

Alfred HOFFMANN

DDR - Bergakademie Freiberg,

Dieter PETRAK

DDR - Institut Weimar, Zementanlagenbau

ENTMISCHUNGSVORGÄNGE BEI DER PNEUMATISCHEN FÖRDERUNG
IM SENKRECHTEN ROHR

Zusammenfassung. Feststoffbeladene Gasströmungen treten bezüglich der Phasenverteilung quer zur Transportrichtung stets entmischt auf. Von praktischem Nutzen ist die experimentelle und theoretische Untersuchung sowie Beschreibung der Dynamik der Mischungszustände. Die Methoden der Diffusionstheorie und die stochastische Theorie der Teilchenbewegung bleiben infolge des hohen mathematischen Aufwandes auf Sonderfälle beschränkt. Die Autoren stellen eine experimentelle Methode zur Bestimmung der Querbewegung von Teilchen vor und belegen ihre Brauchbarkeit mit erreichten Messergebnissen.

1. Einführung

Aus der Analyse neuerer Messergebnisse aus feststoffbeladenen Gasströmungen in vertikalen Rohrleitungen sollen im folgenden einige Gesichtspunkte hervorgehoben werden, die als Beitrag zur Modellierung dieser Mehrphasenströmung aufgefasst werden könnten. Dabei spielen die Begriffe "Entmischung" und "Mischungszustand" der Mehrphasenströmung sowie Notwendigkeit und Nutzen ihrer quantitativen Erfassung eine bedeutende Rolle, so dass wenige einführende Bemerkungen zum Selbstverständnis angebracht erscheinen.

Die Verwendung des Begriffes "Entmischung" setzt voraus, dass ein idealer Mischungszustand über einen Querschnitt, z.B. am Einlauf einer Mehrphasenströmung in eine Rohrleitung oder am Ende der Einlaufstrecke vorhanden ist, der im vertikalen Transport verloren geht. Unter einem idealen Mischungszustand möge dabei die gleichmässige Verteilung der Massstromdichten des Fluids \dot{m}_F und der dispersen Phase \dot{m}_P sowie die gleichmässige Verteilung der nach Grösse, Dichte und Form unterschiedlichen Phasenbestandteile von \dot{m}_P über einen Querschnitt der vertikalen Rohrleitung verstanden werden.

Neben dieser radialen Vergleichsmässigung, Mischung oder Entmischung ist bei Strömungsvorgängen allgemein auch die Entwicklung des Mischungszustandes

des in axialer Richtung zu beachten. Praktisch könnte ein solcher idealer Mischungszustand am Einlauf der Mehrphasenströmung in das Rohr nur mit sehr aufwendigen Mitteln annähernd erreicht werden. Sein Nutzen ist fragwürdig, weil nach Durchströmen der Einlaufstrecke - und schon in dieser selbst - die physikalischen Gesetzmässigkeiten der Wechselwirkung zwischen Gas und Einzelteilchen, Gas und Teilchenensemble, Teilchen und Teilchen sowie Teilchen und Wand diesen idealen Mischungszustand aufheben. Feststoffbeladenen Gasströmungen in technischen oder halbtechnischen sowie Labor-Anlagen treten deshalb immer profilbehafet, d.h. ein einem Mischungszustand auf, der vom idealen weit entfernt ist oder der ideal als Zufalls Mischung vorliegt. Aus Experimenten von W. Müller und H. Rumpf [1] zur Axialvermischung folgt der Schluss, dass eine gleichmässige Phasenverteilung (Zufalls Mischung) nicht erreicht werden kann, wenn in den Versuchen Teilchen mit unterschiedlicher Masse eingesetzt werden. Die dabei selbst im stationären Endzustand auftretenden Konzentrationsprofile werden von den Autoren auf systematische Entmischungen zurückgeführt. Aber auch bei Verwendung von Teilchen gleicher Masse sind diese Profile nachgewiesen worden.

Von praktischem Nutzen ist jedoch die experimentelle und theoretische Untersuchung, quantitative Beschreibung und Modellierung der Dynamik der Mischungszustände (Profilentwicklung). Dieser Nutzen findet seinen Ausdruck in einer besseren technologischen Fahrweise von Anlagen, die in ihrem Wirkungsgrad vom Mischungszustand der feststoffbeladenen Gasströmung am Eintritt in die Anlage abhängig sind. Das sind z.B. die vertikalen Kohlenstaubleitungen zwischen Mühlen und Brennern in den Grosskraftwerken mit Nasskohlen-Ventilatormühlen. Ein schlechter Mischungszustand am Staubleitungsausstritt führt zu einer mangelhaften Mischung mit Verbrennungsluft im anschliessenden Brenner mit allen nachteiligen Folgen für den Dampferzeuger.

Auch in anderen Industriezweigen wie der chemischen Industrie u.a., wo staubförmige Stoffe pneumatisch zu weiteren Verarbeitungsstufen transportiert werden, ist der Wirkungsgrad verschiedener Anlagen in vielen Fällen von der Qualität des pneumatischen Förderprozesses abhängig. Nicht zuletzt soll auf den noch nicht im vollen Masse erkannten Zusammenhang zwischen Mischungszustand der Strömung und Verschleiss der Rohrleitung bzw. der in sie eingebauten Elemente hingewiesen werden.

2. Die Dynamik der Mischungszustände

Die Mischungszustände in einer waagerechten Ebene der vertikalen Rohrleitung stellen sich u.a. als Beladungsprofile dar, deren grundsätzliche Arten in Bild 1 als Wandprofile, Übergangsprofile und Kernprofile gekennzeichnet worden sind. Die Dynamik ihrer Entstehung lässt sich aus den

Transport- und Diffusionvorgängen, d.h. aus den Bewegungen der Teilchen in axialer und radialer Richtung erklären, die sich auch in vertikalen Leitungen unter dem nicht vernachlässigbaren Einfluss der Feldkraft der

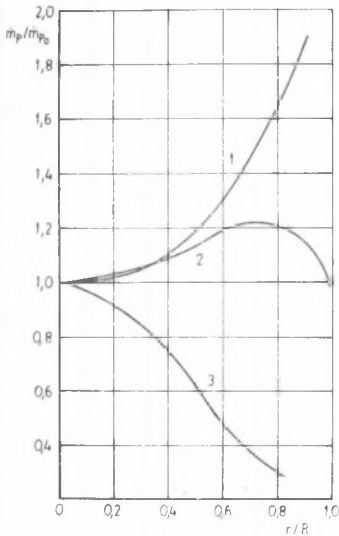


Bild 1. Die charakteristischen Arten von Beladungsprofilen in dimensionsloser Darstellung

1 - Wandprofil, 2 - Übergangsprofil, 3 - Kernprofil

Erde vollziehen. Die Diffusionsbewegungen sind der Hauptströmung in Förderichtung überlagert. Sie resultieren aus den Wechselwirkungen zwischen fluider und disperser Phase und aus den Wechselwirkungen der dispersen Phasenbestandteile untereinander. Schliesslich sind die Randbedingungen der im Strömungsraum eingeschlossenen Mehrphasenströmung von Einfluss, d.h. die Wechselwirkung zwischen Rohrwand und Fluid und zwischen Rohrwand und disperser Phase. Insbesondere geben neuere Messergebnisse, über die im folgenden berichtet werden soll, darüber Aufschluss, dass die Mischungszustände auch von der inneren Struktur des turbulenten Fluids geprägt werden. Diese Struktur ist von der Reynoldszahl abhängig. Sie findet ihren Ausdruck zum einen in einer laminaren Grenzschicht mit ebenen Laminarwirbeln in der Aussenströmung und zum anderen in einer turbulenten Grenzschicht mit räumlichen Turbulenzwirbeln in der Aussenströmung.

Das komplexe Zusammenwirken dieser verschiedenen Wechselwirkungen und Erscheinungen in der Mehrphasenströmung charakterisiert die Dynamik der Mischungszustände. Für eine hinreichende quantitative Erfassung dieser komplexen Vorgänge erscheinen die vorliegenden eigenen und die aus der Literatur bekannten experimentellen Ergebnisse z.Zt., noch nicht als ausreichend.

2.1. Beladungsprofile in der Gasströmung

Entsprechend der Einlaufbedingungen des Feststoffes und des Fördergases bilden sich in der Einlaufstrecke L_E des vertikalen Rohres i.a. asymmetrische Verteilungen der Massenstromdichten des Fluids und der dispersen Phase aus. Nach hinreichend langem Strömungsweg s ist für eine unbeladene Gasströmung nach Nikuradse [2] mit $(L_E)_F = (25 \dots 40) \cdot D$ das Geschwindigkeitsprofil $w_F = w_F(r/R)$ im kreisrunden Rohr ausgeglichen, d.h. rotationssymmetrisch. In allen Querschnitten des Rohres bei

$L_s > L_E$ bleibt dieses Geschwindigkeitsprofil erhalten. Andererseits bilden sich im vertikalen Rohr einer beladenen Strömung nach Ausgleich der Einlaufbedingungen rotationssymmetrische Beladungsprofile $\mu^* = \mu^*(r/R)$ aus, die stromabwärts einem periodischen Wechsel unterliegen. Der dabei auftretende Vorgang des Profilübergangs von einer Profilart zur anderen (Bild 1) vollzieht sich stationär, d.h. die bei unterschiedlichen L/D gemessenen Beladungsprofile unterscheiden sich zwar, sie sind jedoch zeitlich stabil und damit reproduzierbar.

Diese Beladungsprofile sind eine Funktion mehrerer, komplex wirksamer Größen:

$$\mu^*(r/R) = \mu^* \left[L/D; w_r; \bar{d}_p; \sigma_p; \rho_p k; c_w; c'_w; Tu; Tu_r; Re \right] \quad (1)$$

darin bedeuten:

- $\mu^* = \dot{m}_p / \dot{m}_f$ in kg/kg, das Beladungsverhältnis,
- L/S - Länge der Rohrleitung bis zur Messebene dividiert durch den Rohrdurchmesser,
- w_r - die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Fluid w_f und dem Feststoff w_p ;
- \bar{d}_p - der mittlere Teilchendurchmesser bei polydispersen Gemischen;
- σ_p - die Streubreite der Teilchengrößenverteilung;
- ρ_p - die Dichte der Teilchen;
- $k = \sqrt{h/h_0}$ - die Stossziffer nach O. Adam [3];
- c_w, c'_w - die Widerstandsbeiwerte der Einzelteilchen und Teilchenensemble;
- Tu, Tu_r - Turbulenzgrad des Fluids und der auf w_r bezogene;
- Re - Reynoldszahl des Fluids.

Die in Gl. 1 genannten Größen bedingen sehr ausgeprägte Unterschiede in den Bewegungseigenschaften der bei polydispersen Gemischen vorallem in ihrer Masse nicht übereinstimmenden Teilchen. Beispiele solcher gemessenen Beladungsprofile mit ihren dynamischen Übergängen in die einzelnen Profilarten sind in den Bildern 2,3 und 4 dargestellt. Die in Bild 2 wiedergegebenen Profile von J. Hermann [4] belegen einerseits die Abschwächung eines Kernprofils bei $w_f = 13$ m/s von $L/D = 12$ bis $L/D = 53$. Andererseits entwickelt sich bei $L/D = 53$ aus einem Wandprofil bei 5 m/s ein Kernprofil bei 30 m/s.

In Bild 3 sind Messungen von A. Hoffmann [5] an einer im Diffusor verzögerten Staubströmung dargestellt. Die Profilübergänge ergaben sich in Abhängigkeit vom Grad der Verzögerung des vertikalen Staubstromes. Schließlich zeigt Bild 4 Messungen von P. Zenker [6] bei geringsten Staubbeladungen des Fördergases. Diese Messungen gestatten weitere Schlussfolgerungen zu den profilbildenden Einflussfaktoren in der Strömung. Bei einer mittleren Beladung des Gases von nur $\bar{\mu} = 1,2$ g/m³ mit Kalk- bzw. Glas-

teilchen der Durchmesser $7,6 - 284 \mu\text{m}$, die in den Experimenten gesondert, d.h. monodispers eingesetzt worden waren, kann eine gegenseitige Teil-

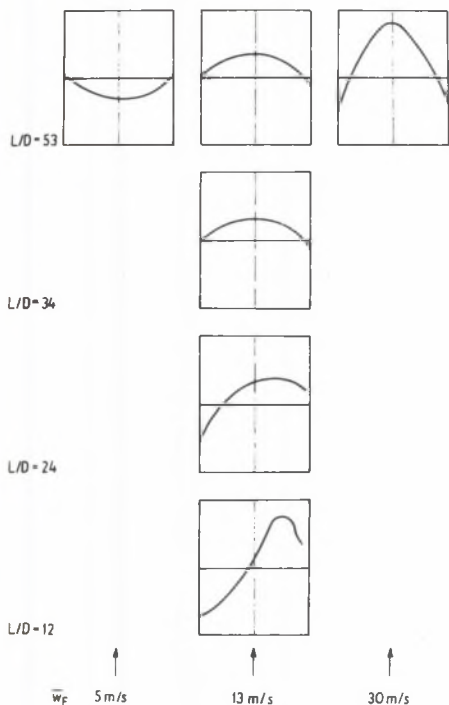


Bild 2: Beladungsprofile eines Gemisches aus Kalkteilchen mit einem mittleren Teilchendurchmesser von $84 \mu\text{m}$ nach [4]

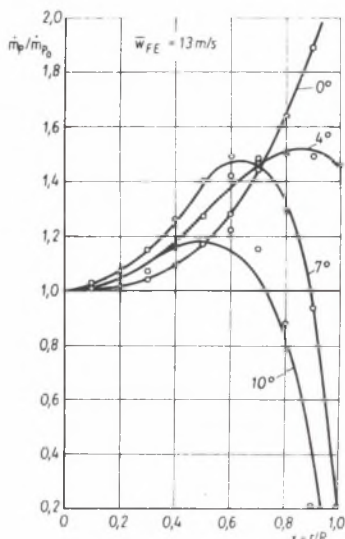


Bild 3: Beladungsprofile für einen Braunkohlenstaub $d_p \leq 1 \mu\text{m}$ senkrechten Diffusor nach [5]
 \bar{w}_{FE} - Diffusoreintrittsgeschwindigkeit des Gases, $\alpha = 0 - 10^\circ$
 Diffusorwinkel

chenbeeinflussung ausgeschlossen werden. Für die Ausprägung der in Bild 4 dargestellten Beladungsprofile verbleiben damit der Turbulenz- und Wandeeinfluss. Unabhängig von der Teilchengröße wirken beide Entmischungseffekte gegeneinander. Der Wandeeinfluss bewirkt die Ausbildung eines Kernprofils, während die Turbulenzdiffusion mit kleiner werdendem Teilchendurchmesser das Kernprofil abschwächt. Das Profil aus der Teilchengröße $7,6 \mu\text{m}$ formt sich entsprechend dem Geschwindigkeitsprofil des Gases, weil die Relativgeschwindigkeit dieser Teilchen sehr klein ist.

Die Turbulenzdiffusion mit ihrem Quertransport von Stoff und Energie führt zur Ausbildung von Übergangs- und Wandprofilen der Beladung. Dabei lässt der Materialeinfluss der Teilchen das Kernprofil der elastischeren Glasteilchen von $238 \mu\text{m}$ ausgeprägter erscheinen als das Kernprofil der größeren ($284 \mu\text{m}$) Kalkteilchen. Im Vergleich der annähernd gleich grossen $26 \mu\text{m}$ Kalkteilchen mit den $23 \mu\text{m}$ - Glasteilchen zeigen sich zwei unter-

schiedliche Profilarten. Der Wandeinfluss bewirkt bei den elastischen Glasteilchen ein Übergangprofil und bei den etwas größeren Kalkteilchen ein Wandprofil.

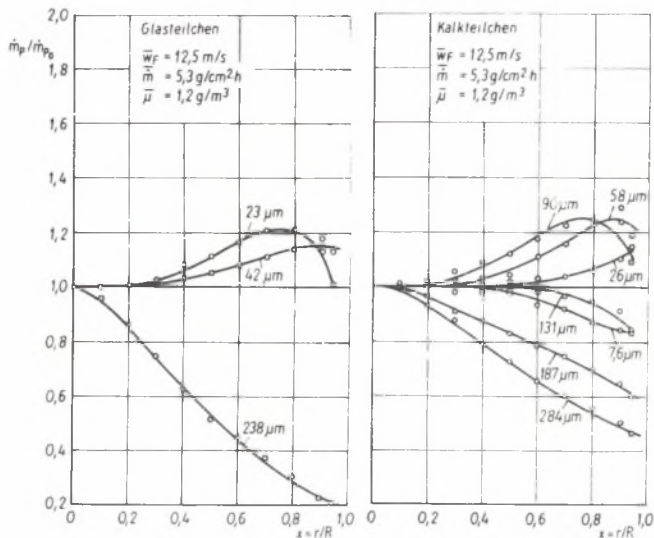


Bild 4: Beladungsprofile für Glas- und Kalkteilchen unterschiedlicher Korn-durchmesser nach [6]

3. Anwendung der Diffusionstheorie auf die feststoffbeladene Gasströmung im Rohr

Als eine der wirksamen Ursachen für die Ausbildung von Beladungsprofilen in Rohrleitungen können neben anderen die Diffusionsvorgänge von Teilchen genannt werden. Zu ihrer Beschreibung wird hauptsächlich der Diffusionskoeffizient benutzt. Es lässt sich bekanntlich eine Zweiteilung der Methodik für die Theorie der Diffusionsvorgänge angeben: die phänomenologische Theorie der Diffusion verzichtet ähnlich wie die Thermodynamik bewusst auf die Kenntnis der Elementarvorgänge; die atomistische Theorie der Diffusion dagegen analysiert diese, um daraus den Diffusionskoeffizienten zu berechnen [7].

Will man diese Theorien auf feststoffbeladene Gasströmungen anwenden, sind einige wesentliche Bedingungen zu beachten. Diese sind:

- es muss sich ein hinreichend grosses Teilchenensemble im Bilanzvolumen befinden; das Bilanzvolumen muss klein gegenüber den Abmessungen des Strömungsraumes sein;

- das Lagrange-Integral-Zeitmass, das für die Teilchenzusammenstöße steht muss wesentlich kleiner sein als die mittlere Verweilzeit der Teilchen im Strömungsraum.

Für die phänomenologische Theorie der Diffusion unter diesen Bedingungen im isotropen Fall gelten die Differentialgleichungen

$$\bar{j} = c \cdot \bar{w} - D \operatorname{grad} c = c \cdot \bar{w} - D \cdot \nabla c \quad (2)$$

$$\partial c / \partial t = -\operatorname{div} (c \cdot \bar{w}) + \operatorname{div} (D \operatorname{grad} c) = -\operatorname{div} (c \cdot \bar{w}) + \nabla (D \nabla c) \quad (3)$$

In teilchendispersen Systemen ist der Diffusionskoeffizient D von der Zeit t , der Konzentration c , der Teilchengröße und Teilchenform sowie der gegenseitigen Teilchenstöße und der mittleren Feststoffbeladung des Trägerfluids abhängig. Im anisotropen Fall ist der Stromdichtevektor \bar{j} von der Raumrichtung abhängig. Die Lösung von Gl. 3 ist mathematisch sehr schwierig und massgeblich von den Anfangs- und Randbedingungen beeinflusst. Die Randbedingungen sind darüber hinaus eine Funktion des Strömungsweges.

Für die atomistische oder auch statistische Theorie der Diffusion wird den von A. Einstein [8] für die Brownsche Teilchenbewegung formulierte Diffusionskoeffizient zugrunde gelegt:

$$D = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{2\tau} \int_{-\infty}^{+\infty} \eta^2 \cdot w(\gamma, \eta, \tau) \cdot d\eta \quad (4)$$

Er stellt sich als mittleres Verschiebungsquadrat dar. S.L. Soo [9] hat beispielsweise für eine in einer Rohrleitung in y -Richtung strömende Gas-Feststoff-Strömung die Diffusionskonstanten der turbulenten Gasströmung und der Teilchenbewegung experimentell bestimmt. Die Messung der Diffusionskonstanten der turbulenten Gasströmung erfolgte mit einer Tracerdiffusionstechnik, während für die Bestimmung der Diffusionskonstante der Teilchenbewegung eine optische Methode eingesetzt wurde. Der Integralausdruck in Gl. 4 für die Teilchenbewegung wurde aus $1/n \sum (\Delta \eta)^2$ ermittelt, was sehr aufwendig ist.

4. Anwendung der stochastischen Theorie der Teilchenbewegung auf die feststoffbeladene Gasströmung im Rohr

Die oben genannten Schwierigkeiten vermeidet man z.T., wenn man den Zustand des teilchendispersen Systems mit Hilfe der mathematischen Theorie der Zufallsprozesse beschreibt [10]. Das Diffusionsmodell kann dann als Spezialfall eines allgemeinen Modells angesehen werden. Der tatsächliche Prozess muss sich als Markoffscher Prozess, d.h. als stochastischer

Prozess ohne Nachwirkung beschreiben lassen. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit der Lage eines Teilchens im Strömungsraum nicht von der Wahrscheinlichkeit der Lage des Teilchens vor dem gewählten zeitlichen Bezugspunkt abhängt.

Wenn für die Verteilungsfunktion $F(t, x, y)$ bestimmte Bedingungen, starke Stetigkeit, zeitliche und örtliche Differenzierbarkeit, Existenz von Grenzwerten erfüllt sind, können zwei Differentialgleichungen abgeleitet werden, die als 1. und 2. Kolmogoroffsche Gleichungen bekannt sind. In vereinfachter Form kann die 2. Kolmogoroffsche Gleichung geschrieben werden

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} [w(x, t)u(x, t)] + \frac{\partial^2}{\partial x^2} [D(x, t)u(x, t)] \quad (5)$$

mit der örtlichen Wahrscheinlichkeitsdichte $u(x, t)$ und x als der Transportrichtung. Der stochastische Koeffizient $w(x, t)$ stellt die Geschwindigkeit der geordneten Teilchenbewegung und $D(x, t)$ den Grad der Unordnung der Teilchenbewegung dar.

Da die 2. Kolmogoroffsche Differentialgleichung eine partielle Differentialgleichung 2. Ordnung darstellt, sind ihre Lösungen wiederum stark von den Anfangs- und Randbedingungen abhängig. Das zeigt sich bei der Untersuchung von Transportprozessen in kontinuierlich betriebenen Apparaten wie Mischer und Kugelmühle und bei der Berechnung der Trennkurve eines Sichters.

Insgesamt ist der damit beschriebene mathematische Apparat für die Untersuchung des Diffusionseinflusses bei feststoffbeladenen Gasströmungen in vertikale Rohrleitungen zu kompliziert. Es ist daher von den Autoren eine experimentelle Methode zur Bestimmung der Querbewegung von Teilchen erprobt worden, auf die im folgenden eingegangen werden soll.

5. Eigene experimentelle Untersuchungen zum Diffusionsstrom

5.1. Beschreibung der Versuchsanlage und der Messtechnik

Die Versuchsanlage zur Untersuchung von feststoffbeladenen Gasströmen im Bereich Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik, Prof. H. Schubert, Bergakademie Freiberg, besteht aus einer vertikalen Rohrleitung NW 100. Sie weist z.Zt. eine maximale Länge von 3,5 m auf und ist aus einzelnen, unterschiedlich langen Leitungselementen lotrecht zusammengesetzt. Das gestattet den Einbau eines Messkopfes zwischen die Leitungselemente in unterschiedlicher Entfernung vom Einlaufkrümmer der Messstrecke. Der Messkopf, der lichtoptische Sonden aufnimmt, ermöglicht die Sondenverschiebung und -drehung und damit die in-stream-Messung in jedem Punkt des Rohrquerschnittes.

Der Versuchstaub wird über einen stufenlos regelbaren Schneckenzuteiler eingebracht, der den Austritt eines Staubbunkers abschliesst. Auf dem Staubbunker ist ein Abscheidezyklon montiert, in dem der feststoffbeladene Gasstrom nach Durchströmen der Messstrecke in seine beiden Phasen getrennt wird. Das Druckluftgebläse und der Schneckenzuteiler gestatten als Maximalwerte in der Leitung mit NW 100 eine Gasgeschwindigkeit von 35 m/s und einen Staubmassenstrom an Weizengröss z.B. von 15 kg/s.

Zur Messwerterfassung und Auswertung wird eine lichteoptische Methode benutzt, über die in zahlreichen Veröffentlichungen berichtet worden ist [11], [12], [13], [14] u.a. Hauptbestandteil der Messmethode für lokale

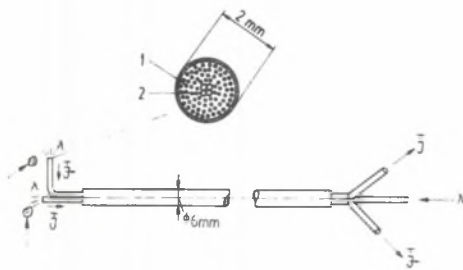


Bild 5: Lichtreflexionssonde zur Simultanmessung des Transport- und Diffusionsstromes

- 1 - Glasfasern $30\ \mu\text{m}$ als Lichtgeber,
2 - PVC-Fasern $250\ \mu\text{m}$ als Reflexionslichtempfänger

instream-Messungen sind flexible Lichtleitfasern, die als Geber und Empfänger in die Mehrphasenströmung eingebracht werden. Ihre Durchmesser betragen $30\text{--}250\ \mu\text{m}$. Diese Grösse gestattet die Ausführung von miniaturisierten Sonden, die ein lokales Messvolumen in der Strömung ausleuchten, die Signale von der dispersen Phase aufnehmen und zur Weiterverarbeitung nach aussen leiten. Die von den Teilchen verursachten Lichtabsorptions- oder Lichtreflexionsimpulse werden von Fotodioden oder Sekundär-

elektronenvervielfachern in elektrische Signale umgewandelt und verstärkt. Die zur Aufnahme der Beladungsprofile und zur Messung des Diffusionsstromes von Teilchen in der beladenen Gaströmung verwendete Simultansonde ist in Bild 5 dargestellt.

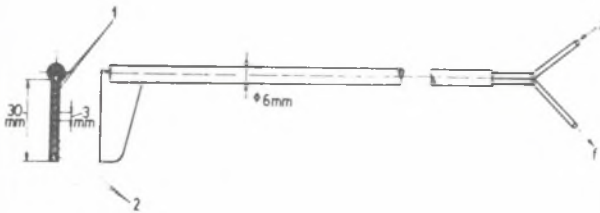


Bild 6: Lichtreflexionssonde zur Bestimmung der Teilchengeschwindigkeit nach der Frequenzmethode

- 1 - Glasfasern $30\ \mu\text{m}$ als Lichtgeber, 2 - Glasfasern $250\ \mu\text{m}$ als Reflexionslichtempfänger

Die Frequenzsonde zur Aufnahme der Geschwindigkeitsprofile des Feststoffes über den Rohrleitungsquerschnitt einschliesslich der Wandgeschwindigkeit des Feststoffes ist in Bild 6 abgebildet.

5.2. Messergebnisse zum Diffusionsstrom und zur Geschwindigkeitsverteilung der dispersen Phase

Für die vertikale Förderleitung wird vorausgesetzt, dass eine Transportgeschwindigkeit des Feststoffes nur in vertikaler Richtung auftritt (y-Richtung). Die x- und z-Komponenten sind gleich Null. Für die Diffusionsbewegung des Feststoffes gilt stattdessen, dass in allen Koordinatenrichtungen Anteile existieren. Die Ausbildung der Beladungsprofile des Feststoffes über den Rohrleitungsquerschnitt wird dann massgeblich von den Diffusionsströmen in der x-z-Ebene bestimmt.

Das geeignete Mass zur Bestimmung der Diffusionsvorgänge quer zur Transportgeschwindigkeit sind die entsprechenden Diffusionskoeffizienten. Diese Methode ist jedoch für den in einer Rohrleitung transportierten Feststoff nur schwer anwendbar. Das ist vor allem in den experimentellen und theoretischen Schwierigkeiten bei der Festlegung der Anfangs- und Randbedingungen begründet. Sowohl die phänomenologische als auch die statistische Theorie der Diffusion sind in ihrer jetzigen Form für die Behandlung eines derartigen Problems wegen des enormen Aufwandes nicht geeignet. Für die Anwendung der stochastischen Theorie der Teilchenbewegung in solchen Rohrleitungen ist die Frage noch zu klären, ob es sich bei den dynamischen Vorgängen tatsächlich um einen Prozess ohne Nachwirkung handelt.

Um dennoch brauchbare Aussagen zur Ausbildung von Beladungsprofilen in vertikalen Rohrleitungen zu erhalten, wird von den Autoren eine experimentelle Methode zur Bestimmung des Diffusionsstromes vorgeschlagen. Im Interesse der Erreichung reproduzierbarer und vergleichbarer Aussagen muss dabei der Diffusionsstrom auf den Transportstrom des Feststoffes in Stromungsrichtung bezogen werden. Dabei sind beide Ströme simultan zu messen.

Der relative mittlere Diffusionsstrom \bar{J}_D ergibt sich aus dem Verhältnis der radialen und axialen mittleren Teilchenimpulse (\bar{I} und \bar{I}_z) an der Simultansonde

$$\bar{J}_D = \frac{\bar{I}}{\bar{I}_z} \cdot 100 \text{ in } \% \quad (6)$$

Dieser relative mittlere Diffusionsstrom wurde in Abhängigkeit von verschiedenen Reynoldszahlen über den Rohrleitungsquerschnitt in unterschiedlichen Messebenen L/D gemessen. Die Ergebnisse für die Messebene $L/D = 26$ sind in Bild 7 dargestellt. Die Verläufe, die sich in den einzelnen Messebenen nur unwesentlich von einander unterscheiden, entsprachen dem bekannten Verlauf der Impulsaustauschgrösse der turbulenten Wirbelelemente,

der für die unbeladene Rohrströmung von J. Nikuradse [15] u.a. ermittelt worden ist. Die Maximalwerte der mittleren relativen Diffusionsströme \bar{J}_{Dmax} aus Bild 7 sind für die einzelnen Reynoldszahlen in Bild 8 über diesen Verlauf übertragen worden. Dieser Verlauf lässt ab $Re \geq 1,4 \cdot 10^5$ eine deutliche Zunahme des Diffusionsstromes erkennen, die auch in allen anderen Mesebenen zu beobachten war ($L/D = 14, 17, 20$ u. 23). In Bild 8 sind auch die mittleren sekundlichen Teilchenzahlen in Transportrichtung für die Rohrmitte ($\bar{i})_0$ und den Wandbereich ($\bar{i})_{0,92}$ eingezeichnet. Im Verlauf $(\bar{i})_{0,92} = f(Re)$ zeigt sich bei $Re > 1,4 \cdot 10^5$ kein weiterer Abfall der Beladung im Wandbereich, obwohl die mittlere Beladung $\bar{\mu}$ wegen $\dot{m}_p = const$ in dieser Versuchsreihe eine fallende Tendenz aufweist, die im Zentrum der Rohrströmung nachweisbar ist. Damit ist experimentell belegt, dass die Feststoffströhne an der Wand infolge des Diffusionsstromes \bar{J}_D

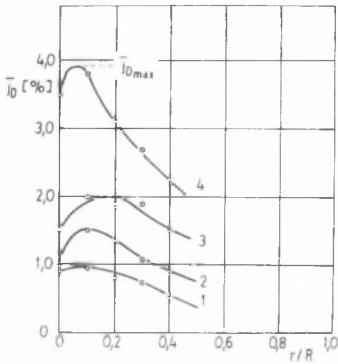


Bild 7: Relativer mittlerer Diffusionsstrom über dem Rohrradius

- 1 - $Re = 1,03 \cdot 10^5$, 2 - $1,42 \cdot 10^5$
- 3 - $1,63 \cdot 10^5$, 4 - $1,83 \cdot 10^5$

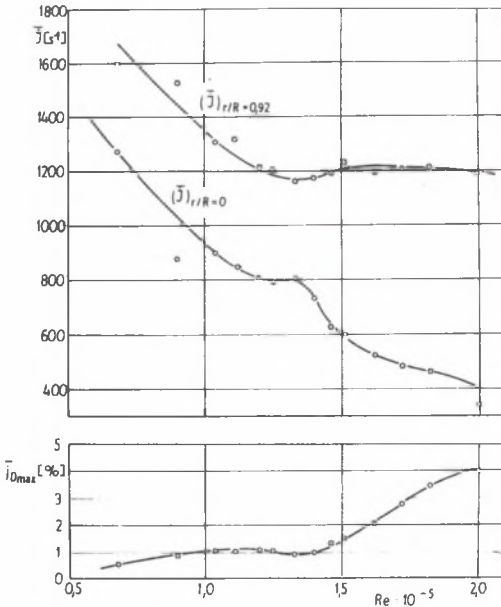


Bild 8: oben: Verläufe der mittleren sekundlichen Teilchenzahlen im Bereich der Rohrwand ($\bar{i})_{0,92}$ und in Rohrmitte ($\bar{i})_0$; unten: Verlauf der Maximalwerte der mittleren relativen Diffusionsströme über der Reynoldszahl

oberhalb Re^{**} mit steigender Reynoldszahl angereichert wird. Nach dem Umschlag der Rohrströmung aus der laminaren in die turbulente Struktur bei $Re^* = 2,24 \cdot 10^3$ findet bei $Re^{**} = 1,53 \cdot 10^5$ ein weiterer Strukturwandel in der Rohrströmung statt, der mit dem Grenzschichtumschlag und der Entstehung turbulenter Wirbel verbunden ist. Der mit der Entstehung räumlich turbulenter Wirbel auftretende höhere Wärme-, Masse- und Impulstransport führt in der beladenen Strömung zum stärkeren Ansteigen des Diffusionsstromes.

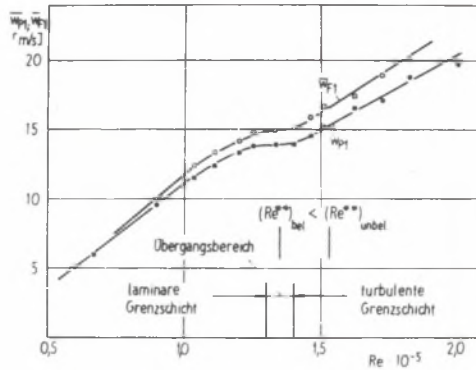


Bild 9: Feststoffgeschwindigkeit an der Rohrwand \bar{w}_{F1} als Funktion der Reynoldszahl, \bar{w}_{F1} - annähernde Geschwindigkeit des schwachbeladenen Fördergases, das intermittierend zwischen Wand und Feststoffströhne tritt; $(Re^{**})_{\text{bei}}$; $(Re^{**})_{\text{unbel}}$ - kritische Reynoldszahlen des Grenzschichtumschlages der beladenen bzw. unbeladenen Gasströmung

Der in Bild 9 dargestellte Geschwindigkeitsverlauf des Feststoffes an der Rohrwand - also im Grenzschichtbereich - belegt diesen physikalischen Sachverhalt ebenfalls.

Ein Beispiel für die den Messwerten zugeordneten Beladungs- und Geschwindigkeitsverläufe des Feststoffes über den Rohrquerschnitt ist in Bild 10 dargestellt.

Die verwendete Messtechnik zur Aufnahme des Diffusionsstromes und zur Geschwindigkeitsbestimmung liefert keine Informationen über die Richtungen der Teilchenbewegungen. Aus den Konzentrationsunterschieden zwischen Wand- und Mittenbereich der Rohrströmung sowie aus früheren Messungen des Feinkorndefizits im Mittenbereich [5] lässt sich der Schluss ableiten, dass der Diffusionsstrom vorwiegend feiner Teilchen auf die Rohrwand gerichtet ist. Die Folge ist eine Anreicherung des Fluids mit Feststoff im Wandbereich. Für die dynamischen Übergänge von einer in die andere Profilart der Beladung existieren begründete Modellvorstellungen, die durch die angeführten Messungen bestätigt werden. Für eine vollständige Erfassung der

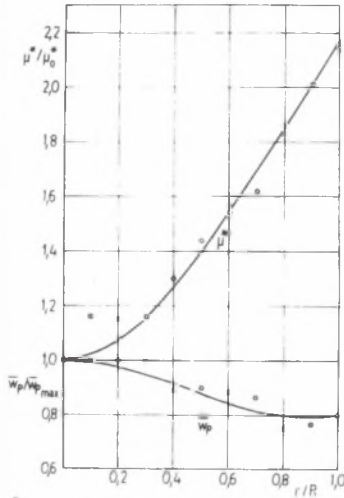


Bild 10: Geschwindigkeits- und Beladungsverteilung bei $\bar{\mu} = 0,75 \text{ kg/m}^3$ und $\bar{w}_{pmax} = 24 \text{ m/s}$

Vorgänge in der feststoffbeladenen Gasströmung im vertikalen Rohr bedarf es weiterer experimenteller Untersuchungen.

6. Literatur

- [1] Müller W., Rumpf H.: Das Mischen von Pulvern in Mischern mit axialer Mischbewegung. Chem.-Ing.-Tech. 39(1967) Heft 5/6.
- [2] Nikuradse J.: Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Röhren. Forsch. arb. d. Ing. wesens 356 (1932).
- [3] Adam O.: Untersuchungen über die Vorgänge in feststoffbeladenen Gasströmen. Forsch. berichte d. Landes Nordrhein/Westf. 904 (1960).
- [4] Herman J.: Staub in turbulenter Gasströmung - Staubverteilung und messtechnische Probleme. Diss. TU-München 1976.
- [5] Hoffmann A.: Untersuchung von Entmischungserscheinungen bei der pneumatischen Förderung von Braunkohlenstaub. Diss. Bergakademie Freiberg 1968.
- [6] Zenker P.: Untersuchungen über die Staubverteilung von stromenden Staub-Luft-Gemischen in Rohrleitungen. Diss. TU-München 1970.
- [7] Jost, W.: Diffusion. Dietrich/Steinkopf, 1957.
- [8] Einstein A.: Ann. Phys. 17 (1905).
- [9] Soo S.L.: Fluid Dynamics of Multiphase Systems. Waltham, Massachusetts, Toronto, London: Blaisdell Publishing Comp. 1967.
- [10] Gnedenko B.W.: Lehrbuch der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Berlin Akademie-Verlag, 1965.
- [11] Petrak D., Hoffmann A.: Ergebnisse bei der Anwendung eines neuen Messverfahrens zur Bestimmung der Geschwindigkeit, Konzentration und Größe der Teilchen in pneumatischen Förderanlagen. Proceedings of the second conference on pneumatic conveying. (Vortrag B 22). Pece, VR-Ungarn, 1978.

- [12] Petrak D., Hoffmann A.: Messmethoden zur quantitativen Erfassung von Mehrphasenströmungen. Freiburger Forschungsheft A 608, Leipzig, 1980.
- [13] Hoffmann, A., Petrak D.: Eine lichtoptische Methode zur in-stream-Messung von Teilchengröße, -geschwindigkeit und -konzentration in Mehrphasenströmungen. Chem. Techn. 32, (1980), Heft 12.
- [14] Petrak D., Hoffmann A.: Die Simultanmessung von Teilchenkonzentration -geschwindigkeit und -grösse in Mehrphasenströmungen. Chem. Techn. 33 (1981), Heft 5.
- [15] Nikuradse J.: Untersuchungen über die Strömungen des Wassers in konvergenten und divergenten Kanälen. VDI-Forsch. heft 289, (1926).

SEGREGACJA CZĄSTEK W PROCESIE TRANSPORTU PNEUMATYCZNEGO W RURZE PIONOWEJ

S t r e s z c z e n i e

W artykule poruszono zagadnienie segregacji cząstek, zachodzącej w procesie transportu pneumatycznego, poprzecznie względem kierunku przepływu medium.

Autorzy przedstawili wyniki badań eksperymentalnych z zastosowaniem techniki świetlno-optycznej (świetłowody) do określenia ww. poprzecznych przemieszczeń. Opracowanie nawiązuje do kilku artykułów opublikowanych wcześniej przez Autorów i wiążących się z poruszonym tematem.

СОРТИРОВКА ЧАСТИЦ В ПРОЦЕССЕ ПНЕВМОТРАНСПОРТА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ

Р е з ю м е

В работе затронута проблема сортировки частиц, которая имеет место в процессе пневмотранспорта, поперечно относительно направления потока среды. Представлены результаты экспериментальных исследований с применением оптико-световой (световоды) техники для определения выше упомянутых поперечных перемещений. В данной работе упомянуто о нескольких ранее опубликованных авторами работах касающихся затронутой темы.

SEGREGATION OF PARTICLES DURING PNEUMATIC CONVEYING IN A VERTICAL TUBE

S u m m a r y

In a paper a problem of particles segregation during pneumatic conveying across the medium flow direction is considered. Some experimental results using light pipes are presented. The work is connected with former papers of authors dealing with the same problem.