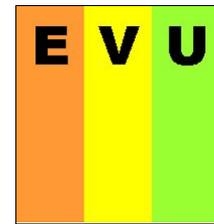




Studienort Wilhelmshaven



Institut für Energie-
Verfahrens- und
Umwelttechnik

Abschlussbericht

zum Thema: **Untersuchungen zum Absetzverhalten von Flugasche im Rauchgas des SCR-Reaktors eines Kraftwerkes**

1. Einleitung
2. Theoretische Grundlagen
 - 2.1. Sedimentation
 - 2.2. Strömungstechnik
 - 2.3. Kornverteilung eines Haufwerkes
3. Rauchgasanlage der swb-Erzeugung GmbH, Heizkraftwerk Hafen, Block 6
4. Siebanalyse der Flugasche
5. Berechnungen zur Sedimentation der Flugasche
6. Schlussfolgerungen zum Strömungsverhalten des Rauchgases
7. Zusammenfassung
8. Literatur
9. Symbolverzeichnis
10. Anhang

Auftraggeber: swb Erzeugung GmbH & Co. KG

Projektbearbeiter: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Winter
Mitarbeiter: · Dipl.-Ing. Richard Liesegang (Siebanalysen)
· B. Eng. Thomas Steenken (Fotos)

Aufgabenstellung: 27.03.2013
Projektnummer: 310094

(Institut für Innovations-Transfer
an der Jade Hochschule)

Bearbeitungszeitraum: März bis November 2013

Wilhelmshaven, 04.11.2013

1. Einleitung

Die Aufgabenstellung zur Untersuchung des Absetzverhaltens von Flugasche im Rauchgasstrom des SCR-Reaktors der swb-Erzeugung GmbH & Co. KG im Heizkraftwerk Hafens, Block 6 wurde während eines Treffens an der Jade Hochschule gestellt und die dazugehörigen Daten in einem Datenblatt übergeben, siehe Anlage 1 /1/. Es wurde vereinbart, Berechnungen zur Sedimentationsgeschwindigkeit durchzuführen, um Schlussfolgerungen für die Absetzung von Flugasche auf den Katalysatorelementen im SCR-Reaktor (DeNO_x -Reaktor) ziehen zu können.

Weiterhin wurden zwei Flugascheproben zum Zweck der Siebanalyse entgegengenommen.

Im Bild 1 /2/ ist das Prinzipschema einer Entstickungsanlage zu sehen und es wird die Abgasführung vor und im SCR-Reaktor deutlich. Die Zuführung geschieht vertikal von oben nach unten und ist dem zu folge mit der Schwerkraft gleichgerichtet, was entgegen einer Absetzungsmöglichkeit der Flugasche aus dem Rauchgas spricht. Trotzdem werden bei Begehungen des SCR-Reaktors stets erhebliche Flugascheablagerungen auf den Katalysatorlagen festgestellt /1/, die ein effizientes Arbeiten der Katalysatoren verhindern. Es ist daher zu untersuchen, warum sich die Asche aus dem Rauchgasstrom absetzt.

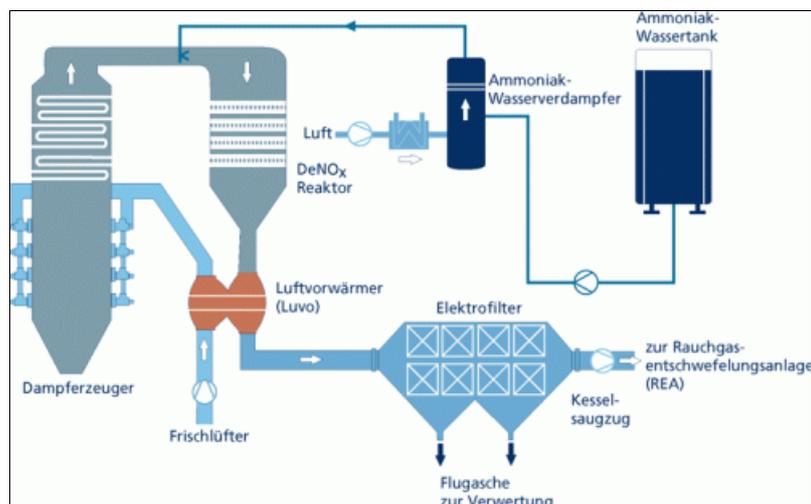


Bild 1 Technologisches Prinzip der katalytischen Rauchgasentstickung /2/

2. Theoretische Grundlagen

Die zusammengestellten theoretischen Grundlagen ermöglichen es sowohl Aussagen zum Absetzverhalten von Flugasche im Abgasstrom des SCR-Reaktors zu erhalten als auch die Strömungsbedingungen in der Rauchgasleitung bis zur obersten Katalysatorlage im SCR-Reaktor einzuschätzen. Darüber hinaus können mit den Grundlagen der Korngrößenverteilung eines Haufwerkes quantitative Aussagen für die Körnigkeit getroffen werden, die gute Vergleichsmöglichkeiten von Flugascheproben zulassen.

2.1. Sedimentation

Folgende Gleichungen finden bei der Berechnung zur Sedimentation von Feststoff in einem Fluid Anwendung /3/.

- Mengenangaben:

-- Volumenkonzentration der Flugasche im Rauchgas c_T :

$$c_T = \frac{V_{FA}}{V_{FA} + V_{RG}} = \frac{V_{FA}}{V_{FARG}} \quad (1)$$

$$[c_T] = \frac{m^3}{m^3}, \text{ Vol- \%}$$

-- Bettdichte (mittlere Dichte) ρ_B :

$$\rho_B = \frac{m_{FA} + m_{RG}}{V_{FA} + V_{RG}} \quad (2)$$

$$[\rho_B] = \frac{kg}{m^3}$$

Die Gl(1) und (2) gelten auch, wenn Mengenströme vorliegen.

- Mathematische Modelle zur Sedimentation:

-- Berechnung der Sedimentationsgeschwindigkeit von kugeligen Einzelkörnern

w_{FA} der Korngröße d_{FA} :

◦ ARCHIMEDES-Zahl:

$$Ar = \frac{d_{FA}^3 g (\rho_{FA} - \rho_{RG}) \rho_{RG}}{\eta_{RG}^2} \quad (3)$$

◦ REYNOLDS-Zahl aus der ARCHIMEDES-Zahl für verschiedene Sedimentationen:

· laminar:

$$Ar \leq 3,6 \quad \rightarrow \quad Re = \frac{Ar}{18} \quad (4)$$

· Übergangsgebiet:

$$3,6 < Ar < 82500 \quad \rightarrow \quad Re = \left(\frac{Ar}{13,875} \right)^{\frac{1}{1,4}} \quad (5)$$

· turbulent:

$$Ar \geq 82500 \quad \rightarrow \quad Re = 1,7408 \sqrt{Ar} \quad (6)$$

- Sedimentationsgeschwindigkeit für kugelige Einzelkörner:

$$w_{FA} = \frac{Re \eta_{RG}}{d_{FA} \rho_{RG}} \quad (7)$$

- Sedimentationsgeschwindigkeit des Schwarmes:
Die Sedimentationsgeschwindigkeit eines Schwarmes ist dann mit der Sedimentationsgeschwindigkeit von Einzelkörnern identisch, wenn nur geringe Volumenkonzentrationen der Flugasche im Rauchgas nach Gl(1) vorliegen. Es gilt für $c_T < 0,25 \text{ Vol-\%} / 3/$:

$$W_{S,FA} = W_{FA} \quad (8)$$

-- Berechnung der Korngröße von kugeligen Einzelkörnern d_{FA} der Absetzgeschwindigkeit w_{FA} :

- LJUSTSCHENKO-Zahl:

$$Lj = \frac{(\rho_{FA} - \rho_{RG}) \eta_{RG} g}{\rho_{RG}^2 w_{FA}^3} \quad (9)$$

- REYNOLDS-Zahl aus der LJUSTSCHENKO-Zahl für verschiedene Sedimentationen :

· laminar:

$$Lj \geq 450 \quad \rightarrow \quad Re = \sqrt{\frac{18}{Lj}} \quad (10)$$

· Übergangsgebiet:

$$450 > Lj > 6,6 \cdot 10^{-4} \quad \rightarrow \quad Re = \left(\frac{13,875}{Lj} \right)^{\frac{1}{1,6}} \quad (11)$$

· turbulent:

$$Lj \leq 6,6 \cdot 10^{-4} \quad \rightarrow \quad Re = \frac{0,33}{Lj} \quad (12)$$

- Korngröße kugeliger Einzelkörner:

$$d_{FA} = \frac{Re \eta_{RG}}{w_{FA} \rho_{RG}} \quad (13)$$

2.2. Strömungstechnik

Aus der Literatur ist bekannt /4/, dass in durchströmten Bauteilen wie unstetigen Rohrerweiterungen, Diffusoren oder Rohrkrümmern/Kniestücken durch Strömungsablösungen besonders hohe Druckverluste auftreten können, wenn das Flächenverhältnis A_2/A_1 sowie der Steigungswinkel δ groß, bzw. das Rohrbogenradius/Rohrdurchmesser-Verhältnis r/d_R klein sind. Ausdruck eines großen Druckverlustes, d.h. einer großen Strömungsablösung mit einem entsprechend großen Wirbelgebiet ist ein hoher Widerstandsbeiwert ζ (Zeta). Diese Strömungsablösungen mit ihren ungerichteten Wirbelbildungen (Turbulenzen) können die Entmischung der Flugasche aus dem Abgasstrom bis hin zur Absetzung von Flugasche im SCR-Reaktor bewirken.

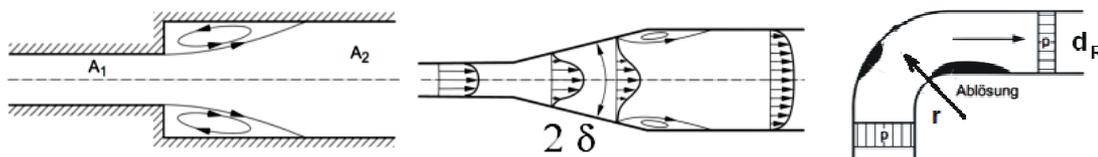


Bild 2 Darstellung der Ablösegebiete von Strömungen mit Wirbelgebieten in verschiedenen Bauteilen /4/

- Unstetige Rohrerweiterung mit Flächenverhältnis A_2/A_1 ,
- Diffusor mit Steigungswinkel δ und
- 90° -Krümmer mit Rohrbogenradius/Rohrdurchmesser-Verhältnis r/d_R

Solch eine strömungstechnisch extrem ungünstige Querschnittserweiterung, wie bei einer unstetigen Rohrerweiterung, tritt in der swb-Entstickungsanlage des Heizkraftwerkes Hafem, Block 6 nicht auf und sie muss daher auch nicht weiter betrachtet werden.

Die Widerstandsbeiwerte ζ für Diffusoren, 90° -Krümmer und Kniestücke für Strömungen im Übergangsgebiet oder im Gebiet hydraulisch rauh betragen:

- Diffusor:

Die Widerstandsbeiwerte ζ für Diffusoren hängen wesentlich vom Steigungswinkel δ und von Durchmesser Verhältnis d_2/d_1 ab, Bild 3. Prinzipiell sollte der Steigungswinkel δ für den Übergang der Rauchgasleitung zum SCR-Reaktor bei 4° liegen, damit die Strömungsablösung verhindert wird.

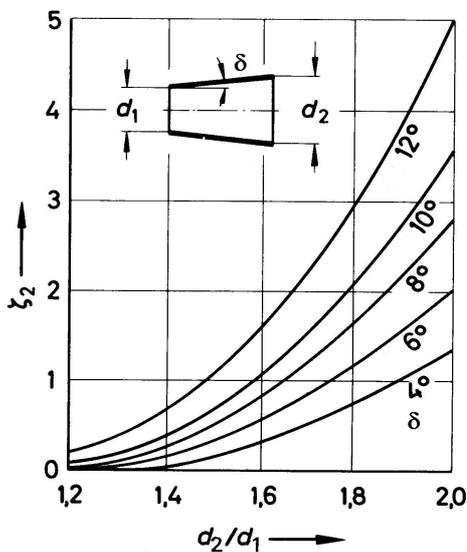


Bild 3 Widerstandsbeiwerte ζ für Diffusoren bei verschiedenen δ und d_2/d_1 , /4/

- 90°-Krümmer:

Die Widerstandsbeiwerte ζ für 90°-Krümmer hängen wesentlich vom Durchmesser-Rohrbogenradius r/d_R ab, Tabelle 1.

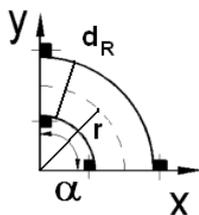


Bild 4 90°-Krümmer, $\alpha = 90^\circ$

- d_R Rohrdurchmesser
- r Radius des Rohrbogens (Mittellinie)

r/d_R mm/mm	1	2	4	6	10
ζ	0,51	0,3	0,23	0,18	0,2

Tabelle 1 Widerstandsbeiwerte ζ für 90°-Krümmer, Übergangsbereich oder hydraulisch rauh /4/

Der Rohrbogenradius r , bzw. das Verhältnis Rohrbogenradius/Rohrdurchmesser r/d_R sollte möglichst groß sein (≥ 4), damit Strömungsablösungen sicher ausgeschlossen werden können.

- Kniestück:

Die Widerstandsbeiwerte ζ für Kniestücke hängt wesentlich vom Winkel α ab, Tabelle 2.

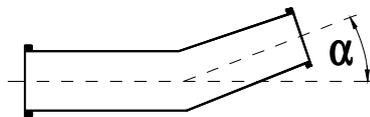


Bild 5 Kniestück

α	15°	22,5°	30°	45°	60°	90°	105°	120°
ζ	0,07	0,135	0,165	0,32	0,684	1,765	2,0	2,54

Tabelle 2 Widerstandsbeiwerte ζ für Kniestücke, Übergangsgebiet oder hydraulisch rau /4/

Aus den Tabellen 1 und 2 wird deutlich, dass Kniestücke bei großen Winkeln α im Vergleich zum 90°-Krümmer besonders große Widerstandsbeiwerte ζ und damit auch große Strömungsablösungen mit sich bringen.

Im Bild 6 ist der obere Teil einer Entstickungsanlage der Fa. SONUTEC GmbH zu sehen /5/. Es ist offensichtlich, dass der Diffusor, das Übergangsstück zwischen dem Rauchgasrohr und dem SCR-Reaktor, einen sehr großen Steigungswinkel δ aufweist und dass daher eigentlich von einer un stetigen Rohrerweiterung ausgegangen werden muss.

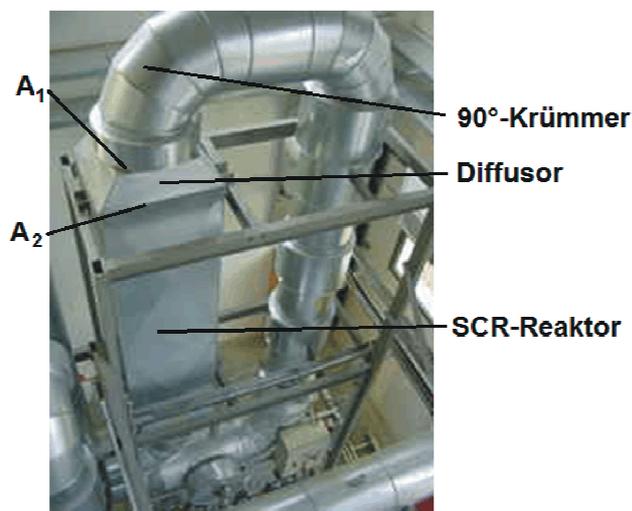


Bild 6 Entstickungsanlage SONUTEC GmbH /5/

Das Rohrbogenradius/Rohrdurchmesser-Verhältnis des 90°-Krümmers liegt geschätzt bei $r/d_R < 2$ und es ist damit sehr ungünstig. Allein das Flächenverhältnis A_2/A_1 nimmt im Bild 6 kleine Werte an, wodurch sich mögliche Flugascheablagerungen in Grenzen halten werden.

Die Beurteilung der Turbulenz von Rohrströmungen kann über die REYNOLDS-Zahl vorgenommen werden, sie lautet:

$$\text{Re} = \frac{w_{\text{RG}} \rho_{\text{RG}} d_{\text{R}}}{\eta_{\text{RG}}} = \frac{w_{\text{RG}} d_{\text{R}}}{\nu_{\text{RG}}} \quad (14)$$

Es gilt: **Re** ≤ 2320: laminare Strömung
 Re > 2320: turbulente Strömung

Ferner gilt die Kontinuitätsgleichung für kompressible Fluide:

$$\dot{m}_{\text{RG}} = \rho_{\text{RG}} A w_{\text{RG}} = \text{konst} \quad (15)$$
$$\rho_{\text{RG},1} A_1 w_{\text{RG},1} = \rho_{\text{RG},2} A_2 w_{\text{RG},2}$$

Für das Absetzen von Flugasche auf die Katalysatorlagen im SCR-Reaktor werden folgende Annahmen getroffen:

- Im Krümmer und im Diffusor finden große Strömungsablösungen statt, die sich bis in den SCR-Reaktor fortpflanzen.
 - Bei Strömungsablösungen bilden sich im Rauchgas Turbulenzgebiete mit verschiedensten Dreh- und Linearbewegungsrichtungen aus.
- Als Absetzbedingung gilt, wenn die Rauchgas- und die Absetzgeschwindigkeit entgegen gerichtet und gleich groß ist:

$$M^{\text{BC}} = M^{\text{EV}} \quad (16)$$

Nach dieser Absetzbedingung folgt auch, dass sich grobe Partikel leichter absetzen als feine.

- In den rotierenden Turbulenzen der Ablösegebiete werden Flugaschepartikel entsprechend der Zentrifugalkräfte nach Außen geschleudert und können sich aus dem Rauchgasstrom entmischen.
- Treffen die Ablösegebiete der Rauchgasströmung im SCR-Reaktor auf die Katalysatorelemente der obersten Lage, dann werden diese in ihrer Gesamtheit nicht gleichmäßig angeströmt.

2.3. Kornverteilung eines Haufwerkes

Körnige Haufwerke lassen sich mit einer ROSIN-RAMMLER-SERLING-Verteilung in BENNET'scher Schreibweise bezüglich ihrer Korngrößenverteilung darstellen [3]. Für die Rückstandssummenfunktion gilt:

$$\Sigma R_{FA} = 100 \exp \left[- \left(\frac{d_{FA}}{d'_{FA}} \right)^n \right] \quad (17)$$

Hierin bedeuten: n Körnungssparameter
 d'_{FA} charakteristische Korngröße bei $\Sigma R_{FA} = 36,79 \text{ Mass-}\%$, $\Sigma D_{FA} = 63,21 \text{ Mass-}\%$

Je größer der Körnungssparameter n ist, desto enger ist die Korngrößenverteilung. Beträgt $n = \infty$, dann liegt Gleichkörnigkeit vor.

Die prinzipielle RRSB-Verteilung ist im Bild 7 im doppeltlogarithmischen Körnungsnetz als Rückstandssummenfunktion nach **DIN 66145** dargestellt worden und das Ablesen der beiden Parameter d'_{FA} und n wird deutlich.

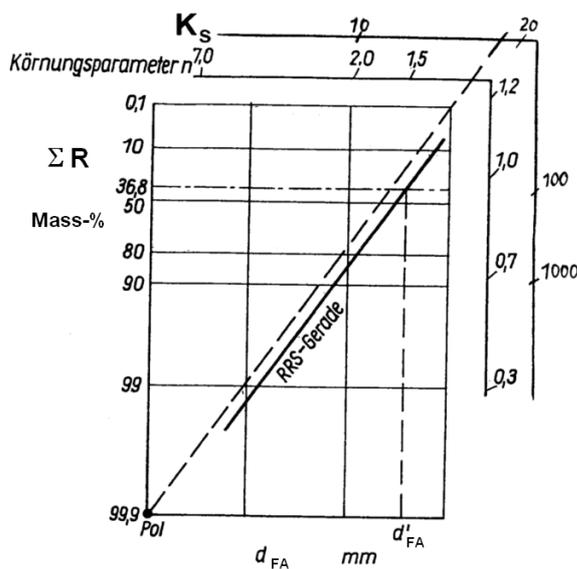


Bild 7 RRSB-Verteilung als Rückstandssumme, Ablesung der Parameter d'_{FA} und n

Für den prozentualen Rückstand/Durchgang sowie die dazugehörigen Summenkurven der Flugasche folgt:

$$R_{FA} = \frac{\Delta m_{FA} \cdot 100}{\Sigma m_{FA}} = D_{FA} \quad \Sigma R_{FA} = \sum_1^i R_{FA,i} \quad \Sigma D_{FA} = 100 - \Sigma R_{FA} \quad (18)$$

$$[R_{FA}] = \text{Mass} - \% \quad [\Sigma R_{FA}] = \text{Mass} - \% \quad [\Sigma D_{FA}] = \text{Mass} - \%$$

3. Rauchgasanlage swb-Erzeugung GmbH, Heizkraftwerk Hafen, Block 6

Das Bild 8 zeigt einen Ausschnitt des Rauchgassystems bis zum SCR-Reaktor /1/. Folgende Daten wurden ermittelt:

$$r = 5,4 \text{ m}; z = 9,5 \text{ m}, \beta = 16^\circ; d_R = 7,2 \text{ m}; d_{SCR} = 13,16 \text{ m}; \delta = 17,4^\circ$$

Der gleichwertige Durchmesser des SCR-Reaktors d_{SCR} (auf kreisrunden Querschnitt bezogen) ergibt sich für die freie Querschnittsfläche aller Katalysatorelemente einer Lage, (siehe Mathcad-Berechnung Anlage 2).

Der 90° -Krümmer vor dem Diffusor weist einen sehr engen Rohrbogenradius und damit ein sehr kleines r/d_R -Verhältnis mit

$$\frac{r}{d_R} = \frac{5,4 \text{ m}}{7,2 \text{ m}} = 0,75$$

auf, so dass nach Tabelle 1 der Widerstandsbeiwert $\zeta > 0,5$ relativ groß ausfallen wird.

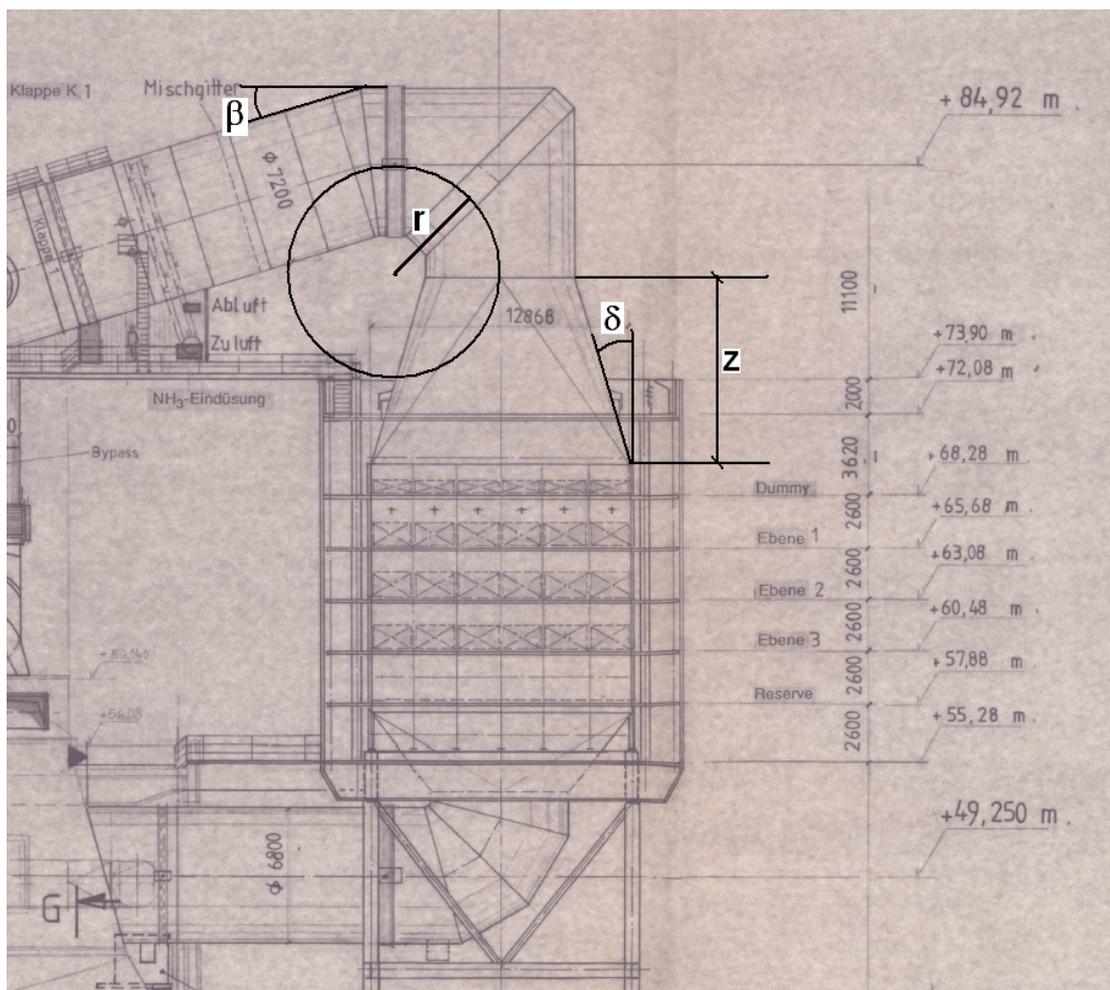


Bild 8 Ausschnitt des Rauchgassystems bis zum SCR-Reaktor /1/

Wird das ansteigende Abgasrohr vor dem 90° -Krümmer mit eingezogen, Bild 8, dann ergibt sich ein Kniestück mit dem Gesamtwinkel von $90^\circ + \beta = 106^\circ$.

Nach Tabelle 2 folgt für solch ein Kniestück ein sehr großer Widerstandsbeiwert von $\zeta = 2$. Die Annahme eines Kniestückes im Vergleich zum einfachen 90° -Krümmer wird für die swb-Entstickungsanlage als realistisch angesehen.

Schon allein durch dieses Kniestück vor dem SCR-Reaktor treten erhebliche Strömungsablösungen auf, so dass eine wesentliche Entmischung von Flugasche aus dem Rauchgasstrom zu erwarten ist.

Diese Strömungsablösung wird noch im folgenden Diffusor verstärkt, weil der Steigungswinkel δ viel zu groß ist:

$$\tan \delta = \frac{d_{\text{SCR}} - d_{\text{R}}}{2 z} = \frac{(13,16 - 7,2) \text{ m}}{2 \cdot 9,5 \text{ m}} = 0,3137$$

$$\delta = 17,4^\circ$$

Nach Bild 3 ergibt sich für ein Verhältnis $d_{\text{SCR}}/d_{\text{R}}$ von

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{d_{\text{SCR}}}{d_{\text{R}}} = \frac{12,8 \text{ m}}{7,2 \text{ m}} = 1,78$$

bei einem Winkel von nur 12° ein Widerstandsbeiwert von $\zeta = 2,8$. Dieser Wert wird bei dem tatsächlichen Winkel von $\delta = 17,4^\circ$ noch deutlich größer ausfallen.

Wegen der kurzen Aufeinanderfolge des Kniestückes und des Diffusors werden sich die Widerstandsbeiwerte nicht nur schlicht addieren, sondern es müssen noch multiplikative Faktoren berücksichtigt werden, die den Widerstandsbeiwert weiter ansteigen lassen /4/.

Somit ergibt sich für die Rauchgasleitung unmittelbar vor dem SCR-Reaktor ein beachtlich großer Widerstandsbeiwert insgesamt von mindestens

$$\zeta = 5.$$

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass wegen des großen Widerstandsbeiwertes ζ auf die oberste Lage der Katalysatorelemente des SCR-Reaktors größere Ablösegebiete mit ihren Turbulenzen treffen, die zu Ablagerungen der Flugasche führen.

4. Siebanalyse der Flugasche

Die übergebenen Flugascheproben /1/ unterscheiden sich auch nach visuellen Gesichtspunkten ganz erheblich:

- SCR-Reaktor (entnommen von der oberen und zwischen den Katalysatorlagen):
sehr grobkörniges, dunkelgraues bis schwarzes Produkt
- E-Filter (Aschesilo):
extrem feines, hellgraues Pulver

Folgende Korngrößenverteilungen wurde gemessen /6/ und mit MathCad bearbeitet, siehe Anlagen 3 und 4:

d_{FA} mm	+2	+1	+0,5	+0,375	+0,25	+0,18	+0,16	+0,125	+0,09	+0,045	+0	Σ Δm_{FA}
Δm_{FA} g	0	4,49	17,16	18,99	12,03	16,8	4,98	6,87	6,86	7,1	4,67	99,95
Δm_{FA} Mass-%	0	4,49	17,17	19	12,04	16,81	4,98	6,87	6,86	7,1	4,67	100
ΣD_{FA} Mass-%	100	95,51	78,34	59,34	47,3	30,5	25,51	18,64	11,78	4,67	0	

Tabelle 3 Siebanalyse der Flugasche aus dem SCR-Reaktor /6/

Die Siebanalyse in Tabelle 3 macht deutlich, dass sich im SCR-Reaktor vor allem nur grobkörnige Flugasche abgelagert hat, die mit der feinkörnigen Flugasche aus dem E-Filter Tabelle 4 keine Gemeinsamkeiten aufweist.

Es lässt sich daher die Schlussfolgerung ziehen, dass im SCR-Reaktor durch die speziellen Strömungsbedingungen des Rauchgases bei der Ablagerung der Flugasche Separierungen des Grobkornes auftreten, während das Feinkorn im Rauchgas durch den SCR-Reaktor gezogen und erst im nachfolgenden E-Filter abgeschieden wird.

d_{FA} mm	+0,16	+0,125	+0,1	+0,09	+0,063	+0,045	+0,032	+0	Σ Δm_{FA}
Δm_{FA} g	0	0,58	1,38	0,16	3,68	5,22	6,88	81,43	99,33
Δm_{FA} Mass-%	0	0,58	1,39	0,16	3,7	5,26	6,93	81,98	100
ΣD_{FA} Mass-%	100	99,42	98,03	97,87	94,17	88,91	81,98	0	

Tabelle 4 Siebanalyse der Flugasche aus dem Aschesilo des E-Filters /6/

Eine ähnliche grobe Flugasche wurde bei einer Beprobung des SCR-Reaktors im swb-Erzeugung-Heizkraftwerk Hafen, Block 6 am 14.07.2012 erhalten /7/, Analyse Anlage 5:

d_{FA} mm	Δm_{FA} Mass-%	
> 1	3,2	6,0
0,2 - 1	50,4	29,2
0,9 - 0,2	21,8	14,6
< 0,09	24,6	50,2

Tabelle 5 Siebanalysen zweier Flugascheproben, SCR-Reaktor, 14.07.2012 /7/

Die erheblichen Unterschiede in den Flugaschekörnungen, siehe Tabellen 3 und 4, werden auch in den Parametern der RRSB-Verteilung in Tabelle 6 deutlich. Das RRSB-Diagramme, Anlage 6, wurde mit den Durchgangssummenwerten aus den Tabellen 3 und 4 erstellt (vergl. MathCad-Berechnung Anlage 4).

Die Parameter der RRSB-Verteilung zeigen, dass die Flugasche im SCR-Reaktor nicht nur deutlich grober (größeres d'_{FA}), sondern auch wegen des größeren Körnungsparameters n mit einer engeren Korngrößenverteilung vorliegt, was ebenfalls auf die erwähnte Separierung hinweist, Tabelle 6.

Flugasche	d'_{FA} mm	n
E-Filter (Aschesilo)	0,015	0,91
SCR-Reaktor	0,27	1,5

Tabelle 6 Parameter der RRSB-Verteilung für die Flugasche, Anlage 6
· rot: E-Filter (Aschesilo)
· grün: SCR-Reaktor

Wie diese grobkörnige Flugasche entstanden ist, kann hier nicht geklärt werden. Die mittlere Korngröße der Kohle ist wesentlich kleiner und daher besteht zu der grobkörnigen Flugasche kein unmittelbarer Größenzusammenhang. Nach dem swb-Datenblatt /1/ haben nur **5 Mass-%** der Kohle eine Korngröße von **> 0,2 mm**. Allerdings können bei der Verbrennung Agglomerationen abgelaufen sein, die solch grobe Aschepartikel entstehen ließen.

In den folgenden Fotos werden die Körnungsunterschiede ebenfalls deutlich /8/. Die Aufnahmen wurden mit dem Mikroskop **Motic 60x**, Skala **1 mm**, Teilung **0,01 mm**, und der Kamera Canon **Ixus 80** angefertigt.

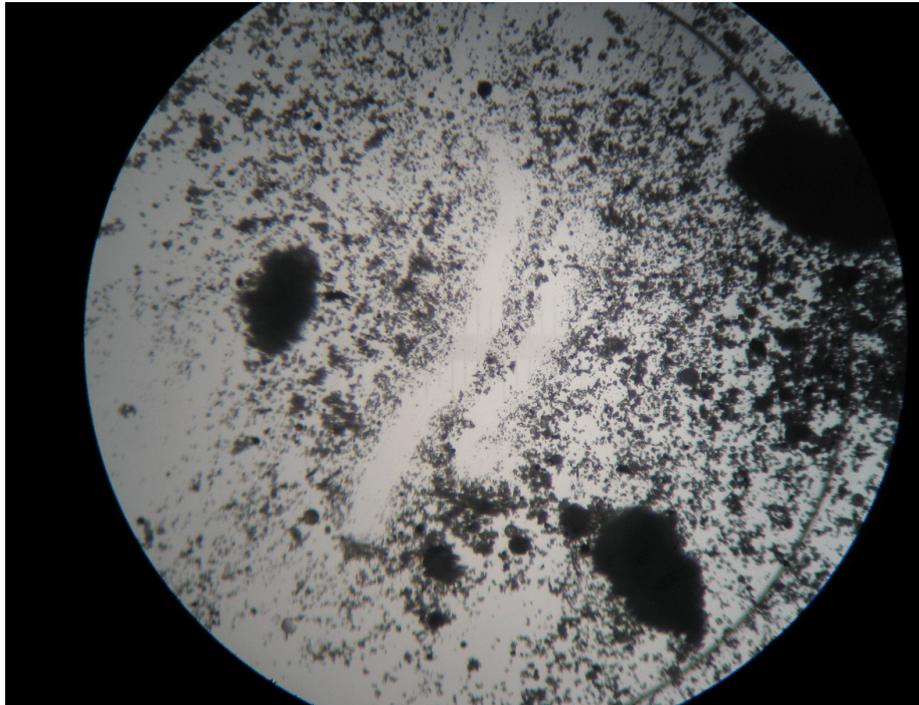


Bild 9 Flugasche E-Filter, ca. 10-20 μm

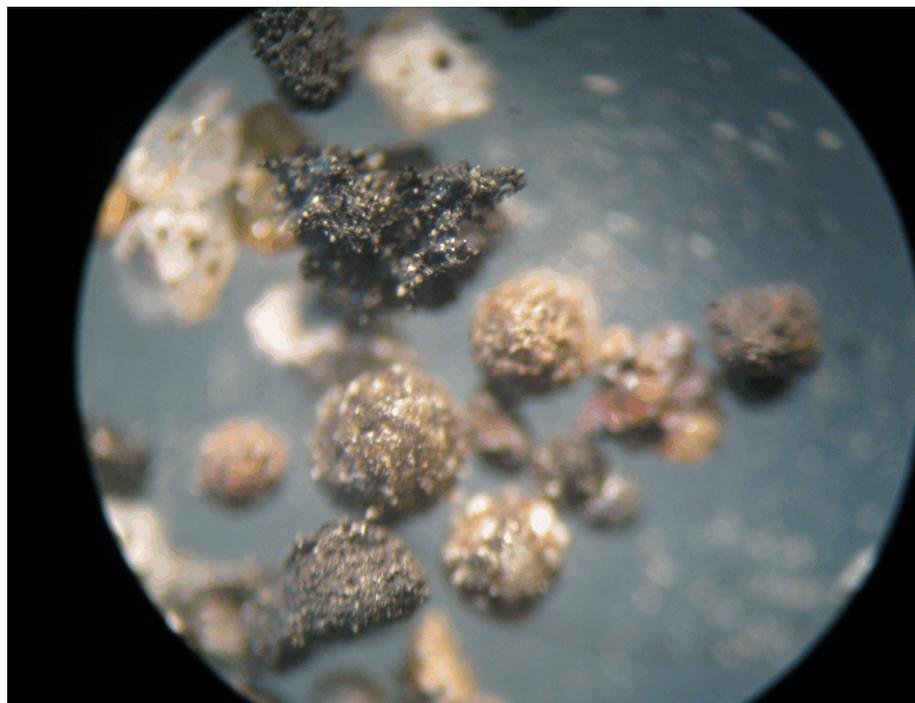


Bild 10 Flugasche SCR-Reaktor, ca. 500 μm

Im Bild 10 sind kugelige aber auch bizarr gesinterten Körner der Flugasche zu sehen. Die runden Körner sind möglicherweise bei der Verbrennung aus kleinen Körnern mittels einer schichtenweisen Roll-Agglomeration entstanden, während die bizarr geformten Körner einfache Sinterstücke darstellen.

5. Berechnungen zur Sedimentation der Flugasche

Auf der Grundlage der Gln(1) bis (18) erfolgten Berechnungen zur Sedimentation der Flugasche im SCR-Reaktor, zur Strömung des Rauchgases im Rauchgassystem und zur Körnung der Flugasche mit der PTC-Software MathCad prime 2.0, wobei die Daten /1/ und /6/ zur Anwendung kamen.

Die kompletten Dateien "FA-Sedimentation 0.7-1.mcdx" und "FA-Sedimentation 1.1-1.mcdx" für die Volumenströme (**0,7** und **1.1**) **Mio m³_N/h** sowie die Datei "Kornverteilung Flugasche swb.mcdx" sind im Anhang in den Anlage 2 und 4 zusammengestellt worden. Folgende Endergebnisse wurden erhalten:

allgemeine Vorgabegrößen:

- Rauchgastemperatur: $t_{RG} = 340 \text{ °C}$
- Druck im SCR-Reaktor: $p = 980 \text{ mbar}$
- Bettdichte der Flugasche (gerüttelt): $\rho_B = 1250 \text{ kg/m}^3$
- Leerraumanteil der dichtesten Kugelpackung /4/ (Flugasche gerüttelt): $\epsilon_B = 0,26$

Ergebnisse:

- Dichte des Rauchgases: $\rho_{RG} = 0,557 \text{ kg/m}^3$
- dynamische Viskosität des Rauchgases: $\eta_{RG} = 3,059 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$
- Feststoffdichte der Flugasche: $\rho_{FA} = 1689 \text{ kg/m}^3$
- Berechnungen der Sedimentationsgeschwindigkeit von Einzelkörnern w_{FA} für verschiedene Korngrößen d_{FA} (Sedimentation laminar und im Übergangsgebiet):

d_{FA} μm	Ar -	Re -	w_{FA} m/s
63	2,46 (laminar)	0,137	0,119
125	19,2 (Übergangsg.)	1,262	0,555
315	307,7 ("")	9,149	1,597
500	1231 ("")	24,623	2,707

Tabelle 7 Ergebnisse der Berechnung zur Absetzgeschwindigkeit der Flugasche mit MathCad, Anlage 2

Schlussfolgerung: Mit Vergrößerung der Korngröße der Flugasche steigt dessen Absetzgeschwindigkeit erheblich.

allgemeine Vorgabegrößen:

- gesamte Anströmfläche aller **6048** Katalysatorelemente einer Lage im SCR-Reaktor: $A_{SCR} = 136,08 \text{ m}^2$
- Aschegehalt der Steinkohle: $y_{A.SK} = 10 \text{ Mass-}\%$
- Flugascheanteil im Rauchgas bezogen auf die Gesamtasche (geschätzt): $y_{FA.RG} = 90 \text{ Mass-}\%$

Ergebnisse:

- Volumenkonzentration der Flugasche im Rauchgas: $c_T = 1,77 \cdot 10^{-06} \text{ m}^3/\text{m}^3$
- das entspricht: $c_T = 1,77 \cdot 10^{-04} \text{ Vol-}\%$
 $\ll 0,25 \text{ Vol-}\%$

Daraus folgt: Die Volumenkonzentration der Flugasche im Rauchgas ist so gering, dass die Gl(8) gilt, d.h. die Absetzgeschwindigkeiten des Schwarmes $w_{S,FA}$ verändern sich im Vergleich zu der des Einzelkorn w_{FA} nicht.

- Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit im SCR-Reaktor und der dazugehörigen Korngröße für verschiedene Rauchgasvolumenströme \dot{V}_{RG} :

In den MathCad-Berechnungen wurden sowohl die Strömungsgeschwindigkeit des Rauchgases im SCR-Reaktor, bezogen auf den freien Querschnitt der Katalysatorelemente einer Lage als auch die Flugaschekorngröße berechnet, die bei dieser Geschwindigkeit nach Gl(16) in Schwebelage gehalten wird.

\dot{V}_{RG} $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$	\dot{V}_{RG} m^3/s	w m/s	Lj -	Re -	d_{FA} mm
$0,7 \cdot 10^6$	451,29	3,316	0,045	36,022	0,597
$1,1 \cdot 10^6$	709,16	5,211	0,012	84,066	0,887

Tabelle 8 Ergebnisse der Berechnungen zur Strömungsgeschwindigkeit des Rauchgases und der dazugehöriger Korngröße der Flugasche bei verschiedenen Rauchgasvolumenströmen

Schlussfolgerung: Die Strömungsgeschwindigkeit des Rauchgases ist bei kleinen Volumenströmen in der gleichen Größenordnung wie die Absetzgeschwindigkeit von groben Partikeln der Flugasche, was als ein Hauptgrund angesehen wird, dass es im SCR-Reaktor zu Flugascheablagerungen und zur Separierung kommt.

Die Schwankungen des Abgasvolumenstromes \dot{V}_{RG} in Tabelle 8 sind betriebsbedingt. Es sollte daher für den Fall eines geringen Abgasvolumenstromes die Möglichkeit untersucht werden, ob das Einsaugen von Frischluft zur Vergrößerung dieses Volumenstromes machbar ist. Dadurch ließe sich die Abgasgeschwindigkeit im Rauchgassystem wieder anheben und das Absetzen der Flugasche wäre erschwert.

6. Schlussfolgerungen zum Strömungsverhalten des Rauchgases

Die in den Abschnitten 2.2. und 3. festgestellten Strömungsablösungen können durch geeignete konstruktive Maßnahmen unterbunden werden. Ob sich die damit verbundene Baumaßnahmen allerdings realisieren lassen, muss geprüft werden.

Soll der Diffusor entsprechend ingenieurtechnischer Vorgaben mit einem Winkel $\delta = 4^\circ$ verwendet werden, dann müsste er eine Länge von $\ell = 91 \text{ m}$ aufweisen (siehe MathCad-Berechnung Anlage 2). Es ist offensichtlich, dass solch eine Baulänge nicht realisierbar ist.

Daher wird für den gegenwärtigen Diffusor im Rauchgassystem vor dem SCR-Reaktor der Einbau von kranzförmigen Leitblechen in zwei Ebenen vorgeschlagen, die von innen nach außen eine Anstiegänderung von jeweils 4° , also 4° , 8° und 12° aufweisen, Skizze Bild 11.

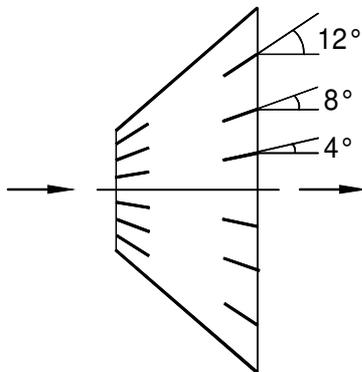


Bild 11 Leitbleche im Diffusor vor dem SCR-Reaktor zur Vermeidung der Strömungsablösung

Im Fall des 90° -Krümmers/Kniestück können ebenfalls Leitbleche entsprechend der Bilder 12 und 13 das Problem der Strömungsablösung beheben.



Bild 12 Bogen mit Leitblechen /9/

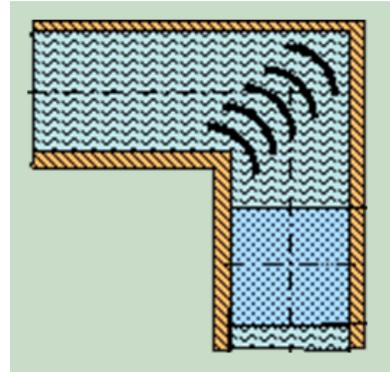


Bild 13 Bogen mit Leitblechen /10/

7. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit konnte an Hand von hohen Widerstandsbeiwerten ζ nachgewiesen werden, dass es im Rauchgassystem des Heizkraftwerkes, Hafen, Block 6 der swb-Erzeugung GmbH & Co. KG zu einer wesentlichen Strömungsablösung kommt, die bis in den SCR-Reaktor reicht. Diese Strömungsablösung ist für die Absetzung bei gleichzeitiger Separierung von grober Flugasche aus dem Rauchgasstrom mit verantwortlich, was auch durch Probenahme und Siebanalysen festgestellt worden ist.

Mikroskopische Aufnahmen der groben Flugasche lassen den Schluss zu, dass bei der Kohleverbrennung im Kessel Roll-Agglomerationen stattfinden, so dass sich aus feinen Flugaschekörnern größere kugelige Partikel mit der Korngröße $> 0,375 \text{ mm}$ bilden können.

Über MathCad-Berechnungen wurde festgestellt, dass die Absetzgeschwindigkeit von groben Flugaschepartikeln in der gleichen Größenordnung wie die der Strömungsgeschwindigkeit des Rauchgases ist. Dieser Sachverhalt gilt gemeinsam mit der Strömungsablösung als Ursache für die Flugascheabsetzung.

Eine Lösung zur Vermeidung von Flugascheablagerungen im SCR-Reaktor wird darin gesehen, dass sowohl eine Frischlufteinsaugung in das Rauchgassystem als auch der Einbau von Leitblechen im Krümmer/Kniestück und im Diffusor unmittelbar vor dem SCR-Reaktor vorgenommen werden können. Durch die Frischlufteinsaugung lässt sich die Rauchgasgeschwindigkeit wieder vergrößern. Die Leitbleche sollen Strömungsablösung verhindern und sind allgemein in Abluftsystemen eine gängige Praxis.

8. Symbolverzeichnis

Symbole

A	Fläche	m ²
c _T	Volumenkonzentration	m ³ /m ³ ; Vol-%
d	Durchmesser	m, mm, μm
d'	charakteristische Korngröße der RRSB-Verteilung	mm
n	Körnungsparameter der RRSB-Verteilung	-
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
Δm _k	Masse einer Kornfraktion	g
p	Druck	Pa, bar
r	Bogenradius	m
∑R; ∑D	Rückstands-, Durchgangssumme	Mass-%
t, T	Temperatur	°C, K
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /s
w	Geschwindigkeit	m/s
y	Massenanteil	-; Mass-%
z	Höhe	m

Indices

A.SK	Asche der Steinkohle
B	Bett
FA	Flugasche
RG	Rauchgas
FA.RG	Flugasche und Rauchgas
R	Rohr
SCR	SCR-Reaktor
S	Schwarm

griechische Symbole

α	Öffnungswinkel des Krümmers/Kniestückes	°
β	Steigungswinkel der Rauchgasleitung	°
δ	Flankenwinkel des Diffusors	°
ε	Leerraumanteil	Vol-%
ζ	Widerstandsbeiwert von Rohreinbauten	-
η	dynamische Viskosität	Pa s
ν	kinematische Viskosität	m ² /s
ρ	Dichte	kg/m ³

dimensionslose Kennzahlen

Ar	ARCHIMEDES-Zahl
Lj	LJASTSCHENKO-Zahl
Re	REYNOLDS-Zahl

9. Literatur

- /1/ Neumann, I.: swb-Datenblatt
swb Erzeugung GmbH & Co. KG, Bremen
- /2/ Internet: Grosskraftwerk Mannheim AG
<http://www.gkm.de/>
- /3/ Weiß/Militzer/Gramlich: Thermische Verfahrenstechnik,
Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie,
Leipzig-Stuttgart, 1993
- /4/ Bohl, W.: Technische Strömungslehre
Vogel Buchverlag; Kamprath-Reihe
Würzburg, 1991
- /5/ Internet: Sonneberger Umwelttechnik GmbH
http://www.sonutec.net/html/body_entstickung_rus.html
- /6/ Liesegang, R.: Protokoll Siebanalysen, Mai 2013
- /7/ swb-Kraftwerkslabor: swb-Erzeugung GmbH, Bremen
Probenahme: 14.07.2012 von Neumann, I.
Fertigstellung: 27.07.2012
- /8/ Steenken, Th.: Protokoll Fotos, Mai 2013
- /9/ Internet: WFK Küchen GmbH
<http://dunstabzugshauben.de/ablufkanal.htm>
- /10/ Schweizer, A.: Projektierungshilfen
<http://www.schweizer-fn.de>

10. Anhang

- Anlage 1: Datenblatt zur Aschesedimentation...: Kat-Daten.pdf
- Anlage 2: MathCad-Ausdruck zum Sedimentations- und Strömungsverhalten:
- FA-Sedimentation 0.7-1.pdf
- FA-Sedimentation 1.1-1.pdf
- Anlage 3: Siebanalyse Flugasche swb.jpg
- Anlage 4: Kornverteilung Flugasche swb.pdf
- Anlage 5: Ascheproben Juli 2012.pdf
- Anlage 6: RRSB-Diagramm swb.jpg