

**17. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2012**  
Neues aus Wissenschaft und Forschung

---

**Optimierung pneumatischer Förderanlagen  
hinsichtlich Funktion und Zuverlässigkeit  
an Beispielen aus der Praxis**

Dipl.-Phys.-Ing. Klaus Schneider

---

KS-Engineering  
Ingenieurbüro  
Klaus Schneider



Dipl.-Phys.-Ing. Klaus Schneider

KS-Engineering GmbH

Hansaring 25/27

50670 Köln

Optimierung bestehender pneumatischer Förderanlagen an Beispielen aus der Praxis

*Ziel des Vortrages ist es, dem in der Praxis arbeitenden Ingenieur an ausgewählten Beispielen zu verdeutlichen, dass auch an bestehenden pneumatischen Förderanlagen, mit einfachen Mitteln eine Optimierung möglich ist.*

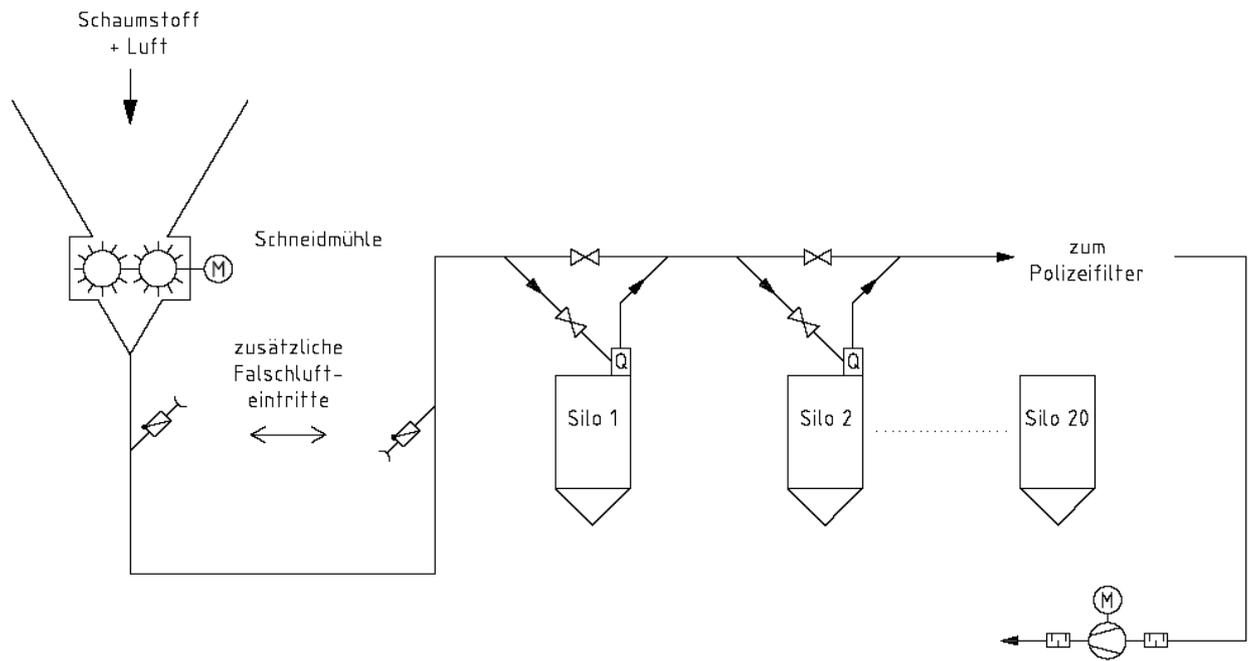
*Folgende Einsatzfälle werden betrachtet:*

- *Anpassung und Optimierung der Luftversorgung für Vakuum- und Druckförderung*
- *Einfluss des Leitungsverlaufes auf die Anlagenperformance am Beispiel einer Querschnittserweiterung*
- *Verschleißminderung durch einfache Maßnahmen*
- *Optimierung der Druckgefäßförderung*
- *Einfluss der Materialeigenschaften (wie z.B. Fließverhalten) auf die pneumatische Förderung*
- *Mindestgeschwindigkeiten bei der pneumatischen Förderung und deren Einfluß auf die Anlagenperformance*

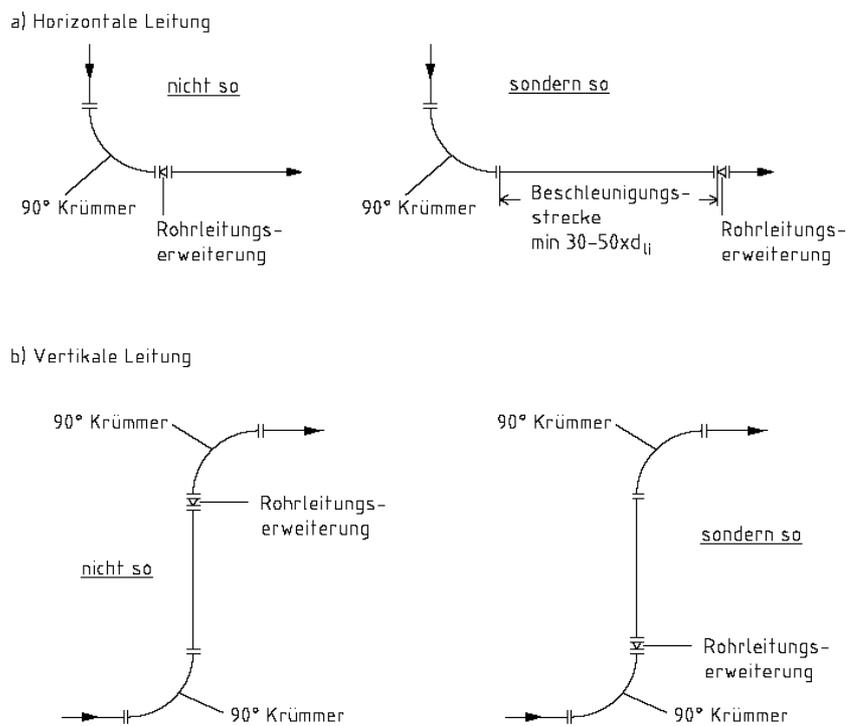
## **1 Vakuumförderung – Luftmenge bei der pneumatischen Förderung und der Abscheidung von Feststoffen in Zyklonen**

Die Bedeutung einer sachgerecht ausgelegten Luftversorgung soll hier am Beispiel des pneumatischen Transportes von Schaumstoffen beschrieben werden. Dabei werden zunächst größere Schaumstoffstücke in einer Schneidmühle auf mehrere (Qualitäten) Größen mittels unterschiedlich großer Lochblecheinsätze zerkleinert. Die zerkleinerten Schaumstoffstücke werden über eine angeschlossene Vakuumförderung abgesaugt und einer Silobatterie zugeführt. Durch eine geeignete Verschaltung können alle Silos dieser Silobatterie mit insgesamt 20 Produktsilos befüllt werden. Die Abscheidung erfolgt über einen auf dem jeweilig angesteuerten Silodach aufgebauten Zyklon (siehe Abbildung 1). Bei der Inbetriebnahme wurde festgestellt, dass die Zyklone nach kurzer Betriebszeit hoffnungslos verstopften und ein weiterer Anlagenbetrieb nicht möglich war, da alles Material im nachgeschalteten Polzeifilter abgeschieden wurde. Recht bald wurde klar, dass die Tragluftmenge vor Zyklon zu gering und damit die gewünschte Zentrifugalabscheidung nicht möglich war. Der Luftzutritt über die Schneidmühle (insbesondere bei grobem Material) reichte dafür nicht aus. Folge: Schaumstoff wurde mit geringer Geschwindigkeit durch die Leitung bis in den Zyklon gepresst, dort kam wegen fehlender Trägerluftmenge keine Rotationsströmung, geschweige denn Abscheidung, zustande und das Material verstopfte den Zyklon.

Abhilfe brachte hier eine Bypass-Öffnung (Abbildung 1) in der Förderleitung nach Schneidmühle, die unterdruckgesteuert den Luftzutritt ermöglichte und so im Zyklon zu einer vollständigen Materialabscheidung führte.



**Abbildung 1:** Vakuumtransport und Siloanlage für Schaumstoff



**Abbildung 2:** Positionierung von Rohrerweiterungen in horizontalen und vertikalen Förderleitungen

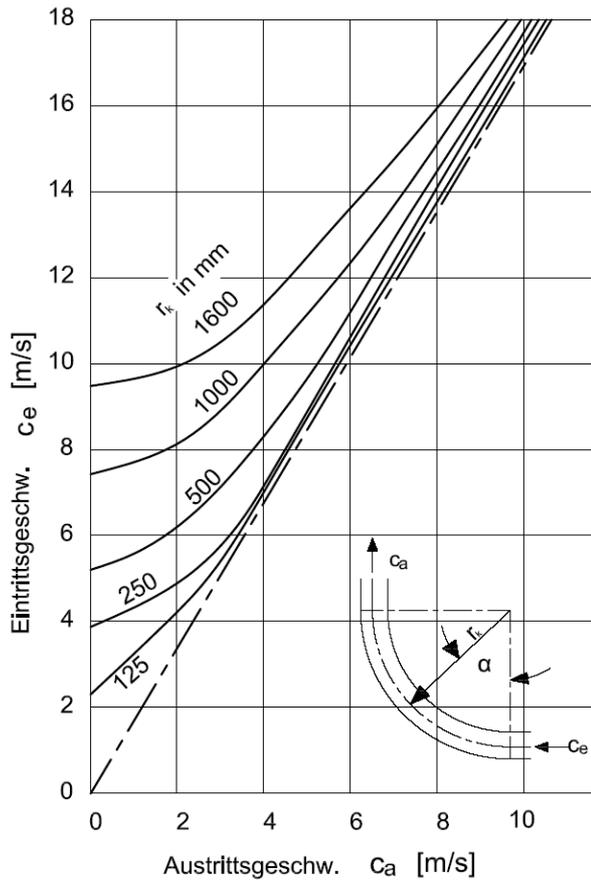
## 2 Rohrleitungsabstufungen in pneumatischen Förderleitungen

Rohrleitungserweiterungen dienen der Geschwindigkeitsanpassung in pneumatischen Förderleitungen und sollen die Luftgeschwindigkeit innerhalb bestimmter Grenzen über die Förderdistanz in der Förderleitung halten. Bevorzugter Ort für solche Anpassungen ist die senkrechte Förderleitung, da diese „unempfindlicher“ für solche Änderungen ist, als die horizontale Förderleitung. Ganz falsch ist es aber, diese Erweiterung in horizontalen Leitungen direkt hinter einer Umlenkung zu positionieren, da in der Umlenkung das Material abgebremst wird und bei einer gleichzeitigen Erweiterung an dieser Stelle die Gefahr einer Verstopfung entsteht. Die Erweiterung sollte so positioniert werden, dass hinter der Umlenkung eine genügend lange Beschleunigungsstrecke zur Verfügung steht.



**Abbildung 3:** Kugelumlenkung mit direkter Erweiterung der Rohrleitung

Das folgende Bild aus einer Veröffentlichung von Weidner [1] zeigt die Abbremsung von Feststoffen in Krümmern. Die gestrichelte Linie als Grenzkurve gilt für die radienlose Umlenkung.



**Abbildung 4:** Abbremsung von Feststoff in Rohrleitungskrümmern

Tritt beispielsweise der Feststoff mit ca.  $c_e = 16$  m/s (entspricht bei einer Luftgeschwindigkeit  $v$  von 20 m/s einem Verhältnis  $c/v$  von 0,8) in den Krümmer ein, tritt der Feststoff nur noch mit  $c_a = ca. 9$  m/s wieder aus. Vergrößert man den Durchmesser gleichzeitig von 60 auf 80 mm, sinkt die Luftgeschwindigkeit als antreibende Kraft schlagartig von 20 m/s auf ca. 11 m/s. Dadurch entsteht eine hohe Verstopfungsgefahr, da die „langsamere“ Luft die Feststoffe nur ungenügend beschleunigt!

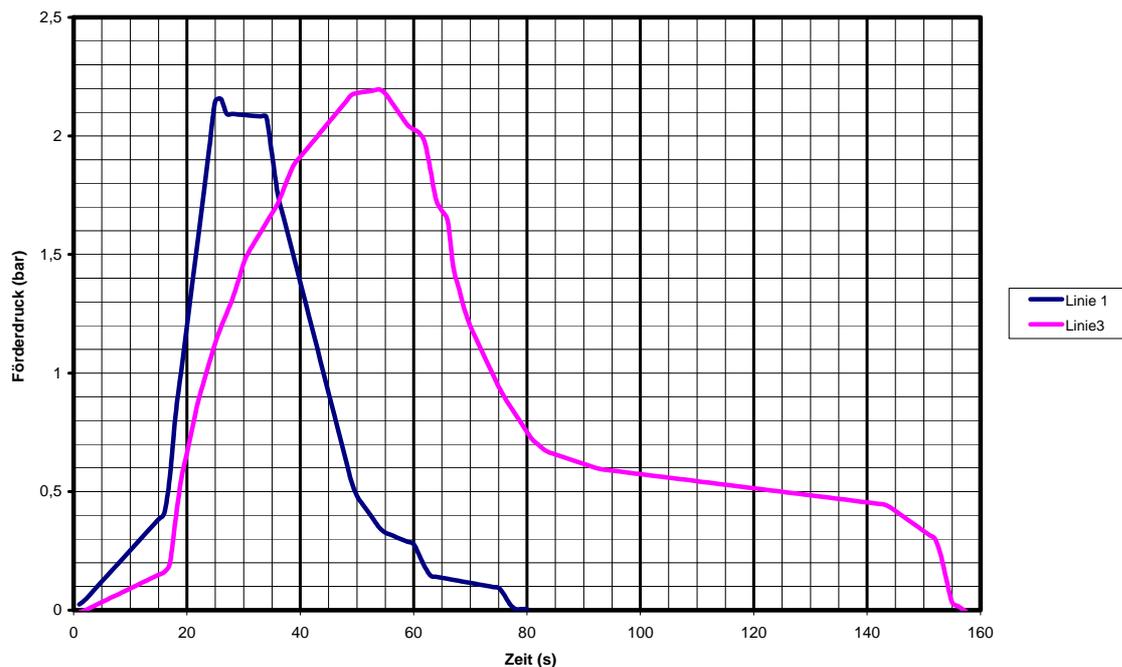
Aus diesem Grunde musste die Erweiterung von 60 auf 80 mm lichter Weite sinnvollerweise um ca. 12 m stromabwärts gelegt und diese zusätzliche Beschleunigungsstrecke (von ca.  $30 - 50 d_{li}$ ) für die Wiederbeschleunigung des Feststoffes nach Krümmer auf  $c_e = 16$  m/s genutzt werden, bevor die Querschnittserweiterung durchgeführt werden.

### 3 Druckverlauf bei der pneumatischen Druckgefäßförderung

Die Bilder zeigen die Druckverläufe in zwei Druckgefäßen (DGF) gleicher Bauart und Größe, mit etwa gleichen Rohrlängen, räumlich ähnlichen Rohrleitungsführungen und gleichem Material (Kesselasche) aus einer Müllverbrennungsanlage. Trotzdem sind die Entleerungszeiten, Drücke und der Druckverlauf sehr unterschiedlich. Dies ist zum einen auf die Programmierung des Steuerungsablaufes, zum anderen auf unterschiedliche Luftmengen für die Förderung zurückzuführen.

#### 3.1 Bestandsaufnahme

- Zwei Linien (L1 und L2) laufen weitestgehend störungsfrei, die dritte Linie (L3) kämpft häufiger mit Verstopfungen
- Die Taktzeiten (L1, L2 ca. 75 s) versus (L3 ca. 155 s) sind stark unterschiedlich, obwohl DGF mit ähnlichen Volumina und ähnlichen Förderentfernungen (siehe Abb. 5)
- Leerlaufdruckverluste sind stark unterschiedlich (Abb. 5: L1 ca. 0,1 bar; L3 ca. 0,5 bar)



**Abbildung 5:** L1, L3: Variation der Taktzeiten, abhängig von der Vorbespannung (1 Ventil klemmt)

Vergleich DGF Linie 3 mit DGF Linie 1

- L1 (blau) arbeitet mit Vorbespannung
- L3 (rot) hat zu lange Nachblaszeiten und zu viel Luft (Gefahr bei Versorgung aus einem Druckluftnetz)

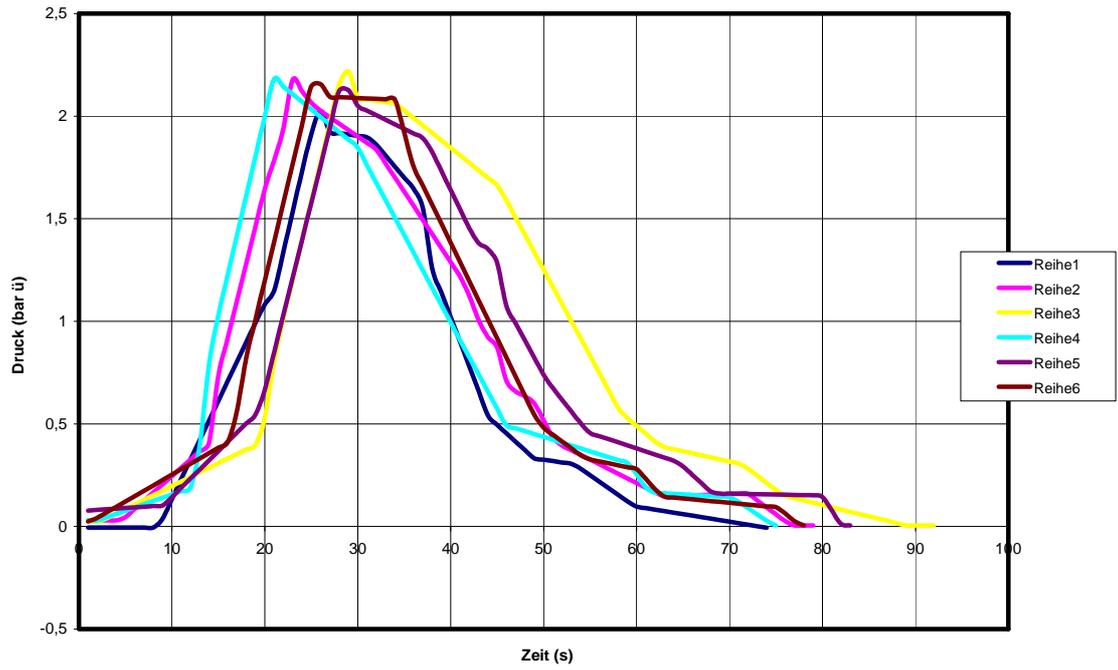


Abbildung 6: L1, L2, DGF 1: Variation der Taktzeiten

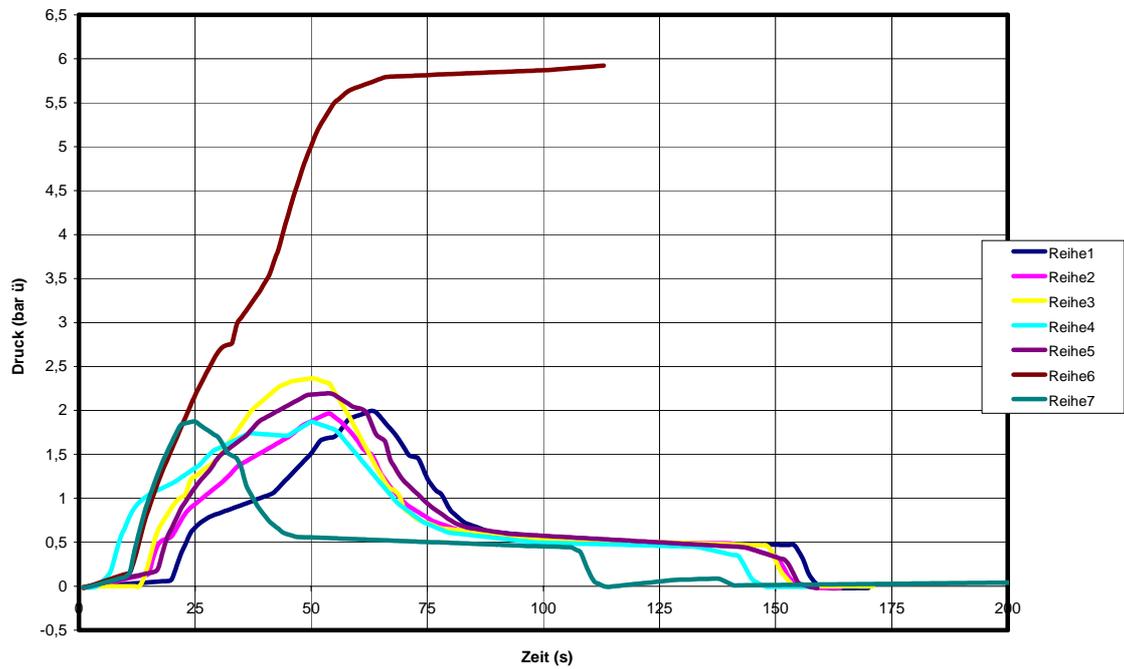


Abbildung 7: L3, DGF 1: Variation der Taktzeiten, ohne Vorbespannen, mit Nachblaszeit

### 3.2 Lösungsmöglichkeiten

- a) Die Druckgefäße der L3 sollten (wie bei L1, L2 geschehen) vorbespannt werden. Dadurch wird der Entleerungsvorgang zum Einen wesentlich beschleunigt, zum Anderen ist der Druckverlauf stabiler.
- b) Die Nachblaszeiten könnten bei L3 wesentlich verkürzt werden.
- c) Die Luftmengen bei L3 sind höher (erkennbar am höheren Reinluftdruckverlust)

Nach Abschluss der Optimierungsarbeiten (besonders das Vorbespannen des Behälters brachte eine wesentliche Verbesserung) konnte auf allen 3 Linien mit annähernd gleicher Qualität und ohne Probleme gefördert werden.

## 4 Mindestgeschwindigkeiten bei der pneumatischen Förderung von sandartigen Feststoffen

Dieses Beispiel beschreibt die Druckgefäßförderung (DGF) von Kessel(Grob-)asche aus einer zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung (ZWSF) über eine Gesamtlänge von 350 m, könnte aber für jedes sandartige Fördermaterial gelten. Während des Betriebes wurden immer wieder Druckstöße in den Förderleitungen beobachtet, die bis zum Abreißen der Halterungen am Silo führten. Typische Korngrößenverteilungen sind in Abbildung 8 dargestellt. Abbildung 9 zeigt die Einordnung dieses Feststoffes in dem so genannten Geldart-Diagramm [2].

Die extremen Druckschwankungen sind auf dem beigefügten Mess-Streifen (Abbildung 10) deutlich zu erkennen.

#### Technische Daten der Förderanlage:

- Förderleitungslänge: ca. 350 m
- Luftvolumenstrom: ca. 520 – 530 m<sup>3</sup>/h (Ansaugbedingungen)
- Leitungsdurchm. gestuft: DN80/DN100 nach ca. 250 m
- Endgeschwindigkeit Luft: ca. 18-19 m/s
- Anfangsgeschwindigkeit: ca. 5,2 m/s (bei 3,5 bar (abs.) Förderdruck)
- Durchsatz: ca. 2,5 t/h, begrenzt durch max. Ascheanfall

#### Vorgehensweise:

- Messung der Drücke in der horizontalen Förderleitung an zwei ca.5 m auseinanderliegenden Messorten
- Aufzeichnung der Messwerte mittels Zwei-Kanal-Schreiber
- Abschätzung der zeitlichen Verschiebung einzelner Druckspitzen zwischen den beiden Messpunkten
- Veränderung der Luftmenge in der Förderleitung

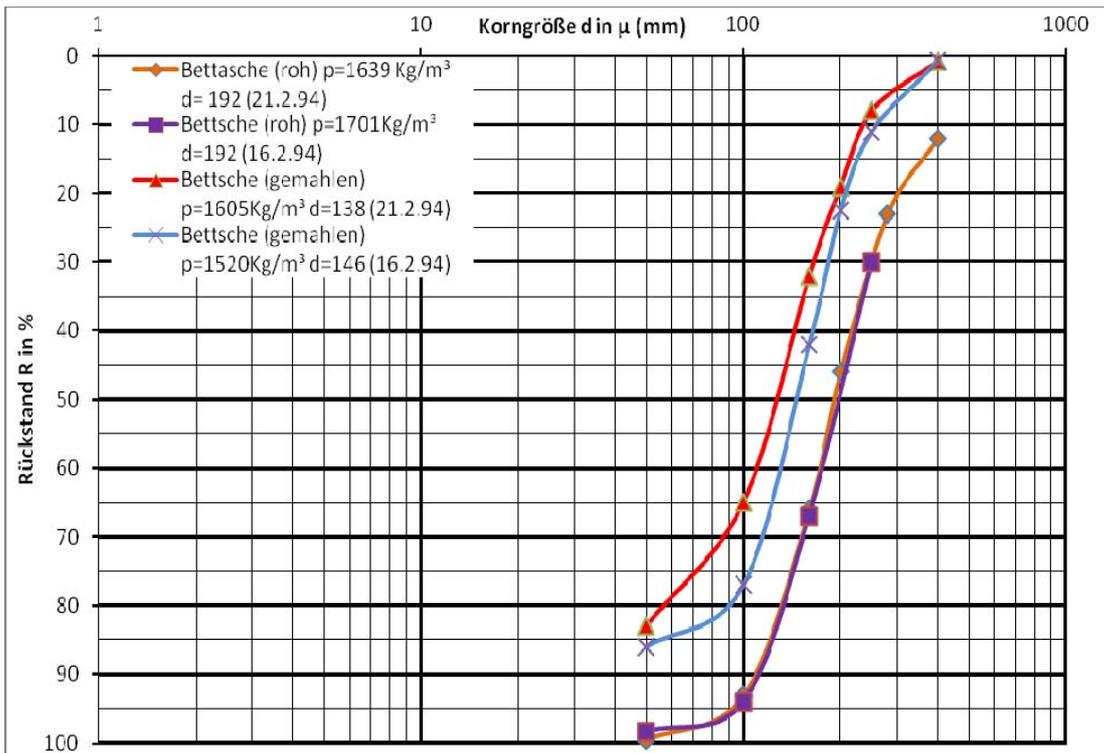


Abbildung 8: Korngrößenverteilung der Bettasche aus ZWSF

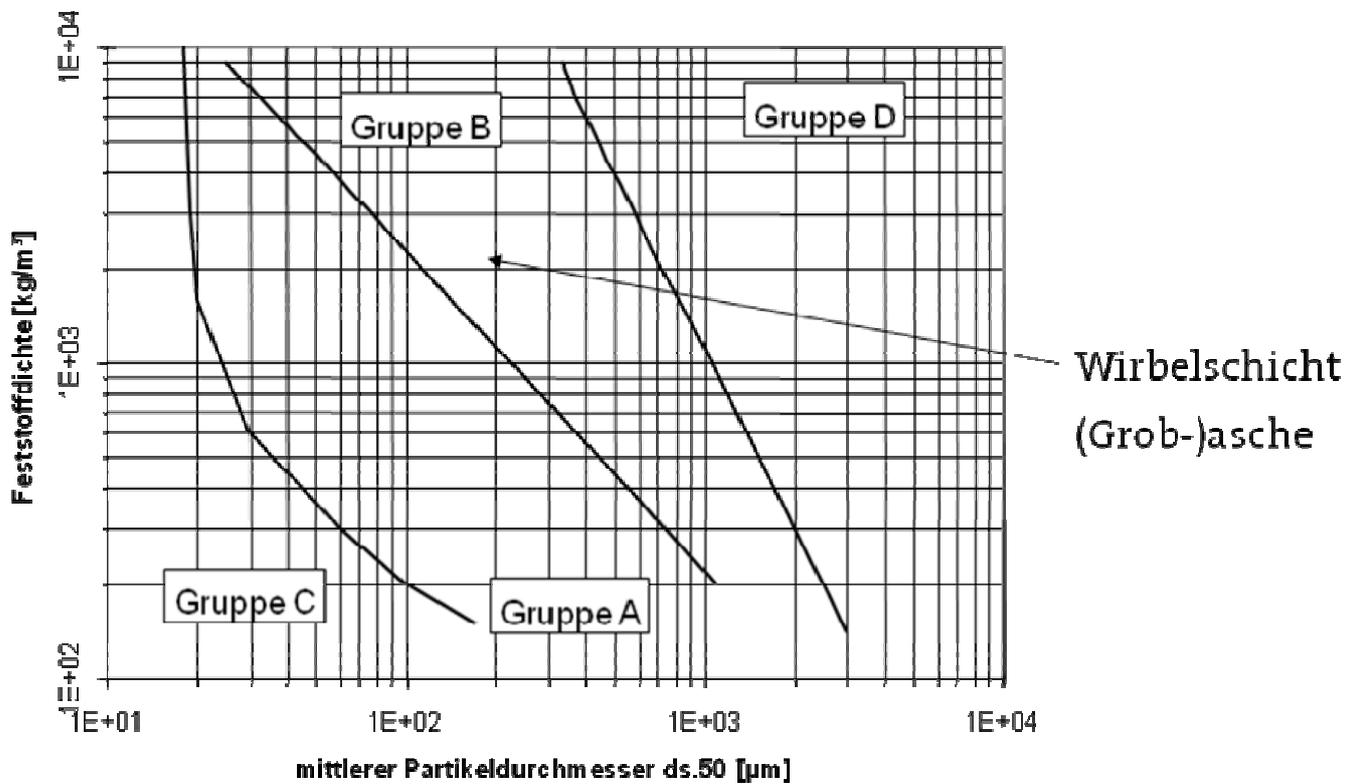
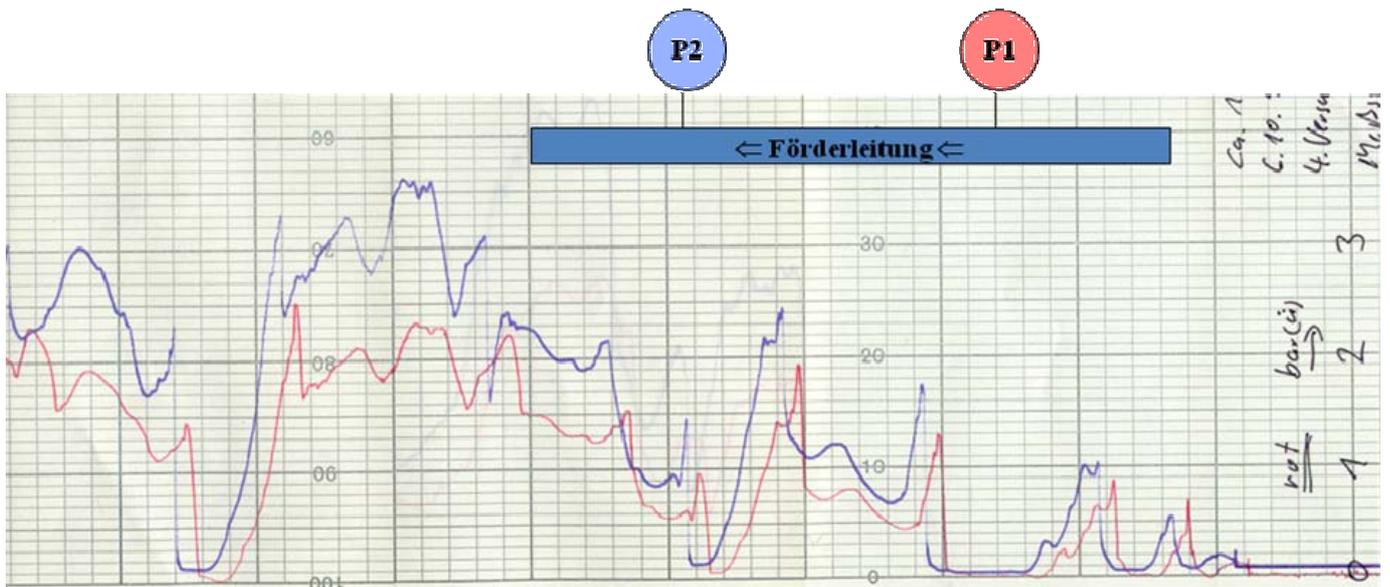


Abbildung 9: Geldart-Klassifizierung für Bodenäsche aus ZWSF



**Abbildung 10:** Aufzeichnung des Druckverlaufes an zwei Stellen der pneumatischen Förderung, Abstand ca. 5 m

#### Auswertung der Versuche und durchgeführte Änderungen am System:

- Der Druck an den Messstellen steigt mit fortschreitender Förderzeit immer stärker an. Grund dafür ist, dass sich am Leitungsbeginn aufgrund der niedrigen Geschwindigkeiten immer wieder neue und längere Pfropfen bilden, die sich dann durch die Leitung schieben. Dies führt zu einem raschen Ansteigen des gesamten Druckniveaus.
- Die Erhöhung der Luftmenge in der Leitung führt zu einem Abklingen der Pfropfenaktivität in der Förderleitung
- Auch in der Messtrecke lassen sich einzelne Pfropfen-Neubildungen erkennen.

#### Änderungen am System:

- Installation einer Zusatzdüse, d.h. Eindüsen einer zusätzlichen Luftmenge am Leitungsbeginn
- Einziehen der Förderleitung am Anfang von DN80 auf DN65  
Erhöhung der Luftgeschwindigkeit am Leitungsanfang auf ca. 11 m/s,

#### Ergebnisse:

- keine Pfropfenbildung und damit Druckspitzen mehr
- ruhige Förderung bei einem maximalen Druck von nur noch ca. 1,5 bar (ü)
- Die Förderzeit wurde pro Gefäß wurde um ca. 25% gesenkt, d.h. Durchsatz im gleichen Maße erhöht.

Allgemein lässt sich sagen, dass bei sandartigen Fördergütern (Geldart-Klassifikation „B“) eine Mindestgeschwindigkeit am Anfang der Förderleitung eingehalten werden muss, wenn man eine ruhige und pfropfenfreie Förderung erzielen will.

Fazit: Optimierungsziel durch vorgenommene Änderungen erreicht und übertroffen!

## 5 Druckgefäßförderung (Fließverhalten unter Druck)

Druckschwankungen bei der pneumatischen Förderung können auch andere Ursachen haben. Prinzipiell ist das Druckgefäß ein „Silo“ und das darin befindliche Material folgt den gleichen Gesetzen bezüglich Fließ- und Reibungsverhalten wie in Vorratssilos. Erschwerend kommt hinzu, dass im DGF bei einseitiger Aufgabe von „Oberluft“ das Material nur zusammengepresst wird und dadurch eine weitere Kompaktierung und Verschlechterung des Ausfließens entstehen kann. Deshalb ist bei feinen und feinsten Stoffen (Klasse C und teilweise Klasse A nach Geldart) eine Fluidisierung und ggf. gezielte Auflockerung des Materials im Druckgefäß von Wichtigkeit.

Dies wird nachfolgend an der Förderung von Wälzoxyd bzw. Quarzsand, feinem Quarzmehl und Kalkhydrat gezeigt.



**Abbildung 11:** Druckgefäßförderer

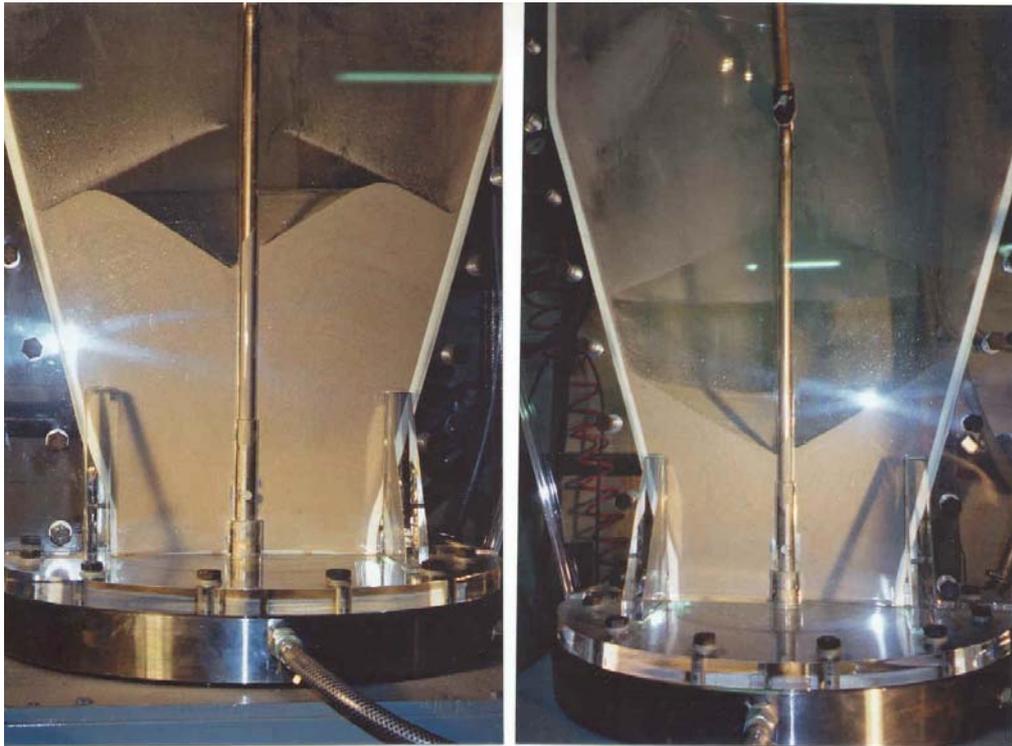


**Abbildung 12:** Druck in der Förderleitung bei mehreren Versuchen

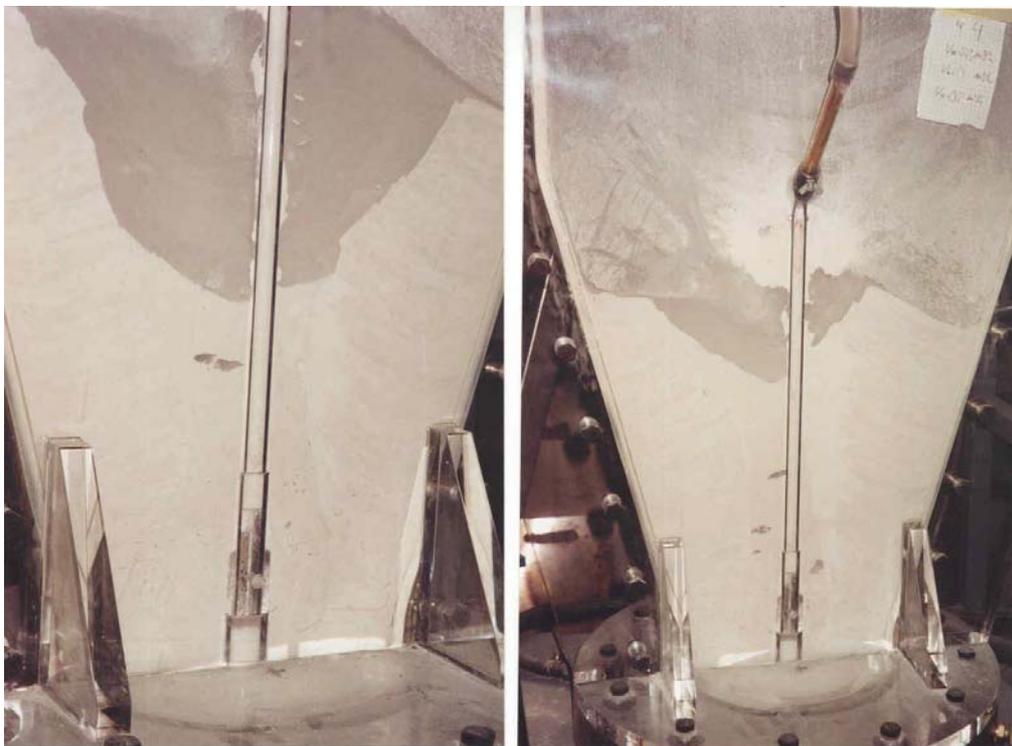
Bild oben links: Druckgefäßförderer: Wälzoxyd ist sehr fein und anbackend, Punktueller Einblasen von Luft führt zu keiner Verbesserung des Fließverhaltens

Bild oben rechts: Man erkennt eine sehr unregelmäßige und unruhige Förderung bei stark schwankenden Drücken in der Förderleitung, welche letztendlich auch zu sehr unterschiedlich langen Taktzeiten führen.

→Der gewünschte Durchsatz für diese Förderanlage wurde nicht erreicht. Erst eine großflächige Fluidisierung über einen Konus aus Sintermetall brachte den gewünschten Erfolg. Es empfiehlt sich auch, bei der Förderung solcher Materialien auf die „Oberluft“ vollständig zu verzichten und die gesamte Luft für das Gefäß von „unten“ über einen Sinterkonus zuzuführen.



**Abbildung 13:** Fließverhalten von Quarzsand ( $d_{50} = 0,1 \text{ mm}$ )



**Abbildung 14:** Fließverhalten von Quarzmehl ( $d_{50} = 0,03 \text{ mm}$ )



**Abbildung 15:** Fließverhalten von Kalkhydrat ( $d_{50} = 0,008 \text{ mm}$ )

Die Abbildungen 13 bis 15 zeigen für die Materialien Quarzsand, Quarzmehl und Kalkhydrat das Fließ- und Förderverhalten in einem Plexiglasgefäß. Die Förderleitung führt von der Mitte senkrecht nach oben, eine Ringauflockerung (über die die so genannte Austragluft zugeführt wird) befindet sich im unteren Teil des Konus. Der „Spiegel“ des Quarzsandes (Abb. 13) sinkt sehr gleichmäßig nach unten ab, der Druck in der Förderleitung bleibt gleichmäßig und auf konstantem Niveau solange die Geschwindigkeiten hoch genug sind. Quarzsand ist ein „B“-Material nach der Geldart-Klassifizierung, das wissen wir schon aus Kapitel 4 dieses Vortrages.

Beim feineren Quarzmehl (Abb. 14) sieht man Blasen aufsteigen und die Oberfläche ist auch nicht mehr so gleichmäßig wie bei dem gröberen Quarzsand. Trotzdem bleibt der Förderdruck sehr stabil. Quarzmehl ist ein „A“-Material nach der Geldart-Klassifikation.

Besonders gravierend sind die Druck- und Fördermengenschwankungen beim Kalkhydrat, einem echten „C“-Material nach Geldart. Man erkennt die Bildung von Hohlräumen und Kanälen, die sich durch die gesamte Materialsäule ziehen.

Fazit: Die Güte (Konstanz) einer Förderung unter Druck hängt immer auch vom Material selbst ab. Bei sehr feinen und feinsten Fördergütern muss auf eine gleichmäßige Fluidisierung resp. Fließverhalten geachtet werden.

## 6 Förderung von Kalkhydrat im Dünnstrom

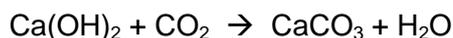
Kalkhydrat ist ein sehr feines Material und neigt zur Ansatzbildung in pneumatischen Förderanlagen, insbesondere in Stahlleitungen. Die Ansätze, die sich dann finden lassen, bestehen aber aus Kalkstein, d.h. aus Calciumcarbonat.

Diese Ansatzbildung findet nur statt bei niedrigen Beladungen und hohen Feststoffgeschwindigkeiten, wie üblicherweise bei der Verwendung von Kalkhydrat als Sorbens in der Umwelttechnik; bei hohen Beladungen und niedrigeren Geschwindigkeiten wird dieser Effekt nur selten und in geringer Ausprägung beobachtet.

Wie ist das möglich? Untersuchungen haben gezeigt, dass chemische Reaktionen, die in der Stahlrohrleitung und allgemein an harten Oberflächen stattfinden können, Auslöser für dieses Phänomen sind.

### 6.1 Materialeigenschaften

Kalkhydrat „altert“ durch die Carbonatisierungsreaktion



Die Reaktion verläuft spontan und kann auch durch das Auftreffen von Kalkhydratpartikeln auf eine harte Oberfläche (Stahlleitung, insbesondere Krümmer) ausgelöst werden.

Die Eigenschaften des Kalkhydrates ändern sich wie folgt:

- gute Fließfähigkeit wird vermindert
- Feuchtegehalt steigt, Material wird „pappig“
- Anbackungsneigung steigt

Alterung wird begünstigt durch:

- Luftaustausch (Silo offen) - ständig wird frisches CO<sub>2</sub> nachgeführt
- Zeit
- Reaktivität (bestimmt die Eignung als Sorbens)  
→ wird in Optimierungsverfahren laufend erhöht

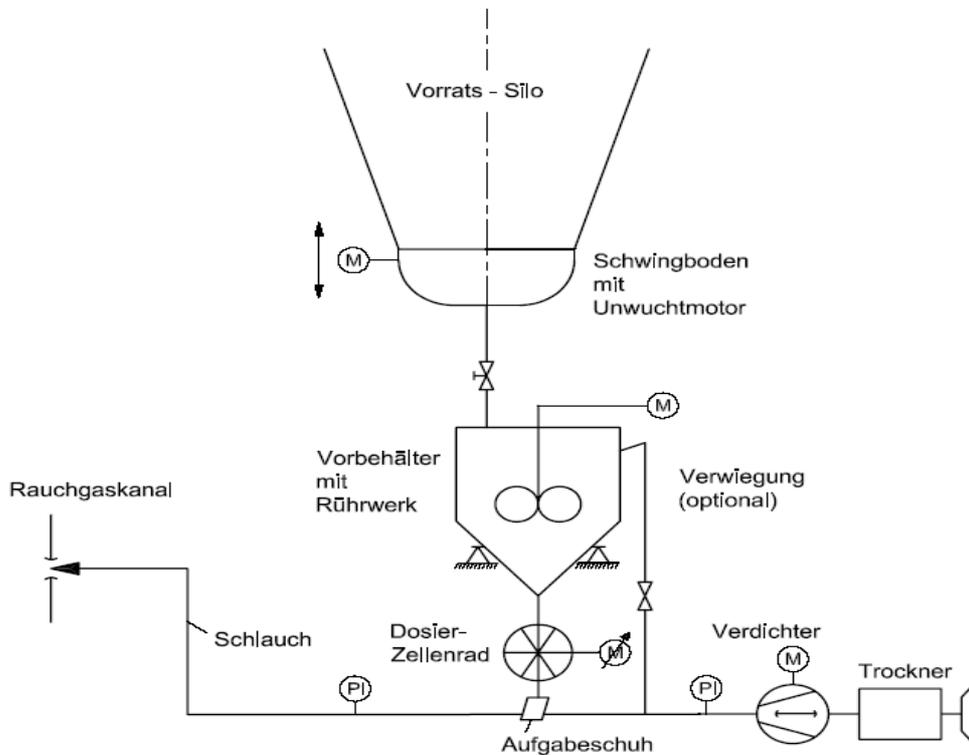
Folgerungen für den Betreiber/Planer bezüglich Material:

- Material sollte bei Anlieferung wirklich frisch sein (Zertifikat?)
- Lagervolumen sollte Lagerzeit von 2 Wochen nicht übersteigen
- Beimischung von Kohlenstaub (5%) oder Carbonat (10%) erhöht die Förderbarkeit (Fließverhalten, Fegekorn)

Folgerungen für den Betreiber/Planer bezüglich Aufstellung/Equipment:

- mindestens der Silokonus eines Lagersilos sollte eingehaust und beheizt werden
- Feuchtigkeitseintrag (ins Silo) sollte vermieden werden, Vermeidung unnötiger Umlenkungen/Weglängen (hohe Priorität bei Leitungsverlegung)
- Drehkolbengebläse, ggf. mit Heizregister

- Diskontinuierlicher Siloaustrag (→ Dosierbehälter)
- Siloaustrag mit geeigneter Unterstützung (z.B. Schwingboden)
- Dosier-/Förderorgane müssen aufeinander abgestimmt sein



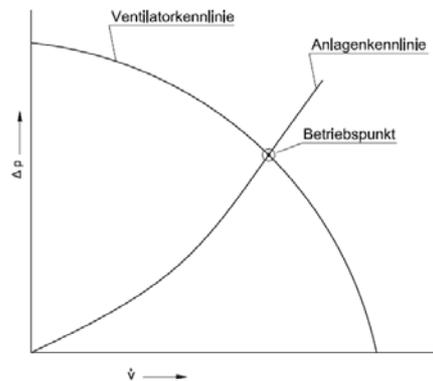
**Abbildung 16:** Blockschaltbild einer Lager- und Fördereinrichtung für Kalkhydrat

Fazit: Einige Fördergüter zeigen unter bestimmten Bedingungen ein ungewöhnliches Verhalten. Bei Unkenntnis kann dies zum Totalversagen der pneumatischen Förderung führen.

In diesem Fall ist die Verlegung von Gummischläuchen bzw. flexiblen Materialien die richtige Lösung für den pneumatischen Transport. Auf der anderen Seite darf das hochaktive Kalkhydrat nicht zu lange im Silo lagern (> 4 Wochen) um den erwähnten Erscheinungen entgegenzutreten.

## 7 Abstimmung der Luftmengen bei Ventilatoren

Werden Ventilatoren oder Seitenkanalgebläse als Lufterzeuger eingesetzt, ist die richtige Wahl des Betriebspunktes für die pneumatische Förderung von ausschlaggebender Bedeutung.



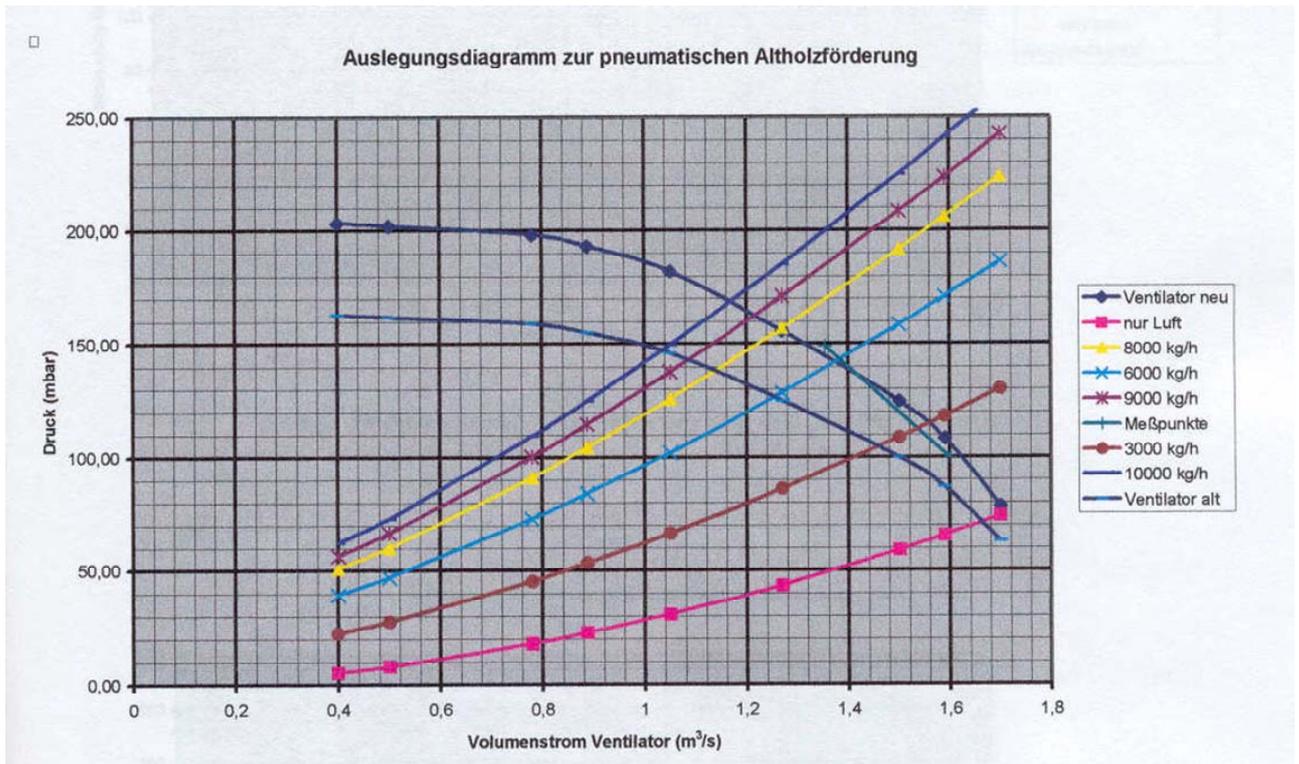
**Abbildung 17:** Beispiel für Anlagen- und Verdichter Kennlinie

Wie in Abbildung 17 gezeigt, treffen sich die (bei der hier vorherrschenden Flug- oder Dünnstromförderung) parabelförmige Anlagenkennlinie und die konkav gekrümmte Ventilator Kennlinie im so genannten Betriebspunkt. Ändert sich die Anlagenkennlinie, wandert der Betriebspunkt nach links oder rechts.

Das Zusammenwirken von Anlagen- und Gebläse Kennlinie bei pneumatischen Förderanlagen am Beispiel einer pneumatischen Förderanlage für Altholz zeigt Abbildung 18.

Man erkennt, dass bei abnehmender Förderleistung und damit abnehmenden Drücken der Schnittpunkt zwischen Anlagen- und Gebläse Kennlinie immer weiter nach rechts, d.h. zu höheren Volumenströmen und damit auch höheren Geschwindigkeiten wandert. Der Verschleiß nimmt ebenfalls überproportional zu.

Diese Gefahr besteht besonders, wenn man mit zu großen „Auslegungssicherheiten“ arbeitet, aber auch (wie in der Abbildung 18 gezeigt) unterschiedliche Mengen fördern will. Hier muss man das Gebläse (z.B. über FU oder Drossel) so regeln, dass die Luftmengen begrenzt werden. In der Praxis wird dieser wichtige Zusammenhang oft übersehen und erst nach größeren Schäden als Ursache ermittelt.



**Abbildung 18:** Gebläse und Anlagenkennlinien bei der Förderung von Holzhackschnitzen

## 8 Zusammenfassung

Die gezeigten Beispiele sollen verdeutlichen, dass mit einfachen Überlegungen und dem Wissen über fundamentale Zusammenhänge Schäden an pneumatischen Förderanlagen sicher vermieden und Optimierungsarbeiten leicht durchgeführt werden können. Ingenieure des VDI haben darüber hinaus vor nicht allzu langer Zeit eine VDI-Richtlinie (die VDI 3671) veröffentlicht, in der Verabredungen zwischen Herstellern und Betreibern von pneumatischen Förderanlagen über Materialeigenschaften und Anlagentechnik getroffen werden, die es beiden Parteien erleichtern sollen, diese Anlagen fachgerecht zu errichten und zu betreiben.

## Literaturverzeichnis

- [1] Weidner, Günther; (1955) „Grundsätzliche Untersuchung über den pneumatischen Fördervorgang“, Forschung 21.Bd/Heft 5, pp 145 -152,
- [2] Geldart, Derek (1973) „Fundamentals of Fluidization“ Powder Technology, 7, pp.285-92