Fackel oder eine Brennkammer in Frage.

[9]

## 6.5 Vergasungsversuche mit getrockneten Schlämmen

### 6.5.1 Klärschlamm

Es wurden Vergasungsversuche mit Klärschlamm zur Ermittlung der Brenngasparameter bei unterschiedlichen Vergasungsluftströmen und zur Bestimmung der NO<sub>x</sub>-Emission bei Verbrennung des Brenngases aus Klärschlamm (s. Abschnitt 6.4) durchgeführt.

Der verwendete getrocknete Klärschlamm stammt aus der produzierenden Klärschlamm-trocknungsanlage der Firma Fritz Schorfmann GmbH & Co. KG, Grasberg. Die ursprüngliche feinkörnige Granulatform dieses Materials erwies sich als ungeeignet für den Einsatz in einer LQV-Anlage.

Aus diesem Grunde war der Klärschlamm für den hier betrachteten Versuch durch die Firma bepex GmbH Leingarten zu kissenförmigen Briketts (35x35x20 mm) kompaktiert worden.

Tabelle 8 zeigt die wesentlichsten Parameter des vergastem Klärschlammes.

| Parameter                   | Meßwert     |
|-----------------------------|-------------|
| Trockensubstanz             | 83,9 %      |
| Organische Substanz         | 61,1 % TS   |
| Mineralische Substanz       | 38,9 % TS   |
| pH-Wert                     | 7,1         |
| Stickstoff (gesamt) als N   | 4,82 % TS   |
| Stickstoff (Ammonium) als N | 0,23 % TS   |
| Kohlenstoff                 | 39,6 % TS   |
| Sauerstoff                  | 10,7 % TS   |
| Wasserstoff                 | 6,4 % TS    |
| Schwefel                    | 2,1 % TS    |
| Heizwert                    | 13130 kJ/kg |

**Tabelle 8:** Zusammensetzung des Klärschlammes

Es wurden folgende Brenngaswerte gemessen:

|                                    |       |      |
|------------------------------------|-------|------|
| Probe                              | 11    | 12   |
| Vergasungsluft [m <sup>2</sup> /h] | 59    | 42   |
| Rauchgasrezi [m <sup>2</sup> /h]   | 17    | 20   |
| Wasserstoff [Vol-%]                | 8,3   | 4,4  |
| Methan [Vol-%]                     | 0,5   | 0,5  |
| Kohlenmonoxid [Vol-%]              | 5,2   | 3,2  |
| Kohlendioxid [Vol-%]               | 14,4  | 14,8 |
| Sauerstoff [Vol-%]                 | < 0,1 | 1,3  |
| Heizwert [kJ/m <sup>3</sup> ]      | 1731  | 1056 |

**Tabelle 9:** Brenngaswerte bei der Vergasung von Klärschlamm

Der sich in vorangegangenen Versuchen andeutende Trend zur Heizwertsteigerung des Schwachgases durch Steigerung des Vergasungsluftvolumenstromes hat sich prinzipiell bestätigt. Der höhere Druckverlust über dem Luftverteilungsrohr bei größeren Luftströmen bewirkt eine bessere Verteilung der Vergasungsluft über der Breite des Vergaserbettes.

Die Klärschlammbricketts zeigten nur in den äußeren Schichten einen guten Ausbrand. Im Inneren liegt ein hoher Anteil nicht umgesetzten Brennstoffes (Schwarzfärbung) vor.

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen nach Verbrennung des Brenngases aus Klärschlamm lagen mit Werten um 2000 mg/m<sup>3</sup> sehr hoch und überschritten die Grenzwerte nach 17. BImSchV um das 10-fache.

Um die Entstehung der Stickoxide zu lokalisieren, wurde NO<sub>x</sub> auch im Brenngas gemessen:

| Probenbezeichnung                                               | V1          | V2   | V3   | V4          | V5    |
|-----------------------------------------------------------------|-------------|------|------|-------------|-------|
| Brennstoff                                                      | Holzbrikett |      |      | Klärschlamm |       |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> i.N.tr.] | 46,8        | 31,0 | 39,0 | 261,7       | 187,9 |

**Tabelle 10:** NO<sub>x</sub>-Gehalt im Brenngas bei unterschiedlichen Einsatzstoffen

Es zeigt sich, daß NO<sub>x</sub> nur zu einem geringen Anteil von ca. 10 % bei der Vergasung gebildet wird. Der überwiegende Teil NO<sub>x</sub> entsteht bei der Verbrennung des Brenngases.

Dementsprechend wurden Minderungsmaßnahmen an der Brennkammer durchgeführt (s. Abschnitt 6.4).

[2] [3] [4]

## 6.6 Vergasungsversuche mit aufbereitetem Restmüll

### 6.6.1 Mechanisch-Biologisches-Stabilat (MBS)

Mit MBS wurden insgesamt 3 Vorversuche von jeweils 12 h Dauer und daran anschließend ein Stabilitätsversuch von 24 h Dauer durchgeführt.

Das MBS (HerHof Umwelttechnik GmbH, Solms-Niederbiehl) wurde durch Lehmann Umwelttechnik GmbH, Jocketa, zu Pellets (Durchmesser ca. 25 mm, Länge 20-60 mm) kompaktiert.

|             |             |
|-------------|-------------|
| Aschegehalt | 50,6 Ma-%   |
| Heizwert    | 10770 kJ/kg |
| Kohlenstoff | 25,0 Ma-%   |
| Wasserstoff | 3,67 Ma-%   |
| Stickstoff  | 0,96 Ma-%   |

**Tabelle 11:** Brennstoffanalyse MBS HerHof

Im Rahmen der 12 h-Vorversuche wurden die Temperaturen und die Vergaserleistung variiert. Im Ergebnis lassen sich u.a. Aussagen über die resultierende Brenngaszusammensetzung und das Ascheschmelzverhalten treffen.

Um einen Dauerbetrieb der LQV-Anlage mit MBS zu ermöglichen, waren folgende Bedingungen einzuhalten:

- kurze Intervalle zwischen zwei Rostbewegungen: 0,7 min
- kein Überschreiten der max. Vergasertemperatur über ca. 850°C
- Fahrweise mit Wassereinspritzung und Rauchgasrückführung in die Vergasungsluft

Im Verlauf der Versuche wurden Brenngasproben entnommen und auf die Gehalte an Wasserstoff, Methan, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Sauerstoff analysiert. Aus diesen Analysendaten wurde der Heizwert  $H_u$  berechnet. In Tabelle 12 sind die Ergebnissen der Analysen mit den dazugehörigen Vergasungsmittelströmen (Luft, Wasser und Rauchgas) und der Heizwert des Gases  $H_u$  zusammengestellt. Bei der Vergasung des Contec-Stabilates war ein gewisser Restsauerstoffgehalt im Brenngas festzustellen, d.h., es war noch überschüssige Luft enthalten. Aus diesem Grund wurde der Heizwert auf einen Zustand frei von überschüssiger Luft, also vollständigem Sauerstoffumsatz, berechnet. Dieser Heizwert ist als  $H_u(\text{korr})$  ebenfalls in der Tabelle aufgeführt. Die tatsächlichen Heizwerte bei vollständigem Sauerstoffumsatz

liegen jedoch noch höher, daß die damit verbundene zusätzliche Wärmefreisetzung wurde bei der Rechnung nicht berücksichtigt.

| <b>Probe</b>                  | <b>50</b> | <b>51</b> |
|-------------------------------|-----------|-----------|
| H <sub>2</sub> in Vol.-%      | 3,9       | 4,5       |
| CH <sub>4</sub> in Vol.-%     | 0,9       | 0,9       |
| CO in Vol.-%                  | 2,6       | 4,8       |
| CO <sub>2</sub> in Vol.-%     | 2,6       | 4,8       |
| O <sub>2</sub> in Vol.-%      | 6,8       | 5,4       |
| Hu in kJ/m <sup>3</sup>       | 1070      | 1413      |
| Hu(korr) in kJ/m <sup>3</sup> | 1582      | 1902      |

**Tabelle 12:** Brenngaszusammensetzung der 12 h-Vorversuche mit MBS

Weiterhin wurde ein Stabilitätsversuch über 24 h gefahren.

Es konnte gezeigt werden, daß bei der Vergasung von MBS auch über einen Zeitraum von 24 h ein kontinuierlicher Betrieb möglich ist.

In jedem Fall muß ein Anstieg der Vergasertemperaturen auf Werte oberhalb ca. 850 °C verhindert werden, um das Risiko von Verschlackungen zu minimieren. Deshalb ist eine kontinuierliche Wassereinspritzung notwendig, um die geforderten Temperaturen zu gewährleisten. Die Wassermenge sollte im Normalfall mindestens 6 l/h betragen, bei zu geringen Vergasertemperaturen bzw. bei starkem Temperaturabfall im Vergaser kann diese Menge kurzzeitig reduziert werden. Zusätzlich ist eine Rauchgasrückführung in die Vergasungsluft erforderlich.

Eine Sichtbeurteilung des Vergasungsrückstandes zeigte einen befriedigenden Ausbrand und eine zum großen Teil pulverige Beschaffenheit. Verbackungen oder gar Verschlackungen waren nicht festzustellen.

Gegenüber den Vorversuchen konnten überwiegend bessere Brenngaswerte erzielt werden:



| Probe           |                      | 53   | 54   | 55   | 56   |
|-----------------|----------------------|------|------|------|------|
| H <sub>2</sub>  | in Vol.-%            | 7,1  | 7,3  | 5,4  | 4,7  |
| CH <sub>4</sub> | in Vol.-%            | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 0,9  |
| CO              | in Vol.-%            | 4,4  | 4,6  | 4,1  | 2,4  |
| CO <sub>2</sub> | in Vol.-%            | 17,0 | 14,5 | 15,1 | 14,3 |
| O <sub>2</sub>  | in Vol.-%            | 2,1  | 2,2  | 2,6  | 5,2  |
| Hu              | in kJ/m <sup>3</sup> | 1785 | 1832 | 1565 | 1131 |
| Hu(korr)        | in kJ/m <sup>3</sup> | 1983 | 2046 | 1786 | 1503 |

**Tabelle 13:** Brenngaszusammensetzungen des 24 h-Stabilitätsversuches mit MBS [5] [6]

### 6.6.2 Contec-Stabilat

Weitere Untersuchungen wurden mit Contec-Stabilat durchgeführt. Das Stabilat wurde von der Firma Nehlsen GmbH & Co. KG in Form von Preßballen zur Verfügung gestellt. Zur Aufbereitung wurde das Produkt zunächst bei D&W Sondermaschinen- und Vorrichtungsbau GmbH Parchim geshreddert. Das zerkleinerte Material wurde anschließend bei der Firma Lehmann Umwelttechnik GmbH Jocketa pelletiert. Diese Pellets hatten einen Durchmesser von 40 mm und eine Länge von durchschnittlich 50 bis 70 mm.

Die Untersuchung einer Probe des pelletierten Materials brachte folgende Ergebnisse:

|                        |          |       |
|------------------------|----------|-------|
| Wassergehalt           | in Ma-%  | 2,5   |
| Aschegehalt (815 °C)   | in Ma-%  | 30,3  |
| Kohlenstoff            | in Ma-%  | 37,8  |
| Wasserstoff            | in Ma-%  | 5,52  |
| Stickstoff             | in Ma-%  | 1,48  |
| Schwefel, verbrennl.   | in Ma-%  | 0,044 |
| Chlor                  | in Ma-%  | 0,69  |
| Sauerstoff (berechnet) | in Ma-%  | 21,7  |
| Hu                     | in kJ/kg | 14490 |

**Tabelle 14:** Zusammensetzung Contec-Stabilat

Die Beschaffenheit und Zusammensetzung des Contec-Stabilates unterschied sich von MBS, so daß zusätzliche Vorversuche zum Vergasungsverhalten erforderlich wurden. Insgesamt wurden wiederum 3 Vorversuche von jeweils 12 h Dauer und ein Stabilitätsversuch von 24 h ausgeführt. Abschließend wurde ein Dauerversuch von 150 h durchgeführt.

### 12 h-Vorversuche

Tabelle 15 zeigt die Brenngaswerte der 12 h-Vorversuche.

| Probe                         | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Luft in m <sup>3</sup> /h     | 18   | 17   | 15   | 16   | 27   | 30   |
| Wasser in l/h                 | 6    | 6    | 9,5  | 6    | 13   | 16   |
| Rauchgas in m <sup>3</sup> /h | 13   | 11   | 0    | 1    | 1    | 11   |
| H <sub>2</sub> in Vol.-%      | 5,1  | 5,6  | 5,0  | 5,9  | 6,1  | 4,8  |
| CH <sub>4</sub> in Vol.-%     | 0,9  | 1,3  | 1,1  | 1,1  | 1,1  | 1,1  |
| CO in Vol.-%                  | 2,9  | 3,1  | 4,5  | 4,8  | 4,4  | 4,1  |
| CO <sub>2</sub> in Vol.-%     | 13,0 | 14,4 | 15,8 | 16,4 | 14,5 | 15,8 |
| O <sub>2</sub> in Vol.-%      | 4,1  | 3,4  | 2,2  | 1,5  | 5,0  | 2,2  |
| Hu in kJ/m <sup>3</sup>       | 1237 | 1460 | 1500 | 1635 | 1606 | 1429 |
| Hu(korr) in kJ/m <sup>3</sup> | 1537 | 1742 | 1676 | 1761 | 2108 | 1596 |

**Tabelle 15:** Brenngaszusammensetzung der 12 h-Vorversuche mit Contec-Stabilat

Ergebnisse der Vorversuche:

1. Das Contec-Stabilat ist mit dem LQV-Verfahren energetisch verwertbar.
2. Beim Einsatz von ausschließlich Luft als Vergasungsmittel besteht die Gefahr der Verschlackung infolge zu hoher Temperaturen im Vergaser. Durch Rückführung von Rauchgas zur Vergasungsluft oder durch Erhöhung des Wassergehaltes im Brennstoff bzw. Zusatz von Wasser zur Vergasungsluft ist die Überhitzung beherrschbar.
3. Die Rückführung von Rauchgas zur Vergasungsluft führt zu einer stärkeren Minderung des Gasheizwertes gegenüber einem Wasserzusatz. Letzterer ist aber gleichbedeutend einem höheren Wassergehalt und damit niedrigerem Heizwert des Brennstoffes und führt entsprechend den thermodynamischen Berechnungen ebenfalls zu einer Heizwertminderung des Gases gegenüber wasserärmeren Brennstoffen.
4. Der Zugabe von Wasser in flüssiger Form sind auch dadurch Grenzen gesetzt, daß bei der vorhandenen konstruktiven Gestaltung durch die vorgewärmte Vergasungsluft nur eine bestimmte Wassermenge verdampft werden kann. Die Auswirkung des nicht verdampften Anteils ist unkontrolliert.

5. Die Leistung des Vergasers beim Einsatz von Contec-Stabilat wird sowohl wegen der erforderlichen Einhaltung der maximalen Vergasertemperatur als auch wegen des hohen Ascheanfalls begrenzt.
6. Bei den durchgeführten Versuchen mit Contec-Stabilat, die mit relativ niedriger Leistung entsprechend einem niedrigen Vergasungsluftstrom durchgeführt werden mußten, ist ein unvollständiger Sauerstoffumsatz festzustellen.

#### 24 h-Stabilitätsversuch

Es wurde ein Stabilitätsversuch über eine Laufzeit von 24 h durchgeführt. Mit diesem Versuch wurde getestet, ob eine stabile Fahrweise des Vergasers realisiert werden kann und die Durchführung des 150-h-Versuches damit gewährleistet ist.

Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 16 zusammengestellt:

| Probe - Nr.                   | 7    | 8    | 9    | 10   |
|-------------------------------|------|------|------|------|
| Luft in m <sup>3</sup> /h     | 19   | 17   | 15   | 21   |
| Rauchgas in m <sup>3</sup> /h | 9    | 11   | 8    | 2    |
| Wasser in l/h                 | 3    | 3    | 3    | 6    |
| H <sub>2</sub> in Vol.-%      | 7,0  | 7,0  | 6,9  | 7,0  |
| CH <sub>4</sub> in Vol.-%     | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  |
| CO in Vol.-%                  | 4,7  | 4,7  | 4,5  | 4,5  |
| CO <sub>2</sub> in Vol.-%     | 15,0 | 16,0 | 15,8 | 15,8 |
| O <sub>2</sub> in Vol.-%      | 1,0  | 1,0  | 1,1  | 1,3  |
| Hu in kJ/m <sup>3</sup>       | 1705 | 1705 | 1669 | 1680 |
| Hu(korr) in kJ/m <sup>3</sup> | 1790 | 1790 | 1761 | 1790 |

**Tabelle 16:** Ergebnisse des 24-h-Stabilitätsversuches mit Contec-Stabilat

Über die gesamte Dauer des 24-h-Versuches wurde ein stabiler Versuchsbetrieb gewährleistet. Die in den Vorversuchen gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse wurden mit diesem Versuch bestätigt.

Mit der Durchführung des 24-h-Versuches wurde nachgewiesen, daß unter den gewählten Vergasungsbedingungen eine längere Versuchsdurchführung unter stabilen Bedingungen möglich ist und die erfolgreiche Durchführung des geplanten 150 h-Versuches damit gewährleistet werden kann.

### 150 h-Versuch

Die während der gesamten Versuchszeit in den Vergaser eingetragenen Ströme des Brennstoffs und ausgetragenen Ströme des Reststoffs sind in Tabelle 17 zusammengestellt.

| Datum    | Contec-Stabilat<br>in kg/d | Contec-Stabilat<br>in kg/h | Asche<br>in kg/d | Asche<br>in kg/h | Asche<br>in % |
|----------|----------------------------|----------------------------|------------------|------------------|---------------|
| 26.10.97 | 320,2                      | 24,63                      | 98,3             | 7,56             | 30,7          |
| 27.10.97 | 559,6                      | 23,32                      | 223,1            | 9,30             | 39,9          |
| 28.10.97 | 455,3                      | 18,97                      | 197,1            | 8,21             | 43,3          |
| 29.10.97 | 491,7                      | 20,49                      | 177,8            | 7,41             | 36,2          |
| 30.10.97 | 501,7                      | 20,90                      | 200,4            | 8,35             | 39,9          |
| 31.10.97 | 427,7                      | 17,82                      | 188,3            | 7,85             | 44,0          |
| 01.11.97 | 178,0                      | 18,74                      | 79,0             | 8,32             | 44,4          |
| Gesamt   | 2934,3 kg                  | 20,6                       | 1164,0 kg        | 8,2              | 39,7          |

**Tabelle 17:** Brennstoffeinsatz und Ascheaustrag 150 h-Versuch mit Contec-Stabilat

Die Analytik des erzeugten Gases erfolgte durch die Entnahme von Gasproben im Abstand von 6 h. Diese Gasproben wurden auf den Gehalt an Wasserstoff, Methan, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Restsauerstoff untersucht. Aus den Anteilen der Komponenten Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Methan im Brenngas wurde der Gasheizwert  $H_u$  berechnet.

Der analytisch ermittelte Restsauerstoffgehalt im Brenngas ist ungewöhnlich. Ohne vorerst die Ursachen für die im Brenngas enthaltenen Luftanteile zu diskutieren, wird der aus den Analysendaten berechnete Heizwert  $H_u$  auf vollständigen Sauerstoffumsatz, d.h. sauerstofffreies Brenngas, korrigiert und als korrigierter Heizwert  $H_u(\text{korr})$  angegeben.

In Tabelle 18 sind diese Ergebnisse mit den daraus berechneten Heizwerten sowie die dazugehörigen Vergasungsluftströme, Wasserzugabemengen und Rauchgasströme in der zeitlichen Folge zusammengestellt.

| Probe - Nr.                        | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Luft in m <sup>3</sup> /h          | 18   | 18   | 19   | 17   | 16   | 18   | 15   | 15   |
| Rauchgas in m <sup>3</sup> /h      | 11   | 9    | 11   | 9    | 6    | 7    | 4    | 9    |
| Wasser in l/h                      | 6    | 6    | 6    | 6    | 3    | 3    | 3    | 3    |
| H <sub>2</sub> in Vol.-%           | 5,6  | 6,0  | 4,8  | 8,1  | 4,9  | 4,9  | 4,8  | 4,7  |
| CH <sub>4</sub> in Vol.-%          | 0,4  | 1,0  | 1,1  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 0,4  |
| CO in Vol.-%                       | 3,6  | 3,2  | 2,7  | 3,0  | 2,7  | 2,7  | 2,5  | 3,1  |
| CO <sub>2</sub> in Vol.-%          | 14,0 | 12,0 | 12,0 | 14,2 | 14,2 | 14,2 | 12,0 | 15,2 |
| O <sub>2</sub> in Vol.-%           | <0,1 | <0,1 | 7,2  | 5,7  | 5,3  | 5,4  | 7,0  | 3,6  |
| Hu in kJ/m <sup>3</sup> i.N.       | 1200 | 1408 | 1251 | 1608 | 1226 | 1226 | 1190 | 1040 |
| Hu(korr) in kJ/m <sup>3</sup> i.N. | 1200 | 1408 | 1904 | 2207 | 1640 | 1650 | 1785 | 1256 |

| Probe - Nr.                        | 25   | 26   | 27   | 28   | 29   | 30   | 31   | 31.2 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Luft in m <sup>3</sup> /h          | 14   | 17   | 13   | 15   | 14   | 13   | 14   | 13   |
| Rauchgas in m <sup>3</sup> /h      | 14   | 12   | 10   | 6    | 6    | 6    | 5    | 6    |
| Wasser in l/h                      | 3    | 3    | 3,6  | 3,6  | 3,6  | 4,8  | 4,8  | 2,4  |
| H <sub>2</sub> in Vol.-%           | 4,7  | 4,9  | 4,1  | 4,4  | 4,4  | 5,8  | 5,6  | 5,6  |
| CH <sub>4</sub> in Vol.-%          | 1,0  | 0,4  | 1,0  | 0,4  | 0,4  | 1,0  | 1,0  | 1,0  |
| CO in Vol.-%                       | 2,8  | 3,2  | 2,9  | 3,0  | 2,6  | 3,4  | 3,1  | 4,3  |
| CO <sub>2</sub> in Vol.-%          | 14,0 | 14,5 | 14,0 | 14,2 | 14,0 | 13,6 | 14,0 | 13,6 |
| O <sub>2</sub> in Vol.-%           | 3,7  | 3,8  | 3,7  | 5,5  | 5,9  | 7,4  | 7,4  | 5,1  |
| Hu in kJ/m <sup>3</sup> i.N.       | 1217 | 1074 | 1166 | 995  | 945  | 1411 | 1352 | 1504 |
| Hu(korr) in kJ/m <sup>3</sup> i.N. | 1478 | 1312 | 1414 | 1349 | 1314 | 2180 | 2088 | 1986 |

| Probe - Nr.                        | 32   | 33   | 34   | 35   | 36   | 37   |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Luft in m <sup>3</sup> /h          | 14   | 10   | 17   | 13   | 12   | 10   |
| Rauchgas in m <sup>3</sup> /h      | 4    | 4    | 10   | 8    | 10   | 7    |
| Wasser in l/h                      | 4,8  | 3    | 4,8  | 2,4  | 3    | 3    |
| H <sub>2</sub> in Vol.-%           | 6,8  | 6,8  | 5,1  | 5,1  | 4,7  | 4,8  |
| CH <sub>4</sub> in Vol.-%          | 1,2  | 1,0  | 1,0  | 1,1  | 1,2  | 1,0  |
| CO in Vol.-%                       | 5,0  | 4,9  | 4,1  | 4,0  | 3,9  | 4,4  |
| CO <sub>2</sub> in Vol.-%          | 12,2 | 13,4 | 12,8 | 12,2 | 13,0 | 12,4 |
| O <sub>2</sub> in Vol.-%           | 5,2  | 4,9  | 6,3  | 6,4  | 6,4  | 6,5  |
| Hu in kJ/m <sup>3</sup> i.N.       | 1793 | 1708 | 1425 | 1448 | 1428 | 1380 |
| Hu(korr) in kJ/m <sup>3</sup> i.N. | 2383 | 2229 | 2036 | 2083 | 2054 | 1999 |

**Tabelle 18:** Vergasungsmittelleinsatz, Gaszusammensetzung und Gasheizwert im Verlauf des 150-h-Versuches

Aus diesen Tabellen ist abzulesen, daß die Heizwerte des Gases, auch die auf vollständigen Sauerstoffumsatz berechneten, deutliche Schwankungen aufweisen. Weil der Betriebszustand des Vergasers über den gesamten Versuch eine weitgehende Konstanz zeigt, können keine Anhaltspunkte für die Ursachen der Heizwertschwankungen erkannt werden. Es ist jedoch erkennbar, daß ein hoher Volumenstrom an Rauchgas zur Vergasungsluft zu einer Verringerung des Heizwertes führt.

In den Gasproben wurde fast immer ein zu hoher Sauerstoffgehalt gefunden. Nach den bisher vorliegenden Erfahrungen mit anderen Brennstoffen sind  $\leq 0,1$  Vol.-% Restsauerstoff als normal anzusehen. Der hohe Sauerstoffgehalt ist gleichbedeutend einem ungenügenden Sauerstoffumsatz, was auf einen unzureichenden Kontakt zwischen der festen und der Gasphase hindeutet. Da bei anderen Brennstoffen und höherer Leistung, also höherem Luftstrom und damit kürzerer Verweilzeit, in der vorhandenen Technikumanlage praktisch vollständiger Sauerstoffumsatz erreicht wird, muß eine gewisse Reaktionsträgheit des eingesetzten Contec-Stabilates diesen geringeren Umsatz verursachen. Ein Einfluß der erforderlichen Einhaltung einer bestimmten maximalen Temperatur ist dabei nicht auszuschließen. Durch konstruktive Maßnahmen, die auf Verweilzeit und Strömung Einfluß nehmen, kann der Sauerstoffumsatz positiv beeinflusst werden.

Die kontinuierliche Messung der Emissionen an Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid und Stickstoffoxiden (als Stickstoffdioxid) erfolgte durch die VER GmbH über die gesamte Versuchszeit des 150-h-Versuches. Neben den genannten Komponenten wurde auch der Gehalt an Kohlendioxid und der Restsauerstoffgehalt gemessen. Die Messung erfolgte im Reingas nach der Rauchgasreinigung und wurde mit dem Gerät

Horiba PG 250 vorgenommen. Die Messung aller Emissionen entsprechen sämtlichen Vorgaben der 17. BImSchV § 4 (6) und §5 wurden von der Ingenieurgesellschaft Umweltschutz, Meß- und Verfahrenstechnik GmbH, Dresden, im Auftrag der VER GmbH vorgenommen. Die Messungen wurden am 27.10. und am 28.10.97 über jeweils 6 Stunden durchgeführt.

Als Staubinhaltsstoffe sind entsprechend den Forderungen des §5(1)3 17. BImSchV zu verstehen:

Metalle a: Summe von Cd und Tl

Metalle b: Hg

Metalle c: Summe von Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V und Sn.

Bei der Bestimmung werden sowohl die Elemente als auch deren Verbindungen in staubgebundener und filtergängiger Form erfaßt.

In der Tabelle 19 sind die über die gesamte Meßzeit ermittelten Mittelwerte für die beiden Meßtage zusammengestellt. Die entsprechenden Werte für das Rohgas sind, soweit diese ermittelt wurden, den Meßergebnissen für das gereinigte Rauchgas gegenübergestellt. Gleichzeitig sind Grenzwerte nach der 17. BImSchV mit aufgeführt.

Dabei ist mit TM die zulässige Tagesmittel-Emissionsgrenze bezeichnet, ohne Zusatz gilt der Grenzwert für die jeweilige Probenahmezeit.

| Parameter       | Einheit                 | 27.10.97 |              | 28.10.97 |             | Grenzwert |
|-----------------|-------------------------|----------|--------------|----------|-------------|-----------|
|                 |                         | Rohgas   | Reingas      | Rohgas   | Reingas     |           |
| O <sub>2</sub>  | Vol.-%                  | -        | 3,15         | -        | 4,86        |           |
| CO              | mg/m <sup>3</sup>       | -        | <b>216,8</b> | -        | 21,4        | 50 (TM)   |
| Cges            | mg/m <sup>3</sup>       | -        | 1,46         | -        | 0,98        | 10 (TM)   |
| HCl             | mg/m <sup>3</sup>       | 117,4    | 0,843        | 121,8    | 0,923       | 10 (TM)   |
| HF              | mg/m <sup>3</sup>       | -        | <0,238       | -        | <0,189      | 1 (TM)    |
| SO <sub>2</sub> | mg/m <sup>3</sup>       | 372,8    | 11,3         | 295,1    | 47,5        | 50 (TM)   |
| NO <sub>x</sub> | mg/m <sup>3</sup>       | -        | <b>746,2</b> | -        | <b>1136</b> | 200 (TM)  |
| Gesamtstaub     | mg/m <sup>3</sup>       | 164,4    | 2,9          | 167,6    | 3,9         | 10 (TM)   |
| Metalle a       | mg/m <sup>3</sup>       | -        | 0,0012       | -        | 0,0004      | 0,05      |
| Metalle b       | mg/m <sup>3</sup>       | -        | 0,0010       | -        | 0,0005      | 0,05      |
| Metalle c       | mg/m <sup>3</sup>       | -        | 0,009        | -        | 0,013       | 0,5       |
| Dioxine         | ng I-TEQ/m <sup>3</sup> | 0,632    | 0,101        | 1,560    | 0,0517      | 0,1       |

**Tabelle 19:** Ergebnisse der Emissionsmessungen 150 h-Versuch mit Contec-Stabilat

Die in Tabelle 19 fett hervorgehobenen Meßwerte überschreiten die im Tagesmittel zulässigen Emissionsgrenzwerte. Daraus geht hervor, daß die zulässigen Grenzwerte der 17. BImSchV lediglich vom Kohlenmonoxid- und dem Stickstoffoxidgehalt überschritten werden. Alle anderen Meßwerte liegen zum Teil deutlich unterhalb der Grenzwerte.



Der hohe Stickstoffoxidgehalt im Rauchgas ist primär auf den Stickstoffgehalt des Brennstoffs zurückzuführen, eine Bildung aus Luftstickstoff ist unter den herrschenden Bedingungen ohne Bedeutung. Die Technikumanlage der VER ist nicht mit einer Minderungsanlage für Stickstoffoxide ausgerüstet, der Gehalt entspricht also dem des Rohgases. Zur Minderung des Gehaltes sind Primär- und Sekundärmaßnahmen möglich. Als Primärmaßnahme ist die gestufte Verbrennung möglich. Sekundärmaßnahmen sind in Form von katalytischer oder thermische selektiver Reduktion durchführbar. Es wird eingeschätzt, daß mit Primärmaßnahmen der Emissionsgrenzwert einzuhalten ist.

Der CO-Gehalt im Rauchgas ist in erster Linie abhängig von der Feuerungsregelung. Infolge der Kleinheit der Technikumanlage und den damit verbundenen geringen Gasströmen unterliegt die Regelung der Gasströme (z.B. Rauchgasrückführung, Verbrennungsluft) starken und kurzzeitigen Schwankungen, die ihrerseits zu den Schwankungen im CO-Gehalt des Rauchgases und kurzzeitigen Überschreitungen führen, zumal mit einem Restsauerstoffgehalt kurz oberhalb des Mindestgehaltes von 3 Vol.-% gearbeitet wurde. Solche Schwankungen sind ein Phänomen kleiner Anlagen (Technikumsmaßstab). In größeren Anlagen mit entsprechend großen Gasströmen ist die Regelung der Gasströme und damit die Einhaltung des CO-Grenzwertes problemlos.

Die gewonnenen Ascheproben und der Staub aus dem Filter vor dem Aktivkoksadsorber wurden auf die zutreffenden Parameter entsprechend Anhang D der TA Abfall bzw. Anhang B der TA Siedlungsabfall analysiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 20 den Grenzwerten der genannten Vorschriften gegenübergestellt. Extreme Überschreitungen der Grenzwerte sind durch Fettdruck hervorgehoben.

|                | Einheit | Anh.D<br>TA Abf. | Anh.B TAS<br>Dep.-Kl. I | Vergaser-<br>asche | Filterstaub   |
|----------------|---------|------------------|-------------------------|--------------------|---------------|
| Org.Anteil als |         |                  |                         |                    |               |
| Glühverlust    | Ma.-%   | ≤10              | ≤3                      | 7,77               |               |
| TOC            | Ma.-%   | keine Forder.    | ≤1                      | 9,58               | 0,76          |
| Lipophile St.  | Ma.-%   | ≤4               | ≤0,4                    | <0,005             |               |
| Eluatkriterien |         |                  |                         |                    |               |
| pH-Wert        |         | 4 - 13           | 5,5 - 13                | 9,89               | 5,93          |
| Leitfähigkeit  | μS/cm   | ≤100 000         | ≤10 000                 | 4 970              | 62 300        |
| TOC            | mg/l    | ≤200             | ≤20                     | 6,4                | 18,6          |
| Phenole        | mg/l    | ≤100             | ≤0,2                    | <0,01              | 0,02          |
| Arsen          | mg/l    | ≤1               | ≤0,2                    | 0,00053            | 0,028         |
| Blei           | mg/l    | ≤2               | ≤0,2                    | 0,027              | <b>63,0</b>   |
| Cadmium        | mg/l    | ≤0,5             | ≤0,05                   | 0,018              | <b>140</b>    |
| Chrom-VI       | mg/l    | ≤0,5             | ≤0,05                   | <0,02              | <0,02         |
| Kupfer         | mg/l    | ≤10              | ≤1                      | <0,004             | <b>266</b>    |
| Nickel         | mg/l    | ≤2               | ≤0,2                    | 0.015              | <b>15,7</b>   |
| Quecksilber    | mg/l    | ≤0,1             | ≤0,005                  | <0,0002            | 0,084         |
| Zink           | mg/l    | ≤10              | ≤2                      | 0,030              | <b>1230</b>   |
| Fluorid        | mg/l    | ≤50              | ≤5                      | <0,1               | <0,1          |
| Ammonium       | mg/l    | ≤1000            | ≤4                      | 1,2                | 724           |
| Chlorid        | mg/l    | ≤10 000          | keine Forder.           | 1160               | <b>21 800</b> |
| Cyanid         | mg/l    | ≤1               | ≤0,1                    | <0,01              | <0,02         |
| Sulfat         | mg/l    | ≤5000            | keine Forder.           | 697                | 4010          |
| Nitrit         | mg/l    | ≤30              | keine Forder.           | -                  | -             |
| AOX            | mg/l    | ≤3               | ≤0,3                    | 0,027              | 2,26          |
| Wasserl.Ant    | Ma.-%   | ≤10              | ≤3                      | 3,4                | <b>42,3</b>   |

**Tabelle 20:** Ergebnisse der Asche- und Staubuntersuchung 150 h-Versuch mit Contec-Stabilat

Die Brennstoffasche, die aus dem Vergaser abgezogen wurde, ist nach den Kriterien der TA Siedlungsabfall Anhang B als deponiefähig nach Deponieklasse 1 einzuordnen. Einzige Parameter, die die entsprechenden Forderungen überschreiten, sind der organische Anteil, ausgedrückt sowohl als Glühverlust als auch TOC, und der wasserlösliche Anteil.

Der Glühverlust und der TOC stehen in der TA Siedlungsabfall als Maß für den Gehalt an organischen kohlenstoffhaltigen Bestandteilen. Beide Kennwerte werden durch die Asche überschritten. Bemerkenswert und ungewöhnlich ist, daß der TOC zahlenmäßig den Glühverlust übersteigt. Unter Beachtung der Bestimmungsmethoden können daraus Rückschlüsse auf die Art des Kohlenstoffs gezogen werden. Der Glühverlust wird bei 550 °C in Luft ermittelt und der TOC bei 1000 °C im Sauerstoffstrom. Aus den Analyseergebnissen kann deshalb gefolgert werden, daß es sich um sehr reaktionsträgen Kohlenstoff handelt und nicht um organische Kohlenstoffverbindungen. Das wird auch dadurch bestätigt, daß der Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff (TOC) im Eluat deutlich unter dem geforderten Grenzwert liegt. Solcher reaktionsträger Kohlenstoff ist nicht verrottbar und stellt keinen Schadstoff dar.

Der Grenzwert für den wasserlöslichen Anteil wird durch die Asche ebenfalls überschritten. Im Widerspruch dazu steht allerdings der deutlich unter dem Grenzwert liegende Wert für die elektrische Leitfähigkeit, die ebenfalls ein Maß für gelöste Salze darstellt. Bei dem wasserlöslichen Anteil dürfte es sich hauptsächlich um Alkali-carbonat sowie um Alkali- und Erdalkalichloride und in geringerer Menge -sulfate handeln. Das geht einerseits aus dem gemessenen pH-Wert sowie dem Chlorid- und Sulfatgehalt des Ascheeluates hervor, die zeigen, daß die Chloride und Sulfate nur einen Teil des wasserlöslichen Anteils darstellen und der übrige Anteil als Carbonat auftritt. Andererseits kommen als Kationen keine Schwermetalle in Betracht, da deren Anteile im Eluat sehr gering und deutlich unter den Grenzwerten nach Anhang B der TA Siedlungsabfall liegen. Weiterhin geht aus den Staubanalysen hervor, daß das eingesetzte Contec-Stabilat einen recht hohen Alkali-, insbesondere Kaliumanteil besitzt, deren Salze durchweg wasserlöslich sind und die den überwiegenden wasserlöslichen Anteil der Contec-Stabilat-Asche darstellen. Der Kaliumgehalt dürfte pflanzlichen Ursprungs sein, also aus pflanzlichen Bestandteilen (Holz) bzw. Kompostierresten stammen. Diese Stoffe stellen jedoch keine Wassergefährdung dar, so daß die vorliegende geringfügige Überschreitung tolerierbar ist

Die Gesamtmenge des Staubes wurde nicht ermittelt. Es wird geschätzt, daß in Summe der während des 150-h-Versuches angefallene Staub maximal 5 kg beträgt. Auf Basis dieser Schätzung und der Schwermetallgehalte im Brennstoff kann der Anteil der Schwermetalle, der insgesamt in den Staub gelangt, berechnet werden. Dieser Anteil beträgt für die 4 hauptsächlich im Staub enthaltenen Schwermetalle:

|             |        |
|-------------|--------|
| Blei        | 1,6 %  |
| Cadmium     | 35,8 % |
| Quecksilber | 2,5 %  |
| Zink        | 3,4 %  |

Aus diesen Werten ist ersichtlich, daß trotz des extrem hoch erscheinenden Gehaltes im Staub der weit überwiegende Anteil der im Contec-Stabilat enthaltenen Schwermetalle Blei, Zink und auch des Quecksilbers unter den Bedingungen der Vergasung beim LQV-Verfahren in die Asche eingebunden wird. Der Anteil des verflüchtigten Cadmiums dagegen ist mit 35,8 % sehr hoch. Die ermittelten Anteile der im Staub enthaltenen Schwermetalle sind abhängig von den während der Vergasung herrschenden Bedingungen, insbesondere von der Temperatur im Vergaser.

Insgesamt muß eingeschätzt werden, daß für den bei diesem Versuch angefallenen Staub eine oberirdische Deponie entsprechend Anhang D der TA Abfall nicht in Frage kommt. Bei einem Einsatz des LQV-Verfahrens für die energetische Verwertung von Contec-Stabilat ist deshalb die Möglichkeit einer Behandlung des anfallenden Staubes für eine Deponie oder infolge des beachtlichen Bleigehaltes die Zuführung zu einer Verwertung zu prüfen. Der Austritt der flüchtigen Schwermetallverbindungen aus dem Vergaser ist nicht vermeidbar. Hinsichtlich der Abscheidung dieser Stoffe aus dem Gas sind im Fall einer technischen Realisierung noch Detailfragen zu klären.

[7]

## 6.7 Auslegungsversuche

Ziel dieses Projektpunktes ist es, Versuche mit Klärschlamm und aufbereiteten Restmüll zu Parameteruntersuchungen und zur Ermittlung von Auslegungsdaten und Emissionswerten für den Genehmigungsantrag nach BImSchG für industrielle Anlagen zu nutzen.

Die aufgeführten Ergebnisse der Versuche mit Klärschlamm und Restmüll werden zur Ermittlung von Auslegungsdaten mitgenutzt. Weil diese Ergebnisse in den Abschnitten 6.4.1, 6.5 und 6.6 recht ausführlich dargestellt sind, wird auf gesonderte Ausführungen hinsichtlich der Auslegung verzichtet.

Weiterhin wurden Untersuchungen zur Auslegung durchgeführt und Konzepte und Konstruktionen für größere Vergasungsapparate erstellt, die auch auf die Vergasung von Klärschlamm und Restmüll übertragbar sind.

### 6.7.1 Vergleich von Versuchsergebnissen mit chemisch-thermodynamischer Modellierung

An der Technikumanlage wurden unter anderem umfangreiche Untersuchungen zur Vergasung von Holzbriketts vorgenommen. Bei diesem Brennstoff, einem Vergleichsbrennstoff für verschiedene Vergasungsanlagen, handelt es sich um Briketts aus gepreßten bindemittelfreien Holzspänen.

Während eines repräsentativen Versuchsabschnittes wurden 18,3 kg/h Brennstoff mit einem Heizwert von 18160 kJ/kg eingesetzt. Das entspricht einem Energieeintrag von 332 328 kJ/h. Dabei wurde ein Brenngasstrom von 52.5 m<sup>3</sup>i.N. (berechnet aus der Kohlenstoffbilanz Brennstoff-Gas) mit einem Heizwert von 3999 kJ/m<sup>3</sup>i.N. (berechnet aus der gemessenen Gaszusammensetzung) erhalten. Das entspricht einer Kaltgasenergie von 209 948 kJ/h und einem Kaltgaswirkungsgrad von 63,2 %.

Auf der Basis der thermodynamischen Berechnungen für diesen Brennstoff ergibt sich ein thermischer Wirkungsgrad von 78 %.

Nachfolgend sind für diesen Versuch die gemessenen Daten des Brenngases und die auf dieser Basis berechneten gegenübergestellt. Dabei handelt es sich um Kalt-

gas, d.h., der Wasserdampfanteil ist bis auf die Sättigungskonzentration bei 30 °C auskondensiert.

|                               | gemessen | berechnet |
|-------------------------------|----------|-----------|
| CO in %                       | 19,1     | 16,8      |
| CH <sub>4</sub> in %          | 0,4      | 0,67      |
| CO <sub>2</sub> in %          | 9,2      | 13,2      |
| H <sub>2</sub> in %           | 13,7     | 14,9      |
| O <sub>2</sub> in %           | 0,1      | -         |
| Heizwert in kJ/m <sup>3</sup> | 3999     | 4000      |

**Tabelle 21:** Vergleich zwischen gemessener und berechneter Brenngaszusammensetzung bei der Vergasung von Holzbrikett

Zwischen den gemessenen und berechneten Werten besteht eine gute Übereinstimmung. Festzustellen ist, daß die CO-Konvertierung nicht vollständig bis zur Gleichgewichtseinstellung abläuft (niedrigerer Wasserstoffgehalt, dafür höherer CO-Gehalt).

Zu bemerken ist, daß durch die Aufwärmung der Verbrennungsluft etwa 8 % der eingetragenen Brennstoffenergie aus dem Bilanzkreis „Vergasung“ als fühlbare Wärme ausgetragen werden, die bei einer Änderung der Luftführung der Vergasung erhalten bleiben und entsprechend höhere Wirkungsgrade bewirken. Bei einer Anlagenvergrößerung und damit Verbesserung des Volumen-Oberflächen-Verhältnisses ist mit einer weiteren Reduzierung des Wärmeverlustes und damit Erhöhung der Wirkungsgrade zu rechnen.

### 6.7.2 Projektierung und Konstruktion der Vergasungsanlage VA 200

Die Technikumanlage VA 130 mit einer thermischen Leistung von ca. 100 kW hat in mehreren Langzeittests mit begleitenden Emissionsmessungen die Verfahrensstabilität und die Effektivität mit verschiedenen Brennstoffen unter Beweis gestellt. Die grundsätzliche Eignung sowohl des Verfahrens als auch der eingesetzten Technik kommt in der vom Regierungspräsidium Dresden erteilten Versuchsgenehmigung dieser Anlage nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) für eine Vielzahl von Abfallstoffen zum Ausdruck.

Aufbauend auf den beim Betrieb der Versuchsanlage gewonnenen Erkenntnissen bereitet VER den Bau einer größeren Anlage vor.

Die projektierte Vergasungsanlage trägt entsprechend dem Vergaservolumen von 200 l die Bezeichnung VA 200.

Das Vergasungsprojekt VA 200 setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Brennstoffbeschickung (Vorratsbehälter, Förderer, Dosierer)
- Vergasungsapparat
- Brenngasaufbereitung
- Brennkammer
- Rauchgaskühler
- Rauchgasreinigung
- Wärmeausbindung
- Rückstandshandling

Gegenüber der VA 130 werden folgende Komponenten verbessert:

- Vergasergehäuse:
  - bessere Aufnahme von Wärmedehnungen des Gehäuses
  - Vergasungsluftzufuhr und Brenngasabzug austauschbar
  - Rostspalt wird durch einen Flachschieber geschlossen. Rüttelhäufigkeit und Ascheaustrag werden damit entkoppelt. Entsprechend dem Zustand des Vergaserbettes kann gezielt Asche abgelassen werden.
- Brennkammer
  - wird aus dem Vergasungsapparat herausgenommen
  - stehende Brennkammer mit Ausmauerung
  - gestufte Verbrennungsführung
- Wärmeübertrager
  - stehende Ausführung
  - Rauchgas wird in geraden Wärmeübertragerrohren geführt
- Brenngasreinigung entsprechend Abschnitt 6.4.3

Technologisches Schema und Konstruktionsentwurf s. Anlagen.

[12]

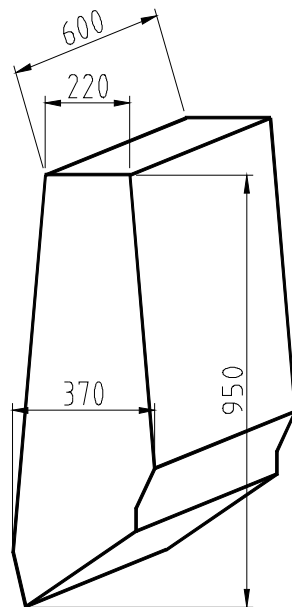
### 6.7.3 Konzeption für einen 1 MW-Vergaserbaustein

Für die Technikumanlage liegen bisher Erfahrungen aus ca. 1500 Betriebsstunden mit verschiedenen Brennstoffen vor. Es wurden erfolgreiche Langzeittests durchgeführt, um die Stabilität des Verfahrens und der Technikumanlage aufzuzeigen. Die Eignung des Verfahrens für die Verwertung von Abfällen ist damit nachgewiesen. Mit dem vorliegenden Entwicklungsstand ist es möglich, im nächsten Schritt Anlagen mit einer Brennstoffleistung von 1000 kW zu bauen und zu betreiben. Das entspricht einer Verzehnfachung der bisherigen Leistung. Die bisherigen linearen Apparateabmessungen vergrößern sich nur um den Faktor 2 bis 3, da die Gaserzeugung volu-

menproportional erfolgt. Unter Einhaltung der geometrischen und strömungstechnischen Ähnlichkeitsanforderungen ist das verfahrenstechnische Risiko abschätzbar.

Der Vergaser der Technikumanlage ermöglicht eine Brennstoffleistung von etwa 100 kW, was je nach Brennstoffheizwert einem Brennstoffverbrauch von 20 bis 30 kg/h entspricht.

Der Versuchsvergaser hat die in der Abbildung gezeigten Abmessungen. Daraus ergibt sich bei einer Apparatebreite von 600 mm ein Volumen von etwa 130 l. Der Vergasungsprozeß mit einem Temperaturniveau zwischen 550 bis 850 °C läuft dabei im unteren Drittel des Apparates ab, wobei diese Reaktionszone ein Volumen von ca. 50 l ausfüllt. Die Leistungsdichte erreicht in der Reaktionszone somit einen Wert von 100 kW je 50 l = 2 kW/l.



**Abbildung 9:** Technikumanlage, Innenabmessungen des Vergasungsraumes

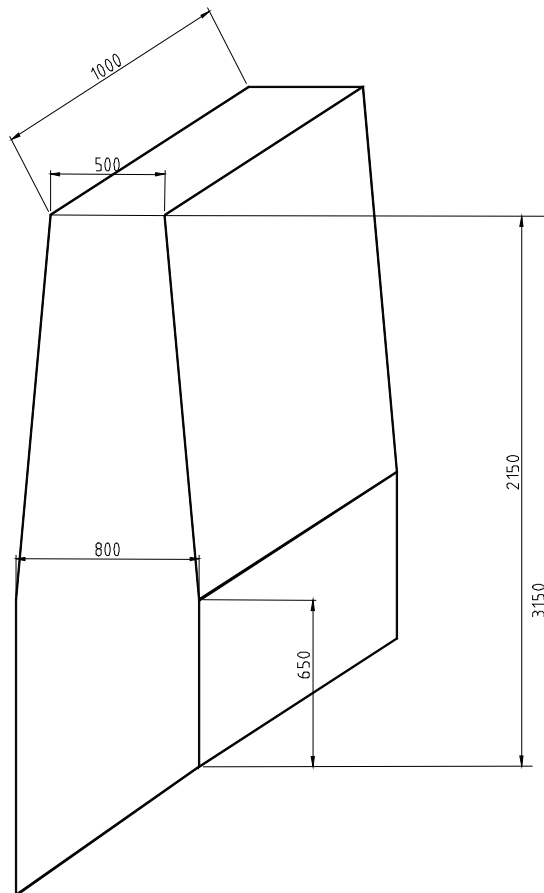
Beim Versuchsapparat wurde von der optimalen Gestaltung der Reaktionszone abgewichen, um unter Beachtung der Leistung von 100 kW günstige Abmessungen für den Schüttguttransport im Reaktor zu erzielen. Bei größeren Apparaten lassen sich die Anforderungen an Wandwinkel und Apparateabmessungen, die sich aus den Eigenschaften der Brennstoffschüttung ergeben, mit den strömungstechnischen und chemischen Gegebenheiten besser in Einklang bringen.

Bei der Vergrößerung der Apparateleistung auf einen Wert von 1000 kW ergibt sich unter der Voraussetzung der genannten Leistungsdichte ein Volumen der Reaktionszone von 500 l. Die Tiefe der Reaktionszone wird so gewählt, daß an ihrem Ende der mit dem Vergasungsmittel eingebrachte Sauerstoff unter Beachtung der Reaktionsgeschwindigkeit vollständig umgesetzt ist. Da sich beim Querstromprinzip der Vergasungsmittelintritt und der Gasaustritt gegenüberliegen, entspricht die Tiefe der

Reaktionszone der Tiefenabmessung des Apparates. Aus theoretischen Untersuchungen ergibt sich ein Optimum von 800 mm. Die Breite des Vergasungsraumes wird mit 1000 mm gewählt, so daß sich eine nahezu quadratische Grundfläche ergibt. Um das erforderliche Volumen von 500 l zu erreichen, muß die Höhe der Reaktionszone zu 650 mm bestimmt werden. Der Volumenanteil, der sich unterhalb dieses Reaktionsvolumens befindet, aber nur vom Sekundärluftanteil, den das Rost liefert, durchströmt wird, wurde bei dieser Betrachtung nicht mit einbezogen.

Über der Reaktionszone wird unter Beibehaltung der Wandwinkel des Versuchssapparates ein entsprechender Vergaserschacht angeordnet. Somit ergibt sich eine Gesamthöhe der Reaktorkammer des 1000 kW Apparates von 3150 mm mit einem Volumen von 1700 l.

Diese Reaktorkammer wird oben von einer Brennstoffschleuse abgeschlossen und unten mit einem Aschesammeltrichter komplettiert. Der Gaserzeuger erreicht mit den Komplettierungsteilen eine Bauhöhe von 6500 mm.



**Abbildung 10:** 1 MW Reaktor, Innenabmessungen des Vergasungsraumes

[13]



## **7 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit**

### **7.1 Technische Optimierung der vorhandenen Vergasereinheit**

- Die Betriebsstabilität der vorhandenen Versuchsanlage wurde verbessert.
- Die bei der Optimierung der Versuchsanlage gewonnenen Erfahrungen können bei Konstruktion und Bau neuer Vergasungsanlagen genutzt werden.

### **7.2 Beschaffung und Installation von Analysentechnik**

- Nutzung der Rauchgasanalysentechnik ist zur Bewertung verschiedener Verbrennungsprozesse möglich.

### **7.3 Technologische Anpassung**

- Parameterstudien zur NO<sub>x</sub>-Reduzierung bei der Vergasung von Klärschlamm können bei Auslegung von Feuerungen zur schadstoffarmen Verbrennung des erzeugten Brenngases aus Klärschlamm und Müll genutzt werden.
- Projekt- und Konstruktionsunterlagen zur Brenngasreinigung mit Dieselwäscher sind für den Bau einer Technikumanlage nutzbar.

### **7.4 Vergasungsversuche mit aufbereitetem Restmüll**

- Nachweis der Eignung des Vergasungsverfahrens zur Vergasung von Restmüll.
- Parameterstudien können zur Auslegung von Vergasungsanlagen für Restmüll genutzt werden.

### **7.5 Auslegungsversuche**

- Projekt- und Konstruktionsunterlagen für eine neue Technikumanlage VA200 wurden erstellt.
- Die Konzeptstudie für einen 1 MW-Vergaserbaustein kann zur Erstellung von Projekt- und Konstruktionsunterlagen für einen Vergaser mit einer Leistung von 1 MW als Grundlage genutzt werden.

## **8 Bekannte Fortschritte auf diesem Gebiet an anderen Stellen**

Zum Themenkreis der Vergasung von Abfällen oder Klärschlamm sind uns keine Anlagen bekannt, die sich im industriellen Einsatz befinden.

## **9 Veröffentlichungen**

### **9.1 Vorträge**

| <b>Autoren</b>                         | <b>Titel</b>                                                                                                                        | <b>Veranstaltung</b>                                                                      |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| N. Topf,<br>W. Krämer                  | Dezentrale Restmüllaufbereitung und thermische Verwertung der heizwertreichen Fraktion - Versuchsergebnisse aus der LQV-Pilotanlage | VDI-Seminar: Vergasungsverfahren für die Entsorgung von Abfällen<br>Freiberg, 03/98       |
| N. Topf<br>W. Krämer<br>Dr. U. Beckert | „Herstellung von Industriebrennstoffen mittels Dampf-Fluid-Trocknung und thermische Verwertung in der Luft-Querstrom-Vergasung“     | VDI-Seminar: Vergasungsverfahren für die Entsorgung von Abfällen<br>Freiberg, 11-12.03.99 |

### **9.2 Publikationen**

| <b>Autoren</b>             | <b>Titel</b>                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dr. G. Liebisch<br>N. Topf | „Luft-Querstrom-Vergasung – eine Möglichkeit zur dezentralen Energieerzeugung aus Biomasse und Abfällen“<br>in 'Vergasungsverfahren für die Entsorgung von Abfällen';<br>Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998 |

### 9.3 Sonstige Veröffentlichungen

| Autoren   | Titel                                                                                                                                                                                    |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| W. Krämer | „Primäre NOx-Minderungsmaßnahmen in einer Luft-Querstrom-Vergasungsanlage mit integrierter Schwachgasverbrennung“<br>Diplomarbeit Nr. 1584 TU Dresden, Institut für Energietechnik, 1997 |

## 10 Quellenverzeichnis

- [1] Technikumanlage LQV Luft-Querstrom-Vergasung - Verfahrensbeschreibung  
internes VER-Dokument
- [2] Versuchsbericht: Versuchsfahrt am 11./12.12.1996 zur Emissionsmessung bei  
Einsatz von getrocknetem Klärschlamm und SGF-Briketts an der LQV-  
Pilotanlage  
internes VER-Dokument, Januar 1997
- [3] Versuchsbericht: Versuchsfahrt am 02.04.1997 zur Emissionsmessung bei  
Einsatz von getrocknetem Klärschlamm an der LQV-Pilotanlage  
internes VER-Dokument, April 1997
- [4] W. Krämer: Primäre NO<sub>x</sub>-Minderungsmaßnahmen in einer Luft-Querstrom-  
Vergasungsanlage mit integrierter Schwachgasverbrennung  
Diplomarbeit Nr. 1584 TU Dresden, Institut für Energietechnik, 1997
- [5] Versuchsbericht: Vergasung von MBS in der LQV-Technikumanlage  
internes VER-Dokument, August 1997
- [6] Versuchsbericht: Vergasung von MBS in der LQV-Technikumanlage - 24 h-  
Dauerversuch  
internes VER-Dokument, August 1997
- [7] Versuchsbericht über die Durchführung des 150 h-Versuches zur Vergasung  
von Contec-Müll-Stabilat in der Luft-Querstrom-Vergasungsanlage  
internes VER-Dokument, November 1997
- [8] Vergasung von SGF in einer Luft-Querstrom-Vergasungsanlage mit nachge-  
schalteter PCR-Anlage zur Brenngasaufbereitung  
internes VER-Dokument, Dezember 1997
- [9] Projektvorlage: Brenngaswäsche für Luft-Querstrom-Vergasung  
internes VER-Dokument, Februar 1999
- [10] Vortrag auf GKSS-Workshop „Kontaminierte Schlämme“ 24.06.1999
- [11] N. Topf und W. Krämer: Dezentrale Restmüllaufbereitung und thermische Ver-  
wertung der HWR-Versuchsergebnisse aus der LQV-Pilotanlage  
Vortrag auf VDI-Seminar: Vergasungsverfahren für die Entsorgung von Abfällen  
Freiberg, 03/98
- [12] Projekt VA 200, Teilprojekt MSR-VA 200 - Aufgabenstellung/Erläuterungen zur  
Ausschreibung  
internes VER-Dokument
- [13] Konzeptstudie für einen 1 MW-Vergaserbaustein nach dem Luft-Querstrom-  
Prinzip (LQV) mit Brenngasaufbereitung  
internes VER-Dokument, Oktober 1997

## **Anlagen**

### **Anlagenverzeichnis**

Anlage 1: Schema Brenngasreinigung mit Dieselwäscher

Anlage 2: Schema VA 200

Anlage 3: Konstruktionsentwurf Querstromvergaser VA 200