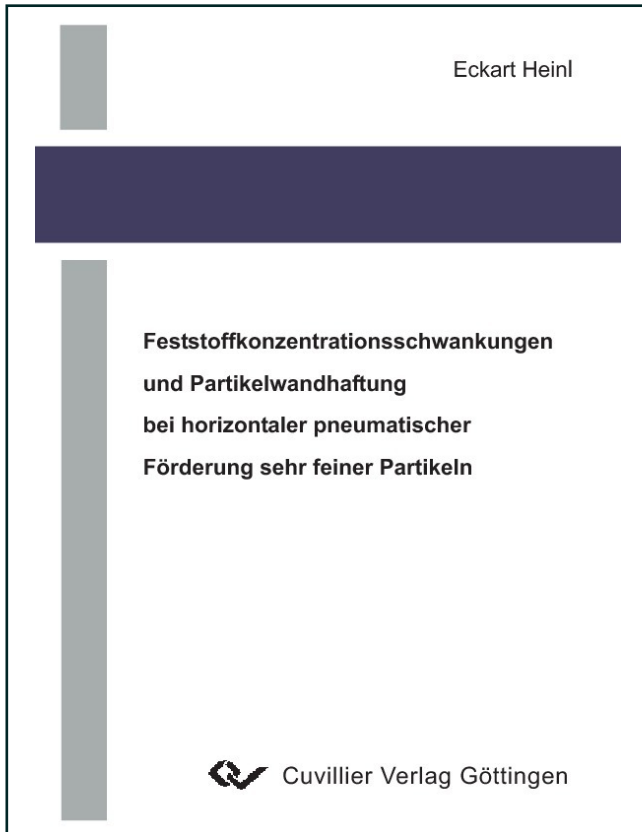




Eckart Hehl (Autor)

**Feststoffkonzentrationsschwankungen und  
Partikelwandhaftung bei horizontaler pneumatischer  
Förderung sehr feiner Partikeln**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/3016>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 1 Einleitung

Der pneumatische Transport von Schüttgütern stellt häufig die Verbindung zwischen zwei Prozessstufen her. Die Auslegung pneumatisch betriebener Förderleitungen bereitet im Allgemeinen keine Schwierigkeiten mehr. Es gibt jedoch Förderzustände, deren Ursache und deren Randbedingungen noch nicht vollständig geklärt sind. Dazu zählen axiale Konzentrationsschwankungen, die entlang der Förderleitung mit mehreren hundert Metern Länge beobachtet werden, obwohl eine gleichmäßige Feststoffdosierung an der Aufgabestelle sichergestellt wurde. In vielen verfahrenstechnischen Prozessen, wie beispielsweise beim Dosieren von Katalysatoren oder bei der Verbrennung von Kohlenstaub, muss der Feststoff jedoch gleichmäßig der Prozessstufe zugeführt werden.

Die bei der pneumatischen Förderung von Partikeln kleiner als  $20\ \mu\text{m}$  auftretende Partikel-Wandhaftung ist ebenfalls unerwünscht. Das Ausbilden von haftenden Partikelschichten an der Rohrwand ändert den für die Strömung zur Verfügung stehenden freien Rohrquerschnitt und die Wandrauheit. Daraus resultiert ein erhöhter Druckverlust. Des Weiteren kann es durch Wiederaufwirbelungen von haftendem Feststoff zu Konzentrationsschwankungen kommen.

In dieser Arbeit werden die Konzentrationsschwankungen und die Partikel-Wandhaftung untersucht. Neben experimenteller Untersuchungen wird auch die numerische Strömungssimulation (CFD) eingesetzt. Letztere hat sich als geeignetes Instrument erwiesen und zum Verständnis komplexer Strömungsvorgänge beigetragen. Generell stellt sie jedoch nur eine Ergänzung zu den notwendigen Experimenten dar. Der entscheidende Vorteil der numerischen Simulation besteht darin, dass einzelne Parameter betrachtet werden können, die messtechnisch gar nicht oder nur mit großem Aufwand erfassbar sind. Damit ist es möglich, den Einfluss dieser Parameter mit geringem Aufwand zu bestimmen. Allerdings setzt diese Vorgehensweise voraus, dass geeignete Modelle zur Darstellung der Vorgänge zur Verfügung stehen. Wenn solche Modelle vorhanden sind und durch experimentelle Ergebnisse verifiziert werden, dann bietet die numerische Simulation ein auch wirtschaftliches Potenzial, die aufwendige experimentelle Untersuchungen verringern kann. In dieser Arbeit wird die Gas/Feststoff-Strömung mit Computational Fluid Dynamics (CFD) simuliert.

## 2 Stand des Wissens

Als Konzentrationsmaß für die disperse Phase Feststoff wird üblicherweise die Beladung verwendet. Sie ist wie folgt definiert:

$$\mu = \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_G} \quad (2.1)$$

Dieser Überblick beschränkt sich auf geringe Feststoffkonzentrationen, bei denen zwei wesentliche Formen der Zweiphasenströmung auftreten. Ist die Beladung klein genug, um alle Partikeln im Flug zu halten, spricht man von Flugförderung. Bei größeren Beladungen bildet sich eine Feststoffsträhne, die sich mit einer geringeren Geschwindigkeit als die sich im Flug befindenden Partikeln durch die Förderleitung bewegt (typisch sind 10 %- 20 % der Gasgeschwindigkeit). Die grundlegenden physikalischen Hintergründe für die Flug- und Strähnenförderung sind bekannt, so dass stationäre pneumatische Förderanlagen in diesem Konzentrationsbereich mit guter Genauigkeit ausgelegt werden können.

### 2.1 Pneumatische Förderung mit geringer Feststoffkonzentration

Bei der pneumatischen Förderung wird der Feststoff durch Strömungskräfte bewegt. Durch die Beschleunigung des Feststoffs bei der Aufgabe und der Wiederbeschleunigung nach Krümmern sowie nach Partikel-Partikel- und Partikel-Wandstößen erfährt die Gasströmung einen zusätzlichen Druckverlust. Der durch die Beschleunigung um die Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta w_P$  verursachte Druckverlustanteil wird mit Gl. (2.2) beschrieben:

$$\Delta p_{P,b} = \mu \cdot \rho \cdot u \cdot \Delta w_P \quad (2.2)$$

Für die Wiederbeschleunigung nach einem Krümmer gibt es verschiedene Berechnungsansätze, da die Lage des Krümmers entscheidenden Einfluss hat ([64], [42]).

Partikelstöße führen zu einem durch Impulsverlust bedingten Druckverlustanteil, der von Partikel- und Wandmaterial sowie der Wandrauheit und der Partikelgröße abhängt. Zusätzlich ist Hubarbeit aufzubringen, um den Feststoff gegen die Schwerkraft anzuheben. Die Druckverlustanteile werden für die Flugförderung nach einem Vorschlag von Barth [1] wie folgt beschrieben:

$$\Delta p_{2ph} = \Delta p_G + \Delta p_{P,H} + \Delta p_{P,W} = (\lambda + \lambda_{P,H} + \lambda_{P,W}) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot u^2 \cdot \frac{L}{D} \quad (2.3)$$

Der Widerstandskoeffizient der reinen Gasströmung  $\lambda$  ist Abb. 2.1 zu entnehmen.

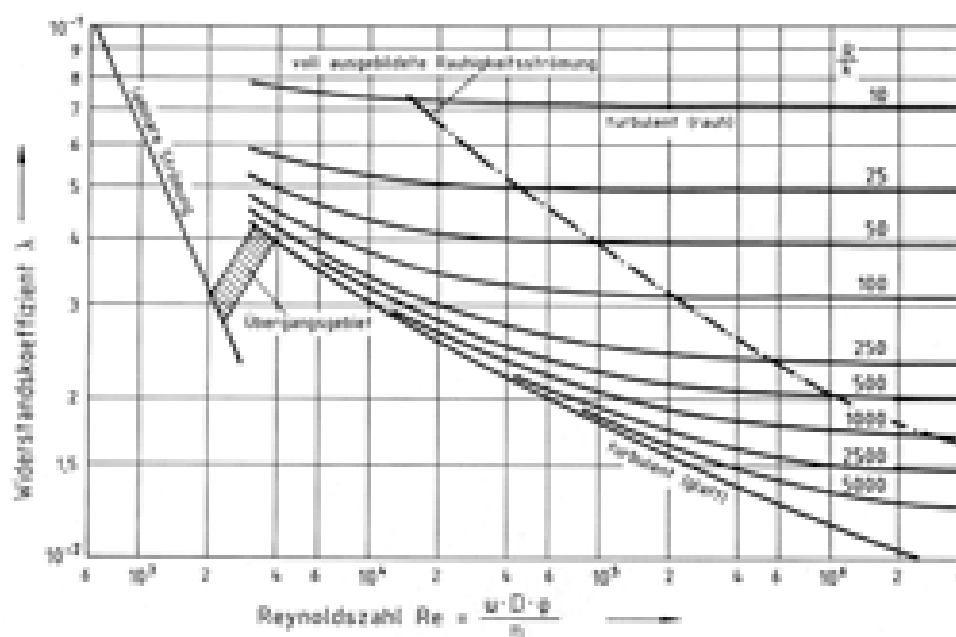


Abb. 2.1: Widerstandskoeffizienten nach Colebrook [8] für glatte und technisch raue Rohre in Abhängigkeit vom Rauheitsverhältnis  $R/k$

Die Bestimmung der Widerstandskoeffizienten des Feststoffs  $\lambda_P$  erfolgt nach Barth [1] mit Hilfe der dimensionslosen Froudezahl  $Fr$  und der Beladung  $\mu$ :

$$\lambda_P = \lambda_{P,W} + \lambda_{P,H} = \mu \cdot \left( \frac{w_P}{u} \cdot \lambda_P^* + \frac{2 \cdot \beta}{u} \cdot Fr^2 \right) \quad (2.4)$$

Für die vertikale Förderung nach oben gilt

$$\beta = 1 \quad (2.5)$$

während  $\beta$  für die geneigte oder horizontale Förderung kleiner als eins ist. Der Wandreibungskoeffizient  $\lambda_P^*$  wird über den entsprechenden Koeffizienten einer nahezu beladungsfreien Strömung  $\lambda_{P,\mu \rightarrow 0}^*$  bestimmt.

$$\lambda_P^* = \frac{\lambda_{P,\mu \rightarrow 0}^*}{\sqrt[4]{1 + \mu}} \quad (2.6)$$

Muschelknautz [49] hat mit umfangreichen Messungen einen Zusammenhang zwischen dem Wandreibungskoeffizienten  $\lambda_{P,\mu \rightarrow 0}^*$  und den dimensionslosen Kennzahlen Barthzahl  $Ba$ , Stoßzahl  $S$  und dem Widerstandskoeffizienten der reinen Gasströmung ermittelt, wie Abb. 2.2 zu entnehmen ist.

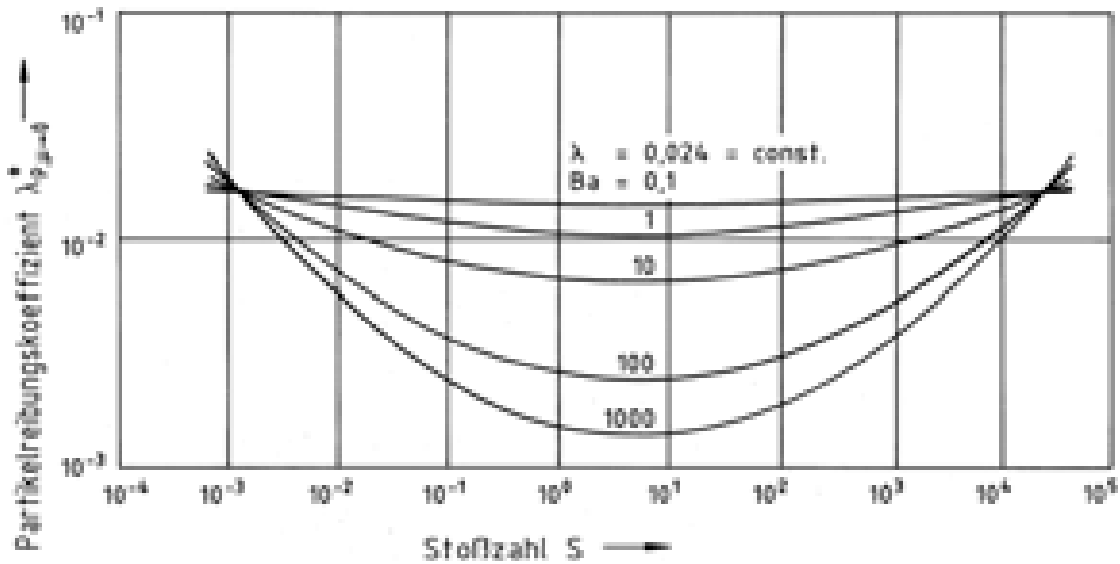


Abb. 2.2: Partikelreibungskoeffizient  $\lambda_{P,\mu \rightarrow 0}^*$  in Abhängigkeit von der Stoßzahl für unterschiedliche Barthzahlen

$$Ba = \frac{w_P^{2-\kappa} \cdot u^\kappa}{g \cdot D \cdot \left(1 - 1,05 \cdot \left(\frac{d_P}{D}\right)^{\frac{1}{7}}\right)^{2-\kappa}} \quad (2.7)$$

$\kappa$  beschreibt das Widerstandsverhalten der Partikelumströmung und nimmt für turbulente Strömung den Wert 0, für laminare Strömung den Wert 1 an.

$$S = \frac{d_P}{s_W} \cdot \frac{E_W}{E_P} \cdot \frac{\rho_P}{\rho_W} \quad (2.8)$$

$E_W$  und  $E_P$  sind die Elastizitätsmodule der Wand und der Partikel.

Bei der Strähnenförderung wird nach einem Vorschlag von Bohnet [3] angenommen, dass der Reibungswiderstand ( $\lambda_{P,W}$ ) ausschließlich durch den in der Schwebelage gehaltenen Feststoff und der Schwerkrafteinfluss ( $\lambda_{P,H}$ ) nur durch die Strähne verursacht wird. Eine zusätzliche Gutablagerung macht die Berücksichtigung der Verringerung des freien Querschnitts erforderlich, so dass für die Strähnenförderung gilt:

$$\lambda_P = \lambda_{P,W} + \lambda_{P,H} = \frac{\mu_{Flug}}{\mu} \cdot \frac{w_P}{u} \cdot \lambda_P^* \cdot \frac{1}{\left(\frac{A}{A_0}\right)^{3/2}} + \frac{\mu_{Strähne}}{\mu} \frac{2 \cdot \beta}{\frac{w_P}{u} \cdot Fr_0^2} \cdot \frac{A}{A_0} \quad (2.9)$$

Für  $\frac{A}{A_0} = 1$  ergibt sich der Fall der Strähnenförderung ohne Gutablagerung.

In den letzten Jahren hat der Einsatz von Computational Fluid Dynamics (CFD) bei der Berechnung von Mehrphasenströmungen erhebliche Fortschritte gebracht. Am Beispiel der Flugförderung wurden numerische Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen disperser und kontinuierlicher Phase durchgeführt. Die Voraussetzungen dafür schafften u.a. Tsuji [72], Sommerfeld [66], Frank/Petrak [19] und Oesterlé/Petitjean [51], die Modelle für den Partikel-Wand-Stoß und/oder den Partikel-Partikelstoß entwickelten und in ihre Programme implementierten. Seitdem kann das Verhalten der Partikel in der Strömung insbesondere im Hinblick auf Druckverlust und Konzentrationsverteilung über dem Querschnitt realitätsnah beschrieben werden. Andere Autoren beschäftigten sich speziell mit der Wirkung von Partikeln auf die Turbulenz der kontinuierlichen Phase. Basierend auf einem Vergleich von Messdaten verschiedener Autoren haben Gore/Crowe [22] und Hetsroni [25] Modelle entwickelt, die die Turbulenzanfächerung und -dämpfung durch die Partikel theoretisch beschreiben. Eine detaillierte Entwicklung dieser Modelle und eine Anwendung bei der CFD-Simulation einer Diffusorströmung ist bei Triesch [71] zu finden.

## 2.2 Förderzustände und Konzentrationschwankungen

Wie in Abschnitt 2.1 anhand der Flug- und Strähnenförderung gezeigt wurde, beschreibt der Druckverlust die sich ausbildende Strömung. Die Auftragung über der Gasgeschwindigkeit ergibt eine Kennlinie, die für die Kombination aus Anlagengeometrie, Rohrmaterial und Fördergut charakteristisch ist. Der qualitative Verlauf stellt sich jedoch immer wie in Abb. 2.3 dar.

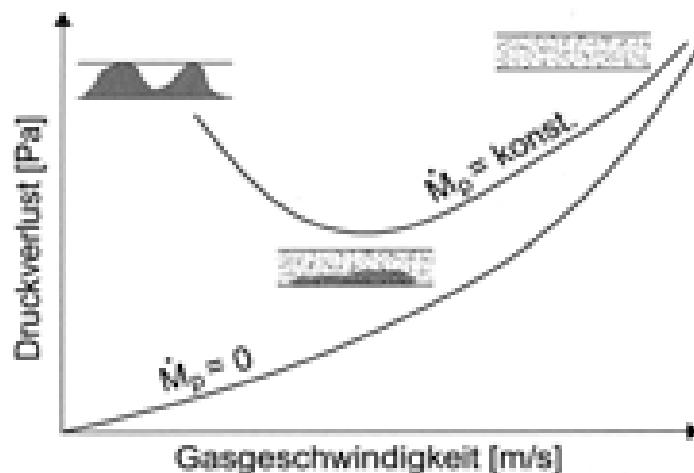


Abb. 2.3: Typische Strömungszustände bei der pneumatischen Förderung

Anhand der Kennlinie erfolgt die Identifizierung der Strömungszustände in Abhängigkeit der Gasgeschwindigkeit und des Feststoffmassenstroms. Krambrock [31] schlägt eine Einteilung in drei Bereiche vor. Bei hohen Gasgeschwindigkeiten befinden sich alle Partikeln im Flug und es stellt sich eine über den Querschnitt homogene Konzentrationsverteilung ein. Niedrigere Gasgeschwindigkeiten haben ein Absetzen des Feststoffs zur Folge. Der Feststoff bewegt sich in Form einer Strähne, es ergibt sich ein Druckverlustminimum. Ein weiteres Absinken der Gasgeschwindigkeit führt zur Propfenbildung und zu einem stark ansteigendem Druckverlust, bevor schließlich die Förderleitung verstopft.

Die Strähnenförderung ist für die meisten Anwendungen, wegen des geringen Energieverbrauchs, die bevorzugte Strömungsform. Allerdings steigt hier, insbesondere vor oder hinter Krümmern, die Gefahr des Verstopfens an. Deshalb wurden viele Untersuchungen durchgeführt, um die Strähnenförderung weiter zu charakterisieren. Basierend auf Druckmessungen resultierten sie in feineren Bereichseinteilungen. So geben Jama et.al. [28] sechs unterschiedliche Bereiche an, Dhodapkar et.al. [13] fünf. Cabrejos/Klinzing [6] unterscheiden in der Flug- und Strähnenförderung zwischen sieben Strömungszuständen. Die Untersuchungen zeigen, dass die Strähnen nur in einem kleinen Strömungsbereich stabil sind. In den meisten Fällen entstehen Dünen, die sich in unterschiedlicher Weise fortbewegen. Andere Dünen werden aus abgelagertem Feststoff gebildet und stellen Strömungshindernisse dar. Beim Übergang zwischen sich bewegenden Strähnen und Dünen kommt es zu Wiederaufwirbelungen, deren Folge eine pulsierende Strömung ist [6].

Mit diesen instationären Strömungszuständen gehen Druckschwankungen einher. Dies wurde von Dhodapkar [13] ausgenutzt, der die Druckschwankungen gemessen und einer Frequenzanalyse unterzogen hat. Er stellte fest, dass sich jedem Strömungszustand ein