

Staubabscheidung in Venturi-Wäschern

Prof. Dr.-Ing. F. Mayinger und Dipl.-Ing. M. Neumann
Institut für Verfahrenstechnik der T.U. Hannover

Zusammenfassung

Für eine zuverlässige Vorausberechnung der Abscheidewirkung von Venturi-Wäschern mangelt es noch an detaillierten Kenntnissen der Einzelvorgänge im Entstauber. Zum besseren Verständnis des Abscheidephänomens wurden die Vorgänge der Flüssigkeitsdispergierung im Gas und der Energiedissipation in der Venturi-Kehle einer halbtechnischen Anlage untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, daß in der Kehle die Flüssigkeit zunächst in eine Vielzahl lamellenartiger Teilchen mit äußerst geringer Membrandicke zerfällt. Tropfen gleicher Flüssigkeitsmasse hätten eine wesentlich geringere abscheidewirksame Oberfläche. Es werden Meßergebnisse über das Spektrum der charakteristischen Abmessungen der Flüssigkeitsteilchen sowie über den Druckverlust im Venturi-Wäscher dargelegt und darüber hinaus Überlegungen für die Abscheidewirkung angestellt.

Summary

Detailed knowledge of the fluid dynamic behaviour in a venturi-scrubber is needed for reliably predicting the particle collection efficiency. Atomization and energy-dissipation in the venturi-throat were measured in a pilot-plant to gain a better understanding of these phenomena.

The results show that the liquid first disintegrates in a great number of small lamella-like particles with extreme small membrane thickness. Droplets of equal mass-contents would have much smaller surface acting for particle diameters and the pressure loss in the venturi-throat are reported together with deliberations on the collection effect.

Résumé

Pour un calcul anticipatif sûr de l'efficacité de séparation des "venturi-scrubber", on manque toujours de connaissances détaillées sur tous les phénomènes dans le séparateur. Pour une meilleure compréhension des phénomènes de séparation, on a examiné dans une installation demi-technique la distribution du liquide dans la phase gazeuse, ainsi

que la dissipation de l'énergie dans la gorge de venturi.

Les résultats montrent que dans la gorge le liquide se désintègre d'abord en beaucoup de particules en lamelle, d'une épaisseur très mince. Des gouttes d'une masse équivalente auraient une surface active de séparation beaucoup plus limitée. Des résultats des expériences sont données sur le spectre des dimensions caractéristiques des particules liquides et des pertes de pression dans le "venturi-scrubber". De plus s'y trouvent des réflexions sur la manière de séparation dans ces appareils.

1. Tropfenmodell und Abscheidegrade

Bei der Berechnung des Gesamtabscheidegrades von Naßwäschern und der dafür benötigten Wassermenge und Wasserfragmentation geht man in der Regel von dem in Abb. 1 dargestellten Barthschen Tropfenmodell aus, wobei die auf den Tropfen auftreffenden Staubteilchen als abgeschieden betrachtet werden. Bei der Bestimmung der Staubbahnen werden für das Strömungsfeld um die kugelförmig angenommenen Tropfen die klassische Hydrodynamik und für den Luftwiderstand der Partikel bei nicht zu grossen Geschwindigkeitsunterschieden das Stokesche Widerstandsgesetz zugrunde gelegt.

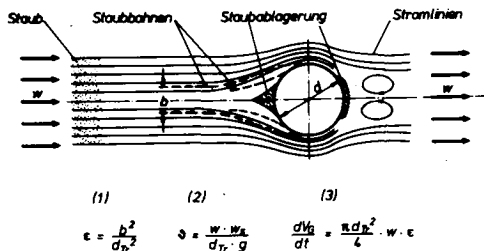


Abb. 1: Stromlinien und Staubbahnen bei der Umströmung eines kugelförmigen Wassertropfens (nach Barth)

Eine interessante Erweiterung dieser klassischen Abscheidetheorie erarbeiteten in jüngster Zeit Leschonski und de Silva /1/ für Querstromabscheider. Sie berücksichtigen zusätzlich die Auftreffwahrscheinlichkeit des Staubteilchens auf den Tropfen unter Annahme einer Potential-

strömung um den Tropfen. Für die Widerstandskoeffizienten in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl wurde eine von Rumpf angegebene Beziehung herangezogen.

Ähnlich wie bereits schon von Barth festgestellt, ergibt sich aus diesen Rechnungen, daß das spezifische gereinigte Gasvolumen in Abhängigkeit vom Tropfendurchmesser ein ausgeprägtes Maximum aufweist. Weiterhin zeigen diese Rechnungen, daß mit steigender Wasserbeladung die Abscheidewirkung exponentiell zunimmt und auf der anderen Seite umso weniger Wasser benötigt wird, je kleiner der mittlere Tropfendurchmesser ist. Leschonski und de Silva errechneten eine nahezu vollständige Abscheidung mit Tropfen von 10 - 30 μm Durchmesser bei etwa 1 l/m^3 Wasserbeladung im Gasstrom. Bei dreifach so großen Tropfen wird etwa die doppelte Wassermenge benötigt.

Theoretische Betrachtungen auf der Basis der Stoßabscheidung an Wassertropfen lassen zumindest die wichtigen Kennzahlen und Modellgesetze für die Feinstaubabscheidung zusammenstellen und geben im Falle nicht zu großer Differenzgeschwindigkeiten zwischen Gas und Flüssigkeit durchaus brauchbare Auslegungsunterlagen. Sie zeigen vor allem, daß es eine optimale Tropfengröße hinsichtlich Abscheidegrad und Energie-dissipation geben muß.

Eine spezielle Konstruktion von Hochleistungs-Naßentstaubern stellen die Venturi-Wäscher dar, in denen die Flüssigkeit durch die Strömungsenergie des Gases verteilt wird. Ausgehend von allgemeinen Betrachtungen der Flüssigkeitsfragmentation wurden erste Überlegungen zu dem im Venturi-Wäscher erzeugten Spektrum der flüssigen Partikel bereits von Nukijama /2/ angestellt, die dann von Ueoka /3/ durch Berücksichtigung der mit dem Tropfenweg veränderlichen Tropfenkonzentration verbessert wurden. Calvert /4/ führte schließlich aufgrund neuerer Messungen zuverlässigere Widerstandsbeiwerte beschleunigter Tropfenschwärme ein und berücksichtigte die Änderung der Relativgeschwindigkeit stromabwärts von der Venturi-Kehle. Schließlich wurden die Beziehungen aufgrund von zwischenzeitlich veröffentlichten Messungen des Abscheidegrades /5,6,7/ durch Anpassung empirischer Koeffizienten, die alle nicht berücksichtigten physikalischen Phänomene und Einflußgrößen abdecken sollen, weiter verbessert. Bei den nicht berücksichtigten Phänomenen war vor allem an eine Abscheidung durch andere Mechanismen als durch Stoßabscheidung z.B. durch Kondensationseffekte gedacht. Abhängig von der Korngrößenverteilung des Staubes ergaben sich dabei unterschiedliche optimale Werte für die Tropfengrößen, die Gasgeschwindigkeit in der Kehle und das Volumenverhältnis von Flüssigkeit zu Gas.

Ein Vergleich so gerechneter Abscheidegrade und gemessener Werte /8,9/ wurde von Büttner /10/ durchgeführt. In Abb. 2 sind über dem Produkt aus Flüssigkeits-Gasverhältnis und Gasgeschwindigkeit in der Kehle gerechnete und gemessene Werte des Abscheidegrades aufgetragen.

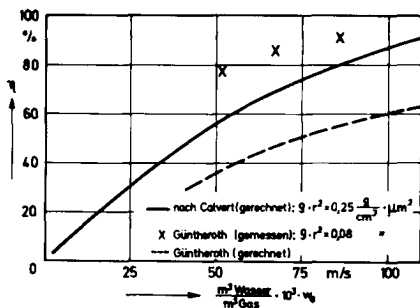


Abb. 2: Gemessene und gerechnete Abscheidegrade in Abhängigkeit vom Gas-Wasser-Verhältnis

Es zeigt sich, daß für große Partikeldurchmesser die Übereinstimmung noch annähernd zutrifft, während für kleine Partikeldurchmesser, wie insbesondere aus den Messungen von Güntheroth /9/ hervorgeht, die Theorie die Abscheidewirkung des Venturi-Wäschers weit unterschätzt. Diese Diskrepanz zwischen Rechnung und Messung wird bei Partikeldurchmessern unter $1 \mu\text{m}$ besonders groß, für die die Theorie vernachlässigbar kleine Abscheidegrade errechnet, bei denen aber ein richtig ausgelegter Venturi-Wäscher, wie die Messungen von Güntheroth zeigten, auch Stäube von $0,3$ bis $0,5 \mu\text{m}$ mittlerem Korndurchmesser zu über 90% abscheiden kann. Für eine Verbesserung der Theorie scheint es deshalb notwendig, den Fragmentationsvorgang der Flüssigkeit in der Venturi-Kehle, die Verteilung der Tropfengröße und die Geschwindigkeitsverhältnisse zwischen Gas und Flüssigkeitsteilchen näher zu untersuchen.

2. Versuche zum Strahlzerfall im Venturi-Wäscher

Im Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Hannover wurden in Zusammenarbeit mit der Fa. Baumco Essen, finanziert vom Bundesminister für Forschung und Technologie, systematische Untersuchungen zum Strahlzerfall, zur Tropfenbeschleunigung und zur Abscheidewirkung im Venturi-Wäscher an einer halbtechnischen Anlage durchgeführt. Die Anlage arbeitet bis zu einem Gasdurchsatz von $4.500 \text{ m}^3/\text{s}$ und be-

sitzt einen rechteckigen Kehlenquerschnitt von 85 cm^2 . Zur Regelung der Anlage und Anpassung an veränderliche Gasmengen sind im Kehlenbereich drehbare Klappen angeordnet, die den Kehlenquerschnitt verengen lassen. Die Waschflüssigkeit wird über einfache Bohrungen, die in zwei Reihen beidseitig an der engsten Stelle des Kehlenprofils angeordnet sind, zugegeben.

Die Messung des Fragmentationsvorganges und der Flüssigkeitsbewegung erfolgte mit Hilfe der Ultra-Kurzzeit-Fotografie bei Belichtungszeiten von $10^{-8} - 10^{-7}$ sec. Mit dieser Einrichtung war es möglich, Wasserteilchen bis herab zu Abmessungen von wenigen 100-stel mm und bei Geschwindigkeiten bis zu 100 m/s scharf abzubilden.

Als abzuscheidender Staub wurden submikrone Paraffinpartikel von $0,3$ bis $0,5 \mu\text{m}$ Durchmesser der dem Wäscher zuströmenden Luft homogen zuge-mischt. Zur Herstellung des Paraffinnebels wurde ein ursprünglich von Klumb angegebener und von Güntheroth /9/ entwickelter Aerosolerzeuger eingesetzt, in dem aufgeschmolzenes Paraffinöl in Ringschlitzdüsen zerstäubt wird. Paraffin wurde als abzuscheidender Stoff gewählt, um möglichst ungünstige Benetzungsverhältnisse und damit auch schwierige Abscheidebedingungen zu verifizieren.

Die fotografischen Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskinematografie über die Flüssigkeitsverteilung im Venturi-Wäscher bestätigten die von Hesketh /11/ erstmals qualitativ gemachte, aber noch nicht quantifizierte Beobachtung, daß die Flüssigkeit zunächst nicht in Tropfen zerfällt; Hesketh konnte aber noch nicht die im folgenden beschriebene oberflächenintensive Lamellen- und Membranbildung nachweisen. Grund für das Entstehen solcher Membranen sind offenbar die hohen Scherspannungen und die Impulskräfte in der Strömung, die im Kehlenbereich die tropfenformende Oberflächenspannung weit überwiegen.

In Abb. 3 ist eine fotografische Aufnahme des Strahlzerfalles im gesamten Kehlenbereich wiedergegeben, wobei der besseren optischen Zugänglichkeit halber die Wasserzugabe nur einseitig erfolgte. In diesem Bild sind zwei Bereiche - "1" und "2" - durch Kreise gekennzeichnet, die im folgenden näher betrachtet werden sollen, wobei es aber eines erheblich größeren optischen Auflösungsvermögens bedarf, wodurch andererseits wieder nur ein geringer Ausschnitt aus dem Strahl erfaßt werden kann.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen solche Ausschnitte aus dem Bereich "1", also aus einem Gebiet unmittelbar in oder hinter der engsten Stelle

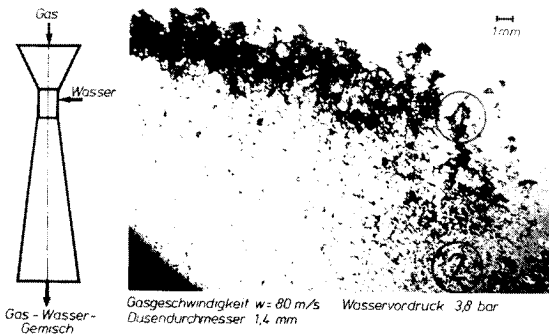


Abb. 3: Strahlzerfall (Übersichtsaufnahme)

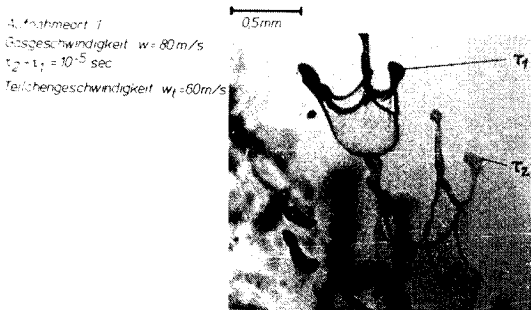


Abb. 4: Taschenförmige Membran

der Venturi-Kehle. In Abb. 4 wurde eine spezielle Aufnahmetechnik, nämlich die Doppelbelichtungstechnik angewandt, wobei in kurzem zeitlichen Abstand hintereinander zwei Aufnahmen auf ein- und dieselbe fotografische Platte gemacht wurden. Im vorliegenden Fall betrug dieser zeitliche Abstand 10^{-5} s. Dadurch ist es möglich, die Geschwindigkeit der Flüssigkeitsteilchen hinsichtlich Größe und Richtung in der Aufnahmeebene genau zu bestimmen. Abb. 4 zeigt eine spezielle Form der unter den Scherkräften der Gasströmung sich bildenden Flüssigkeitslamellen, nämlich eine taschenförmige Membran, die sich, wie aus dem Vergleich beider Belichtungen zu erkennen ist, aufbläht und dehnt. Aus der Tatsache der Volumenvergrößerung der Membrantasche ist auch abzu-

leiten, daß laufend Gas in die Tasche strömt, dessen Staubbelastung von der Flüssigkeitshaut umschlossen wird.

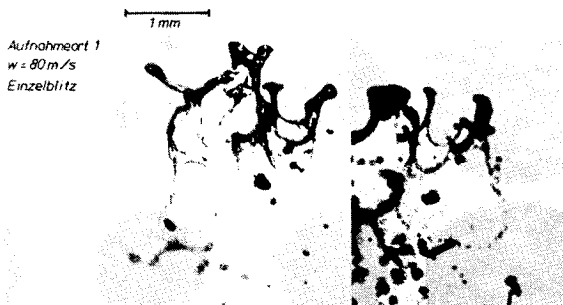


Abb. 5: Zerfall von Lamellen

Ein einfaches Kräftegleichgewicht und eine Impulsbetrachtung zeigt, daß zwischen Flüssigkeitspartikel und Gas eine erhebliche Differenzgeschwindigkeit herrschen muß, da sonst die Scher- bzw. Impulskräfte gegen die Oberflächenspannung eine so weitgehende Deformation von der Tropfenform nicht bewirken könnten.

In der Mehrzahl bilden sich jedoch nicht taschenförmige, sondern lamellen- oder fadenförmige Flüssigkeitspartikel mit Längenabmessungen von einigen Zehntel Millimeter bis einige Millimeter. Die Oberflächenspannung des Wassers war in allen Fällen nicht durch Detergentien oder Schmutzeffekte reduziert.

Auf ihrem Weg durch die Kehle werden die Wasserteilchen stark beschleunigt und es vermindern sich dadurch die an sie angreifenden äusseren Strömungskräfte, so daß schließlich die Oberflächenspannung wieder überwiegt, wodurch die Rückbildung zu Tropfen erfolgt. In verschiedenen Fällen wurde auch eine Überdehnung der Lamellen, bzw. Membranen durch die Strömungskräfte beobachtet, wodurch dann - wie in der rechten Aufnahme von Abb. 5 zu erkennen ist - die Flüssigkeitshaut in zahlreiche kleine Tropfen zerfällt.

Bildserien, in kurzem zeitlichen Abstand aufgenommen, lassen aus der starken statistischen Bewegung der Wasserlamellen einen hohen Turbulenzgrad vermuten, wie er eigentlich bei einer Zweiphasenströmung mit

so großem Dichteunterschied der Komponenten zu erwarten ist. Es erhebt sich deshalb die Frage, welche Relevanz angesichts der beobachteten Ereignisse die Annahme laminar umströmter Tropfen bei der Berechnung der Abscheidewirkung in der Venturi-Kehle noch hat. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß die Lamellen eine Lebensdauer von nur wenigen 1000-stel Sekunden haben und sich nach wenigen Zentimetern Strömungsweg, wie Abb. 6 zeigt, die im Strahlbereich "2" (Abb. 3) aufgenommen wurden, wieder in Tropfen unterschiedlicher Größe rückbilden.

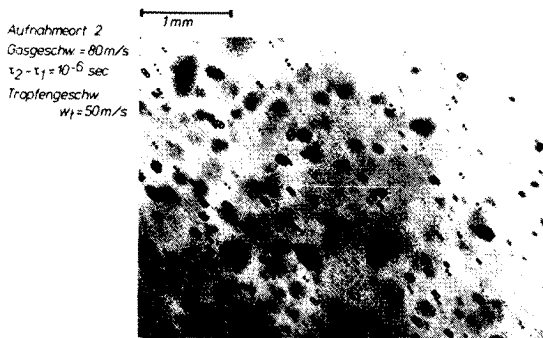


Abb. 6: Ausbildung von Tropfen (Doppelbelichtungsaufnahme)

Bei Abb. 6 handelt es sich ebenfalls wieder um eine Doppelbelichtungsaufnahme, auf der jeder Tropfen zweimal im Zeitabstand von 10^{-6} s abgebildet ist. Die Turbulenz ist jetzt erheblich geringer und die Tropfen zeigen - wie man aus ihren Bahnen in der Doppelbelichtungsaufnahme sehen kann - im wesentlichen eine gerichtete Strömung. Wegen der durch den großen Abbildungsmaßstab - Bild zu Objekt - bedingten äußerst geringen Tiefenschärfe wird nur eine Bildebene deutlich abgebildet, so daß bei der Auswertung des Tropfendurchmessers keine perspektivischen Probleme entstehen.

Ein Beispiel für das an dieser Stelle der Venturi-Kehle bei verschiedenen Gasgeschwindigkeiten gemessene Tropfenspektrum gibt Abb. 7. Daraus geht hervor, daß weitgehend unabhängig von der Gasgeschwindigkeit das Häufigkeitsmaximum bei Tropfengrößen von 50 - 60 μm liegt. Mit abnehmender Gasgeschwindigkeit erhöht sich jedoch der Anteil an großen Tropfen, die Durchmesser von 200 - 300 μm annehmen. Diese Häufigkeitsverteilung der Tropfenzahl darf nicht darüber hinwegtäuschen, daß wegen der Zunahme des Tropfenvolumens mit der dritten Potenz des Durchmessers sich ein großer Anteil der Flüssigkeit in den

großen Tropfen befindet.

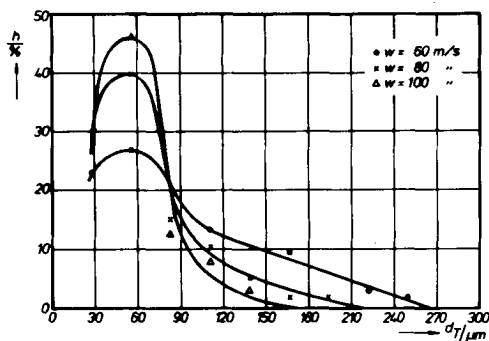


Abb. 7: Häufigkeitsverteilung der Wassertropfen

3. Abscheidemechanismus

Vor der Betrachtung des wirksamen Abscheidemechanismus ist die Frage nach der für die Abscheidung benötigten Zeit zu diskutieren. Der Abscheidvorgang wird im allgemeinen beiderseits der Phasengrenze von den Stoffübergangswiderständen auf der Gas- und auf der Flüssigkeitsseite bestimmt. Grenzfälle sind, wenn auf einer Seite der Stofftransportwiderstand keine Rolle spielt, wie z.B. bei der Staubabscheidung in der flüssigen Phase, da das Teilchen als abgeschieden gelten kann, wenn es von der Flüssigkeit benetzt ist. Der Übergangswiderstand liegt also hier auf der Gasseite und es gilt zusätzlich lediglich zur Benetzung die Oberflächenspannung zu überwinden. Eine Erhöhung des gasseitigen Austauschkoeffizienten und eine Vergrößerung der Flüssigkeitsoberfläche verspricht also eine Verbesserung des Abscheidegrades. Lamellen und Membranen haben bei gleichem Flüssigkeitsvolumen eine wesentlich größere Oberfläche als Tropfen.

Ungünstiger würden jedoch die Bedingungen für den Stoffaustauschkoeffizienten bei Lamellen gegenüber Tropfen, wenn die An- und Umströmung laminar erfolgen würde, was aber aus folgenden einfachen Überlegungen auszuschließen ist. Die Differenzgeschwindigkeiten zwischen Gas- und Flüssigkeitslamellen in diesem Bereich der Kehle, nämlich wenige Zentimeter unterhalb der Eindüsungsstelle betragen 30 - 80 m/s, wie man aus Abb. 8 entnehmen kann. Bei Lamellenabmessungen in der Größenordnung von 0,5 bis 1 mm ergeben sich dabei Reynolds-Zahlen für die

Wasserpartikel von $1 \cdot 10^3$ bis $6 \cdot 10^3$, also weit außerhalb des Stokes'schen Bereichs. Hierbei kann man selbstverständlich die Frage stellen, welche Abmessung der Lamelle - deren Dicke, deren Länge oder einen gemittelten Wert - man als charakteristische Länge in die Reynolds-Zahl einzusetzen hat. Die Werte ergeben, daß selbst bei gerichteter Gasströmung die Umströmung der Partikel nicht nach den laminaren Gesetzen behandelt werden darf. Hinzu kommt als wesentlicher Faktor die in Zweiphasenströmungen beobachteten starken mittleren Turbulenzgrade /12/.

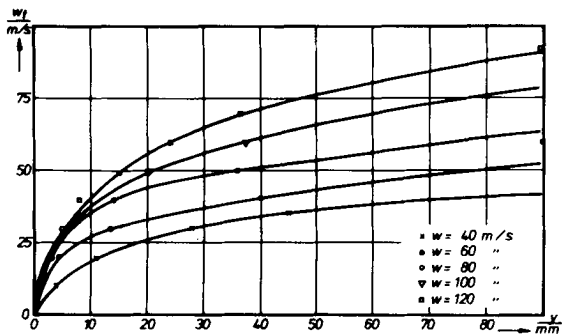


Abb. 8: Beschleunigungsvorgang der Flüssigkeitsteilchen

Man wird es also in diesem Kehlenbereich mit einem anderen Stoffaustauschgesetz zu tun haben als dem der laminaren Umströmung. Abscheidenvorgänge, die allein oder weitgehend gaseitig bestimmt sind, könnten also in diesem Kehlenbereich so intensiviert sein, daß sie bereits abgeschlossen sind, bevor die Strömung in der Venturi-Erweiterung sich wieder verzögert und die Tropfenbildung einsetzt. Dies gilt nicht für Absorptionsvorgänge, bei denen die Diffusion oder eine langsame chemische Reaktion in der flüssigen Phase eine erhebliche Rolle spielen.

Die für die Abscheidewirkung wichtige Stoffaustauschfläche und ihre Änderung längs des Strömungsweges durch die Venturikehle kann auch mit Hilfe einer rasch ablaufenden Modellreaktion, z.B. der Luftoxidation von wässriger Na_2SO_3 -Lösung, wie bei Nagel /13/ beschrieben, bestimmt werden. Hierbei wird Na_2SO_3 der Waschflüssigkeit - Wasser - zugesetzt und der Sulfit-Verbrauch bzw. der Sauerstoff-Verbrauch gemessen. Aus der umgesetzten Sauerstoffmenge kann die Stoffaustauschfläche berechnet werden. Wegen der kurzen Verweilzeiten in der Venturikehle müssen allerdings Korrekturen für die endliche Reaktionsgeschwindigkeit ange-

bracht werden.

Abb. 9 zeigt den so ermittelten Verlauf der spezifischen Austauschfläche für eine Gasgeschwindigkeit von 60 m/s an der engsten Stelle und eine Wasserbeladung von $0,5 \text{ l/m}^3$. Die Austauschfläche weist unmittelbar hinter der Eindüsungsstelle also im Bereich maximaler Scherspannungen und Impulskräfte auf die Flüssigkeit, ein stark ausgeprägtes Maximum auf.

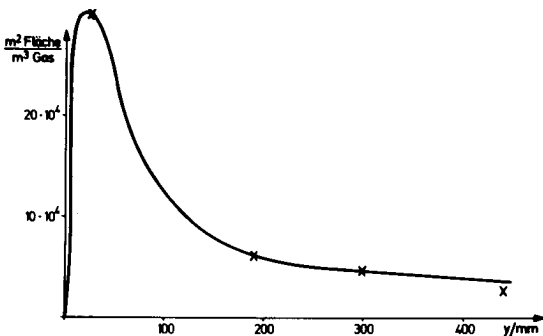


Abb. 9: Austauschfläche in Abhängigkeit des Strömungsweges

4. Zweiphasenmodell

Die gemachten Beobachtungen legen nahe, bei der Berechnung der Abscheidewirkung von Venturi-Wäschern für submikrone Staubstoffe von der Annahme des umströmten Tropfens abzugehen und dafür die - allerdings theoretisch noch wenig analysierten - Gesetze des Impuls- und Stoffaustausches in der Zweiphasenströmung heranzuziehen.

Da in der Literatur keine Ansätze für den Stoffaustausch zwischen Gas und Flüssigkeit in einer stark turbulenten zweiphasigen Strömung mit Gas als der kontinuierlichen Phase bekannt sind, muß und kann man versuchen, über die Analogie zum Impulsaustausch Ansätze zu finden. Als Maß für den Impulsaustausch kann man die Geschwindigkeitendifferenz zwischen den Phasen sowie den Druckverlust der Strömung, soweit er primär impuls- und nicht schubspannungsbedingt ist, heranziehen. Die Wandeinwirkungen im Bereich der Kehle auf den Druckverlust dürften jedoch gering sein. Trägt man für verschieden große aber zeichnungs-gleiche Anlagen den Reststaubgehalt in der Reinluft über dem Druckverlust im Venturi-Wäscher auf, wie das in Abb. 10 geschehen ist, so er-

gibt sich ein eindeutiger Zusammenhang, wobei zu beachten ist, daß der Reststaubgehalt in der Reingluft in erster Näherung umgekehrt proportional dem Abscheidegrad ist.

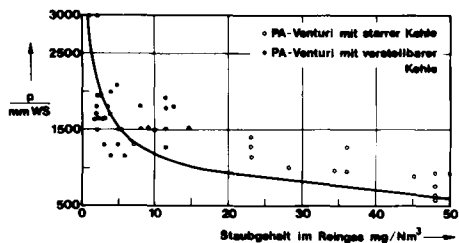


Abb. 10: Reingasstaubgehalt als Funktion des Druckabbaus im Venturi-Scrubber

Zu klären ist noch, ob auch tatsächlich im Bereich der Venturikehle der größte Druckverlust und damit die höchste Energiedissipation auftritt. Hierüber gibt Abb. 11 Auskunft.

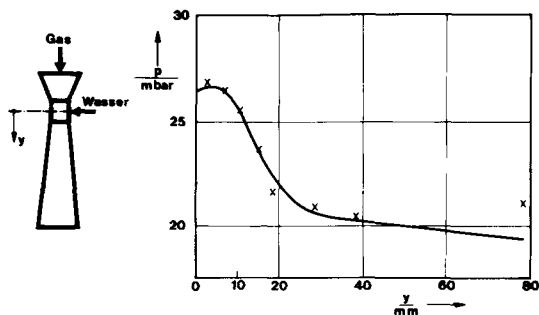


Abb. 11: Druckabbau in der Venturikehle

Es zeigt, daß nach einem anfänglichen Druckaufstau beim Auftreffen der Gasströmung auf die Flüssigkeit an der Eindüseestelle der relativ größte Druckabbau und damit auch die höchste Energiedissipationsdichte

in den ersten Zentimetern hinter der engsten Stelle der Venturi-Kehle erfolgt.

Erste Druckverlustbetrachtungen in Zweiphasenströmungen hat Martinelli /14/ angestellt, der zwei Kennzahlen für die Berechnung des zweiphasigen Druckverlustes vorschlug. Die eine Kennzahl ist das Verhältnis von zweiphasigem zu einphasigem Druckverlust, wobei für den einphasigen angenommen wird, daß die Gasphase allein im Kanal strömt.

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_{2ph} = \phi_{Gtt}^2 \cdot \left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_G \quad (1)$$

Die Kennzahl ϕ_{tt} wird als Zweiphasenmultiplikator bezeichnet. Eine zweite Kennzahl, den sogenannten Martinelli-Parameter X_{tt}

$$X_{tt} = \left(\frac{\rho_G}{\rho_F}\right)^{0,5} \left(\frac{\eta_F}{\eta_G}\right)^{0,1} \left(\frac{1-\dot{x}}{\dot{x}}\right)^{0,9} \quad (2)$$

leitet Martinelli aus einfachen Strömungsbetrachtungen ab. Der Index tt bedeutet, daß für beide Phasen turbulente Strömung vorausgesetzt wird. In Gl. 2 bedeutet ρ die Dichte, η die Viskosität und \dot{x} das Verhältnis Gasmengenstrom zu flüssigem Mengenstrom. Die Indizes F und G stehen für Flüssigkeit und Gas. In Anwendung auf den Venturi-Wäscher und der Flüssigkeitsbeladung w kann man Gl. 2 sofort umschreiben

$$X_{tt} = \left(\frac{\rho_G}{\rho_F}\right)^{0,5} \left(\frac{\eta_F}{\eta_G}\right)^{0,1} \left(\frac{w}{1-w}\right)^{0,9} \quad (2a)$$

Der Zweiphasenmultiplikator ϕ_{tt} wird von Martinelli empirisch aufgrund von Messungen als Funktion von X_{tt}

$$\phi_{tt} = f(X_{tt}) \quad (3)$$

angegeben.

Der Martinelli-Parameter X_{tt} hat aber auch bei Wärmeübergangsberechnungen in zweiphasigen Strömungen, bei denen es im wesentlichen auf den Wärmeaustausch zwischen einem wandnahen Flüssigkeitsfilm und einer mit kleinen Flüssigkeitspartikeln beladenen Gasströmung im Kern des Kanales ankommt, gute Dienste geleistet, wie Ansätze von Schrock und Grossmann /15/ und von Calus /16/ und deren Vergleich mit Meßergebnissen beweisen. Dispergierungsgrade von Flüssigkeiten werden in der Literatur häufig mit der Weber-Zahl

$$We = \frac{d_T r \cdot \rho \cdot W_G^2}{\sigma_F} \quad (4)$$

beschrieben, wobei aber Tropfenform vorausgesetzt wird.

Nach diesen Überlegungen bietet es sich an, einen Ansatz für den Stoffübergangskoeffizienten mit einer modifizierten Sherwood-Zahl

$$Sh = f(Re, X_{tt}, We, s) \quad (5)$$

als Funktion des Martinelli-Parameters, der Weberschen Kennzahl und des Schlupfes, d.h. des Geschwindigkeitsverhältnisses zwischen Gas und Flüssigkeit

$$s = \frac{W_G}{W_F} \quad (6)$$

zu versuchen.

Für den Abscheidegrad ist dann zusätzlich noch die angebotene Austauschfläche A von Bedeutung. Sie kann nach Nagel /17/ als Funktion der im Volumen pro Zeiteinheit dissipierten Energie - also der Energiedissipationsdichte E - dargestellt werden. Ein unmittelbares Maß für die Energiedissipationsdichte ist aber wiederum der örtliche bzw. integrale Druckverlust. Weiterhin ist das Verhältnis c_A/c_E der Staubkonzentration c_A im Rohgas zu der im Reingas c_E ein wichtiger Parameter.

Bevor die Zweckmäßigkeit oder Unzweckmäßigkeit für den Versuch eines Ansatzes zur Beschreibung des Abscheidegrades bewiesen werden kann, bedarf es einer Reihe systematischer Messungen in Venturi-Wäschern. Dies ist das Ziel der in nächster Zeit mit der hier skizzierten Versuchseinrichtung weiterzuführenden Arbeiten.

Literatur

- /1/ K. Leschonski und
S.R. de Silva: Theoretische Untersuchung eines Modell-Naß-entstaubers; Tagung des GVC-Fachausschusses "Mehrphasenströmungen", Clausthal-Zellerfeld, Mai 1975

- /2/ S. Nukiyama und
Y. Tanasawa: Trans. Soc. Mechan. Engrs. (Japan) 4 (1938) 86

- /3/ Y. Ueoka: Trans. Soc. Mech. Engrs. (Japan) 23 (1957) 309

- /4/ S. Calvert: AIChE J. Mai (1970) 392

- /5/ F.O. Ekman and
H.F. Johnstone: Ind. Engng. Chem. 43 (1951) 1358

- /6/ H.F. Johnstone and
M.H. Roberts: Ind. Engng. Chem. 41 (1949) 2417
- /7/ J. Brink and
C.F. Contant: Ind. Engng. Chem. 50 (1958) 1157
- /8/ M. Wicke: Fortschr. Ber. VDI-Z. Reihe 3 (1968) Nr. 33
- /9/ H. Güntheroth: Fortschr. Ber. VDI-Z. Reihe 3 (1966) Nr. 13
- /10/ H. Büttner: Staub-Reinhalt. Luft 34 (1975) 358
- /11/ Hesketh, Engel
und Calvert: Atmospheric Environment 4 (1970) 639
- /12/ L.S. Tong: J. Wiley and Sons Inc., New York 1967
- /13/ O. Nagel, H. Kürten
und R. Sinn: 42 (1970) 474
- /14/ R.C. Martinelli
and D.B. Nelson: Trans. ASME 70 (1948) 695
- /15/ V.E. Schrock and
L.M. Grossmann: Forced Convection Boiling Studies, Univ. of
California, Inst. of Eng. Research, Berkeley,
Final Rept. Nov. 1, 1959
- /16/ W.F. Calus u.a.: Chem. Engng. J. 6 (1973) 223
- /17/ O. Nagel, H. Kürten
und R. Sinn: Chemie-Ing.-Techn. 44 (1972) 899

Formelzeichen

b	Abstand der Grenzstaubbahnen
d	Durchmesser
g	Erdbeschleunigung
l	Wegstrecke
p	Druck
s	Schlupf
Sh	Sherwoodzahl
t	Zeit
v	Volumen

w	Geschwindigkeit
w_s	Sinkgeschwindigkeit
w	Flüssigkeitsbeladung
We	Weberzahl
X_{tt}	Martinelli-Parameter
x	Gasmengenstrom/Flüssigkeitsmengenstrom
ϵ	relativer Entstaubungsgrad
η	dynamische Viskosität
Φ_H	Zweiphasenmultiplikator
ρ	Dichte
σ	Oberflächenspannung
ϑ	dimensionslose Kenngröße

Indices

F	Flüssigkeit
G	Gas
Tr	Tropfen