

Lufttechnik Bayreuth GmbH & Co. KG
Markgrafenstraße 4
95497 Goldkronach

Neue thermische Abgasreinigungstechnologie mit regenerativer Abluftvorwärmung für Abgase mit Anteilen siliziumorganischer Verbindungen (2. Phase)

**Kurztitel:
SiO₂ - RNV**

Abschlussbericht zur zweiten Phase eines Entwicklungsprojektes,
gefördert unter Aktenzeichen 21154/02 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Bernd Rüska, Otto Carlowitz,
Olaf Neese, Karl-Heinz Dammeyer

Goldkronach, Juni 2009

Herausgeber und Bezugsmöglichkeit:

Luftechnik Bayreuth GmbH & Co. KG (LTB)
Markgrafenstraße 4
95497 Goldkronach
Tel.: (09273) 500-0
Fax: (09273) 500-111
Internet: www.ltb.de
e-mail: info@ltb.de

Lufttechnik Bayreuth GmbH & Co. KG
Markgrafenstraße 4
95497 Goldkronach

Neue thermische Abgasreinigungstechnologie mit regenerativer Abluftvorwärmung für Abgase mit Anteilen siliziumorganischer Verbindungen (2. Phase)

**Kurztitel:
SiO₂ - RNV**

Abschlussbericht zur zweiten Phase eines Entwicklungsprojektes,
gefördert unter Aktenzeichen 21154/02 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Bernd Ruskamp, Otto Carlowitz,
Olaf Neese, Karl-Heinz Dammeyer

Goldkronach, Juni 2009

1. Projektkennblatt

11/95		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	21154/02	Referat	22/2	Fördersumme	167.160,00 €
Antragstitel	Neue thermische Abgasreinigungstechnologie mit regenerativer Abluftvorwärmung für Abgase mit Anteilen siliziumorganischer Verbindungen				
Stichworte	Verfahren; Abgas, Abluft, Siliziumdioxid, RNV, Kunststoff				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
28 Monate	01.12.2006	31.03.2009	2 / 2		
Zwischenberichte:	alle 6 Monate Kurzbericht				
Bewilligungsempfänger	Luftechnik Bayreuth GmbH & Co. KG Markgrafenstr.4 95497 Goldkronach			Tel	09273/500-0
				Fax	09273/500-111
				Projektleitung Herr Rüskaamp	
				Bearbeiter	
Kooperationspartner	CUTEC-Institut GmbH, Clausthal-Zellerfeld				
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung einer neuen Technologie zur thermischen Nachverbrennung von Abgasen bzw. Abluftströmen mit siliziumorganischen Inhaltsstoffen. Um den Zusatz-Brennstoffbedarf auch für kleine Abluftbeladungen mit organischen Stoffen so gering wie möglich zu halten, werden zur Gewährleistung einer hohen Abluftvorwärmung Regeneratoren (Wärmespeicherbetten) eingesetzt (sog. regenerative Nachverbrennung). Der neue Technologieansatz beruht auf Regeneratormassen in Form von Keramikugeln, auf denen sich Anhaftungen innerhalb der Oxidationszone aufgrund von SiO₂-Verbindungen bilden. Im Rahmen der Pilotphase A ist eine mobile Technikumsanlage erstellt und zunächst bei der CUTEC und schließlich bei der Firma ALBIS Plastic GmbH am Standort Hamburg erfolgreich eingesetzt worden. Primäres Ziel war dabei, das Oxidationsverhalten der siliziumorganischen Verbindungen zu untersuchen sowie das Systemverhalten mit Blick auf die Projektierung einer Hauptausführung zu ergründen. Die hier beschriebene Demonstrationsphase B beinhaltet einerseits die Konzeption und das Engineering einer Hauptausführung und andererseits – um eine möglichst schnelle Verbreitung der neuen Technologie zu gewährleisten – weitere Testläufe der Pilotanlage an zwei unterschiedlichen Produktionsprozessen (Firma Miele und Firma Currenta). Bei ALBIS wurde zu Vergleichszwecken noch ein Versuch mit konventionellen Wabenkörpern durchgeführt, damit alte und neue Technologie gegenübergestellt werden können. Hieraus resultierte eine Hauptausführung in konventioneller Bauart bei ALBIS, das Angebot einer Hauptausführung mit neuer Technologie ist Fa. Miele unterbreitet worden.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>In Phase B soll in 5 Arbeitsschritten parallel zu Versuchen bei zwei weiteren Anwendern mit dem Scale-up und der Entwicklung der Hauptausführung für die Fa. ALBIS begonnen werden.</p>					
<p>1. Scale-up und Entwicklung der Hauptausführung: Aufgrund der geringen Konzentrationen an Siliziumorganischen Verbindungen im Rohgas sowie der Ergebnisse aus den Versuchen mit einer herkömmlichen Versuchsanlage wurde bei ALBIS eine Hauptausführung in konventioneller Bauart geplant.</p>					
<p>2. Versuche bei ALBIS und weiteren Anwendern: Bei ALBIS wurde eine Versuchsanlage mit Wabenkörpern installiert. Parallel hierzu und zu Schritt 1 wurden bei Fa. Miele, Oelde (Antihafbeschichtung) und Fa. Currenta, Leverkusen (Abwasserreinigung) Versuche mit der Pilotanlage gefahren. Aufgrund der höheren Eingangskonzentrationen als bei ALBIS, die zudem ausschließlich aus siliziumorganischen Verbindungen bestehen, soll eine Hauptausführung mit neuer Technologie bei Miele zum Einsatz kommen.</p>					
<p>3. Fertigung und Montage der Hauptausführung in konventioneller Bauart bei ALBIS.</p>					
<p>4. Inbetriebnahme und Validierung der Hauptausführung in konventioneller Bauart bei ALBIS.</p>					
<p>5. Auswertung, Berichterstellung und Ergebnisverbreitung: Die Ergebnisse der Versuche mit der Pilotanlage sowie der Inbetriebnahme der konventionellen Hauptausführung bei ALBIS werden vorgestellt, eine ökonomisch/ökologische Bewertung findet statt. Die Forschungsergebnisse werden durch Vorträge, Veröffentlichungen, im Internet und im Rahmen der Lehre an der TU Clausthal verbreitet.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt € An der Bornau 2 € 49090 Osnabrück € Tel 0541/9633-0 € Fax 0541/9633-190					

Ergebnisse und Diskussion

Ergänzende Versuche bei ALBIS (Hamburg):

Im Laufe der Phase 1 des Vorhabens hat sich herausgestellt, dass bei der Firma ALBIS relativ geringe Konzentrationen an siliziumorganischen Verbindungen im Abgas festzustellen waren. Da auch in Zukunft mit kleinen Konzentrationen zu rechnen ist, wurde der Arbeitsplan für die zweite Phase des Vorhabens um den Test einer konventionellen regenerativen Oxidationsanlage erweitert. Dabei stellte sich heraus, dass nur die obersten Lagen der Regeneratoren (Wabenkörper) mit Siliziumdioxid belegt waren, so dass eine periodische Absaugung für ausreichende Standzeiten sorgen kann. Auf dieser Basis entschied sich ALBIS, eine konventionelle Anlage zu beschaffen, die zwischenzeitlich installiert und in Betrieb genommen wurde. Sie arbeitet seither zielführend.

Versuche bei Miele (Oelde):

Bei der Firma Miele stammen die siliziumorganischen Verbindungen aus dem Abgas einer Anlage zur Herstellung von Antihafbeschichtungen. Da hohe Konzentrationen an siliziumorganischen Verbindungen vorlagen, konnte der neue Technologieansatz sehr intensiv untersucht werden. Dabei stellte sich heraus, dass die Anlage betriebssicher arbeitete. Durch die kontinuierliche Überwachung der Anlage von Clausthal aus (Internetverbindung), war es möglich, ständig den Anlagenzustand zu validieren und die Steuerung zu optimieren. In verschiedenen Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass die Reingaskonzentrationen weit unterhalb der geforderten Emissionsbegrenzungen lagen. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass kein Pufferbehälter zur Realisierung des Spülzyklus installiert war, so dass sich im realen Betrieb einer späteren Hauptausführung die Werte noch einmal verbessern können. Miele hat sich entschlossen, eine Hauptausführung mit der neuen Technologie zu beschaffen. Derzeit laufen technisch/kaufmännische Verhandlungen zwischen dem Anlagenbauer LTB und Miele.

Versuche bei Currenta (Leverkusen):

Der Anwendungsfall bei Currenta ist deshalb für die Erprobung des neuen Technologieansatzes besonders wertvoll, weil sehr vielschichtige organische Verbindungen aus unterschiedlichen Herstellungsbetrieben verarbeitet werden müssen. Dabei ist die Konzentration an siliziumorganischen Verbindungen nicht ganz so hoch, wie im Fall Miele. Auch hier stellte sich der Betrieb der Versuchsanlage als sehr betriebssicher heraus und es wurden insbesondere die sicherheitstechnischen Anforderungen in der chemischen Industrie vor Aufstellung der Anlage berücksichtigt. Die Anlage läuft zum Zeitpunkt der Berichtserstellung im zweiten Turnus, wobei die Versuche über den Zeitraum des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens hinausgehen. Aus energetischer Sicht ist der Anwendungsfall Currenta deshalb besonders bedeutsam, weil der Vergleich zu einer konventionellen thermischen Abgasreinigungsanlage mit rekuperativer Abluftvorwärmung angestellt werden kann. Es ist jetzt schon abzusehen, dass mit dem neuen Konzept der Brennstoffverbrauch um ca. 75 % abgesenkt werden kann. Es deutet sich an, dass die Ablagerungen durch die siliziumorganischen Stoffe offenbar leichter zu handhaben sind, als in einer konventionellen thermischen Nachverbrennung mit Rekuperator, weil die Oxidationsreaktion in einer reinen Gasphase (flameless) stattfindet und Temperaturspitzen, wie sie durch eine Brennerflamme hervorgerufen werden können, nicht auftreten. Currenta ist an der Umsetzung des neuen Technologieansatzes sehr interessiert.

Insgesamt wird festgestellt, dass sich bei den bisherigen Anwendungen der neue Technologieansatz im Pilotmaßstab bewährt hat. Dabei ist zu vermerken, dass die Kugelschüttung offensichtlich große Mengen an Siliziumdioxid aufnehmen kann, so dass sich lange Betriebszyklen ergeben, was zu einem geringen Betriebs- und Wartungsaufwand führt. Anfragen für weitere Einsatzfälle der Versuchsanlage liegen bereits vor. Der neue Technologieansatz soll daher noch weiter erprobt werden, wobei Ziel die Einrichtung einer Produktgruppe ist. Daher arbeitet LTB weiter intensiv an der Automatisierung des Kugelumlaufs und des Scale-up der Gesamtanlage.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Vorträge und Veröffentlichungen im Rahmen der „Berliner Energiekonferenz“ (2006), des VDI-Kolloquiums „Emissionsminderung 2008“ in Nürnberg und „10th Conference on Energy For A Clean Environment“ im Juli 2009 in Lissabon. Vortrag beim Jahrestreffen der Fachausschüsse „Energieverfahrenstechnik“ und „Hochtemperaturtechnik“ in Hamburg (2009). Kontakte zu potentiellen Anwendern der neuen Reinigungstechnologie sind vorhanden, so dass gezielt Informationsmaterial verbreitet werden kann.

Fazit

Im Rahmen der 2. Phase des Vorhabens wurden erfolgreiche Versuche bei zwei zusätzlichen Anwendern gefahren. Es ist geplant, die Pilotanlage auch noch bei weiteren Anwendern zu erproben. Aus den bisherigen positiven Ergebnissen resultierte eine Hauptausführung in konventioneller Bauart bei Fa. ALBIS (in Betrieb), während Fa. Miele beabsichtigt, eine Anlage gemäß des neuen Technologieansatzes zu errichten (zurzeit Phase der technisch/kaufmännischen Klärung).

2. Inhaltsverzeichnis

1.	PROJEKTKENNBLETT.....	5
2.	INHALTSVERZEICHNIS.....	7
3.	VERZEICHNIS VON BILDERN, ZEICHNUNGEN UND GRAFIKEN	8
4.	VERZEICHNIS VON TABELLEN	9
5.	VERZEICHNIS VON BEGRIFFEN, ABKÜRZUNGEN UND DEFINITIONEN.....	9
6.	ZUSAMMENFASSUNG	10
7.	HAUPTTEIL.....	12
7.1	EINLEITUNG	12
7.2	ANWENDUNGSFALL 1: FIRMA ALBIS, HAMBURG	13
7.2.1	Vergleichende Versuche mit einer konventionellen RNV-Technologie.....	13
7.2.2	Errichtung einer Hauptausführung	16
7.3	ANWENDUNGSFALL 2: FIRMA MIELE, OELDE.....	18
7.3.1	Emittierender Prozess	18
7.3.2	Applikation der SiO ₂ -RNV-Versuchsanlage in Oelde	19
7.3.3	Ergebnisse des Versuchsbetriebs	22
7.3.4	Projektierung einer Hauptausführung.....	33
7.4	ANWENDUNGSFALL 3: FIRMA CURRENTA, LEVERKUSEN.....	38
7.4.1	Emittierender Prozess und bisherige Abgasreinigungstechnologie.....	38
7.4.2	Aufbau der Versuchsanlage und Sicherheitstechnik.....	39
7.4.3	Erste Ergebnisse	42
8.	BEWERTUNG DER ERGEBNISSE DES VORHABENS	46
8.1	TECHNOLOGISCHE BEWERTUNG	46
8.2	ÖKONOMISCHE BEWERTUNG UND PATENTRECHTLICHE SITUATION.....	47
8.3	ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG / UMWELTENTLASTUNG.....	48
9	MAßNAHMEN ZUR VERBREITUNG DER VORHABENSERGEBNISSE.....	49
10.	FAZIT UND AUSBLICK	50
11.	LITERATURVERZEICHNIS	52
12.	ANHÄNGE.....	53
A1:	VERSUCHSERGEBNISSE	54
A2:	SONSTIGES.....	60

3. Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen und Grafiken

Nr.	Bezeichnung	Seite
Bild 7.1	Verfahrensschema der eingesetzten Versuchsanlage konventionellen Typs (Quelle: LTB).	14
Bild 7.2	Ausgelesene Daten der Versuchsanlage. Oben: Daten vom 03.04.2007; unten Daten vom 11.07.2007 (Quelle: LTB).	14
Bild 7.3	Fotos aus der konventionellen Versuchsanlage nach Abschluss der Versuchsphase.	15
Bild 7.4	Hauptausführung der RNV-Anlage bei der Firma ALBIS (Quelle: LTB).	17
Bild 7.5	Vereinfachtes Fließbild der Thermoglasuranlage einschließlich Abluftabsaugungen für die Versuchsanlage.	18
Bild 7.6	Schematische Darstellung einer konventionellen RNV-Anlage.	20
Bild 7.7	Schematische Darstellung des neuen Technologieansatzes.	20
Bild 7.8	Aufstellung und Einsatz der Pilotanlage in Oelde.	21
Bild 7.9	Prinzipieller Verlauf der Temperaturprofile im Regeneratorbett.	22
Bild 7.10	Zeitliche Verläufe ausgewählter Messgrößen für den Versuchsturnus 2.	25
Bild 7.11	Aufbau einer verbesserten Austragsvorrichtung für die Versuche bei Miele.	27
Bild 7.12	Massenverteilungen von Grob- und Feinfraktion.	29
Bild 7.13	Entleerung mit hoher Staubfracht und Struktur der Siliziumdioxidanhaftungen.	30
Bild 7.14	Zeitliche Temperaturverläufe beim Aufheizvorgang (Turnus 3).	30
Bild 7.15	Zeitliche Temperaturverläufe beim Aufheizvorgang (Turnus 6).	31
Bild 7.16	Zeitliche Entwicklung des Temperaturprofils in Zyklus 1.	32
Bild 7.17	Reingaskonzentrationsverläufe (Beispiel).	33
Bild 7.18	Kugelaustrag aus der RNV.	35
Bild 7.19	Ansichten der Schältrommel.	37
Bild 7.20	Rohrkettenförderer.	38
Bild 7.21	Verfahrensließbild zum neuen Technologieansatz SiO ₂ -RNV.	40
Bild 7.22	Aufstellungssituation der Pilotanlage bei Fa. Currenta in Leverkusen.	42
Bild 7.23	Zeitliche Verläufe ausgewählter Messgrößen für den Versuchsturnus 1, Currenta.	43
Bild 7.24	Massenverteilung von Grob- und Feinfraktion bei dem Versuch in Leverkusen.	44
Bild 7.25	Kugelaustrag und siliziumorganische Ablagerungen bei der ersten Entleerung.	45
Bild A1.1	Zeitliche Verläufe ausgewählter Messgrößen für den Versuchsturnus 1.	54
Bild A1.2	Zeitliche Verläufe ausgewählter Messgrößen für den Versuchsturnus 2.	54
Bild A1.3	Zeitliche Verläufe ausgewählter Messgrößen für den Versuchsturnus 3.	55
Bild A1.4	Zeitliche Verläufe ausgewählter Messgrößen für den Versuchsturnus 4.	55
Bild A1.5	Zeitliche Verläufe ausgewählter Messgrößen für den Versuchsturnus 5.	56
Bild A1.6	Zeitliche Verläufe ausgewählter Messgrößen für den Versuchsturnus 6.	56

4. Verzeichnis von Tabellen

Nr.	Bezeichnung	Seite
Tab. 7.1	Konzentrationsmessungen an der Thermoglasuranlage.	19
Tab. 7.2	Technische Daten der Pilotanlage.	22
Tab. 7.3	Überblick über die in Oelde durchgeführten Versuchsreihen.	23
Tab. 7.4	Überblick über die Gesamtmassen an Kugeln sowie Grob- und Feinfraktion.	28
Tab. 7.5	Dauer und Energiebedarf der Aufheizvorgänge.	32
Tab. 7.6	Auslegungsparameter der Hauptausführung.	34
Tab. 7.7	Technische Hauptdaten der Schältrummel.	36
Tab. 7.8	Überblick über die in Leverkusen durchgeführten Versuchsreihen.	43
Tab. 8.1	Energieeinsparung durch das neue Verfahren (Beispiel CURRENTA).	48
Tab. A1.7	Bestimmung der Staubmasse	57
Tab. A2.1	Tagesmittelwerte wichtiger Messgrößen der Versuche in Oelde (1)	60
Tab. A2.2	Tagesmittelwerte wichtiger Messgrößen der Versuche in Oelde (2)	60
Tab. A2.3	Tagesmittelwerte wichtiger Messgrößen der Versuche in Oelde (3)	61
Tab. A2.4	Tagesmittelwerte wichtiger Messgrößen der Versuche in Oelde (4)	61
Tab. A2.5	Tagesmittelwerte wichtiger Messgrößen der Versuche in Oelde (5)	62
Tab. A2.6	Tagesmittelwerte wichtiger Messgrößen der Versuche in Oelde (6)	62
Tab. A2.7	Tagesmittelwerte wichtiger Messgrößen der Versuche in Leverkusen	63

5. Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

Zeichen / Symbol	Dimension	Erläuterung
Δp	[Pa]	Differenzdruck zur Errechnung einer Strömungsgeschwindigkeit; Druckverlust
$\Sigma \text{ org. C; } C_{\text{ges}}$	[mg/m ³]	Summe organisch gebundenen Kohlenstoffes
LP	[%]	Lageparameter: Hilfsgröße zur Verschiebung von Temperaturmaxima per SPS-Programm

6. Zusammenfassung

Im Rahmen der 1. Phase des Vorhabens ist eine Technologie entwickelt und mit Hilfe einer Pilotanlage erprobt worden, die es gestattet, Abgase mit siliziumorganischen Verbindungen und insbesondere deren Oxidationsprodukt SiO_2 in einer thermischen Abgasreinigungsanlage mit regenerativer Abluftvorwärmung (RNV) handhabbar zu machen. Auf den Bericht zur 1. Phase wird verwiesen [RüCN06]. Die Grundidee bestand darin, die Anhaftungen des amorphen Siliziumdioxids auf einer Kugelschüttung zunächst zuzulassen, die belegte Keramik periodisch zu entnehmen, so dass die Anhaftungen entfernt werden können, und anschließend gereinigt wieder dem Reaktor zuzuführen. Der Reaktor besteht dabei aus einer zylindrischen Schüttung, wobei die Strömungsrichtung periodisch umgekehrt wird. Beim Anfahren erfolgt die Aufheizung des oberen Teils der Kugelschüttung mit Hilfe eines Brenners. Anschließend wird das Temperaturmaximum durch einen Luftstrom in die Mitte des Reaktors getrieben. Neben der apparatetechnischen Konzeption wurde besonderes Gewicht auf die regelungstechnische Ausgestaltung des Systems gelegt.

Nachdem die Versuchsanlage zum neuen Technologieansatz im Rahmen der 1. Phase bei ALBIS erprobt wurde und sich entgegen den Erwartungen nur wenig siliziumorganische Substanzen im Abgas befunden haben, wurde zu Beginn der 2. Phase versuchsweise zunächst eine konventionelle regenerative Nachverbrennung einem Test unterzogen. Die Produktion von ALBIS wird durch Entwicklungen bezüglich der Produktzusammensetzungen zukünftig dauerhaft weniger siliziumorganische Verbindungen einsetzen. Schließlich kamen die Untersuchungen durch wesentliche Anstöße von LTB zu dem Ergebnis, bei ALBIS eine konventionelle RNV einzusetzen.

Die zweite Phase des Vorhabens befasst sich mit der Errichtung einer konventionellen Hauptausführung bei ALBIS, die zwischenzeitlich installiert und in Betrieb gesetzt wurde, und der Frage der Handhabbarkeit des neuen Technologieansatzes bei weiteren Anwendern. Der zweite Anwender war die Firma Miele in Oelde. Bei der Herstellung von Antihafbeschichtungen für Backöfen bzw. Herde entstehen Abgase mit erheblichen Anteilen siliziumorganischer Verbindungen. Die Versuche mit der Pilotanlage verliefen erfolgreich. Einerseits konnten Standzeiten von bis zu ca. 6 Wochen realisiert werden, ehe eine Entnahme der belegten Speichermassen notwendig wurde, andererseits konnte das Handling mit der Speichermasse im Zusammenwirken zwischen Anlagenbauer LTB und Forschungsinstitut laufend verbessert werden. Der Erfolg des Betriebs der Pilotphase bei Miele wird dadurch bestätigt, dass der Anwender nunmehr eine Hauptausführung nach dem neuen Verfahren einsetzen möchte. Verhandlungen hierzu laufen derzeit zwischen LTB und Miele.

Als 3. Anwendungsfall sollten Ablüfte mit Inhaltsstoffen aus möglichst unterschiedlichen Produktionen zu behandeln sein. Dieser Fall war bei der Firma Currenta in Leverkusen gegeben. In einer Kläranlage werden Abwässer aus unterschiedlichen Chemiebetrieben gereinigt, deren Gase aus dem Belebungsbecken restorganische Substanzen enthalten und heute in einer konventionellen thermischen Abgasreinigungsanlage mit rekuperativer Abluftvorwärmung bei erheblichem Erdgaseinsatz behandelt werden. Erste Versuche mit der Pilotanlage zeigen, dass die Beläge auf den Keramikugeln im Rahmen einer Entleerung ohne Schwierigkeiten entfernbar sind, der Brennstoffbedarf ist erwartungsgemäß sehr niedrig. Die Versuchsphase wird über den Abschluss der Förderphase durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt hinaus fortgeführt, so dass sich auch hier die Möglichkeit einer Anwendung des neuen Verfahrens mit hoher Wahrscheinlichkeit eröffnen wird.

Auf Grund des im Laufe des Projektes optimierten Regelungsschemas sowie des für die Hauptausführung vorgesehenen automatisierten Kugelaustrags in Verbindung mit einer Schältrömmel und einem Rohrkettenförderer ist von einem sehr guten Handling auszugehen. Das Verfahren der thermischen Abgasreinigung incl. periodischer Abgasumschaltung und Kugelaustrag ist unter dem Titel „Verfahren und Vorrichtung zur Behandlung von siliziumorganische Verbindungen enthaltenden Abgasen“ in zahlreichen europäischen Ländern sowie in Kanada und den USA patentrechtlich angemeldet. Am Patent sind Vertreter der Firmen ALBIS, CU-

TEC und LTB beteiligt. Von einer Anmeldung in verschiedenen asiatischen Ländern wie z.B. VR China, Japan, Indien etc. wurde abgesehen, da sowohl die Relation von Kosten und Chancen als auch die Vertriebsmöglichkeiten ohne Lizenznehmer vor Ort als zu gering eingestuft wurden. Die weiteren Bestrebungen zur Umsetzung der Technologie sind erfolgversprechend angelaufen. Es ist geplant, die Pilotanlage auch noch bei weiteren Anwendern zu erproben, Interessensbekundungen hierfür liegen vor.

Der ökologische Erfolg des neuen Technologieansatzes liegt in der Einsatzmöglichkeit von RNV-Anlagen mit regenerativer Abluftvorwärmung statt bisheriger herkömmlicher TNV-Anlagen mit rekuperativer Abluftvorwärmung. Daraus resultieren ein wesentlich geringerer Energiebedarf (Einsparung fossiler Energieträger, deutlich geringere CO₂-Emissionen) sowie geringere Sekundäremissionen (insbesondere NO_x aber auch CO, Σ org. C). Darüber hinaus stellt die neue Technologie einen zuverlässigen Abscheider für die während der Verbrennung gebildeten SiO₂-Stäube dar, wie Staubmessungen im Reingas bestätigen. Aufgrund der sehr geringen Korngröße der untersuchten Anhaftungen sind diese Staubfraktionen als nicht unproblematisch einzustufen.

Das Projekt „Neue thermische Abgasreinigungstechnologie mit regenerativer Abluftvorwärmung für Abgase mit Anteilen siliziumorganischer Verbindungen“ wurde gemeinsam vom Antragsteller Lufttechnik Bayreuth GmbH & Co.KG, Goldkronach und den Kooperationspartnern CUTEC-Institut GmbH, Clausthal-Zellerfeld und ALBIS PLASTIC GmbH, Hamburg bearbeitet. Eine Förderung erfolgte durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück unter dem Aktenzeichen 21154 bzw. 21154/02.

7. Hauptteil

7.1 Einleitung

Für das vorliegende Vorhaben wurde ein zweistufiger Entwicklungsansatz gewählt. Die erste Phase hatte das Ziel, zu ergründen, inwieweit die Verfahrensidee einer Anlagentechnologie zur thermischen Oxidation von Abgasen mit siliziumorganischen Inhaltsstoffen auf der Basis periodisch reinigbarer Regeneratormassen (Entfernung des Oxidationsproduktes Siliziumdioxid) sich grundsätzlich als funktionsfähig erweist. Der Bedarf dafür war vorhanden, schließlich hatte eine erhebliche Anzahl von Anlagen der thermisch regenerativen Nachverbrennung Probleme bei Abgasen mit siliziumorganischen Inhaltsstoffen, weil die als Regeneratorspeichermassen verwendeten Wabenkörper (keramische Monolithe) zum Zusetzen neigen bis hin zur vollständigen „Verblockung“. Dies hat zur Folge, dass die Wabenkörper ausgebaut, einzeln mit Druckstrahlgeräten gereinigt und wieder eingebaut werden müssen. Es handelt sich dabei um einen aufwändigen und von den Arbeitsbedingungen her an der Grenze der Zumutbarkeit einzuordnenden Prozess. Weiter muss ein Teil der Wabenkörper wegen Rissen und Abplatzungen ersetzt werden. Insofern stellt der neue Technologieansatz der automatisierten Regeneratorentleerung durch Verwendung von Keramikkugeln als Speichermassen eine erhebliche Erleichterung dar, das Verfahren erweist sich beim ersten Anwender ALBIS Plastic in Hamburg als grundsätzlich handhabbar, weil die erstellte Pilotanlage zielführend und zuverlässig arbeitete. Dies alles ist im Bericht zur Phase 1 des Vorhabens dargelegt [RüCN06].

Die zweite Phase des Vorhabens befasst sich mit der Frage der Handhabbarkeit des neuen Technologieansatzes bei verschiedenen Anwendern. Andere siliziumorganische Einsatzstoffe sowie weitere Begleitstoffe können zu einem unterschiedlichen Anhaftungsverhalten der aus der Oxidation resultierenden Reaktionsprodukte führen und aus diesem Grund die Übertragbarkeit auf weitere Betriebe in Frage stellen. Es kommt hinzu, dass die Produktion von ALBIS durch Entwicklungen bezüglich der Produktzusammensetzungen dauerhaft weniger siliziumorganische Verbindungen einsetzt und damit die volle Leistungsfähigkeit der Pilotanlage bezüglich Ablagerungen noch nicht unter Beweis gestellt werden konnte. Schließlich kamen die Untersuchungen durch wesentliche Anstöße von LTB zu dem Ergebnis, bei ALBIS eine konventionelle regenerative Nachverbrennung einzusetzen, wie im Folgenden in Abschnitt 7.2 dargelegt wird. Die Anlage wurde zwischenzeitlich installiert und in Betrieb gesetzt. Umso bedeutsamer war es, nach Bewilligung der 2. Phase des Vorhabens einen Anwender zu finden, dessen Abgasinhaltsstoffe sich durch erhebliche Anteile an siliziumorganischen Verbindungen auszeichnen. Dies ist bei der Firma Miele in Oelde der Fall. Bei der Herstellung von Antihafbeschichtungen für Backöfen bzw. Herde (haushaltlicher Einsatzbereich) wird eine Mischung verschiedener siliziumorganischer Verbindungen auf emaillierte Oberflächen appliziert und anschließend bei höheren Temperaturen wärmebehandelt. Hieraus resultieren Abgase mit erheblichen Anteilen siliziumorganischer Verbindungen, die gereinigt werden müssen. Anfänglich erfolgte dies in einer konventionellen rekuperativen Nachverbrennung, die sich jedoch in extrem kurzer Zeit (wenige Tage) zusetzte. Man nahm die Nachverbrennung außer Betrieb und kam nach Recherchen und Versuchen mit anderen Verfahren (u. a. Kondensationsverfahren) zu dem Ergebnis, dass keine brauchbare Technologie zur Verfügung stand, so dass die Abgase zwangsläufig unbehandelt abgeführt werden mussten. Insofern bestand begründete Hoffnung, durch den neuen Technologieansatz ein funktionsfähiges Verfahren zu finden und den Stand der Technik hierdurch erweitern zu können. Wie im Abschnitt 7.2 im Einzelnen dargelegt, verliefen die Versuche mit der Pilotanlage erfolgreich. Einerseits konnten Standzeiten von bis zu ca. 6 Wochen realisiert werden, ehe eine Entnahme der belegten Speichermassen notwendig wurde, andererseits konnte das Handling mit der Speichermasse im Zusammenwirken zwischen Anlagenbauer LTB und Forschungsinstitut laufend verbessert werden. Der Erfolg des Betriebs der Pilotphase bei Miele in Oelde wird dadurch bestätigt, dass der Anwender nunmehr eine Hauptausführung nach dem neuen Verfahren einsetzen möchte. Verhandlungen hierzu laufen derzeit zwischen LTB und Miele. Als 3. Anwendungsfall wurde eine Anwendung gesucht, bei der Ablüfte mit Inhaltsstoffen aus möglichst unterschiedlichen Produktionen zu behandeln sind. Dieser Fall war bei der Firma Currenta in Leverkusen gegeben. In einer Kläranlage werden Abwässer aus unterschiedlichen Chemiebetrieben gereinigt. Dabei enthalten die Gase aus dem Belebungsbecken restorganische Substanzen, die heute in zwei rekuperativen Nachverbrennungsanlagen (Abluftmengenstrom je

ca. 20.000 m_n³/h) unter erheblichem Erdgaseinsatz behandelt werden. Zum einen müssen die Rohrbündelwärmeübertrager periodisch mit erheblichem Aufwand gereinigt werden (wegen der Brennerflamme entstehen örtlich sehr hohe Temperaturen, die einen Schmelzfluss bewirken und zu hartnäckigen Anbackungen führen) und zum anderen sind die hohen Brennstoffverbräuche mit daraus resultierenden Kohlenstoffdioxidemissionen zu nennen. Der neue Technologieansatz bietet die Chance, beide Problematiken beherrschbar zu machen:

- Durch die reine Gasphasenoxidation (Zusatzbrennstoff Erdgas wird der Abluft „als künstliche Beladung“ vor der Anlage zugegeben, so dass Temperaturspitzen im Reaktor selbst im Rahmen der reinen Gasphasenoxidation nicht mehr oder nur in vernachlässigbarem Maße auftreten).
- In rekuperativen Nachverbrennungsanlagen endet die Abluftvorwärmung etwa 200 K unterhalb der Reaktionstemperatur. Dieser Wert kann mit Hilfe der Regeneratortechnologie auf (40-70) K verringert werden, so dass der Brennstoffbedarf entsprechend sinkt.

Erste Versuche mit der Pilotanlage zeigen, dass die Beläge im Rahmen einer Entleerung ohne Schwierigkeiten entfernbar sind. Die Versuchsphase wird über den Abschluss der Förderphase durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt hinaus fortgeführt, so dass sich auch hier die Möglichkeit einer Anwendung des neuen Verfahrens mit hoher Wahrscheinlichkeit eröffnet. Es ist geplant, die Pilotanlage auch noch bei weiteren Anwendern zu erproben. Anfragen hierfür liegen vor.

7.2 Anwendungsfall 1: Firma ALBIS, Hamburg

Bereits im Bericht zur 1. Phase des Vorhabens sind Versuche mit dem neuen Technologieansatz beim Anwender ALBIS dargestellt worden. Dabei hatte sich herausgestellt, dass das Betriebsverhalten der Anlage als unproblematisch zu bezeichnen ist. Sowohl der Anfahrprozess als auch der quasistationäre Abgasbehandlungsbetrieb waren über ein Telefonmodem von Clausthal aus steuerbar. Es konnten kontinuierlich Messdaten aufgezeichnet und übertragen werden. Auch ohne Spülzyklus wurden bei organischen Schadstoffbeladungen von bis zu ca. 150 mg/m_n³ im Rohgas bei sonst optimalen Betriebsbedingungen Reingaskonzentrationen von 20 mg/m_n³ unterschritten (dieser Wert gilt als aktueller Grenzwert für Σ org. C im Reingas von thermischen Nachverbrennungsanlagen gemäß 31. BImSchV). Im Hinblick auf das Oxidationsverhalten der siliziumorganischen Verbindungen und Anhaftungen des Oxidationsproduktes Siliziumdioxid ergaben sich erwartungsgemäß Ablagerungen im mittleren Bereich des Schüttgutreaktors, d. h. in der Oxidationszone. Allerdings erwies sich die Beladung des zu behandelnden Abgases mit siliziumorganischen Verbindungen als nicht so hoch wie ursprünglich erwartet. Es sollten daher zusätzlich Versuche mit einer bei LTB vorhandenen, konventionellen thermischen Abgasreinigungsanlage mit regenerativer Abluftvorwärmung gefahren werden, um das ursprüngliche Versuchsprogramm der 2. Phase des Vorhabens um diesen Aspekt zu erweitern. Hierdurch konnte ein unmittelbarer Vergleich des konventionellen und neuen Technologieansatzes beim selben Anwender herbeigeführt werden.

7.2.1 Vergleichende Versuche mit einer konventionellen RNV¹-Technologie

Bild 7.1 zeigt das Verfahrensschema der zu Vergleichszwecken bei ALBIS eingesetzten konventionellen Versuchsanlage. Es handelt sich demnach um ein Abbild der üblicherweise angewandten Großtechnologie in Kompaktbauweise (montiert auf einem Grundrahmen), die alle drei notwendigen Betriebsphasen (Abluft vorwärmen, Reingas kühlen, Regenerator spülen) vollzieht. Darüber hinaus ist die Anlage im Regenerator links mit Temperaturfühlern bestückt, so dass die zugehörigen Profile und damit das Regeneratorverhalten abgebildet werden können.

¹ RNV: Regenerative Thermische Oxidation

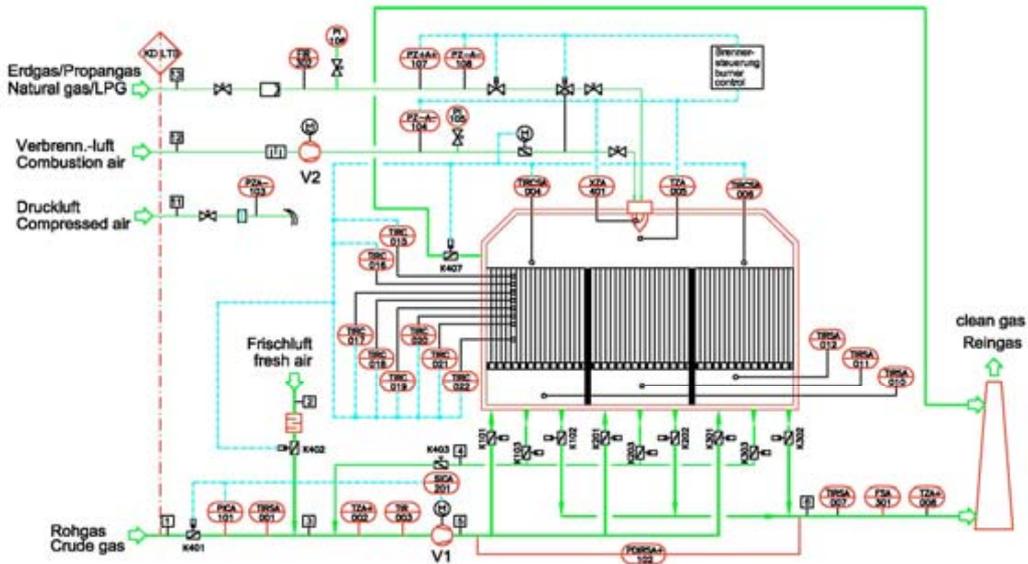


Bild 7.1: Verfahrensschema der eingesetzten Versuchsanlage konventionellen Typs (Quelle: LTB).

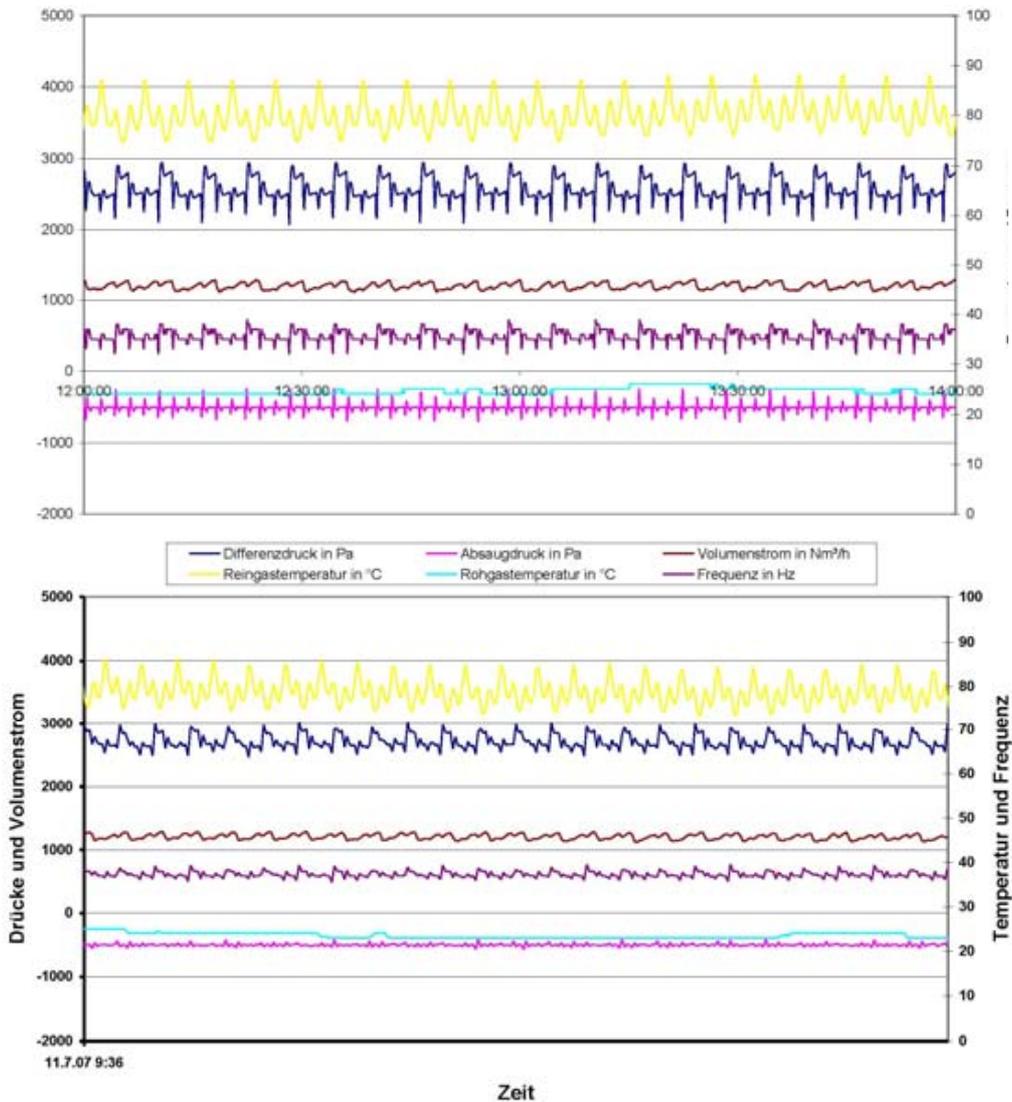


Bild 7.2: Ausgelesene Daten der Versuchsanlage. Oben: Daten vom 03.04.2007; unten: Daten vom 11.07.2007 (Quelle: LTB).

Bild 7.2 vermittelt einen Eindruck zum Betriebsverhalten der konventionellen Versuchsanlage zu zwei verschiedenen Zeitpunkten. Der Vollständigkeit halber wird vermerkt, dass die Zeitachse des oberen Diagrammes in Bild 7.2 mit der im unteren vergleichbar ist. Zunächst ist festzustellen, dass der durch die Anlage geförderte Volumenstrom zu beiden Zeitpunkten identisch ist, was durch die Unterdruckregelung (siehe Bild 7.1) im Rohgas sichergestellt wird. Auch das thermodynamische Verhalten, charakterisiert durch die Reingasaustrittstemperatur kann als unverändert angesehen werden. Demgegenüber ist die Frequenz der Ventilatorregelung leicht angestiegen, was sich ebenfalls in einem leicht erhöhten Druckverlust (Differenzdruck) dokumentiert:

03.04.07 Frequenz: ca. 35 Hz; Druckverlust; ca. 2500 Pa

11.07.07 Frequenz: ca. 37 Hz; Druckverlust; ca. 2750 Pa

Demnach dürften sich die Regeneratorspeichermassen mit Siliziumdioxid leicht belegt haben, wobei der Anstieg des Druckverlustes während dieser ca. 3 Monate im Vergleich zu anderen Einsatzgebieten (Anwendungsfall Fa. Miele, siehe weiter unten, oder Anlagen zur mechanisch biologischen Abfallbeseitigung) als äußerst moderat einzustufen ist. Diese Erkenntnis bestätigt **Bild 7.3**.

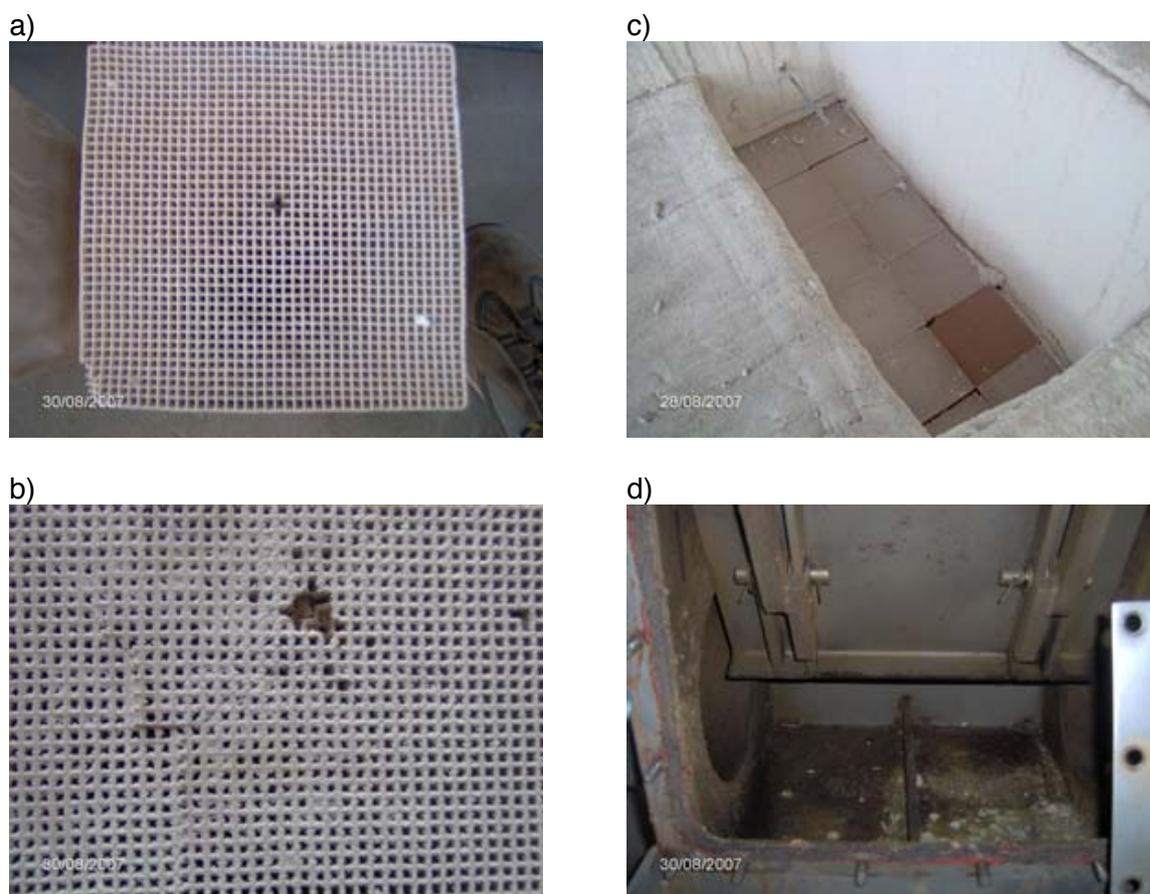


Bild 7.3: Fotos aus der konventionellen Versuchsanlage nach Abschluss der Versuchsphase; a) Wabenkörper neu, b) Wabenkörper der obersten Wabenlage nach Versuchsfahrt, c) Blick in eine der Regeneratorkammern, d) Blick in eine Rohgasklappe nach dem Versuch.

In **Bild 7.3a** findet sich die Aufnahme eines neuen Wabenkörpers, **Bild 7.3b** zeigt die oberste Wabenlage der Regeneratoren, die eine leichte Belegung ausweist. Dabei ist zu vermerken, dass *ausschließlich* die oberste Wabenlage mit Belag versehen war, alle anderen vier Wabenlagen nicht. Dies ist für die Handhabung einer Hauptausführung bedeutsam, weil Beläge in der obersten Wabenlage relativ einfach durch Absaugen entfernt werden können. Allerdings muss man sich darüber klar sein, dass eine solche Vorgehensweise ausschließlich im Fall kleiner Beladungen an Kohlenwasserstoffen – unter ihnen Anteile siliziumorganischer Verbin-

dungen – möglich ist. Wie anhand von Bild 7.14 im Bericht zur Phase 1 des Vorhabens theoretisch dargelegt und experimentell validiert, wandern die Reaktionsfronten bei höheren Beladungen insbesondere im sog. überautothermen Betrieb in die Regeneratoren hinein, so dass dann weitere Bereiche mit Siliziumdioxid belegt werden und eine einfache Entfernung nicht mehr ohne weiteres, d. h. nicht ohne periodischen Ausbau, möglich wird. Da jedoch im Anwendungsfall der Firma ALBIS nur relativ geringe Abluftbeladungen auftreten, ist dort die Installation einer konventionellen Technologie möglich.

Abschließend vermittelt **Bild 7.3c** einen Einblick in eine Regeneratorkammer der Versuchsanlage, die innen mit keramischer Faser ausgekleidet ist. **Bild 7.3d** zeigt den Rohgaseintritt, hier eine Rohgasklappe. Der Rohgaseintritt ist offenbar auch nach mehrmonatigem Betrieb nicht durch klebrige Substanzen belegt. Dies ist dem Umstand zu verdanken, dass die den Produktionsabsaugungen nachgeschalteten Wasserwäscher weiter in Betrieb waren und dort neben klebrigen Substanzen auch Partikel entfernt werden. Die Aufrechterhaltung des Wäscherbetriebes ist damit auch eine Voraussetzung für den störungsfreien Betrieb einer RNV-Hauptausführung.

7.2.2 Errichtung einer Hauptausführung

Aufgrund des vorstehend beschriebenen Kenntnisstandes ist von der Firma LTB bei der Firma ALBIS in Hamburg eine konventionelle RNV-Anlage errichtet worden. Die Anlage kann einen maximalen Abgasvolumenstrom von $30000 \text{ m}_N^3/\text{h}$ bewältigen² und arbeitet bei einem Reaktionstemperaturniveau im Bereich zwischen 800 °C und 900 °C . Der Brennstoffverbrauch liegt in dem unter 8.3 im Bericht zur Phase 1 des Vorhabens genannten Bereich (siehe auch Kapitel 8 dieses Berichtes). **Bild 7.4** vermittelt einen Eindruck zur Ausführung der Anlagentechnologie.

Es wird deutlich, dass es sich um ein Scale-up der im Vorfeld eingesetzten Versuchsanlage handelt, wobei die drei Regeneratoren hier konstruktiv in einem Stahlgehäuse untergebracht wurden. Auffällig sind die drei Begehungsöffnungen im Bereich der Brennkammer (**Bild 7.4a**), die zu Reinigungszwecken (Entfernung des Oxidationsproduktes Siliziumdioxid von der obersten Wabenlage) vorgesehen worden sind.

Anhand des Screenshots (**Bild 7.4b**) kann auch ein Überblick über die Verfahrensdaten gewonnen werden. Der Vollständigkeit halber wird auf den Bypass mit der Klappe K 600 und den Ventilator V 3 hingewiesen. Es handelt sich um eine Sicherheitseinrichtung. Würde z. B. der Brenner der RNV-Anlage während des Betriebes ausfallen, so ist ein Neustart in bestimmten Fällen nur dann zulässig, wenn die Anlage vorher mit ausreichend Frischluft gespült wurde, so dass alle brennbaren Substanzen vor dem Brennerneustart entfernt wurden. Sollte die RNV-Störung nicht sofort behoben werden können, wird die vorgelagerte Produktion außer Funktion gesetzt.

² Die ursprünglich benannte Abluftmenge (siehe Bericht Phase 1) konnte durch ablufttechnische Maßnahmen von $35000 \text{ m}_N^3/\text{h}$ auf $30000 \text{ m}_N^3/\text{h}$ reduziert werden.

a)



b)

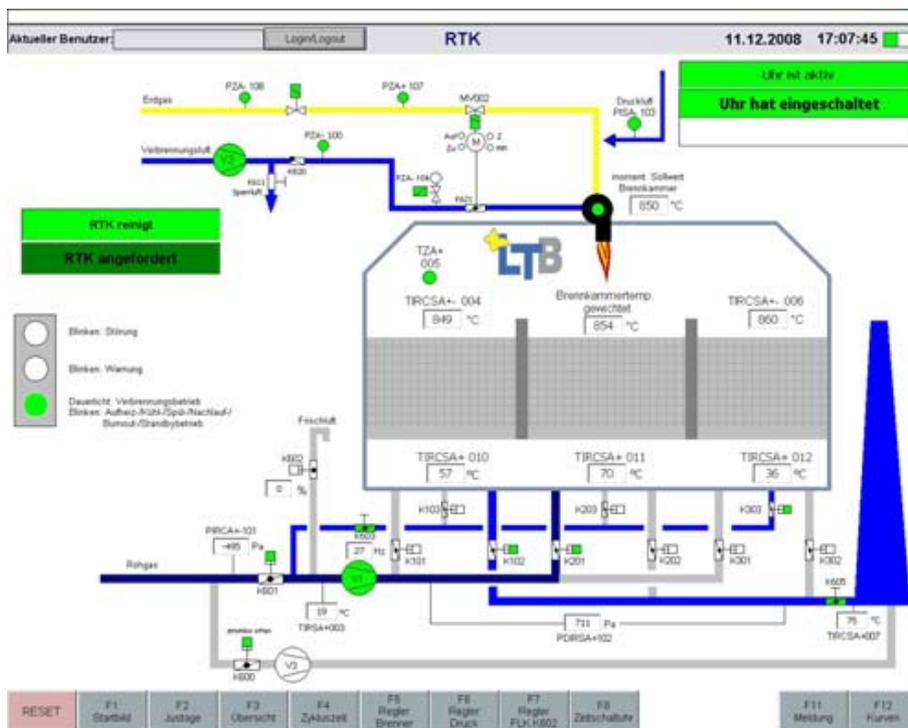


Bild 7.4: Hauptausführung der RNV-Anlage bei der Firma ALBIS; a) Aufstellungssituation, b) Screenshot des SPS-Bildschirms. Die abgebildeten Messwerte im Screenshot sind Momentanwerte und können daher nicht zu Bilanzzwecken herangezogen werden. (Quelle: LTB).

7.3 Anwendungsfall 2: Firma Miele, Oelde

In der ersten Phase des Vorhabens hat sich die grundsätzliche Eignung der Anlagentechnologie herausgestellt, jedoch konnten im Industrieinsatz bei Albis nur sehr geringe siliziumorganische Schadstofffrachten untersucht werden. Daher war es das Ziel für die zweite Phase, einen Anwender zu finden, bei dem höhere Konzentrationen an siliziumorganischen Verbindungen anzutreffen sind. Dies ist bei der Firma Miele & Cie. KG am Standort Oelde der Fall.

7.3.1 Emittierender Prozess

Am Standort Oelde werden Produktionsanlagen zur Herstellung von Küchen-Einbaugeräten wie Herden, Backöfen und Mikrowellengeräten betrieben. Backmuffeln, Backbleche und verschiedene Einbauteile werden dabei nach der Emaillierung mit einer Antihafbeschichtung versehen. Diese Beschichtung erfolgt in einer Thermoglasuranlage, in der spezielle, siliziumorganische Komponenten enthaltende Materialien auf die Oberfläche aufgebracht und thermisch behandelt werden [Car09].

Innerhalb der Thermoglasuranlage durchlaufen die beschichteten Bauteile Zonen mit steigender Temperatur, so dass ein Anteil der organischen Stoffe in die Anlagenatmosphäre freigesetzt und an verschiedenen Stellen abgesaugt werden kann.

Ein Teil der so entstehenden Abluftströme sollte entsprechend der ursprünglichen Anlagenkonzeption mit Hilfe einer Kondensationsanlage (Kühlung) bzw. über eine thermische Nachverbrennungsanlage gereinigt werden. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass die Abgasreinigungseinrichtungen nicht zufriedenstellend arbeiteten. Insbesondere traten an der thermischen Nachverbrennungsanlage schon nach einer Betriebsdauer von wenigen Tagen Verstopfungen durch das Oxidationsprodukt der siliziumorganischen Verbindungen (Siliziumdioxid) auf, die zu Anlagenausfällen führten. Bei regulärer Auslastung war es nicht möglich, die Anlage über einen Zeitraum von 5 Arbeitstagen (1 Arbeitswoche) betriebsfähig zu halten. Eine anschließend installierte Kondensationsstufe war ebenfalls nicht in der Lage, den gewünschten Reinigungsgrad sicherzustellen [Car09].

Insofern konnte für diese Abluftreinigungsaufgabe bislang kein am Markt verfügbares und zielführendes Verfahren gefunden werden, so dass gemeinsam mit der Aufsichtsbehörde weiter nach Lösungen gesucht wurde.

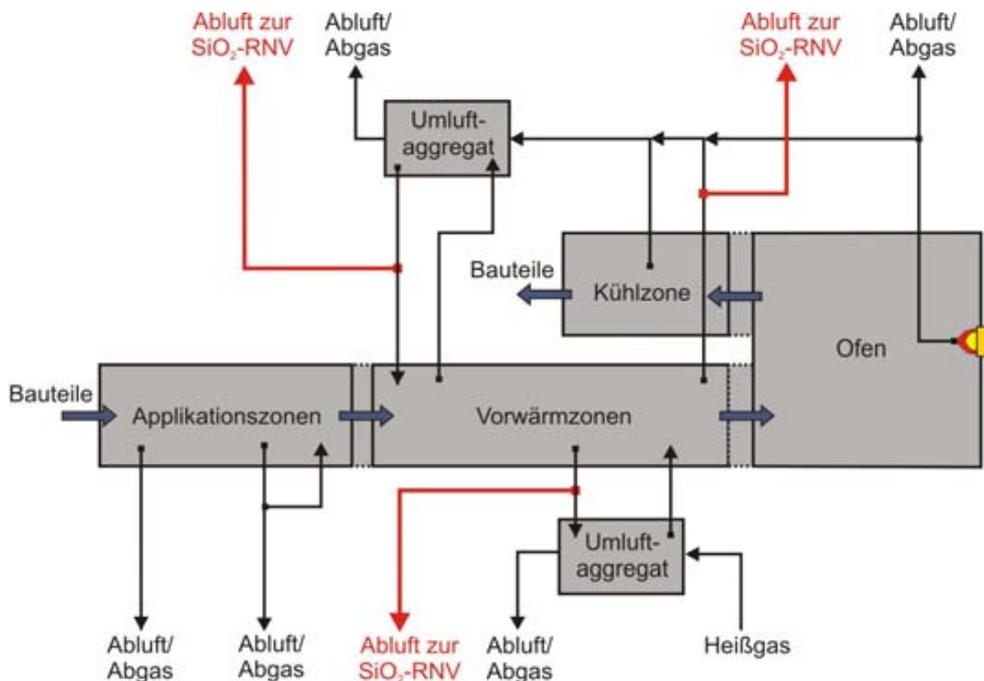


Bild 7.5: Vereinfachtes Fließbild der Thermoglasuranlage einschließlich Abluftabsaugungen für die Versuchsanlage.

Die Thermoglasuranlage ist grundsätzlich gemäß **Bild 7.5** (vereinfachtes Fließschema) aufgebaut. Auf eine detailliertere Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet, da das Verfahren hinsichtlich Applikation und anschließender thermischer Behandlung der Geheimhaltung unterliegt.

7.3.2 Applikation der SiO₂-RNV-Versuchsanlage in Oelde

Vor der Applikation der Versuchsanlage war zunächst zu klären, an welcher Stelle des Thermoglasurprozesses eine Abluftabsaugung erfolgen sollte. Hierzu wurden im Vorfeld orientierende Konzentrationsmessungen an allen vorhandenen Umluft- und Abgasströmen der Anlage durchgeführt. **Tabelle 7.1** gibt einen Überblick über einige Messwerte. Es zeigte sich, dass der größte Teil der organischen Emissionen der Anlage in den Vorwärmzonen anfällt. Relevante, jedoch niedrigere C_{ges}-Konzentrationen sind auch in der Abdunstzone und dem Trockner gemessen worden. Weniger bedeutsam sind die Konzentrationen im Brennerabgas sowie in den Applikationszonen.

Tabelle 7.1: Konzentrationsmessungen an der Thermoglasuranlage.

Nr.	Messstellenbezeichnung	C _{ges} Konz. [ppm]			C _{ges} Konz. [mg/m ³]		
		Mittel	Min	Max	Mittel	Min	Max
M1	Abluft Applikation 1	27	22	36	44	36	58
M2	Abluft Applikation 2	28	20	45	45	32	73
M3	Abluft Vorwärmung 1	88	70	105	142	113	170
M4	Umluft Vorwärmung 2	152	134	169	245	215	272
M5	Umluft Vorwärmung 3	332	180	547	534	290	881
M8	Abluft Vorwärmung 3	132	243	443	213	391	713
M10	Abgas Ofen	3	17	113	5	27	182

Auf Basis der Messungen wurden dann die drei Anschlussstellen mit hohen Konzentrationen (Abdunstzone, Anwärmzone 1 und Ofeneinfahrt) festgelegt, an denen die Abluft für die SiO₂-RNV-Versuchsanlage abgezogen werden sollte. Die Absaugstellen sind in Bild 7.5 rot eingezeichnet.

Vor der Diskussion der Ergebnisse des Versuchsbetriebes ist es zum besseren Verständnis und der Vollständigkeit halber zweckmäßig, in verkürzter Darstellung auf die Funktionsweise der Pilotanlage einzugehen.

Herkömmliche RNV-Anlagen sind gemäß **Bild 7.6** meist als Drei- oder Mehrkammersysteme (Regeneratoren A, B und C) ausgeführt, die in eine oben liegende Brennkammer (D) münden und zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine extrem hohe Abluftvorwärmung ermöglichen und daher den Zusatzbrennstoffeinsatz auf ein Minimum begrenzen. Innerhalb der drei Regeneratorkammern werden nacheinander die drei Zyklen

- Abluft aufwärmen (Regenerator A)
- Regenerator spülen (Regenerator B)
- Reingas kühlen (Regenerator C)

durchlaufen. Der neu entwickelte Technologieansatz basiert darauf, die Siliziumdioxidanhaftungen innerhalb der Regeneratoren gezielt zuzulassen und die keramische Wärmespeichermasse abhängig von der Staubbelastung (z. B. monatlich) automatisiert zu entnehmen und zu reinigen. Auf diese Weise dient der Regenerator gleichzeitig der Wärmerückgewinnung und der Staubrückhaltung. **Bild 7.7** zeigt schematisch den Aufbau der entwickelten Verfahrensvariante, die auf einer Einturmbauweise mit Keramikugelfüllung basiert. Das hat den Vorteil, dass ein System zum Aus- und Eintrag der Schüttung nicht mehrfach installiert werden muss. Die Aufgaben „Abluftvorwärmung“ (A in Bild 7.6 und 7.7) und „Reingasabkühlung“ (C) werden durch eine einzelne Schüttung wahrgenommen, die zwei übereinander angeordneten Regeneratoren entspricht. Das zyklische Wärmerecycling erfolgt durch eine Umkehr der Strömungsrichtung innerhalb des Systems. Der Schadstoffumsatz (und damit auch die Bildung des Siliziumdioxids) und die Reaktion des Zusatzbrennstoffes findet etwa in der Mitte der

Schüttung statt, der Brennraum (E) entfällt. Das Brennersystem im Kopf der Anlage dient nur noch zum Aufheizen der Anlage und ist im Abgasreinigungsbetrieb abgeschaltet. Zur Realisierung des Spülvorgangs (B) ist ein Pufferbehälter vorgesehen, der das im Regenerator befindliche Rohgas nach dem Umschalten zwischenspeichert. Damit ist das neue System dem konventionellen oder klassischen (Bild 7.6) energetisch und im Hinblick auf die erzielbaren Reingaswerte praktisch gleichwertig.

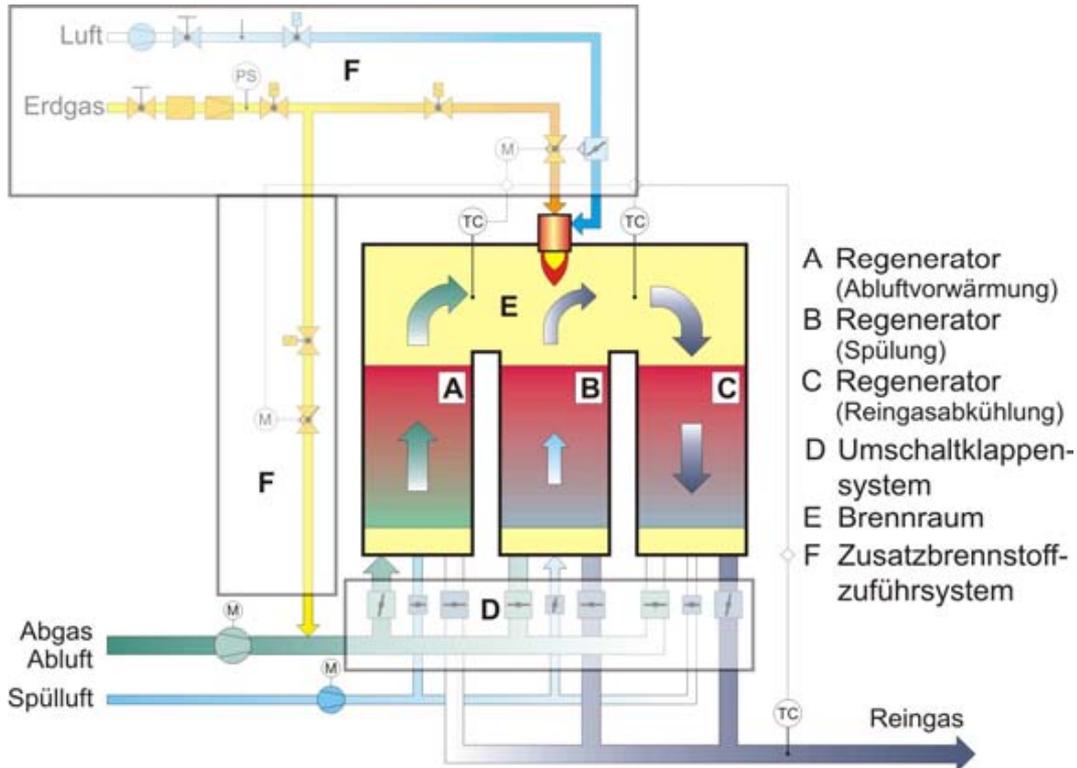


Bild 7.6: Schematische Darstellung einer konventionellen RNV-Anlage.

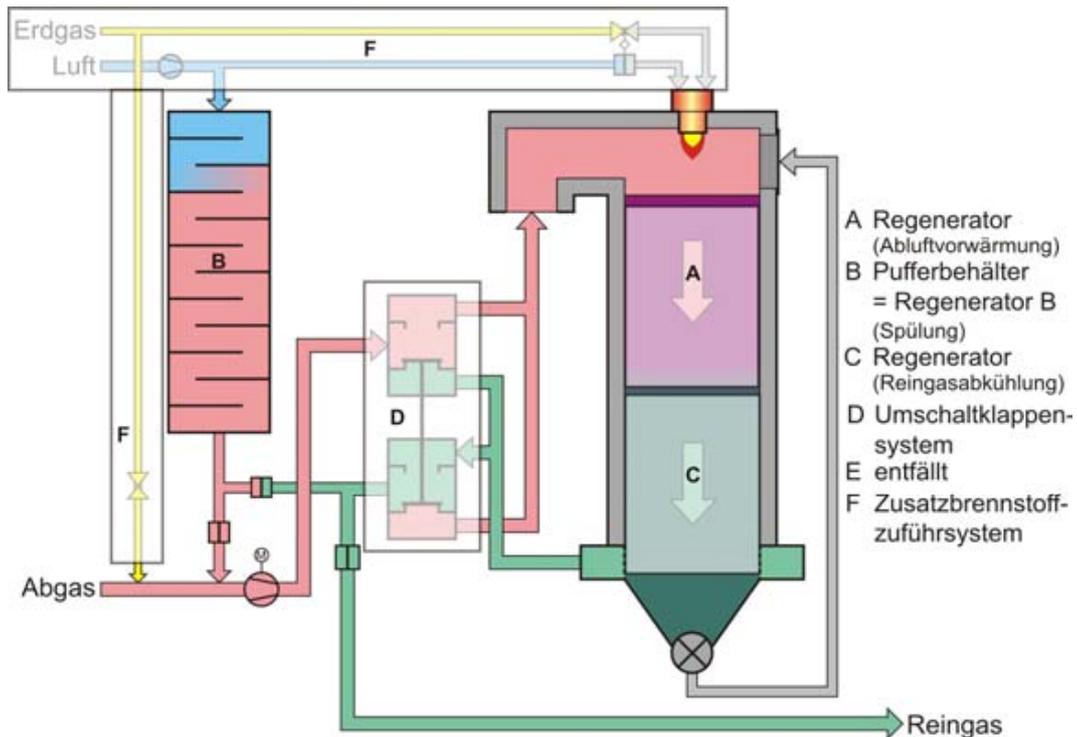


Bild 7.7: Schematische Darstellung des neuen Technologieansatzes.

Die Verfahrenstechnik der Pilotanlage entspricht im Wesentlichen dem in Bild 7.7 dargestellten Konzept. Es wurde jedoch aus Kostengründen auf den automatisierten Kugelastrag und den Spülbehälter verzichtet. Die Fotos in **Bild 7.8** vermitteln einen Eindruck vom Aufbau der Pilotanlage und sind während des Einsatzes in Oelde erstellt worden.



Bild 7.8: Aufstellung und Einsatz der Pilotanlage in Oelde.

Die wichtigsten technischen Daten der Versuchsanlage sind in **Tabelle 7.2** zusammengefasst.

Tabelle 7.2: Technische Daten der Pilotanlage.

Grundsätzliche Anforderungen		Anlagengeometrie	
ausreichende Größe für ein Scale-up		Gesamtabmessungen (BxTxH)	2,4x2,8x10 m
flexibler, modularer Aufbau		Reaktordurchmesser (außen)	1200 mm
einfacher Transport zu weiteren Anwendern		Regeneratorbetthöhe	6000 mm
Betriebsdaten		Regeneratorbettdurchmesser	700 mm
Brennerleistung	max. 180 kW	Regeneratorbettmasse	3,5...4 Mg
Abgasstrom	max. 1200 m ³ _N /h	Durchmesser Keramikugeln	25 mm
Vorwärmgrad	93...96 %	Regenerator Oberfläche	320...380 m ²

Neben der apparatetechnischen Konzeption wurde besonderes Gewicht auf die regelungstechnische Ausgestaltung des Systems gelegt.

Auf Grund des besonderen Anlagenaufbaus und den Anforderungen an das Temperaturprofil (für den Schadstoffumsatz ausreichend hohes Temperaturmaximum in der Mitte des Regenerators) ergab sich die Herausforderung, ein spezielles Anfahrprogramm zum Inbetriebsetzen der Anlage sowie eine angepasste Regelungsstrategie zur Koordination der Lage des Temperaturprofils zu entwickeln. In **Bild 7.9** sind die wichtigsten Betriebszustände und die dabei vorherrschenden Temperaturprofile als prinzipielle Verläufe dargestellt.

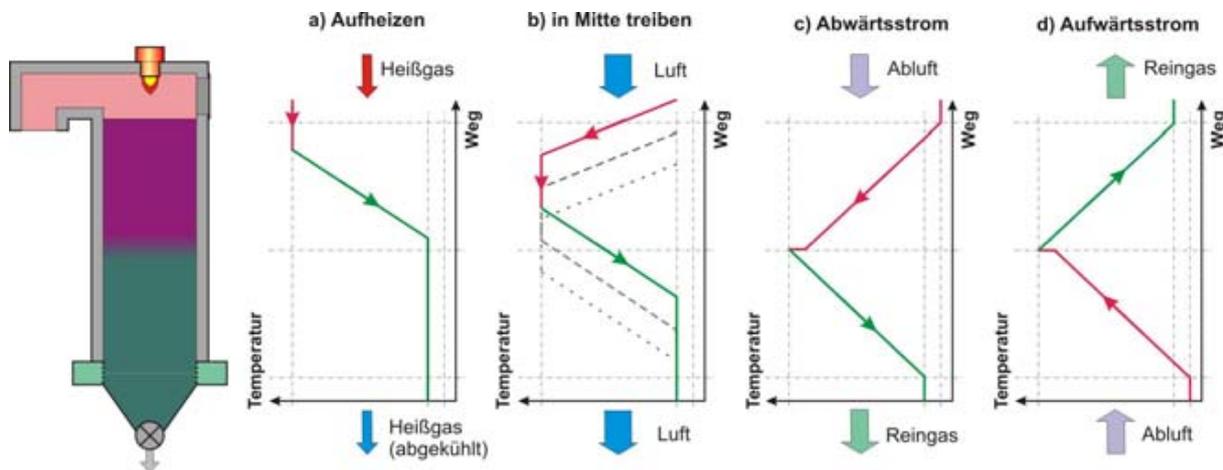


Bild 7.9. Prinzipieller Verlauf der Temperaturprofile im Regeneratorbett.

Durch eine begleitende mathematische Modellierung konnte der Anfahrprozess auf Antrieb erfolgreich vollzogen werden [RCN07]. Aufgrund der sich ausbildenden Temperaturprofile insbesondere bei Veränderungen der Schadstofffrachten und der Notwendigkeit, diese in der Mitte des Reaktors zu halten, ist ein Lageparameter eingeführt worden. Er integriert die Temperaturfunktion über dem Weg und vergleicht die ermittelten Flächen ober- und unterhalb der (thermodynamischen) Mitte des Reaktors. Auf Abweichungen reagiert das System mit veränderlichen Umschaltzeiten. Die speicherprogrammierbare Steuerung der Anlage hat zwischenzeitlich einen Reifegrad erreicht, der einen vollautomatischen Betrieb ermöglicht. Mittels einer mobilen Internetverbindung können alle Betriebsdaten übertragen und die gesamte Anlagensteuerung von Clausthal aus vorgenommen werden.

7.3.3 Ergebnisse des Versuchsbetriebs

7.3.3.1 Überblick Versuchsreihen bei Miele

Der Aufbau der Versuchsanlage in Oelde wurde nach einer längeren Planungsphase, die für die Klärung von genehmigungsrechtlichen Fragen und die Fundamenterstellung erforderlich war, im Oktober/November 2007 durchgeführt. Verzögerungen bei der Bereitstellung einer Datenverbindung haben dazu geführt, dass die Inbetriebnahme der Anlage erst am 25.03.2008 möglich war. Es schloss sich eine Versuchsphase bis zum 31.10.2008 an. Innerhalb dieses Zeitraumes konnte ein Normalbetrieb (Abluftbehandlung) mit einer Gesamtdauer

von 171 Tagen realisiert werden. In der **Tabelle 7.3** ist ein Überblick über die in Oelde durchgeführten Versuchsreihen aufgeführt.

Tabelle 7.3: Überblick über die in Oelde durchgeführten Versuchsreihen.

Versuchsreihen Oelde										
Turnus Nr.	Start	Ende	Tage Normalbetrieb	Versuchsparameter	Abluftvolumenstrom	Regeltemperatur	Umschaltzeit	Lage Temperaturprofil	Druckverlust	Erdgasverbrauch
					m ³ /h	°C	Min	%	mbar	m ³ /h
1	22.03.08	22.04.08	31	Minimum	700	880	9,9	56	19,7	1,51
				Mittelwert	700	881	10,0	60	33,4	2,07
				Maximum	700	885	10,2	65	41,9	3,78
	Bemerkungen:	Parametervariation: Lageparameter Temperaturprofil Überautothermes Temperaturprofil								
2	25.04.08	26.05.08	23	Minimum	680	850	9,9	56	17,1	1,19
				Mittelwert	744	854	10,0	56	53,1	1,29
				Maximum	800	855	10,0	56	84,2	1,39
	Bemerkungen:	Parametervariation: Abluftvolumenstrom Messung der Cges-Konzentrationen von Abluft und Reingas								
3	28.05.08	01.07.08	29	Minimum	600	815	7,5	56	25,5	0,81
				Mittelwert	687	850	10,3	58	51,6	1,32
				Maximum	700	875	20,0	59	81,6	2,45
	Bemerkungen:	Parametervariation: Regeltemperatur Betriebsunterbrechung infolge einer SPS-Störung								
4	03.07.08	20.08.08	40	Minimum	580	850	4,9	56	23,2	0,75
				Mittelwert	811	876	6,9	59	47,6	1,55
				Maximum	1000	895	10,0	61	65,3	3,40
	Bemerkungen:	Parametervariation: Regeltemperatur, Umschaltzeit Messung der Cges-Konzentration im Reingas								
5	01.09.08	23.09.08	22	Minimum	750	865	9,9	45	42,3	1,11
				Mittelwert	795	882	14,0	56	51,7	1,39
				Maximum	800	895	30,0	59	58,3	1,77
	Bemerkungen:	Parametervariation: Abluftvol.str., Regeltemperatur, Umschaltzeit Drei Betriebsunterbrechungen infolge von SPS-Störungen								
6	01.10.08	31.10.08	26	Minimum	390	15	0,0	45	5,5	0,00
				Mittelwert	772	765	13,1	56	46,9	1,16
				Maximum	1000	890	30,0	62	58,3	1,56
	Bemerkungen:	Parametervariation: Frischluftbetrieb ab 16.10.08 Versuch Entleerung im Normalbetrieb (Heißentleerung) 15./16.10.08								

Eine Versuchsreihe (Turnus) umfasst den Betriebszeitraum zwischen zwei Anlagenentleerungen und gliedert sich grundsätzlich in die Teilschritte:

1. Aufheizen der Anlage,
2. Einstellung des Temperaturprofils mit Frischluft,
3. Normalbetrieb mit Abluft (zyklischer Betrieb),
4. Abkühlen der Anlage,
5. Entleerung der Anlage mit Abtrennung des Staub- und Kugelbruchanteils sowie
6. Wartung und Wiederbefüllung der Anlage

Insgesamt sind sechs Versuchsreihen (Anlagenentleerungen) durchgeführt worden, bei denen sich die Anlage zwischen 22 und 40 Tagen im Normalbetrieb befand. Damit konnte gegenüber dem TNV-Betrieb, der nur für einige Tage störungsfrei möglich war, eine Vervielfachung der Standzeit erreicht werden.

Neben der Versuchsdauer sind in Tabelle 7.3 auch die im Normalbetrieb (Schritt 3) eingestellten Versuchsparameter (jeweils Minimum, Maximum und Mittelwert) aufgeführt. Die letzten beiden Spalten enthalten schließlich den erreichten Druckverlust der Regeneratorschüttung sowie den Erdgasverbrauch des jeweiligen Turnus. Unter „Bemerkungen“ sind Parametervari-

ationen innerhalb der Versuchsreihe und Sonderereignisse, wie Betriebsunterbrechungen aufgeführt. Die Mehrzahl der Betriebsunterbrechungen (insbesondere in Turnus 3 und 4) waren durch Fehlfunktionen (Systemabstürze) der Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) verursacht. Nach einem Austausch der CPU-Einheit war diese Fehlerquelle behoben. Es wird darauf hingewiesen, dass die Sicherheitseinrichtungen der Steuerung die Anlage bei jedem Stillstand in einen sicheren Zustand versetzt haben und ein Neustart (Reset) der SPS ferngesteuert möglich war. Anlagenstillstände infolge von betrieblichen Einflüssen (Verstopfungen, Ausfall von Messfühlern etc.) sind abgesehen vom Ausfall eines Klappenstellungsrückmelders (Feuchtigkeit) zu Beginn der Versuchskampagne nicht aufgetreten. Auch die Datenfernübertragung und Fernsteuerung der Anlage erwies sich als äußerst zuverlässig. Damit konnten bei den Versuchen in Oelde im Gegensatz zu den vorangegangenen Versuchen in Hamburg deutliche Fortschritte im Hinblick auf die Betriebssicherheit der Anlagentechnik erzielt werden.

In der ersten Phase des Forschungsvorhabens wurden nur punktuell Reingaskonzentrationsmessungen durchgeführt, weil hier die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und betriebliche Aspekte im Vordergrund des Interesses standen. Um auch das Ausbrandverhalten des Prozesses über einen längeren Zeitraum kontrollieren zu können, ist während der Versuche in Oelde (Turnus 2 bis 6) eine kontinuierliche Erfassung der CO-Konzentrationen (IR-Messtechnik) zum Einsatz gekommen. In Turnus 2 und Turnus 5 wurde zusätzlich die Σ org. C-Konzentration im Reingas mit einem Flammenionisationsdetektor (FID) fortlaufend gemessen. Eine Messung der Σ org. C-Eingangskonzentration fand nur in Turnus 2 statt. Dabei hat sich gezeigt, dass auch das Messgerät infolge der Oxidationsprodukte aus siliziumorganischen Verbindungen verstopft. Es wurde in der Folge auf weitere länger dauernde Rohgasmessungen verzichtet, da irreversible Schäden am Messgerät zu befürchten waren.

7.3.3.2 Erkenntnisse zum Anlagenverhalten aus dem Versuchsbetrieb mit Abluft (Normalbetrieb)

Nach vollzogenem Aufheizvorgang geht die Anlage in den regulären Abluftbehandlungsbetrieb (Normalbetrieb) über. Die Abluft wurde an allen drei Absaugstellen (vgl. Bild 7.5) entnommen. Anhand einer Übersichtsgrafik von Versuchsturnus 2 (**Bild 7.10**) lässt sich das Betriebs- und Emissionsverhalten der Anlage im Verlauf des Turnus erläutern. In der Grafik sind ausgewählte Messgrößen (Skalierung und Einheiten in der Legende) in Abhängigkeit von der Versuchsdauer in Tagen aufgetragen. Die grau dargestellten Kurven repräsentieren dabei die einstellbaren Parameter (Abluftvolumenstrom, Regeltemperatur, Umschaltzyklusdauer und Lageparameter). Abgesehen vom Abluftvolumenstrom ($700 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ und $800 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$) wurden bei diesem Turnus keine Parameter verändert. Die Regeltemperatur war mit $855 \text{ }^\circ\text{C}$, (relativ niedrig im Verhältnis zu den übrigen Turnussen), der Lageparameter war auf 56 %, der Umschaltzyklus auf 10 Minuten eingestellt.

Die farbig dargestellten Kurven zeigen die Verläufe der Messwerte:

- Differenzdruck der Regeneratorschüttung,
- Volumenstrom Erdgas,
- Temperaturen Reingas Austritt und Abluft Eintritt sowie
- Konzentrationen von CO und Σ org. C im Reingas und Σ org. C in der Abluft.

Der **Differenzdruck** der Schüttung hat einen über die Versuchszeit ansteigenden Verlauf. Ursache hierfür ist hauptsächlich die allmähliche Beladung der Schüttung mit SiO_2 -Anhaftungen. Einen Einfluss kann aber zusätzlich auch die Entstehung von Bruchstücken der Kugeln infolge von thermischen Spannungsrissen (zyklische Temperaturschwankungen in der heißen Zone) haben, die die Strömung ebenfalls behindern. Zum Ende des Versuchsturnus wurden Druckverluste von etwa 85 mbar gemessen, was der Kapazitätsgrenze des Ventilators entspricht. Ein Weiterbetrieb der Anlage führt dann nicht zu einer Druckverluststeigerung, sondern einem Absinken des Volumenstromes. Die Steigung des Druckverlustes korreliert offensichtlich auch mit der Abluftbeladung an organischen Stoffen. Ist diese niedrig, z. B. zwischen Tag 7 und 10 sowie Tag 16 und 19 ergibt sich eine geringere Steigung als in den übrigen Zeiträumen. Die niedrige Beladung liegt vornehmlich in Wochenendzeiten, in denen die Produktion reduziert bzw. abgeschaltet war. Ein weiterer Einflussfaktor ist auch der Abluftvolumen-

strom. Bei geringem Volumenstrom ist naturgemäß auch ein niedrigeres Druckverlustniveau zu erwarten. Darüber hinaus deuten die stark unterschiedlichen Steigungen der Kurve bei 700 m³_N/h (bis Tag 10) und 800 m³_N/h (ab Tag 11) darauf hin, dass der Druckverlustaufbau infolge der Siliziumanhaftungen sich bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten schneller vollzieht.

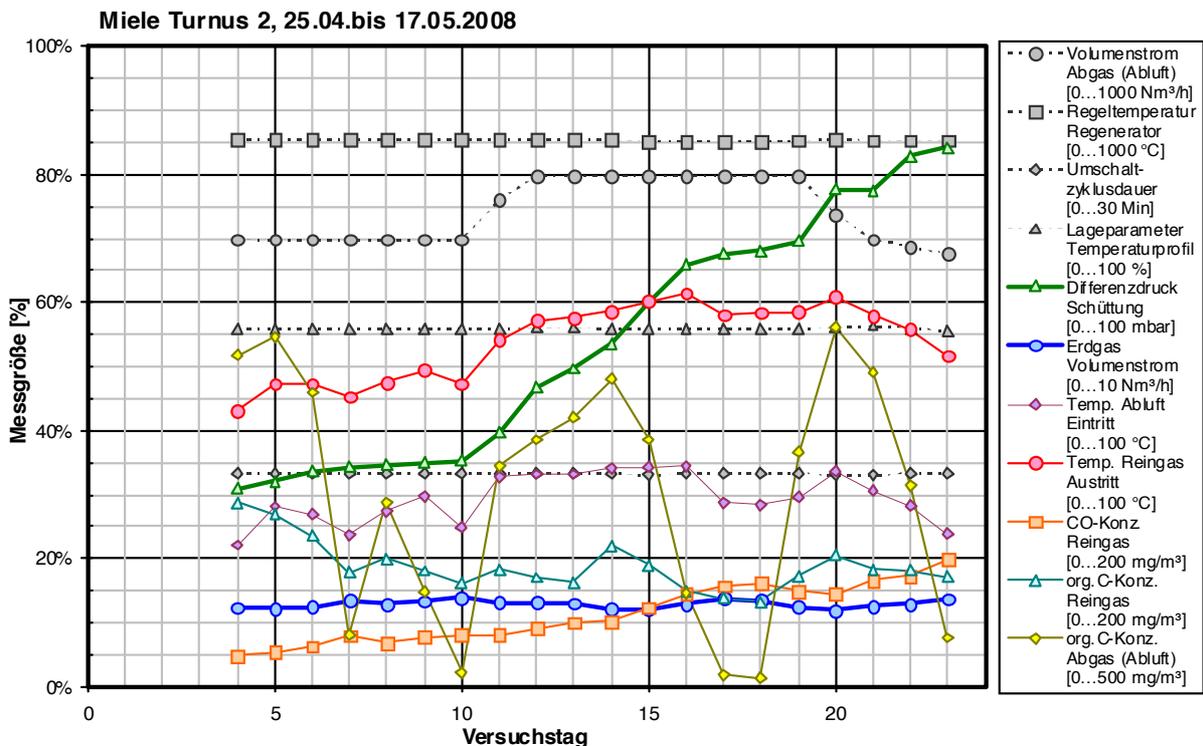


Bild 7.10: Zeitliche Verläufe ausgewählter Messgrößen für den Versuchsturnus 2.

Die Auswirkung der Beladung mit Siliziumdioxid auf den **Erdgasverbrauch** und damit die Vorwärmefizienz der Anlage ist dagegen sehr gering. Es ergibt sich kein signifikanter Anstieg des Verlaufs über der Versuchszeit. Dies deutet darauf hin, dass die Wärmeübertragungseigenschaften des Regeneratorbettes durch die Anhaftungen nicht relevant verändert werden. Insgesamt ist das Niveau des Erdgasverbrauches mit ca. 1,2 bis 1,4 m³_N/h niedrig. Letzterer Wert entspricht etwa einem Abluftvorwärmgrad von 94,6 %.

Die **Reingaskonzentrationen** von CO liegen auf einem Niveau zwischen ca. 10 mg/m³_N bis 40 mg/m³_N, was einen guten Ausbrand im Hinblick auf den üblichen CO-Grenzwert von 100 mg/m³_N darstellt. Es lässt sich keine signifikante Auswirkung höherer org-C-Abluftkonzentrationen feststellen. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass niedrige Beladungen zur Aufrechterhaltung der Reaktionstemperatur des Prozesses durch die Erdgasbeladung ausgeglichen werden. Auffällig ist der allmähliche Anstieg der CO-Konzentration mit steigendem Druckverlust. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Ausbrandbedingungen bei hoher SiO₂-Beladung tendenziell schlechter sind. Aber auch bei höherem Druckverlust stärker auftretende Randströmungen sind eine mögliche Ursache. Jedoch lässt sich dies nicht anhand der Σ org. C -Konzentrationen im Reingas nachvollziehen, die einen tendenziell waagerechten Verlauf aufweisen. Hauptursache der Σ org. C -Emissionen sind Umschaltpeaks und ein relativ ausgeprägtes Tailing aufgrund des bei der Versuchsanlage nicht vorgesehenen Spülbehälters (siehe auch Bild 7.17).

Der Vollständigkeit halber ebenfalls im Diagramm dargestellt sind die **Ablufteintritts-** und die **Reingasaustrittstemperaturen**. Bei den übrigen Versuchsreihen (Turnus 1, 3 bis 6) sind die Rohgaskonzentrationen nicht gemessen worden. Ob die Produktion in Betrieb ist, lässt sich anhand der dann höheren Eintrittstemperatur des Abgases feststellen.

Die zeitlichen Verläufe der Messgrößen sind für alle Versuchsreihen (Turnus 1 bis 6) in den Bildern A1.1 bis A1.6 im Anhang enthalten. Die Grafiken wurden analog zu Bild 7.10 aufgebaut. An dieser Stelle soll zusammenfassend auf signifikante Unterschiede in den Versuchseinstellungen hingewiesen werden:

- Turnus 1 (**Bild A1.1**):
Im ersten Turnus wurde der Versuchsanlage Abluft mit etwas geringerer Konzentration aus einer Absaugstelle (Tabelle 7.3, M5) vorgelegt, um ein Gefühl für das Verhalten der Anlage bei den neuen Einsatzbedingungen zu erhalten. Alle übrigen Versuche sind mit Abluft aus allen 3 Absaugstellen beaufschlagt worden. Als Einstellparameter wurde nur die Lage des Temperaturprofils von 64% bis 56 % verändert. Aufgrund des geringen Volumenstromes ($700 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$) und der hohen Regeltemperatur hat sich ein breites Temperaturplateau mit einem innerhalb der Schüttung allmählich nach oben und unten wandernden Temperaturprofil herausgebildet (vgl. hierzu auch Abschnitt 7.3.3.4). Der Druckverlust steigt relativ langsam an.
- Turnus 2 (**Bilder A1.2** und 7.10):
Der zweite Turnus wurde bereits erläutert.
- Turnus 3 (**Bild A1.3**):
Der dritte Turnus beinhaltete einen Anlagenneustart (Tag 12), der aufgrund eines SPS-Ausfalls notwendig wurde. Als Einstellparameter wurde gegen Ende des Turnus die Regeltemperatur schrittweise von 860 bis auf 815 °C abgesenkt, was sich in einem Anstieg der CO-Konzentration bemerkbar machte. Insgesamt ist das CO-Konzentrationsniveau niedriger als bei Turnus 2. Auffällig sind jedoch sehr hohe CO-Konzentration in den ersten 3-4 Tagen nach dem Aufheizen, die aus einem noch nicht voll ausgebildeten Temperaturprofil resultieren (vgl. hierzu auch Abschnitt 7.3.3.4). Der Druckverlust steigt ähnlich schnell wie in Turnus 2. An Tag 19 wurde eine Staubprobe mit drei Messungen durchgeführt und eine mittlere Staubbelastung von $2,6 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ festgestellt (vgl. **Anhang A1.7**).
- Turnus 4 (**Bild A1.4**):
Der vierte Turnus ist durch 3 Anlagenneustarts (Tag 6, Tag 22 und Tag 29) gekennzeichnet, die ebenfalls auf SPS-Ausfälle zurückzuführen sind. In der Folge wurde die CPU-Einheit ausgewechselt. Der Abluftvolumenstrom ($700 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ bis $1000 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$), die Umschaltzeit (5 Minuten und 10 Minuten) und die Regeltemperatur wurden im Verlauf der Versuche variiert. Insgesamt schränken die häufigen An- und Abfahrvorgänge die Aussagekraft der Versuchsergebnisse dieses Turnus ein.
- Turnus 5 (**Bild A1.5**):
Im fünften Turnus wurden – wie auch im 2. Turnus – Σ org. C -Reingaskonzentrationen gemessen. Parametervariationen sind mit Blick auf gute Ausbrandwerte und die Minimierung von Umschaltpeaks (Σ org. C) durchgeführt worden. Bei relativ hoher Regeltemperatur und einem Volumenstrom von $800 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ wurden der Einfluss größerer Zykluszeiten (10 bis 30 Minuten) und der Verlängerung der Abschaltdauer des Erdgasventils vor dem Umschalten (von 10 s auf 30 s bzw. 60 s) untersucht. Es zeigte sich, dass die Reingaskonzentrationen von CO und Σ org. C durch die Optimierungen gegenüber Turnus 2 deutlich abgesenkt werden konnten.
- Turnus 6 (**Bild A1.6**):
Der sechste Turnus nimmt eine Sonderstellung ein. Ein Betrieb mit Abluft erfolgte in den ersten 15 Tagen bei unveränderten Einstellparametern. Anschließend wurde eine Teilentleerung der Anlage ohne vorherige Abkühlung durchgeführt, um zu demonstrieren, dass in einer Hauptausführung auf ein Abfahren der Anlage zum Reinigen der Kugelschüttung verzichtet werden kann, wenn jeweils nur ein geringer Teil der Schüttung abgezogen wird. Im Anschluss daran wurde die Anlage 10 Tage mit Frischluft betrieben, um eine Bilanzierung unabhängig von der Abluftbelastung zu ermöglichen.

Eine ausführliche Übersicht über die Tagesmittelwerte der wichtigsten Messgrößen aller Versuche ist im Anhang in den **Tabellen A2.1** bis **A2.6** enthalten.

7.3.3 Entleerungen und Anhaftungsverhalten

Nach Beendigung eines Versuchsturnus wird die Anlage heruntergekühlt und die Regeneratorschüttung über einen unten angebrachten Austrag entleert.

Bei den in Hamburg durchgeführten Entleerungen der Regeneratorfüllung hat sich herausgestellt, dass die Austragsvorrichtung (**Bild 7.11a**) nicht gut handhabbar war. Zum Einen hat sich der Siebboden aus Maschendraht relativ schnell mit Bruchstücken der Kugeln zugesetzt, zum Anderen waren die Platzverhältnisse unterhalb der Anlage sehr eng (schlechte Zugänglichkeit).

Deshalb wurde durch die Firma LTB eine verbesserte Austragsvorrichtung in Form einer Rinne mit doppeltem Boden gebaut (**Bild 7.11b**). Der obere Boden ist als Lochblech (Lochdurchmesser 2 mm) ausgeführt, so dass bei der Entleerung direkt der Feinanteil (Siliziumdioxidstaub) abgezogen werden kann. Die Kugeln einschließlich etwaiger Bruchstücke fallen dann am Ende der Rinne an. Die Neigung der Rinne kann mittels höhenverstellbarer Füße den Erfordernissen angepasst werden.

In den ersten Einsätzen der Austragsrinne (Turnus 1 und 2) wurde festgestellt, dass bei Miele offensichtlich ein deutlich größerer Kugelbruchanteil anfällt. Dieser sollte ebenfalls abgetrennt werden, um eine signifikante Änderung der Korngrößenverteilung der Regeneratorschüttung zu verhindern. Hierzu wurde bei CUTEC eine zweite Stufe der Austragsvorrichtung hergestellt, bei der ein stabiler Gitterrost (Abstand 20 mm) eine Abtrennung des Kugelbruchs ermöglicht (**Bild 7.11c**). Mit dieser Austragsvorrichtung wurden die Entleerungen von Turnus 3 bis Turnus 6 durchgeführt.



a.) Bisherige Austragsvorrichtung

b.) Verbesserte Austragsvorrichtung (Stufe 1)

c.) Verbesserte Austragsvorrichtung (Stufe 2)

Bild 7.11: Aufbau einer verbesserten Austragsvorrichtung für die Versuche bei Miele.

Bei den Entleerungen erhält man somit drei Fraktionen:

1. weitgehend intakte Keramikugeln
2. Grobfraction bestehend aus Kugelbruchstücken
3. Feinfraction bestehend aus Siliziumdioxidanhaftungen (überwiegend)

Einen Überblick über die Gesamtmassen der bei den Versuchen abgezogenen Fraktionen liefert **Tabelle 7.4**. Die Versuchsanlage hat demnach ein Staubrückhaltevermögen (Feinfraction) von etwa 100 bis 120 kg (Feinfraction). Die abgezogene Masse an Kugelbruchstücken (Grobfraction) liegt zwischen 170 und 570 kg. Der sehr große Bruchanteil in Turnus 5 ist darauf zurückzuführen, dass bei diesem Versuch mit deutlich längeren Zykluszeiten bis zu 30 Minuten experimentiert wurde (vgl. Bild A1.5). Dies verursacht größere Temperaturamplituden, die eine höhere thermische Wechselbelastung der Kugelschüttung hervorrufen. Möglichst gleichmäßige Betriebsbedingungen sind also im Hinblick auf die Standzeit der Regene-

ratorschüttung von Vorteil. Tendenziell nimmt mit steigender Betriebsdauer auch der Bruchanteil zu.

Tabelle 7.4: Überblick über die Gesamtmassen an Kugeln sowie Grob- und Feinfraktion.

Turnus	Datum	Masse Kugeln	Masse Grobfraktion	Masse Feinfraktion
		kg	kg	kg
1	23.04.2008	4712	n.b.	37,1
2	27.05.2008	4436	n.b.	117,2
3	02.07.2008	4342	166,1	107,6
4	29.08.2008	4564	299,4	130,9
5	22.09.2008	2930	567,0	54,2
6a	15.10.2008	1851	108,0	< 2
6b	26.11.2008	3868	145,5	7,5

In den Diagrammen von **Bild 7.12** ist die relative Massenverteilung von Grob- und Feinfraktion über der relativen abgezogenen Kugelmasse aufgetragen. Somit ist eine Aussage über den Ort der Bildung von Anhaftungen möglich. 0% auf der x-Achse repräsentiert dabei das untere Ende, 100 % das obere Ende der Schüttung. Die Breite der Stufen der Treppenkurve entspricht dabei der jeweils entnommenen Kugelmasse, (ohne Staub- und Kugelbruchanteil). Bei der Interpretation der Grafiken muss jedoch berücksichtigt werden, dass ein Teil der Anhaftungen bei der Entleerung und auch bei An- und Abfahrvorgängen nach unten rieselt.

Die größten Staubmengen sind in den Versuchsturnussen 2 bis 5 etwa in der Mitte der Schüttung anzutreffen. Hier befindet sich auch die Reaktionszone mit den höchsten Temperaturen. In Turnus 1 ist eine breitere Verteilung der Staubmenge aufgetreten. Dies wird drauf zurückgeführt, dass sich ein sehr breites Temperaturplateau ausgebildet hat und sich somit die Reaktionszone nach oben (im Abwärtstrom) bzw. unten (im Aufwärtstrom) verschoben hat. Die häufigen An- und Abfahrvorgänge haben im Turnus 4 zu einem erhöhten Feinanteil am unteren Ende der Schüttung geführt. Im Turnus 5 ist die Verteilung etwas nach oben verschoben. Bei diesem Versuch ist es infolge des großen Kugelbruchanteils (Verkantungen der Bruchstücke) zu einer Brückenbildung unterhalb der Mitte der Schüttung gekommen. Dadurch konnte zunächst die untere Hälfte der Schüttung entnommen werden, die obere Hälfte blieb unbewegt und der „Rieseleffekt“ war weniger ausgeprägt als bei den übrigen Entleerungen.

Die Verteilung im Turnus 6 ist deshalb sehr untypisch, weil innerhalb dieses Versuchsturnus schon ein Teil (ca. 1800 kg) der Schüttung bei dem Heißentleerungsversuch entnommen wurde. Hierzu wurde das Temperaturprofil (Lageparameter) zunächst auf 60% etwas nach oben verschoben und der Abluftvolumenstrom der Anlage für die Dauer der Teilentleerung (jeweils ca. 1 h) abgeschaltet. Insgesamt wurden 4 Teilentleerungen mit je ca. 450 kg Kugeln durchgeführt. Nach jeder Entleerung wurde die Anlage wieder in Betrieb gesetzt bis sich das ursprüngliche Niveau und die ursprüngliche Lage des Temperaturprofils wieder eingestellt haben. Es hat sich herausgestellt, dass die Schüttung auch im heißen Zustand entleert werden kann und die Anlagensteuerung innerhalb kurzer Zeit (ca. 2 h) wieder nahezu den ursprünglichen Zustand (Temperaturverteilung) hergestellt hat.

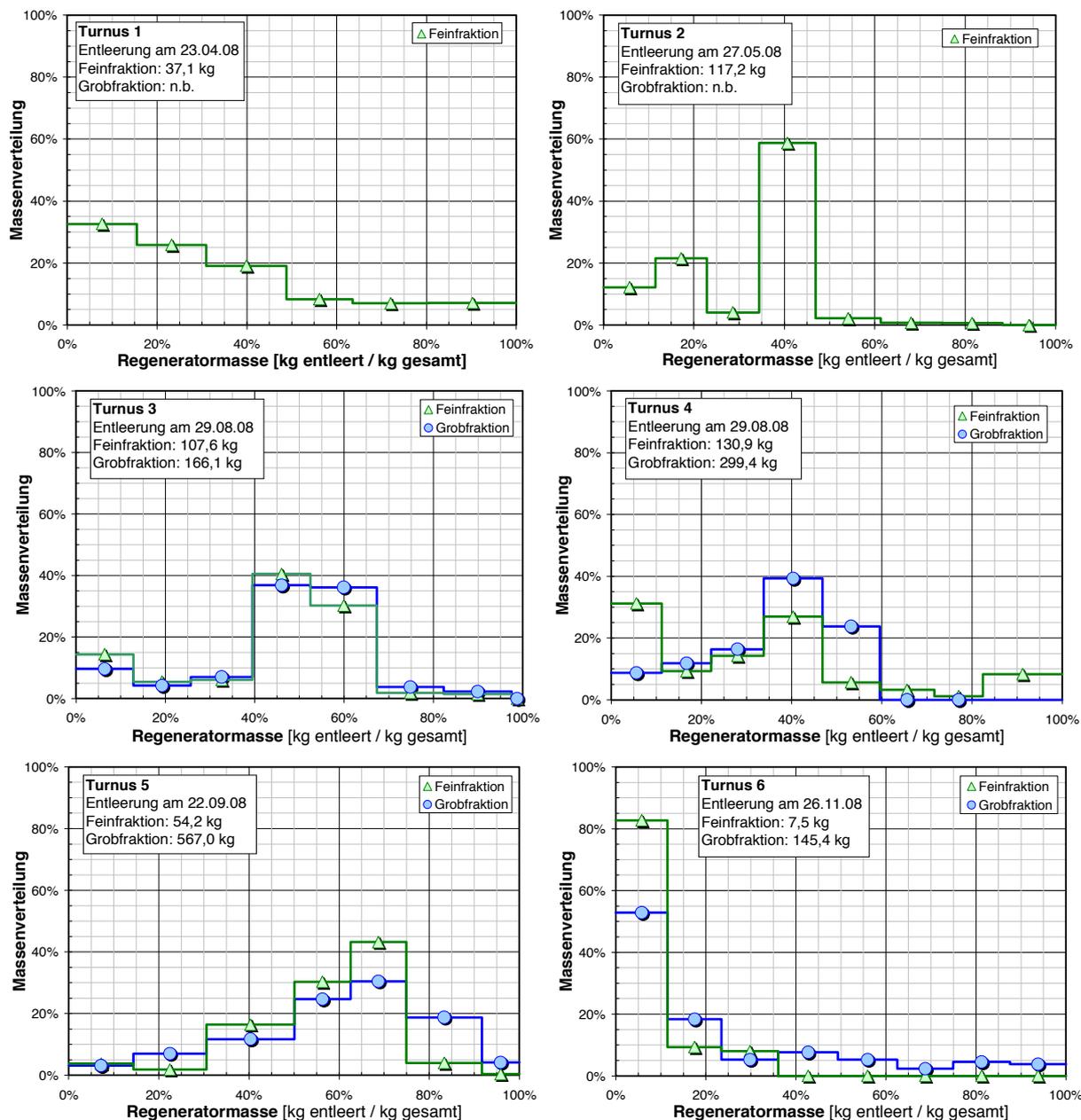


Bild 7.12: Massenverteilungen von Grob- und Feinfraktion bei den Entleerungen in Oelde.

Die Fotografien in **Bild 7.13** dokumentieren den Charakter der Anhaftungen. Während in den Wabenkörpern von herkömmlichen RNV-Anlagen eher amorphe Strukturen gefunden wurden, sind bei den hier durchgeführten Versuchen die Siliziumanhaftungen auf der Oberfläche der Kugeln zu einem Teil verglast. Bei den Entleerungen sind sowohl staubförmige Anhaftungen als auch verglaste Kugeloberflächen und glassplitterförmige Materialien abgezogen worden. Ein Vorteil der Verglasungserscheinungen liegt darin, dass die Masse der in der Anlage zurückgehaltenen SiO₂-Fracht sich deutlich erhöht, die Anlage also ein höheres Fassungsvermögen hat. Nachteilig könnten sich Verglasungen auswirken, wenn diese so stark ausfallen, dass die Keramikugeln agglomerieren. Bei den hier beschriebenen Versuchen wurde dies jedoch nicht festgestellt.

Die Ursachen für die Verglasungserscheinungen sind noch nicht eindeutig geklärt. Die übliche Schmelztemperatur von Siliziumdioxid (>1200 °C) ist in der Anlage nicht erreicht worden. Es ist jedoch denkbar, dass neben der Art der eingesetzten siliziumorganischen Verbindungen auch ggf. die Zusammensetzung der Keramikugeln eine Rolle spielt. Diese können z.B. Alkalimetalle enthalten, die den Schmelzpunkt deutlich herabsetzen können.



Bild 7.13: Entleerung mit hoher Staubfracht und Struktur der Siliziumdioxidanhaftungen.

7.3.3.4 Diskussion ausgewählter betrieblicher Phänomene

Anfahrvorgänge

Die Anfahrvorgänge der Anlage sind zunächst hauptsächlich aus Sicht der Anlagensteuerung interessant. Gemäß Bild 7.9 wird zunächst der obere Teil der Schüttung mit einem Heißgas (ca.980 °C) aufgeheizt, das aus im Abwärtsstrom geführter Frischluft und den Brennerabgasen besteht. **Bild 7.14** dokumentiert die dabei auftretenden Temperaturverläufe im Regenerator.

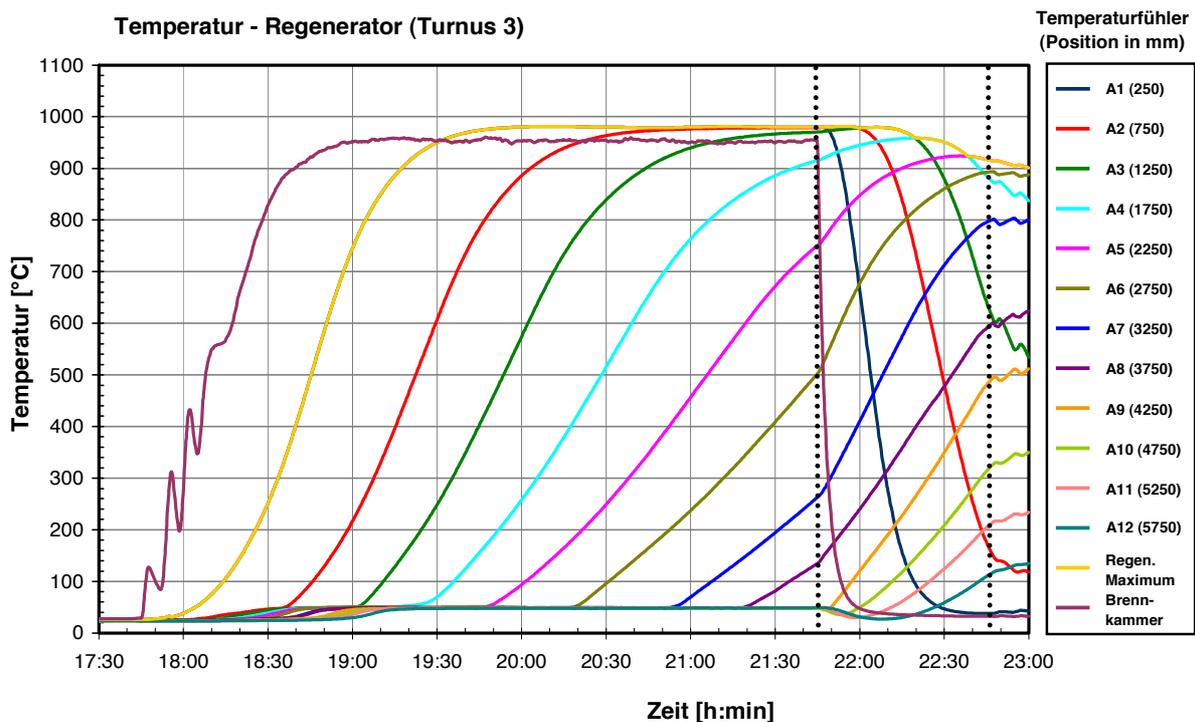


Bild 7.14: Zeitliche Temperaturverläufe beim Aufheizvorgang (Turnus 3).

Nach Erreichen eines Temperaturwertes von 750 °C an Messfühler A5 (Abbruchbedingung) wird der Brenner abgeschaltet und das Temperaturmaximum mit einem erhöhten Frischluftstrom in Richtung Regeneratormitte getrieben. Hat der Lageparameter LP [RüCN06] des Temperaturprofils einen Wert von 40 % überschritten und ist die Maximaltemperatur größer als 750°C (Zeitbedarf für diese Bedingungen erfahrungsgemäß ca. 1 Stunde), wird der zyklische Betrieb mit periodischer Strömungsumkehr aktiviert.

Die ersten Versuche bei Miele haben gezeigt, dass dem Anlagenstart auch aus Emissions-sicht eine besondere Aufmerksamkeit zukommen muss. Die CO-Emissionen waren insbesondere im Anschluss an die Anfahrvorgänge teilweise mehrere Tage lang sehr hoch, wie die Verläufe in Bild A1.3 und A1.4 zeigen. Maximal wurden Konzentrationen von 380 mg/m³_N festgestellt (Turnus 3). Aus diesem Umstand ergab sich die Notwendigkeit, den Aufheizvorgang im Hinblick auf die Emissionen zu optimieren.

In **Bild 7.15** ist beispielhaft der veränderte Aufheizvorgang von Turnus 6 aufgeführt. Die Heiß-gastemperatur wurde hier leicht abgesenkt (ca. 950 °C) und dafür die Abbruchbedingung auf das Erreichen einer Temperatur von 800 °C an Messfühler A6 verschoben, so dass ein größerer Bereich der Schüttung aufgeheizt wird. Die Brennereinschaltdauer hat sich dadurch nur um etwa 15 Minuten erhöht. Der zyklische Umschaltbetrieb (Lageparameter von 40 %) wurde schon nach einer deutlich kürzeren Zeit (30 Minuten) aktiviert. Durch diese vergleichsweise geringen Änderungen hat sich der Aufheizzyklus nicht verlängert, aber die CO-Werte (vgl. Bild A1.6) waren auch zu Beginn des Zyklus deutlich niedriger als gefordert. Dies ist natürlich außerordentlich erfreulich, zeigt aber auch, dass die Anlage besonders sorgfältig eingestellt werden muss, um von Beginn an eine sichere Grenzwertunterschreitung zu ermöglichen.

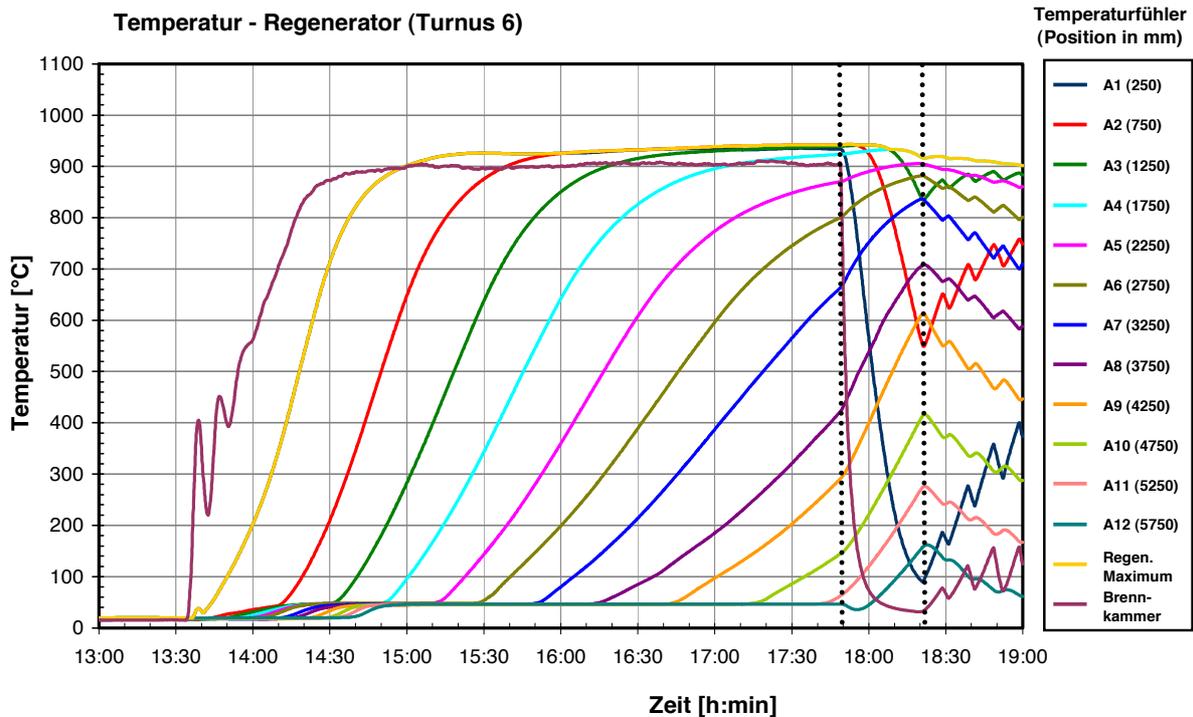


Bild 7.15: Zeitliche Temperaturverläufe beim Aufheizvorgang (Turnus 6).

Eine weitere wichtige Größe stellt der Energiebedarf für die Aufheizvorgänge dar. Dieser ist in **Tabelle 7.5** zusammenfassend in einer Energiebilanz aufgeführt. Es zeigt sich, dass die Aufheizung mit der konzentrationsoptimierten Fahrweise etwas mehr Energie (vgl. Turnus 3 mit Turnus 5 und 6) erfordert, als die ursprüngliche Vorgehensweise.

Tabelle 7.5: Dauer und Energiebedarf der Aufheizvorgänge.

Aufheizvorgang (Datum)	Turnus	Dauer		Energie zugeführt			Energie abgeführt		Differenz kW	In der Schüttung gespeichert kWh	Energieaufwand (Erdgas) kWh
				Abluft kW	Brennerluft kW	Erdgas kW	Reingas kW	Transmission kW			
28.05.2008	3	04:00	4,00	4,2	1,7	96,2	6,9	3,6	91,6	366,4	385,0
12.06.2008	3	04:02	4,03	2,1	1,4	115,0	6,1	4,0	108,4	437,3	463,9
03.07.2008	4	04:43	4,72	3,3	1,6	118,4	7,8	4,7	110,8	522,4	558,4
09.07.2008	4	04:28	4,47	3,1	1,4	117,3	8,6	5,1	108,1	482,9	524,0
28.07.2008	4	04:17	4,28	5,8	1,9	109,9	8,0	3,4	106,2	455,0	470,7
05.08.2008	4	04:00	4,00	4,6	1,5	109,2	7,7	3,9	103,7	414,6	436,6
01.09.2008	5	05:22	5,37	3,6	1,8	116,9	7,0	4,3	111,0	595,8	627,6
01.10.2008	6	04:14	4,23	2,6	1,2	121,4	8,1	5,1	112,0	474,0	514,1

Ausbildung überautothermer Temperaturprofile

Wie schon vermerkt, hat sich im ersten Turnus des Anlagenbetriebs ein überautothermes Temperaturprofil mit einem ausgeprägten Temperaturplateau entwickelt. Dieser Vorgang läuft allmählich über mehrere Versuchswochen ab und ist in **Bild 7.16** dokumentiert. Es haben sich 2 Temperaturmaxima ausgebildet, die charakteristisch für den überautothermen Betrieb einer solchen Anlage sind. Näheres zu diesem Phänomen ist in [RCN08] dargestellt.

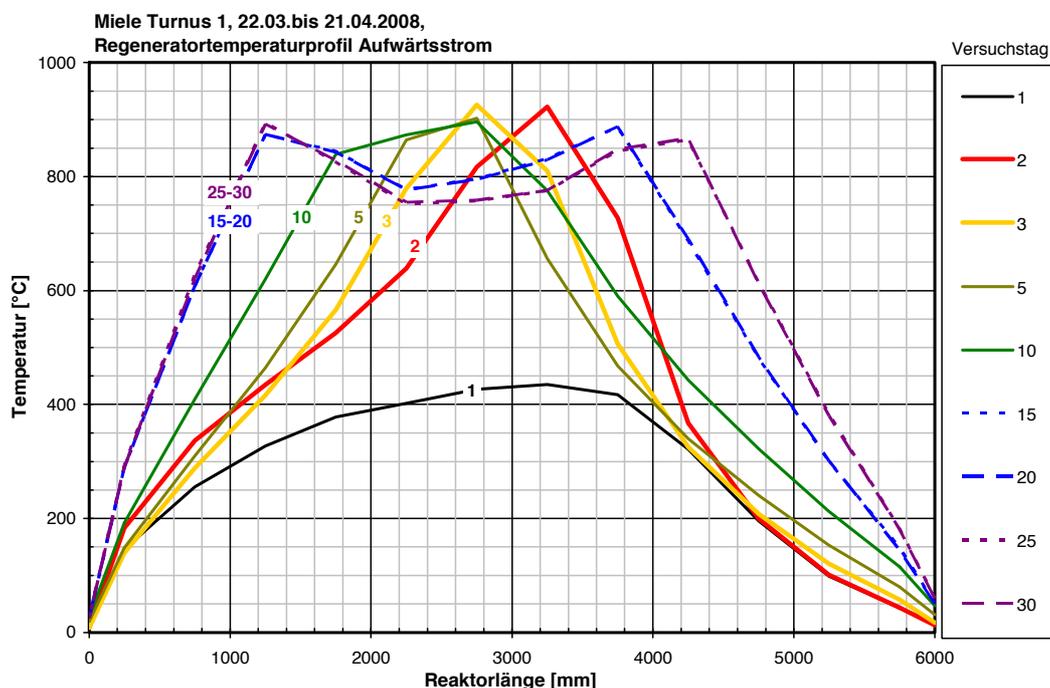


Bild 7.16: Zeitliche Entwicklung des Temperaturprofils in Zyklus 1.

Für den Betrieb der Versuchsanlage bedeutet dieser Betriebszustand, dass ein Verlust von wirksamer Wärmeübertragerfläche und ein erheblicher Erdgasmehrverbrauch zu verzeichnen ist. In Turnus 1 wurden etwa $2 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ Erdgas verbraucht (Bild A1.1), was gegenüber z.B. Turnus 2 (ca. $1,2 \dots 1,4 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$) einer Erhöhung um 40...60 % entspricht.

Ursächlich für die Entstehung des Temperaturplateaus bzw. der Temperaturmaxima ist die Einstellung eines relativ geringen Volumenstromes ($700 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$) und einer relativ hohen Regeltemperatur (880 °C) gewesen. Diese führte in Verbindung mit der sehr trägen eingestellten Regelung der Erdgaszufuhr zum unbeabsichtigten Entstehen des überautothermen Zustandes. Nach einer Optimierung sind in den übrigen Versuchen keine derartigen Zustände mehr aufgetreten.

Diskussion der zyklischen Reingaskonzentrationsverläufe

In **Bild 7.17** sind die Reingaskonzentrationen für Kohlenmonoxid und Σ org. C als zeitlicher Verlauf dargestellt. Das Resultat zeigt, dass bei optimaler Fahrweise auch ohne Spülbehälter bei einer Eingangsbelastung von $0,4 \dots 0,7 \text{ g/m}^3_{\text{N}}$ Σ org. C -Konzentrationen in der Größenordnung von 10 mg/m^3 erreichbar sind. Dieser Wert würde sich mit einer Spülung um die im Diagramm erkennbaren Umschaltpeaks verringern.

Der Verlauf der Reingaskonzentrationen zeigt darüber hinaus – auch an anderen Versuchstagen – insbesondere im Aufwärtsstrom ein ausgeprägtes Tailing, d.h. die Konzentrationen sinken über der Zeit langsamer ab, als im Abwärtsstrom. Dies hängt damit zusammen, dass im Aufwärtsstrom das im Verhältnis relativ große Volumen des Brennraumes mit gespült werden muss. Der Brennraum wird jedoch bei der Versuchsanlage nicht vollständig durchströmt, so dass dieser Spülvorgang länger dauert. Weiter können auch Schadstoffe in die keramische Faser diffundieren, aus der sie nur relativ langsam wieder austreten. Diesem Umstand ist bei der Konzeption einer Hauptausführung Rechnung zu tragen.

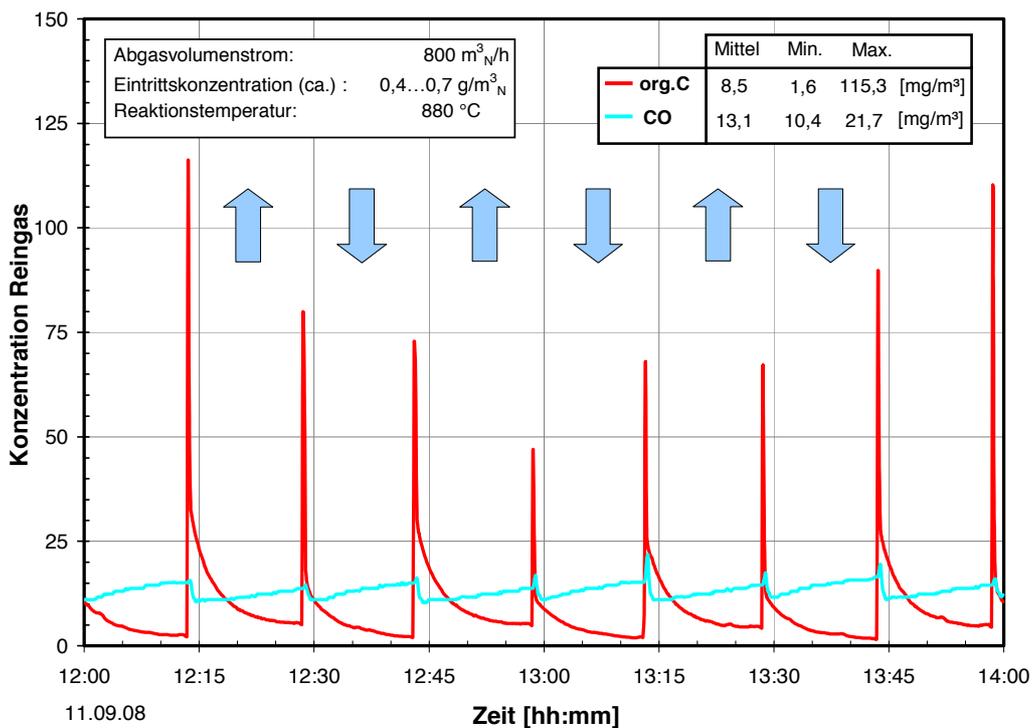


Bild 7.17: Reingaskonzentrationsverläufe (Beispiel).

7.3.4 Projektierung einer Hauptausführung

Nach der erfolgreichen Durchführung der verschiedenen Versuchsreihen hat sich das Verfahren für diesen Anwendungsfall als zielführend herausgestellt. Firma Miele hat sich entschlossen, eine solche Anlage nach dem neuen Verfahren zu installieren und somit das neue Verfahren umzusetzen. Zwischenzeitlich wurde seitens LTB ein Angebot zur Projektierung einer Hauptausführung für einen Volumenstrom von $5000 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ unterbreitet. Dieses Vorhaben befindet sich zurzeit in der Phase der technisch/kaufmännischen Klärung. Parallel dazu wurden durch CUTEC Messungen vorgenommen, um Datenmaterial zur Optimierung des vorhandenen Abluftkonzeptes bei Miele zu generieren.

Die Auslegung einer Hauptausführung nach neuem Technologieansatz erfolgte mit den folgenden Größen gemäß **Tabelle 7.6**:

Tabelle 7.6: Auslegungsparameter der Hauptausführung.

Abluft	
Volumenstrom, Norm	5000 m ³ _N /h
Volumenstrom, Betrieb	6830 m ³ /h
Massenstrom	6500 kg/h
Rohgastemperatur	100°C
Dichte, Norm	1,3 kg/m ³ _N
Dichte, Betrieb	0,95 kg/m ³
SiO₂-RNV	
Durchmesser innen	1750 mm
Bethöhe	2 x 2900 mm
Volumen Regeneratorkugeln	2 x 7,0 m ³
Ventilatorauslegung	
<ul style="list-style-type: none"> • Pressung wird zu 95% auf Ventilatordruckseite erbracht • Ventilator wird mit FU betrieben • Anordnung: Ventilator steht vor RNV 	
Druckverluste (100°C Ablufttemperatur)	
RNV-Regenerator	50 hPa (einschl. Verschmutzungen)
Klappen, interne Rohrleitg	10 hPa
Äußere Widerstände	5 hPa
Summe	65 hPa (bei 100°C)
Erforderliche Pressung	82 hPa (bei 20°C, Normierung Ventilator)
Brennerauslegung	
<ul style="list-style-type: none"> • Aufheizung 20 □ 1000°C: 1770 kW 	
Wärmerückgewinnungsgrad	ca. 90 %
erf. Leistung Abluft	177 kW
Sonstige Verluste	50 kW (geschätzt)
Brennergröße	400 kW (zum schnellen Anfahren)

Beschreibung des Kugelaustrags aus der RNV

Der Kugelaustrag hat die Aufgabe, die Keramikugeln unten aus dem Gehäuse der SiO₂-RNV ganz gleichmäßig über den Querschnitt (Massenfluss) auszutragen. Im Gegensatz zur Versuchsanlage, die jeweils komplett entleert wurde, soll die Betriebsanlage mit einem Kugelumlaufl für die Reinigung ausgerüstet werden. D.h., dass die Kugeln unten entnommen, nach oben transportiert, über eine Schältrammel gereinigt und in das SiO₂-RNV-Gehäuse wieder aufgegeben werden. Der Hintergrund hierfür ist zum einen, dass die Fallhöhe für die Kugeln wesentlich reduziert werden kann und weniger Kugeln zu Bruch gehen werden. Zum anderen besteht die Absicht, die Reinigung auch während des Abgasreinigungsbetriebes der Anlage zu testen, um so auf das Abfahren und Abkühlen der Anlage zur Reinigung verzichten zu können.

Das Konzept des Kugelaustrages (siehe auch **Bild 7.18**) wurde für eine sehr große Anlage (Volumenstrom: 20.000 m³/h, Innendurchmesser: 3.000 mm) untersucht und erarbeitet, weil hier die Bedingungen sehr viel schwieriger sind, als an einer kleinen Anlage, wie sie für Miele geplant ist. Ein zentraler Auslass, wie bei der Versuchsanlage realisiert, ist bei großem Durchmesser nicht mehr möglich, weil dann ein gleichmäßiger Abzug über den gesamten Querschnitt nicht zu erreichen ist.

Bei LTB liegen Erfahrungen aus dem Umgang mit Schüttgütern vor, speziell mit Austragssystemen für Schüttgüter mit Korndurchmessern im Bereich 3-8 mm, die jedoch grundsätzlich nicht rund waren und somit ein anderes Fließverhalten als die hier vorliegenden Kugeln zeigen.

Die grundlegende Idee bei der Neuentwicklung des Kugelaustrages war, durch eine geschickte Anordnung von Konen einen Böschungswinkel aus Kugeln zu bilden, aus dem dann mit

umlaufenden Räubern eine konstante, aber vergleichsweise kleine Menge an Kugeln gleichmäßig am Umfang ausgetragen wird.

Versuche mit Kugeln haben ergeben, dass der Schüttwinkel des ruhenden Kugelbetts bei 28° – 30° liegt (siehe **Anhang A1.2**). Aus diesem Grund sind alle Winkel der Konen im Austrag derart dimensioniert. Um ein Ausfließen der Kugeln zu verhindern, wird die Auslauffläche 20° nach oben geneigt und so lang gewählt, dass der Endpunkt auf gleicher Höhe wie die Oberkante des Schlitzes liegt. Die Räumarme, die die Kugeln über die aufsteigende Auslauffläche schieben, werden an den Enden zu schmalen Schaufeln ausgebildet. Für die beiden Räumarme wurde in Versuchen eine erforderliche Kraft von je ca. 300 N ermittelt. Unter der Annahme, dass die Losbrechkraft ca. 5-fach größer ist, ergibt sich die Dimensionierung des erforderlichen Getriebemotors für die Räumer zu 25.000 Nm.

Der Austrag muss neben dem Rückhalten und Austragen der Kugeln auch den Durchtritt des Abluftstroms in den Regenerator sicherstellen. Aus diesem Grund sind die Konen im Kugelaustrag aus Lochblech gestaltet. Die hierdurch entstehenden freien Flächen sind für den Abluftstrom ausreichend.

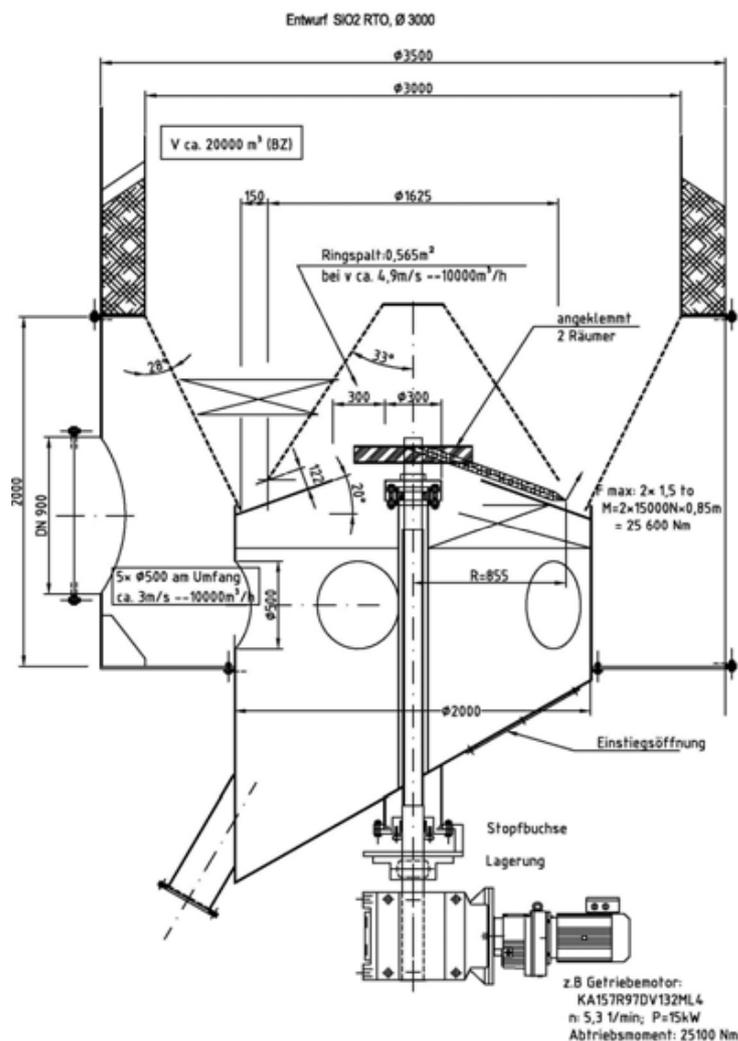


Bild 7.18 Kugelaustrag aus der RNV.

Beschreibung der Schältrummel

Die Schältrummel hat die Aufgabe, die keramischen Kugeln des Regenerators von Anhaftungen zu befreien. Dies soll durch reibende Kontakte der Kugeln untereinander erfolgen und wird durch Verwendung einer drehenden Trommel erreicht. Die Trennung von Feingut und Kugeln wird durch die Verwendung eines Lochblechs als Trommelmantel ermöglicht.

Die Schältrummel besteht aus einer inneren, sich drehenden Trommel und dem Außenmantel. Durch den Einlaufkanal werden die Kugeln in das Innere der drehenden Trommel geführt. Die Trommel besteht aus Lochblech mit kreisrunden Löchern und ist innen und außen mit einer schneckenförmigen Spirale ausgerüstet. Die innere Spirale erzwingt einen gleichmäßigen Transport der Kugeln in Längsrichtung durch die Trommel. Weitere, längs der Trommel senkrecht stehende Stegbleche bewirken eine zusätzliche Bewegung der Kugeln zueinander. Die Kugeln reiben aneinander, das Feingut löst sich von den Kugeloberflächen und fällt durch das Lochblech in den Außenmantel der Schältrummel. Am Ende der Trommel fallen die Kugeln gereinigt aus der Schältrummel. Das Feingut sammelt sich auf dem Boden des Außenmantels, wird hier von der Spirale auf der Außenseite der Trommel in die zum Kugeltransport entgegen gesetzte Richtung transportiert und verlässt die Schältrummel am anderen Ende in den Reststoffsilo. Die technischen Hauptdaten der Schältrummel sind in **Tabelle 7.7** aufgelistet, verschiedene Ansichten gibt **Bild 7.19** wieder.

Tabelle 7.7: Technische Hauptdaten der Schältrummel.

Schältrummel		
Durchsatzleistung	kg/h	1000
Drehzahl	min ⁻¹	60
Antriebsleistung	kW	0,25
Länge Außenmantel	mm	1660
Durchmesser Außenmantel	mm	900
Länge Trommel	mm	1380
Durchmesser Trommel	mm	680

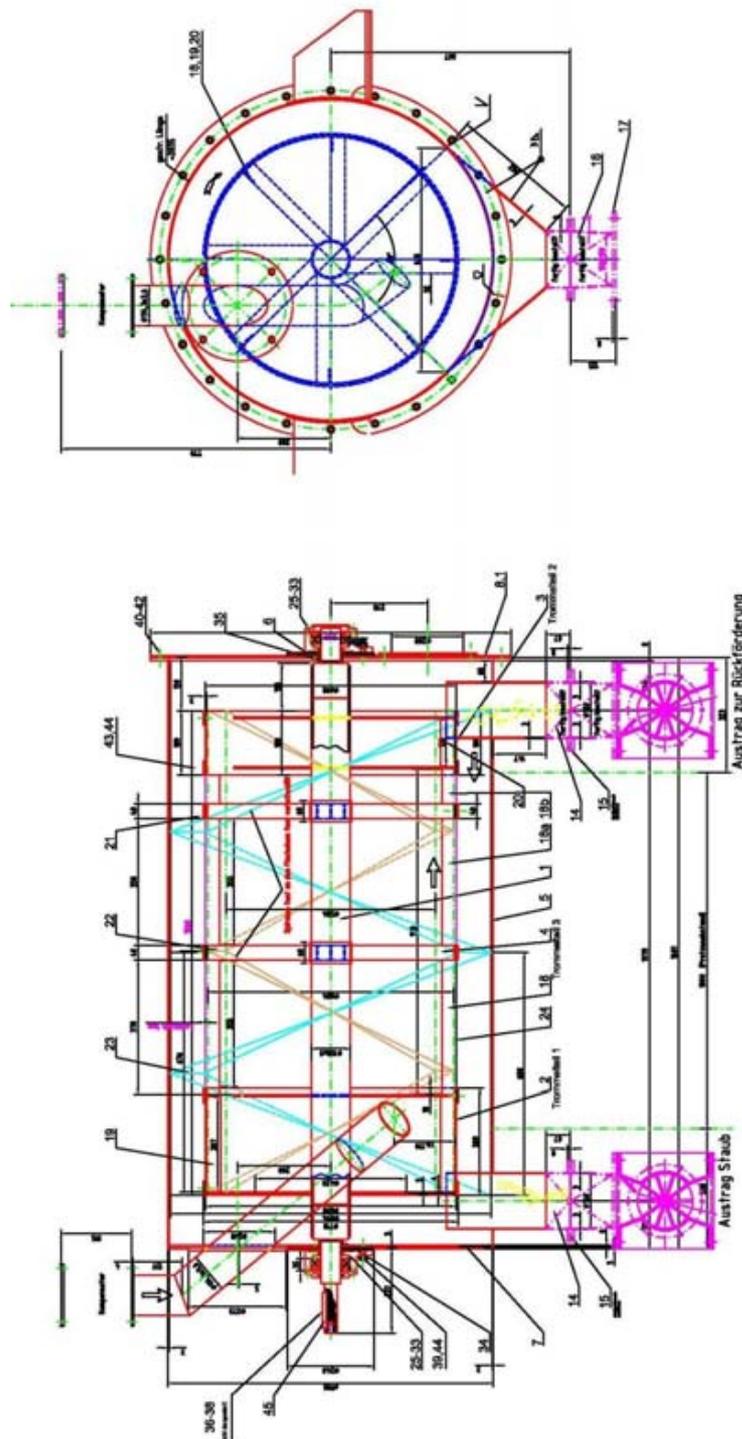


Bild 7.19 Ansichten der Schältrommel.

Rohrkettenträger

Ein handelsüblicher Rohrkettenträger (**Bild 7.20**) dient zum Transport der keramischen Formkörper vom unten liegenden Ausfrag in die oben liegende Schältrommel. Er besteht im Wesentlichen aus dem Rohrgehäuse aus Stahl mit Grund- und Deckanstrich sowie der Förderkette mit Transportscheiben in temperaturfester Ausführung. Zum Antrieb gehören das Antriebskettenrad, Lagerungen und ein Getriebemotor. Weiterhin sind eine Revisionsklappe sowie Abstützungen im Bereich der angeflanschten Ein- und Auslaufstutzen vorhanden.

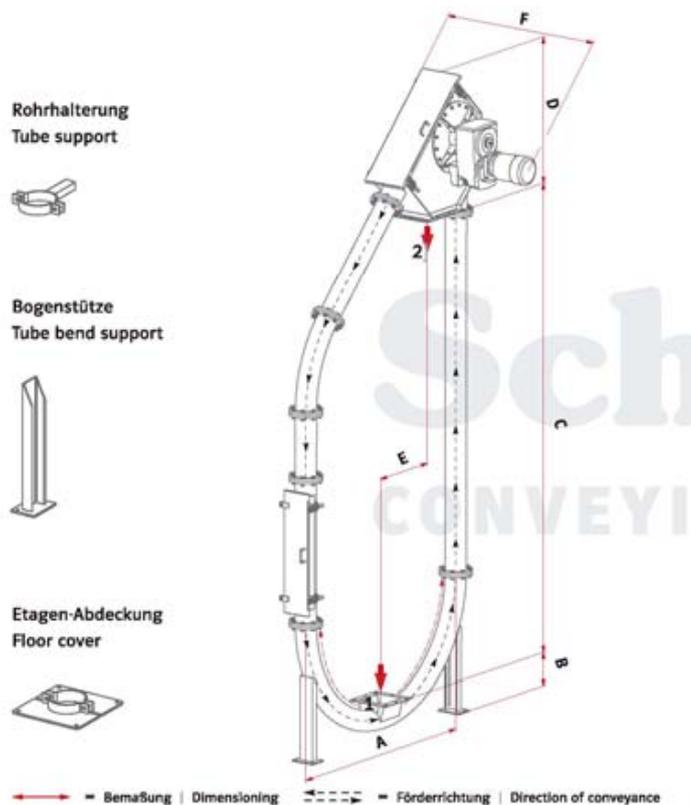


Bild 7.20: Rohrkettenträger [Sch09].

7.4 Anwendungsfall 3: Firma Currenta, Leverkusen

7.4.1 Emittierender Prozess und bisherige Abgasreinigungstechnologie

Die Currenta GmbH & Co. OHG befasst sich im Auftrag von Bayer und LANXESS mit Versorgung, Entsorgung und Management der Chemiestandorte in Leverkusen, Dormagen und Krefeld. Im Chemiepark Leverkusen betreibt die Gesellschaft unter anderem eine aufwändige Abwasseraufbereitung für Abwässer aus den Produktionen von Pharma- und Chemierohstoffen. Die zugehörigen Belebungsbecken dieser Anlage sind geschlossen ausgeführt (sog. Turmbiologie), so dass die anfallende Abluft gesammelt und einer Reinigungseinrichtung zugeführt werden kann. Da die Produktionsprozesse des Chemieparkes auch biologisch nicht abbaubare org. Substanzen herstellen und verarbeiten, enthält diese Abluft einen erheblichen Anteil organischer Verbindungen (ca. $0,5 \dots 1,5 \text{ g/m}^3_{\text{N}}$). Derzeit wird diese Abluft durch thermische Nachverbrennungsanlagen mit rekuperativer Abluftvorwärmung gereinigt, die in der nächsten Zeit erneuert werden müssen. Zu den anfallenden Schadstoffen gehören auch organische Silizium- und Chlorverbindungen, die Betriebsprobleme infolge von festen Ablagerungen schon an der derzeit eingesetzten Anlagentechnik verursachen. Aus energetischer Sicht wäre der Einsatz einer RNV-Technik für diesen Anwendungsfall prädestiniert, scheiterte bisher jedoch an der Ablagerungsproblematik.

Für die weitere Erprobung der neuen Anlagentechnik bietet dieser Anwendungsfall eine Reihe weiterer Herausforderungen:

- Die anfallende Abluft beinhaltet eine Vielzahl von organischen Stoffen. Neben siliziumorganischen Verbindungen auch chlororganische Stoffe und weitere Säurebildner, die u. a. korrosiv sind.
- Die Abluft kommt feuchtigkeitsgesättigt aus den Biotürmen.
- Die Sicherheitstechnik der Anlage muss die strengen Anforderungen eines Chemiebetriebes erfüllen und daher angepasst werden.
- Ein direkter Vergleich zwischen herkömmlicher TNV-Technologie und neuer Anlagentechnologie kann angestellt werden.

7.4.2 Aufbau der Versuchsanlage und Sicherheitstechnik

Der Abbau der Versuchsanlage in Oelde und der anschließende Transport nach Leverkusen erfolgte Ende November 2008. Im Anschluss daran waren noch umfangreiche Klärungen von sicherheitstechnischen und betrieblichen Fragestellungen durchzuführen, bis die Freigabe zum Aufbau und zur Inbetriebnahme der Anlage seitens Currenta erfolgen konnte. Die Inbetriebnahme der Anlage wurde dann am 25.03.2008 durchgeführt.

Auch mit Blick auf die mögliche Erstellung einer Hauptausführung ist die Dokumentation und die Mess-, Steuer- und Regelungstechnik der Versuchsanlage komplett überarbeitet worden. Den derzeitigen Stand dokumentiert das erweiterte Verfahrensfließbild in **Bild 7.21**.

Da die Anlagensteuerung bisher im Zuge der Versuche nach und nach erweitert und verbessert wurde, war es erforderlich, die Nomenklatur der MSR-Einrichtungen neu zu fassen und zu vereinheitlichen. Die Nummerierung von Sensoren und Aktoren in Bild 7.21 orientiert sich nunmehr an den Hauptkomponenten der Anlage:

- A1.00: SiO₂-RNV Reaktor mit Brennkammer (D1.10), Wärmeübertrager-Schüttungen (W1.20 und W1.30) und Austragsbehälter (B1.40).
- D2.00: Brennersystem mit Erdgasbrenner (D2.10), Verbrennungsluftstrecke (A2.20) und Erdgasstrecke (A2.30).
- A3.00: Umschaltklappensystem (Tellerventile) mit Abluftklappeneinheit (K3.10) und Reingasklappeneinheit (K.3.20).
- A4.00: Abluffördersystem (A4.00) mit Abluft-/Frischluf-Klappenkombination (K4.10/K4.20) und Abluftventilator (V4.30).
- A5.00: Erdgasstrecke für den Flamelessbetrieb.
- A6.00: Reingasstrecke (Kamin).
- A7.00: Druckluftverteilsystem.

Ebenfalls in Bild 7.21 dargestellt sind die einzelnen Regel-, Schalt- und Sicherheitsschaltkreise der Anlagensteuerung.

Die Regelkreise sind mit dem Symbol UC gekennzeichnet. Die wesentlichen Regelkreise sind:

- UC110: Temperaturregelung im Brennerbetrieb (Aufheizen).
Abhängig von der an den Fühlern TIRC111/112 gemessenen Temperatur (Mittelwert) wird die Luftregelklappe K2.26 auf- bzw. zugefahren.
- UC120: Temperaturregelung im Abluftreinigungsbetrieb (Normalbetrieb).
Die Regelabweichung der beiden höchsten Regeneratortemperaturen (Auswahl aus den Messwerten der Temperaturfühler TIRC121 bis 126 und TIRC131 bis 136 und Mittelung) wirkt auf das Linearstellglied in der Erdgasstrecke (Flameless) K.5.07.
- UC130: Lageregelung Temperaturprofil.
Die Messwerte der Temperaturfühler in der Regeneratorschüttung (TIRC121 bis 126 und TIRC131 bis 136) werden über der Höhe integriert und daraus ein Parameter ermittelt, der die Lage relativ zur geometrischen Mitte des Regenerators charakterisiert. Abhängig davon werden die Schaltzeiten (Magnetventile V3.11 und V3.21) für Aufwärtsstrom und Abwärtsstrom verändert.
- UC140: Volumenstromregelung Abluft.
Der Abluftvolumenstrom (Messstelle FIRC434) wird durch eine Frequenzregelung des Ventilators V4.30 auf einem Sollwert gehalten.

Die wichtigsten Schaltkreise der Anlagensteuerung sind mit dem Symbolen US bzw. UZ gekennzeichnet. Besonders sicherheitsgerichtete Schalteinrichtungen (UZ) sind nicht nur in der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS), sondern zusätzlich direkt als Hardwareschaltungen (Redundanz) realisiert. Dies ist erforderlich, damit die Anlage auch bei einem Ausfall der SPS in einen sicheren Zustand versetzt wird. Die wesentlichen Schaltkreise sind:

- US200: Allgemeine Freigabe Anlagenbetrieb.
Für die allgemeine Freigabe des Anlagenbetriebs muss eine ganze Reihe von Randbedingungen, wie beispielsweise Druckverlust der Schüttung (PDIRS+101), Maximaltemperaturen von Brennkammer (TIRCS+111/112) und Regeneratoren (TIRCS±127), Temperatur am Ein- und Austritt des Reaktors (TIRS+115/141), Tellerventilstellung (GIRS±311/312) und Vordruck Druckluftsystem (PSA-702) im vordefinierten Arbeitsbereich der Anlage liegen. Je nach Messgröße führt eine Über- bzw. Unterschreitung zu einem Erlöschen der Betriebsfreigabe und einem Abfahren der Anlage.
- US210: Freigabe Brennerbetrieb.
Voraussetzung für die SPS-seitige Freigabe des Brennerbetriebes ist, dass die Anlage im Abwärtsstrom mit Frischluft läuft (GIRS±311/312), ein ausreichender Volumenstrom am Ventilator vorliegt (FIRC 434) und die allgemeine Freigabe US200 vorliegt. Darüber hinaus muss auch die hardwareseitige Freigabe UZ2101, bestehend aus Sicherheitstemperaturbegrenzer (TZA+113/114), Lufteintrittsdrucküberwachung (PZA-116) sowie Verbrennungsluft- (PZA±227) und Erdgasdrucküberwachung (PZA+241, PZA-242) vorliegen.
- US220: Freigabe Flamelessbetrieb.
Die Freigabe der Erdgasbeimischung in die Abluft (Flamelessbetrieb) erfordert eine ausreichend hohe Regeneratortemperatur (TIRCS±127), ein etwa mittig angeordnetes Temperaturprofil (gemäß UC130) und einen Mindestvolumenstrom (FIRC434), der im Abwärts- oder Aufwärtsstrom (Tellerventilstellung GIRS±311/321) durch den Regenerator geleitet wird. Wie schon beim Brennerbetrieb werden der Volumenstrom (Druckschalter PZA-438) und die Temperatur (Sicherheitstemperaturschalter TZA-137) zusätzlich durch eine Hardwareschaltkette (UZ 2201) überwacht.
- US230: Freigabe Abluftbetrieb.
Schließlich erfolgt die Freigabe des Abluftbetriebes abhängig von den erfüllten Bedingungen für den Flamelessbetrieb (US220) jedoch mit einer erhöhten Regeneratortemperatur (TIRCS±127).

Im Rahmen der gemeinsam mit Currenta durchgeführten Sicherheitsanalyse wurden verschiedene denkbare Szenarien von kritischen Anlagenzuständen betrachtet und die Reaktion des Steuerungssystems auf diese Bedingungen untersucht. Anschließend erfolgte die Freigabe durch den zuständigen Sicherheitsingenieur (sog. A3-Testat) und die Überprüfung der Umsetzung der geforderten Sicherheitseinrichtungen (A4-Testat) vor Inbetriebnahme der Anlage.

Da bei Currenta mit dem Auftreten von Säurebildnern (Chlor- und Schwefelverbindungen) in der Abluft zu rechnen war, musste die Eintrittstemperatur vor der Versuchsanlage angehoben werden. Dazu wurde durch die Firma BayerTechnologyServices ein Dampfheizregister zur Verfügung gestellt und in die Abluftzuführung integriert. Damit kann die Eintrittstemperatur auf einen Wert von 120...130 °C eingestellt werden. Daraus resultierend sind auch die Reingasaustrittstemperaturen mit 140...160 °C ausreichend hoch, um ein Auskondensieren der Säuren zu verhindern.

Darüber hinaus wurde die gesamte Anlage mit einer Außenisolierung ausgestattet, die dafür sorgen soll, dass alle Wandtemperaturen oberhalb von Kondensationspunkten liegen und eine korrosive Beschädigung der Anlage vermieden wird.

Bild 7.22 vermittelt einen Eindruck über die Aufstellungssituation der Pilotanlage bei Currenta in Leverkusen. Die Bilder zeigen den Aufstellungsort und die nachgerüstete Isolierung (7.22a und 7.22b), das Heizregister zur Anhebung der Eintrittstemperatur (7.22c) und Montagearbeiten am Brennkammerkopf (7.22d).



a) Aufbau der Pilotanlage (1)



b) Aufbau der Pilotanlage (2)



c) Heizregister



d) Brennkammerkopf

Bild 7.22: Aufstellungssituation der Pilotanlage bei Fa. Currenta in Leverkusen.

7.4.3 Erste Ergebnisse

Trotz der umfangreichen Vorbereitungsarbeiten bis zur endgültigen Betriebsbereitschaft der Anlage konnten noch innerhalb des Vorhabens erste Versuche in dem neuen Anwendungsumfeld durchgeführt werden. Insgesamt ist die Anlage bisher 90 Tage ohne Störung betrieben worden, wobei *eine* Entleerung stattgefunden hat. In **Tabelle 7.8** sind für die beiden bisher durchgeführten Versuchsturnusse die Einstellparameter sowie der Druckverlust und der Erdgasverbrauch (jeweils mit Minimal-, Maximal und Mittelwert) aufgeführt. Weitere Versuche bis etwa September 2009 werden sich anschließen. Die zweite Entleerung der Anlage ist für Anfang Juli 2009 vorgesehen.

Eine ausführliche Übersicht über die Tagesmittelwerte der wichtigsten Messgrößen der bisherigen Versuche ist im Anhang in der **Tabelle A2.7** enthalten.

Tabelle 7.8: Überblick über die in Leverkusen durchgeführten Versuchsreihen.

Versuchsreihen Leverkusen										
Turnus Nr.	Start	Ende	Tage Normalbetrieb	Versuchsparameter	Abluftvolumenstrom	Regeltemperatur	Umschaltzeit	Lage Temperaturprofil	Druckverlust	Erdgasverbrauch
					m ³ _N /h	°C	Min	%	mbar	m ³ _N /h
1	25.03.09	05.05.09	40	Minimum	700	850	10,0	56	25,4	0,66
				Mittelwert	700	866	14,9	57	29,7	0,93
				Maximum	710	885	15,0	58	30,8	1,42
				Bemerkungen:	Parametervariation: Regeltemperatur kont. Messung der Cges-Konzentrationen im Reingas					
2	06.05.09	geplant 30.06.09	geplant 56	Minimum	770	860	14,9	56	33,2	0,00
				Mittelwert	798	866	15,0	57	41,5	0,88
				Maximum	800	870	15,0	58	48,7	1,09
				Bemerkungen:	Parametervariation: Abluftvolumenstrom kont. Messung der Cges-Konzentrationen im Reingas					

Die zeitlichen Verläufe ausgewählter Messgrößen sind in **Bild 7.23** für den Versuchsturnus 1 dargestellt. Auffällig ist zunächst die höhere Eintrittstemperatur gegenüber den Versuchen bei Miele, die mit dem vorgeschalteten Heizregister erzielt wurde. Die Dampfmenge wird zu Beginn des Versuches manuell eingestellt. Die zugehörige Temperatur hat sich innerhalb der Versuchsdauer zwischen 120 und 130 °C bewegt. Die Reingasaustrittstemperatur liegt etwa 20 K oberhalb der Eintrittstemperatur. Der Abluftvolumenstrom ist über den gesamten Turnus mit 700 m³_N/h konstant gehalten worden. Auch die Zyklusdauer (15 Minuten) und der Lageparameter (57 %) blieben unverändert. Lediglich die Regeltemperatur wurde im Verlauf schrittweise von 880 °C bis auf 855 °C abgesenkt. Dies macht sich auch im Erdgasverbrauch der Anlage bemerkbar, der gegen Ende des Zyklus etwas niedriger ausfällt. Das Niveau des Erdgasbedarfes ist mit ca. 1 m³_N/h geringer, als bei den Versuchen in Oelde. Hier wirken sich die etwas höhere organische Beladung (laut Betreiberangaben zwischen 0,5 g/m³_N und 1,5 g/m³_N) sowie die zusätzliche Wärmedämmung positiv aus. Der Druckverlust der Anlage ist leicht von minimal 28,5 mbar am Tag 10 auf 30,5 mbar gegen Ende des Turnus angestiegen.

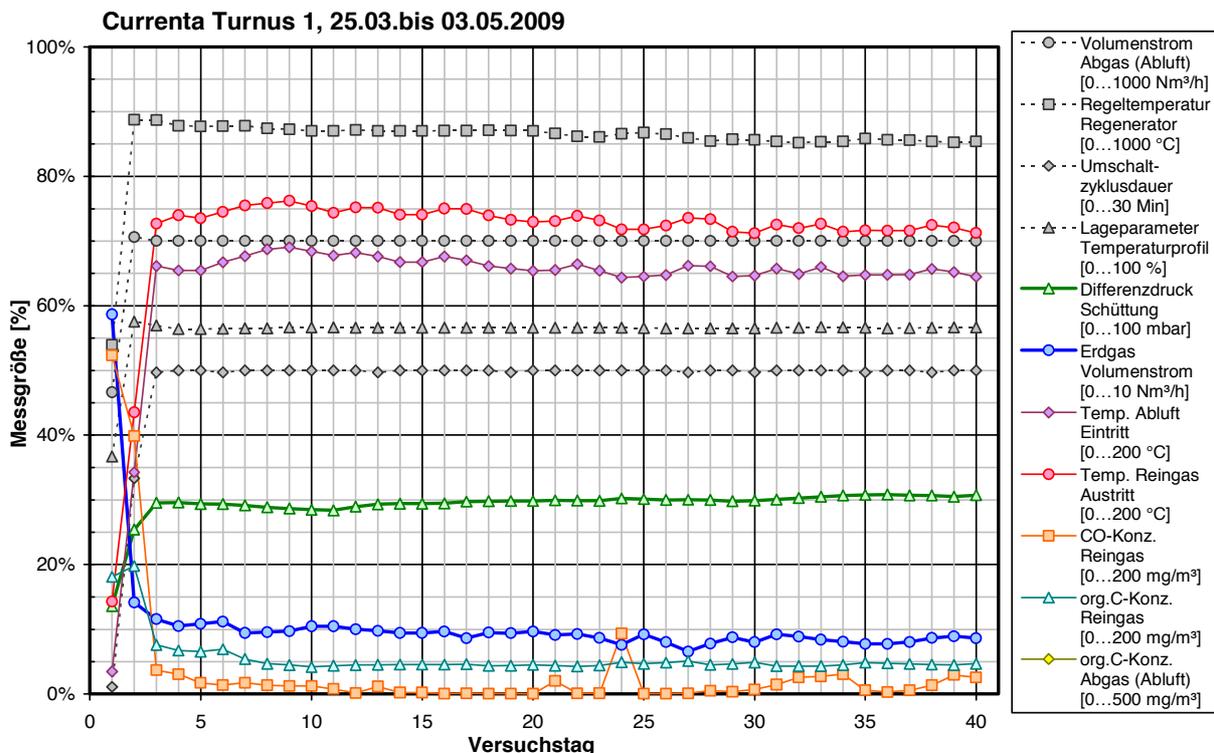


Bild 7.23: Zeitliche Verläufe ausgewählter Messgrößen für den Versuchsturnus 1, Currenta.

Der flache Anstieg hängt damit zusammen, dass die Fracht an siliziumorganischen Verbindungen mit ca. $40 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$ deutlich niedriger ist, als bei den Versuchen in Oelde. Die Anlage kann also bis zu einer Entleerung länger betrieben werden. Nach Betreiberangaben war die Produktion des Hauptverursachers siliziumorganischer Schadstoffe über den gesamten Zyklus in Betrieb. Dies dokumentiert auch ein zwischenzeitlich durchgeführter Wartungsstillstand der TNV-Anlage aufgrund von dort gebildeten Ablagerungen.

Die Reingaskonzentrationen an $\Sigma \text{ org. C}$ (ca. $10 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$) und CO ($<10 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$) bewegen sich auf einem durchweg niedrigen Niveau.

Für den noch nicht abgeschlossenen Turnus 2 wurde ein höherer Volumenstrom ($800 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$) eingestellt und die Regeltemperatur mit $865 \text{ }^\circ\text{C}$ konstant gehalten. Bei diesen Einstellungen ergab sich ein deutlich stärkerer Druckverlustanstieg von ca. 35 mbar auf ca. 47 mbar. Auffällig sind zeitweise erhöhte CO-Konzentrationen, die jedoch immer noch unter den Emissionsbegrenzungen der TA-Luft liegen ($<100 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$). Die Ursachen hierfür müssen noch geprüft werden.

Die erste Entleerung bestätigt die Einschätzung, dass deutlich weniger siliziumorganische Verbindungen in der Abluft vorliegen. Die Gesamtmasse der Staubbeladung des Bettes (Feinfraktion) betrug 18,7 kg. Gemäß **Bild 7.24** ist eine relativ gleichmäßige Verteilung der Feinfraktion zu verzeichnen. Die Grobfraktion konnte gegenüber den Versuchen in Oelde um eine Größenordnung auf nur 14,5 kg reduziert werden. Eine Ursache für den hohen Bruchanteil bei Miele lag darin, dass die Kugeln sich beim Aufheizen ausdehnen und in der Folge große Spannungen an den Berührungsf lächen wirken. Deshalb wurde bei Currenta ein kleiner Teil der Schüttung (ca. 25 kg) nach dem Aufheizen der Anlage entnommen, um eine Druckentlastung herbeizuführen. Diese Vorgehensweise hat zu dem drastisch verringerten Bruchanteil beigetragen. Vorteilhaft hat sich darüber hinaus sicherlich auch die gleichmäßige Betriebsführung ausgewirkt.

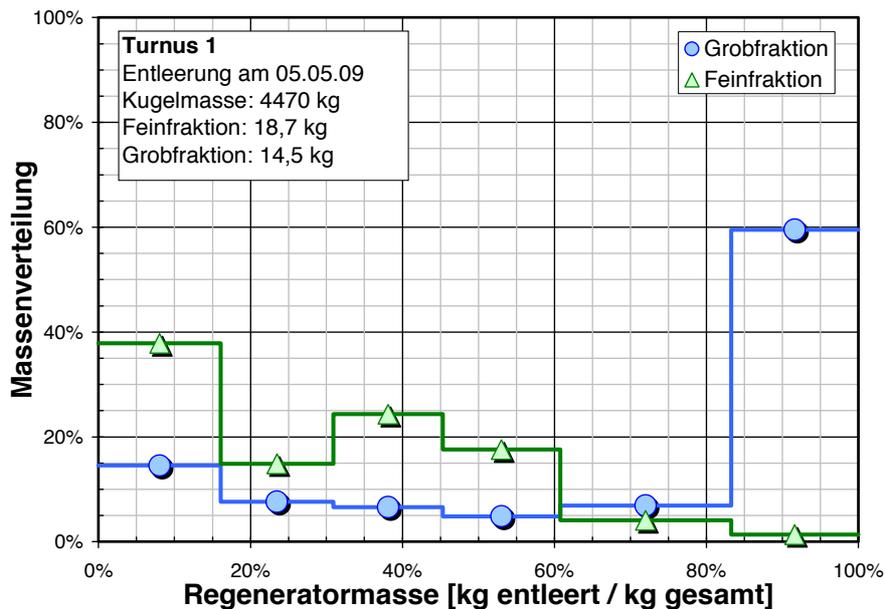


Bild 7.24: Massenverteilung von Grob- und Feinfraktion bei dem Versuch in Leverkusen.

Einen Eindruck von der Entleerung und von der Struktur der Anhaftungen vermittelt **Bild 7.25**. Im Unterschied zu den Versuchen in Oelde sind hier keine Verglasungen, sondern amorph belegte Kugeloberflächen entstanden. Über der Höhe des Bettes sind dabei signifikante Unterschiede feststellbar gewesen. Die zuerst ausgetragenen Kugeln lagen praktisch im Originalzustand vor (Bild 7.25a). Nach einer Entleerung von etwa 25 % des Bettes konnten weiß belegte Kugeln gemäß Bild 7.25c beobachtet werden. Im Anschluss traten wieder unbelegte, jedoch infolge hoher Temperatur rot verfärbte Kugeloberflächen auf (Bild 7.25d). In der Mitte des Bettes folgte eine weitere Zone mit rot verfärbten und amorph belegten Kugeln (Bild 7.25e). Es schloss sich eine Zone ohne Belag an, bevor etwa bei 75% des Bettes wieder Beläge entsprechend Bild 7.25c zu verzeichnen waren. Der obere Bereich der Schüttung war

wieder belagsfrei. Offensichtlich sind in der Abluft siliziumorganische Verbindungen mit signifikant unterschiedlicher Zündtemperatur vorhanden, so dass sich verschiedene Zonen mit Staubbelägen ausbilden. Der Staub haftet relativ stark an den Kugeloberflächen und reibt sich während der Entleerung nicht vollständig ab. Daraus folgt, dass die Siliziumdioxidmasse in der Schüttung noch höher ausfällt, als in der Feinfraktion entsprechend Bild 7.24 angegeben.



a.) Kugelaustrag (Phase 1: Originalzustand)

b.) Abgetrennte Feinfraktion



c.) Amorph belegte Kugeln (1)

d.) Verfärbungen

e.) Amorph belegte Kugeln (2)

Bild 7.25: Kugelaustrag und siliziumorganische Ablagerungen bei der ersten Entleerung.

Insgesamt kann somit schon anhand der ersten Versuche festgestellt werden, dass das neue Verfahren auch unter den erschwerten Einsatzbedingungen, die in Leverkusen vorliegen, ziel führend arbeitet. Die Versuche werden derzeit noch fortgesetzt. Unter anderem sollen noch Analysen der Abluftzusammensetzung und ergänzende Reingasmessungen auch im Hinblick auf die Staubfracht sowie das Auftreten von organischen Spurenverbindungen (z.B. Dioxine) vorgenommen werden. Die Firma Currenta hat signalisiert, dass großes Interesse an der neuen Technologie besteht und mit der Planung einer Hauptausführung einschließlich Angebots erstellung begonnen werden kann.

8. Bewertung der Ergebnisse des Vorhabens

8.1 Technologische Bewertung

Bei zahlreichen Betrieben des produzierenden oder verarbeitenden Gewerbes fallen mit siliziumorganischen Inhaltsstoffen verunreinigte Abgase an. Von den derzeit nach dem Stand der Technik zur Verfügung stehenden Abluftreinigungsverfahren sind die thermischen Verfahren am ehesten geeignet, Ablüfte mit diesen Inhaltsstoffen und vorliegenden Konzentrationen zu behandeln. Diese Technik ist jedoch im Fall von siliziumorganischen Verbindungen im Abgas bislang nicht ausreichend betriebssicher, da das Silizium oxidiert und die Anlage in Form von Belägen innerhalb kurzer Zeit zusetzen kann.

Die Innovation beim neuen Technologieansatz liegt darin, zunächst die beschriebenen Siliziumanlagerungen in Kauf zu nehmen, jedoch die keramische Regeneratormasse periodisch in Abhängigkeit des zunehmenden Druckverlustes automatisiert über einen Kugelaustrag zu entnehmen, in einer Schältrömmel zu reinigen und über einen Rohrkettenförderer wieder einzufüllen. Hierfür wurde eine modifizierte Anlagentechnik entwickelt, in der alle drei für RNV-Anlagen charakteristische Zyklen (Rohgas vorwärmen), (Reingas abkühlen) und (Regenerator spülen) realisiert werden können.

Von besonderem Interesse im Hinblick auf die Entwicklung der neuen Technologie waren dabei im realen Anwendungsfall u.a. das Anhaftungsverhalten, der Aufbau des Druckverlustes oder die Untersuchung des Schadstoffumsatzes [RüCN06]. Diese Punkte sollten über die Einsetzbarkeit des Verfahrens entscheiden.

Neben der apparatetechnischen Konzeption wurde besonderes Gewicht auf die regelungstechnische Ausgestaltung des Systems gelegt. Die Speicherprogrammierbare Steuerung der Anlage hatte bereits in etwa zur Mitte der Projektlaufzeit einen Reifegrad erreicht, der einen vollautomatisierten Betrieb gestattete, wie diverse mehrmonatige Versuchsbetriebe bei drei verschiedenen Anwendern unter Beweis gestellt haben. Weiterhin hat sich das Anhaftungs- bzw. Abreinigungsverhalten als vielversprechend für den zukünftigen Einsatz dieser Abgasreinigungstechnologie erwiesen. Wird ein Maximaltemperaturniveau nicht überschritten, bleibt das Oxidationsprodukt SiO_2 – in den bislang untersuchten Fällen – pulverförmig und lässt sich einfach entfernen bzw. löst sich schon beim Entnehmen der Kugelschüttung selbsttätig.

Sicherheitstechnische Aspekte zur Vermeidung spontaner Rückfreisetzung organischer Verbindungen sind im Rahmen des Gesamtvorhabens bedacht worden. Den Möglichkeiten, dass sich organische Substanzen auf der Schüttung absetzen und dort pyrolysieren oder sublimieren und sich daraus ein explosives Gemisch bilden könnte oder dass organische Aufpelzungen (Harze) eine abgelagerte Schicht bilden, die bei definierter Stärke zur Selbstentzündung neigt, ist durch verschiedene Maßnahmen Rechnung zu tragen.

In den bisherigen Anwendungsfällen der Versuchsanlage sind diese Effekte nicht aufgetreten. Sofern die Gefahr jedoch auf Grund bekannter Abgasinhaltsstoffe besteht, sollten vom potentiellen Anwender vor Errichtung dieser neuen Technologie in Form einer Hauptausführung Versuche mit der Pilotanlage durchgeführt werden, um gesicherte Erkenntnisse über die Betriebsweise zu erlangen. Weiterhin müssten sich diese Vorgänge durch erhöhte Konzentrationen an Σ org. C -Emissionen im Reingas bzw. durch höhere Temperaturen als im Normalbetrieb ankündigen. Diese erhöhten Werte können durch Konzentrationsmessungen im Reingas (FID; UEG-Sensor) und durch Temperaturmessungen gezielt überwacht werden und deren Signale über das SPS-Programm Störungen melden, Bypässe zur Umfahrung der Anlage öffnen oder ggf. Löschvorrichtungen (Wasser) in Betrieb setzen.

Die o.g. Effekte können aber auch bei herkömmlichen RNV-Anlagen auftreten. Nach dem bei den Antragstellern vorhandenen Kenntnisstand ist bisher ein Fall an einer sogenannten Combuchanger-Anlage in der chemischen Industrie ansatzweise bekannt. Genauere Analysen liegen dazu nicht vor.

Es bleibt damit festzuhalten, dass im Rahmen des Vorhabens eine Technologie entwickelt und mit Hilfe einer Pilotanlage erprobt wurde, die es gestattet, Abgase mit siliziumorganischen Verbindungen und insbesondere deren Oxidationsprodukt SiO_2 in einer thermischen Abgas-

reinigungsanlage mit regenerativer Abluftvorwärmung sicher handhabbar zu machen. Der erfolgreiche Betrieb der Pilotanlage wird auch dadurch bestätigt, dass der Anwender Miele in Oelde nunmehr eine Hauptausführung nach dem neuen Verfahren einsetzen möchte. Verhandlungen hierzu laufen derzeit zwischen LTB und Miele.

8.2 Ökonomische Bewertung und patentrechtliche Situation

Die Wirtschaftlichkeit einer thermischen Abgasreinigungstechnologie hängt wesentlich von den Möglichkeiten zur Abhitzenutzung ab. Es ist bekannt, dass der Bedarf an Prozesswärme in vielen Fällen gering bis nicht vorhanden ist (z. B. bei Fa. ALBIS). In einem solchen Fall ergibt sich der größte wirtschaftliche Nutzen in Form der Brennstoffersparnis des neuen Verfahrens gegenüber der konventionellen TNV-Technologie mit rekuperativer Abluftvorwärmung (Abhitzenutzung). Benötigt der emittierende Prozess im Grundlastfall mindestens die Wärme, die innerhalb der TNV-Anlage in Form der Reingasenthalpie bereitgestellt wird, so sind die beiden Systeme energetisch praktisch gleichwertig.

Insofern lässt sich die Frage nach der Wirtschaftlichkeit des neuen Verfahrens nicht allgemein, sondern nur im Zusammenhang mit einem konkreten Anwendungsfall beantworten.

Hinsichtlich der Investitionskosten stellen sich ähnliche Szenarien dar. Diese sind ebenfalls stark vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig, da auch die Ausrüstung der Anlage von der Prozesswärmenutzung und den Abgasrandbedingungen (kondensierbare Bestandteile, Abluftbeladung, Staub etc.) abhängt. Die zum Zeitpunkt der Antragstellung gehegte Skepsis hinsichtlich eines Investitionsmehraufwandes für Einrichtungen zur Reinigung der keramischen Speichermassen hat sich als unbegründet herausgestellt. Grundsätzlich besteht das Ziel der Entwicklung, einen mit herkömmlichen RNV-Anlagen vergleichbaren Wirkungsgrad und nur leicht (max. 10 %) erhöhte Investitionskosten zu erreichen. Legt man den Fall aus **Tabelle 8.1** (siehe Kap. 8.3) zu Grunde, so sind die Brennstoffkosten des neuen Verfahrens um 75 % niedriger, als bei Verwendung der TNV-Technologie. Mit einem Erdgaspreis von 0,04 €/kWh und 8500 Betriebsstunden pro Jahr ergäben sich jährliche Brennstoffkosten von 915.000 € (TNV) bzw. 231.500 € (RNV). Berücksichtigt man ferner, dass der Elektroenergieverbrauch (hauptsächlich Prozess- bzw. Abluftventilator) der neuen Technologie aufgrund des etwas höheren Druckverlustes (keine monolithischen Wabenkörper, sondern Keramikugeln) höher ausfällt, können Betriebsmittelkosten in der Größenordnung von ca. 650.000 €/Jahr eingespart werden.

Das Verfahren der thermischen Abgasreinigung incl. periodischer Abgasumschaltung und Kugelaustrag ist unter dem Titel „Verfahren und Vorrichtung zur Behandlung von siliziumorganische Verbindungen enthaltenden Abgasen“ in zahlreichen europäischen Ländern sowie in Kanada und den USA patentrechtlich angemeldet. Am Patent sind Vertreter der Firmen ALBIS, CUTEC und LTB beteiligt. Von einer Anmeldung in verschiedenen asiatischen Ländern wie z.B. VR China, Japan, Indien etc. wurde abgesehen, da sowohl die Relation von Kosten und Chancen als auch die Vertriebsmöglichkeiten ohne Lizenznehmer vor Ort (Präsenz) als zu gering eingestuft wurden. Die Marktchancen des neuen Verfahrens ergeben sich aus der Vielfalt der Anwendungsgebiete von siliziumorganischen Verbindungen in der verarbeitenden Industrie. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die gesamte Bandbreite der Problematik erst langsam entfalten wird. Bereits in der Bearbeitungszeit der 1. Phase des Vorhabens waren zahlreiche potentielle Anwender an die Projektpartner herangetreten, weiterhin hat die Zahl der Interessierten im Laufe des Projektes noch zugenommen.

An das Ende des Entwicklungsvorhabens wird sich eine Phase der Weiterentwicklung und Optimierung des Verfahrens anschließen. Wie in Abschnitt 8.1 bereits erwähnt, erlauben die bisherigen Ergebnisse einen positiven Ausblick hinsichtlich Handhabbarkeit und Reinigungsergebnissen, so dass mit überschaubaren Zeiten bis zur Marktreife der neuen Technologie zu rechnen ist.

8.3 Ökologische Bewertung / Umweltentlastung

Wie bereits vorstehend erläutert, bleibt in vielen Anwendungsfällen, bei denen Abgase bzw. Ablüfte anfallen, die siliziumorganische Verbindungen enthalten, zur sicheren Entsorgung und Schadstoffminderung nur die Alternative, eine herkömmliche TNV-Anlage mit rekuperativer Abluftvorwärmung einzusetzen. Durch die in diesem Vorhaben neu entwickelte Technologie wird diesen Anwendungsfällen der Einsatz einer RNV-Anlage mit regenerativer Abluftvorwärmung erschlossen. Dadurch ergibt sich eine erhebliche Umweltentlastung, da die RNV-Technologie

- einen wesentlich geringeren Energiebedarf aufweist (Einsparung fossiler Energieträger, deutlich geringere CO₂-Emissionen) und
- geringere Sekundäremissionen (insbesondere NO_x aber auch CO, Σ org. C) verursacht.

Die Energieeinsparung soll an dem Beispiel der Firma CURRENTA verdeutlicht werden. Dabei werden jeweils eine TNV- und RNV-Anlage mit einem Abluftvolumenstrom von 40.000 m_N³/h verglichen. Der Energieverbrauch wurde mittels einer Energiebilanz errechnet. Für die TNV-Anlage ist von einer üblichen maximalen Abluftvorwärmtemperatur von 610 °C ausgegangen worden. Für die RNV-Anlage wurde ein Abluftvorwärmgrad von 94,4 % angesetzt. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 8.1 dargestellt. Die angegebenen Wertebereiche für die NO_x, CO und Σ org. C -Emissionen stellen die mit konventioneller Technik erreichbaren Konzentrationen dar. Die Beispielberechnung lässt sich im Wesentlichen auf andere Einsatzfälle übertragen.

Tab. 8.1: Energieeinsparung durch das neue Verfahren (Beispiel CURRENTA) [CNRRü09].

	Einheit	TNV-Anlage	SiO ₂ -RNV	Einsparung
Abluftmenge (Auslegung)	m ³ _N /h	40.000	40.000	
Abluftmenge (Durchschnitt)	m ³ _N /h	30.000	30.000	
Ablufteintrittstemperatur	°C	30	30	
Reaktionstemperatur	°C	800	880	
Reingasaustrittstemperatur	°C	254	81	
Abluftvorwärmtemperatur	°C	610	840	
Abluftvorwärmgrad	%	72,3	94,4	
Brennstoffeinsatz	kW	3.330	680	
Elektr. Energie (Ventilator)	kW	25,5	56	
Brennstoffkosten	€/Jahr	915.000	231.500	75%
Stromkosten	€/Jahr	26.000	57.000	-119%
Betriebsmittelkosten	€/Jahr	941.000	288.500	69%

Darüber hinaus stellt die neue Technologie – nach den bisherigen Erkenntnissen – einen nahezu idealen Abscheider für die während der thermischen Verbrennung gebildeten SiO₂-Stäube dar. Aufgrund der sehr geringen Korngröße der untersuchten Anhaftungen (weitgehend amorph) sind diese Staubfraktionen als nicht unproblematisch einzustufen. Insofern kommt der automatisierten Entfernung der Regeneratormasse eine erhebliche Bedeutung zu.

9 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die im Folgenden beschriebenen Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse sind bereits getroffen worden bzw. sind vorgesehen (berücksichtigt wurden hier auch die Vorträge 1 bis 5 aus Phase 1):

- Vortrag „Entwicklung einer thermischen Abgasreinigungsanlage mit regenerativer Abluftvorwärmung für Abgase mit siliziumorganischen Verbindungen“ im Rahmen des VDI-Kolloquiums „Fortschritte in der Luftreinhaltetechnik“ am 06. und 07.06.2005 in Schwäbisch Gmünd [CNR05].
- Vortrag „Konzepte zur Behandlung von Abgasen mit organischen Inhaltsstoffen aus der Kunststoffcompoundierung“ im Rahmen des VDI-Kolloquiums „Spritzgießen 2005“ am 16. und 17.02.2005 in Baden-Baden [CNK05].
- Veröffentlichung „Ansatzpunkte zur konzeptionellen und betrieblichen Optimierung von thermischen Abgasreinigungsanlagen mit regenerativer Abluftvorwärmung in Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft [CN05].
- Vortrag „Übersicht über Anwendungsgebiete, Funktionsweise und Entwicklungsbedarf der thermischen Abgasreinigung mit regenerativer Abluftvorwärmung“ beim International Symposium MBT 2005 vom 23. – 25.11.2005 in Hannover [RCN05].
- Vortrag „Pilotversuche an einer thermischen Abgasreinigungsanlage mit regenerativer Abluftvorwärmung für Abgase mit siliziumorganischen Verbindungen“, GVC Fachausschuss-Hochtemperaturtechnik, 06.03.2006 in Würzburg.
- Vortrag „Behandlung von Abluft mit siliziumorganischen Inhaltsstoffen“, VDI-Jahrestagung Aufbereitungstechnik 2006, Köln [RCND06].
- Vortrag „Probleme bei der Abgasreinigung durch RNV bei mechanisch-biologischen Abfallaufbereitungsanlagen“, Berliner Energiekonferenz – Substitution von fossilen Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe und Biomasse, 2006 Berlin [NCR06].
- Vortrag „Erkenntnisse aus dem Industrieinsatz einer mobilen RNV-Pilotanlage zur Behandlung von Abgasen mit siliziumorganischen Inhaltsstoffen“ im Rahmen des VDI-Kolloquiums „Emissionsminderung 2008“ am 09. und 10.04.2008 in Nürnberg [CNR08].
- Vortrag „RNV-Pilotanlage für Abgase mit siliziumorganischen Inhaltsstoffen – Betriebsverhalten im Industrieinsatz“, Jahrestreffen der Fachausschüsse „Energieverfahrenstechnik“ und „Hochtemperaturtechnik“, 2009, Hamburg.
- Angemeldeter Vortrag „RNV Pilot Plant For Exhaust Gases With Organosilicon Compounds – Operation Behaviour In Industrial Use“, 10th Conference On Energy For A Clean Environment, July 2009, Lisbon, Portugal [CNRRü09].
- Weiterhin sind zusätzliche Veröffentlichungen in branchenspezifischer Fachliteratur und in umweltorientierten Fachzeitschriften geplant, um der Öffentlichkeit den Zugang zu den Ergebnissen des geförderten Vorhabens zu ermöglichen.
- Kontakte zu potenziellen Anwendern der neuen Reinigungstechnologie sind vorhanden, so dass gezielt Informationsmaterial verbreitet werden kann.

10. Fazit und Ausblick

1. Phase des Vorhabens

Im Rahmen der 1. Phase des Vorhabens ist eine Technologie entwickelt und mit Hilfe einer Pilotanlage erprobt worden, die es gestattet, Abgase mit siliziumorganischen Verbindungen und insbesondere deren Oxidationsprodukt SiO_2 in einer thermischen Abgasreinigungsanlage mit regenerativer Abluftvorwärmung handhabbar zu machen. Die Grundidee besteht darin, die Anhaftungen des amorphen Siliziumdioxids auf einer Kugelschüttung zunächst zuzulassen, die belegte Keramik periodisch zu entnehmen, so dass die Anhaftungen entfernt werden können und anschließend gereinigt wieder dem Reaktor zuzuführen. Der Reaktor besteht dabei aus einer zylindrischen Schüttung, wobei die Strömungsrichtung periodisch umgekehrt wird. Beim Anfahren erfolgt die Aufheizung des oberen Teils der Kugelschüttung mit Hilfe eines Brenners. Anschließend wird das Temperaturmaximum durch einen Luftstrom in die Mitte des Reaktors getrieben. Die an diesem System gewonnenen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Konzeption der Pilotanlage

Neben der apparatetechnischen Konzeption wurde besonderes Gewicht auf die regelungstechnische Ausgestaltung des Systems gelegt. Durch parallele mathematische Modellierung konnte der Anfahrprozess auf Antrieb erfolgreich vollzogen werden. Aufgrund der sich ausbildenden Temperaturprofile insbesondere bei Veränderungen der Schadstofffrachten und der Notwendigkeit, diese in der Mitte des Reaktors zu halten, ist ein Lageparameter eingeführt worden. Er integriert die Temperaturfunktion über dem Weg und vergleicht die ermittelten Flächen ober- und unterhalb der (thermodynamischen³) Mitte des Reaktors. Auf Abweichungen reagiert das System mit temporär veränderlichen Umschaltzeiten. Als geeignete Temperaturmesstechnik haben sich einfache Manteltemperaturfühler herauskristallisiert, die den Stahl-layer etwas in Richtung Schüttung überragen. Die Speicherprogrammierbare Steuerung der Anlage hat einen Reifegrad erreicht, dass ein vollautomatisierter Betrieb möglich und durchführbar ist, wie mehrmonatige Versuchsbetriebe bei verschiedenen Anwendern unter Beweis gestellt haben. Die Pilotanlage ist über ein Telefonmodem vollständig fahr- und überwachbar.

Betriebsverhalten bei siliziumorganischen Verbindungen

Versuche in Clausthal mit künstlich erzeugter Abgasbeladung haben deutlich gemacht, dass Beladungsspitzen an siliziumorganischen Verbindungen die Temperaturen im Reaktor so weit ansteigen lassen, dass das Oxidationsprodukt SiO_2 die Keramikoberflächen in der Oxidationszone verglast. Auch können Sinterungen der hier eingesetzten Keramikugeln dabei auftreten. Allerdings überschreiten die Temperaturen dann 1200°C deutlich, wie gezielte Sinterversuche in einem Ofen bestätigt haben. Gleichwohl ließ sich die Schüttung anschließend problemlos entnehmen. Wird ein Maximaltemperaturniveau nicht überschritten (dies ist über die maximale Eintrittsbeladung sicher zu stellen, ggf. ist Frischluft zur Verdünnung beizumischen), bleibt das Oxidationsprodukt SiO_2 – in den bislang untersuchten Fällen – pulverförmig und lässt sich einfach entfernen bzw. löst sich schon beim Entnehmen der Kugelschüttung selbsttätig. Weiterhin haben punktuelle Staubmessungen während der Dosierungsversuche gezeigt, dass kein relevanter Staubaustrag ($< 3,0 \text{ mg/m}^3$) festzustellen ist. Die Versuche bei der Firma ALBIS haben die Untersuchungen in Clausthal weitgehend bestätigt. Allerdings stellten sich die siliziumorganischen Abluftfrachten nicht als extrem hoch heraus. Vor diesem Hintergrund war es zielführend, bei ALBIS in der 2. Phase des Vorhabens versuchsweise eine Regeneratoranlage mit konventionellen Wabenkörpern einzusetzen, um ein Gefühl dafür zu bekommen, wie empfindlich diese Technologie vergleichsweise gegenüber der neuen reagiert.

³ Aufgrund von Asymmetrien des Systems insbesondere am unteren Auslauf der Kugelschüttung stimmen „geometrische“ und „thermodynamische“ Mitte nicht überein.

2. Phase des Vorhabens

Grundsätzlich verliefen die Arbeiten im Rahmen der 1. Phase des Vorhabens so erfolgreich, dass die 2. Phase begonnen werden konnte. Diese sollte auch wie ursprünglich konzipiert mit den Arbeitspaketen

- Konstruktive Ausführung und Realisierung einer Hauptausführung
- Parallele Fortführung von Pilotversuchen bei weiteren Anwendern

realisiert werden. Dabei war es – wie vorstehend vermerkt – zweckmäßig, beim 1. Anwender (Firma ALBIS) noch eine vergleichende Versuchsphase mit einer Pilotanlage, die konventionelle Wabenkörper enthält, parallel zu den weiteren Arbeiten vorzusehen. Schließlich kamen die Untersuchungen durch wesentliche Anstöße von LTB zu dem Ergebnis, bei ALBIS eine konventionelle RNV einzusetzen, auch vor dem Hintergrund, dass Fa. ALBIS auf Grund von Entwicklungen in der Produktzusammensetzung auch zukünftig nur geringe Konzentrationen an siliziumorganischen Verbindungen im Rohgas fahren wird.

Die Errichtung einer konventionellen Hauptausführung bei ALBIS ist abgeschlossen, die Anlage wurde zwischenzeitlich installiert und in Betrieb genommen.

Umso bedeutsamer war es, nach Bewilligung der 2. Phase des Vorhabens weitere Anwender zu finden, deren Abgasinhaltsstoffe sich durch erhebliche Anteile an siliziumorganischen Verbindungen auszeichnen, damit weitere Erkenntnisse zum Belegungsverhalten der keramischen Speichermasse (Kugeln) gesammelt werden konnten. Hierfür wurden ausgewählt:

1. Firma Miele, Oelde
2. Firma Currenta, Leverkusen

Bei der Herstellung von Antihaltbeschichtungen für Backöfen bzw. Herde (haushaltlicher Einsatzbereich) wird bei der Fa. Miele in Oelde ein Silikonöl auf betroffenen Oberflächen appliziert und anschließend bei höheren Temperaturen wärmebehandelt. Hieraus resultieren Abgase mit erheblichen Anteilen siliziumorganischer Verbindungen, die gereinigt werden müssen. Anfänglich erfolgte dies in einer konventionellen rekuperativen Nachverbrennung, die sich jedoch in extrem kurzer Zeit (wenige Tage) zusetzte. Man nahm die Nachverbrennung außer Betrieb und hoffte, mit Hilfe des neuen Technologieansatzes ein funktionsfähiges Verfahren zu finden. Die Versuche mit der Pilotanlage verliefen erfolgreich, so dass einerseits Standzeiten von bis zu ca. 6 Wochen realisiert werden konnten, ehe eine Entnahme der belegten Speichermassen notwendig wurde, und andererseits das Handling mit der Speichermasse im Zusammenwirken zwischen Anlagenbauer LTB und Forschungsinstitut laufend verbessert werden konnte. Der Erfolg des Betriebs der Pilotphase bei Miele in Oelde wird dadurch bestätigt, dass der Anwender nunmehr eine Hauptausführung nach dem neuen Verfahren einsetzen möchte. Verhandlungen hierzu laufen derzeit zwischen LTB und Miele

Bei der Firma Currenta in Leverkusen handelt es sich um einen Entsorgungsbetrieb der chemischen Industrie, bei dem im Bereich der Abwasserreinigung auch Ablüfte anfallen, die erhebliche Mengen an siliziumorganischen Verbindungen enthalten und einer Aufbereitung zugeführt werden müssen. Zurzeit findet die Abluftreinigung in zwei rekuperativen Nachverbrennungsanlagen (Abluftmengenstrom je ca. 20.000 m³/h) unter erheblichem Erdgaseinsatz statt. Zum einen müssen die Rohrbündelwärmeübertrager periodisch mit erheblichem Aufwand gereinigt werden und zum anderen sind die hohen Brennstoffverbräuche mit zugehörigen Kohlenstoffdioxidemissionen zu nennen. Der neue Technologieansatz bietet die Chance, beide Problematiken beherrschbar zu machen. Erste Versuche mit der Pilotanlage zeigen, dass die Beläge im Rahmen einer Entleerung ohne Schwierigkeiten entfernbar sind. Die Versuchsphase wird über den Abschluss der Förderphase durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt fortgeführt, so dass sich auch hier die Möglichkeit einer Anwendung des neuen Verfahrens mit hoher Wahrscheinlichkeit eröffnet. Es ist geplant, die Pilotanlage auch noch bei weiteren Anwendern zu erproben. Anfragen hierfür liegen vor.

11. Literaturverzeichnis

- [Car09] Carlowitz, O.; Ist-Zustandsaufnahme und Erstellung eines Abluftkonzeptes für die Thermoglasuranlage der Miele & Cie. KG am Standort Oelde; Bericht für die Miele & Cie. KG, Oelde; Clausthal, April 2009 (unveröffentlicht).
- [CNR06] Carlowitz, O.; Neese, O.; Reindorf, T.: Siliziumproblematik in TNV-Regeneratoren. wlb Wasser, Luft und Boden 50. Jg. (2006) Nr. 3-4, S. 46-49.
- [CNR08] Carlowitz, O.; Neese, O.; Reindorf, T.: Erkenntnisse aus dem Industrieinsatz einer mobilen RTO-Pilotanlage zur Behandlung von Abgasen mit siliziumorganischen Inhaltsstoffen. VDI-Bericht 2035: Emissionsminderung 2008, Nürnberg, 09./10.04.08, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2008, ISBN 978-3-18-092035-1, S. 247 – 252.
- [CNRRü09] Carlowitz, O.; Neese, O.; Reindorf, T.; Rüskaamp, B.: RTO Pilot Plant For Exhaust Gases With Organosilicon Compounds – Operation Behaviour In Industrial Use; 10th Conference On Energy For A Clean Environment, 7.-10. July 2009, Lisbon, Portugal.
- [NCR06] Neese, O.; Carlowitz, O.; Reindorf, T.: Probleme bei der Abgasreinigung durch RTO bei mechanisch-biologischen Abfallaufbereitungsanlagen, Berliner Energiekonferenz – Substitution von fossilen Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe und Biomasse, 08./09.11.2006, Berlin.
In: K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Beckmann (Hrsg.): Energie aus Abfall Bd. 1, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2006, S. 371-387.
- [RCN07] Reindorf, T.; Carlowitz, O.; Neese, O.: Modell gestützte Inbetriebnahme einer regenerativen Nachverbrennungsanlage. VDI-Bericht 1988: Deutscher Flammentag - Verbrennung und Feuerung, Berlin, 12./13.09.2007; Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2007, ISBN 978-3-18-091988-1.
- [RCN08] Reindorf, T.; Carlowitz, O.; Neese, O.: Simulation der Reingasauskopplung in RNV-Anlagen. VDI-Bericht 2035: Emissionsminderung 2008, Nürnberg, 09./10.04.08, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2008, ISBN 978-3-18-092035-1, S. 257 – 264.
- [RCND06] Reindorf, T.; Carlowitz, O.; Neese, O.; Dammeyer, K.-H.: Behandlung von Abluft mit siliziumorganischen Inhaltsstoffen. VDI-Jahrestagung Aufbereitungstechnik 2006, Köln, 09./10.11.06; S. 171 - 184; ISBN 3-18-234279-7.
- [RüCN06] Rüskaamp, B.; Carlowitz, O.; Neese, O.: Neue thermische Abgasreinigungstechnologie mit regenerativer Abluftvorwärmung für Abgase mit Anteilen siliziumorganischer Verbindungen. Abschlussbericht zur ersten Phase eines Entwicklungsprojektes, gefördert unter Aktenzeichen 21154 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, 2006.
- [Sch09] Schräge Conveying Systems; Vertikale Ausrichtung, Rohrkettenförderer in senkrechter Position; www.schraege.de/fileadmin/Produkte/download/DB-RKFsenkrecht.pdf; 24.06.2009.

12. Anhänge

- A1: Versuchsergebnisse
- A1.1 Grafiken und Ergebnistabellen
- A1.2 Austragsversuche LTB

- A2: Sonstiges

A1: Versuchsergebnisse
A1.1 Grafiken und Ergebnistabellen

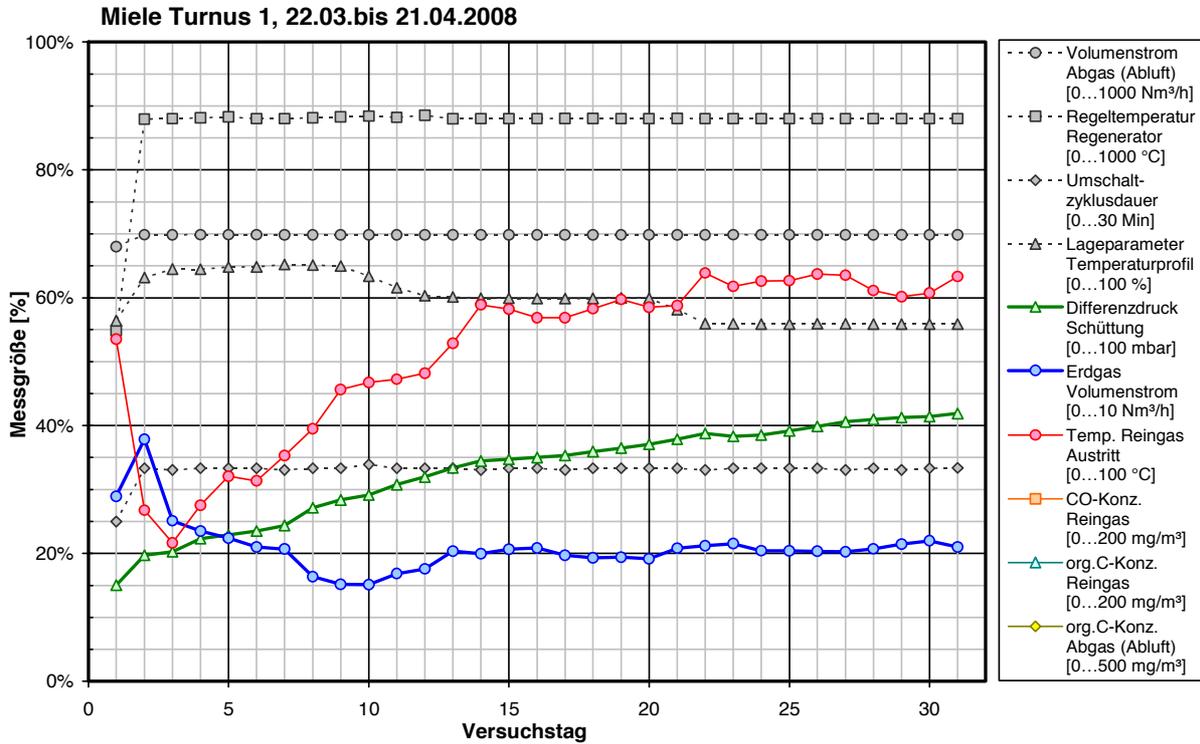


Bild A1.1 Zeitliche Verläufe ausgewählter Messgrößen für den Versuchsturnus 1.

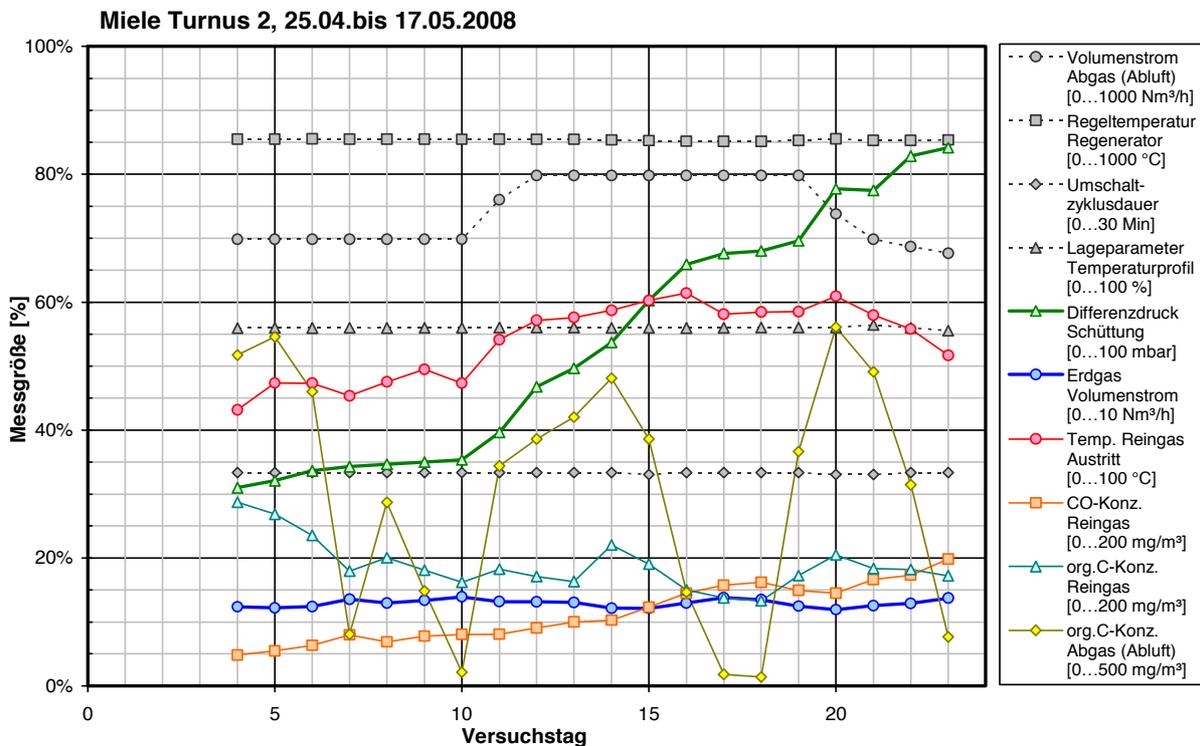


Bild A1.2 Zeitliche Verläufe ausgewählter Messgrößen für den Versuchsturnus 2.

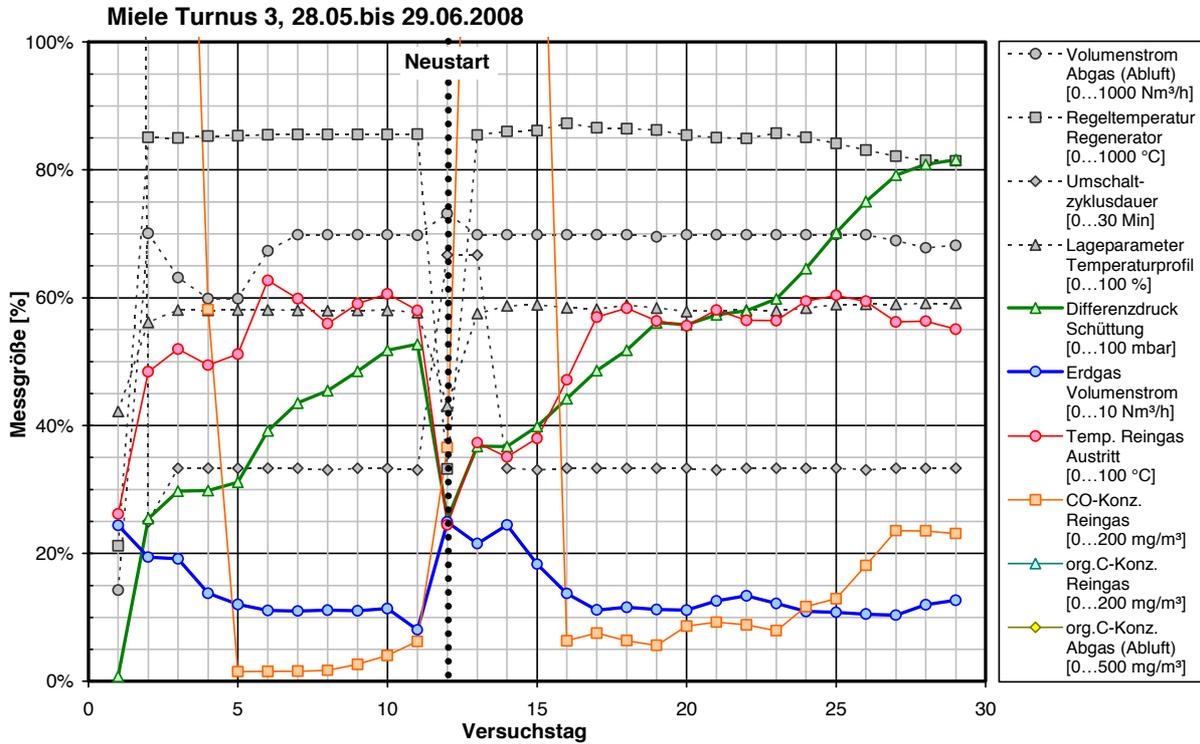


Bild A1.3: Zeitliche Verläufe ausgewählter Messgrößen für den Versuchsturnus 3.

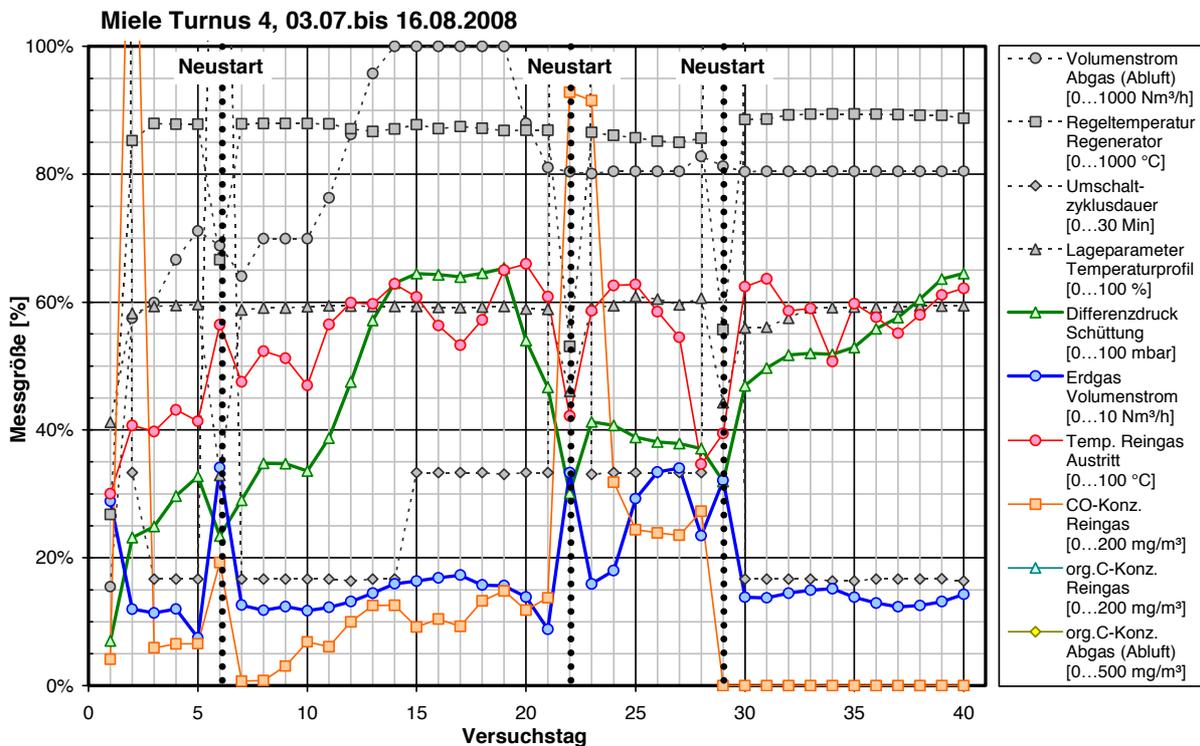


Bild A1.4: Zeitliche Verläufe ausgewählter Messgrößen für den Versuchsturnus 4.

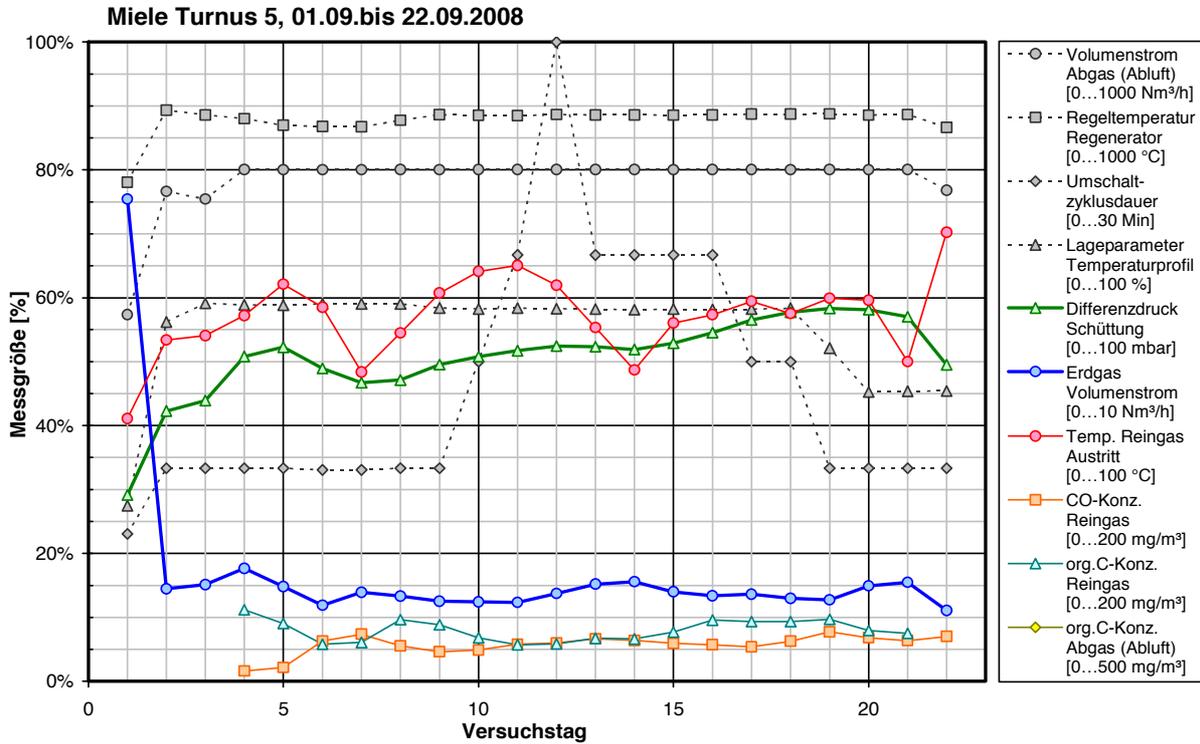


Bild A1.5: Zeitliche Verläufe ausgewählter Messgrößen für den Versuchsturnus 5.

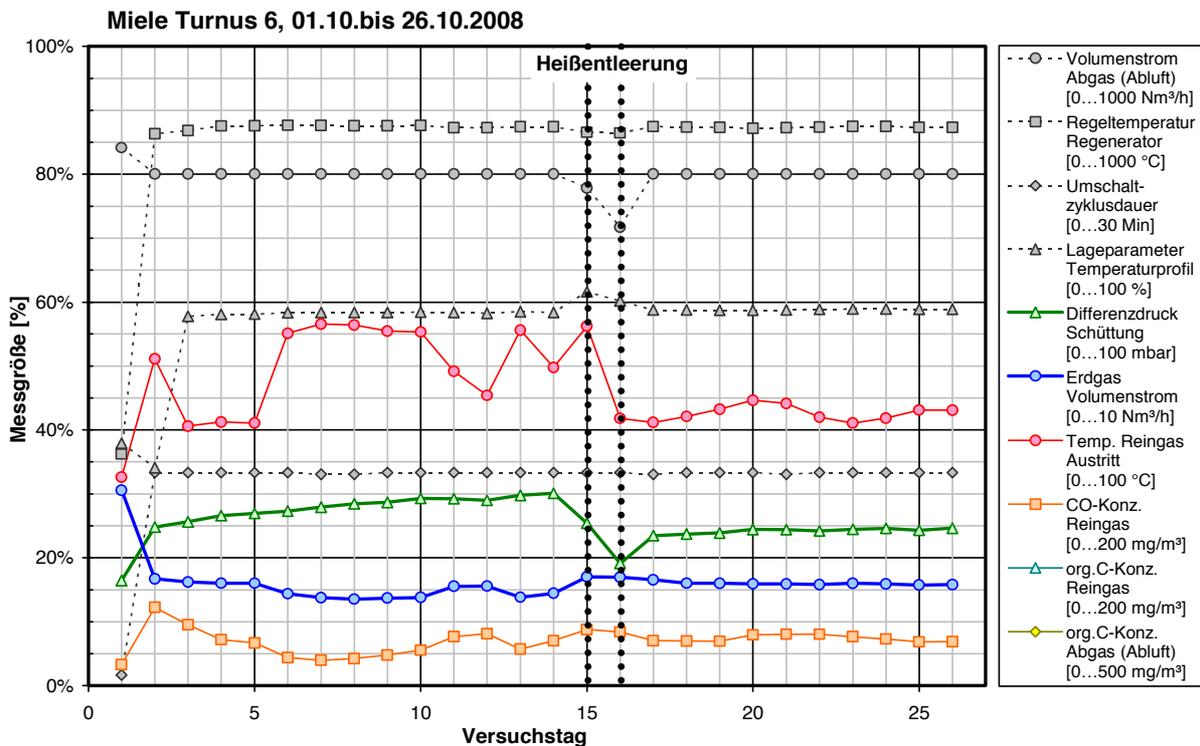


Bild A1.6: Zeitliche Verläufe ausgewählter Messgrößen für den Versuchsturnus 6.

Tabelle A1.7 Bestimmung der Staubmasse

Bestimmung der Staubmasse

Projekt: Miele, 2386

Probennahme: 20.06.2008

Bemerkung: **Edelstahl**filterhalter von Fa. Becker wurden im Ultraschallbad mit Tickopur R 33 Lösung gereinigt (fettfrei) und anschließend mit klarem Wasser gespült. Nach dem Trocknen wurden die Filterhalter mit **Glasfaserfiltern MGA/1 der Firma Munktell** bestückt und im Trockenschrank etwa 1 Stunde bei **150 °C** ausgeheizt. Anschließend wurden die Filter im Exsikkator über Nacht konditioniert. Nach der Behandlung mit dem Ionisierungsgebläse wurden die Filter mitsamt der Filterhalter auf der Analysenwaage MC1 von Sartorius (Filterwaagschale) gewogen. Nach der Probenahme wurden die Filter bei **150 °C** für mind. 1 Stunde im Trockenschrank ausgeheizt, im Exsikkator abgekühlt und anschließend gewogen.

Labor-Nr.	Filter-Nr.	Filter-Art	Edelstah	Vorwaage 18.06.2008	Auswaage 26.06.2008	Differenz	korrigiertes Ergebnis	abges.Volu- men	Konzentration	Bemerkung
08062001	E5	MGA/1	x	42,58978 g	42,58986 g	0,08 mg	0,02 mg			Filter: weiß, verrutscht, verkruscht
08062002	E6	MGA/1	x	40,05929 g	40,06179 g	2,50 mg	2,44 mg	1,032 m3	2,36 mg/m3	Filter: weiß + schwarze Krümel
08062003	E7	MGA/1	x	41,10656 g	41,10847 g	1,91 mg	1,84 mg	1,011 m3	1,82 mg/m3	Filter: weiß + schwarze Krümel
08062004	E8	MGA/1	x	39,12324 g	39,12708 g	3,84 mg	3,77 mg	1,058 m3	3,57 mg/m3	Filter: weiß + schwarze Krümel
	E9	MGA/1	x	40,49637 g	40,49643 g	0,06 mg				Blindwert
	E10	MGA/1	x	42,40992 g	42,40999 g	0,07 mg				Blindwert

Mittelwert: 2,58 mg

Mittelwert (Referenz-Filter-Abweichung)

STABW	0,06 mg
NWG	0,01 mg
BSG	0,09 mg
	0,26 mg

A1.2 Durchgeführte Versuche zur Bestimmung des Verhaltens der Kugeln in der SiO₂-RNV

Zuerst wurden einige Versuche mit unterschiedlichen Abmessungen der Auswurfschaufel durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass die ursprünglich realisierte Auswurfkonstruktion keine Rückschlüsse auf die zu bestimmende Motorleistung zuließ, da zu viele freie Parameter eine enorme Streuung der Messergebnisse verursachten. Deshalb wurde eine neue Lösung für diese Simulation umgesetzt, bei der einige dieser freien Parameter zu Konstanten, und damit berechenbar wurden. Die Messergebnisse dieser Versuche wurden verworfen. Es wurden nun Messreihen mit unterschiedlicher Befüllung der Anlage mit Keramikugeln und variierten Absenkwinkeln der Bodenplatte durchgeführt. Zur Durchführung wurde eine Hebelkonstruktion zur Auswurfsimulation verwendet, die eine Gesamtlänge von 2,75m aufwies. Die Auswurfschaufel war ein auf 90° gekantetes Blech der Länge 0,6m und einer beidseitigen Schenkelhöhe von 40mm, deren Vorderseite im 45°-Winkel angespitzt wurde.

10° & 50kg:

Für diese Messreihe wurde das Bodenblech auf 10° zur Waagrechten angeschweißt. Die Auswurfschaufel ragte 0,31m in die Schüttung hinein. Der Drehpunkt des Hebels teilte diesen in 0,515m (Schaufel) und 2,235m (Hebelarm). Es wurden zur Erstbefüllung 50kg Keramikugeln, entspricht einem Volumen von 0,0335m³, auf einmal eingefüllt. Dabei zeigte sich eine deutliche Tendenz der Kugeln, über den Rand der 0,51m langen Bodenplatte zu rollen. Auch während der Versuchsdurchführung bemerkte man ein erhöhtes Fließverhalten der Schüttung.

10° & 152kg:

Für diese Messreihe wurde das Bodenblech auf 10° zur Waagrechten angeschweißt. Die Auswurfschaufel ragte 0,31m in die Schüttung hinein. Der Drehpunkt des Hebels teilte diesen in 0,515m (Schaufel) und 2,235m (Hebelarm). Das Gewicht der Schüttung wurde hierfür auf 152kg erhöht. Es ergab sich ein ähnliches Fließverhalten, wie bei den Versuchen **10° & 50kg**.

20° & 50kg:

Für diese Messreihe wurde das Bodenblech auf 20° zur Waagrechten angeschweißt. Die Auswurfschaufel ragte 0,31m in die Schüttung hinein. Der Drehpunkt des Hebels teilte diesen in 0,515m (Schaufel) und 2,235m (Hebelarm). Es wurden zur Erstbefüllung 50kg Keramikugeln, entspricht einem Volumen von 0,0335m³, auf einmal eingefüllt. Es stellte sich ein erheblich trägeres Fließverhalten der Schüttung heraus. Bei der Erstbefüllung traten nur vereinzelt Kugeln über den Rand hinaus.

20° & 152kg:

Für diese Messreihe wurde das Bodenblech auf 20° zur Waagrechten angeschweißt. Die Auswurfschaufel ragte 0,31m in die Schüttung hinein. Der Drehpunkt des Hebels teilte diesen in 0,515m (Schaufel) und 2,235m (Hebelarm). Das Gewicht der Schüttung wurde nun auf 152kg erhöht. Es ergab sich ein ähnliches Fließverhalten, wie bei den Versuchen **20° & 50kg**.

20° & Xkg:

Für diese Messreihe wurde das Bodenblech auf 20° zur Waagrechten angeschweißt. Die Auswurfschaufel ragte 0,31m in die Schüttung hinein. Der Drehpunkt des Hebels teilte diesen in 0,515m (Schaufel) und 2,235m (Hebelarm). Das Gewicht der Schüttung war leider nicht bekannt, da die Anlage schon vorab befüllt war. Von den 152kg müsste das Gewicht von zwei Säcken Keramikugeln abgezogen werden. Es zeigte sich allerdings ein ähnliches Fließverhalten, wie bei den Versuchen **20° & 50kg** und **20° & 152kg**.

20° & 50kg & gekürzt:

Für diese Messreihe wurde das Bodenblech auf 20° zur Waagrechten angeschweißt und um 0,12m auf 0,39m gekürzt. Dies soll im Originalmaßstab eine erhebliche Materialeinsparung bringen. Die Auslauföffnung für die Kugeln wurde mit Hilfe eines Bleches so angepasst, dass sie der Öffnung in den vorhergehenden Versuchen entsprach. Die Auswurfschaufel ragte

0,31m in die Schüttung hinein. Der Drehpunkt des Hebels teilte diesen in 0,39m (Schaufel) und 2,36m (Hebelarm). Es wurden zur Erstbefüllung 50kg Keramikugeln, entspricht einem Volumen von 0,0335m³, auf einmal eingefüllt. Es stellte sich ein ähnlich träges Fließverhalten der Schüttung wie bei den Versuchen **20° & 50kg** und **20° & 152kg** heraus. Bei der Erstbefüllung traten nur vereinzelte Kugeln (3 Stück) über den Rand hinaus.

Ergebnis der Versuchsreihen:

Es stellte sich zum einen eine Abhängigkeit der Kraft von dem Gewicht der Schüttung heraus, die durch diese Versuche nicht genauer bestimmt werden konnte. Weiter wurde ein Zusammenhang zwischen dem Winkel des Bodenbleches und der aufzuwendenden Kraft herausgefunden. Mit steigendem Winkel erhöht sich auch die Kraft, die benötigt wird, um die Auswurfschaufel in der Schüttung in Bewegung zu setzen. Ferner konnte nachgewiesen werden, dass bei einer Erstbefüllung der Winkel der Bodenplatte über ein Herausrollen der Kugeln aus dem Schüttbett entscheidet. Allerdings hat dieser Winkel keinen Einfluss auf das Nachrollen der Kugelschüttung während des Ausräumvorgangs. Der entscheidende Faktor hierfür ist der Schüttwinkel, den die Kugeln einnehmen und der bei allen Versuchen bei circa 29° lag.

A2: Sonstiges

A2.1 Versuchsübersichten

Tabelle A 2.1: Tagesmittelwerte wichtiger Messgrößen der Versuche in Oelde (Turnus 1).

Zeit				Einstellwerte (Sollwerte)				Temperaturen					Volumenströme			Massenströme			Druck	Konzentrationen			
Datum	Wochentag	Versuchsturnus	Versuchstag	Betriebszustand	Abluft- volumenstrom m³/h	Temperatur RegMax12 °C	Umschaltzeit/ Zyklusdauer %	Laperparameter	Abluft vor Ventilator °C	Abluft nach Ventilator °C	Abluft EA 01/02 °C	Reingas Kamin °C	Reingas EA 01/02 °C	Abluft Nm³/h	Reingas Nm³/h	Erdgas (korrigiert) Nm³/h	Abluft kg/h	Reingas kg/h	Erdgas (korrigiert) kg/h	Differenzdruck- schüttung mbar	CO Reingas mg/m³	Cgesamt Reingas mg/m³	Cgesamt Abgas mg/m³
19.03.08	Mi	0	1	Aufheizen	720	805	4,8	42	6,0	13,3	12,1	40,0	45,4	717	704	6,99	927	910	5,56	18,4			
20.03.08	Do	0	2	Normalbetrieb	700	880	7,5	64	11,0	16,6	13,6	29,9	30,9	698	645	3,73	903	835	2,97	20,2			
21.03.08	Fr	0	2	Abkühlen	700	615	7,5	65	11,8	17,5	14,6	26,4	25,7	698	658	1,19	903	851	0,94	21,3			
22.03.08	Sa	1	1	Aufheizen	680	550	7,5	56	5,5	11,6	11,2	50,4	53,5	680	651	2,89	879	842	2,30	15,0			
23.03.08	So	1	2	Normalbetrieb	700	880	10,0	63	1,8	8,8	7,1	26,7	26,7	698	656	3,78	903	848	3,01	19,7			
24.03.08	Mo	1	3	Normalbetrieb	700	880	9,9	64	3,4	12,0	8,2	22,4	21,6	698	661	2,51	903	854	2,00	20,3			
25.03.08	Di	1	4	Normalbetrieb	700	880	10,0	64	12,6	18,6	14,8	27,0	27,5	698	653	2,35	903	845	1,88	22,3			
26.03.08	Mi	1	5	Normalbetrieb	700	885	10,0	65	16,7	23,0	19,2	31,8	32,0	698	658	2,24	903	851	1,79	22,9			
27.03.08	Do	1	6	Normalbetrieb	700	880	10,0	65	15,3	20,7	17,8	30,8	31,3	698	668	2,10	903	864	1,68	23,5			
28.03.08	Fr	1	7	Normalbetrieb	700	880	9,9	65	19,0	25,6	21,9	34,5	35,3	698	687	2,07	903	888	1,65	24,4			
29.03.08	Sa	1	8	Normalbetrieb	700	880	10,0	65	19,9	27,2	23,7	38,6	39,5	698	666	1,64	903	861	1,30	27,1			
30.03.08	So	1	9	Normalbetrieb	700	885	10,0	65	23,2	31,6	27,7	44,6	45,6	698	664	1,52	903	858	1,21	28,4			
31.03.08	Mo	1	10	Normalbetrieb	700	885	10,2	63	22,6	31,0	28,6	45,8	46,7	698	657	1,51	903	849	1,20	29,2			
01.04.08	Di	1	11	Normalbetrieb	700	880	10,0	62	20,6	28,5	27,2	45,4	47,2	698	641	1,68	903	829	1,34	30,8			
02.04.08	Mi	1	12	Normalbetrieb	700	885	10,0	60	17,4	25,2	24,3	45,1	48,2	698	638	1,76	903	825	1,40	32,0			
03.04.08	Do	1	13	Normalbetrieb	700	880	10,0	60	16,3	24,4	24,1	48,0	52,9	698	635	2,04	903	822	1,62	33,4			
04.04.08	Fr	1	14	Normalbetrieb	700	880	9,9	60	17,9	26,1	26,9	54,2	58,9	698	629	1,99	903	813	1,59	34,4			
05.04.08	Sa	1	15	Normalbetrieb	700	880	10,0	60	17,4	25,4	26,2	53,8	58,2	698	633	2,07	903	819	1,64	34,7			
06.04.08	So	1	16	Normalbetrieb	700	880	10,0	60	14,6	23,6	24,6	52,8	56,9	698	630	2,09	903	814	1,66	35,0			
07.04.08	Mo	1	17	Normalbetrieb	700	880	9,9	60	16,4	24,3	24,8	52,2	56,8	698	625	1,97	903	808	1,57	35,3			
08.04.08	Di	1	18	Normalbetrieb	700	880	10,0	60	19,0	27,2	27,4	54,5	58,3	698	627	1,93	903	810	1,54	35,9			
09.04.08	Mi	1	19	Normalbetrieb	700	880	10,0	60	19,8	28,5	28,7	56,0	59,7	698	638	1,94	903	826	1,54	36,5			
10.04.08	Do	1	20	Normalbetrieb	700	880	10,0	60	18,4	26,6	27,4	54,6	58,5	698	636	1,92	903	822	1,53	37,1			
11.04.08	Fr	1	21	Normalbetrieb	700	880	10,0	58	19,6	28,3	29,4	55,3	58,8	698	640	2,08	903	827	1,66	37,9			
12.04.08	Sa	1	22	Normalbetrieb	700	880	9,9	56	19,8	29,1	30,9	59,0	63,9	698	628	2,12	903	812	1,69	38,7			
13.04.08	So	1	23	Normalbetrieb	700	880	10,0	56	15,4	24,9	28,7	58,1	61,8	698	645	2,15	903	834	1,71	38,3			
14.04.08	Mo	1	24	Normalbetrieb	700	880	10,0	56	17,7	26,3	28,7	57,6	62,6	698	633	2,04	903	818	1,63	38,5			
15.04.08	Di	1	25	Normalbetrieb	700	880	10,0	56	17,9	26,5	29,2	57,9	62,7	698	622	2,04	903	804	1,62	39,2			
16.04.08	Mi	1	26	Normalbetrieb	700	880	10,0	56	18,7	27,1	29,6	58,4	63,7	698	615	2,03	903	795	1,62	39,9			
17.04.08	Do	1	27	Normalbetrieb	700	880	9,9	56	19,5	28,2	30,6	58,7	63,5	698	615	2,03	903	795	1,61	40,6			
18.04.08	Fr	1	28	Normalbetrieb	700	880	10,0	56	17,3	26,1	27,7	55,4	61,1	698	619	2,07	903	801	1,65	41,0			
19.04.08	Sa	1	29	Normalbetrieb	700	880	9,9	56	17,1	26,1	27,5	54,5	60,1	698	625	2,15	903	808	1,71	41,3			
20.04.08	So	1	30	Normalbetrieb	700	880	10,0	56	15,7	25,2	27,3	55,3	60,7	698	628	2,20	903	812	1,75	41,4			
21.04.08	Mo	1	31	Normalbetrieb	700	880	10,0	56	20,2	29,9	31,3	58,4	63,3	698	603	2,10	903	780	1,67	41,9			
22.04.08	Di	1	31	Abkühlen	990	660	10,0	60	16,3	28,5	28,7	105,5	111,9	986	872	1,17	1.275	1.128	0,93	40,7			
23.04.08	Mi	1	31	Entleerung	70	25	0,0	58	10,7	16,2	12,9	13,5	23,0	70	63		90	81		0,3			

Tabelle A 2.2: Tagesmittelwerte wichtiger Messgrößen der Versuche in Oelde (Turnus 2)

Zeit				Einstellwerte (Sollwerte)				Temperaturen					Volumenströme			Massenströme			Druck	Konzentrationen			
Datum	Wochentag	Versuchsturnus	Versuchstag	Betriebszustand	Abluft- volumenstrom m³/h	Temperatur RegMax12 °C	Umschaltzeit/ Zyklusdauer %	Laperparameter	Abluft vor Ventilator °C	Abluft nach Ventilator °C	Abluft EA 01/02 °C	Reingas Kamin °C	Reingas EA 01/02 °C	Abluft Nm³/h	Reingas Nm³/h	Erdgas (korrigiert) Nm³/h	Abluft kg/h	Reingas kg/h	Erdgas (korrigiert) kg/h	Differenzdruck- schüttung mbar	CO Reingas mg/m³	Cgesamt Reingas mg/m³	Cgesamt Abgas mg/m³
25.04.08	Fr	2	1	Aufheizen																			
26.04.08	Sa	2	2	Normalbetrieb																			
27.04.08	So	2	3	Normalbetrieb																			
28.04.08	Mo	2	4	Normalbetrieb	700	855	10,0	56	22,2	28,3	28,1	40,3	43,2	698	637	1,24	903	764	0,98	31,0	9,7	57,4	258,7
29.04.08	Di	2	5	Normalbetrieb	700	855	10,0	56	28,1	34,0	33,2	44,6	47,4	698	632	1,22	903	759	0,97	32,1	10,9	53,7	272,9
30.04.08	Mi	2	6	Normalbetrieb	700	855	10,0	56	26,9	33,3	32,0	44,0	47,3	698	607	1,24	903	728	0,99	33,6	12,7	47,1	230,0
01.05.08	Do	2	7	Normalbetrieb	700	855	10,0	56	23,7	30,2	30,4	42,8	45,4	698	608	1,35	903	729	1,08	34,3	16,0	35,8	40,4
02.05.08	Fr	2	8	Normalbetrieb	700	855	10,0	56	27,4	33,6	32,7	44,7	47,5	698	603	1,30	903	724	1,03	37,1	13,8	40,1	143,5
03.05.08	Sa	2	9	Normalbetrieb	700	855	10,0	56	29,8	36,1	35,1	46,5	49,5	698	589	1,34	903	706	1,06	35,0	15,6	36,2	74,2
04.05.08	So	2	10	Normalbetrieb	700	855	10,0	56	24,9	32,4	32,1	45,2	47,3	698	583	1,39	903	699	1,11	35,3	16,1	32,4	10,6
05.05.08	Mo	2	11	Normalbetrieb	760	855	10,0	56	32,8	40,4	39,2	51,0	54,1	760	648	1,32	983	778	1,05	39,7	16,2	36,5	172,0
06.05.08	Di	2	12	Normalbetrieb	800	855	10,0	56	33,2	41,9	40,7	53,5	57,2	798	681	1,32	1.032	817	1,05	46,8	18,1	34,2	193,0
07.05.08	Mi	2	13	Normalbetrieb	800	855	10,0	56	33,2	42,5	41,5	54,3	57,6	798	663	1,31	1.032	795	1,04	49,7	19,9	32,6	210,1
08.05.08	Do	2	14	Normalbetrieb	800	855	10,0	56	34,1	43,9	42,5	54,8	58,7	798	658	1,21	1.032	790	0,97	53,7	20,6	44,1	240,5
09.05.08	Fr	2	15	Normalbetrieb	800	855	9,9	56	34,4	45,8	43,8	56,1	60,3	798	649	1,21	1.032	779	0,96	60,2	24,6	38,1	193,0
10.05.08	Sa	2	16	Normalbetrieb	800	850	10,0	56	34,5	47,0	44,9	57,0	61,4	798	643	1,29	1.032	771	1,03	65,9	29,0	30,0	73,4
11.05.08	So	2	17	Normalbetrieb	800	850	10,0	56	28,8	42,2	41,5	54,5	58,1	798	654	1,38	1.032	784	1,10	67,6	31,5	27,5	9,0
12.05.08	Mo	2	18	Normalbetrieb	800	850	10,0	56	28,4	42,2	41,6	54,8	58,4	798	651	1,35	1.032	782	1,07	68,0	32,4	26,6	7,0
13.05.08	Di	2	19	Normalbetrieb	800	855	10,0	56	29,7	44,0	42,4	54,5	58,5	798	638	1,25	1.032	765	0,99	69,6	29,9	34,5	183,2
14.05.08	Mi	2	20	Normalbetrieb	740	855	9,9	56	33,6	48,7	45,6	56,3	60,9	738	542	1,19	954	650	0,95	77,8	29,0	41,0	280,5
15.05.08	Do	2	21	Normalbetrieb	700	855	9,9	56	30,6	45,9	43,5	53,4	58,0	698	514	1,25	903	617	1,00	77,5	33,3	36,7	245,5
16.05.08	Fr	2	22	Normalbetrieb	690	855	10,0	56	28,2	43,9	41,6												

Tabelle A 2.3: Tagesmittelwerte wichtiger Messgrößen der Versuche in Oelde (Turnus 3)

Zeit		Einstellwerte (Sollwerte)				Temperaturen					Volumenströme			Massenströme			Druck	Konzentrationen			
Datum	Wochentag Versuchsturnus Versuchstag	Betriebszustand	Abluft- volumenstrom m³/h	Temperatur RegMax12 °C	Umschaltzeit/ Zykeldauer %	Laperparameter	Abluft vor Ventilator °C	Abluft nach Ventilator °C	Abluft EA 01/02 °C	Reingas Kamin °C	Reingas EA 01/02 °C	Abluft Nm³/h	Reingas Nm³/h	Erdgas (korrigiert) Nm³/h	Abluft kg/h	Reingas kg/h	Erdgas (korrigiert) kg/h	Differenzdruck- schüttung mbar	CO Reingas mg/m³	Cgesamt Reingas mg/m³	Cgesamt Abgas mg/m³
28.05.08	Mi 3a 1	Aufheizen	140	210	8,1	42	23,1	27,2	28,9	27,7	26,2	143	178	2,44	184	213	1,94	0,8	-713,5		
29.05.08	Do 3a 2	Normalbetrieb	700	850	7,5	56	28,8	36,2	34,9	45,2	48,4	701	313	1,94	906	375	1,54	25,5	358,5		
30.05.08	Fr 3a 3	Normalbetrieb	630	850	10,0	58	35,6	41,6	39,4	48,0	52,0	631	191	1,92	816	229	1,53	29,7	392,5		
31.05.08	Sa 3a 4	Normalbetrieb	600	855	10,0	58	34,0	39,6	37,1	45,3	49,5	599	187	1,38	774	224	1,10	29,8	116,3		
01.06.08	So 3a 5	Normalbetrieb	600	855	10,0	58	32,3	39,0	38,2	47,8	51,2	599	108	1,20	774	130	0,96	31,2	3,1		
02.06.08	Mo 3a 6	Normalbetrieb	670	855	10,0	58	42,4	50,4	47,5	57,4	62,7	673	141	1,11	870	170	0,88	39,2	3,1		
03.06.08	Di 3a 7	Normalbetrieb	700	855	10,0	58	36,9	45,6	43,7	55,3	59,8	698	286	1,10	903	343	0,88	43,5	3,4		
04.06.08	Mi 3a 8	Normalbetrieb	700	855	9,9	58	31,3	40,4	39,0	51,4	55,9	698	326	1,11	903	391	0,88	45,5	3,4		
05.06.08	Do 3a 9	Normalbetrieb	700	855	10,0	58	35,2	44,4	42,7	53,9	59,1	698	282	1,10	903	339	0,88	48,5	5,3		
06.06.08	Fr 3a 10	Normalbetrieb	700	855	10,0	58	37,0	46,7	44,6	55,8	60,6	698	263	1,14	903	316	0,91	51,8	8,1		
07.06.08	Sa 3a 11	Normalbetrieb	700	855	9,9	58	41,8	51,6	55,1	56,1	58,0	698	266	0,81	902	319	0,64	52,7	12,4		
08.06.08	So 3a	Normal/Daten!	700	855	0,0	57	47,2	57,6	66,4	57,1	56,0	697	192	0,29	901	230	0,23	52,6	14,3		
09.06.08	Mo 3a	Abkühlen	870	585	16,5	42	35,4	46,3	50,1	63,5	70,6	870	462	0,12	1.125	555	0,10	49,7	6,7		
10.06.08	Di 3a	Abkühlen	1000	195	20,0	43	22,1	31,2	29,5	36,3	38,9	998	717	0,00	1.290	860	0,00	36,8	-0,1		
11.06.08	Mi 3a	Abkühlen	1000	85	20,0	51	16,7	24,1	21,5	29,4	30,1	998	774	0,00	1.290	928	0,00	29,1	-0,1		
12.06.08	Do 3b 12	Aufheizen	730	330	20,0	43	13,7	20,1	22,8	24,4	24,5	732	623	2,49	946	748	1,98	25,5	73,2		
13.06.08	Fr 3b 13	Normalbetrieb	700	855	20,0	58	13,4	21,7	21,5	34,0	37,3	698	590	2,15	903	708	1,71	36,8	373,1		
14.06.08	Sa 3b 14	Normalbetrieb	700	860	10,0	59	12,7	20,8	22,0	33,1	35,1	698	593	2,45	903	712	1,95	36,7	380,8		
15.06.08	So 3b 15	Normalbetrieb	700	860	9,9	59	14,4	23,3	24,2	35,8	38,0	698	568	1,83	903	681	1,46	39,8	313,2		
16.06.08	Mo 3b 16	Normalbetrieb	700	875	10,0	58	24,7	33,7	32,8	43,9	47,2	698	532	1,37	903	639	1,09	44,2	12,7		
17.06.08	Di 3b 17	Normalbetrieb	700	865	10,0	58	34,9	43,5	41,0	52,6	57,0	698	514	1,12	903	617	0,89	48,6	15,1		
18.06.08	Mi 3b 18	Normalbetrieb	700	865	10,0	59	35,8	45,0	42,4	54,1	58,4	698	492	1,16	903	591	0,92	51,8	12,7		
19.06.08	Do 3b 19	Normalbetrieb	700	860	10,0	58	32,8	42,5	40,5	52,1	56,4	695	510	1,12	899	612	0,89	56,1	11,2		
20.06.08	Fr 3b 20	Normalbetrieb	700	855	10,0	58	32,8	42,8	40,5	51,6	55,6	698	516	1,11	903	619	0,89	55,8	17,2		
21.06.08	Sa 3b 21	Normalbetrieb	700	850	9,9	58	36,3	46,5	43,6	53,8	58,1	698	493	1,26	903	592	1,00	57,3	18,5		
22.06.08	So 3b 22	Normalbetrieb	700	850	10,0	58	30,3	42,8	41,0	52,3	56,5	698	419	1,34	903	503	1,06	57,9	17,6		
23.06.08	Mo 3b 23	Normalbetrieb	700	855	10,0	58	34,3	46,0	42,0	51,8	56,4	698	462	1,22	903	555	0,97	59,8	15,9		
24.06.08	Di 3b 24	Normalbetrieb	700	850	10,0	58	35,9	49,0	44,2	54,5	59,5	698	449	1,09	903	539	0,87	64,5	23,4		
25.06.08	Mi 3b 25	Normalbetrieb	700	840	10,0	59	35,8	50,5	45,6	55,9	60,4	698	418	1,08	903	502	0,86	70,2	25,8		
26.06.08	Do 3b 26	Normalbetrieb	700	830	9,9	59	35,5	50,6	45,4	55,0	59,4	698	419	1,05	903	503	0,84	75,0	36,2		
27.06.08	Fr 3b 27	Normalbetrieb	690	820	10,0	59	32,8	48,2	42,7	51,3	56,2	689	446	1,03	891	536	0,82	79,1	47,1		
28.06.08	Sa 3b 28	Normalbetrieb	680	815	10,0	59	32,7	48,7	43,1	51,6	56,3	678	433	1,20	877	520	0,95	80,9	47,1		
29.06.08	So 3b 29	Normalbetrieb	680	815	10,0	59	29,0	46,5	42,1	50,9	55,1	682	375	1,27	882	451	1,01	81,6	46,2		
30.06.08	Mo 3b	Abkühlen	660	720	10,0	57	29,7	47,6	42,2	70,0	82,0	655	283	0,55	847	339	0,44	81,5	24,1		
01.07.08	Di 3b	Abkühlen	680	215	0,0	56	22,5	40,4	34,8	77,1	84,0	676	280	0,00	874	335	0,00	73,7	0,0		
02.07.08	Mi 3b	Entleerung	300	30	0,0	51	29,0	35,8	29,9	32,3	31,0	303		0,00	392		0,00	14,7	0,0		

Tabelle A 2.4: Tagesmittelwerte wichtiger Messgrößen der Versuche in Oelde (Turnus 4)

Zeit		Einstellwerte (Sollwerte)				Temperaturen					Volumenströme			Massenströme			Druck	Konzentrationen			
Datum	Wochentag Versuchsturnus Versuchstag	Betriebszustand	Abluft- volumenstrom m³/h	Temperatur RegMax12 °C	Umschaltzeit/ Zykeldauer %	Laperparameter	Abluft vor Ventilator °C	Abluft nach Ventilator °C	Abluft EA 01/02 °C	Reingas Kamin °C	Reingas EA 01/02 °C	Abluft Nm³/h	Reingas Nm³/h	Erdgas (korrigiert) Nm³/h	Abluft kg/h	Reingas kg/h	Erdgas (korrigiert) kg/h	Differenzdruck- schüttung mbar	CO Reingas mg/m³	Cgesamt Reingas mg/m³	Cgesamt Abgas mg/m³
03.07.08	Do 4a 1	Aufheizen	150	270	37,8	41	23,4	28,4	28,5	30,4	30,0	155	233	2,88	200	301	2,30	7,0	8,3		
04.07.08	Fr 4a 2	Normalbetrieb	580	850	10,0	58	18,5	26,2	27,2	39,5	40,7	575	563	1,20	744	729	0,95	23,2	295,7		
05.07.08	Sa 4a 3	Normalbetrieb	600	880	5,0	59	20,4	29,3	31,3	41,1	39,7	599	509	1,14	775	658	0,90	24,9	11,8		
06.07.08	So 4a 4	Normalbetrieb	670	880	5,0	59	21,7	31,0	33,5	43,9	43,1	666	546	1,20	862	706	0,95	29,7	13,0		
07.07.08	Mo 4a 5	Normal/Daten!	710	880	5,0	60	25,2	33,2	34,9	41,4	41,4	711	625	0,75	919	807	0,60	32,7	13,1		
08.07.08	Di 4a	Abkühlen	840	735	0,0	43	27,6	35,6	38,0	60,1	71,8	842	738	0,00	1.088	954	0,00	36,2	4,3		
09.07.08	Mi 4b 6	Aufheizen	690	665	59,9	33	17,2	24,8	30,8	50,2	56,5	688	636	3,41	890	822	2,72	23,4	38,5		
10.07.08	Do 4b 7	Normalbetrieb	640	880	5,0	59	29,5	36,7	37,0	46,5	47,5	640	536	1,26	828	694	1,00	29,0	1,4		
11.07.08	Fr 4b 8	Normalbetrieb	700	880	5,0	59	33,3	40,5	40,8	51,1	52,3	699	579	1,18	904	749	0,94	34,8	1,6		
12.07.08	Sa 4b 9	Normalbetrieb	700	880	5,0	59	32,0	39,2	39,6	50,0	51,2	699	583	1,24	904	754	0,99	34,7	6,2		
13.07.08	So 4b 10	Normalbetrieb	700	880	5,0	59	25,8	34,3	36,3	46,9	47,0	699	572	1,17	904	739	0,93	33,6	13,7		
14.07.08	Mo 4b 11	Normalbetrieb	760	880	5,0	59	39,0	46,9	45,7	54,0	56,5	763	634	1,23	987	820	0,98	38,7	12,1		
15.07.08	Di 4b 12	Normalbetrieb	860	870	4,9	59	39,3	48,8	47,7	57,0	59,9	862	714	1,31	1.115	923	1,05	47,5	20,0		
16.07.08	Mi 4b 13	Normalbetrieb	960	865	5,0	59	36,4	47,0	46,5	56,7	59,7	958	837	1,45	1.238	1.082	1,15	57,1	25,1		
17.07.08	Do 4b 14	Normalbetrieb	1000	870	5,0	59	37,0	48,2	47,3	59,2	62,8	1000	876	1,59	1.293	1.133	1,27	63,0	25,1		
18.07.08	Fr 4b 15	Normalbetrieb	1000	875	10,0	59	31,9	43,5	42,0	56,4	60,8	1000	886	1,64	1.293	1.146	1,30	64,5	18,3		
19.07.08	Sa 4b 16	Normalbetrieb	1000	870	10,0	59	23,5	36,8	36,5	52,6	56,3	1000	862	1,69	1.293	1.115	1,34	64,3	20,8		
20.07.08	So 4b 17	Normalbetrieb	1000	875																	

Tabelle A 2.5: Tagesmittelwerte wichtiger Messgrößen der Versuche in Oelde (Turnus 5)

Zeit		Betriebszustand	Einstellwerte (Sollwerte)				Temperaturen					Volumenströme			Massenströme			Druck	Konzentrationen				
Datum	Wochentag		Versuchsturnus	Versuchstag	m ³ /h	°C	%	°C	°C	°C	°C	°C	Nm ³ /h	Nm ³ /h	Nm ³ /h	kg/h	kg/h		kg/h	mbar	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³
				Abluftvolumenstrom	Temperatur Reg/Max12	Umschaltzeit/Zyklusdauer	Laperparameter	Abluft vor Ventilator	Abluft nach Ventilator	Abluft EA 01/02	Reingas Kamin	Reingas EA 01/02	Abluft	Reingas	Erdgas (korrigiert)	Abluft	Reingas	Erdgas (korrigiert)	Differenzdruck-schüttung	CO Reingas	Cgesamt Reingas	Cgesamt Abgas	
01.09.08	Mo	5	1	Aufheizen	570	780	6,9	27	20,1	34,9	38,0	40,6	41,1	573	584	7,54	741	755	6,00	29,1			
02.09.08	Di	5	2	Normalbetrieb	770	895	10,0	56	27,4	41,9	34,2	49,9	53,4	766	723	1,45	991	935	1,15	42,3			
03.09.08	Mi	5	3	Normalbetrieb	750	885	10,0	59	31,1	44,2	48,4	50,9	54,1	754	740	1,51	976	956	1,20	43,9	4,2		
04.09.08	Do	5	4	Normalbetrieb	800	880	10,0	59	32,3	47,2	40,0	54,8	57,2	800	773	1,77	1.035	1.000	1,41	50,8	3,2	22,3	
05.09.08	Fr	5	5	Normalbetrieb	800	870	10,0	59	34,2	50,5	42,8	59,4	62,1	800	754	1,48	1.035	975	1,18	52,3	4,3	18,1	
06.09.08	Sa	5	6	Normalbetrieb	800	870	9,9	59	32,8	48,9	41,3	56,0	58,5	800	753	1,19	1.035	974	0,95	48,9	12,6	11,6	
07.09.08	So	5	7	Normalbetrieb	800	865	9,9	59	22,9	39,4	32,9	47,3	48,4	800	767	1,39	1.035	991	1,11	46,7	14,7	12,2	
08.09.08	Mo	5	8	Normalbetrieb	800	880	10,0	59	33,8	49,0	40,3	51,8	54,5	800	766	1,33	1.035	991	1,06	47,1	11,1	19,3	
09.09.08	Di	5	9	Normalbetrieb	800	885	10,0	58	38,4	55,8	45,2	57,4	60,7	800	730	1,25	1.035	944	1,00	49,5	9,2	17,7	
10.09.08	Mi	5	10	Normalbetrieb	800	885	15,0	58	39,7	58,3	46,7	60,3	64,1	800	712	1,24	1.035	921	0,99	50,8	9,7	13,7	
11.09.08	Do	5	11	Normalbetrieb	800	885	20,0	58	39,7	60,1	46,8	61,5	65,0	800	702	1,24	1.035	908	0,98	51,7	11,5	11,5	
12.09.08	Fr	5	12	Normalbetrieb	800	885	30,0	58	36,1	55,3	43,6	58,4	62,0	800	713	1,37	1.035	922	1,09	52,4	12,0	11,7	
13.09.08	Sa	5	13	Normalbetrieb	800	885	20,0	58	29,9	48,5	37,3	51,6	55,3	800	773	1,52	1.035	999	1,21	52,3	13,3	13,5	
14.09.08	So	5	14	Normalbetrieb	800	885	20,0	58	19,4	39,1	29,5	46,4	48,7	800	779	1,56	1.035	1.007	1,24	51,9	12,8	13,3	
15.09.08	Mo	5	15	Normalbetrieb	800	885	20,0	58	30,9	49,5	37,9	52,0	56,1	800	790	1,40	1.035	1.021	1,11	52,9	11,9	15,4	
16.09.08	Di	5	16	Normalbetrieb	800	885	20,0	58	31,9	52,0	40,0	53,8	57,3	800	789	1,34	1.035	1.020	1,06	54,5	11,5	19,1	
17.09.08	Mi	5	17	Normalbetrieb	800	885	15,0	58	33,6	54,0	42,0	56,0	59,4	800	783	1,36	1.035	1.012	1,08	56,5	10,8	18,7	
18.09.08	Do	5	18	Normalbetrieb	800	885	15,0	58	32,3	52,2	40,9	54,0	57,5	800	779	1,30	1.035	1.007	1,03	57,7	12,6	18,7	
19.09.08	Fr	5	19	Normalbetrieb	800	890	10,0	52	34,7	54,8	45,2	55,8	59,9	800	772	1,28	1.035	998	1,01	58,3	15,5	19,4	
20.09.08	Sa	5	20	Normalbetrieb	800	885	10,0	45	34,2	54,4	45,2	55,5	59,6	800	772	1,49	1.035	998	1,19	58,1	13,6	15,9	
21.09.08	So	5	21	Normalbetrieb	800	885	10,0	45	21,1	42,4	34,8	47,8	50,0	800	785	1,55	1.035	1.015	1,23	57,0	12,7	15,0	
22.09.08	Mo	5	22	Normalbetrieb	770	865	10,0	45	20,3	40,5	38,4	63,1	70,2	768	776	1,11	993	1.003	0,88	49,5	14,0		
23.09.08	Di	5		Abkühlen	390	170	0,0	62	15,3	32,2	21,7	59,0	66,6	395	570	0,00	511	737	0,00	18,8	-0,1		
24.09.08	Mi	5		Entleerung	450	20	10,0	53	13,6	28,3	14,9	15,2	16,1	453	514	0,00	586	665	0,00	5,5	-0,1		

Tabelle A 2.6: Tagesmittelwerte wichtiger Messgrößen der Versuche in Oelde (Turnus 6)

Zeit		Betriebszustand	Einstellwerte (Sollwerte)				Temperaturen					Volumenströme			Massenströme			Druck	Konzentrationen				
Datum	Wochentag		Versuchsturnus	Versuchstag	m ³ /h	°C	%	°C	°C	°C	°C	°C	Nm ³ /h	Nm ³ /h	Nm ³ /h	kg/h	kg/h		kg/h	mbar	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³
				Abluftvolumenstrom	Temperatur Reg/Max12	Umschaltzeit/Zyklusdauer	Laperparameter	Abluft vor Ventilator	Abluft nach Ventilator	Abluft EA 01/02	Reingas Kamin	Reingas EA 01/02	Abluft	Reingas	Erdgas (korrigiert)	Abluft	Reingas	Erdgas (korrigiert)	Differenzdruck-schüttung	CO Reingas	Cgesamt Reingas	Cgesamt Abgas	
01.10.08	Mi	6	1	Aufheizen	840	360	0,5	38	13,0	31,7	24,4	30,1	32,6	842	790	3,06	1.088	1.021	2,43	16,5	6,6		
02.10.08	Do	6	2	Normalbetrieb	800	865	10,0	34	11,7	31,0	27,5	48,0	51,1	800	715	1,67	1.035	924	1,33	24,8	24,5		
03.10.08	Fr	6	3	Normalbetrieb	800	870	10,0	58	14,5	33,4	23,6	42,2	40,6	800	720	1,62	1.035	931	1,29	25,6	19,0		
04.10.08	Sa	6	4	Normalbetrieb	800	875	10,0	58	12,8	30,9	22,9	42,6	41,2	800	733	1,60	1.035	948	1,28	26,6	14,4		
05.10.08	So	6	5	Normalbetrieb	800	875	10,0	58	13,4	31,5	23,2	41,9	41,1	800	743	1,60	1.035	961	1,28	27,0	13,4		
06.10.08	Mo	6	6	Normalbetrieb	800	875	10,0	58	33,1	51,1	38,9	55,3	55,1	800	730	1,44	1.035	943	1,15	27,3	8,8		
07.10.08	Di	6	7	Normalbetrieb	800	875	9,9	58	35,3	54,4	41,1	57,1	56,6	800	712	1,38	1.035	920	1,10	27,9	8,0		
08.10.08	Mi	6	8	Normalbetrieb	800	875	9,9	58	34,1	52,6	40,6	57,3	56,4	800	691	1,35	1.035	984	1,08	28,5	8,5		
09.10.08	Do	6	9	Normalbetrieb	800	875	10,0	58	33,3	50,7	39,5	55,8	55,5	800	704	1,37	1.035	910	1,09	28,7	9,6		
10.10.08	Fr	6	10	Normalbetrieb	800	875	10,0	58	33,2	48,5	39,1	55,7	55,3	800	692	1,38	1.035	895	1,10	29,3	11,2		
11.10.08	Sa	6	11	Normalbetrieb	800	875	10,0	58	23,3	41,4	33,0	51,8	49,2	800	683	1,55	1.035	883	1,24	29,2	15,3		
12.10.08	So	6	12	Normalbetrieb	800	875	10,0	58	18,2	35,3	28,5	47,9	45,4	800	704	1,56	1.035	910	1,24	29,0	16,3		
13.10.08	Mo	6	13	Normalbetrieb	800	875	10,0	58	35,1	50,8	41,5	56,7	55,6	800	666	1,38	1.035	861	1,10	29,8	11,5		
14.10.08	Di	6	14	Normalbetrieb	800	875	10,0	58	23,0	38,1	32,5	51,4	49,8	800	670	1,45	1.035	867	1,15	30,1	14,1		
15.10.08	Mi	6	15	Normal/Entleer	780	865	10,0	62	14,6	31,3	27,1	56,1	56,3	779	673	1,70	1.007	871	1,36	25,4	17,6		
16.10.08	Do	6	16	Normal/Entleer	720	865	10,0	60	12,1	39,0	25,1	40,3	41,8	717	624	1,70	927	807	1,35	19,1	16,8		
17.10.08	Fr	6	17	Normalbetrieb	800	875	9,9	59	10,0	13,8	22,0	41,4	41,2	800	694	1,66	1.035	898	1,32	23,5	14,1		
18.10.08	Sa	6	18	Normalbetrieb	800	875	10,0	59	10,0	13,8	22,2	42,9	42,1	800	705	1,60	1.035	911	1,28	23,7	13,9		
19.10.08	So	6	19	Normalbetrieb	800	875	10,0	59	11,7	15,5	23,8	43,4	43,3	800	709	1,60	1.035	917	1,27	23,9	13,9		
20.10.08	Mo	6	20	Normalbetrieb	800	870	10,0	59	13,3	17,3	25,4	44,6	44,6	800	703	1,59	1.035	910	1,27	24,4	15,9		
21.10.08	Di	6	21	Normalbetrieb	800	875	9,9	59	13,8	17,6	25,6	45,0	44,1	800	710	1,59	1.035	919	1,26	24,4	16,1		
22.10.08	Mi	6	22	Normalbetrieb	800	875	10,0	59	10,0	13,9	22,4	42,6	42,0	800	708	1,58	1.035	915	1,26	24,2	16,1		
23.10.08	Do	6	23	Normalbetrieb	800	875	10,0	59	9,1	13,0	21,6	41,0	41,1	800	711	1,60	1.035	919	1,27	24,5	15,3		
24.10.08	Fr	6	24	Normalbetrieb	800	875	10,0	59	9,9	13,7	22,0	41,5	41,8	800	720	1,59	1.035	931	1,26	24,6	14,6		
25.10.08	Sa	6	25	Normalbetrieb	800	875	10,0																

Tabelle A 2.7: Tagesmittelwerte wichtiger Messgrößen der Versuche in Leverkusen (Turnus 1)

Zeit				Einstellwerte (Sollwerte)				Temperaturen					Volumenströme			Massenströme			Druck	Konzentrationen			
Datum	Wochentag	Versuchsturnus	Versuchstag	Betriebszustand	Abluftvolumenstrom m³/h	Temperatur Reg/Max12 °C	Umschaltzeit/ Zykusdauer %	Lapparameter	Abluft vor Ventilator °C	Abluft nach Ventilator °C	Abluft EA 01/02 °C	Reingas Kamin °C	Reingas EA 01/02 °C	Abluft Nm³/h	Reingas Nm³/h	Erdgas (korrigiert) Nm³/h	Abluft kg/h	Reingas kg/h	Erdgas (korrigiert) kg/h	Differenzdruck- schüttung mbar	CO Reingas mg/m³	Gesamt Reingas mg/m³	Gesamt Abgas mg/m³
25.03.09	Mi	1	1	Aufheizen	470	540	0,3	37	7,0	9,2	21,0	27,8	28,6	466,2	519,5	5,87	602,8	671,8	4,67	13,6	104,6	36,2	
26.03.09	Do	1	2	Normalbetrieb	710	885	10,0	58	68,5	68,4	71,4	83,4	87,1	706,2	689,8	1,42	913,2	891,9	1,13	25,4	79,8	39,6	
27.03.09	Fr	1	3	Normalbetrieb	700	885	14,9	57	132,2	129,4	130,4	140,0	145,4	699,9	703,5	1,16	905,0	909,6	0,92	29,5	7,4	15,2	
28.03.09	Sa	1	4	Normalbetrieb	700	880	15,0	56	130,9	128,5	130,3	142,6	148,0	699,9	704,0	1,05	905,0	910,3	0,84	29,6	6,1	13,4	
29.03.09	So	1	5	Normalbetrieb	700	875	15,0	56	130,9	128,0	129,7	141,5	147,0	699,9	703,9	1,13	905,0	910,2	0,90	29,4	3,4	13,1	
30.03.09	Mo	1	6	Normalbetrieb	700	875	14,9	56	133,4	130,4	132,2	143,7	149,0	699,9	704,7	1,12	905,0	911,2	0,89	29,3	2,8	13,8	
01.04.09	Mi	1	7	Normalbetrieb	700	880	15,0	56	135,3	132,4	134,1	145,6	151,0	699,9	703,1	0,94	905,0	909,1	0,75	29,2	3,5	10,8	
02.04.09	Do	1	8	Normalbetrieb	700	875	15,0	57	137,4	135,0	136,6	146,9	151,7	699,9	703,1	0,96	905,0	909,1	0,76	28,9	2,7	9,4	
03.04.09	Fr	1	9	Normalbetrieb	700	875	15,0	57	138,1	136,0	137,5	147,6	152,4	699,9	702,8	0,97	905,0	908,7	0,77	28,7	2,5	9,0	
04.04.09	Sa	1	10	Normalbetrieb	700	870	15,0	57	136,8	134,6	135,8	145,8	150,8	699,9	702,7	1,05	905,0	908,6	0,83	28,5	2,5	8,4	
05.04.09	So	1	11	Normalbetrieb	700	870	15,0	57	135,5	133,4	134,6	144,0	148,8	699,9	701,0	1,05	905,0	906,4	0,83	28,4	1,6	8,7	
06.04.09	Mo	1	12	Normalbetrieb	700	870	15,0	57	136,4	135,0	136,1	145,6	150,4	699,9	701,1	1,00	905,0	906,6	0,80	29,0	0,4	9,0	
07.04.09	Di	1	13	Normalbetrieb	700	870	14,9	57	135,2	134,0	135,4	145,7	150,3	699,9	702,6	0,98	905,0	908,5	0,78	29,3	2,4	9,0	
08.04.09	Mi	1	14	Normalbetrieb	700	870	15,0	57	133,5	132,1	133,5	143,8	148,1	699,9	700,0	0,94	905,0	905,2	0,75	29,4	0,4	9,1	
08.04.09	Mi	1	15	Normalbetrieb	700	870	15,0	57	133,5	132,1	133,5	143,8	148,1	699,9	700,0	0,94	905,0	905,2	0,75	29,4	0,4	9,1	
09.04.09	Do	1	16	Normalbetrieb	700	870	15,0	57	135,3	134,1	135,5	145,7	150,0	699,9	700,9	0,96	905,0	906,3	0,77	29,5	0,2	9,1	
10.04.09	Fr	1	17	Normalbetrieb	700	870	15,0	57	134,1	133,5	135,1	145,6	149,9	699,9	701,3	0,86	905,0	906,8	0,69	29,7	0,2	9,2	
11.04.09	Sa	1	18	Normalbetrieb	700	870	15,0	57	132,2	131,5	133,2	143,7	147,9	699,9	699,2	0,95	905,0	904,1	0,76	29,8	0,1	8,7	
12.04.09	So	1	19	Normalbetrieb	700	870	14,9	57	131,5	130,8	132,4	142,8	146,6	699,9	699,1	0,94	905,0	904,0	0,75	29,8	0,1	8,8	
13.04.09	Mo	1	20	Normalbetrieb	700	870	15,0	57	130,8	130,2	131,6	142,0	145,9	699,9	696,6	0,97	905,0	900,7	0,77	29,8	0,1	9,0	
14.04.09	Di	1	21	Normalbetrieb	700	865	15,0	57	131,0	130,5	132,0	142,2	146,1	699,9	696,1	0,91	905,0	900,1	0,73	29,9	4,0	8,8	
15.04.09	Mi	1	22	Normalbetrieb	700	860	15,0	57	132,8	132,5	134,1	144,0	147,8	699,9	697,0	0,93	905,0	901,2	0,74	29,9	0,2	8,5	
16.04.09	Do	1	23	Normalbetrieb	700	860	15,0	57	130,9	130,7	132,2	142,6	146,4	699,9	695,3	0,87	905,0	899,0	0,69	29,9	0,2	8,9	
17.04.09	Fr	1	24	Normalbetrieb	700	865	15,0	57	128,7	128,2	129,5	139,7	143,5	699,9	691,7	0,76	905,0	894,3	0,60	30,2	18,7	8,8	
18.04.09	Sa	1	25	Normalbetrieb	700	870	15,0	57	129,0	128,1	129,5	139,7	143,6	699,9	690,3	0,92	905,0	892,6	0,73	30,1	0,1	9,4	
19.04.09	So	1	26	Normalbetrieb	700	865	15,0	57	129,5	128,7	130,2	140,9	144,8	699,9	690,5	0,80	905,0	892,9	0,64	30,0	0,1	9,7	
20.04.09	Mo	1	27	Normalbetrieb	700	860	14,9	57	132,4	131,5	132,9	143,3	147,1	699,9	689,4	0,66	905,0	891,5	0,52	30,0	0,2	10,2	
21.04.09	Di	1	28	Normalbetrieb	700	855	15,0	57	132,2	131,6	133,1	143,3	146,8	699,9	692,0	0,78	905,0	894,7	0,62	30,0	1,0	9,0	
22.04.09	Mi	1	29	Normalbetrieb	700	855	15,0	57	129,0	128,2	129,3	139,2	142,8	699,9	692,1	0,88	905,0	894,8	0,70	29,8	0,7	9,3	
23.04.09	Do	1	30	Normalbetrieb	700	855	14,9	57	129,3	128,5	129,4	138,8	142,4	699,9	689,8	0,80	905,0	891,9	0,64	29,9	1,4	9,7	
24.04.09	Fr	1	31	Normalbetrieb	700	855	15,0	57	131,5	131,2	132,4	141,6	145,1	699,9	690,2	0,92	905,0	892,5	0,73	30,1	2,9	8,6	
25.04.09	Sa	1	32	Normalbetrieb	700	850	15,0	57	129,8	129,9	131,2	140,8	143,9	699,9	690,3	0,89	905,0	892,5	0,71	30,3	5,2	8,6	
26.04.09	So	1	33	Normalbetrieb	700	855	15,0	57	132,0	132,0	133,1	142,1	145,3	699,9	688,8	0,84	905,0	890,6	0,67	30,5	5,4	8,7	
27.04.09	Mo	1	34	Normalbetrieb	700	855	15,0	57	129,1	129,2	130,4	139,8	142,9	699,9	684,4	0,81	905,0	884,9	0,64	30,7	6,2	9,0	
28.04.09	Di	1	35	Normalbetrieb	700	860	14,9	57	129,5	129,7	130,9	140,1	143,3	699,9	681,3	0,78	905,0	881,0	0,62	30,8	1,2	9,7	
29.04.09	Mi	1	36	Normalbetrieb	700	855	15,0	57	129,5	129,6	130,6	140,1	143,1	699,9	679,3	0,78	905,0	878,3	0,62	30,8	0,6	9,5	
30.04.09	Do	1	37	Normalbetrieb	700	855	15,0	57	129,6	129,7	130,8	140,3	143,2	699,9	678,1	0,81	905,0	876,8	0,64	30,7	1,2	9,3	
01.05.09	Fr	1	38	Normalbetrieb	700	855	14,9	57	131,3	131,5	132,7	142,0	144,9	699,9	678,2	0,87	905,0	876,9	0,69	30,7	2,7	9,1	
02.05.09	Sa	1	39	Normalbetrieb	700	855	15,0	57	130,4	130,4	131,5	140,9	144,1	699,9	678,7	0,89	905,0	877,6	0,71	30,5	5,9	9,0	
03.05.09	So	1	40	Normalbetrieb	700	855	15,0	57	129,0	129,0	130,0	139,4	142,5	699,9	676,8	0,86	905,0	875,1	0,69	30,7	5,2	9,4	
04.05.09	Mo	1		Abkühlen	890	735	15,0	55	53,4	58,5	67,2	91,7	91,5	892,8	828,7	0,47	1154,4	1071,6	0,38	39,9	2,3	4,1	
05.05.09	Di	1		Entleerung	390	145	15,0	56	11,9	13,9	23,8	69,8	78,2	388,3	359,4	0,00	502,1	464,7	0,00	10,0	0,0		