

Nachdruck

**„Mit Wasserdampf zu sauberen Rauchgasen “
(Chemische Industrie 10/88, Prof. Dr. J.M. Chawla, CALDYN Ettlingen)**

Der Feinstaub ist heute das eigentliche Problem bei der Rauchgasreinigung. Herkömmliche Staubabscheider sind hier regelmäßig überfordert. Eine Partikelvergrößerung durch kondensierenden Wasserdampf bietet sich in der Praxis als elegante Problemlösung an.

In vielen Chemie, Kraftwerks- und Müllverbrennungsanlagen werden Abgasreinigungssysteme eingesetzt. Es werden trockene Verfahren, wie Faserfilter, und Naßabscheideverfahren, z.B. Venturi-Wäscher, eingesetzt. Mit Hochleistungsgeräten lassen sich Partikel größer als 1µm gut abscheiden. Für Partikel unter 1µm, besonders für Partikel zwischen 0,1-0,6µm (diese Partikel liegen unterhalb der Sichtbarkeit - Wellenlänge des sichtbaren Lichtes: ca. 0,7µm), gab es bisher kein geeignetes Abscheidesystem. An Versuchen zur Abscheidung kleiner Partikel, im folgenden Aerosole genannt, hat es nicht gefehlt; z.B. wurden Hochleistungs-Venturi-Wäscher mit immer höherem Druckverlust eingesetzt. Sowohl diese Hochleistungs-Venturi-Wäscher als auch die Faserfilter verursachten auf der Gasseite einen untragbar hohen Verlust, ohne den gewünschten Abscheidegrad zu erzielen.

Beim CALDYN-System für Aerosolabscheidung wird ein grundsätzlich anderer Weg beschritten. Die kleinen Aerosolpartikel unter 0,6µm werden durch die Kondensation von Wasserdampf an diesen Partikeln derart vergrößert, daß sie mit den bekannten Systemen (z.B. Gon-Packungen der Symalit) abgeschieden werden können.

Größere Aerosole durch Kondensation

Dies wird dadurch erreicht, daß das

Wasser mit einem maximalen Tropfendurchmesser von 26µm (mittlerer Durchmesser von 8µm) in den Gasstrom zerstäubt wird. Der Gasstrom wird vorher weitgehend mit Wasserdampf gesättigt. Das Wassertropfenspektrum erstreckt sich zwischen ca. 0,1 und 26µm. Wassertropfen unter 2µm haben einen sehr hohen Wasserdampfdruck an der Oberfläche. Sie sind in der gesättigten Gasatmosphäre nicht stabil und lösen sich in Wasserdampfmoleküle auf. Dadurch entstehen örtliche, gleichmäßig über den Querschnitt verteilte Zonen mit übersättigtem Wasserdampf. Wenn ein Aerosol in eine dieser übersättigten Zonen gelangt, dient das Aerosolpartikel als Kondensationskeim. Wasserdampf kondensiert am Aerosol und vergrößert dessen Abmessungen bis auf etwa 1µm.

Für reine Wassertropfen gilt nach Kelvin [1/]:

$$\ln \frac{p}{p_s} = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \tilde{M}_W}{d \cdot \tilde{R} \cdot T \cdot \rho_W} \quad (1)$$

wobei

- p =Dampfdruck an der Phasentrennfläche
- p_s =Sättigungsdampfdruck entsprechend der Gastemperatur
- σ =Oberflächenspannung
- d =Tropfendurchmesser

Für einen Wassertropfen von $d=1\mu\text{m}$ beträgt $p/p_s=1,00241$. Dies bedeutet, daß dieser Tropfen nur in einer Atmosphäre von 100,241% relativer Feuchtigkeit stabil ist. In der gesättigten Gasatmosphäre mit 100% relativer Feuchtigkeit zerfällt dieser Tropfen in kleine Wasserdampfmoleküle und schafft eine mit Wasserdampf übersättigte Zone. Andererseits beträgt die Dampfdruckerniedrigung an der Aerosoltrennfläche (z.B. Salzlösung):

$$\frac{p}{p_s} = \left(1 + \frac{6 \cdot i \cdot m \cdot \tilde{M}_W}{\rho_W \cdot \pi \cdot d^3 \cdot \tilde{M}_S} \right)^{-1} \quad (2)$$

Aus Gl.(1) und (2) ergibt sich der effektive Dampfdruck an der Aerosoloberfläche:

$$\frac{p}{p_s} = \left(1 + \frac{6 \cdot i \cdot m \cdot \tilde{M}_W}{\rho_W \cdot \pi \cdot d^3 \cdot \tilde{M}_S} \right)^{-1} \cdot \exp \left(\frac{4 \cdot \sigma \cdot \tilde{M}_W}{d_p \cdot \tilde{R} \cdot T \cdot \rho_W} \right) \quad (3)$$

Der Verlauf von p/p_s in Abhängigkeit vom Durchmesser d ist in Abbildung 1 wiedergegeben.

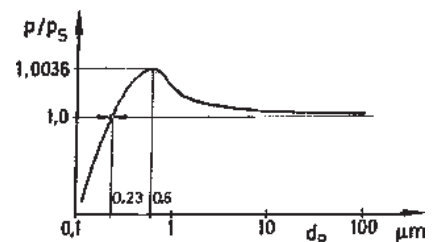


Abb. 1: Wasserdampfdruck p/p_s an der Partikeloberfläche in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser d_p

Hierbei wurde ein Natriumchlorid-Aerosol mit einer Salzmasse von 10^{-16}g ($0,045\mu\text{m}$ Durchmesser) zugrundegelegt [2/]. Der stabile Durchmesser dieses Partikels beträgt bei 100% relativer Feuchtigkeit $d_p=0,23\mu\text{m}$.

Ist p/p_s in der Umgebung des Aerosols größer als eins, wird der Aerosolpartikel durch die Wasserdampfkondensation auf Werte größer als $0,23\mu\text{m}$ wachsen.

Die für das Aerosolwachstum benötigte Zeit beträgt [3/]:

$$t = \frac{\rho_W \cdot \tilde{M}_g \cdot (d^2 - d_0^2)}{8 \cdot \delta \cdot \rho_g \cdot \tilde{M}_W \cdot p_s \cdot \left(\frac{p}{p_s} - 1 \right)} \quad (4)$$

Für $p/p_s=1,001$ (dies entspricht dem Dampfdruck für 2μ Wassertropfen) beträgt $t=0,165s$ für $d_p=0,23$ bis $1\mu m$.

Wassertropfenverteilung

Mit vorgegebener Aerosolbeladung von z.B. 200 mg/Nm^3 Gas und einem Aerosoldurchmesser von z.B. $d_p=0,3\mu m$ beträgt die Anzahl der Aerosole pro m^3 Gas $N_A=1,44 \times 10^{13}$. Mit einer kubischen Verteilung beträgt der Abstand l zwischen den benachbarten Aerosolpartikeln:

$$l_A = \left(\frac{1}{N_A} \right)^{\frac{1}{3}} = 42\mu m \quad (5)$$

Um diese Aerosole bis auf $1\mu m$ zu vergrößern, beträgt die benötigte Wassermenge $7,4 \times 10^{-3} \text{ kg/Nm}^3$ Gas. Ausgehend von 10^{-2} kg Wasser pro Nm^3 Gas und einem Wassertropfendurchmesser von $2\mu m$ beträgt der Abstand zwischen den benachbarten Wassertropfen:

$$l_w = \left(\frac{1}{N_w} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{1}{2,39 \cdot 10^{12}} \right)^{\frac{1}{3}} = 75\mu m \quad (6)$$

Aerosolvergrößerung

Werden kleine Wassertropfen in den Gasstrom eingebracht, findet auch Trägheitsabscheidung statt. Um diesen Abscheidegrad quantitativ beschreiben zu können, wird folgendes Modell betrachtet (Abb. 2):

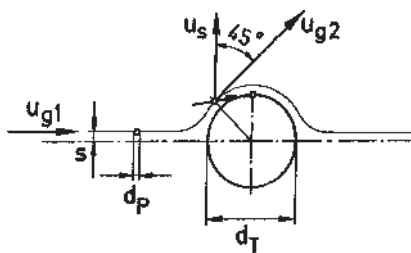


Abb. 2: Trägheitsabscheidung

Bei der Umströmung eines Wassertropfens d_T wird die Geschwindigkeit von u_{g1} auf $\frac{\pi}{2} u_{g1}$ erhöht:

$$u_{g2} = \frac{\pi}{2} \cdot u_{g1} \quad (7)$$

Die Zeit, in der der Wassertropfen bis Punkt A umströmt wird, beträgt:

$$\tau = \frac{d_T}{4 \cdot u_{g1}} \quad (8)$$

Die senkrechte Geschwindigkeitskomponente am Punkt A beläuft sich auf:

$$u_s = u_{g2} \cdot \sin 45^\circ = 1,12 \cdot u_{g1} \quad (9)$$

Die Beschleunigung:

$$b = \frac{u_s}{\tau} = 4,48 \cdot \frac{u_{g1}^2}{d_T} \quad (10)$$

Die relative Geschwindigkeit zwischen Gas und Aerosol erreicht:

$$u_r = \frac{1}{18} \frac{\rho_l}{\eta_g} d_p^2 \cdot 4,48 \frac{u_{g1}^2}{d_T} \quad (11)$$

Der Schlupf S beträgt:

$$S = \frac{\rho_l \cdot u_{g1} \cdot d_p^2 \cdot 4,48}{18 \cdot \eta_g \cdot d_T \cdot 4} \cdot d_T \quad (12)$$

$$S \approx \psi \cdot d_T$$

Mit Trägheitsparameter ψ :

$$\psi = \frac{\rho_l \cdot u_{g1} \cdot d_p^2}{18 \cdot \eta_g \cdot d_T} \quad (13)$$

Auftreffgrad η :

$$\eta = \left(\frac{2S}{d_T} \right) = (2\psi)^2 \quad (14)$$

Die Gleichung (14) stimmt für kleine Trägheitsparameter $<0,5$ sehr gut mit den numerischen Berechnungen von Löffler /4/ überein (Abb.3).

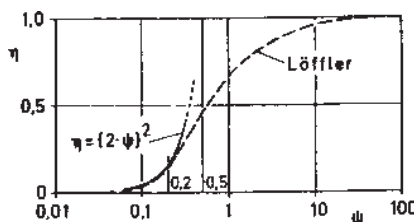


Abb. 3: Auftreffgrad η in Abhängigkeit vom Trägheitsparameter ψ

Um einen Partikel mit $d_p=0,6\mu m$ mit einer Auftreffwahrscheinlichkeit von $0,5$ nach Gleichung 14 abscheiden zu können, beträgt die notwendige relative Geschwindigkeit $u_{g1}=1,67\text{m/s}$ für einen Wassertropfendurchmesser $d_T=1\mu m$ und $u_{g1}=16,7\text{m/s}$ für einen Wassertropfendurchmesser $d_T=10\mu m$.

Ein Wassertropfen mit $d_T=1\mu m$ wird stark abgebremst und kann nur über eine vernachlässigbar kleine Strecke mit $1,67 \text{ m/s}$ relativer Geschwindigkeit bewegt werden.

Das gleiche gilt für einen $10\mu m$ großen Wassertropfen, der mit $16,7\text{m/s}$ relativer Geschwindigkeit bewegt werden soll. Die Trägheitsabscheidung für Aerosolpartikel $<0,6\mu m$ ist sehr unwahrscheinlich. Vielmehr werden kleine Aerosole erst durch die Wasserdampfkondensation vergrößert. Für $d_p>1\mu m$ überwiegt die Trägheitsabscheidung bzw. -vergrößerung durch den Aufprall von Wassertropfen und Aerosolpartikeln. Beide Vorgänge spielen sich gleichzeitig ab, und sie dauern nur wenige Zehntelsekunden.

In der Praxis werden häufig Faserfilter aus Monofilamenten eingesetzt. Mit Faserdurchmessern von $50\mu m (=d_f)$ und Anströmgeschwindigkeit $u_{g1}=3 \text{ m/s}$ beträgt für d_p der Auftreffgrad nach Gleichung 14:

$d_p [\mu m]$	η
0,3	0,0167
0,5	0,0463
0,6	0,0677
0,8	0,118
1,0	0,185
1,4	0,5

Die kleinen Aerosole mit d_p kleiner $0,6\mu m$ werden hauptsächlich durch Wasserdampfkondensation auf d_p größer als $1\mu m$ vergrößert. Hierfür werden Wassertropfen von kleiner als $2\mu m$ in dem gesättigten Gas zerstäubt. Auch zur Vergrößerung durch Trägheit benötigt man kleine Wassertropfen d_T kleiner als ca. $10\mu m$.

Diese Zerstäubung wird durch Druckluft oder Wasserdampf erreicht. Die Schallgeschwindigkeit in einem Flüssigkeit-Gasgemisch ist wesentlich kleiner als die Schallgeschwindigkeit in der Gas- oder Flüssigkeitsphase. Dies wird dazu benutzt, um Flüssigkeiten zu zerstäuben.

Dabei werden Flüssigkeit und Gas mit relativ niedriger Geschwindigkeit in einer Mischkammer zusammengeführt und am Ende der Mischkammer expandiert (Abb.4). Am Ende der Mischkammer strömt das

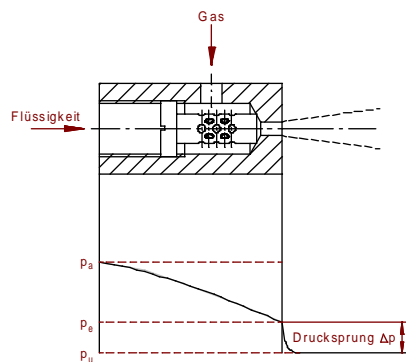


Abb. 4: Schematische Darstellung der Zerstäuberdüse

Gemisch mit der Schallgeschwindigkeit des Zweiphasengemisches. Der Drucksprung am Ende der Mischkammer zerteilt die flüssige Phase in kleinere Tropfen /5/.

Abbildung 5 zeigt das erzielbare Tropfenspektrum.

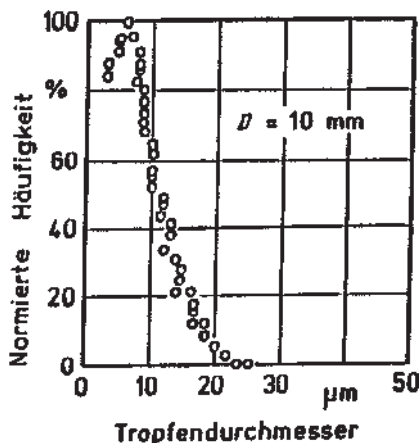


Abb. 5: Erzielbares Tropfenspektrum

Dabei wird 0,7kg Druckluft für 1kg Wasser bei 6 bar absolutem Druck benötigt /6/. Diese Tropfen müssen den gesamten Querschnitt belegen. Eine mögliche Düsenanordnung zeigt Abbildung 6. Neben der Feinstzerstäubung muß auch die Wurfweite entsprechend groß sein, um den Kanalquerschnitt vollständig mit Wassertropfen zu belegen. Eine Wurfweite von über 4m läßt sich mit dem hier angewandten Zerstäubungsprinzip erzielen. Dabei kann die Gasgeschwindigkeit mehr als 3m/s betragen, ohne daß der

tropfenbeladene Querstrahl merklich abgelenkt wird.

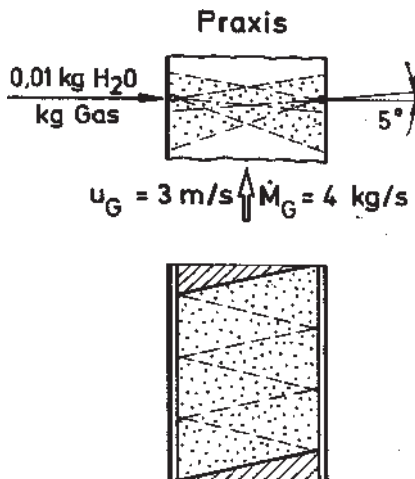


Abb. 6: Eine mögliche Düsenanordnung für die Aerosolvergrößerung

Ergebnisse

Dieses System wird zur Zeit in der Gasreinigung von Müll- und Schlammverbrennungsanlagen sowie in der Gasreinigung von Kohlekraftwerken eingesetzt. Als Beispiel sind die Resultate an einer Schlammverbrennungsanlage wiedergegeben:

- Gastemperatur 70°C, gesättigt mit Wasserdampf
- Rohgasbeladung 200 mg/m³ Gas
- Reingasbeladung nach dem Venturi Wäscher ohne Aerosolvergrößerung ca. 90 mg/m³ Gas
- Reingasbeladung nach der Aerosolvergrößerung ca. 12 mg/m³ Gas

In Kombination mit dem Mehrstufen-Abscheidesystem der Symalit sind bereits sowohl bei kohlengefeuerten Kraftwerken als auch bei kommunalen Müllverbrennungsanlagen Emissionen erreicht worden, die die bisherigen Abgaswerte deutlich unterschritten. In diesen Mehrstufen-Verfahren ist das Kondensationssystem ein integrierender Bestandteil. In einer jeweils nachgeschalteten unter Flutungsbedingungen betriebenen

Agglomerationsstufe werden die durch Kondensation auf 0,8-1,0μm vergrößerten Aerosole zu solchen von 10-12μm agglomeriert und in der Folge abgeschieden.

Im Kraftwerk Mannheim, Block 18, wurde in der hier beschriebenen Weise eine Rauchgasmenge von ca. 450000Nm³/h gereinigt. Die mittlere Eingangsbeladung betrug ca. 250-300mg/Nm³ Ammonium-Aerosole mit einem Anteil von ca. 30 Gew% zwischen 0,1-0,4μm. In einem nahezu zweijährigen ununterbrochenen Betrieb wurden Reingaswerte deutlich unter 10 mg/Nm³ dauerhaft erzielt.

Sowohl bei der MBA Bremerhaven - einer kommunalen Müllverbrennungsanlage mit einer jährlichen Kapazität von 300000t - sowie bei den BEW Ruhleben - einer städtischen Klärschlammverbrennungsanlage mit einer Gesamt Rauchgasmenge von ca. 180000Nm³/h sind diese Mehrstufen-Verfahren bereits im Einsatz bzw. werden demnächst in Betrieb genommen.

Literatur

- /1/ F. Ehrler, VDI Wärmeatlas, Abschnitt Jd, Auflage 1984, VDI Verlag, Düsseldorf
- /2/ W.C. Hind, Aerosoltechnology, John Wiley u. Sons. N.Y. (1982)
- /3/ E.U. Schlünder, Einführung in die Stoffübertragung, Georg Thieme Verlag, Stuttgart (1984)
- /4/ G. Schuch und F. Löffler, Verfahrenstechnik 12, (1978), Nr.5, S.302-306
- /5/ Deutsches Patent DE 2627880
- /6/ J.M. Chawla, Atomisation of liquids employing the low sonic velocity in liquid/gas-mixtures. Iclass meeting 1985. Imperial College London. Siehe auch Technische Information CSL der Caldyn Apparatebau GmbH, Ettlingen
- /7/ D. Steidl, Praxisnahe Erprobung eines Caldyn-Wäschers, Chem.Ind. XXXIV, Dez. 1982, S.861-863
- /8/ J. Reijnen, CAV, Sept.1987, S.31-34

CALDYN
Apparatebau GmbH

Nobelstraße 6, D-76275 Ettlingen, Tel. 07243/5403-0, Fax 07243/5403-99
E-mail: CALDYN@T-online.de / Internet: <http://www.CALDYN.de>