

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

Entfernung oxidierbarer Aerosole aus Abluftströmen

von

F. Opferkuch, G. Gaiser, G. Eigenberger
Institut für Chemische Verfahrenstechnik
Universität Stuttgart

Förderkennzeichen 395005

Die Arbeiten des Programms Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur
Luftreinhaltung wurden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg gefördert

Juli 1998

Kurzfassung

Die sichere und vollständige Beseitigung lungengängiger oxidierbarer Aerosole stellt in vielen technischen Prozessen ein noch weitgehend ungelöstes Problem dar. Dabei ist das Spektrum der in Frage kommenden Aerosole sehr vielfältig. Es reicht von rußförmigen Emissionen aus Verbrennungsmotoren, Holzfeuerungen, sowie Röst- und Räucherprozessen über lungengängige Feinststäube in der Holz-, Textil-, Kunststoff-, und Lebensmittelverarbeitung bis zu Bioaerosolen unterschiedlichster Art und Herkunft (Aerosole aus biologischen Abwasserreinigungsanlagen sowie Krankheitskeime, Blütenpollen und anderen Allergenen in Krankenhäusern und Reinraumbereichen).

In diesem Projekt wurde die vollständige Oxidation dieser Aerosole zu CO_2 , Wasser und anorganischen Reststoffen untersucht. Die Oxidation erfolgte im Gegenstromreaktor, einem neuen Reaktorkonzept mit integriertem Wärmerücktausch. Dem Wärmerücktausch kommt dabei eine große Bedeutung zu, da Aerosole aus den genannten Prozessen meist nur eine geringe Schadstoffkonzentration aufweisen und in der Regel bei niedrigen Temperaturen anfallen. Große Luftströme müssen daher auf die notwendige Reaktionstemperatur aufgeheizt werden, wobei die bei der Oxidation freigesetzte Reaktionswärme gering ist. Daher muß ein sehr effizienter Wärmetausch zwischen eintretender und austretender Luft gewährleistet werden. Zu diesem Zweck wurde der Gegenstromreaktor entwickelt und optimiert, der sich durch eine hohe Wärmeintegration auszeichnet [1].

Bei diesem Reaktor strömen Abluft und gereinigte Abluft abwechselnd in benachbarten Kanälen. Die Kanäle wurden mit Einbauten versehen um einen hohen Wärmeübergang zu erzielen. Hierzu wurden verschiedene Strukturen entwickelt und für diese Strukturen der örtliche Wärmeübergang bestimmt und optimiert. Durch die Verwendung geeigneter Strukturen läßt sich die Apparategröße gegenüber der Verwendung von ebenen Spalten um den Faktor 12 reduzieren. Zur Auslegung und zur Simulation des Betriebsverhaltens wurde ein Modell des Reaktors erstellt. In Simulationsrechnungen wurde das Betriebsverhalten des Reaktors für unterschiedliche Bedingungen ermittelt. Zur Untersuchung der katalytischen und thermischen Oxidation von Aerosolen wurden Gegenstromreaktoren mit unterschiedlichen Spaltgeometrien entwickelt und aufgebaut. Das Umsatzverhalten der entwickelten Gegenstromreaktoren wurde anhand von unterschiedlichen Aerosolen untersucht. Als Modellaerosole wurden Räucheraerosole, Aerosole aus Holz-Feinststäuben und ein Bioaerosol aus Hefen für die Oxidationsversuche verwendet. Zur Erzeugung der Modellaerosole wurden unterschiedliche Aerosolgeneratoren ausgelegt und aufgebaut. Das Umsatzverhalten dieser Aerosole bei der Oxidation im Gegenstromreaktor wurde für unterschiedliche Betriebsbedingungen untersucht.

Die Untersuchungen belegen, daß organische Aerosole im Gegenstromreaktor praktisch vollständig umgesetzt werden können. Dies gilt sowohl für die untersuchten Aerosole aus Holz-Feinststäuben als auch für die untersuchten Räucheraerosole. Dabei werden sowohl die enthaltenen Rauchpartikel als auch die in den Räucheraerosolen enthaltenen Kohlenwasserstoffe praktisch vollständig umgesetzt. Auch die in den Räucheraerosolen enthaltenen Geruchsstoffe werden im Gegenstromreaktor zu über 99% umgesetzt. Als Beispiel für die Entfernung von Bioaerosolen aus der Abluft wurde die Inaktivierung eines Hefe-Aerosols untersucht. Die Versuche zeigen, daß auch bei kurzen Verweilzeiten im Kopfbereich des Reaktors

eine trockene Sterilisierung von Luftströmen möglich ist. Der besondere Vorteil des Gegenstromreaktors liegt dabei in dem hohen Wärmerücktausch. Damit ist eine Inaktivierung bei geringem Energieaufwand möglich.

Summary

Exhaust air streams coming from technical processes can contain breathable oxidizable aerosols. The reliable entire removal of those aerosols often still represents a far-reaching unsolved problem. The possible aerosols vary in a wide spectrum. Examples are sootable emissions from combustion engines, wood stoves, roast- and smoke processes and breathable dusts from wood-, textile-, plastic-, and food-processing plants and bioaerosols of various nature and origin (aerosols from biological sewage cleaning plants as well as germs of diseases, pollen and other allergic aerosols especially in hospitals and clean room areas.) In this project the total oxidation of these aerosols to CO_2 , water and anorganic residue substances has been investigated.

The heat integration when oxidizing aerosols is very important because of aerosols released from processes above show only little concentration of pollutants and come up usually at low temperatures. Big air streams must be heated up to a reaction temperature while the amount of the reaction heat released by the oxidation of the particle is small. For that purpose a counter flow reactor for oxidizing aerosols has been developed and optimized, which is distinguished by a high heat integration [1]. The significance of this concept is the internal heat exchange between the entering and the escaping air.

In the reactor exhaust air and purified air flow alternating in neighbouring channels. The channels are provided with corrugated structures to attain a high rate of heat transfer.

For this several structures were developed and the local heat transfer coefficients were determined and optimized for them. Through the use of suitable structures it is possible to reduce the size of the apparatus by a factor of 12 in comparison with deploying only flat channels. For the design of the reactor a simulation of the operating behaviour by a mathematical model of the reactor was prepared. In various calculations the operating behaviour was determined. For examination of the catalytic and the thermic oxidation of aerosols several counter flow reactors with different geometries of the channels were developed and constructed. Experiments were performed for the developed counter flow reactors oxidizing various types of aerosols. Types of aerosols used were: smoke aerosols, aerosols of wooden dust and a bioaerosol from yeast. For the generation of these aerosole models several aerosol generators were developed and constructed. The conversion behaviour of these aerosols in a counterflow reactor had been examined under several working conditions. The examinations verify that organic aerosols in a counter flow reactor can be practically completely converted. This is valid for the examined aerosols from wooden dust as well as for the examined smoke aerosols. In that case the contained smoke particle as well as the volatile organic compounds in the smoke aerosols oxidize practically complete. Also odouring substances contained in the smoke aerosole can be converted by a rate higher than 99%. As an example for the removal of bioaerosols from waste air an inactivation of a yeast aerosole had been examined. The experiment proves the possibility of a dry sterilisation of air streams in a counter flow reactor. The distinct advantage of a

counter flow reactor lies in the very high rate of internal heat exchange. Because of this the inactivation is possible at low energy expenses.

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	v
FORMELZEICHEN.....	vii
1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG.....	1
2 KONZEPTE FÜR DEN GEGENSTROMREAKTOR.....	5
2.1 Keramische Monolithe	5
2.2 Reaktor mit metallischen Wänden.....	6
3 OPTIMIERUNG DER STRÖMUNGSKANÄLE.....	8
3.1 Anforderungen an die Auslegung der Strömungskanäle	8
3.2 Entwicklung neuer Strukturen zur Verbesserung des Wärmeübergangs	8
3.2.1 Wandseitiger Wärmeübergang	9
3.2.2 Strömungsverhalten	12
3.2.3 Druckverlust.....	13
3.3 Verwendete Strukturen	14
3.4 Beschichtung der Strukturen mit Katalysator	14
4 MODELLBILDUNG UND RECHNERSIMULATION.....	16
4.1 Modellierung des Gegenstromreaktors	16
4.2 Simulationsrechnungen zur Auslegung.....	17
5 AUFBAU DER GEGENSTROMREAKTOREN	20
5.1 Temperaturführung zur Reduzierung der Verschmutzungsempfindlichkeit	20
5.2 Reaktor mit großer Spaltweite.....	20
5.3 Reaktor mit kleiner Spaltweite.....	23
5.4 Reaktor mit Parallelkanälen.....	27
6 WÄRMERÜCKTAUSCH DER EINZELNEN REAKTOREN.....	31
6.1 Reaktor mit großer Spaltweite und längsgeknickten Einbauten.....	31
6.2 Reaktor mit kleiner Spaltweite und Dralleinbauten	32
6.3 Reaktor zur thermischen Oxidation.....	33
6.4 Reaktor mit Parallelkanälen.....	33
6.5 Energetische Betrachtung.....	34
7 AUFBAU DER VERSUCHSANLAGE	37
7.1 Anlagenkomponenten	37
7.2 Durchsatz- und Temperaturmessung	39
7.3 Sicherheitstechnik	40

8 PRÜFAEROSOLE.....	42
8.1 Eigenschaften von Aerosolen.....	42
8.2 Räucheraerosole.....	43
8.3 Aerosole aus Feinstäuben.....	44
8.3.1 Feinstäube.....	48
8.3.2 Meßtechnik bei Räucheraerosolen und Feinstäuben.....	49
8.4 Bioaerosole.....	52
8.4.1 Meßtechnik bei Bioaerosolen.....	52
9 VERSUCHSERGEBNISSE ZU RÄUCHERAEROSOLEN.....	54
9.1 Partikelumsätze der Räucheraerosole.....	54
9.2 Oxidation der enthaltenen Kohlenwasserstoffe (FID-Messungen).....	56
9.3 Oxidation der Geruchsstoffe.....	58
9.4 Ablagerungen bei Räucheraerosolen.....	59
9.5 Bewertung für Räucheraerosole.....	61
10 VERSUCHSERGEBNISSE ZU FEINSTSTÄUBEN.....	62
10.1 Ablagerungen bei Feinststäuben.....	62
10.2 Partikelumsätze der Feinststäube.....	63
10.3 Bewertung für Feinststäube.....	66
11 VERSUCHSERGEBNISSE ZU BIOAEROSOLEN.....	68
11.1 Inaktivierungsrate für Hefe.....	68
11.2 Bewertung für die Inaktivierung von Keimen.....	69
12 WIRTSCHAFTLICHE BETRACHTUNG ZUM VERFAHREN.....	70
12.1 Beispiel 1: Abluftreinigung von Räucheranlagen.....	70
12.2 Beispiel 2: Abluftreinigung in der Holzverarbeitung.....	71
13 ZUSAMMENFASSUNG.....	77
14 WEITERFÜHRENDE ARBEITEN.....	78
LITERATURVERZEICHNIS.....	70

Abbildungsverzeichnis

Diagramme und Abbildungen

Abb. 1-1: Prinzip des Gegenstromreaktors, schematischer Temperatur- und Konzentrationsverlauf	--3
Abb. 2-1: Schematischer Aufbau eines keramischen Gegenstromreaktors	-----6
Abb. 2-2: Schematischer Aufbau des Gegenstromreaktors mit metallischen Wänden	-----7
Abb. 3-1: Wendelstruktur gegensinnig	-----10
Abb. 3-2: Wendelstruktur gleichsinnig	-----10
Abb. 3-3: Längsgeknickte Struktur	-----10
Abb. 3-4: Schräggeknickte Struktur	-----10
Abb. 3-5.: Örtliche Stoffübergangsverteilung in Wendelstruktur bei gegensinniger Anordnung, $Re = 2000$, Strömung von links nach rechts	-----10
Abb. 3-6: Örtliche Stoffübergangsverteilung in Wendelstruktur bei gleichsinniger Anordnung, $Re = 2000$	-----11
Abb. 3-7: Örtliche Stoffübergangsverteilung bei geknickter Stegstruktur, $Re = 2000$	-----11
Abb. 3-8: Örtliche Stoffübergangsverteilung bei schräg, um 45° geknickter Stegstruktur, $Re = 2000$	11
Abb. 3-9: Wärmeübergang von Wendel- und Stegstrukturen mit unterschiedlichem Längsversatz λ und unterschiedlicher Stegbreite b/d_s ; Leerkanal nach [6]	-----12
Abb. 3-10: Strömungsverhalten in Wendelstruktur bei gegensinniger Anordnung ($Re=1000$)	-----12
Abb. 3-11: Strömungsverhalten in Wendelstruktur bei gleichsinniger Anordnung ($Re=2000$)	-----12
Abb. 3-12: Strömungsvorgänge in gleich- und gegensinnigen Wendeleinbauten	-----13
Abb. 3-13: Strömungsverhalten in geknickter Stegstruktur ($Re = 2000$)	-----13
Abb. 3-14: Strömungsverhalten in schräggeknickter Stegstruktur ($Re = 2000$)	-----13
Abb. 3-15: Druckverlustbeiwerte im Gegenstromreaktor bei unterschiedlichen Einbauten Stegstrukturen mit unterschiedlichem Längsversatz λ und unterschiedlicher Stegbreite b/d_s ; Leerkanal nach [6]	-----14
Abb. 3-16: Wendelstruktur mit washcoat (links) und mit gebrauchsfertiger Katalysatorbeschichtung (rechts)	-----15
Abb. 4-1: Einfluß der Baulänge auf die Grenzkonzentration für die autotherme Betriebsweise $L_{aktiv} = 150$ mm, $g_z = 1$ kg/(m ² s)	-----18
Abb. 4-2: Einfluß der Länge der aktiven Zone auf die Maximaltemperatur im Reaktor $L = 700$ mm, $g_z = 1$ kg/(m ² s), $\Delta T_{ad} = 50$ K	-----18
Abb. 5-1: Temperaturführung zur Reduzierung der Verschmutzungsempfindlichkeit	-----20
Abb. 5-2: Gegenstromreaktor 1, Ausbildung des Zuströmbereiches	-----21
Abb. 5-3: Gegenstromreaktor 1, schachtförmige Kanäle im Kopfbereich	-----21
Abb. 5-4: Gegenstromreaktor 1	-----22
Abb. 5-5: Gegenstromreaktor 2	-----24
Abb. 5-6: Gegenstromreaktor 2, gefaltete Wände und die Anordnung der Strukturen	-----25
Abb. 5-7: Gegenstromreaktor 2, Reaktorkopfes mit Kanälen für Mittenabzug und elektr. Heizung	--25
Abb. 5-8: Gegenstromreaktor 2	-----26
Abb. 5-9: Gegenstromreaktor 2, Strömungskanäle mit eingelegten Strukturen	-----26
Abb. 5-10: Gegenstromreaktor 3, gewellte Strukturen	-----28
Abb. 5-11: Gegenstromreaktor 3	-----28
Abb. 5-12: Gegenstromreaktor 3	-----29
Abb. 6-1: Temperaturprofil im Gegenstromreaktor mit großer Spaltweite, $g_z = 0,20$ kg/m ² s, elektrisch beheizt	-----31
Abb. 6-2: Temperaturprofil im Gegenstromreaktor mit großer Spaltweite, $g_z = 0,60$ kg/m ² s, elektrisch beheizt	-----31
Abb. 6-3: Temperaturprofil im Gegenstromreaktor mit kleiner Spaltweite und Dralleinbauten, $g_z = 0,35$ kg/m ² s, elektrische Stützheizung	-----32
Abb. 6-4: Temperaturprofil im Gegenstromreaktor mit kleiner Spaltweite und Dralleinbauten, $g_z = 0,86$ kg/m ² s, 620 ppm Propan und elektrische Stützheizung	-----32
Abb. 6-5: Temperaturprofil im Gegenstromreaktor zur thermischen Oxidation, $g_z = 0,5$ kg/m ² s, elektrische Stützheizung	-----33
Abb. 6-6: Temperaturprofil im Gegenstromreaktor zur thermischen Oxidation, Methanol, $g_z = 0,78$ kg/m ² s, $\Delta T_{ad} = 79$ K autotherm,	-----33

Abb. 6-7: Temperaturprofile im Gegenstromreaktor mit Parallelkanälen $g_z = 0,87 \text{ kg/m}^2\text{s}$, el. Stützeheizung. -----	34
Abb 6-8: Temperaturprofil im Gegenstromreaktor mit Parallelkanälen, $g_z = 0,87 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 600 ppm Propan, autotherm-----	34
Abb. 6-9: spezifischer Energiebedarf der aufgebauten Reaktoren: $T_{\text{kopf}} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$, $g_z = 0,6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ---	35
Abb. 7-1: Fließbild der Versuchsanlage mit Hauptluftstrom, Aerosolerzeugung, Durchflußmessung, Gegenstromreaktor, Mittenabzug und Meßeinrichtungen. -----	38
Abb. 7-2: Aufbau der Versuchsanlage mit Gegenstromreaktor 1, links: Anlagensteuerung und Planfiltermeßgerät, Bildmitte: Gegenstromreaktor mit großer Spaltweite und längsgeknickten Strukturen, rechts Meßdatenerfassung. -----	39
Abb. 8-1: Fließbild des Raucherzeugers -----	44
Abb. 8-2: Staubinjektor nach DIN ISO 5011-----	45
Abb. 8-3: Zyklon zur Klassierung der Staubfracht nach der Dispergierung -----	47
Abb. 8-4: Rückstandskurve des Zyklons am Beispiel von Jelucel HM 30-----	47
Abb. 8-5: Verfahrensfließbild des Aerosolgenerators -----	48
Abb. 8-6: Aerosolgenerator zur Dispergierung von Stäuben -----	48
Abb. 8-7: Korngrößenanalyse des Aufgabegutes Jeluxyl HAHO 120/f-----	49
Abb. 8-8: Planfiltermeßgeräte nach VDI 2066-----	50
Abb. 8-9: Meßstellen an der Versuchsanlage -----	51
Abb. 9-1: Räucheraerosol, Planfilterproben, links Rohgas, rechts Reingas.-----	54
Abb. 9-2: Räucheraerosol, Membranfilter rohgasseitig-----	55
Abb. 9-3: Räucheraerosol, Membranfilter reingasseitig-----	55
Abb. 9-4: Umsatz der Rauchpartikel $g_z = 0,20 \text{ kg/m}^2\text{s}$ -----	56
Abb. 9-5: Umsatz der Rauchpartikel $g_z = 0,37 \text{ kg/m}^2\text{s}$ -----	56
Abb. 9-6: Umsatz der Rauchpartikel $g_z = 0,60 \text{ kg/m}^2\text{s}$ -----	56
Abb. 9-7: Umsatz der Kohlenwasserstoffe, $g_z = 0,20 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $T_{\text{Kopf}}=437^\circ\text{C}$ -----	57
Abb. 9-8: Umsatz der Kohlenwasserstoffe, $g_z = 0,37 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $T_{\text{Kopf}}=437^\circ\text{C}$ -----	57
Abb. 9-9: Umsatz der Kohlenwasserstoffe $g_z = 0,20 \text{ kg/m}^2\text{s}$ -----	58
Abb. 9-10: Umsatz der Kohlenwasserstoffe $g_z = 0,37 \text{ kg/m}^2\text{s}$ -----	58
Abb. 9-11: Umsatz der Kohlenwasserstoffe $g_z = 0,60 \text{ kg/m}^2\text{s}$ -----	58
Abb. 9-12: Räucheraerosol, Abscheidung im kalten Reaktor 1-----	60
Abb. 9-13: Reinigungsschritt zur thermischen Beseitigung von Ablagerungen-----	60
Abb. 10-1: Feinststaub, Abscheidung im Reaktor -----	63
Abb. 10-2: Feinststäube, Partikel-Umsatz im Gegenstromreaktor 1, $g_z = 0,37 \text{ kg/m}^2\text{s}$ -----	64
Abb. 10-3: Feinststäube, Planfilterproben, Jeluxyl HAHO 120/f, $g_z=0,20 \text{ kg/m}^2\text{s}$, oben Probe Rohgas, unten Proben im Reingas, v. l. n. r.: $480 \text{ }^\circ\text{C}$, $590 \text{ }^\circ\text{C}$, $690 \text{ }^\circ\text{C}$, $805 \text{ }^\circ\text{C}$.-----	65
Abb. 10-4: Planfilterprobe, Jeluxyl HAHO 120/f, Rohgas-----	65
Abb. 10-5: Planfilterprobe, Jeluxyl HAHO 120/f, Reingas, $g_z = 0,37 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $T_{\text{kopf}} = 480 \text{ }^\circ\text{C}$ -----	65
Abb. 10-6: Planfilterprobe, Jeluxyl HAHO 120/f, Reingas, $g_z = 0,37 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $T_{\text{kopf}} = 590 \text{ }^\circ\text{C}$ -----	66
Abb. 10-7: Planfilterprobe, Jeluxyl HAHO 120/f, Reingas, $g_z = 0,37 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $T_{\text{kopf}} = 690 \text{ }^\circ\text{C}$ -----	66
Abb. 10-8: Planfilterprobe, Jeluxyl HAHO 120/f, Reingas, $g_z = 0,37 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $T_{\text{kopf}} = 805 \text{ }^\circ\text{C}$ -----	66
Abb. 11-1: Hefen <i>Saccharomyces cerevisiae</i> (Linienabstand $50 \mu\text{m}$) -----	69
Abb. 11-2: Thermische Inaktivierung von luftgetragenen Hefen im Gegenstromreaktor -----	69

Tabellen

Tab.1-1: Durchmesser verschiedener organischer Aerosolpartikel -----	2
Tab. 5-1: Technische Daten Gegenstromreaktor 1-----	23
Tab. 5-2: Gegenstromreaktor 2, technische Daten -----	26
Tab. 5-3: Gegenstromreaktor 3, technische Daten -----	30
Tab. 7-1: Viertelkreisdüsen zur Volumenstrommessung -----	40
Tab. 8-1: Auslegungsdaten des Zyklons zu Klassierung der Staubfracht (Beispiel: Zellulose Jelucel HM 30) -----	46
Tab. 8-2: Stoffdaten Holzmehl Jeluxyl HAHO 120/f-----	49
Tab. 9-1:olfaktrometrische Messung an Räucheraerosolen -----	59
Tab. 12-1: Beispiel 1: Abluftreinigung von Räucheranlagen-----	71
Tab 12-2: Beispiel 2: Abluftreinigung in der Holzverarbeitung-----	76

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

<i>a</i>	m^2/m^3	spezifische Oberfläche
<i>A</i>	m^2	Querschnittsfläche
<i>b</i>	m	Streifenbreite
<i>c_p</i>	$kJ/kg\ K$	Wärmekapazität
<i>d</i>	m	Durchmesser
<i>D</i>	m^2/s	Diffusionskoeffizient
<i>g_Z</i>	$kg/(m^2\ s)$	Querschnittsbelastung
<i>h</i>	m	Spaltweite
<i>k</i>	$W/m^2\ K$	Wärmedurchgangskoeffizient
<i>L</i>	m	Länge
<i>m</i>	kg/s	Massenstrom
<i>M</i>	$kg/kmol$	Molmasse
<i>n</i>	-	Anzahl der Trennwände
<i>r</i>	$kmol/s$	Reaktionsgeschwindigkeit
<i>R</i>	%	Rückstandsumme
<i>t</i>	s	Zeit
<i>T</i>	K	Temperatur
<i>V</i>	m^3/h	Volumenstrom
<i>w</i>	-	Massenanteil
<i>X</i>	%	Umsatz

Griechische Buchstaben

<i>a</i>	W/mK	Wärmeübergangskoeffizient
<i>b</i>	m/s	Stoffübergangskoeffizient
<i>D_{hr}</i>	$kJ/kmol$	Reaktionsenthalpie
<i>D_p</i>	Pa	Druckverlust
<i>D_T</i>	K	Temperaturerddifferenz
<i>e</i>	-	Hohlraumanteil
<i>l</i>	$W/(mK)$	Wärmeleitfähigkeit

\boldsymbol{n}	m^2/s	kinematische Viskosität
\boldsymbol{r}	kg/m^3	Dichte
\boldsymbol{z}	-	Druckverlustbeiwert

Indices

1	aufströmend
2	abströmend
ad	adiabat
$aktiv$	Katalytisch aktive Zone
amb	Umgebung
aus	Austritt, Reingas
ax	axial
eff	effektiv
ein	Eintritt, Rohgas
G	gas
h	hydraulisch
$inert$	Wärmeübertragungszone
P	Partikel
S	solid
s	Spalt
v	volumenbezogen
w	Wand

Kennzahlen

Nu	-	Nußelt-Zahl $(\boldsymbol{a} d_h)/\boldsymbol{l}$
Re	-	Reynolds-Zahl $(\boldsymbol{w} d_h)/\boldsymbol{n}$
Sh	-	Sherwood-Zahl $(\boldsymbol{b} d_h)/\boldsymbol{D}$

1 Einleitung und Problemstellung

Oxidierbare Aerosole sind so vielseitig, wie die Prozesse in Industrie, Handwerk und Raumlufttechnik die zu deren Entstehung führen. Einheitlich ist Ihnen die Eigenschaft der feindispersen Verteilung einer organischen, flüssigen oder festen Phase in einem Luftstrom. Aerosole fallen entweder direkt als Abluft am Entstehungsort an (Räucheranlagen, Holzverarbeitungsmaschinen), oder werden in stärkerer Verdünnung in Innenräumen zentral über eine Luftwechselanlage abgesaugt. Je nach Entstehungsort und Erscheinungsbild spricht man entweder von Rauch oder von Staub, beidemal ist eine feste Phase dispers in einem gasförmigen umgebenden Medium gelöst. Während gröbere Partikel in der Abluft ($>10\ \mu\text{m}$ im Durchmesser) durch Entstaubungsanlagen (Zyklone, Elektro- oder Schlauchfilter) wirtschaftlich beseitigt werden können, stellen kleinere Partikel, die je nach Entstehungsart bis zu wenigen 10 nm im Durchmesser groß sein können, ein weit größeres Problem bei der Entfernung aus der Abluft dar. Zur Entfernung von Partikeln aus Abluftströmen werden in der Praxis verschiedene Wirkprinzipien eingesetzt.

Bei Massen-, Trägheits- und Fliehkraftabscheider ist der Trenneffekt des Apparates bestimmt durch die Dichte und den Teilchendurchmesser der Teilchen, die abgetrennt werden sollen. Feinere und leichtere Stäube können nur schwer abgetrennt werden. Bis herab zu Partikeldurchmessern von $12\ \mu\text{m}$ werden bei der Staubabscheidung beispielsweise Zyklone eingesetzt, die besonders wirtschaftlich arbeiten. Auch bei der Naßentstaubung findet die Abscheidung der Partikel aufgrund ihrer Schwer- oder Trägheitskräfte statt. Allerdings sollen besonders die kleinen und damit leichteren Partikel an Tropfen einer Waschflüssigkeit gebunden werden, um so ihre Masse zu vergrößern und damit ihre Abscheidung zu erleichtern. Nachteil des Verfahrens ist, daß bei der Naßentstaubung das Luftverunreinigungsproblem auf das Wasser verlagert wird.

Bei Prozessen, bei denen sehr feine oder leichte Partikel ($< \text{ca. } 1\ \mu\text{m}$) in der Abluft anfallen, reichen daher Massenkraftabscheider und Naßentstauber nicht aus. Hier werden zur Zeit Elektrofilter und filternde Entstauber eingesetzt. Bei Elektrofiltern ist besonders bei kleinen Partikeln die Abscheideleistung durch die Abreinigung der Niederschlagsplatten negativ beeinflusst. Bei filternden Entstaubern müssen für einen störungsfreien Betrieb Feuchtegehalt und Temperatur des Gases innerhalb gewisser Grenzen liegen. Die siebmäßige Filterwirkung bei Gewebe- oder Vliesstoffen erfaßt dabei noch Partikel bis zu $1\ \mu\text{m}$ [2], durch Tiefenfiltration können auch noch kleinere Partikel abgetrennt werden. Die Abscheideleistung eines filternden Entstaubers wird dadurch begrenzt, daß die für die Abscheidung von kleineren Partikeln durch Tiefenfiltration vorteilhafte Ablagerungsschicht zu dick wird und wegen des zu hoch gewordenen Druckverlustes entfernt werden muß. Somit ist die sichere Abscheidung von kleinsten Partikeln nicht gewährleistet, da die Abscheideleistung bei filternden Entstauber im Dauerbetrieb durch die Notwendigkeit der periodischen Entfernung der Ablagerungsschicht schwankt.

Feinstaubanteile in Abluftströmen unter $1\ \mu\text{m}$ können zur Zeit mit bekannten industriellen Verfahren nicht sicher abgetrennt werden. Bei staub- oder rauchförmigen Emission kommt aber gerade diesem Partikelanteil wegen seiner gesundheitsgefährdenden Potentials besondere Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang

sind die Lungengängigkeit und die geringe Sinkgeschwindigkeit in der Atmosphäre von kleinen Partikelgrößen zu nennen. In der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (TA Luft) werden daher der Gesamtstaubgehalt und der Feinstaubanteil gewerblicher Anlagen begrenzt. Darin wird der Feinstaubgehalt auf Partikeldurchmesser von 5 bzw. 10 μm bezogen. Partikel die größer als 5-10 μm im Durchmesser sind, werden normalerweise durch die oberen Teile des Atmungssystem zurückgehalten, Partikel die kleiner als 5 μm sind, können tief in die Alveolen eindringen.

Ruß	10-250 nm
Tabakrauch	100-750 nm
Bakterien	0,75-25 μm
Mehlstaub	5 - 20 μm
Pollen	5 - 50 μm

Tab.1-1: Durchmesser verschiedener organischer Aerosolpartikel

Um kleinste organische Partikel aus Abluftströmen sicher zu entfernen bleibt nur die Verbrennung als Abluftreinigung. Die meisten organischen Verbindungen lassen sich bei Temperaturen von 750 - 1000 $^{\circ}\text{C}$ in der sog. thermischen Nachverbrennung (TNV) zu CO_2 und H_2O oxidieren. Das Problem besteht i.a. nur darin, daß große Luftmengen von geringen Schadstoffmengen befreit werden müssen, d.h. die Konzentrationen der organischen Stoffe in der Abluft sind so niedrig, daß sie weit unterhalb der Zündgrenzen liegen, also nicht selbständig sondern nur unter Energiezufuhr brennen. Die Betriebskosten solcher Anlagen sind also vor allem durch den Verbrauch an Zusatzbrennstoff und den Energiebedarf für die Gasförderung gekennzeichnet. Die katalytische Nachverbrennung (KNV) ist durch den Einsatz von Edelmetall-Katalysatoren (Pt, Pd) in der Lage, das Temperaturniveau zu senken und somit den Energiebedarf zu verringern. Beiden Verfahren werden in der Regel rekuperative oder regenerative Wärmeübertrager vorgeschaltet, um die Wärme des Reingases für die Vorwärmung des Rohgases zu nutzen. Unter gewissen Umständen lassen sich so die Verfahren autotherm, d.h. ohne Zufuhr von Fremdenergie betreiben.

Eine Weiterentwicklung dieser beiden Verfahren stellt die thermische oder katalytische Abluftreinigung im Gegenstromreaktor dar. In diesem Apparat sind rekuperativer Wärmeübertrager, Brennkammer und bei der katalytischen Abluftreinigung der Katalysator in einer Einheit zusammengefaßt. Umgesetzt kann dieses Apparatekonzept werden, indem man einen monolithischen Aufbau wählt, in dem die einzelnen Kanäle wechselweise im Gegenstrom durchströmt werden, oder in einer Plattenbauweise, in der Schächte an Stelle der Kanäle im Monolith treten. Diese trennen in geeigneter Weise die unterschiedlichen Gaswege voneinander und gewährleisten gleichzeitig die Wärmeübertragung. Das Betriebsverhalten des Gegenstromreaktors ähnelt dabei dem einer thermischen Nachverbrennung mit periodischer Strömungsumkehr, ohne dessen Nachteile wie bewegte Teile oder Totvolumina zu besitzen. Als Grundlage zur Beschreibung des Betriebsverhaltens eines Gegenstromreaktors können die bekannte Modellierung des periodisch betriebenen Reaktors herangezogen werden [3].

Der Wärmeübergang in den benachbarten Kanälen des Gegenstromreaktors zwischen der gereinigten und der ungereinigten Abluft bestimmt dabei die erforderliche treibende Temperaturdifferenz zwischen den beiden Strömen und damit

die erforderliche Zusatzenergie. Ein autothermer Betrieb kann mit diesem Reaktor-konzept bei bereits kleineren Abluftkonzentrationen als bei herkömmlichen TNV oder KNV-Verfahren erreicht und aufrechterhalten werden. Bei geeigneter Auslegung des Apparates kann eine adiabate Temperaturerhöhung von 25°C als treibende Temperaturdifferenz für einen autothermen Betrieb ausreichen.

Für die Verbrennung der Schadstoffe muß das Rohgas auf mindestens 500°C vorgewärmt werden. Diese Aufgabe übernimmt im Gegenstromreaktor das abströmende Reingas, so der Zusatzenergiebedarf durch den Wärmerücktausch des Reaktors festgelegt ist. Hohe Wärmeübergangskoeffizienten sind daher eine Voraussetzung für eine besonders wirtschaftliche Reinigung niedrig belasteter Aerosol-Abluftströme. Zur Erzielung hoher Wärmeübergangskoeffizienten müssen die einzelnen Kanäle mit Einbauten ausgestattet werden, die einen hohen Wärmeübergang zwischen durchströmender Luft und Kanalwänden bewirken. Dieses läßt sich mit einem neu entwickelten Reaktorkonzept durch Kopplung von Reaktion und rekuperativem Wärmetausch realisieren.

Schwankende Abluftkonzentrationen beim technischen Einsatz erfordern einen breiten Betriebsbereich des Reaktors sowohl bei kleinen als auch bei großen Aerosolkonzentrationen in der Abluft. Wie in Kapitel 5 gezeigt wird, kann ein besonders breiter Betriebsbereich erreicht werden, wenn sich die Reaktionszone im Reaktor frei verschieben kann. Dies erfordert auch im katalytisch aktiven Bereich (entsprechend der Reaktionszone bei der thermischen Nachverbrennung) einen hohen Wärmeübergang zwischen Luft und Kanalwänden.

Abb. 1-1 zeigt schematisch den Aufbau des Gegenstromreaktors sowie den, im Sonderfall des autothermen Betriebes, resultierenden Temperatur- und Schadstoffkonzentrationsverlauf.

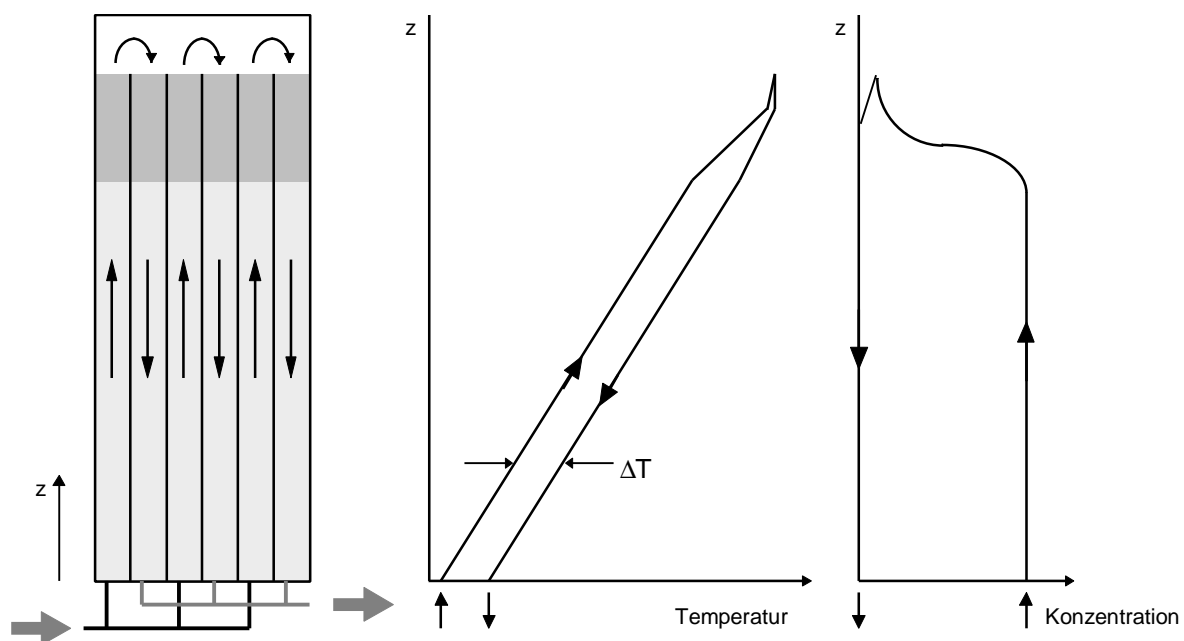


Abb. 1-1: Prinzip des Gegenstromreaktors, schematischer Temperatur- und Konzentrationsverlauf

Die zu reinigende Abluft strömt durch die eine Hälfte der Kanäle nach oben und wird dabei von der gereinigten Abluft bis auf Reaktionstemperatur erhitzt. Bei der katalytischen Abluftreinigung werden im folgenden katalytisch aktiven Bereich die

enthaltenen Stoffe oxidiert. Die freigesetzte Reaktionswärme bewirkt eine geringe weitere Temperaturerhöhung. Die gereinigte Abluft strömt nun durch die zweite Hälfte der Kanäle wieder nach unten und gibt dabei ihre Wärme ab.

2 Konzepte für den Gegenstromreaktor

Wie in Kapitel 1 dargestellt, läßt sich der Aufbau eines Gegenstromreaktors hauptsächlich in 3 Funktionseinheiten unterteilen. Es sind dies zum einen die Ein- und Auslaufbereiche, in denen die zu reinigende Abluft zur Vergrößerung der wärmeübertragenden Fläche in mehrere Strömungskanäle aufgeteilt wird. Beim zweiten Teil handelt es sich um eine reine Wärmeübertragungszone (sog. inerte Zone), in der die einströmende Abluft auf Reaktionstemperatur aufgeheizt werden muß. Und schließlich einen Reaktionsbereich im Kopf des Reaktors (aktive Zone), in dem die Schadstoffe umgesetzt werden. In diesem Bereich herrscht die höchste Temperatur des Reaktors, hier sind Anfahrheizung und Umlenkzone integriert. Für den einen funktionellen Aufbau eines Gegenstromreaktors sind 2 verschiedene Konzepte möglich. Das erste besteht aus modifizierten keramischen Wabenkatalysatorstrukturen. Das zweite Konzept besitzt metallische Wände mit dazwischen angeordneten Strukturen zur Erhöhung des Wärmeübergangs.

2.1 Keramische Monolithe

Der Grundkörper der keramischen Monolithe besteht aus extrudierten Wabenkörpern, wie sie als Katalysatorträger breite Anwendung finden. Für die hier vorgesehene Anwendung müssen die Wabenstrukturen an mehreren Stellen modifiziert werden. Der Aufbau ist in Abb. 2-1 schematisch dargestellt. Zunächst muß jede zweite Kanalreihe mit seitlichen Eintrittsöffnungen versehen werden. In diesen Reihen werden die unteren Kanalöffnungen verschlossen. Die dazwischenliegenden Kanalreihen behalten ihre ursprünglichen Öffnungen. Am entgegengesetzten Ende des Wabenkörpers erhält der Wabenkörper eine abdichtende Haube. In dem darunter entstehenden Zwischenraum erfolgt die Strömungsumlenkung.

Da die Kanalwände der kommerziell erhältlichen Wabenformkörper nicht gasdicht sind, müssen sie durch einen Tauchvorgang in verdünnter keramischer Vergußmasse abgedichtet werden. Im oberen Bereich werden die Formkörper katalytisch beschichtet. Auf diese Weise läßt sich ein Gegenstromreaktor aus verfügbaren keramischen Formkörpern herstellen. In den so modifizierten Monolithen entsteht nun folgende Durchströmung: Durch die ersten Kanäle tritt das Rohgas in den Reaktor ein, wird auf dem Weg zum Reaktorkopf erwärmt, reagiert in der katalytisch aktiven Zone, wird im Kopfbereich umgelenkt und strömt durch die benachbarten Kanäle wieder zurück und gibt dabei seine Wärme an die benachbarten Kanäle ab. Für die gleichzeitige Behandlung von zwei unterschiedlichen Gasströmen wurde ein ähnliches Konzept in [4] beschrieben.

Die Vorteile des keramischen Materials bestehen in seinem inerten Verhalten auch bei hohen Temperaturen und seiner guten Beschichtbarkeit. Bei den zahlreichen Versuchen mit diesen Wabenformkörpern stellte sich jedoch folgendes Problem dar. Infolge der großen Temperaturgradienten entlang der Wabenformkörper zwischen kaltem Ein- und Austritt auf der einen Seite und den hohen Oxidationstemperaturen im Reaktorkopf auf der anderen Seite und aufgrund der Temperaturschwankungen im Betrieb, bildeten sich nach einer gewissen Betriebszeit durch den Temperaturverlauf im Reaktor hervorgerufene Spannungsrisse in den

verwendeten Formkörpern. Die Wabenformkörper werden damit unbrauchbar. Versuche mit unterschiedlichen kommerziell verfügbaren Corderit-Wabenformkörpern endeten bei dem gleichen Problem. Für das hier angestrebte Konzept weisen die derzeit verwendeten Materialien eine zu geringe Temperaturwechselbeständigkeit auf.

Aufgrund dieser Probleme wurde dieses Konzept nicht weiter verfolgt. Statt dessen wurde das im folgenden beschriebene Gegenstromreaktor-konzept mit metallischen Wänden untersucht.

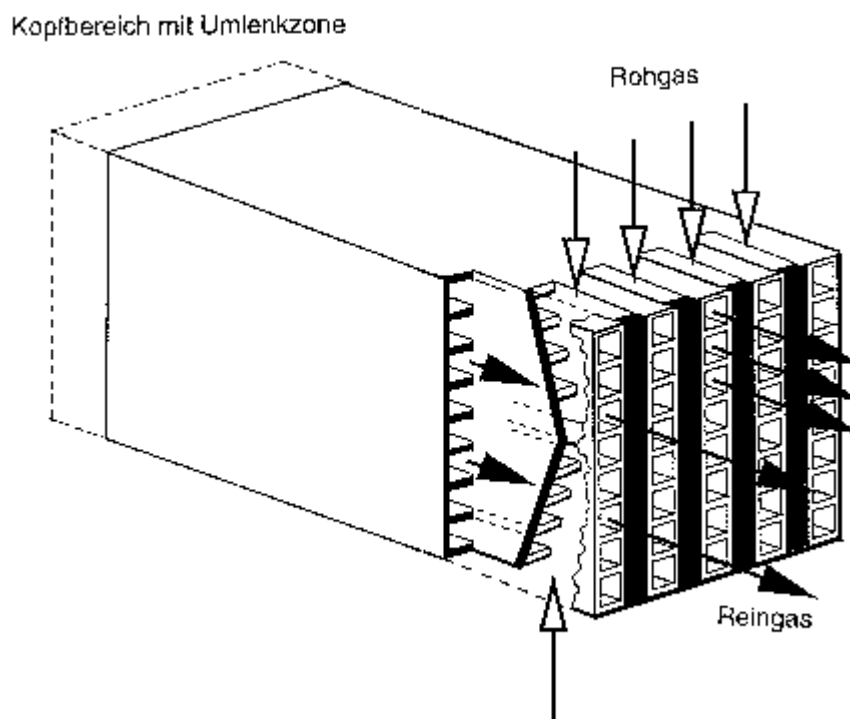


Abb. 2-1: Schematischer Aufbau eines keramischen Gegenstromreaktors

2.2 Reaktor mit metallischen Wänden

Der hier entwickelte Gegenstromreaktor besteht aus ebenen, parallelen Strömungskanälen, die im Gegenstrom durchströmt werden. Die Trennwände bestehen aus einem temperaturbeständigen dünnen Blech. Als Abstandshalter zwischen den Blechen sowie zur Verbesserung des Wärmeübergangs werden in die Kanäle Strukturen eingelegt. In Abb. 2-2 ist ein schematischer Aufbau des Gegenstromreaktors mit metallischen Wänden gezeigt, im unteren Bereich befindet sich der Zu- und Abströmbereich, am oberen Ende der Kanäle wird der Kopf des Reaktors, mit Strömungsumlenkung und Stützheizung montiert. Im oberen Bereich des Reaktors sind die Strukturen mit einem Katalysator beschichtet. Hinsichtlich Anströmung der einzelnen Kanäle und Ausbildung der Reaktorwände wurden unterschiedliche Reaktorvarianten entwickelt. Der jeweilige spezielle Aufbau ist in Kapitel 5 beschrieben. Die Wärmeübertragung erfolgt durch metallische Wände zwischen dem strömenden Reingas und Rohgas. Gegenüber dem vorausgehend beschriebenen

keramischen Aufbau bieten die metallischen Wände den zusätzlichen Vorteil der besseren Wärmeleitfähigkeit.

Zur Erzielung einer gleichmäßigen Strömungsverteilung in den einzelnen Spalten werden die Strukturen erst oberhalb des Einströmbereichs eingelegt. Für die Einbaustrukturen wurden neue geometrische Formen entwickelt, die sich durch einen hohen Wärmeübergang auszeichnen. Ergebnisse hierzu werden in Kapitel 6 erörtert. Im oberen Bereich des Reaktors münden die Kanäle in den Kopfbereich. Dort wird die Strömung umgelenkt und die Rückströmung erfolgt durch die jeweils benachbarten Kanäle. In den Reaktorkopf wird eine elektrische Heizung integriert, mit welcher der obere Bereich des Gegenstromreaktors zu Beginn auf die erforderliche Betriebstemperatur aufgeheizt wird.

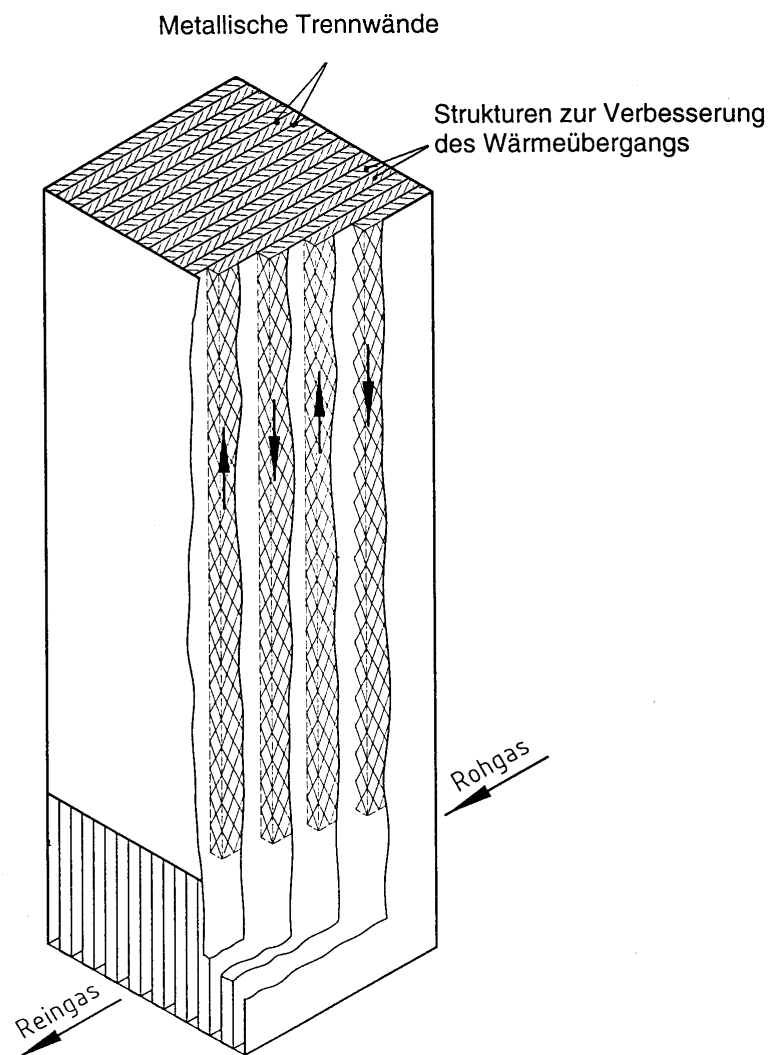


Abb. 2-2: Schematischer Aufbau des Gegenstromreaktors mit metallischen Wänden

3 Optimierung der Strömungskanäle

3.1 Anforderungen an die Auslegung der Strömungskanäle

Der Wärmeübergang zwischen der gereinigten und der ungereinigten Abluft in den jeweils benachbarten Kanälen bestimmt die erforderliche treibende Temperaturdifferenz zwischen den beiden Strömen. Hohe Wärmeübergangskoeffizienten ermöglichen einen Betrieb bei einem kleinen treibenden Temperaturgefälle und somit mit einem geringem Einsatz von Zusatzenergie beim Betrieb des Reaktors zur Abluftreinigung. Hohe Wärmeübergangskoeffizienten sind daher eine Voraussetzung für die Reinigung niedrig beladener Aerosol-Abluftströme. Zur Erzielung hoher Wärmeübergangskoeffizienten müssen die einzelnen Kanäle mit Einbauten ausgestattet werden, die einen hohen Wärmeübergang zwischen durchströmender Luft und Kanalwänden bewirken.

Wie in Kapitel 4 gezeigt wird, kann ein besonders breiter Betriebsbereich des Gegenstromreaktors erreicht werden, wenn sich bei schwankenden Schadstoffkonzentrationen und Zusammensetzungen der Abluft die Reaktionszone im Reaktor frei verschieben kann. Dies erfordert auch im katalytisch aktiven Bereich einen hohen Wärmeübergang zwischen Luft und Kanalwänden. Folglich müssen für diesen aktiven Bereich Strukturen entwickelt werden, die zum einen eine ausreichend große katalytische Oberfläche aufweisen und die zudem zu hohen Wärmeübergangskoeffizienten an die Kanalwand führen.

3.2 Entwicklung neuer Strukturen zur Verbesserung des Wärmeübergangs

Die notwendige katalytische Aktivität der Einbauten legt auf den ersten Blick den Einsatz von Schüttkörpern oder Wabenmonolithen als Einbauten in die Kanäle nahe. Wabenmonolithe besitzen für den Einsatz im Gegenstromreaktor den Nachteil, daß die parallele Anordnung der Kanäle den konvektiven Wärmetransport quer zur Strömungsrichtung verhindert [5]. In Voruntersuchungen wurden unterschiedliche Schüttkörper untersucht [6]. Die verwendeten schmalen Spalte einerseits und die erforderliche große aktive Oberfläche andererseits bedingen kleine Schüttkörper. Untersuchungen an einer Technikumsanlage belegen, daß der Einsatz von Schüttgütern unter den vorliegenden Bedingungen zu einem unverhältnismäßig hohen Druckverlust führt (über 150 mbar bei einem Volumenstrom von 60 m³/h). Für die praktische Anwendbarkeit des Reaktorkonzeptes scheidet daher deren Verwendung aus.

Statt dessen wurden Strukturen mit einem reproduzierbaren, geordneten Aufbau entwickelt, die zu einem definierten Strömungsverhalten führen. Dabei lassen sich zwei grundsätzliche Arten geordneter Strukturen konzipieren, die einen ausgeprägten Austausch zwischen dem Kern der Strömung und den Wänden der Kanäle bewirken. Dies sind zum einen verdrehte, wendelförmige Strukturen, die durch erzwungene Rotation vieler Teilströme einen hohen Wärmetransport zur Wand erzeugen. Benachbarte Wendeln können dabei in gleicher (Abb. 3-2) oder gegensinniger Orientierung (Abb. 3-1) angeordnet werden. Die zweite Bauform geordneter Strukturen besteht aus nebeneinanderliegenden, in Längsrichtung geknickten Stegen (Abb. 3-3). Deren Anordnung schräg zur Strömungsrichtung bewirkt

ebenfalls einen ausgeprägten Transport zwischen dem Kern der Strömung und der Kanalwand.

3.2.1 Wandseitiger Wärmeübergang

Zur Bestimmung der wandseitigen Wärmeübergangskoeffizienten wird die Ammoniak-Methode [7], eine Meßmethode konvektiver Stoffübertragung, verwendet. Dabei werden die zu untersuchenden Flächen mit einem feuchten Träger beschichtet, welcher die erste Reaktionskomponente enthält. Der durchströmenden Luft wird die zweite Reaktionskomponente (Ammoniak) impulsförmig zudosiert. Diese gasförmige Komponente reagiert mit der Komponente im feuchten Träger zu einem farbigen Produkt. Die auf der Oberfläche entstehende örtliche Farbintensitätsverteilung ist dabei ein Maß für die örtlich übergegangene Stoffmenge. Zur Quantifizierung wird die Helligkeitsverteilung der Probe remissionsfotometrisch gemessen [8]. Unter Bilanzierung der örtlichen Konzentration lassen sich daraus die örtlichen Stoffübergangskoeffizienten bestimmen. Über die Analogie der Wärme- und Stoffübertragung lassen sich daraus örtliche Wärmeübergangskoeffizienten berechnen.

Abb. 3-5 zeigt die durch den Einsatz von Wendelstrukturen (Abb. 3-1) in gegenseitiger Anordnung erhaltene Stoffübergangsverteilung an den Trennwänden des Gegenstromreaktors. Die Berührungsflächen der Wendeln an der Kanalwand sind als weiße Flächen erkennbar. Charakteristisch für diese Struktur sind Streifen mit hohem örtlichen Stoffübergang, erkennbar an der dunklen Färbung der Proben. Dazwischen liegende Zonen weisen einen geringeren Stoffübergang auf. Die Ursache dafür liegt in der gegenläufigen Rotation der Strömung. Die in Abb. 3-2 gezeigte gleichsinnige Anordnung der Wendelstrukturen führt zu einer deutlich gleichmäßigeren Verteilung des örtlichen Wärme- bzw. Stoffübergangs (Abb. 3-6). Die Mittelwerte des örtlichen Wärmeübergangs sind in Abb. 3-9 dargestellt. Beide Anordnungen zeigen nahezu den gleichen mittleren Wärme- bzw. Stoffübergang. Gegenüber dem Leerkanal läßt sich durch den Einsatz von Wendelstrukturen der Wärmeübergang z.B. bei $Re = 2000$ um nahezu den Faktor 3 steigern. Beim Leerkanal ist der Wärmeübergang aufgrund der laminaren Strömung konstant. Demgegenüber nimmt bei Wendelstrukturen der Wärmeübergang mit zunehmender Re-Zahl zu. Durch die permanente Strömungsumlenkung beginnt der Übergang zu turbulenter Strömung bereits bei kleinen Re-Zahlen.

Abb. 3-7 zeigt die örtliche Stoffübergangsverteilung bei einer geknickten Stegstruktur. Die weißen Flächen zeigen wiederum die Auflage der Stege an der Kanalwand. Die Ausrichtung der Stege (Abb. 3-3) bewirkt einen hohen und gleichmäßigen Wärme-/ Stoffübergang. Lediglich auf der Rückseite der Stege entstehen Ablösegebiete mit geringerem Wärme-/ Stoffübergang. Weitere, hier nicht gezeigte Versuche belegen, wie diese Ablösegebiete durch Wahl der Stegbreite und des Anstellwinkels verringert werden können. Abb. 3-9 macht deutlich, daß sich mit diesen Strukturen sehr hohe Wärmeübergangskoeffizienten erreichen lassen. Bei einer Re-Zahl von 2000 läßt sich die Nußelt-Zahl gegenüber dem Leerkanal um den Faktor 8 steigern. Aufgrund des unterschiedlichen hydraulischen Durchmessers bei gleicher Spalthöhe (infolge der unterschiedlichen benetzten Oberfläche) ergibt sich eine Steigerung des Wärmeübergangs gegenüber dem Leerkanal um den Faktor 12. Wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, liegt der Nachteil von längsgeknickten Strukturen in ihrem hohen Druckverlust. Aus diesem Grund wurden Strukturen entwickelt die ausgehend von der Forderung eines hohen Wärmeüberganges, noch

einen akzeptablen Druckverlust verursachen. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist in Abb. 3-4 zu sehen. Diese Strukturen vermeiden durch eine schräge Knickung Ablösegebiete (Abb. 3-8) und erzeugen damit einen gleichmäßigeren Wärmeübergang, dessen mittlerer Wert jedoch etwas unter dem der längsgeknickten Einbauten liegt.

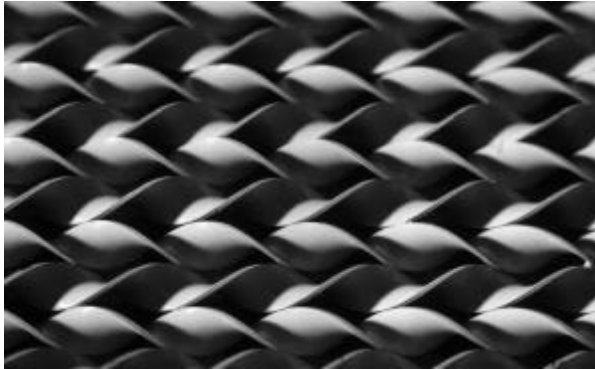


Abb. 3-1: Wendelstruktur gegensinnig

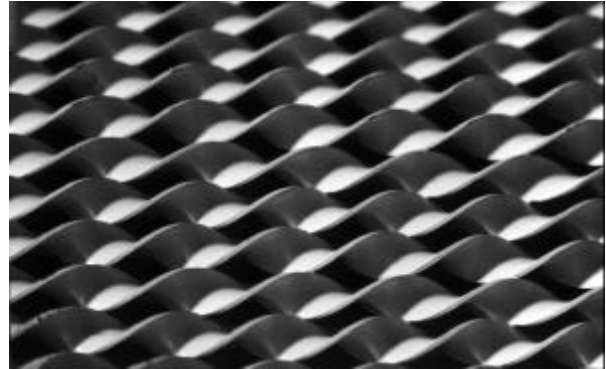


Abb. 3-2: Wendelstruktur gleichsinnig

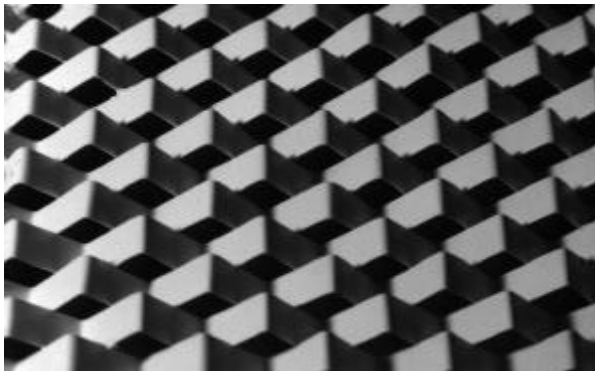


Abb. 3-3: Längsgeknickte Struktur

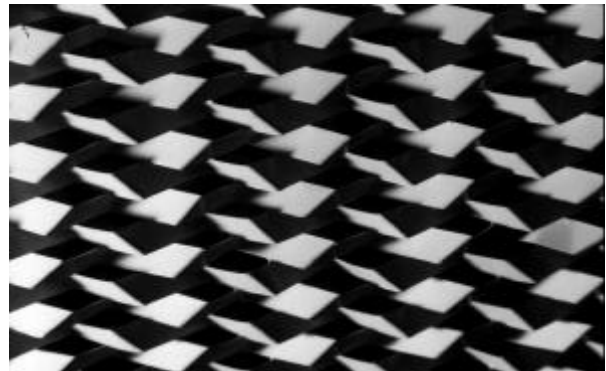


Abb. 3-4: Schräggeknickte Struktur

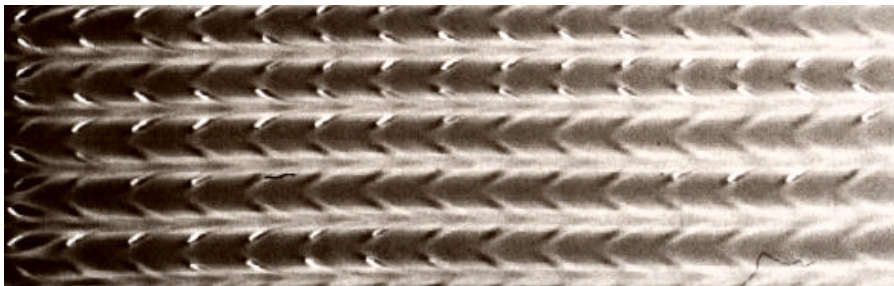
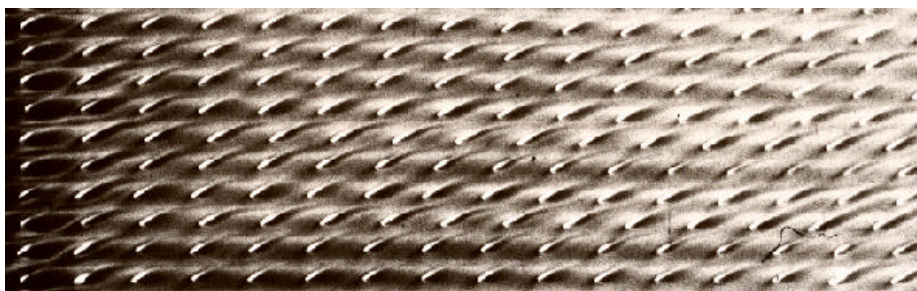
Abb. 3-5.: Örtliche Stoffübergangsverteilung in Wendelstruktur bei gegensinniger Anordnung, $Re = 2000$, Strömung von links nach rechts

Abb. 3-6: Örtliche Stoffübergangsverteilung in Wendelstruktur bei gleichsinniger Anordnung, $Re = 2000$

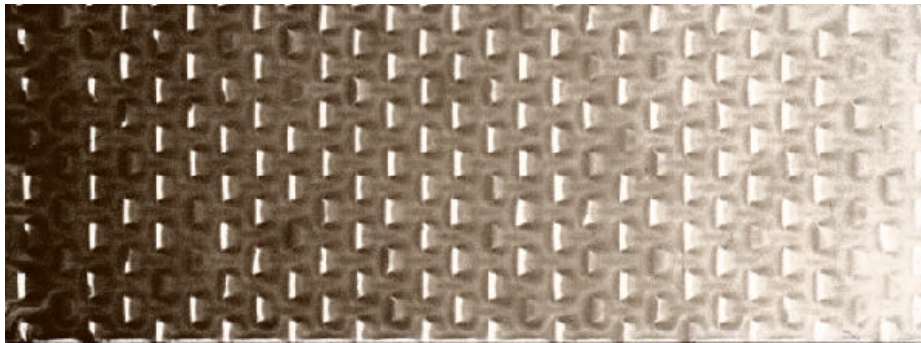


Abb. 3-7: Örtliche Stoffübergangsverteilung bei geknickter Stegstruktur, $Re = 2000$

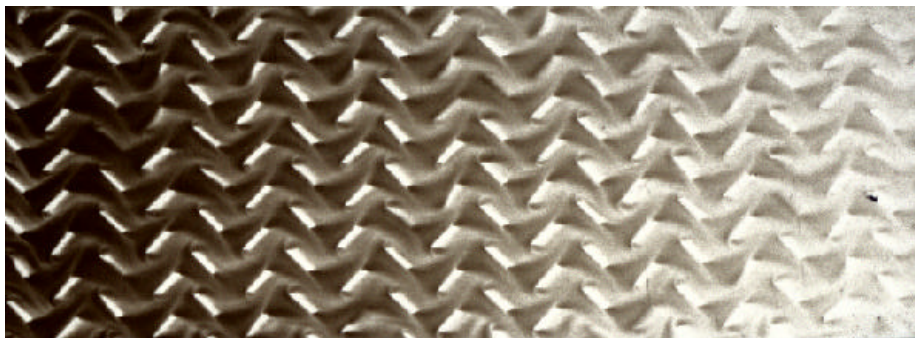


Abb. 3-8: Örtliche Stoffübergangsverteilung bei schräg, um 45° geknickter Stegstruktur, $Re = 2000$

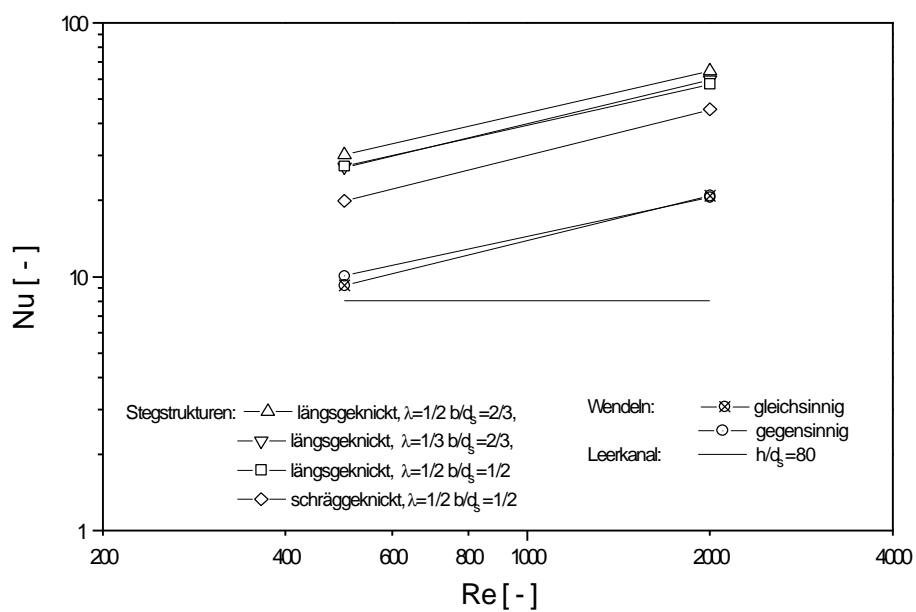


Abb. 3-9: Wärmeübergang von Wendel- und Stegstrukturen mit unterschiedlichem Längsversatz λ und unterschiedlicher Stegbreite b/d_s ; Leerkanal nach [6]

3.2.2 Strömungsverhalten

Für die gleichmäßige Erwärmung der Abluft ist ein ausgeprägtes Mischverhalten der Strömung im Spalt anzustreben. Das Strömungsverhalten wurde in einem transparenten Wasserkanal sichtbar gemacht. Dazu wurde die Strömung punktförmig mit Tinte markiert.

Abb. 3-10 zeigt die Strömung in der Wendelstruktur mit gegensinnigen Wendeln. Da sich bei dieser Struktur jeweils paarweise rotierende Teilströme ausbilden, ist das Mischverhalten der Strömung in diesen Strukturen stark eingeschränkt. Demgegenüber zeigt die Anordnung mit gleichsinniger Orientierung der Wendeln ein sehr ausgeprägtes Mischverhalten Abb. 3-11 Die Ursache hierfür liegt in der gleichen Drehrichtung der Teilströme. Dadurch erfolgt zum einen ein Impulsaustausch durch die gegenläufige Strömungsrichtung in der Mittelebene, zum anderen werden in Wandnähe Sekundärströmungen mit einer Komponente quer zur Strömungsrichtung induziert (Abb. 3-12). Beide Vorgänge tragen zum Mischverhalten der Strömung in diesen Kanälen bei.

Geknickte Stegstrukturen führen ebenfalls zu einem Mischverhalten im Spalt. Wegen der fehlenden Querkomponenten der Strömung erfolgt die Vermischung hierbei jedoch nicht in gleichem Maße über die ganze Strukturbreite. (Abb. 3-13, Abb. 3-14).

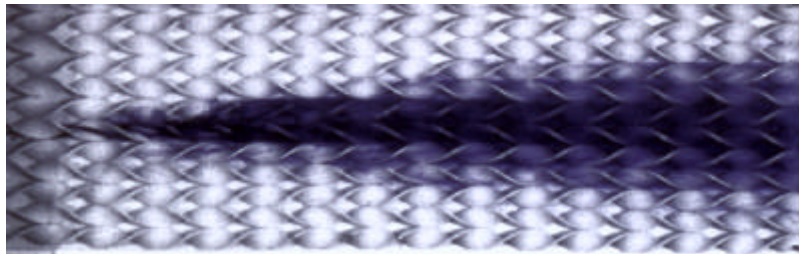


Abb. 3-10: Strömungsverhalten in Wendelstruktur bei gegensinniger Anordnung (Re=1000)

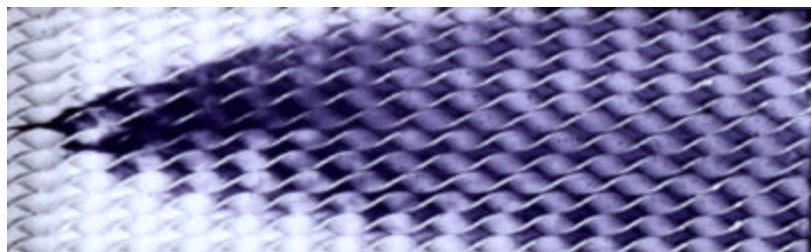


Abb. 3-11: Strömungsverhalten in Wendelstruktur bei gleichsinniger Anordnung (Re=2000)

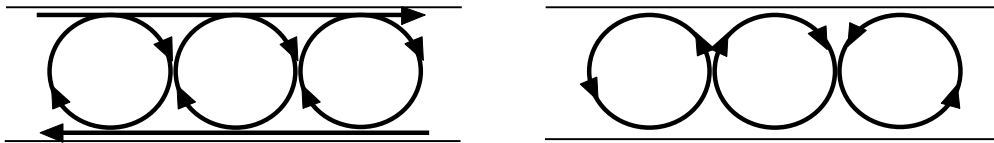


Abb. 3-12: Strömungsvorgänge in gleich- und gegensinnigen Wendeleinbauten

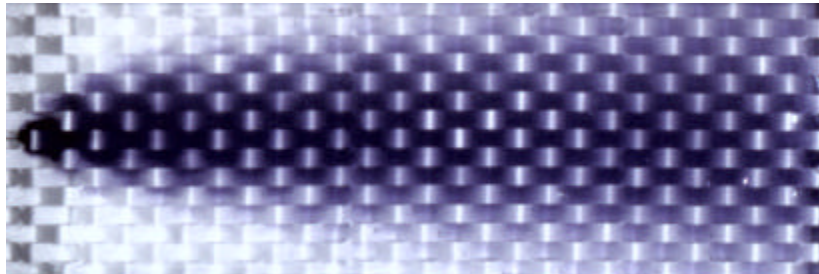


Abb. 3-13: Strömungsverhalten in geknickter Stegstruktur ($Re = 2000$)

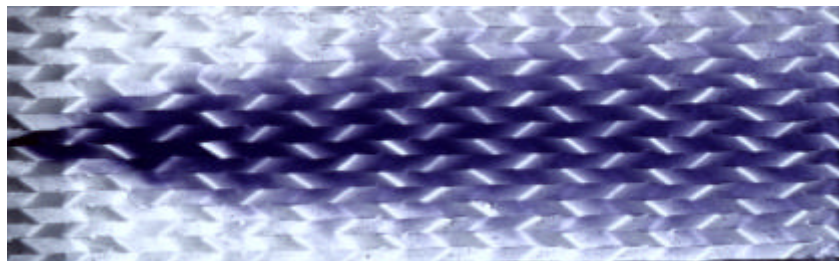


Abb. 3-14: Strömungsverhalten in schräg geknickter Stegstruktur ($Re = 2000$)

3.2.3 Druckverlust

Der Druckverlust der Einbauten stellt besonders bei großen Abluftströmen ein wesentliches Kriterium dar. Abb. 3-15 zeigt Meßwerte zum Druckverlust eines Teiles der untersuchten Strukturen. Beide Wendelstrukturen verursachen eine moderate Erhöhung des Druckverlusts gegenüber dem Leerkanal. Die geknickten Stegstrukturen weisen bei größeren Re -Zahlen gegenüber dem Leerkanal eine Erhöhung des Druckverlusts um über zwei Größenordnungen auf. Ein sinnvoller Kompromiß zwischen hohem Wärmeübergang und moderatem Druckverlust stellen die schräg geknickten Strukturen dar. Die Druckverlustbeiwerte dieser geordneten Strukturen liegen zwischen den Wendeln und den längs geknickten Strukturen.

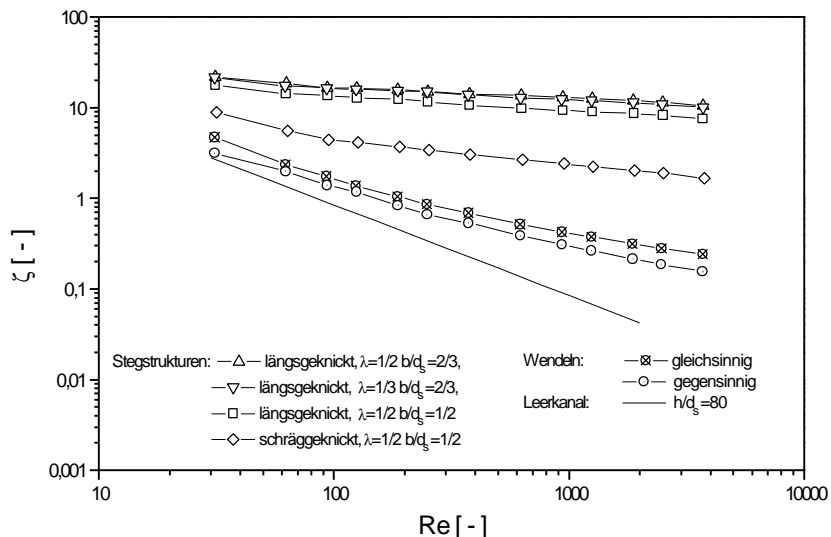


Abb. 3-15: Druckverlustbeiwerte im Gegenstromreaktor bei unterschiedlichen Einbauten Stegstrukturen mit unterschiedlichem Längsversatz λ und unterschiedlicher Stegbreite b/d_s ; Leerkanal nach [6]

3.3 Verwendete Strukturen

Die geknickten Stegstrukturen bewirken die größte Verbesserung des Wärmeübergangs in diesen Kanälen. Der große Druckverlust führt jedoch zu Nachteilen im praktischen Betrieb, in dem der Gegenstromreaktor teilweise mit Verfahren konkurriert deren Druckverlust besonders niedrig ist. Günstigere Werte für den Druckverlust erreicht man durch die Schrägstellung der Stege. Das günstigste Verhältnis zwischen Wärmeübergang und Druckverlust läßt sich durch Verwendung von Wendelstrukturen erzeugen. Dabei zeigt die gegensinnige Anordnung aufgrund des kleineren Druckverlusts geringfügig bessere Werte. Demgegenüber führt die gleichsinnige Wendelstruktur zu einer deutlich homogeneren Verteilung örtlicher Wärmeübergangskoeffizienten.

Im Gegenstromreaktor mit kleiner Spaltweite werden deshalb Wendelstrukturen in gleichsinniger Anordnung verwendet. Zur mechanischen Stabilisierung werden diese in Form eines Flachdrahtgewebes mit Querdrähten eingesetzt. Für den Aufbau des Gegenstromreaktors mit großer Spaltweite werden schräggeknickte Strukturen verwendet. Der Aufbau dieser Plattenapparate zur Abluftreinigung wird in Kapitel 5 beschrieben.

3.4 Beschichtung der Strukturen mit Katalysator

Für den katalytisch aktiven Bereich wurden die verwendeten Strukturen mit einem sog. Washcoat aus Aluminiumoxid beschichtet. Auf diesen wurde ein Platinkatalysator imprägniert. Abb. 3-16 zeigt im linken Teil die Struktur mit Washcoat und im unteren Teil die einbaufertige Katalysatorstruktur.

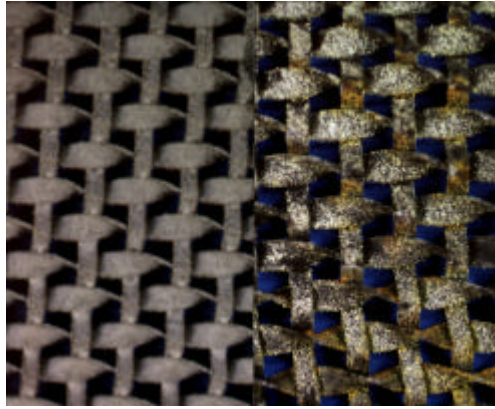


Abb. 3-16: Wendelstruktur mit washcoat (links) und mit gebrauchsfertiger Katalysatorbeschichtung (rechts)

4 Modellbildung und Rechnerimulation

4.1 Modellierung des Gegenstromreaktors

Zur Auslegung des Reaktors und zur Berechnung des stationären und dynamischen Betriebsverhaltens wurde ein eindimensionales Zweiphasenmodell des Gegenstromreaktors erstellt [9],[10]. Die Berücksichtigung von Konvektions- und Diffusionstermen führt zu einem parabolischen Differentialgleichungssystem.

Die notwendigen Temperaturen und Verweilzeiten die für einen Vollumsatz der Aerosole notwendig sind, richten sich nach der Art der zu verbrennenden Verbindungen. Da es sich bei Aerosolen meist um komplexe Verbindungen handelt, lassen sich die notwendigen kinetischen Daten nur experimentell bestimmen. Da für die Oxidation von Aerosolen noch keine solchen Daten vorliegen, wurde als Reaktion die Oxidation von Propan modelliert. Propan gilt als Vertreter der schwer zu oxidierenden Kohlenwasserstoffe. Aus Vorversuchen mit Räucheraerosolen ging hervor, daß die Reaktionstemperatur von Propan in einem ähnlichen Bereich liegt. Aufgrund der relativ kleinen Abmessungen des Versuchsreaktors wurden Wärmeverluste an die Umgebung bei der Simulation mit berücksichtigt.

Aus Platzgründen sollen hier nur exemplarisch Bilanzgleichungen für Masse und Energie aufgeführt werden. Die Modellierung ist in [11] ausführlich beschrieben.

Für die aufströmenden Kanäle ergibt sich die folgende Energiebilanz, Glg. (4-1).

$$\begin{aligned}
 r_s (1 - e) A_1 c_{pS} \frac{\partial T_1}{\partial t} = r & c_{pG1} \frac{\partial T_1}{\partial z} \\
 & + A_1 I_{ax1} e \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \\
 & - \Delta h_{R1} r_1 A_1 a_v \\
 & + a_1 h n (T_w - T_1) \\
 & + k_{amb} d_s n (T_{amb} - T_1)
 \end{aligned} \tag{4-1}$$

In der Energiebilanz werden neben dem konvektiven Wärmetransport die axiale Wärmeleitung in der eingebauten Struktur, der Wärmeübergang an die seitliche Kanalwand, die Wärmeverluste an die Umgebung sowie im katalytisch aktiven Bereich die freigesetzte Reaktionsenthalpie berücksichtigt.

Die Energiebilanz (Glg. (4-2) der Trennwand beinhaltet den Wärmeübergang an die beiden angrenzenden Kanäle sowie die axiale Wärmeleitung in der Trennwand.

$$\rho_w A_w c_{p,w} \frac{dT_w}{dt} = \rho_w A_w \frac{d^2 T_w}{dz^2} - a_1 n h (T_w - T_1) - a_2 n h (T_w - T_2) \quad (4-2)$$

In der Massenbilanz (Glg. (4-3)) werden konvektiver und diffusiver Transport berücksichtigt, sowie in den katalytisch aktiven Bereichen die Umsetzung des Schadstoffes.

$$A_1 \rho_{G,1} \frac{dw_1}{dt} = \rho_{G,1} \frac{dw_1}{dz} + A_1 e D_{eff,1} \frac{d^2 w_1}{dz^2} + M_{propan} r_1 A_1 a_w \quad (4-3)$$

Die Randbedingungen sowie die weiteren Parameter sind bei B. Krohmer beschrieben. Der Gegenstromreaktor wird für die Berechnung in vier Zonen unterteilt, eine Einlaufzone ohne Struktur, eine Wärmeübertragungszone mit unbeschichteter Struktur, eine Reaktionszone mit katalytisch aktiver Struktur und eine Umlenkzone im Kopfbereich. Dabei lassen sich die Längen der einzelnen Zonen frei festlegen. Das resultierende Gleichungssystem wird mit dem adaptiven Solver Pdexpack [12] gelöst.

4.2 Simulationsrechnungen zur Auslegung

Mit dem erstellten Modell wurden zunächst Simulationsrechnungen zur Auslegung des Gegenstromreaktors 2 durchgeführt. Anforderungen an die Auslegung des Reaktors sind dabei zum einen die autotherme Abluftreinigung bei geringen Schadstoffkonzentrationen in der Abluft und zum zweiten der mögliche Betrieb auch bei höheren Abluftkonzentrationen. An dieser Stelle soll exemplarisch der Einfluß der Baulänge und der Einfluß der Länge des aktiven Katalysatorbereiches erörtert werden.

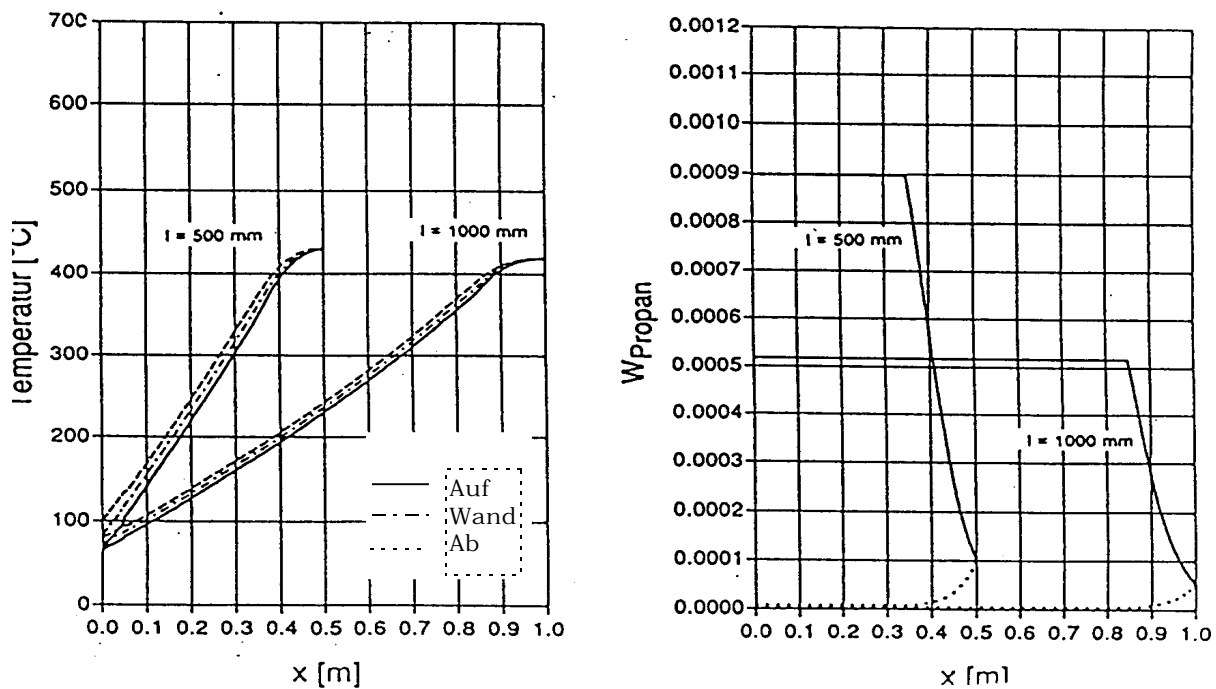


Abb. 4-1: Einfluß der Baulänge auf die Grenzkonzentration für die autotherme Betriebsweise
 $L_{aktiv} = 150 \text{ mm}$, $g_z = 1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$

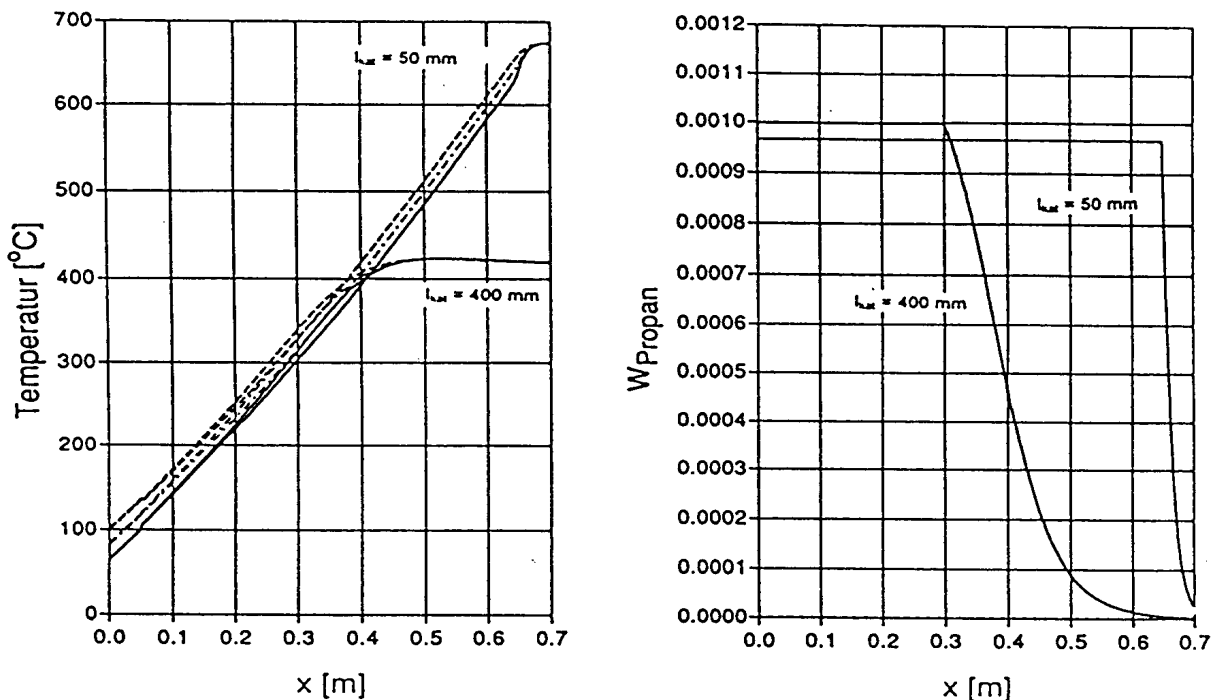


Abb. 4-2: Einfluß der Länge der aktiven Zone auf die Maximaltemperatur im Reaktor
 $L = 700 \text{ mm}$, $g_z = 1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$, $\Delta T_{ad} = 50 \text{ K}$

Abb. 4-1 verdeutlicht den Einfluß der Baulänge des Reaktors auf die untere Grenzkonzentration w bei der gerade noch ein autothermer Betrieb des Reaktors möglich ist. Der linke Teil des Bildes zeigt den simulierten Temperaturverlauf, im rechten Teil ist der zugehörige Konzentrationsverlauf dargestellt. Die hier gezeigte Simulation bezieht sich auf einen aktiven Bereich von 150 mm und einer Massenstromdichte der Abluft durch den Reaktor von $g_z = 1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$. In der aktiven Zone ist ein Platin-Katalysator auf die Strukturen aufgebracht. Bei einer Gesamtbaulänge des Reaktors (Wärmeübertragungs- und Reaktionszone) von $L = 500 \text{ mm}$ ist ein autothermer Betrieb bis hinab zu einer Grenzkonzentration von $9 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{Propan}}/\text{kg}_{\text{Abluft}}$ möglich. Dies entspricht einer adiabaten Temperaturerhöhung von 37 K. Bei einer Vergrößerung der Baulänge auf $L = 1000 \text{ mm}$ vergrößert sich die wärmeübertragende Fläche. Dies ermöglicht bei gleichem Durchsatz einen Wärmetausch mit kleinerer treibender Temperaturdifferenz. Damit läßt sich ein autothermer Betrieb bis zu einer Konzentration von $5,2 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{Propan}}/\text{kg}_{\text{Abluft}}$ entsprechend einer adiabaten Temperaturerhöhung von 22 K erreichen.

Neben der Grenzkonzentration stellt die maximale auftretende Temperatur im Reaktor ein wichtiges Kriterium dar. Diese Maximaltemperatur wird einerseits von der freigesetzten Reaktionswärme und damit von der Konzentration der Abluft bestimmt; zum anderen kann die Maximaltemperatur durch die Länge der aktiven Katalysatorzone beeinflusst werden. Nieken [13] zeigte dies für den Reaktor mit periodischer Strömungsumkehr und für dessen Grenzfall, den Gegenstromreaktor. Abb. 4-2 verdeutlicht diesen Einfluß. Bei einer Länge der aktiven Zone von 400 mm beginnt der Umsatz der Schadstoffe beim Eintritt in die aktive Zone bei einer Temperatur um 400 °C. Bis zur vollständigen Umsetzung der Schadstoffe stabilisiert sich ein Temperaturniveau von ca. 420 °C. Die Reaktionsenthalpie kompensiert die Wärmeverluste im Reaktorkopf. Wird hingegen die Länge der aktiven Zone auf 50 mm reduziert, so erfolgt unter sonst gleichen Bedingungen eine weitere Vorwärmung der Abluft bis zum Eintritt in die Katalysatorzone. Unter sonst gleichen Bedingungen wird dabei eine Temperatur von 680 °C erreicht. Eine größere Länge der aktiven Zone führt zu einer niedrigeren Maximaltemperatur. Damit läßt sich der Reaktor in einem größeren Konzentrationsbereich autotherm bzw. ohne Eingriffe in seinen Energiehaushalt betreiben.

In weiteren Simulationsrechnungen wurden verschiedene Möglichkeiten zur Beeinflussung der Maximaltemperatur beim Betrieb mit hohen Abluftkonzentrationen untersucht. Simuliert wurden die Heißgasauskopplung, die Wärmeauskopplung auf dem höchsten Temperaturniveau, sowie die Kaltgaseinspeisung. Die Ergebnisse belegen, daß die Heißgasauskopplung unter bestimmten Bedingungen geeignet ist, um die Maximaltemperatur im Reaktorkopf deutlich zu senken. In weiteren Simulationen wurde das dynamische Verhalten bei schwankenden Abluftmengen und schwankenden Zulaufkonzentrationen untersucht. Eine ausführliche Beschreibung der durchgeführten Simulationen ist bei B. Krohmer enthalten.

5 Aufbau der Gegenstromreaktoren

Für die Oxidation der Aerosole wurden mehrere Gegenstromreaktoren mit unterschiedlicher Spaltgeometrie aufgebaut und verglichen. Bei einer ersten Bauform lag der Schwerpunkt auf einer möglichst geringen Verschmutzungsempfindlichkeit, bei den folgenden wurde eine größere Gewichtung auf einen hohen Wärmerücktausch gelegt.

5.1 Temperaturführung zur Reduzierung der Verschmutzungsempfindlichkeit

Die Bildung von Ablagerungen auf den wärmeübertragenden Wänden des Reaktors wird maßgeblich von der Temperatur der Wände beeinflusst. Eine hohe Wandtemperatur verhindert die Kondensation von leichtflüchtigen Bestandteilen in der Abluft und reduziert das Anlagern von Partikeln durch thermophoresischer Effekte. Bei allen Reaktorkonzepten wurde daher eine ungerade Anzahl von Spalten vorgesehen, so daß die außen liegenden Spalte von der gereinigten Abluft durchströmt werden (Abb. 5-1). Auf diese Weise wird sichergestellt, daß die vom Rohgas durchströmten, nach oben führenden Spalte stets von beiden Seiten durch die gereinigte Abluft erwärmt werden. Zusätzlich kommen unvermeidbare Wärmeverluste durch die Außenhaut des Reaktors vor allem auf der Reingasseite zum Tragen. Die Wandtemperatur besitzt durch diese Anordnung der Gaswege stets eine Temperatur die über derjenigen des Rohgases liegt.

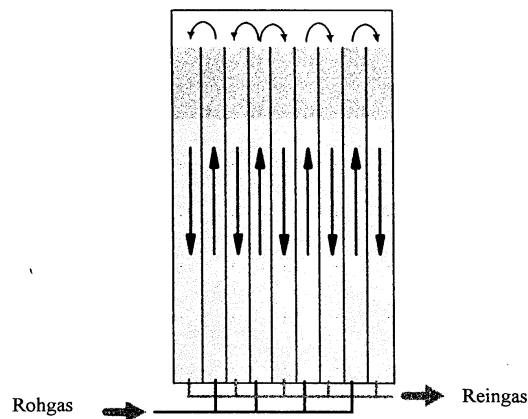


Abb. 5-1: Temperaturführung zur Reduzierung der Verschmutzungsempfindlichkeit

5.2 Reaktor mit großer Spaltweite

Beim Aufbau dieses ersten Reaktors für die Oxidation von Aerosolen wurde die Spaltgeometrie für einen Betrieb mit großer Verschmutzungsgefahr konzipiert. Für diesen Reaktor wurde daher eine große Spaltweite der einzelnen Kanäle vorgesehen. Diese beträgt bei diesem Reaktor $d_s = 15 \text{ mm}$. Die Einbauten in die schachtförmigen Kanäle des Reaktors lassen sich z.B. zu Reinigungszwecken demontieren. Die einzelnen Kanäle sind aus schachtförmigen Blechtaschen aufgebaut. Die Zu- und Abströmung in die Rohgaskanäle erfolgt durch eingeschweißte Rohrstücke, wie in

Abb. 5-2 dargestellt. Dadurch wird das Rohgas gleichmäßig auf die aufströmenden Kanäle verteilt. Da bei größerer Spaltweite zwangsläufig der Wärmeübergang abnimmt, muß die Reaktorbauhöhe ausreichend hoch ausgeführt werden. Abb. 5-4 zeigt den aufgebauten Reaktor. Die Gesamtquerschnittsfläche beträgt 200 mm x 180 mm. Die gesamte Reaktorhöhe inklusive der Anfahr- und Stützheizung und aller Anschlüsse ist mit 2,2 m ausgeführt.

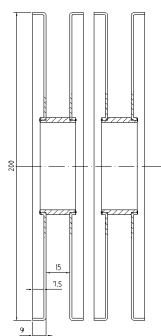


Abb. 5-2: Gegenstromreaktor 1, Ausbildung des Zuströmbereiches

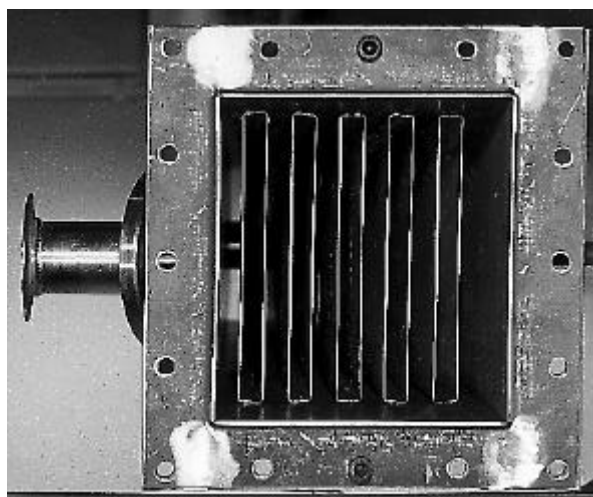


Abb. 5-3: Gegenstromreaktor 1, schachtförmige Kanäle im Kopfbereich

Die jeweils benachbarten Reingaskanäle werden bei dieser Ausführung durch die Zwischenräume der Rohgaskanäle gebildet und münden im unteren Bereich in einen freien Austrittsraum. Durch ein in das umhüllende Reaktorgehäuse eingeschweißtes Rohr tritt die gereinigte Abluft aus dem Reaktor aus. Kopf und Boden des Reaktors werden angeschraubt, wodurch eine leichtere Zugänglichkeit für die Reinigung gewährleistet wird.

Der Kopf des Reaktors Abb. 5-3 ist mit einer elektrischen Heizung versehen. Diese wird sowohl zum Anfahren des Reaktors benötigt, als auch für die Regelung des Reaktors für den Fall kleiner Aerosolkonzentrationen. Im Kopf des Reaktors ist ein Mittenabzug vorgesehen, über den eine Heißgasausschleusung zur Verhinderung von Übertemperaturen erfolgen kann.

Zur Erzielung eines hohen Wärmeübergangs wurden in die Kanäle des Reaktors die in Kapitel 3 entwickelten schräggeknickten Strukturen eingelegt. Diese Strukturen weisen einen niedrigen Druckverlust auf. Durch die schräge Anstellung der Strukturen lassen sich Ablösegebiete hinter den Stegen der Strukturen vermeiden. Dadurch kann die Verschmutzungsempfindlichkeit reduziert werden. Im Reaktionsbereich wurden die Kanäle des Reaktors mit einem kommerziellen Wabenkatalysator versehen.

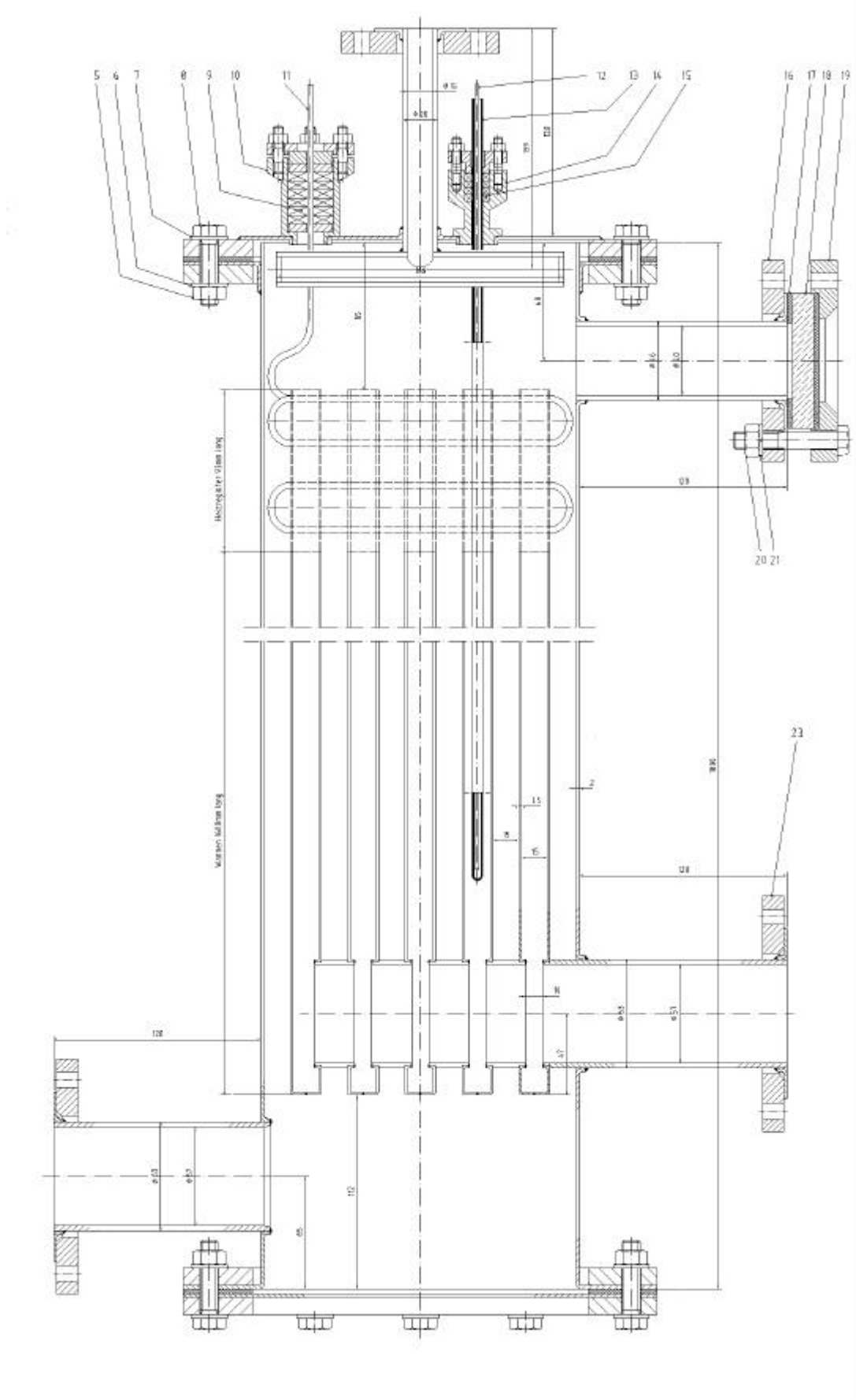


Abb. 5-4: Gegenstromreaktor 1

Spaltweite d_s	15 mm
Spaltbreite h	200 mm
Gesamt-Querschnittsfläche $A_{Ges}=A_1 + A_2$	0,033 m ²
Stärke der Trennwände	1 mm
auf das Reaktorvolumen bezogene wärmeüber- tragende Fläche a_w	57,14 m ⁻¹
Länge der inerten Zone	1400 mm
Struktur in der inerten Zone	längsgeknickte Struktur
Länge der aktiven Zone	150 mm
Katalysator	Platin auf Monolith (400 cpsi)
Anzahl der Trennwände n	10
Anfahr- und Stützheizung	230 V; 2,0 kW

Tab. 5-1: Technische Daten Gegenstromreaktor 1

5.3 Reaktor mit kleiner Spaltweite

Große Spaltweiten im Gegenstromreaktor ergeben niedrigere Wärmeübergangskoeffizienten. Auch durch den Einsatz optimierter Strukturen in den Spalten kann der Wärmeübergang nur in gewissen Grenzen verbessert werden. Ein optimierter Wärmerücktausch im Reaktor kann daher nur bei kleinen Spaltweiten erfolgen. Aus diesem Grund wurde ein zweiter Gegenstromreaktor mit kleiner Spaltweite entwickelt, der sich durch einen hohen Wärmeübergang auszeichnet. Durch diesen hohen Wärmeübergang wird die Leistungsfähigkeit der wärmeübertragenden Bereiche des Reaktors gesteigert und somit eine kleinere Baugröße erzielt, als bei größeren Spaltweiten. Dabei müssen allerdings Einschränkungen hinsichtlich der Verschmutzungsempfindlichkeit in Kauf genommen werden.

Dieser Gegenstromreaktor wurde in seinem Aufbau wesentlich modifiziert, um die kleinen Spaltweiten mit fertigungstechnisch vertretbarem Aufwand realisieren zu können. Die Spalte in diesem Reaktor besitzen eine Breite von 2,5 mm. Die Trennwände werden dabei aus einem durchgehenden Blech mit einer Dicke von 0,1 mm gebildet, das durch alternierende Faltungen die vorgesehenen Strömungskanäle bildet. Abb. 5-6 zeigt ein Schema dieses Aufbaus. In die durch die Faltungen entstehenden Kanäle werden Strukturen eingelegt (gestrichelt dargestellt), die dabei gleichzeitig als Abstandshalter für die Blechwände dienen.

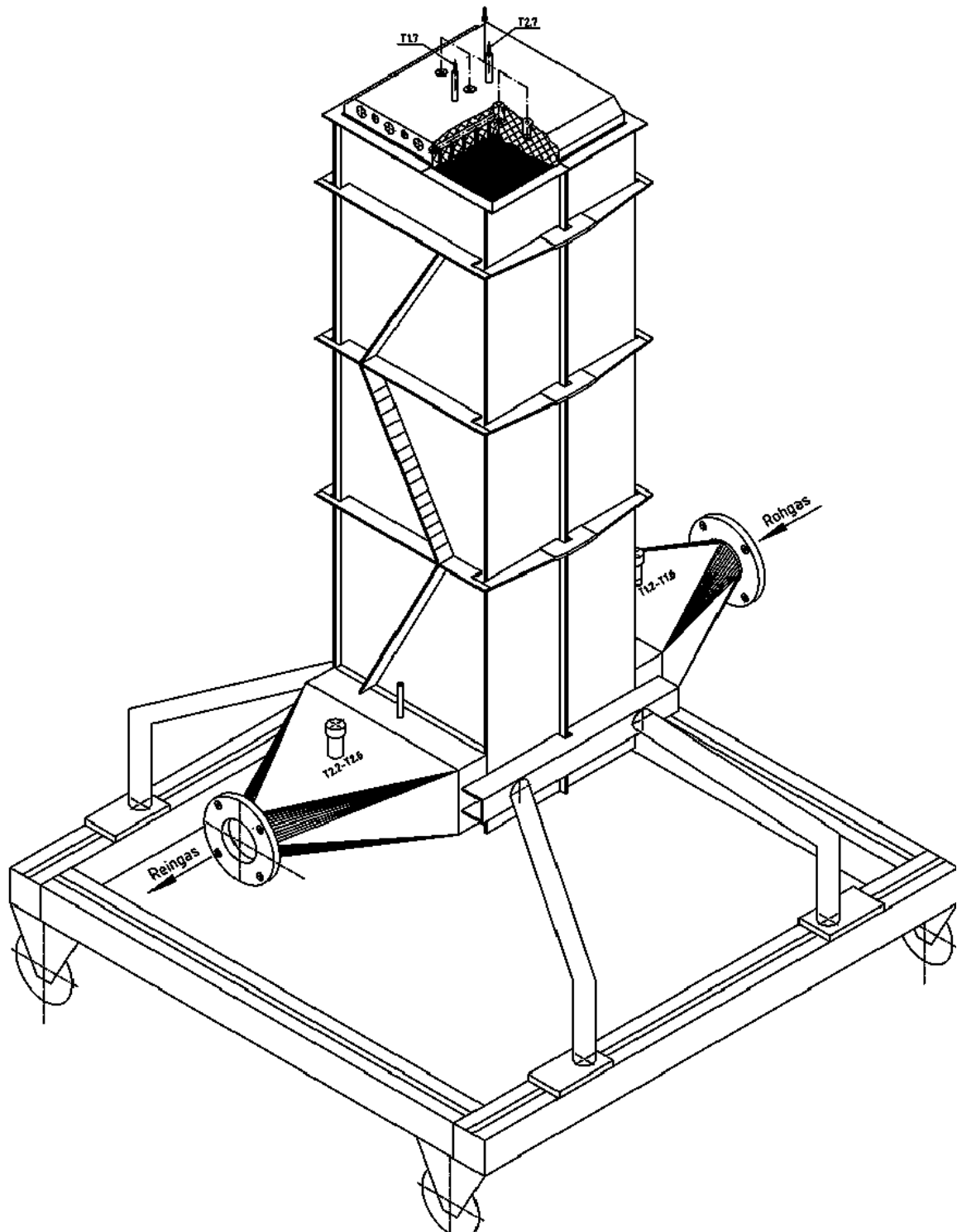


Abb. 5-5: Gegenstromreaktor 2

Anhand der Simulationsrechnungen wurden die Auslegungsdaten des Gegenstromreaktors ermittelt. Der Versuchsreaktor wurde für eine Abluftmenge von bis zu $80 \text{ m}^3/\text{h}$ konzipiert. Die wärmeübertragende Länge beträgt 700 mm und soll einen autothermen Betrieb ab einer adiabaten Temperaturerhöhung von 30 K ermöglichen. Die aktive Zone von 400 mm Länge gewährleistet bei höheren Konzentrationen

eine niedrige Maximaltemperatur. Bis zu einer adiabaten Temperaturerhöhung von 82 K soll der Reaktor bei einer Maximaltemperatur von 700 °C ohne zusätzliche Wärmeauskopplung betrieben werden können. Für diese Daten wurde der Reaktor konstruiert und aufgebaut. Abb. 5-5 zeigt ein Schema des entwickelten Gegenstromreaktors. Im hinteren Teil des Bildes ist der Zulauf des Rohgases zu erkennen, der Auslauf der gereinigten Abluft befindet sich auf der Vorderseite. Der Anschluß auf dem Reaktorkopf ist für die Heißgasauskopplung vorgesehen. Die in dünnwandigen Hülsen geführten Thermolemente ermöglichen die Temperaturmessung an jeder axialen Position im Reaktor.

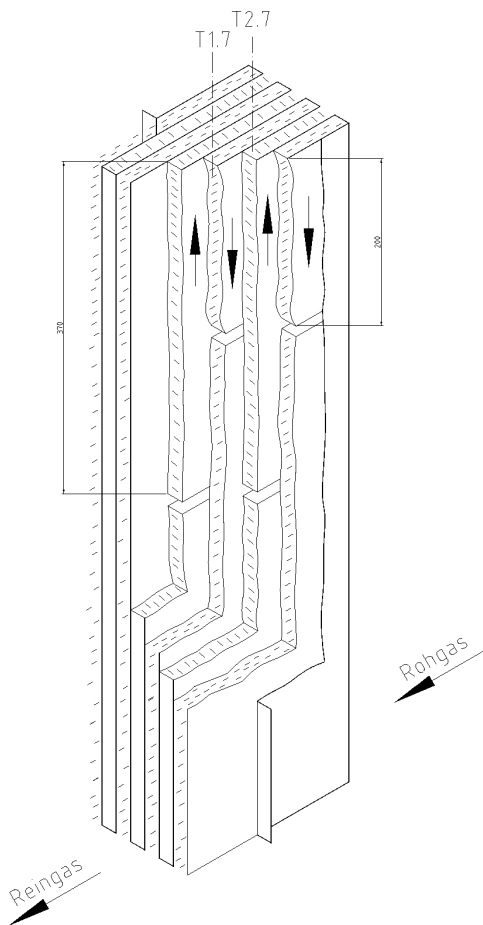


Abb. 5-6: Gegenstromreaktor 2, gefaltete Wände und die Anordnung der Strukturen

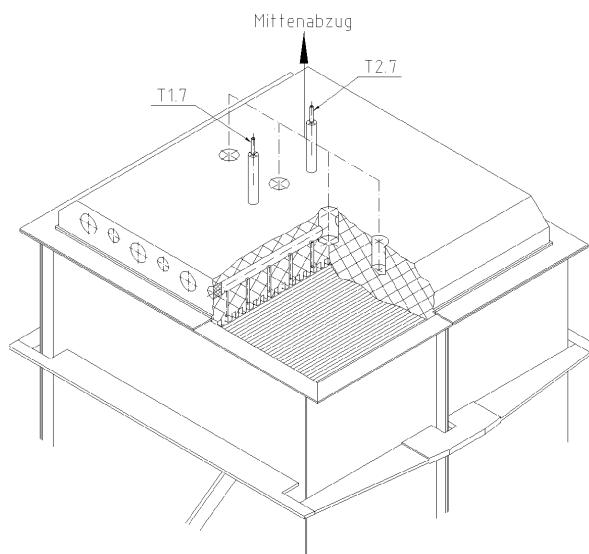


Abb. 5-7: Gegenstromreaktor 2, Reaktorkopf mit Kanälen für Mittenabzug und elektr. Heizung

Abb. 5-7 zeigt die Ausführung des Reaktorkopfes mit elektrischer Beheizung und Kanälen für den Mittenabzug zur Heißgasauskopplung. Dabei gewährleistet eine Vielzahl von Bohrungen einen gleichmäßigen Abzug der ausgekoppelten Heißgasmenge. Zur Verbesserung des Wärmeübergangs ist der Reaktorkopf auf der innenliegenden Seite mit Rippen versehen. Der aufgebaute Reaktor ist in Abb. 5-8 gezeigt. Abb. 5-9 zeigt die Ausführung der Kanäle mit eingelegten Strukturen zur Verbesserung des Wärmeübergangs. In die Kanäle dieses Reaktors wurden gleichsinnige Wendelstrukturen zur Erhöhung des Wärmeübergangs eingelegt.

Spaltweite d_s	2,5 mm
Spaltbreite t	200 mm
Gesamt-Querschnittsfläche $A_{Ges}=A_1 + A_2$	0,041 m ²
Stärke der Trennwände d_w	0,1 mm
Anzahl der Trennwände n	80
auf das Reaktorvolumen bezogene wärmeübertragende Fläche a_w	384,6 m ⁻¹
Länge der inerten Zone, aufströmend	295 mm
Länge der inerten Zone, abströmend	465 mm
Länge der aktiven Zone, aufströmend	370 mm
Länge der aktiven Zone, abströmend	200 mm
Struktur, (inerten und aktiven Zone)	Drahtgestrick aus gleichsinnigen Wendeln
Katalysator	Platin auf Metallgewebe/washcoat
Anfahr- und Stützheizung	400 V; 4,0 kW

Tab. 5-2: Gegenstromreaktor 2, technische Daten

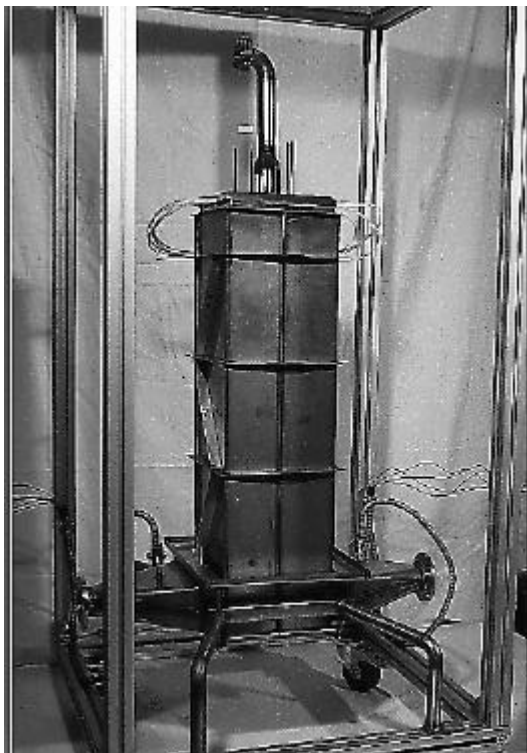


Abb. 5-8: Gegenstromreaktor 2



Abb. 5-9: Gegenstromreaktor 2, Strömungskanäle mit

ingelegten Strukturen

5.4 Reaktor mit Parallelkanälen

Die bei dem vorstehend beschriebenen Konzept verwendeten kleinen Spaltweiten mit eingelegten Strukturen zeichnen sich durch einen hohen Wärmeübergang aus. Andererseits haben sie gerade durch die kleine Spaltweite und die verwendeten Wendelstrukturen den Nachteil einer höheren Verschmutzungsanfälligkeit. Diese entsteht z.B. durch die in der Struktur enthaltenen Querdrähte, an denen sich Aerosole ablagern können.

Daher stellte sich die Aufgabe, durch eine geeignete Spaltgeometrie einen hohen Wärmeübergang zu realisieren und gleichzeitig die Verschmutzungsempfindlichkeit zu reduzieren. Dazu sollten die Kanäle möglichst geringe Strömungsumlenkungen aufweisen, an denen sich Aerosole bevorzugt ablagern.

Zur Erzielung eines hohen Wärmeübergangs wurden bei diesem Aufbau kleine Spaltweiten von 1,2 mm realisiert. In die einzelnen Kanäle wurden gewellte Blechstrukturen so eingelegt, daß in Strömungsrichtung durchgehende Kanäle entstehen. Abb. 5-10 zeigt einen Ausschnitt der verwendeten Strukturen. Der Wellung ist ein leichter fischgrätfförmiger Verlauf überlagert. Der aufgebaute Reaktor ist in Abb. 5-12 dargestellt. Die ausgeführte Gesamtbauhöhe beträgt bei diesem Reaktor 580 mm. Im oberen Bereich sind die Strukturen auf einer Länge von 150 mm mit einem Katalysator beschichtet.

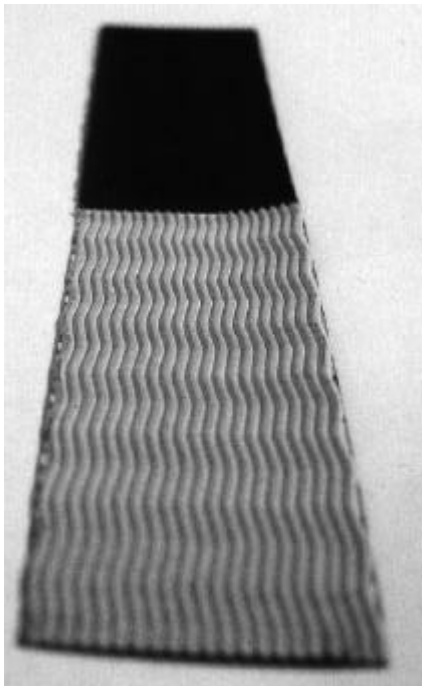


Abb. 5-10: Gegenstromreaktor 3, gewellte Strukturen



Abb. 5-11: Gegenstromreaktor 3

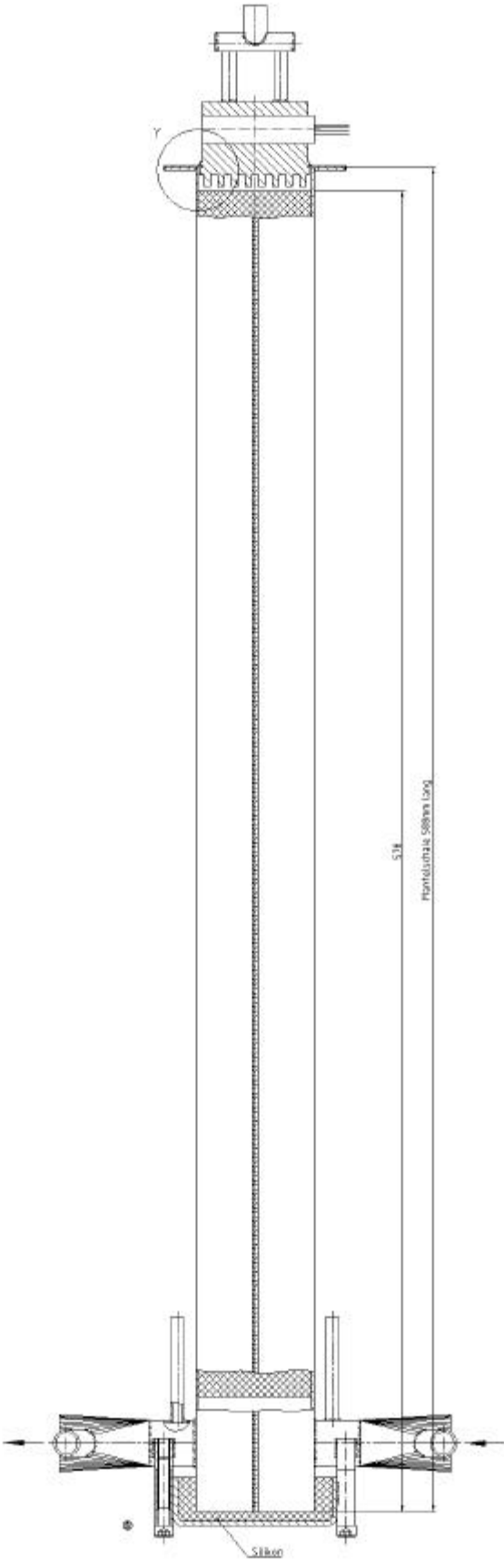


Abb. 5-12: Gegenstromreaktor 3

Spaltweite d_s	1,2 mm
Spaltbreite t	50 mm
Gesamt-Querschnittsfläche $A_{Ges}=A_1 + A_2$	0,0019 m ²
Wandstärke d_w	0,2 mm
Anzahl der Trennwände n	32
auf das Reaktorvolumen bezogene wärmeüber- tragende Fläche a_w	695,6 m ⁻¹
Länge der inerten Zone	380 mm
Länge der aktiven Zone	150 mm
Struktur (inerte und aktiven Zone)	gewellte Metallstruktur, Parallelkanäle
Katalysator	Platin auf Metallstruktur/washcoat
Anfahr- und Stützheizung	230 V; 0,8 kW

Tab. 5-3: Gegenstromreaktor 3, technische Daten

6 Wärmerücktausch der einzelnen Reaktoren

6.1 Reaktor mit großer Spaltweite und längsgeknickten Einbauten

Für die Versuche mit Räucheraerosolen wurde der Reaktortyp 1 eingesetzt, dessen Spaltweite 15 mm beträgt. Durch diese große Spaltweite ist es möglich, die Einbauten des Reaktors bei Bedarf auszubauen und zu reinigen oder auszuwechseln. Die große Spaltweite hat in Kombination mit einer geringeren wärmeübertragenden Fläche zur Folge, daß die treibende Temperaturdifferenz im Reaktor vergleichsweise hoch ist ($\Delta T \approx 80 \text{ K}$ bei $g_z = 1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ und $T_{\text{Kopf}} = 600^\circ\text{C}$). Zum Einsatz bei der Umsetzung von Aerosolen kann dies jedoch auch vorteilhaft sein, da die Wände der aufströmenden Kanäle eine deutlich höhere Temperatur als der Gasraum aufweisen. Diese höhere Temperatur verursacht eine thermophoretische Triebkraft auf die gasgetragenen Partikel, die von der heißen Wand weg hin zum kühleren Gasraum weist. Mit höherer Temperaturdifferenz steigt auch der Einfluß dieser Kraft, so die Partikel einen Impuls weg von den Trennwänden erhalten, was die Verschmutzungsanfälligkeit der Blechwände reduziert [14]. Die im stationären Zustand des Reaktors gemessenen Temperaturprofile sind in Abb. 6-1 und Abb. 6-2 zu sehen. Beide Temperaturprofile wurden ausschließlich mit der Stützheizung im Kopf des Reaktors eingestellt. Mit steigendem Durchsatz und zunehmender Maximaltemperatur wird mehr Wärme aus dem Reaktor ausgetragen, die Temperaturdifferenz $T_{\text{Aus}} - T_{\text{Ein}}$ steigt.

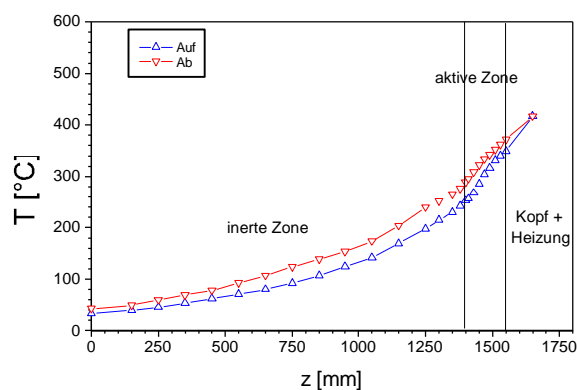


Abb. 6-1: Temperaturprofil im Gegenstromreaktor mit großer Spaltweite, $g_z = 0,20 \text{ kg/m}^2\text{s}$, elektrisch beheizt

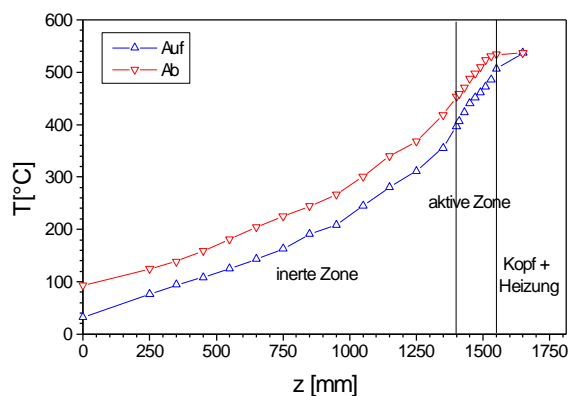


Abb. 6-2: Temperaturprofil im Gegenstromreaktor mit großer Spaltweite, $g_z = 0,60 \text{ kg/m}^2\text{s}$, elektrisch beheizt

6.2 Reaktor mit kleiner Spaltweite und Dralleinbauten

Ein optimierter Wärmetausch lässt sich durch kleine Spaltweiten und metallische Dralleinbauten realisieren. In dieser Reaktorform konnte eine Spaltweite von 2,5 mm durch die spezielle Drallstruktur realisiert werden. Die Struktur stellt gleichzeitig den Träger des Katalysators dar, der in diesem Fall asymmetrisch aufgebaut ist, d.h., der Katalysator nimmt ein größeres Bauvolumen in den aufströmenden Kanälen ein, als in den abströmenden. Geringe Spaltweite und große wärmeübertragende Fläche ermöglichen einen effizienten Wärmerücktausch. Die treibende Temperaturdifferenz zwischen den ab- und aufströmenden Gaskanälen ist gering ($\Delta T < 25 \text{ K}$ bei $g_z = 1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ und $T_{\text{kopf}} = 600 \text{ °C}$). In Abb. 6-3 ist ein Temperaturprofil des Reaktors dargestellt, das sich mit der Stützheizung im Kopf des Reaktors einstellt. In Abb. 6-4 wurde zusätzlich noch Propan zudosiert. Aufgrund des stark verbesserten Wärmetransportes ist bei vergleichbarer Flächenbelastung und Maximaltemperatur, wie bei dem Reaktortyp 1, ein verbesserter Wärmerücktausch an der geringeren Temperaturdifferenz $T_{\text{Aus}} - T_{\text{Ein}}$ erkennbar.

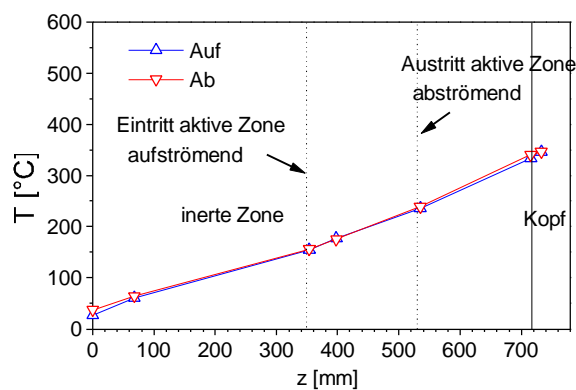


Abb. 6-3: Temperaturprofil im Gegenstromreaktor mit kleiner Spaltweite und Dralleinbauten, $g_z = 0,35 \text{ kg/m}^2\text{s}$, elektrische Stützheizung

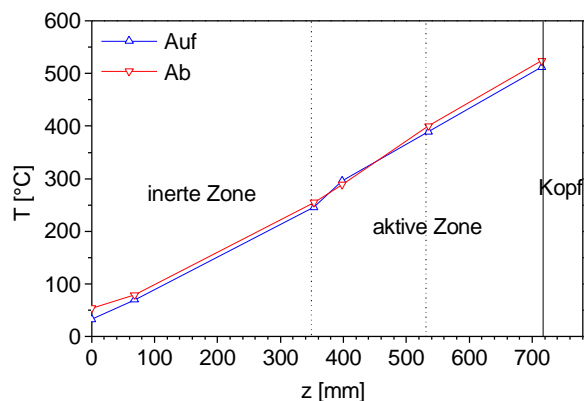


Abb. 6-4: Temperaturprofil im Gegenstromreaktor mit kleiner Spaltweite und Dralleinbauten, $g_z = 0,86 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 620 ppm Propan und elektrische Stützheizung

6.3 Reaktor zur thermischen Oxidation

Der Reaktoraufbau entspricht dem im Kapitel 6.2 beschriebenen Reaktortyp. Es wurde allerdings auf eine katalytische Beschichtung der Einbauten verzichtet. Der Apparat ist vollständig aus hochtemperaturbeständigem Stahl aufgebaut, und eignet sich so für die hohen Temperaturen, die bei Versuchen zur rein thermischen Oxidation notwendig sind. Sein über den Strömungsweg der Abluft gleichstrukturierter Aufbau führt zu einem nahezu linearen Temperaturprofil (Abb. 6-6). Die einzige Wärmequelle zur Beheizung des Reaktors ist an der Umlenkzone, also im Kopf des Reaktors installiert.

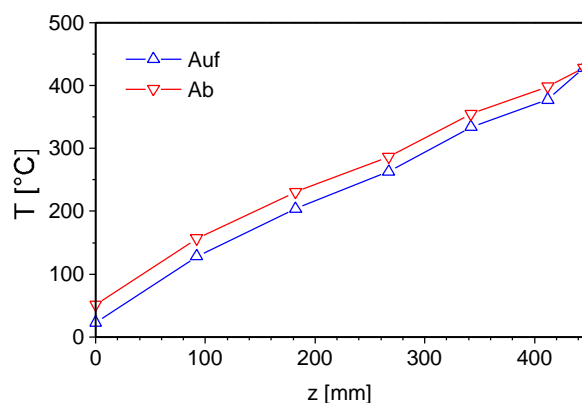


Abb. 6-5: Temperaturprofil im Gegenstromreaktor zur thermischen Oxidation, $g_z = 0,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$, elektrische Stützheizung

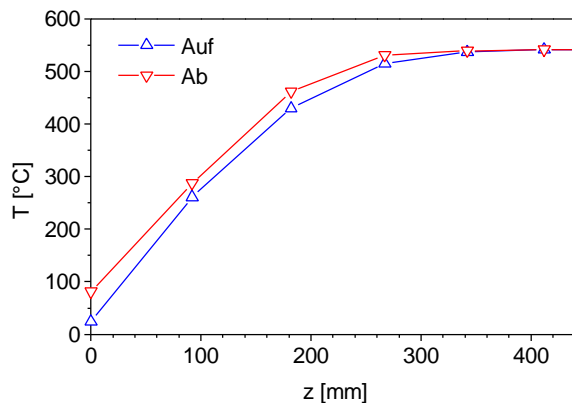


Abb. 6-6: Temperaturprofil im Gegenstromreaktor zur thermischen Oxidation, Methanol, $g_z = 0,78 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $\Delta T_{ad} = 79 \text{ K}$ autotherm,

6.4 Reaktor mit Parallelkanälen

Parallelkanäle, die auf dem Strömungsweg der zu behandelnden Abluft nur eine geringe Angriffsfläche für eine Partikelabscheidung bieten, eignen sich besonders für den Einsatz bei der Aerosolumsetzung. Die geringe Spaltweite des Reaktors von 1,2 mm und die Tatsache, daß die verwendeten Strukturen linienförmig an den Kanalwänden anliegen, verbessert den Wärmetransport des Reaktors zusätzlich. Der katalytisch aktive Teil des Reaktors besitzt ein großes Bauvolumen im Verhältnis zum Gesamtvolumen des Apparates. Dadurch wird ein breiter Betriebsbereich möglich, bei dem der Reaktor autotherm betrieben werden kann. Der Reaktor weist eine sehr gute Wärmeintegration auf, was treibende Temperaturdifferenzen um 10 K im autothermen Betrieb ermöglicht. In Abb. 6-7 sind Temperaturprofile dargestellt, die sich bei verschiedenen Kopftemperaturen im stationären Betrieb mit der Stützheizung des Reaktors einstellen.

In Abb. 6-8 ist ein im autothermen Betrieb (ohne elektrische Zusatzheizung) gemessenes Temperaturprofil dargestellt. Das Temperaturmaximum liegt im autothermen Betrieb, nicht am Reaktorkopf, sondern unmittelbar am Beginn der katalytisch aktiven Zone. Die Ursache hierfür ist in den unvermeidbaren Wärmeverlusten am Reaktorkopf begründet. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist so hoch, daß alles Propan nach Eintritt in den Katalysator in wenigen Zentimetern

Fließweglänge umgesetzt ist. Gleichzeitig wird dort die gesamte Reaktionswärme frei. Auf dem weiteren Fließweg der Abluft wird auf Grund von Verlusten an die Umgebung Wärme abgegeben, der Gasstrom kühlt sich ab. Nach dem Umkehrpunkt der Strömung wird die Abluft durch die in den benachbarten Kanälen im Gegenstrom strömende heißere Luft aufgewärmt. Der Scheitelpunkt des Temperaturniveaus ist im abströmenden Kanal wieder am Ort der größten Wärmefreisetzung im aufströmenden Kanal, danach wird die Abluft durch das einströmende Rohgas bis nahe zur Umgebungstemperatur abgekühlt.

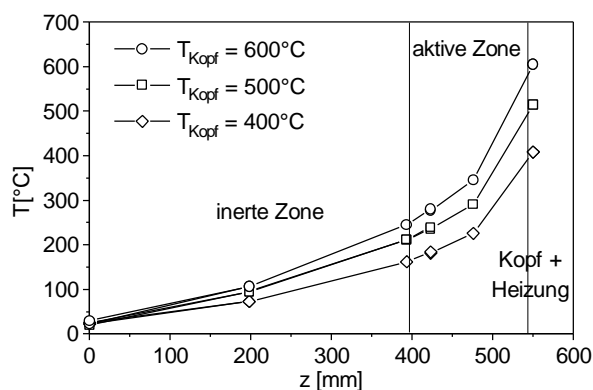


Abb. 6-7: Temperaturprofile im Gegenstromreaktor mit Parallelkanälen
 $g_z = 0,87 \text{ kg/m}^2\text{s}$,
 el. Stützheizung.

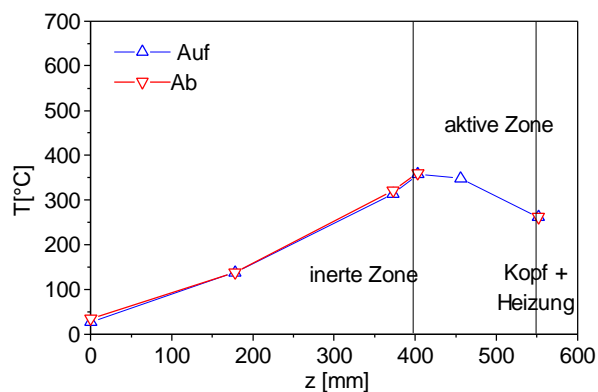


Abb. 6-8: Temperaturprofil im Gegenstromreaktor mit Parallelkanälen,
 $g_z = 0,87 \text{ kg/m}^2\text{s}$,
 600 ppm Propan, autotherm

6.5 Energetische Betrachtung

Das Konzept der katalytischen oder thermischen Abluftreinigung konkurriert bei der Entfernung von Aerosolen aus Abluftströmen mit herkömmlichen katalytischer oder thermischer Nachverbrennung mit Brennkammer und Wärmeübertrager in getrenntem Aufbau. Die besondere, integrierte Aufbauweise des Gegenstromreaktors ermöglicht eine besonders energiesparende Betriebsweise, d.h. einen geringen Einsatz von Zusatzenergie. Zusätzlich zur Energie, die in den zu behandelnden Abluftströmen in Form eines Brennwertes vorhanden ist, muß zur Aufrechterhaltung der notwendigen Kopftemperatur auch bei geringen Schadstoffkonzentrationen, zusätzlich Wärme bereitgestellt werden. Dies ist bei den aufgebauten Reaktoren in Form einer elektrischen Stützheizung möglich. Alternativ wäre am Reaktoreintritt die Zumischung eines Stützgases mit ähnlicher Zündtemperatur, wie die der umzusetzenden Abluftkomponenten denkbar. Der Energiebedarf des Reaktors wird dabei durch äußere Verluste über den Reaktormantel an die Umgebung verursacht. Die äußeren Wärmeverluste hängen von der Güte der Isolierung, dem Temperaturniveau im Reaktor und der Größe und Form der Außenfläche ab und sind apparatetechnisch nur bedingt zu optimieren. Die Temperaturerhöhung des Abluftstromes ist jedoch direkt ein Maß für den Wirkungsgrad des Wärmerücktausches im Reaktor. Ohne äußere Verluste wäre die meßbare Temperaturdifferenz zwischen Reaktorein- und austritt gerade so groß, wie der Wärmeeintrag in den Kopf des Reaktors durch die el. Stützheizung oder/und eine evtl. Reaktionsenthalpie durch Schadstoffumsetzung (6-4). Die im realen Betrieb gemessene Temperaturdifferenz ist jedoch niedriger, da un-

vermeidbare Verluste nicht nur am Kopf sondern auch im Wärmetauscherteil des Reaktors entstehen.

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_{Aus} - T_{Ein})$$

6-4

Für eine Abschätzung der Güte des Wärmerücktausches der Reaktoren mit unterschiedlichen Spaltgeometrien läßt sich diese leicht meßbare Temperaturdifferenz heranziehen, indem man den spezifischen Wärmebedarf der Versuchsreaktoren für den Fall eines adiabaten Wärmerücktausches bestimmt. Alle äußeren Verluste werden dem Kopf des Reaktors zugeschlagen und abhängig vom Reaktortyp durch eine Bilanzierung der Wärmeströme am Reaktor ermittelt. Damit ist dieser Verluststrom nur durch die Kopftemperatur bedingt und beträgt bei dem Reaktor mit großer Spaltweite bei 500 °C ca. 500 W, was bei einer Querschnittsbelastung von um 0,6 kg/m²s ca. 50 % des Gesamtwärmeaustrags entspricht (Abb. 6-9). Bei ungünstigerem Oberfläche/Volumen-Verhältnis, oder bei höherer Kopftemperatur des Reaktors, können diese Werte auch höher sein. Der so ermittelte Energiebedarf sowie die durch den Druckverlust über den Reaktor erforderliche Verdichterleistung der einzelnen Reaktoren stellt sich wie folgt dar:

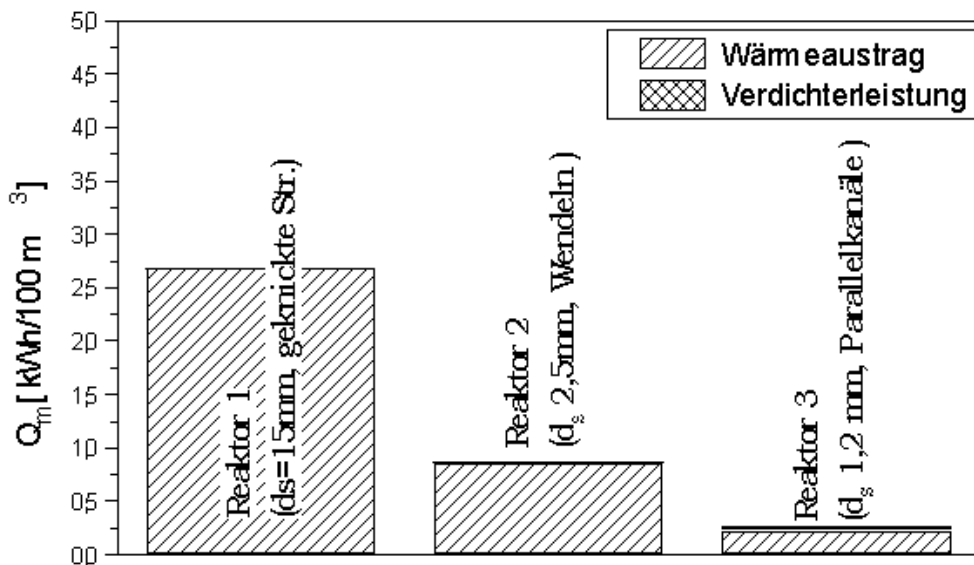


Abb. 6-9: spezifischer Energiebedarf der aufgebauten Reaktoren:
 $T_{kop} = 600 \text{ °C}$, $g_z = 0,6 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Die größten Anteile des Gesamtenergiebedarfes eines Gegenstromreaktors sind neben den äußeren Verlusten die Verluste über den Wärmeaustrag am Reaktoraustritt. Dieser Wärmeaustrag sinkt mit kleiner werdender Spaltweite d_s . Ursache ist die vergrößerte wärmeübertragende Fläche und der verbesserte Wärmeübergang mit abnehmender Spaltweite. Um gleiche Kopftemperaturen bei kleinen wie bei großen Spaltweiten zu erhalten, sind bei gleicher Querschnittsfläche bei kleineren Spaltweiten daher nur geringere Bauhöhen notwendig. Bei identischer Querschnittsbelastung steigt aus diesem Grund die Verdichterleistung mit abnehmender Spaltweite nur mäßig an. Die Verdichterleistung liegt im untersuchten Bereich um mindestens eine Größenordnung unter dem der ausgetragenen Wärme. D.h., ein möglichst

effizienter Wärmerücktausch ist für eine apparatebauliche Optimierung von besonderem Interesse. Mit kleinen Spaltweiten lassen sich die Baugröße des Gegenstromreaktors und der Bedarf an Zusatzenergie minimieren.

7 Aufbau der Versuchsanlage

7.1 Anlagenkomponenten

Zur Versuchsdurchführung wurde eine Anlage im Technikumsmaßstab errichtet, die es ermöglicht, die verschiedenen Gegenstromreaktoren bei unterschiedlichen Durchsätzen und Schadstoffbeladungen zu betreiben. Zu den einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaus gehören neben dem eigentlichen Reaktor die gesamten Versorgungssysteme (Luft, Brenngas, Aerosole, Trägergas für einen Sättiger, Druckluft, Kühlwasser), die Anlagensteuerung und die Meßwerterfassung.

Zur Erzeugung eines synthetischen Abluftstromes ist es an diesem Versuchsaufbau möglich, sowohl gasförmige Komponenten, als auch einen luftgetragenen Partikelstrom einem regelbaren Hauptluftstrom beizumengen (Abb. 7-1). Als Trägerluftstrom wird mit einem Seitenkanalgebläse Umgebungsluft gefördert. Der Luftstrom durch die Anlage kann durch eine Bypassregelung im Bereich von 0 bis ca. 200 m³/h eingestellt werden. Zum Anfahren und für einen Betrieb des Reaktors bei geringsten Schadstoffbeladungen ist es möglich, den jeweiligen Reaktorkopf elektrisch zu beheizen. Die Heizleistungen betragen dabei je nach Reaktortyp zwischen 500 Watt und 4 kW und können meßtechnisch erfaßt werden. Durch einen Mittenabzug ist es möglich, in den Energiehaushalt des Reaktors Eingriff zu nehmen, um so Übertemperaturen zu vermeiden. Dieser Teilstrom wird bei der höchsten Temperatur aus dem Reaktor entnommen und kann in einem angeschlossenen Wärmetauscher auf annähernd Umgebungstemperatur abgekühlt werden. Der Abluftstrom aus dem Reaktoraustritt (Reingas) bedarf auf Grund seiner geringen Temperatur (< 100 °C) keiner besonderen Behandlung und wird mittels eines Abzuges ins Freie geführt.

Um Partikelverluste in Förder- und Meßleitungen möglichst gering zu halten, wurden Aerosolerzeugung und die dazugehörige Meßeinrichtung in räumlicher Nähe zum Versuchsreaktor montiert (siehe Abb. 7-2). Alle Gegenstromreaktoren zur Abluftreinigung sind beweglich aufgebaut, um Versuche in Betrieben vor Ort zu ermöglichen. Um zuverlässige Aussagen über das Betriebsverhalten des Reaktors machen zu können, wurde dieses Sicherheitskonzept auch für Langzeitversuche an der Anlage ausgelegt.

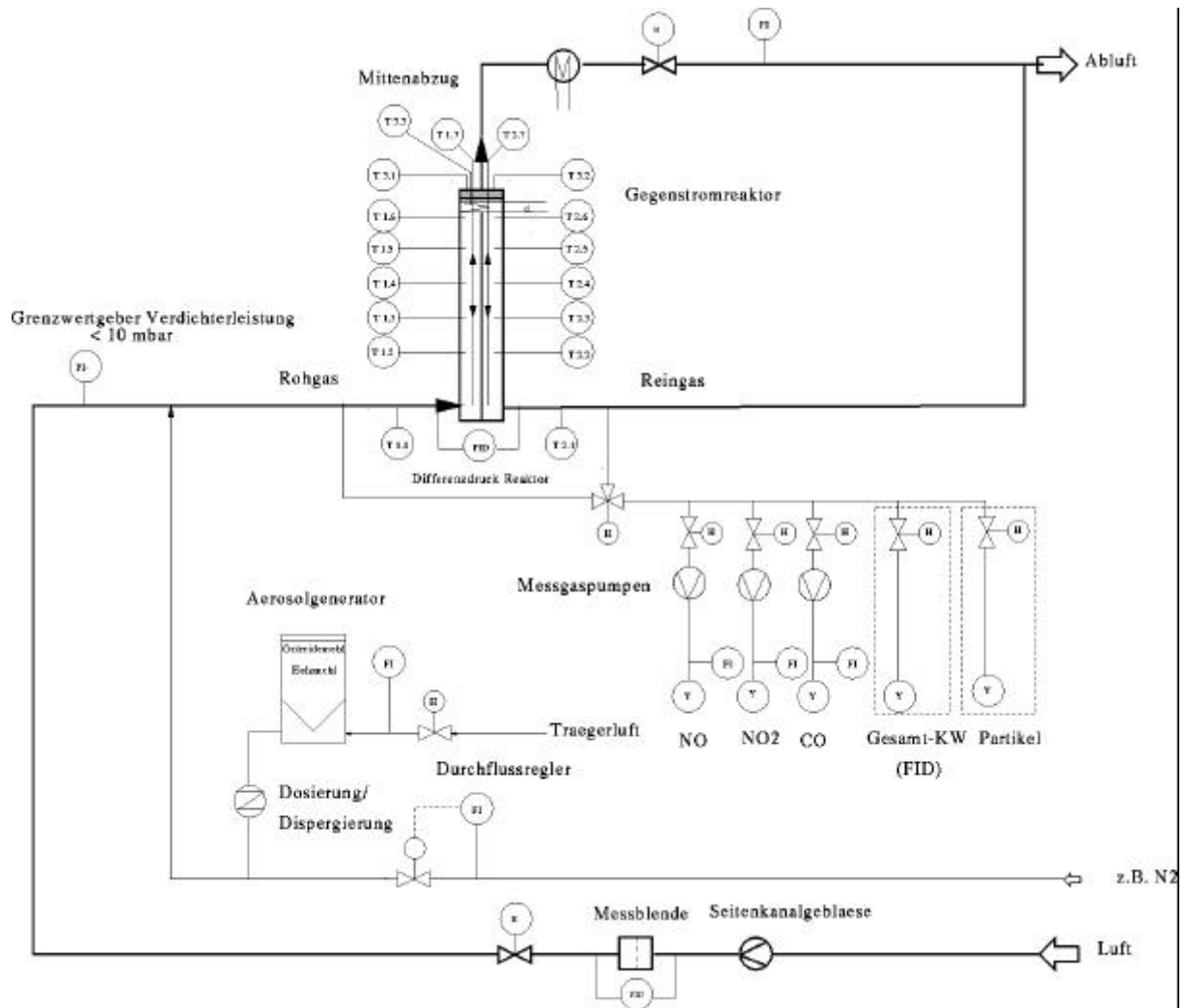


Abb. 7-1: Fließbild der Versuchsanlage mit Hauptluftstrom, Aerosolerzeugung, Durchflußmessung, Gegenstromreaktor, Mittenabzug und Meßeinrichtungen.

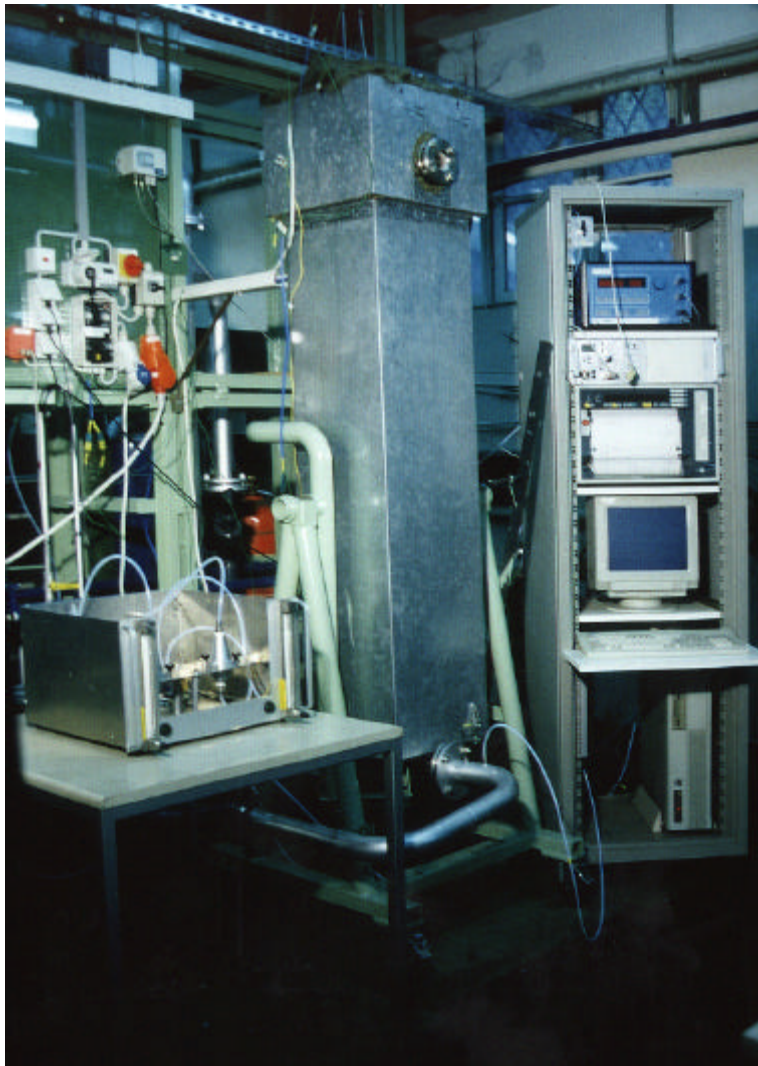


Abb. 7-2: Aufbau der Versuchsanlage mit Gegenstromreaktor 1, links: Anlagensteuerung und Planfiltermeßgerät, Bildmitte: Gegenstromreaktor mit großer Spaltweite und längsgeknickten Strukturen, rechts Meßdatenerfassung.

7.2 Durchsatz- und Temperaturmessung

Die Durchsatzmessung des Hauptluftstromes an den verschiedenen Gegenstromreaktoren muß geeignet sein, einen breiten Volumenstrombereich zu erfassen. Während der kleinste Reaktortyp (Gegenstromreaktor 3) mit einem Volumenstrom um $5 \text{ m}^3/\text{h}$ betrieben wird, sind beim Gegenstromreaktor 1 Durchsätze von über $75 \text{ m}^3/\text{h}$ möglich. Gleichzeitig muß die Volumenstrombestimmung im Aerosol-Betrieb unempfindlich gegenüber Verschmutzungen sein, bzw. leicht zu reinigen sein. Bei einer Messung hinter dem Reaktor ist zusätzlich noch ein breiter Temperaturbereich nötig, da die dort maßgebliche Reingastemperatur abhängig vom Wärmerücktausch des angeschlossenen Reaktors ist und bis zu $100 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen kann. Zur Durchsatzmessung des Hauptluftstromes an der Versuchsanlage wurde deshalb eine Differenzdruckmessung an einer Vierteldüse mit Eckdruckentnahme nach DIN [15] eingesetzt. Dazu wurde hinter dem jeweiligen Gegenstromreaktor eine gerade Rohrstrecke der Länge $6 D$ (Durchmesser der Zu- bzw. Ablaufrohre $D = 50 \text{ mm}$) zur Strömungsberuhigung angebracht. Die Vierteldüse ist anschließend zwischen zwei Flanschverbindungen so eingebaut, daß eine Reinigung, sowie ein Auswechseln der Blenden zur Erfassung verschiedener

Volumenstrombereiche möglich ist. Zur Abdeckung des gesamten Durchsatzbereiches sind drei verschiedene Blenden notwendig (Tab. 7-1), deren erzeugter Wirkdruck wird mit einem Membran-Druckaufnehmer (0-100mbar) gemessen. Zur Volumenstrommessung an einer Normblende ist die Kenntniss der Zustandsgrößen des strömenden Mediums an der Blende notwendig. Die Temperatur wurde dazu mit einem Thermoelement des Typs K erfaßt. Der Absolutdruck vor der Blende ergibt sich bei dem gewählten Meßanordnung (Nachdruck an der Blende = Umgebungsdruck) direkt aus gemessenem Differenzdruck und dem Umgebungsdruck. Die Berechnung des Durchsatz aus dem Differenzdruck erfolgt mittels einer Meßdatenerfassung auf einem PC und wird dort als zeitlicher Verlauf dargestellt.

Typ [D = 50 mm]	Bohrung d [mm]	Meßbereich [m ³ /h]
Blende 1	6,7	3 - 15
Blende 2	10,6	10 - 30
Blende 3	16,0	25 - 75

Tab. 7-1: Viertelkreisdüsen zur Volumenstrommessung

Für größere Reaktor-Durchsätze als 75 m³/h wurde der Volumenstrom auf der Saugseite des Gebläse mit einem Degu-Flow-Gerät bestimmt. Kleinere Durchsätze als 3 m³/h im Druckluftstrom des Aerosolerzeugers werden mit Schwebekörperdurchflußmessern erfaßt. Die Durchflußregulierung von Stützgas zur Reaktorbeheizung, sowie die Verbrennungsluftdosierung des Schwelrohres erfolgt durch Mass-Flow-Controller. Alle Temperaturen werden durch Thermoelemente des Typs K erfaßt und zur Sichtbarmachung zeitlicher Temperaturverläufe auf einem Meßdatenschreiber angezeigt. Das Umsatzverhalten von Kohlen-Wasserstoffen wird durch eine Konzentrationsmessung mit einem FID (Flammen-Ionisations-Detektor, Fa. Rathfisch) realisiert. Zum Einsatz kommt das Gerät bei der Bestimmung von Kohlen-Wasserstoff-Verbindungen in der Gasphase in Roh- und Reingas.

7.3 Sicherheitstechnik

Beim Umgang mit Feinststäuben im Labor sind auf Grund ihres gesundheitlichen Gefährdungspotentiales unbedingt Schutzmaßnahmen zu treffen. Dazu gehört bei der Staubförderung die konstruktive Vermeidung aller Leckagen. Bei Befüllungs- und Wartungsarbeiten ist unbedingt auf das Tragen von Atemschutzausrüstung zu achten. Bei Räucheraerosolen besteht ein Gefährdungspotential durch die im Rauch enthaltenen Stoffe. Da die Partikelgrößen hier kleiner sind als die der verwendeten Stäube und der Trockenhefen und eine zusätzliche Gefährdung vom gasförmigen Anteil des Rauches ausgeht, muß hier besonders auf dichte Gaswege geachtet werden.

Als oxidierbare Aerosole werden alle Partikel/Luft-Gemische bezeichnet, die Sauerstoff zur exothermen Reaktion benötigen. Alle kohlenstoffhaltigen Stäube sind im dispergierten Zustand zündbar und damit explosionsfähig [16]. Staubexplosionsfähigkeit ist immer dann gegeben, wenn in einem Staub/Luftgemisch nach der

Zündung durch eine geeignete Zündquelle eine Flammenausbreitung in Verbindung mit einer Drucksteigerung auftritt. Ein solcher Explosionsvorgang besteht aus einer chemischen Reaktion, bei der sich die Reaktionsprodukte unmittelbar oder in komplizierten Zwischenreaktionen bilden. Der erforderliche Sauerstoff wird mit der Verbrennungsluft zugeführt. Es existieren eine obere und eine untere Explosionsgrenze von Staubpartikeln in Luft. Jenseits dieser Grenzen ist eine selbständige Explosionsfortpflanzung im Gemisch nicht möglich. Von besonderem Interesse ist die untere Explosionsgrenze, die für viele technische Stäube zwischen 15 und 60 g/m³ liegt [17]. Die obere Explosionsgrenze liegt im allgemeinen mit 2 - 6 kg/m³ recht hoch. Eine höhere Temperatur vermindert die untere Explosionsgrenze. Die Kornoberfläche und damit die Korngrößenverteilung innerhalb einer Staubart sind dabei von erheblichem Einfluß auf den Verbrennungsvorgang. Mit abnehmender mittlerer Partikelgröße steigt die Explosionsgrenze überproportional an. Ein weiteres Senken der unteren Explosionsgrenze wird erreicht, wenn zum Partikel/Luftgemisch ein brennbares Gas zugemischt wird (sog. hybrides Gemisch). Bei den Versuchen im Gegenstromreaktor werden besonders feine Partikel/Luftgemische eingesetzt. Verfahrensbedingt ist eine zur Auslösung einer Staubexplosion geeignete Zündquelle durch die elektrische Stützheizung im Kopf des Gegenstromreaktors gegeben. Um eine Gefährdung durch Staubexplosionen trotzdem auszuschließen dürfen deshalb nur Modellaerosole eingesetzt werden deren Staubkonzentrationen deutlich geringer als die untere Explosionsgrenze ist. Auf den Einsatz von Stützgas zur Aufrechterhaltung des Temperaturprofils im Gegenstromreaktor wurde aus diesen Überlegungen heraus verzichtet. Die gesamte Anlage, besonders aber die Bauteile der Aerosolerzeugung, die Rohrleitungen und der metallische Reaktor werden zur Vermeidung von statischen Aufladungen durch eine Erdung potentialfrei gehalten.

Feinststäube können sich im Reaktor an den metallischen Wänden und den Einbauten abscheiden. Durch eine Lösung dieser Ablagerungen während der Versuchsdurchführung besteht auch bei geringen Staubkonzentrationen in Rohgas eine Gefahr der örtlichen Überschreitung der Explosionsgrenzen. Um dieses Gefährdungspotential abzumildern, wurden die Feinststaubversuche am Gegenstromreaktor 1 durchgeführt. Bei diesem Reaktortyp können durch eine teilweise Demontage der Reaktorhülle Ablagerungen kontrolliert und evtl. abgereinigt werden. Zur weiteren Minimierung des Risikos einer Staubexplosion ist am Kopf des Reaktors eine Entlastungsöffnung angebracht, die mit einer Berstscheibe aus Graphitfolie verschlossen ist. Bei einem unkontrollierten Druckanstieg im Reaktor soll der Überdruck durch diese Öffnung entweichen können.

Bei einem langsameren unerwünschten Anstieg der Temperaturen im Reaktor über einen festgelegten Grenzwert hinaus sowie einem Unterschreiten eines unteren Grenzwertes des Volumenstromes wird ein Alarm ausgelöst. Gleichzeitig wird die Stützheizung und eine evtl. Stützgasdosierung abgeschaltet.

8 Prüfaerosole

8.1 Eigenschaften von Aerosolen

Die Größe der Partikel in einem Aerosolsystem ist meist nicht einheitlich (monodispers), sondern muß über eine Größenverteilung beschrieben werden (polydispers). In der Richtlinie VDI 3491 Bl.1 [18] werden verschiedene Partikeldurchmesser definiert. In Verbindung mit verschiedenen Mengenmaßen, z.B. Anzahl, Volumen und Masse, ergibt sich eine Vielzahl an Möglichkeiten der Messung und Darstellung einer Partikelgrößenverteilung. Bei Aerosolen bietet sich zur Beschreibung der Partikelgröße der aerodynamische Durchmesser an. Er beschreibt im Bereich über 0,5 µm Durchmesser das Verhalten der Partikel im gasgetragenen Zustand. Der aerodynamische Durchmesser stellt den Durchmesser einer Kugel einheitlicher Dichte ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$) dar, die die gleiche Sinkgeschwindigkeit wie das Partikel aufweist [19].

Die Partikelkonzentration beschreibt die Häufigkeit des Auftretens von Partikeln in einem Größenintervall pro Volumeneinheit des Trägermediums. Übliche Konzentrationsmaße sind die Massenkonzentration, die Volumenkonzentration oder die Anzahlkonzentration.

Zur Prüfung des Gegenstromreaktors beim Einsatz zur Oxidation von Aerosolen organischen Ursprungs sollen verschiedene Aerosole eingesetzt werden. Die Art der eingesetzten Aerosole soll sich weitgehend an der Praxisrelevanz eines potentiellen Einsatzgebietes des Gegenstromreaktors orientieren. Die Techniken zur Erzeugung von Prüfaerosolen sollen im wesentlichen durch ein Nachvollziehen natürlicher Partikelentstehungsmechanismen vollzogen werden. Das bereitgestellte Aerosol sollte über einen längeren Zeitraum eine konstante Zusammensetzung aufweisen, um einen stationären Betrieb des Reaktors zu ermöglichen. Zur Generierung von Prüfaerosolen werden in Literatur verschiedene Verfahren aufgezeigt [20],[21]. Um staubförmige Aerosole zu erzeugen muß von einem Dispergieren von Feststoff-Haufwerken ausgegangen werden, wobei es sich bei den Partikeln um feste Partikel handelt, die überwiegend unregelmäßig und von der Kugel stark abweichende Formen aufweisen und polydispers in Luft verteilt werden sollen. Die Größenordnung des damit abzudeckenden Partikelbereiches liegt grundsätzlich über ca 1 µm und geht bis zu großen Partikeln von 100 µm Durchmesser.

Partikel können auch durch Kondensation von Dämpfen entstehen. Kondensiert dieser Dampf auf bereits vorhandenen kleinsten Partikeln (sog. Kondensationskeimen), spricht man von gesteuerter Kondensation. Bei ausreichend hoher Übersättigung kann die Bildung von Partikeln auch ohne Vorhandensein von Kondensationskeimen spontan und ungesteuert einsetzen. Bei vielen natürlichen Partikelentstehungsprozessen (Smog, Verbrennung, Verschmelzung) wird die, für die Kondensation notwendige Übersättigung der Dampfphase, durch eine chemische Reaktion ausgelöst [22]. Der übliche Partikelbereich variiert stark nach dem jeweiligen Verfahren und liegt bei ca. 0,01 bis 100 µm. Im Rauchgas liegen feste und flüssige Partikel aus Aggregaten vieler Primärpartikel vor, die im allgemeinen polydispers verteilt sind.

8.2 Räucheraerosole

Zur Erzeugung eines Räucheraerosoles wurde der Vorgang einer ungesteuerten Kondensation nach einer chemischen Reaktion gewählt. Als Reaktion dient dazu in Anlehnung an die Praxis der Räucherung die Verschwelung von organischem Material. Ein Vorteil einer solchen Aerosolerzeugung liegt auch in einer einfachen Handhabung der Versuchsanordnung.

Zur Raucherzeugung wurde eine Apparatur errichtet, in der es möglich ist, geeignetes organisches Material bei konstantem Luftdurchsatz zu verschwelen. In einem Borosilikatglasrohr mit einem Innendurchmesser von 30 mm wurden die Holzspäne, Hackschnitzel oder Preßlinge eingefüllt und durch eine offene Flamme gezündet. Nach dem Zünden des Rohrinhaltes wird der Raucherzeuger mit dosierter Druckluft aus dem Hausnetz durchströmt. Das eingefüllte Material verschwelt im Glasrohr unter starker Rauchentwicklung. Dieser Rauch besitzt eine dichte weiße Färbung und einen starken Geruch, der dem geräucherter Fleischwaren vergleichbar ist. Die kondensierbaren Bestandteile des Rauches werden vor der Beimischung in den Zustrom des Reaktors in einem wassergekühlten Wärmetauscher verflüssigt (Abb. 8-1). Eine nachfolgende Waschflasche dient als Kondensatabscheider, aus der ein definierter Volumenstrom trockenen Rauchgases mit Umgebungstemperatur am Aerosolinjektor dem Hauptluftstrom zudosiert wird. Das Rauchgas weist nach dem Auskondensieren noch eine vergleichbare Färbung auf, wie frischer, feuchter Rauch. Er stammt von den enthaltenen nicht kondensierbaren Partikeln, die im Gasstrom verbleiben. Der Niederschlag in der Waschflasche erweist sich dabei als eine zweiphasige Flüssigkeit. Der größere Anteil in der Flasche ist eine wässrige Lösung, die zweite Phase ist von teeriger Konsistenz, ähnlich dem Niederschlag an den Wänden einer Räucherammer. Das Aerosol entspricht etwa demjenigen, das aus einer Räucherammer ausgeblasen wird.

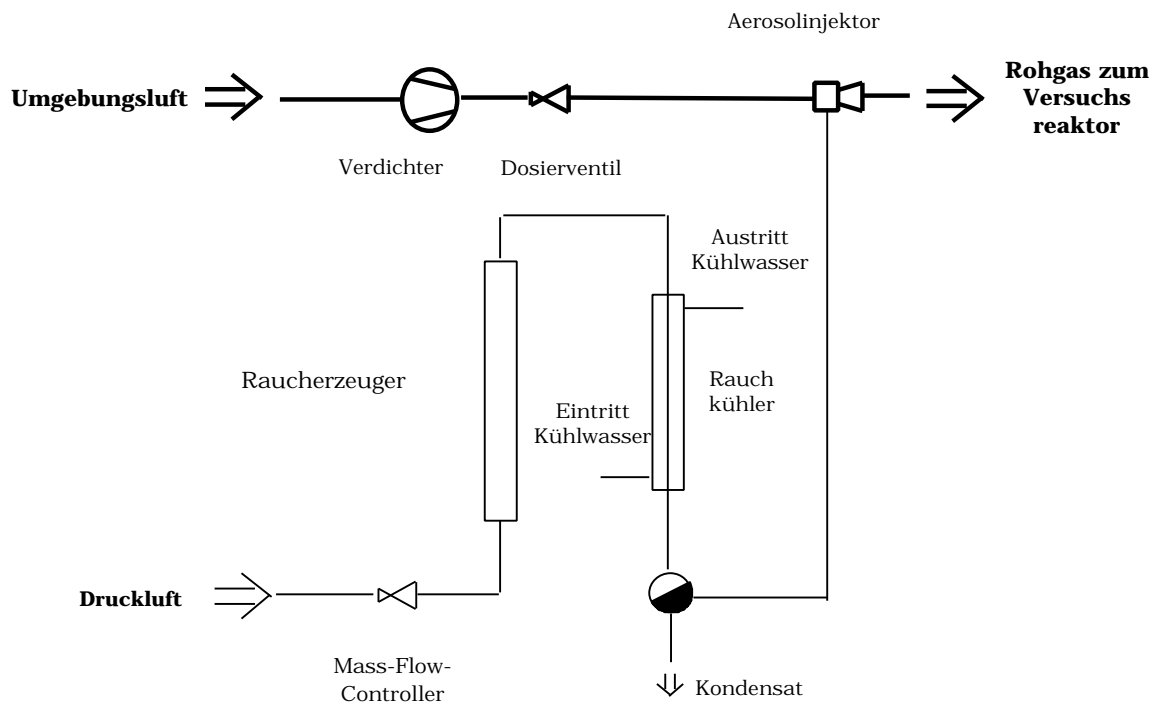


Abb. 8-1: Fließbild des Raucherzeugers

8.3 Aerosole aus Feinstäuben

Der andere Entstehungsmechanismus von Aerosolen ist die Zerkleinerung größerer Strukturen. Hierzu zählt das Versprühen von Flüssigkeiten, das Dispergieren vorgegebener Haufwerke und das Zerkleinern und Dispergieren von Feststoffen. Da bei allen Zerkleinerungs- und Dispergierungsvorgängen mit abnehmender produzierter Partikelgröße der notwendige Energieaufwand beträchtlich steigt, sind die so erzeugbaren Partikelgrößen nach unten begrenzt.

Zur Untersuchung der Oxidation von Feinstäuben im Gegenstromreaktor wird das Funktionsprinzip der Dispergierung von Feststoffen in Luft angewandt, da dieses den Entstehungsmechanismus technischer Aerosole gleicht. Die zu dispergierenden Stäube (z.B. Holzstaub) weisen je nach Stoffart, Korngröße, Feuchtegehalt und anderen Parametern unterschiedliche Eigenschaften auf. Zur Herstellung eines Aerosoles aus Feststoffhaufwerken werden grundsätzlich zwei Vorgänge ausgeführt.

1. Dosieren
2. Dispergieren

Das Dosieren bedeutet hier die Einstellung eines Feststoff-Massenstromes. Durch das Dispergieren soll das Haufwerk in einem vorgegebenen Gasstrom zerteilt werden. Eine Desagglomeration ist erforderlich, wenn die Feststoffteilchen durch Haftkräfte verschiedener Art (Flüssigkeitsbrückenkräfte, van-der-Waals-Kräfte, Kräfte auf Grund elektrostatischer Aufladung) in Form von Agglomeraten gebunden sind. Feinkörnige Pulver agglomerieren besonders stark [23]. Die Agglomeration kann im trockenen und feuchten Haufwerk stattfinden, wenn agglomerierende

Bedingungen vorherrschen, aber auch in der Dispersion, beim Zusammenstoß von Partikeln, die im Gas dispergiert sind. Auch natürliche Aerosole sind agglomeriert. Zur Desagglomeration wird die Beanspruchung der Agglomerate durch die Strömungskräfte des strömenden Gases oder durch die Wandreibung in einem Strömungskanal ausgenutzt. Beanspruchungen in geradlinigen Rohrströmungen von unterhalb von 100 m/s genügen jedoch nur zur Auflösung von groben Agglomeraten [24].

Zur mechanischen Dosierung des einzusetzenden Feststoffes wird ein Präzisions-Schneckendosierer der Firma Gericke, Rielasingen vom Typ GLD 86 eingesetzt. Das volumetrische Dosierprinzip dieses Dosierapparats setzt eine fließfähiges Gut voraus, wie es z.B bei dem Holzstaub des Typs Jeluxyl HAHO 120/f, Fa. Jelu der Fall ist. Die Dosierleistung dieses Gerätes beträgt 0,05 - 0,9 l/h. Bei einer Schüttdichte des verwendeten Holzstaubes von 220 g/l entspricht dies einem Massenstrom von 10 - 200 g/h. Konstruktionsbedingt arbeitet der Dosierapparat bei Umgebungsdruck. Am Auslaufrohr des Dosierapparats wird deshalb mittels eines Unterdruckes der Feststoffstrom abgesaugt. Der Unterdruck wird dabei durch einen Staubinjektor (Abb. 8-2) nach DIN ISO 5011 [25] erzeugt. Diese Dispergierdüse wird zur anschließenden Dispergierung des Feststoffes eingesetzt, der die luftgetragenen Partikelagglomerate durch hohe Scherkräfte auflöst. Diese Scherkräfte entstehen dabei durch eine quer zur Hauptstromrichtung angeordnete Bohrung, in der Druckluft mit hoher Geschwindigkeit den Partikel-/Luftstrom schneidet. Das so erzeugte polydisperse Aerosol weist nun neben Einzelpartikeln auch noch Partikelagglomerate auf, welche im Staubinjektor nicht vollständig dispergiert wurden.

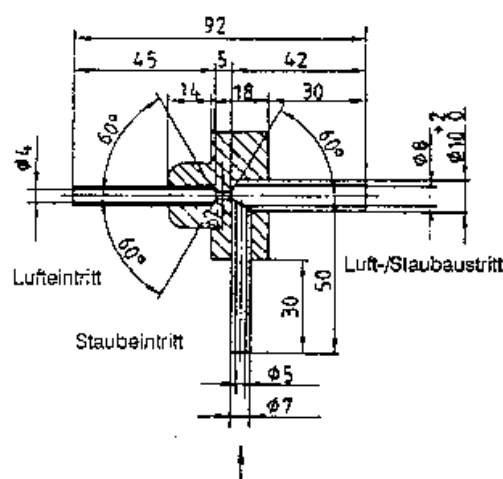


Abb. 8-2: Staubinjektor nach DIN ISO 5011

Partikelagglomerate sowie größere Partikel, die zwar im Aufgabegut vorhanden, aber im zu erzeugenden Aerosol unerwünscht sind, können mit Hilfe eines Zyklons aus dem Aerosol abgeschieden werden, so daß man einen gasgetragenen Partikelstrom erhält, in dem die Partikel weitgehend als polydisperse Feinstfraktion des Ausgangsstoffes vorliegen. Der Luftstrom durch den Zyklon besteht dabei aus einem Hauptluftstrom vom Lufteintritt des Staubinjektors und einem Nebenluftstrom, der am Luft-/Staubeintritt des Injektors eingesaugt wird und beträgt bei einem Vordruck von 6 bar am Lufteintritt des Staubinjektors ca. 18 m³/h. Die Auslegungsdaten des Zyklons (Abb. 8-3) betragen demnach wie folgt:

Luftstrom durch den Zyklon	18 m ³ /h
Beladung am Eintritt	0,5 - 11 g/m ³
Beladung am Austritt	max. 250 mg/m ³
Grenzkorn der Emission	7,5 µm
Feststoffdichte der Partikel	1,5 g/cm ³

Tab. 8-1: Auslegungsdaten des Zyklons zu Klassierung der Staubfracht (Beispiel: Zellulose Jelucell HM 30)

Zur Berechnung des Zyklons wurde mit einem Auslegungsprogramm am IMVT Stuttgart [26] durchgeführt. Das Programm erlaubt es, aus der Korngrößenanalyse des Aufgabegutes und den Mengenströmen durch den Zyklon das Grenzkorn und die daraus resultierende Staubbiladung am Zyklonaustritt zu berechnen. Abb. 8-4 zeigt die Rückstandssummenkurve des Aufgabegutes (*Rauf*) und die der Emission aus dem Zyklon (*Rfein*). Zusätzlich ist noch der Wirkungsgrad der Trennleistung (*etaf*) des Zyklons über der Partikelgröße abgetragen. Bei der vorgegebenen Staubfracht werden keine Partikel mit einem größeren Durchmesser als 10 µm vom Zyklon emittiert.

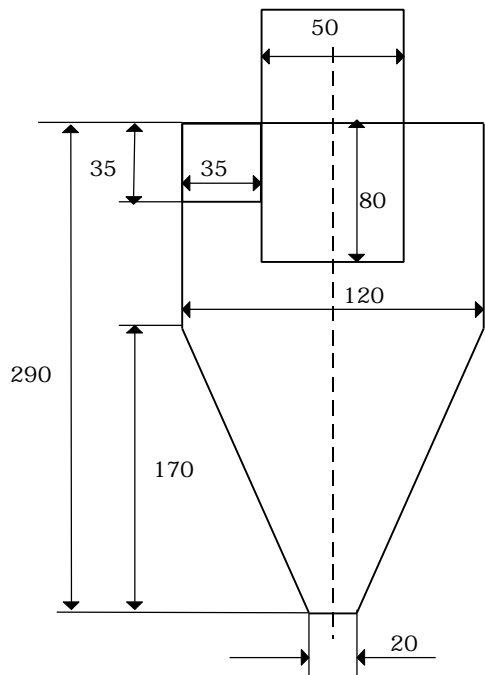


Abb. 8-3: Zyklon zur Klassierung der Staubfracht nach der Dispergierung

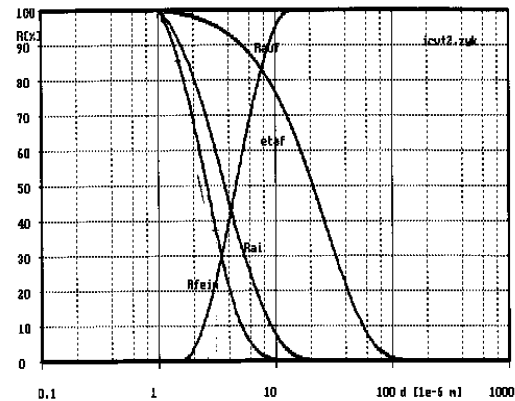


Abb. 8-4: Rückstandskurve des Zyklons am Beispiel von Jelucel HM 30

Dosierapparat, Staubinjektor und Zyklonklassierer bilden zusammen eine funktionelle Einheit eines Aerosolgenerators, der eine Erzeugung von Prüf-aerosolen mit unterschiedlichen Stäuben und verschiedener Beladung erlaubt. Das erzeugte Aerosol wird durch einen Aerosolinjektor in der Zuleitung zum Gegenstromreaktor dem Hauptluftstrom beigemischt (Abb. 8-5). Durch eine Dosierung des Luftstromes vom Gebläse ist es möglich, die Staubbeladung im Zulaufrohr durch Verdünnung des im Aerosolgenerators erzeugten Staubaerosols einzustellen. Durch eine Bypassregelung unmittelbar am Reaktoreintritt ist es möglich, den Volumenstrom und damit die Flächenbelastung des Reaktors zu regeln.

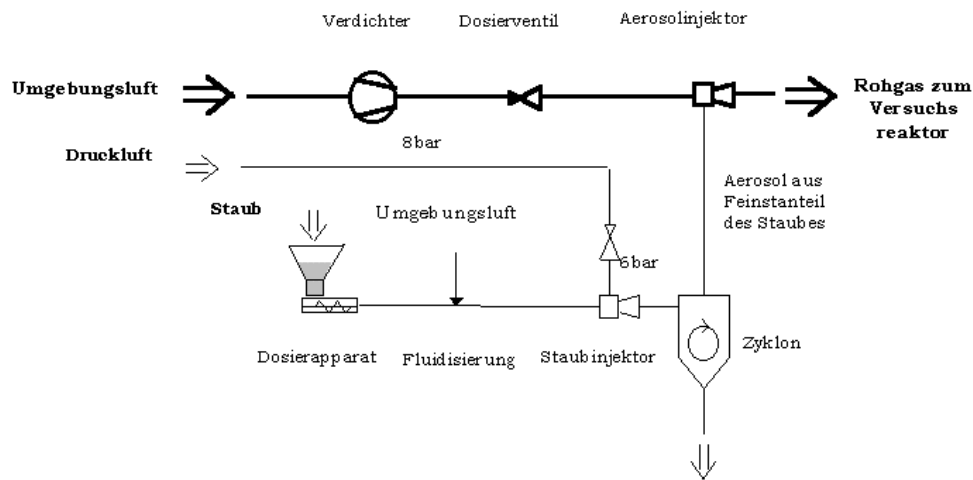


Abb. 8-5: Verfahrensfliessbild des Aerosolgenerators

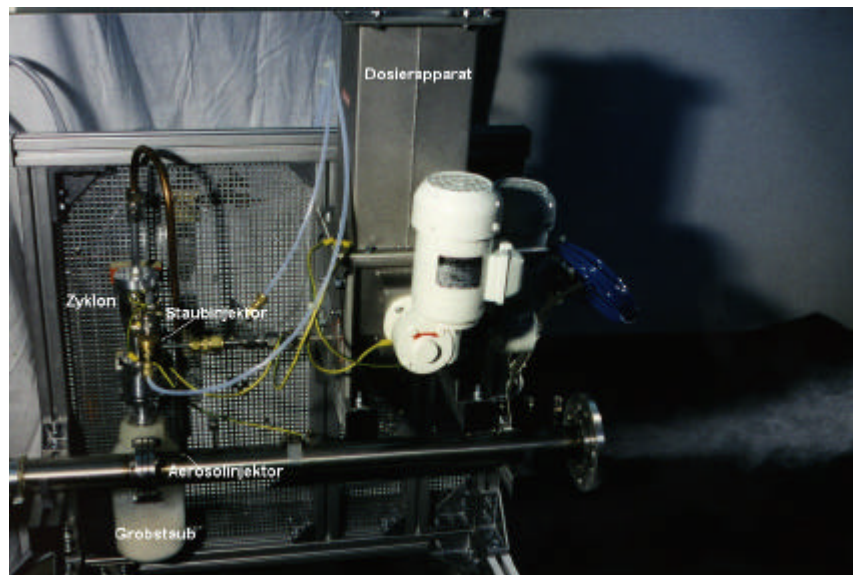


Abb. 8-6: Aerosolgenerator zur Dispergierung von Stäuben

8.3.1 Feinstäube

Holzstäube sind eine häufige Abluftproblematik in holzverarbeitenden Betrieben in Handwerk und Industrie. Dabei werden besonders die Hartholzstäube als karzinogen eingestuft. Auf Grund der Materialeigenschaften von Hartholz (Buche, Eiche) entstehen bei der Verarbeitung dieser Materialien besonders feinkörnige Stäube. Zur Aerosolherzeugung soll deshalb ein Hartholzstaub mit definierter Korngrößenverteilung dienen. Der eingesetzte Hartholzstaub (Jeluxyl HAHO 120/f, Fa Jelu, Rosenberg) findet Anwendung als Füllstoff und als Prüfstaub zu allgemeinen Filtertestzwecken. Hartholzstaub ist gut fließfähig und weist einen geringen Ascheanteil auf (Tab. 8-2). Die Fließfähigkeit wird bei dem eingesetzten Hartholzstaub durch ein breites Kornspektrum gewährleistet. Das Prüfaerosol soll im Rohgas keine Partikel aufweisen, die größer als $10\ \mu\text{m}$ sind. Korngrößenanalysen des Aufgabegutes im Dosierer, sowie des Feinstaubes im Prüfaerosol, die an einem Raster-Elektronen-Mikroskop und an einem Durchlicht-Mikroskop

durchgeführt wurden, zeigten, daß der gewählte Versuchsaufbau nach Abb. 8-5 geeignet ist, die Grobfraktion $> 10 \mu\text{m}$ im Aufgabegut des Hartholzstaubes abzuscheiden und ein Prüfaerosol zu erzeugen, daß den gestellten Anforderungen entspricht..

Schüttgewicht	220 g/l
Ascheanteil	$< 0,5 \%$
Mittlere Korngröße Aufgabegut d_{50A}	75 μm
Feuchtegehalt	$< 10\%$

Tab. 8-2: Stoffdaten Holzmehl Jeluxyl HAHO 120/f

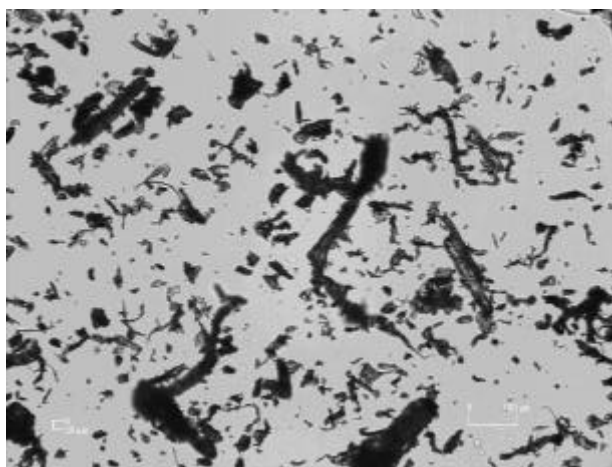


Abb. 8-7: Korngrößenanalyse des Aufgabegutes Jeluxyl HAHO 120/f

8.3.2 Meßtechnik bei Räucheraerosolen und Feinstäuben

Um Partikelbelastungen der Luftströme messen zu können, wird ein Meßverfahren mit Planfiltern nach VDI 2066 [27] (Abb. 8-8) eingesetzt. Das Verfahren ist zur Messung geringer Staubgehalte geeignet und in der Praxis im Konzentrationsbereich von $0,1$ bis 20 mg/m^3 erprobt. Für den Konzentrationsbereich von $0,1$ bis 5 mg/m^3 werden insbesondere an die Wägung erhöhte Anforderungen gestellt. Die mit diesem Verfahren erhaltenen Staubproben können bei Einsatz geeigneter Meßfilter nach der gravimetrischen Auswertung zur Bestimmung von Staubinhaltsstoffen mit geeigneten Verfahren analysiert werden (z.B. FTIR). Das System ist für Probengasvolumenströme bis $4 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgelegt. Grundlage des Verfahrens ist die isokinetische Entnahme eines Teilgasvolumenstromes aus dem Hauptvolumenstrom, die Abscheidung des im Teilgasvolumenstrom enthaltenen Staubes durch ein Rückhaltesystem, sowie die zeit- und volumenbezogene gravimetrische Ermittlung der Staubmasse. Durch die konstruktive Gestaltung des Planfilterkopfes kann eine weitgehende Gleichverteilung des Staubes auf dem Planfilter erreicht werden. Dies kann im Zusammenhang mit einer Bestimmung der Staubinhaltsstoffe im Anschluß an die gravimetrische Auswertung von Bedeutung sein. Das Rückhaltesystem setzt sich zusammen aus dem Einlaufkonus (A), dem Filterhalter (B) mit Meßfilter sowie dem Abschlußgehäube (C). Die eigentliche Sonde (Durchmesser 2 mm) ist mit der Eintrittsöffnung zur Strömungsrichtung im Hauptvolumenstrom angeordnet. Sonde und Rückhaltesystem sind zur

Minimierung von Partikelverlusten durch Anlagerungen [28] in den Meßleitungen mit einer 250 mm langen Messingrohrleitung mit dem gleichen Durchmesser wie die Sonde verbunden.

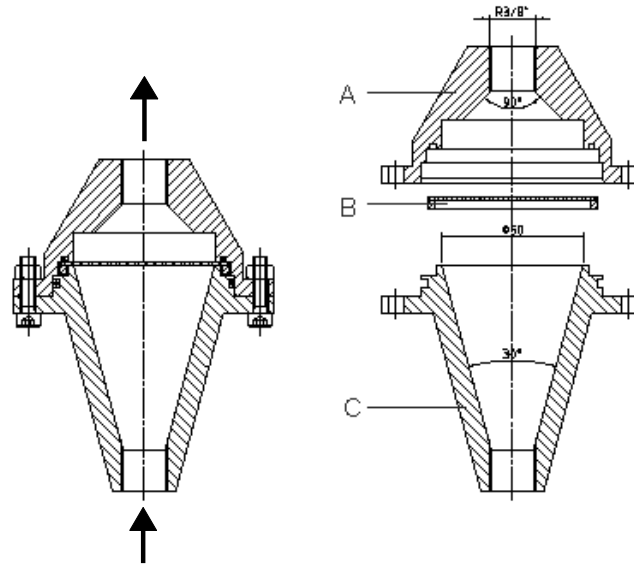


Abb. 8-8: Planfiltermeßgeräte nach VDI 2066

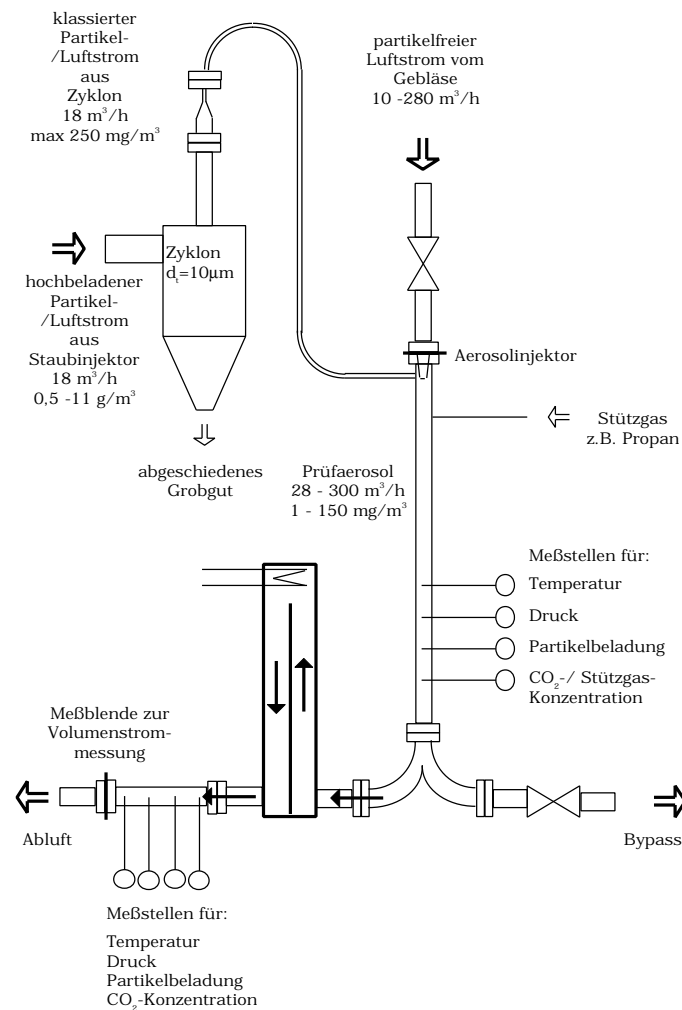


Abb. 8-9: Meßstellen an der Versuchsapparatur

Auf Grund der zu erwartenden kleinen Partikelgrößen wurden Filtermembranen aus Cellulose-Nitrat (Porengröße 0,1 µm) und Faserfliesfilter aus Glasfaser (Faserdurchmesser 1,2 µm) und Quarzfaser (Faserdurchmesser 1 µm) eingesetzt. Filtermembranen aus Cellulose-Nitrat wurden für die Versuche mit dem Räucheraerosol eingesetzt, da dieser Filtertyp die geringste Porengröße aufweist. Quarzfaserfilter sind sehr temperaturstabil und können zur thermischen Analyse der Staubbeladung auf bis zu 850 °C erhitzt werden.

Die Filterbeladung wurde durch eine Differenzwägung der Proben auf einer Analysenwaage (Ablesegenauigkeit 1/100 mg) bestimmt. Alle Filter mußten vor der Wägung elektrostatisch entladen werden, da durch das Handling, sowie durch den eigentlichen Meßvorgang diese teilweise erheblich statisch aufgeladen wurden. Zum Potentialausgleich wurden sie einen längeren Zeitraum auf einer geerdeten, leitfähigen Unterlage abgelegt.

Eine optische Auswertung der Filterproben erfolgte an einem Lichtmikroskop und an einem Raster-Elektronen-Mikroskop (REM). Zur olfaktrometrischen Umsatzmessung der Räucheraerosole wurden Gasproben aus Zu- und Ablauf des Reaktors gezogen und am Institut für Siedlungswasserbau der Universität Stuttgart ausgewertet. Die Korngrößenanalysen des jeweiligen Aufgabegutes wurden an einem

Lichtmikroskop des Institutes für Mechanische Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart ausgeführt.

8.4 Bioaerosole

Das Spektrum an Bioaerosolen ist sehr breit, es reicht in der Molekülebene von Proteinen, die als Allergene in der Lage sind Allergien auszulösen, über Mikropartikel wie Viren und Bakterien, bis hin zu Blütenpollen, die im Größenbereich von 5 - 50 μm liegen. Ihr Gefährdungspotential ergibt sich aus der Gefahr der Deposition solcher Partikel in den Atemwegen. Keimfähige Bioaerosole finden dort ein ideales Wachstumsklima, um sich zu vermehren. Diese Aerosole weisen daher ein teilweise erhebliches gesundheitsgefährdendes Potential auf. Pathogene Keime sollten daher bei Versuchen im Technikumsmaßstab mit noch unbekanntem Deaktivierungsrate nicht eingesetzt werden. Hefen und Schimmelpilze haben einen Durchmesser von 5 - 10 μm und sind von runder Form. Die geringe Größe der Bakterien (1 μm) bedingt ein großes Oberflächen/Volumenverhältnis. Sie haben deswegen eine wesentlich höhere Wachstumsgeschwindigkeit als Hefen und Schimmelpilze. *Escherichia coli* teilt sich z. B. unter optimalen Bedingungen alle 20 - 30 min. Vegetative Bakterien, Hefen und Schimmelpilze (einschließlich der Schimmelpilzsporen) sowie Viren werden bereits durch Temperaturen um 100 °C abgetötet. Wesentlich hitzeresistenter sind bakterielle Endosporen der Gattung *Bacillus* und *Clostridium*, die in der Regel erst bei Temperaturen über 100 °C deaktiviert werden können.

Zur Ermittlung der Keimtötung von Bioaerosolen im Gegenstromreaktor durch eine Kurzzeitwärmebehandlung wurden zur Vermeidung gesundheitlicher Gefährdungen Hefen der Gattung *Saccharomyces cerevisiae* (Backhefe) eingesetzt. Als Trockenbackhefe mit einer Hefetrockensubstanz von 92 - 96% wird sie durch weitgehenden Wasserentzug der Frischhefe hergestellt [29]. Es handelt sich dabei um ein granuliertes oder pulverförmiges Produkt, das unter Vakuum oder Schutzgas abgefüllt und verpackt wird. Die nur geringe Restmenge an Wasser erlauben es, die Trockenbackhefe ohne Aktivitätsverlust mindestens 1 Jahr zu lagern. Trockenbackhefe wird hauptsächlich in Bäckereien tropischer und subtropischer Gebiete und der häuslichen Bäckerei eingesetzt. Die eingesetzte Trockenbackhefe stammt aus der Abluft aus dem Trocknungsprozeß bei der technischen Herstellung bei den Deutschen Hefewerken, Hamburg. Unter dem Lichtmikroskop zeigen sich bei einer Vergrößerung von 1:400 Hefeagglomerate in der Größenordnung von wenigen μm bis 250 μm . Dieses Kornspektrum gleicht dem des eingesetzten Holzstaubes. Zur Erzeugung eines Feststoffaerosols aus Hefen kann man daher Trockenbackhefen auf dem gleichen Wege Dosieren, Dispergieren und Klassieren wie den Holzstaub.

8.4.1 Meßtechnik bei Bioaerosolen

Die Abluftbeladung wird bei keimfähigen Bioaerosolen nicht als Gewichtsanteil der Partikel pro Volumeneinheit angegeben, sondern in Kolonie-Bildenden-Einheiten (KBE) pro Volumeneinheit. Isokinetisch abgezogene Teilvolumenströme aus Roh- und Reingas werden mittels einer Meßgaspumpe einen definierten Zeitraum durch eine Membranfilter (1,2 μm) gesaugt. Diese Membranfilter werden anschließend auf befeuchteten Nährkartonscheiben in Petrischalen abgelegt und bei 30 °C im Brutschrank bebrütet. Spätestens nach 2 Tagen bilden die Hefen auf den Selektiv-

medien der Schaufus-Pottinger-Nährkartonscheiben (Dr. Möller & Schmelz GmbH, Göttingen) sichtbare blaugüne Kolonien. Die Anzahl dieser Kolonien auf dem Membranfilter wird durch Auszählen bestimmt. Die Anzahl dieser Kolonie-Bildenden-Einheiten bezogen auf den abgesaugten Teilvolumenstrom stellt das Meßergebnis dar. Vollumsatz ist erreicht, wenn auf der Reingasseite keine keimfähigen Hefen mehr vorhanden sind.

9 Versuchsergebnisse zu Räucheraerosolen

9.1 Partikelumsätze der Räucheraerosole

Um den Einfluß des Temperaturverlaufes und der Verweilzeit der Abluft auf das Umsatzverhalten von Räucheraerosolen im Gegenstromreaktor zu untersuchen, wurden Versuche mit unterschiedlichen Temperaturniveaus und Durchsätzen durchgeführt. Als Bauform kam dabei der Reaktortyp 1 zum Einsatz. Aufgrund der Bauform des Reaktors 1 ist eine Demontage der Einbauten bei im Betrieb unlöslichen Anlagerungen möglich. Die Partikelbeladungen auf Roh- bzw. Reingasseite wurde durch eine gravimetrische Auswertung der Filterproben bestimmt. Es wurden dabei Partikelbeladungen von max. 50 mg/m^3 auf der Rohgasseite untersucht, die Flächenbelastung des Reaktors mit großer Spaltweite wurde im Bereich $0,22$ bis $0,67 \text{ kg/m}^2\text{s}$ variiert.

Das Umsatzverhalten bezgl. der partikelförmigen Beladung des Räucheraerosoles im Gegenstromreaktor kann anhand der Färbung von Planfilterproben sichtbar gemacht werden. Abb. 9-1 zeigt, daß das Reingas bei der Wahl einer geeigneten Temperatur im Reaktor keine sichtbare Färbung mehr aufweist. Die sichtbaren Partikel werden im Reaktor umgesetzt. Nicht umsetzbare Partikel, z.B. aus dem Ascheanteil des organischen Schwelgutes, sind in so geringer Konzentration vorhanden, daß sie mit bloßem Auge nicht erkennbar sind. Die Färbung ist ein Maß für die Partikelbeladung der Filtermembran.

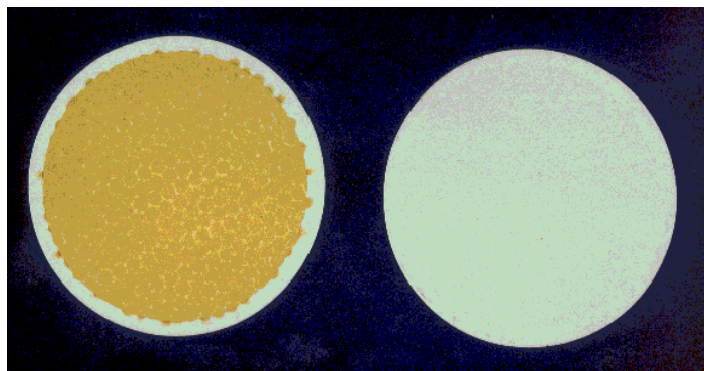


Abb. 9-1: Räucheraersol, Planfilterproben, links Rohgas, rechts Reingas.

Die Sichtbarmachung der einzelnen Partikel aus dem Räucheraerosol kann auf Grund ihrer geringen Größe nur begrenzt mit einem Raster-Elektronen-Mikroskop erreicht werden. Verglichen wurden dazu eine Filterprobe von der Rohgasseite Abb. 9-2 mit einer Probe von der Reingasseite Abb. 9-3. Die Partikelgrößen, die dabei gefunden wurde, sind im Bereich um 50 nm und somit kleiner als die Porengröße der Cellulose-Nitrat-Membran mit 100 nm . Die Abscheidung der Partikel auf der Membran findet somit nicht nur auf der Oberfläche der Membran sondern besonders auch in der Tiefe statt. Aus diesen Grund erkennt man auf der Oberfläche in Abb. 9-2 nur wenige Partikel, die an der faserartigen Struktur der Membran anhaften. Eine Schwierigkeit solcher Aufnahmen ist, das die organischen

Partikel vor dem Hintergrund der ebenfalls organischen Membran nur gering kontrastieren. Eine stärkere Vergrößerung als die hier gezeigte (1 : 20 000) ist mit diesem Hintergrund nicht sinnvoll.

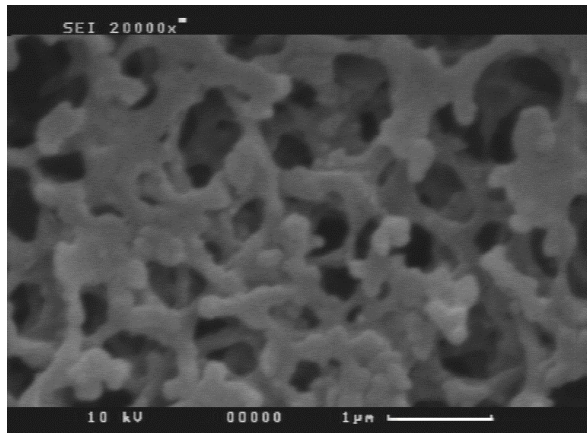


Abb. 9-2: Räucheraerosol,
Membranfilter rohgasseitig

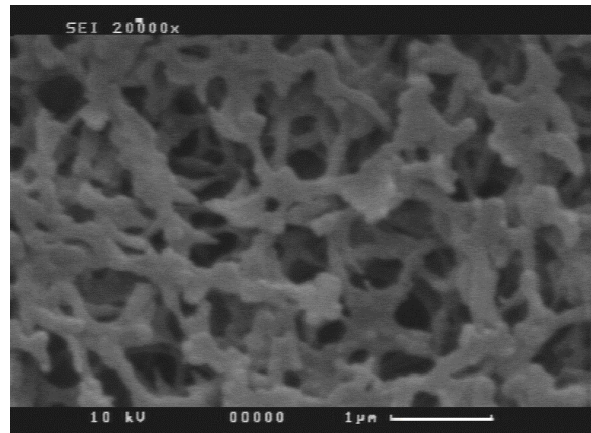


Abb. 9-3: Räucheraerosol,
Membranfilter reingasseitig

Die in Abb. 9-4 - Abb. 9-6 dargestellten Ergebnisse für den Umsatz partikelförmiger Verunreinigungen X_P in Räucheraerosolen wurden am Reaktor 1 gemessen. Zur Beladungsmessung wurden Membranfilter aus Cellulose-Nitrat eingesetzt. Als Schwelgut dienten Preßlinge, die Versuchsdauer mit Aerosoleinspeisung betrug ca. 2 h. Die Meßdauer wurde abhängig von der Beladung des Rohgases im Bereich zwischen 20 bis 30 min gewählt. Die Streuung der Meßwerte wird maßgeblich durch Wägungenauigkeiten verursacht, die durch eine nur geringe Gewichtszunahme der Filtermembranen durch die Messung bedingt sind. Bereits bei einer Filterbeladung von ca. 2 mg kollabierten die 50 mm großen Filterpapiere. In den Versuchen wurden daher die Filter geringer beladen, so daß Gewichtsunterschiede zwischen unbeladenen und beladenen Filtern, insbesondere auf der Reingasseite, von wenigen 1/10 mg auszuwerten waren. Weitere Fehlerquellen sind die Volumenstrommessung durch die Planfilterköpfe, die im Versuch mit Schwebekörperdurchflußmesser erfolgte. Ablagerungen in den Meßleitungen, die in der Lage sind, das Meßergebnis zu verfälschen, waren nur in sehr geringem Umfang erkennbar. Die Kopftemperatur stellt im Betrieb des Reaktors mit elektrischer Stützheizung die höchste Temperatur im Reaktor dar. Die örtliche Temperatur im Katalysator ist abhängig von der Reaktorhöhe, Durchsatz und der Kopftemperatur. Das Temperaturprofil im Reaktor ist gerade auch bei Räucheraerosolen von der adiabaten Temperaturerhöhung des Luftstromes abhängig. Es konnten adiabate Temperaturerhöhungen im Kopf des Reaktors von bis ca. 40 K im Versuch mit Räucheraerosolen gemessen werden. Die Konzentration der Kohlenwasserstoffe betrug ca. 1000 ppm Propanäquivalent. Bei dem Reaktor mit großer Spaltbreite (Reaktor 1) reicht dieser Wert für einen anzustrebenden autothermen Betrieb allerdings nicht aus. Der axiale Temperaturgradient am Reaktoreintritt für Vollumsatz der Edukte am oberen Rand der inerten Zone bestimmt die notwendige Bauhöhe des Reaktors und läßt sich nach folgender Gleichung bestimmen:

$$\left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=0} = \frac{g_z \cdot c_{pG} \cdot \Delta T_{ad}}{I_{eff}} \quad (9-1)$$

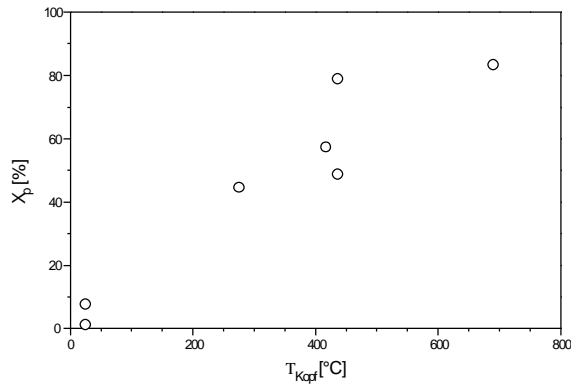


Abb. 9-4: Umsatz der Rauchpartikel
 $g_z = 0,20 \text{ kg/m}^2\text{s}$

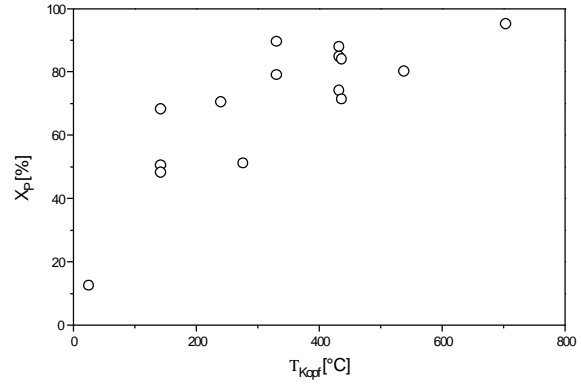


Abb. 9-5: Umsatz der Rauchpartikel
 $g_z = 0,37 \text{ kg/m}^2\text{s}$

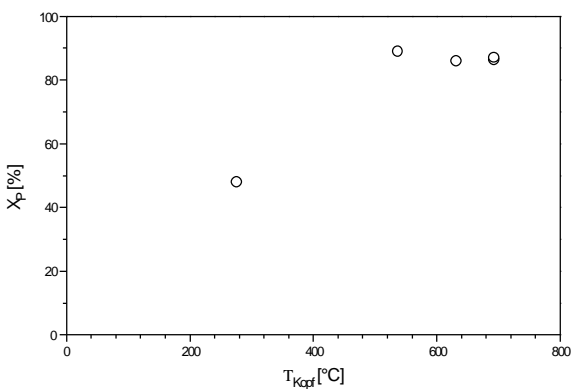


Abb. 9-6: Umsatz der Rauchpartikel
 $g_z = 0,60 \text{ kg/m}^2\text{s}$

9.2 Oxidation der enthaltenen Kohlenwasserstoffe (FID-Messungen)

Räucheraerosole enthalten als Verbrennungsprodukte aus der Verschmelzung Kohlenwasserstoffe (KW) in unterschiedlichen Verbindungen. Aus der Literatur [30] sind dabei über 200 verschiedene Formen von KW in Räucheraerosolen bekannt. Die Kohlenwasserstoffe sind im Räucheraerosol in der Gasphase, aber auch in der Partikelphase enthalten. Auf dem Strömungsweg vom Rauchrohr zum Gegenstromreaktor können gasförmige Bestandteile des Rauchgases auf den bereits gebildeten Partikeln adsorbieren, oder die Kohlenwasserstoffe bilden durch einen Kondensationsvorgang im Gasstrom neue Partikel.

Mit dem Flammen-Ionisations-Detektor kann der Anteil an Gesamt-Kohlenwasserstoffen gemessen werden und somit das Umsatzverhalten des Reaktors bestimmt

werden. Für die Messung des Umsatzverhaltens des Reaktors wurde das Meßgerät auf den Anzeigewert von Propan geeicht. Zur Messung wurde ein Teilvolumenstrom vor (Rohgas) und hinter (Reingas) dem Reaktor analysiert. Für die relative Betrachtung des Umsatzes der Kohlenwasserstoffe, der auf die Rohgaskonzentration bezogen ist, spielt der absolute Anzeigewert eine untergeordnete Rolle. Die Angaben des Gasgehaltes beziehen sich auf das Eichgas Propan und sind somit als Propan-äquivalent des Gasanteils der im Gasstrom enthaltenen Kohlenwasserstoffe zu verstehen. Im stationären Betrieb des Reaktors mit großer Spaltbreite wurden mehrere Messungen zum Umsatzverhalten von Räucheraerosolen gezogen. Abb. 9-7 und Abb. 9-8 zeigen als Beispiel die Ergebnisse einer Meßreihe. Die Mittelwerte aus Versuchen zur Ermittlung der Kohlenwasserstoff-Umsätze bei verschiedenen Temperaturen sind in den Abb. 9-9 - Abb. 9-11 dargestellt. Das Umsatzverhalten der meßbaren Kohlen-Wasserstoff-Verbindungen gleicht dem der partikelförmigen Verunreinigungen von Räucheraerosolen. Der maximale Umsatz bei den gemessenen Temperaturprofilen lag bei über 98%.

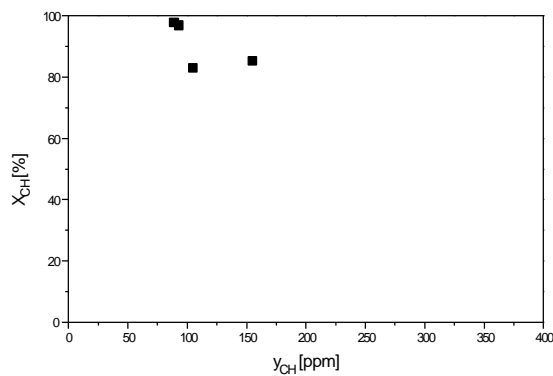


Abb. 9-7: Umsatz der Kohlenwasserstoffe, $g_z = 0,20 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $T_{Kopf} = 437^\circ\text{C}$

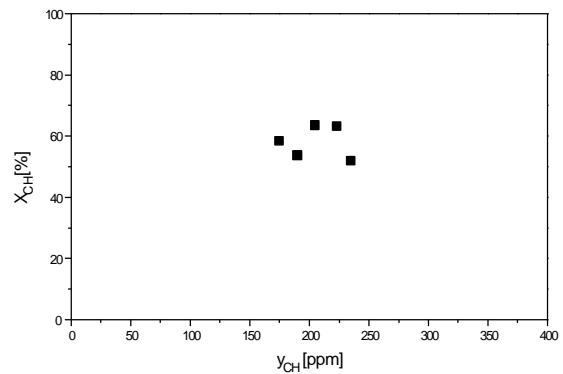


Abb. 9-8: Umsatz der Kohlenwasserstoffe, $g_z = 0,37 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $T_{Kopf} = 437^\circ\text{C}$

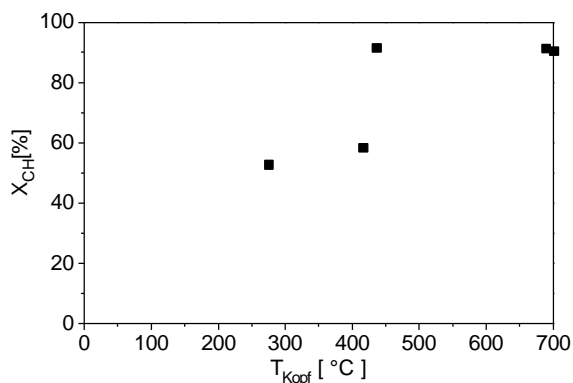


Abb. 9-9: Umsatz der Kohlenwasserstoffe $g_z= 0,20 \text{ kg/m}^2\text{s}$

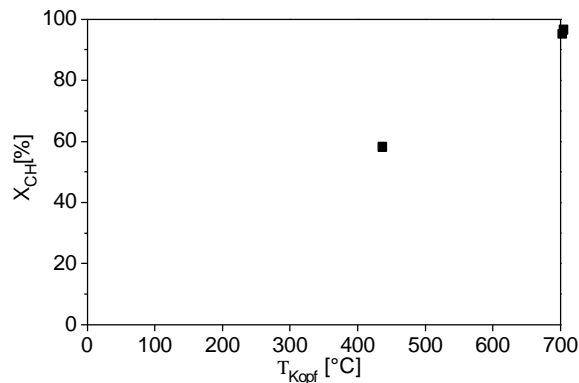


Abb. 9-10: Umsatz der Kohlenwasserstoffe $g_z= 0,37 \text{ kg/m}^2\text{s}$

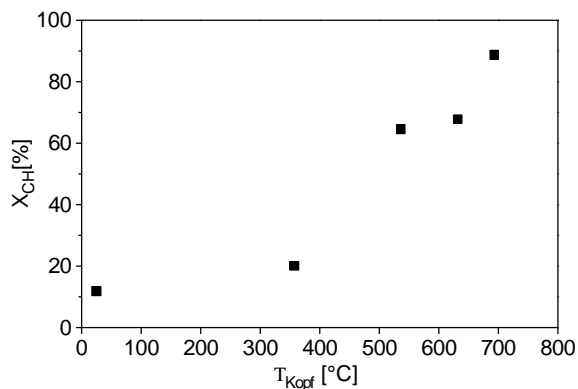


Abb. 9-11: Umsatz der Kohlenwasserstoffe $g_z= 0,60 \text{ kg/m}^2\text{s}$

9.3 Oxidation der Geruchsstoffe

Bei der Abluftproblematik der Räucheraerosole ist neben einer Beseitigung von gasförmigen und partikelförmigen Verunreinigungen aus dem Gasstrom eine Behandlung der Geruchsemission notwendig. Bei den Geruchsemissionen handelt es sich bei Räucheraerosolen in der Regel um geringfügige Konzentrationen organischer Verbindungen. Durch die thermische, bzw. katalytische Behandlung des Abluftstromes können solche Verunreinigungen ebenso beseitigt werden, wie andere organische Verunreinigungen. Auf Grund der guten Wärmeintegration ist der Gegenstromreaktor für den Einsatz zur Beseitigung von Verunreinigungen mit geringem Brennwert, aber hoher Geruchsintensität besonders geeignet.

Zur Messung dieses Umsatzverhaltens wurde die Olfaktometrie angewandt. Die Olfaktometrie ist ein Meßverfahren, bei dem die Wirkung des Geruchs auf den Menschen ermittelt wird. Der Geruchssinn ist äußerst empfindlich und reagiert oft bereits auf Konzentrationen geruchsintensiver Stoffe, die unterhalb der analytischen Nachweisgrenze liegen. Als Schlüsselgröße für Geruchsbestimmungen wird die Geruchskonzentration angesehen. Die Geruchskonzentration einer zu messenden Luftprobe wird durch Verdünnung mit Neutralluft bis zur Geruchsschwelle bestimmt. Die Geruchsschwelle gibt die Konzentration an Geruchsstoffen an, die bei 50% eines Probandenkollektivs zu einem Geruchseindruck führt. Die Geruchskonzentration ist an der Geruchsschwelle definitionsgemäß 1 GE/m^3 . Aus

den Volumenströmen von Luftprobe und Neutralluft ergibt sich der Zahlenwert der Verdünnung, die Geruchskonzentration in GE/m³. Der unterschiedlichen Verteilung der Geruchsempfindlichkeit in der Bevölkerung wird dadurch Rechnung getragen, daß durchschnittlich empfindliche, getestete Riecher als Probanden eingesetzt werden.

Als Probenmessung wurde ein Versuch ausgewählt, bei dem ein hoher Partikel- und Kohlenwasserstoffumsatz gemessen werden konnte. Der Umsatz der Geruchsstoffe aus der olfaktometrischen Messung betrug für den aufgeführten Versuch 99,2%, wobei die dem Reaktor zugeführten Geruchsstoffe, die als räuchereotypisch von den Probanden erkannt wurden, auf der Reingasseite nicht gemessen werden konnten. Die Geruchsempfindung "Chlor" reingasseitig wird mit chlorhaltigen Verunreinigungen in den verschwelten Preßlingen erklärt.

g_z [kg/m ² s]	T_{kopf} [°C]	X_{PF} [%]	X_{CH} [%]	Z₅₀* (Rohgas) [GE/m ³]	Z₅₀ (Reingas) [GE/m ³]	X_{ol} [%]
0,22	690,2	83,4	91,2	13 008	108	99,2

Tab. 9-1:olfaktrometrische Messung an Räucheraerosolen

Geruchseindrücke: der Probanden an der Geruchsschwelle:

Rohgas: "Räucherei"

Reingas: "Chlor"

9.4 Ablagerungen bei Räucheraerosolen

In Abb. 9-12 ist das Abscheideverhalten des Reaktors ohne Beheizung dargestellt. Insgesamt wurde das Abscheideverhalten des Reaktors bei Unbeheiztem Reaktor (d.h. ohne Temperatureinfluß) in mehreren Versuchen bei unterschiedlichen Durchsätzen gemessen. Für den Reaktor 1 mit großer Spaltweite und längsgeknickten Strukturen wurden dabei für Räucheraerosole aus Preßlingen Abscheidegrade < 15% gemessen.

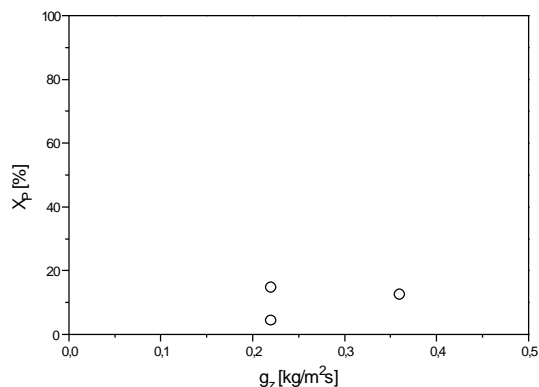


Abb. 9-12: Räucheraerosol, Abscheidung im kalten Reaktor 1

Auf Grund der geringen Partikelkonzentration und der geringen Abscheiderate des Reaktors ohne Beheizung konnten beim Öffnen des Reaktors nur geringe Ablagerungen an den Einbauten und Trennwänden festgestellt werden. Im Langzeitbetrieb mit Räucheraerosolen ist jedoch besonders im inerten Teil des Reaktors mit Verschmutzungen zu rechnen. Im technischen Einsatz des Reaktors bei der Abluftreinigung soll ein kontinuierlicher Betrieb mit möglichst langen Wartungsintervallen gewährleistet werden können. Um Ablagerungen auf den Trennwänden, sowie auf den metallischen Strukturen zu beseitigen, mußte deshalb eine Strategie entwickelt werden, um den Reaktor ohne Demontage der Einbauten zu reinigen. Möglich ist dies, indem nach einer gewissen Betriebszeit ein Reinigungsschritt zwischengeschaltet wird. In diesem Reinigungsschritt wird die Fußtemperatur des Reaktors durch ein im Zulauf montiertes elektrisches Heizregister angehoben. Zusätzlich wird mit der Stützheizung im Kopf des Reaktors eine vollständige Durchheizung bis hin zu den Ein- und Austrittsöffnungen erreicht. Die Temperatur, die notwendig ist, um die Ablagerungen von Räucheraerosolen durch eine Verbrennung an den Oberfläche des Reaktors zu beseitigen, wurde im Versuch mit ca. 500 °C ermittelt.

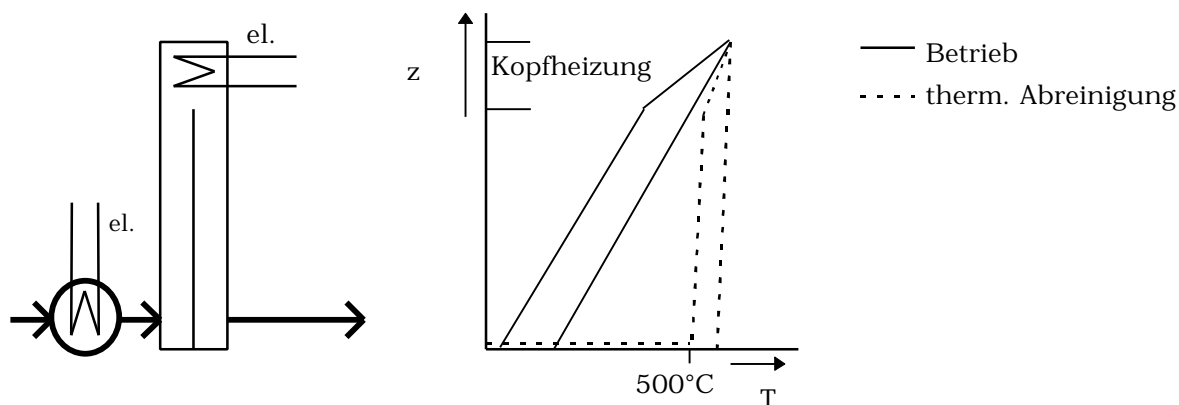


Abb. 9-13: Reinigungsschritt zur thermischen Beseitigung von Ablagerungen

9.5 Bewertung für Räucheraerosole

Es konnten mit der Methode der gravimetrischen Beladungsmessung von Planfiltern Partikelumsätze im Gegenstromreaktor von bis zu 96,5% gemessen werden.

Gleichzeitig findet abhängig von der Verweilzeit bei Temperaturen im Kopf des Reaktors ab 400 °C ein Umsatz der Kohlenwasserstoffe statt. Olfaktrometrische Messungen ergaben, daß die im Rauch enthaltenen als besonders intensiv empfundenen Geruchsstoffe durch die thermisch katalytische Abluftbehandlung praktisch vollständig umgesetzt werden.

10 Versuchsergebnisse zu Feinststäuben

Das Umsatzverhalten von luftgetragenen Feinststäuben unter dem Einfluß des Temperaturverlaufes und der Verweilzeit der Abluft im Gegenstromreaktor wurde am Beispiel eines Hartholzstaubes (Jeluxyl HAHO 120/f) untersucht. Als Bauform kam dabei, wie bei den Räucheraerosolen der Reaktortyp 1 zum Einsatz. Ausschlaggebend war auch hier die Möglichkeit der Demontage der Einbauten bei im Betrieb unlöslichen Anlagerungen. Die Partikelbelastungen auf Roh- bzw. Reingasseite wurden durch eine isokinetische Teilvolumenstromentnahme aus der Hauptluftleitung und eine anschließende gravimetrische Auswertung der Filterproben bestimmt. Als Filter wurden Glasfaserfilter oder Quarzfaserfilter verwendet. Es wurden dabei Partikelbelastungen bis zu 300 mg/m^3 auf der Rohgasseite untersucht, die Flächenbelastung des Reaktors mit großer Spaltweite wurde im Bereich zwischen $0,2$ und $5,5 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ variiert.

10.1 Ablagerungen bei Feinststäuben

Bei Feinststäuben mit dem in Kapitel 5 angebenen Korngrößenspektrum werden ein beträchtlicher Teil der Partikel auf Ihrem Weg durch den Reaktor bereits im kalten Zustand abgeschieden. Die Ablagerungen sind als eine feine Staubschicht auf den Trennwänden und auf den Strukturen erkennbar. Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit werden mehr Partikel abgeschieden. Als maßgebliche Ursache für diesen Abscheidungs Vorgang sind Agglomeration von Partikeln in der Gasphase durch Turbulenz im Reaktor zu nennen. Bei einer Feststoffbelastung der Abluft von 50 mg/m^3 und einer mittleren Korngröße von $7 \mu\text{m}$ mit einer Dichte von 1 g/cm^3 entspricht dies einer Partikelbelastung von $278 \cdot 10^9$ Partikeln/ m^3 . In einem so hoch beladenen Abluftstrom agglomerieren Partikel in der Gasphase zu größeren Gebilden und werden somit leichter durch Schwerkrafteinflüsse abgeschieden. Diese Vorgänge sind besonders in Bereichen höchster Turbulenz (Umlenkzone im Kopf) ursächlich für trägheitsbedingte Abscheidungen.

Im Reaktor der Bauform 1 wurden zur Ermittlung dieser Einflüsse das Abscheideverhalten in einem breiter Bereich an Querschnittsbelastungen gemessen. Wie in Abb. 10-1 gezeigt nimmt mit zunehmender Querschnittsbelastung und damit mit steigender Turbulenz im Reaktor die Abscheiderate bei den gemessenen Feinststäuben zu. Für eine technische Umsetzung dieses Apparatekonzeptes ist somit die Gestaltung besonders der hochbeladenen, aufströmenden Kanäle besonders wichtig. Bei der Gestaltung der Kanäle steht die Verschmutzungsempfindlichkeit durch Ablagerungen, dem gesteigerten Wärmeübergang bei größerer Turbulenz gegenüber. Für ein tragfähiges Konzept muß ein Optimum der geometrischen Gestaltung gesucht werden, das die Anforderungen in geeigneter Weise miteinander verbindet.

Eine periodische Abreinigung von organischen Ablagerungen ist auf dem gleichem Weg wie bei Räucheraerosolen möglich (Kapitel 9.4). Versuche am Beispiel Holzstaub zeigten, daß Oberflächenablagerungen aus organischen Feinststäuben bei 600°C oxidiert werden können.

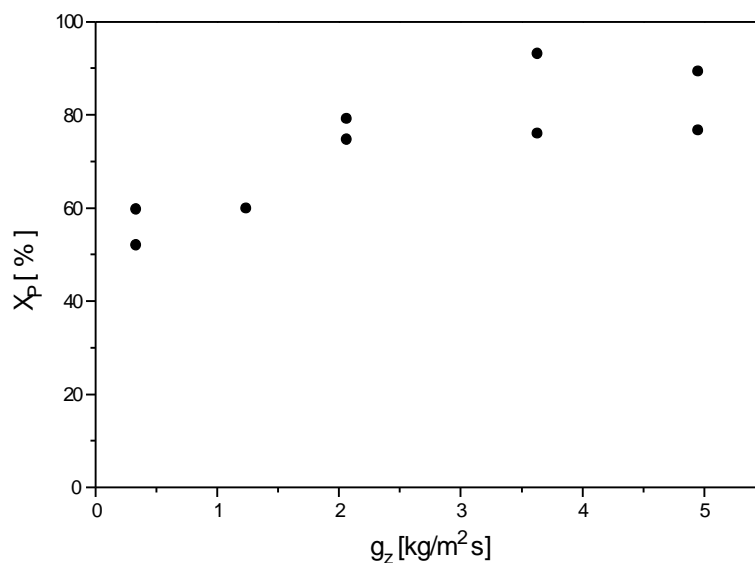


Abb. 10-1: Feinststaub, Abscheidung im Reaktor

10.2 Partikelumsätze der Feinststäube

Die Versuche zu den in Abb. 10-2 dargestellten Ergebnissen für den Umsatz partikelförmiger Verunreinigungen X_P in Feinststäuben wurden am Reaktor 1 (große Spaltbreite) durchgeführt. Zur gravimetrischen Messung der Staubbiladung wurden Membranfilter aus Glasfaser verwendet. Quarzfaserfilter wurden auf Grund ihrer hohen Temperaturbeständigkeit nur zu Analysezwecken der Filterbeladung eingesetzt. Als Prüfstaub kam Hartholzstaub (siehe Kapitel 8) zum Einsatz. Bei diesem Feinststaub wurden Rohgas-Beladungen bis 200 mg/m³ untersucht. Die Meßdauer der isokinetischen Absaugung wurde zwischen 20 bis 40 min gewählt. Die Streuung der Meßwerte ist geringer als bei Räucheraerosolen, da höhere Staubgehalte in der synthetischen Abluft möglich sind und somit auch höhere Filterbeladungen gemessen werden können. Ablagerungen in den Meßleitungen, die in der Lage sind, das Meßergebnis zu verfälschen wurden, durch geringe Querschnitte der Meßleitungen und durch kurze Leitungslängen begrenzt. Bei den Feinststäuben konnte auch bei Vollumsatz auf Grund ihres geringen Brennwertes keine adiabate Temperaturerhöhung gemessen werden, die Kopftemperatur des Reaktors stellt somit im Betrieb mit elektrischer Stützheizung die höchste Temperatur der Abluft im Reaktor dar. Bei der Abluftreinigung von Feinststäuben im Korngrößenbereich zwischen 1 - 10 µm im Gegenstromreaktor bilden sich in allen Bereichen des Reaktors Ablagerungen. Ein regelrechtes Zuwachsen des Reaktors durch diese Ablagerungen konnte nicht beobachtet werden. Um die Ablagerungen so gering als möglich zu halten, wurden die Versuche zur thermischen Umsetzung von Partikeln im Gegenstromreaktor bei einer geringen Flächenbelastung von $g_z = 0,37$ kg/m² s durchgeführt. Die Umsetzung der Partikel beginnt bereits bei ca 300 °C im Kopf des Reaktors. Dies wird besonders deutlich an der Färbung der Planfilter, (Abb. 10-3). Bei dem vorliegenden Kornspektrum des Hartholzstaubes ist bei einer Kopftemperatur des Gegenstromreaktors von 330 °C eine rußförmige Verfärbung der Filterproben aus dem Reingas erkennbar. Bei gleichbleibendem Reaktordurchsatz steigt mit zunehmender Temperatur im Kopf der gravimetrisch meßbare Umsatz an Partikeln deutlich an. Die rußförmigen Verfärbungen der Filterproben, die jeweils bei ansonsten identischen Versuchs-

bedingungen genommen wurden, verblassen deutlich. Bei Temperaturen im Kopf des Reaktors um 600 °C sind keine sichtbaren Verfärbungen der Proben mehr erkennbar. Bei diesen Temperaturen konnten auch gravimetrisch keine partikelförmigen Verunreinigungen mehr im Reingas gemessen werden. Zur Ermittlung der Partikelgrößen der Filterbeladungen wurden auch Aufnahmen an einem Raster-Elektronen-Mikroskop gemacht (Abb. 10-4 - Abb. 10-8). Der Rohgasfilter ist stark beladen, erkennbar ist die flockige Form der Partikel, es hat sich durch die Messung ein Filterkuchen aufgebaut. Bei Abb. 10-5 ist bei optischer Betrachtung eine schwärzliche Verfärbung erkennbar, unter dem Mikroskop werden Partikelgrößen erkennbar, die denen im Rohgas gleichen. Die Partikel erfahren bei dieser Kopftemperatur nur an der äußeren Schicht eine beginnende Umsetzung. Deutlich kleinere Partikel sind bei einer Kopftemperatur von 590 °C im Reingas sichtbar. Ab 690 °C Kopftemperatur können keine Partikel mehr auf der Oberfläche der Filterproben gefunden werden

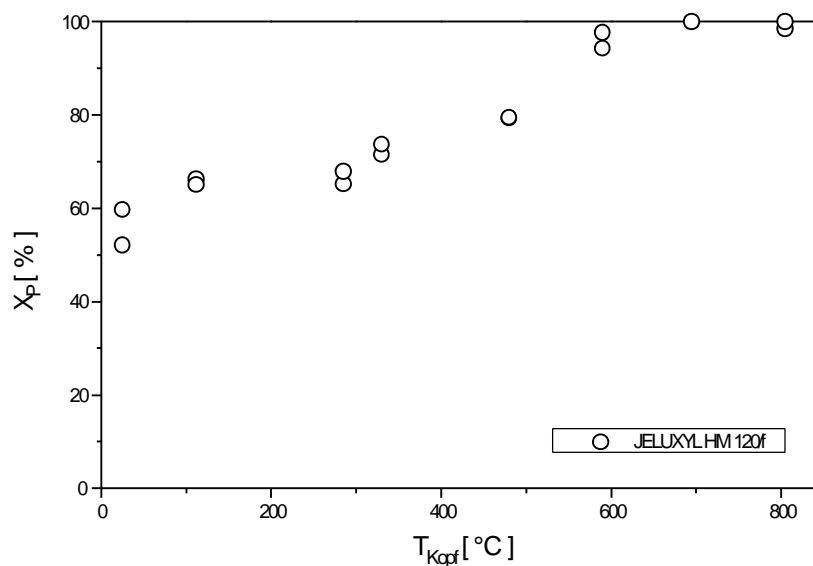


Abb. 10-2: Feinststäube, Partikel-Umsatz im Gegenstromreaktor 1,
 $g_z = 0,37 \text{ kg/m}^2\text{s}$

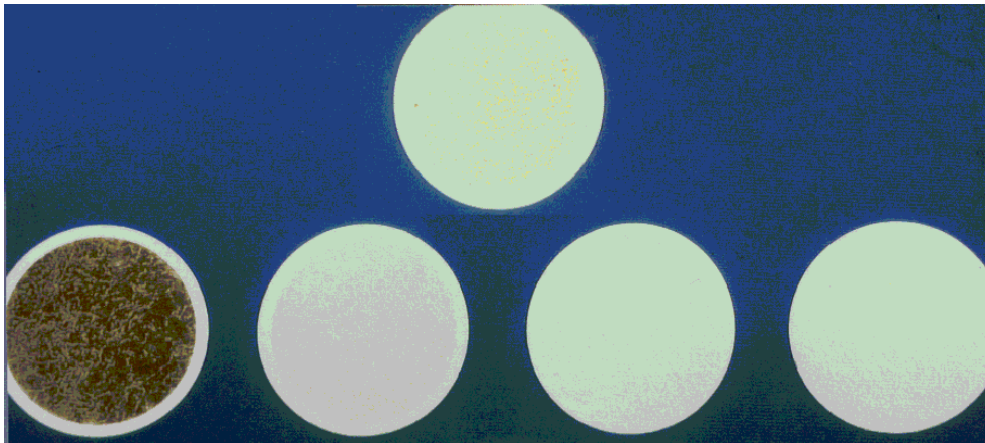


Abb. 10-3: Feinststäube, Planfilterproben, Jeluxyl HAHO 120/f, $g_z=0,20 \text{ kg/m}^2\text{s}$,
oben Probe Rohgas,
unten Proben im Reingas, v. l. n. r.: 480 °C, 590 °C, 690 °C, 805 °C.

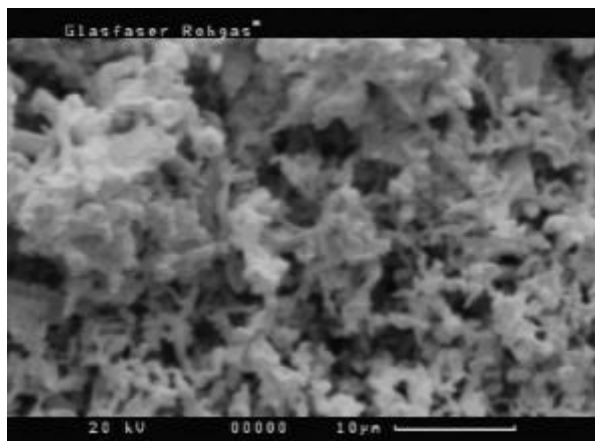


Abb. 10-4: Planfilterprobe,
Jeluxyl HAHO 120/f,
Rohgas

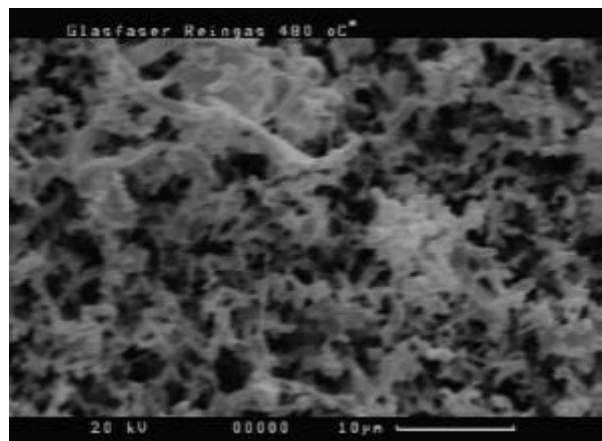


Abb. 10-5: Planfilterprobe,
Jeluxyl HAHO 120/f,
Reingas,
 $g_z = 0,37 \text{ kg/m}^2\text{s}$,
 $T_{\text{kopf}} = 480 \text{ °C}$

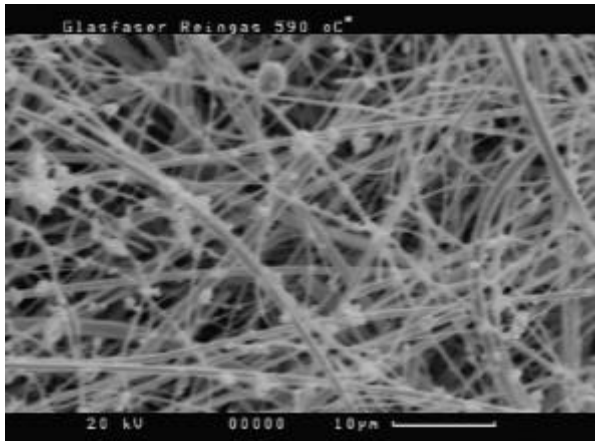


Abb. 10-6: Planfilterprobe,
Jeluxyl HAHO 120/f,
Reingas, $g_z = 0,37 \text{ kg/m}^2\text{s}$,
 $T_{\text{kopf}} = 590 \text{ °C}$

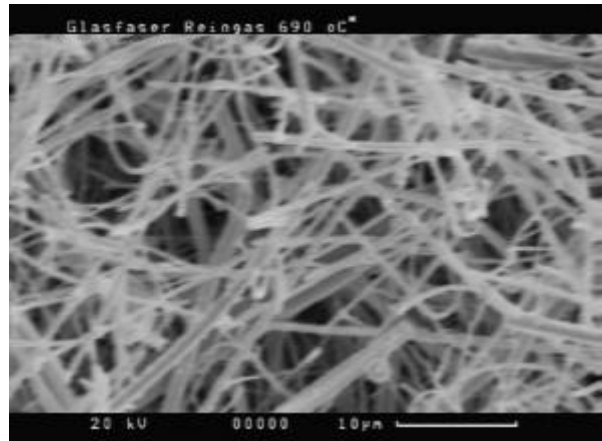


Abb. 10-7: Planfilterprobe,
Jeluxyl HAHO 120/f,
Reingas, $g_z = 0,37 \text{ kg/m}^2\text{s}$,
 $T_{\text{kopf}} = 690 \text{ °C}$

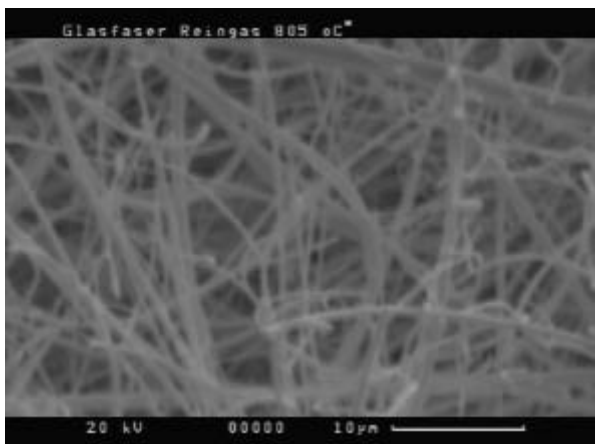


Abb. 10-8: Planfilterprobe,
Jeluxyl HAHO 120/f,
Reingas, $g_z = 0,37 \text{ kg/m}^2\text{s}$,
 $T_{\text{kopf}} = 805 \text{ °C}$

10.3 Bewertung für Feinststäube

Mit organischen Feinststäuben beladene Abluftströme können in einem Gegenstromreaktor bei geeigneter Temperatur praktisch vollständig umgesetzt werden. Dies konnte im Versuch anhand eines Hartholzstaubes mit Korngrößen $< 10 \mu\text{m}$, der in einem Aerosolgenerator in Luft fein dispergiert wurde, gezeigt werden. Luftgetragene Partikel scheiden sich aber teilweise vor Erreichen der Reaktionszone an den Trennwänden und den Einbauten des Reaktors ab. Das Abscheideverhalten des Reaktors des Typs 1 wurde im kalten Zustand bei verschiedenen Durchsätzen ermittelt. Bei dem vorliegenden Korngrößenspektrum der Partikel sind Trägheitskräfte maßgeblich für die Anlagerungen. Der Grad der Abscheidung steigt aus diesem Grund mit zunehmender Geschwindigkeit im Reaktor. Ab ca. 300 °C beginnt die thermische Umsetzung im Reaktor, erkennbar an einer

sichtbaren Rußbildung im Reingas. Bei Temperaturen über 600 °C konnten mit der Planfiltermethode keine Partikel mehr im Reingas gemessen werden. Hält man den Durchsatz fest und steigert man die Temperatur mit Hilfe der Stützheizung im Kopf des Reaktors, sinkt auf Grund der geringen Dichte des Gases die Verweilzeit der Partikel. Gleichzeitig steigt auf Grund der höheren Geschwindigkeit die trägheitskraftbedingte Abscheidung der Partikel im Reaktor. Bei Maximaltemperaturen im Reaktor über ca. 300 °C überlagern sich somit die zunehmende Abscheidung, die kürzere Verweilzeit und die beginnende Umsetzung der Partikel. Bei einer temperaturbeständigen Bauweise des Reaktors ist es im Versuch möglich, durch eine Strömungsumkehr mittels der eingebauten Stützheizung Anlagerungen bei 500 - 600 °C thermisch abzureinigen.

11 Versuchsergebnisse zu Bioaerosolen

11.1 Inaktivierungsrate für Hefe

Durch eine thermische Abluftbehandlung ist es möglich, luftgetragene Bioaerosole zu inaktivieren bzw. sie vollständig oxidativ zu CO_2 und H_2O umzusetzen. Das Temperaturprofil im Gegenstromreaktor muß im günstigsten Falle gerade so gewählt werden, daß durch die Kurzzeitwärmebehandlung der Abluft luftgetragene Keime sicher inaktiviert werden können. Da bei der Keiminaktivierung ein Katalysatoreinsatz nicht sinnvoll erscheint, wurden die Versuche mit einem Gegenstromreaktor durchgeführt, dessen Einbauten aus einem für die Totaloxidation inerten Material (Edelstahl) bestehen. Der Aufbau des Reaktors entspricht dem des Gegenstromreaktors 2, d.h. Spaltweite 2,5 mm mit gleichsinnigen Wendeleinbauten.

Zu Versuchszwecken wurde eine synthetische Abluft mit dispergierte Trockenhefen (Abb. 11-1) eingesetzt. Dabei wurden Rohgasbeladungen bis ca. $300 \text{ KBE}/\text{m}^3$ untersucht. Der Umgang mit lebensfähigen Keimen erfordert besondere Sorgfalt, da die gesamte Meßvorrichtung zur Keimzahlbestimmung in der Abluft steril gehalten werden muß.

Durch die Versuche soll am Beispiel Hefe gezeigt werden, welche Kombination von Temperatur und Verweilzeit von Bioaerosolen im Gegenstromreaktor notwendig ist, um Keime zu inaktivieren. Dazu wurden bei einer im Versuch eingestellten Querschnittsbelastung von $g_z = 0,60 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$ das Rohgas bei verschiedenen Kopftemperaturen durch den Reaktor geleitet. Um bei einer Versuchsreihe eine Kontamination der Reingasseite zu vermeiden, wurden der Reaktor vor der Durchströmung mit dem Bioaerosol mittels seiner eingebauten Kopfheizung bei einer Temperatur im Kopf um $500 \text{ }^\circ\text{C}$ weitgehend sterilisiert. Im Verlauf der Versuche wird die Kopftemperatur beginnend mit $500 \text{ }^\circ\text{C}$ schrittweise gesenkt, bis die Temperaturbehandlung keine ausreichende Inaktivierung der Biomasse bewirkt.

Trockenhefe gilt als besonders thermolabil, trotzdem können keimfähige Hefen bei einer Kopftemperatur unter $200 \text{ }^\circ\text{C}$ im Reingas nachgewiesen werden (Abb. 11-2) Bei $200 \text{ }^\circ\text{C}$ reicht auch die kurze Verweilzeit der Abluft in der heißen Zone aus, um vorhandene Keime sicher zu inaktivieren. Die Gesamtverweilzeit der Abluft im Apparat und dem eingestellten Durchsatz betrug nur $0,7 \text{ s}$.

Bei höheren Temperaturen wird die Biomasse zu Wasser und CO_2 oxidiert, und es ist auch gravimetrisch keine Beladung des Reingases mehr meßbar.

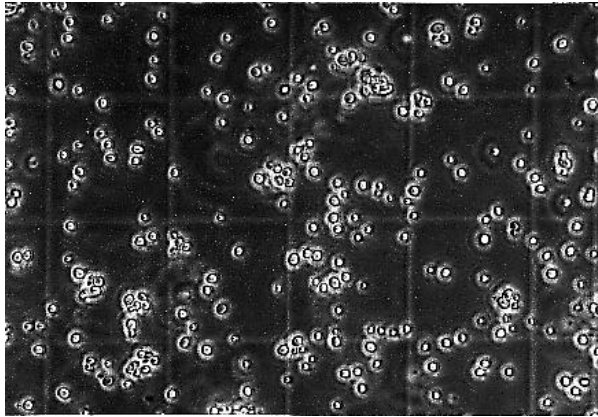


Abb. 11-1: Hefen *Saccharomyces cerevisiae*
(Linienabstand 50 μm)

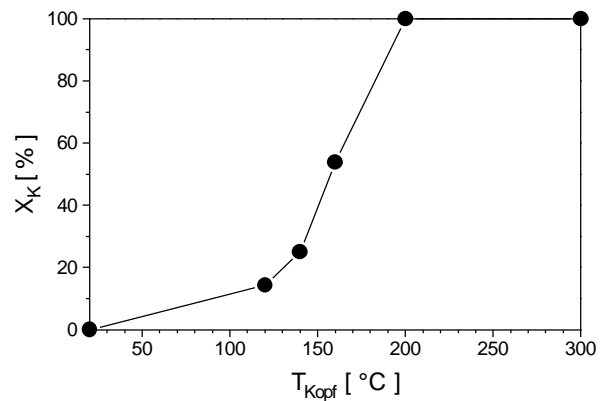


Abb. 11-2: Thermische Inaktivierung von
luftgetragenen Hefen im
Gegenstromreaktor

11.2 Bewertung für die Inaktivierung von Keimen

Durch eine thermische Behandlung von Bioaerosolen ist es möglich, lebensfähige Keime zu inaktivieren. Anhand eines Modellaerosoles auf der Basis von Hefen der Gattung *Saccharomyces cerevisiae* konnte gezeigt werden, daß bei der kurzen Verweilzeit der Abluft in der heißen Zone des Gegenstromreaktors eine sog. trockene Sterilisation von Luftströmen möglich ist. Beim Anfahren des Reaktors ist allerdings darauf zu achten, daß keine lebensfähigen Keime auf die Reingasseite des Reaktors gelangen. Werden lebensfähige Keime in den kälteren Bereichen der abströmenden Kanäle angelagert, können diese die gereinigte Abluft wieder kontaminieren.

12 Wirtschaftliche Betrachtung zum Verfahren

12.1 Beispiel 1: Abluftreinigung von Räucheranlagen

Bei der Räucherung von Fisch-, Fleisch- und Wurstwaren wird überwiegend das Kaltrauchverfahren angewandt, bei dem die zu behandelnde Ware bei Umgebungstemperatur in einer Räucherammer einer kleinen Konzentration von Rauch ausgesetzt wird. Der Räucherprozeß dauert je nach Ware zwischen 20 und 40 Stunden. Längere Einwirkzeiten bei kleineren Konzentrationen führen zu einer gleichmäßigeren Produktqualität. Die Abluft aus den Räucherammern muß entsprechend der TA-Luft gereinigt werden. Die Abluftkonzentration verändert sich während des Räuchervorgangs von anfänglich 400 mg/m^3 auf 100 mg/m^3 . Im konkreten Anwendungsfall einer Räucherei konnten die geforderten Abluftwerte mit konventionellen Verfahren (Elektrofilter und anschließende Abluftwäsche) nicht erreicht werden. Aus einem weiteren Anwendungsfall ist die katalytische Reinigung der Abluft einer Räucherammer bekannt. Dafür muß die Abluft auf eine Temperatur von $650 \text{ }^\circ\text{C}$ aufgeheizt werden. Durch die Oxidation der Abluft erfolgt eine geringe weitere Temperaturerhöhung um ca. $20\text{-}25 \text{ }^\circ\text{C}$ (je nach Prozeßstadium). Trotz einer Kopplung der Ströme über einen externen Wärmeübertrager und einer Vorwärmung der zu reinigenden Abluft muß die zu reinigende Abluft elektrisch um weitere $250 \text{ }^\circ\text{C}$ auf Reaktionstemperatur erhitzt werden.

Würde in diesem Fall ein katalytischer Gegenstromreaktor mit optimiertem Wärmerücktausch verwendet, so könnte dieser bei den vorliegenden Abluftkonzentrationen autotherm betrieben werden. In diesem Fall muß lediglich die Energie für das einmalige Aufheizen des Apparates aufgebracht werden.

Tab. 12-1 zeigt kalkulierte Verbrauchswerte für die beiden Verfahren.

Der Vergleich belegt, daß der Einsatz eines Gegenstromreaktors zur Abluftreinigung von Räuchereiabluft auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll ist. Durch die integrierte Wärmerückgewinnung im Gegenstromreaktor könnte der Energieverbrauch im betrachteten Anwendungsbeispiel auf unter 10% des bisherigen Energieverbrauchs reduziert werden. Die finanziellen Einsparungen bei den Energiekosten lassen auch eine geringe Amortisationszeit erwarten. Allerdings müssen die Kosten für eine kommerzielle Ausführung des Apparates einschließlich Regelung etc. noch ermittelt werden. Auch unter ökologischen Gesichtspunkten ist der Einsatz des Gegenstromreaktors für das genannte Anwendungsbeispiel sinnvoll. Tabelle 1 zeigt Werte für die CO_2 -Menge, die sich aus dem Stromverbrauch ergibt. Entsprechend der Reduzierung des Energiebedarfs reduziert sich auch die den Stromverbrauch verursachte CO_2 -Menge auf unter 10% des ursprünglichen Werts.

Konzentration Röchereiabluft	400 mg/m ³ C _{ges}	
Adiabate Temperaturerhöhung	25 °C	
Abluftstrom aus Röchieranlage	250 m ³ /h	
Dauer des Röchervorganges	40 h	
Heizleistung für Abgasbehandlung	11,2 kW	0,5 kW (nur Abstrahlverluste, Reaktor läuft autotherm)
Energiebedarf für die Abluftreinigung während eines Röchervorganges	447 kWh	20 kWh
Energiebedarf für Aufheizen des Apparates	0,8 kWh	10,5 kWh
Energiebedarf für Gebläseleistung während eines Röchervorganges	5,5 kWh	8,3 kWh
Zahl der Röchervorgänge pro Jahr und Anlage	156	
Energiebedarf pro Jahr für die Abluftreinigung	70793 kWh	6045 kWh
relativer Energiebedarf [%]	100 %	8,5 %
kalkulierter Strompreis für Elektroheizung	0,20 DM/kWh	
Jährliche Stromkosten für Abluftreinigung	<u>14.1599 DM</u>	<u>1.209 DM</u>
spez. CO ₂ -Emission bei der Stromerzeugung (Mittelwert Bundesgebiet)	0,55 kg CO ₂ / kWh el	
zusätzliche CO ₂ -Menge durch o.g. Stromverbrauch	<u>38,9 Tonnen</u>	<u>3,3 Tonnen</u>

Tab. 12-1: Beispiel 1: Abluftreinigung von Röchieranlagen

12.2 Beispiel 2: Abluftreinigung in der Holzverarbeitung

Bei der Holzverarbeitung, insbesondere bei der Bearbeitung von Harthölzern, wie Buche oder Eiche entstehen Feinststäube. Diese Feinststäube werden von der Senatskommission zur Prüfung gesundheitsgefährdender Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) als krebserzeugend eingestuft, andere

Holzstäube gelten als Verdachtsstoffe. Für solche Arbeitsplätze gilt ein TRK-Wert (Technische-Richt-Konzentration) von Holzstaub in der Atemluft am Arbeitsplatz von $2 \text{ mg/m}^3_{\text{Luft}}$ [31]. Dieser niedrige Grenzwert in geschlossenen Räumen ist nur durch eine voll funktionsfähige und sorgfältig geplante Absauganlage zu erreichen. Die dadurch anfallenden Luftströme sind je nach Entstehungsart sehr unterschiedlich mit Holzstaub beladen. Um bei der Abführung der Abluft in die Umgebung den nach der 7. BImSchV (Bundes-Immissions-Schutzgesetz) gültigen Emissionswert von $20 \text{ mg}_{\text{Staub}}/\text{m}^3_{\text{Luft}}$ einhalten zu können, wird die Abluft in Zyklonen und/oder Schlauchfiltern entstaubt. Sollen die gereinigten Abluftströme speziell während der Heizperiode aus Energiespargründen vollständig rückgeführt werden, muß der Grenzwert rückgeführter Luft von $0,1 \text{ mg}_{\text{Staub}}/\text{m}^3_{\text{Luft}}$ eingehalten werden. Mit filternden Anlagen gelingt es nicht, die besonders gefährlichen Partikel kleinsten Durchmessers aus der Abluft sicher zu entfernen. Dies berücksichtigt auch der Gesetzgeber, indem er an solche Anlagen eine dauernde Überwachung der Staubkonzentration in der Rückführung vorschreibt. Durch eine Klappenregelung wird bei Erreichen des Grenzwertes unzureichend gereinigte Abluft in die Umgebung entlassen. Solch aufwendige Anlagen können auf Grund der erheblichen Investitionskosten nur in größeren Betrieben zum Einsatz kommen. Bei kleineren und mittleren Betrieben wird deshalb meist auf eine energiesparende Rückführung verzichtet. Durch eine kombinierte Abluftreinigung von Holzstäuben im Zyklon mit nachgeschaltetem Gegenstromreaktor kann der geforderte Grenzwert zur Rückführung sicher eingehalten werden. Das untersuchte Anlagenkonzept eignet sich dabei besonders für kleinere und mittlere Betriebe. In einem Berechnungsbeispiel (Tab 12-2) wurde deshalb von den Verhältnissen eines mittelständischen Holzverarbeitenden Betriebes mit einer Gewerbefläche von 500 m^2 ausgegangen. Der Betrieb steht vor der Alternative die bestehende Entstaubungsanlage (Zyklon - Grenzwert der Emission $20 \text{ mg}_{\text{Staub}}/\text{m}^3_{\text{Luft}}$) durch einen Gegenstromreaktor mit Rückführung nachzurüsten. Dazu soll die im Zyklon grob gereinigte Luft vollständig einer Temperaturbehandlung im Gegenstromreaktor unterzogen werden. Da das Rohgas im Gegenstromreaktor nur eine geringe Staubbelastung aufweist, ist der durch die Verbrennung der organischen Partikel entstehende CO_2 -Anteil (40 ppm) im Reingas im Bereich natürlicher Konzentrationschwankungen. Der Gegenstromreaktor soll während der Arbeitszeit (10 Stunden pro Tag) mit einem mittleren Volumenstrom von $5000 \text{ m}^3/\text{h}$ betrieben werden. Während der restlichen Zeit des Tages bleibt das Temperaturprofil durch die stabile Schichtung im Reaktor ohne Durchströmung erhalten. Für diesen Stand-by-Betrieb müssen nur die Verluste über die Außenhaut des Gegenstromreaktors gedeckt werden. Während der arbeitsfreien Wochenenden soll die gasbefeuerte Stützheizung im Reaktor abgestellt werden, so daß der Apparat einmal pro Woche bei Arbeitsbeginn aufgeheizt werden muß. Die wirtschaftliche Bewertung für eine herkömmliche Anlage ohne Rückführung und für die erweiterte Anlage mit Rückführung wurde für eine Arbeitswoche während der Heizperiode erstellt. Die zur Abluftreinigung im Gegenstromreaktor eingesetzte thermische Energie dient daher gleichzeitig als Raumluftheizung, während im Falle ohne Rückführung erhitzte Raumluft abgesaugt wird, die durch kühle Frischluft ersetzt werden muß. Während der Heizperiode können so durch den Einsatz eines Gegenstromreaktors zur Abluftreinigung von Feinststäuben in dem als Beispiel herangezogenen Betrieb ca. 5000 DM Energiekosten pro Jahr eingespart werden. Zusätzlich werden gegenüber einer Entstaubungsanlage ohne Rückführung Abluft-Emissionen von besonders bedenklichen Feinststäuben vermieden. Das vorgestellte Beispiel kann auch auf andere Branchen mit ähnlichen Abluftproblematiken, wie Bäckereien, Betriebe in der Textil- oder Papierverarbeitung übertragen werden.

mittlere Staubkonzentration nach Grobentstaubungsanlage (Zyklon, Schlauchfilter)	10 mg/m ³	
Grenzwert für Rückführung (Eiche- und Buche in erheblichem Umfang)	0,1 mg/m ³	
mittlerer Abluftstrom (mittelständischer Betrieb)	5000 m ³ /h	
Betriebsdauer pro Tag	10 h/d	
Gesamtenergiebedarf für die Gebläseleistung pro Tag (Grobentstaubung im Zyklon $\Delta p=1000$ Pa, GSTR $\Delta p=1700$ Pa)	14 kWh	37,5 kWh
Energiebedarf für die Stützheizung des GSTR im Abluftbetrieb pro Tag (10 h/d), $\Delta T = 25$ K incl. Verluste	-	450 kWh
Energiebedarf für die Stützheizung des GSTR im Stand-by-Betrieb pro Tag (14 h/d)	-	24,5 kWh
Gesamtenergiebedarf für die Abluftreinigung pro Tag	14 kWh	512 kWh
Energiebedarf für das Aufheizen des Apparates (1 x pro Woche)	-	125 kWh
Gesamtenergiebedarf für die Abluftreinigung pro Woche (5 Arbeitstage)	70 kWh	2685 kWh
Wärmeverlust durch Luftwechsel pro Woche (während der Heizperiode, $\Delta T=20$ K)	1665 kWh	-
Energiebedarf der Raumluftheizung pro Woche (Gebäude: 500 m ² , $k=1,0$ W/m ² K, $\Delta T = 20$ K) inkl. Verluste durch Luftwechsel bzw. Eintrag durch GSTR	5065 kWh	903 kWh
Thermischer Gesamtenergiebedarf pro Woche (Heizung + Abluftreinigung)	5065 kWh	3400 kWh
Kosten der thermische Energie pro Woche (Heizperiode, Erdgas, 0,10 DM/kWh)	506,50 DM	340,00 DM
Elektrischer Gesamtenergiebedarf pro Woche	70 kWh	187,5 kWh

(Abluftreinigung)		
-------------------	--	--

Kosten der elektrischen Energie zur Luftförderung pro Woche (el. Strom 0,20 DM/kWh)	7,00 DM	18,75 DM
Gesamtenergiekosten pro Woche (Heizung + Abluftreinigung)	513,50 DM	358,80 DM
Gesamtenergiekosten in der Heizperiode (30 Wochen, Heizung + Abluftreinigung)	<u>15 405 DM</u>	<u>10 764 DM</u>

Tab 12-2: Beispiel 2: Abluftreinigung in der Holzverarbeitung

13 Zusammenfassung

Zur Entfernung oxidierbarer Aerosole wurde eine Versuchsanlage mit unterschiedlichen Gegenstromreaktoren aufgebaut. Durch optimierte metallische Einbauten in die einzelnen Kanäle der Reaktoren kann ein hoher Wärmerücktausch von der gereinigten Abluft an die ungereinigte Rohluft erreicht werden. Die Verwendung optimierter Strukturen ermöglicht die autotherme Abluftreinigung auch gering belasteter Abluftströme.

Das Umsatzverhalten von Gegenstromreaktoren wurde für unterschiedliche Aerosolarten untersucht. Dabei wurden Aerosole aus Holz-Feinststäuben, Räucher-aerosole und Bioaerosole untersucht. Für die einzelnen Aerosole mußten unterschiedliche Aerosolgeneratoren ausgelegt und aufgebaut werden. Für die Erzeugung von Feststoff-Aerosolen wurde ein Aerosolgenerator aufgebaut mit dem Feinstpartikel dosiert, redispergiert und nach Abtrennung ungewünschter größerer Partikelfractionen einem Trägerluftstrom zudosiert werden können. damit lassen sich Aerosole mit bestimmter Grenzkorngröße erzeugen. Repräsentative Räucher-aerosole wurden durch Verschmelzung von Hackspänen unter Sauerstoffunterschluß erzeugt. Als Beispiel für Bioaerosole wurden Hefen in einen Luftstrom dispergiert.

Für die so erzeugten Aerosole wurde das Umsatzverhalten bei der Oxidation im Gegenstromreaktor untersucht. Für die jeweiligen Aerosole wurde der Einfluß der Oxidationstemperatur und der Einfluß der mittleren Verweilzeit untersucht. Die Messung des Umsatzes der enthaltenen Partikel erfolgte gravimetrisch. Der Umsatz der z.B. in Räucheraerosolen enthaltenen Kohlenwasserstoffe erfolgte mittels FID. Zur Bestimmung der Geruchsstoffe wurden olfaktometrische Messungen durchgeführt.

Die Untersuchungen zeigten, daß Holzstaub-Aerosole bei ausreichend hoher Temperatur des Reaktorkopfes (700°C) vollständig umgesetzt werden können. Bei den Räucheraerosolen zeigt sich ein beginnender Umsatz der Rauchpartikel ab einer Temperatur von 200 °C. Bei Temperaturen um 400 °C zeigt sich ein Umsatz von 80%, der bei höheren Temperaturen auf über 95% ansteigt. Berücksichtigt man die bei der gravimetrischen Messung mit erfaßten anorganischen Bestandteile, so kann dies als Vollumsatz der organischen Bestandteile gewertet werden. Beim Umsatz der enthaltenen Kohlenwasserstoffe zeigt sich ein ausgeprägter Einfluß von der Verweilzeit im Reaktorkopf. Auch für die in den Räucheraerosolen in starkem Maße enthaltenen Geruchsstoffe konnte ein vollständiger Umsatz erreicht werden. Als Beispiel für die Entfernung von Bioaerosolen aus der Abluft wurde die Inaktivierung eines Hefe-Aerosols untersucht. Die Versuche zeigen, daß auch bei kurzen Verweilzeiten im Kopfbereich des Reaktors eine trockene Sterilisierung von Luftströmen möglich ist. Der besondere Vorteil des Gegenstromreaktors liegt dabei in dem hohen Wärmerücktausch. Damit ist eine Inaktivierung bei geringem Energieaufwand möglich.

Durch Verwendung optimierter Strukturen für den Wärmerücktausch läßt sich ein autothermer Betrieb des Gegenstromreaktors bereits bei kleinen Schadstoffkonzentrationen erreichen. Damit ergibt sich ein erheblich reduzierter Energiebedarf für die Abluftreinigung. Die vergleichende Betrachtung mit einer konventionellen katalytischen Nachverbrennung zeigt, daß der Einsatz des Gegenstromreaktors ökonomisch und ökologisch sinnvoll ist.

14 Weiterführende Arbeiten

Mit den durchgeführten Untersuchungen wurde das Ziel des Projekts voll erreicht. Die besondere Eignung des Gegenstromreaktors zur Entfernung oxidierbarer Aerosole aus Abluftströmen konnte belegt und die Tragfähigkeit des Konzepts nachgewiesen werden.

Nun muß in dem beantragten weiterführenden Projekt der Reaktor bis zur technischen Anwendbarkeit unter realen Betriebsbedingungen weiterentwickelt, erprobt und optimiert werden. Ziel dieser weiterführenden Arbeiten ist es, die für den technischen Einsatz maßgeblichen Einflußgrößen und Betriebsbedingungen gezielt zu untersuchen und zu verbessern. Außerdem müssen erste Erfahrungen unter realen Betriebsbedingungen gewonnen werden.

In Langzeitversuchen muß das Verschmutzungsverhalten der Strukturen unter realen Bedingungen untersucht werden. Zudem sollen in den Langzeitversuchen unterschiedliche Konzepte zur Regenerierung von Katalysator und wärmeübertragenden Strukturen erprobt werden.

In weiteren Versuchen muß das Verhalten des Gegenstromreaktors bei Schwankungen von Abluftmenge und Abluftkonzentration bestimmt und ein Regelkonzept für den praktischen Betrieb entwickelt werden.

In Betriebsversuchen an je einer Räucheranlage und an einer Röstanlage soll der Einsatz des Gegenstromreaktors unter realen Betriebsbedingungen erprobt werden.

Partikelbeladene Abluftströme aus technischen Prozessen können außer den in den bisherigen Untersuchungen im Vordergrund stehenden Feinstpartikeln und Aerosolen von $d_p \leq 5\mu\text{m}$ häufig auch größere Partikel enthalten. Für diese reicht die kurze Gasverweilzeit in der Hochtemperaturzone für eine vollständige Umsetzung nicht aus. Deshalb soll ein Gegenstromreaktor mit einer neu konzipierten keramischen, katalytisch aktiven Filterschicht im Hochtemperaturbereich versehen werden. Darauf sollen die größeren Partikel abgeschieden und somit ihre Verweilzeit für die vollständige Oxidation erhöht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Gaiser, G.; Opferkuch, F.; Eigenberger, G.: Der Gegenstromreaktor zur Entfernung oxidierbarer Aerosole aus Abluftströmen - Auslegung und Aufbau. In: Statuskolloquium des PEF, März 1997, S. 289-302.
- [2] Baumbach, G.; Luftreinhalte, 3. Auflage; Springer, 1994
- [3] Eigenberger, G., Nieken, U.: Katalytische Abluftreinigung: verfahrenstechnische Aufgaben und neue Lösungen. Chem.-Ing.-Tech. 63(1991)8, S.781-791.
- [4] Minjolle, L.: Method of manufacturing a ceramic unit for indirect heat exchange and a heat exchanger unit obtained thereby. U.S. Pat. 4,271,110
- [5] Shah, R.K.; London, A.L.: Laminar flow forced convection in ducts. Advances in Heat transfer, Academic Press, 1978.
- [6] Opferkuch, F.; Katalytische Reinigung von Abluftströmen im Gegenstromreaktor: Entwicklung neuer Strukturen mit verbessertem Betriebsverhalten, Diplomarbeit, Institut für Chemische Verfahrenstechnik, Universität Stuttgart, 1996
- [7] Kottke, V.; Blenke, H.; Schmidt, K.G.: Eine remissionsfotometrische Meßmethode zur Bestimmung örtlicher Stoffübergangskoeffizienten bei Zwangskonvektion in Luft. Wärme- und Stoffübertragung 10 (1977) 9-21.
- [8] Gaiser, G.; Kottke, V., Blenke, H.: Determination and visualization of local heat and mass transfer in internal flows. Proc. Sec. Int. Symp. Fluid Control, Measurement, Mechanics and Visualization, 5.-9. Sept. 1988, Sheffield, England, 221-225.
- [9] Eigenberger, G., Nieken, U.: Katalytische Abluftreinigung: verfahrenstechnische Aufgaben und neue Lösungen. Chem.-Ing.-Tech. 63(1991)8, S.781-791.
- [10] Gaiser, G.; Opferkuch, F.; Eigenberger, G.: Der Gegenstromreaktor - Ein neues Konzept für die katalytische Abluftreinigung. Beitrag Fachausschußsitzung Reaktionstechnik der GVC im VDI sowie des DECHEMA Fachausschusses Technische Reaktionsführung, Würzburg, März 1997
- [11] Krohmer, B.: Gegenstromreaktor zur katalytischen Abluftreinigung - Modellierung, Simulation, Katalysatorbau, Institut für Chemische Verfahrenstechnik 1996.
- [12] Nowak, U.; Frauhammer, J.; Nieken, U.: A fully adaptive algorithm for parabolic partial differential equations in one space dimension. Computers & Chemical Engineering Vol. 20, No.5(1996), 547-561
- [13] Nieken, U.: Abluftreinigung in katalytischen Festbettreaktoren bei periodischer Strömungsumkehr; VDI-Fortschrittsberichte Nr. 328, 1993
- [14] Wirzberger, H.; Lekhtmakher, S.; Shapiro, M.; Dudko, V.; Prevention of Particle Deposition by means of heating the deposition surface, Journal of Aerosol Science, Volume 28 Supplement 1, Sept. 1997, S83
- [15] DIN 1952 bzw. VDI 2041, Durchsatzbestimmung mit Normblenden
- [16] Geck, W.H.; Zündfähige Industriestäube, Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, 1954.
- [17] Bartknecht, W; Staubexplosionen, Springer Verlag 1987
- [18] VDI 3491, Messen von Partikel, Blatt 1: Kennzeichnung von Partikeldispersionen in Gasen, Begriffe und Definitionen. VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 4, VDI-Verlag, Düsseldorf (1980)
- [19] Reist, P.C.; Aerosol Science and Technology, Second Edition, McGraw-Hill, Singapore (1993)
- [20] VDI 3491 Blatt 4 - 16, Messen von Partikeln, Herstellungsverfahren für Prüfaerosole, VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 4, VDI-Verlag, Düsseldorf

-
- [21] Zahradnicek, A.; Löffler, F.; Eine neue Dosiervorrichtung zur Erzeugung von Aerosolen aus vorgegebenen feinkörnigen Feststoffen; Staub Reinhaltung der Luft 36 (1976) Nr.11 S.425-427
 - [22] Helsper,C.; Mölter,L.; Erzeugung von Prüfaerosolen für die Kalibrierung von optischen Partikelmeßverfahren nach VDI 3491, Technisches Messen tm 56 (1989), S.229-234
 - [23] Rumpf, H.; Die Wissenschaft des Agglomerierens, Chemie Ingenieur Technik 46 (1974) Nr.1 S.1-11
 - [24] A.Zahradnicek, Methoden zur Aerosolherstellung aus vorgegebenen Haufwerken, Staub-Reinhaltung der Luft 35 (1975) Nr.6, S.226-231
 - [25] DIN ISO 5011
 - [26] Trautmann;D.; Persönliche Mitteilungen, Instiut für Mechanische Verfahrenstechnik, Universität Stuttgart
 - [27] VDI 2066, Messen von Partikeln, Staubmessung in strömenden Gasen, Gravimetrische Bestimmung geringer Staubgehalte, Planfilterkopfgeräte, VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 4
 - [28] Fissan, F.; Shwienek, G.; Sampling and Transport of Aerosols, TSI Journal of Particle Instrumentation, Vol.2 No.2, S. 3 - 10, 1987
 - [29] Osteroth, D.; Taschenbuch für Lebensmittel-Chemiker und -technologien, Band 2, Springer 1991
 - [30] Tóth, L.; Chemie der Räucherung, Verlag Chemie, Weinheim, 1983
 - [31] Weiss, E.; Atemluftbelastung durch Hozstaub in holzverarbeitenden Betrieben- Istzustand und Möglichkeiten zur Luftreinhaltung; Jahresbericht der Arbeitsgruppe Luftreinhaltung der Universität Stuttgart - ALS, 1994