

Strömungsprobleme der Mechanische Verfahrenstechnik

Folien zur Vorlesung

NUR ZUM PERSÖNLICHEN GEBRAUCH!

PD Dr.-Ing. habil. Frank Babick, 1. April 2025

8. Pneumatischer Transport

Lernziele zu Kapitel 8

- Wissen:
 - Formen des pneumatischen Transports
 - Unterschiede zwischen Flug- und Pfröpfenförderung
 - technische Realisierung von Pfröpfenförderung
- Fähigkeiten:
 - Berechnung der Grenzgutbeladung
 - Berechnung des Druckverlustes

8.1 Pneumatischer Transport

- Anwendungen und technische Umsetzung -



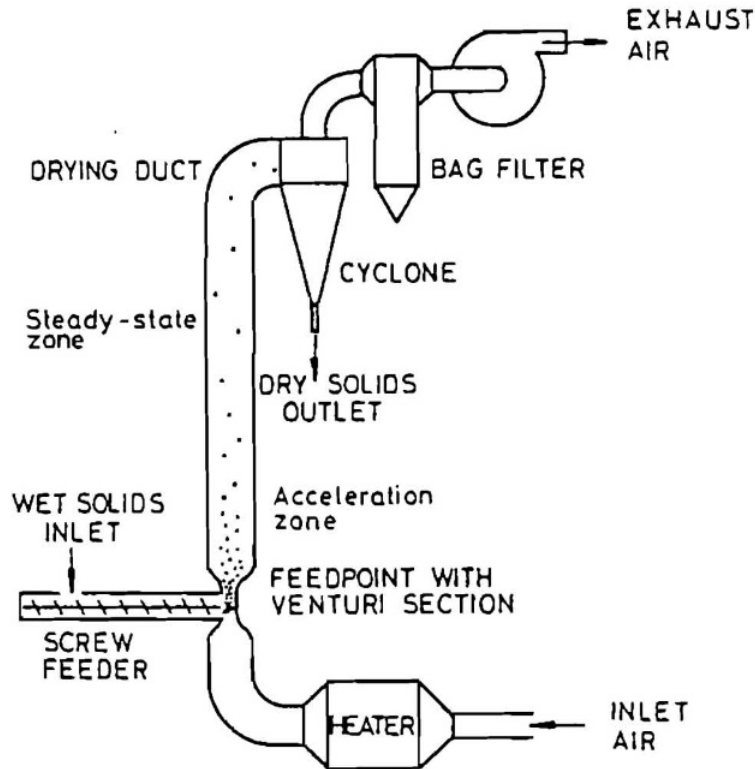
Pneumatischer Transport – Einführung

= kontinuierlicher Transport trockener disperser, rieselfähige Feststoffe in einem Gasstrom

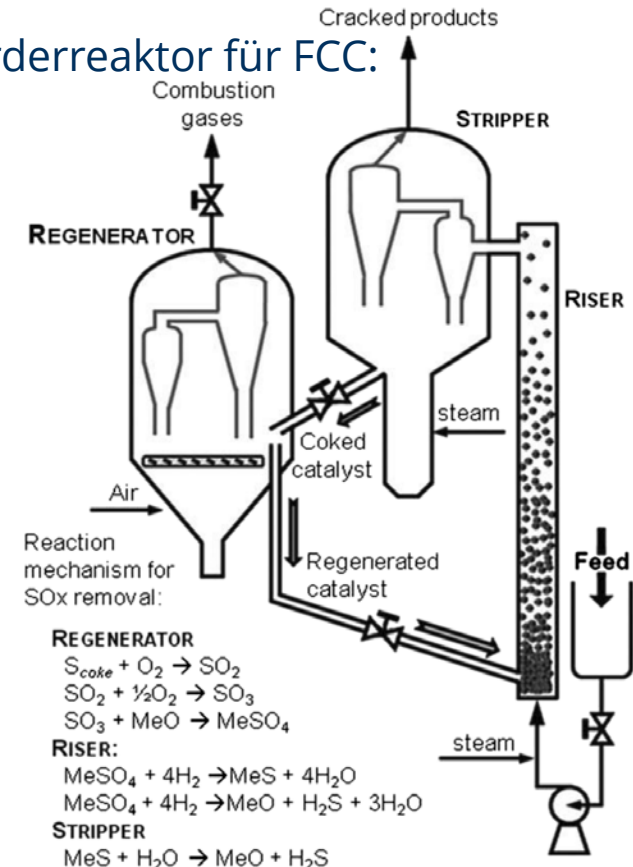
- Förderbedingung:
 - vertikaler Transport: $v_F > v_S$ (Partikel fallen nicht zu Boden)
 - horizontaler Transport: $v_F > 2 \cdot v_{\text{Stopf}}$ (abgelagerte Partikel werden mitgerissen)
- Anwendungen:
 - Partikelgrößen: 50 μm ... 10 mm
 - Fördergeschw.: 0.1 m/s ... 50 m/s
 - Gutbeladung: $\mu = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_L} = 0,1 \dots 150 \frac{\text{kg Gut}}{\text{kg Luft}}$
 - z. B. Waschpulver, Salze, Getreide, Hülsenfrüchte, Nüsse, Düngemittel, Zement, Sand, Ruß, Pigmente, Tabletten, ...
- kombinierbar mit Wärme- und Stoffaustauschprozessen
 - wie Kühlen oder Trocknen des Fördergutes
 - chemische Reaktionen (Flugstromvergaser, FCC im Förderstrom)

Pneumatischer Transport mit Stoffwandlung

Pneumatische Trocknung:



Förderreaktor für FCC:



Kemp et al., *Drying Technol.*, 12(1-2):279-297, 1994; doi: 10.1080/07373939408959957

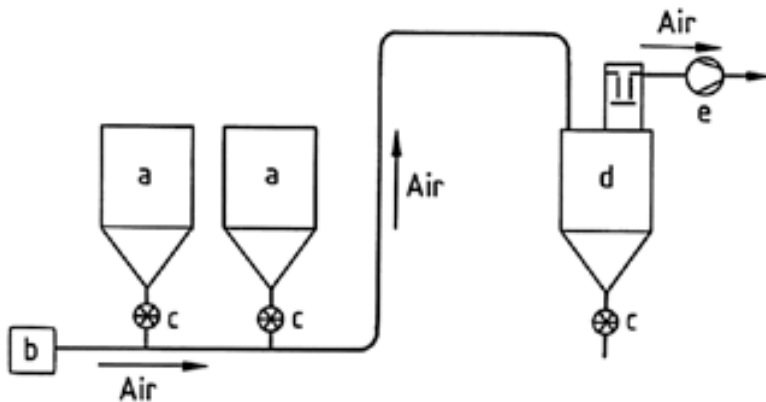
Chaillot et al., *Waste Biomass Valorization*, 28:24375-24405, 2021; doi: 10.1007/s11356-020-08498-6

Pneumatischer Transport – Vor+Nachteile

- Vorteile:
 - einfache, flexible, leicht automatisierbare Anlagen
 - Produktweiterbehandlung
 - Schutzgasförderung
 - Vermeidung von Kontamination (Hygiene)
 - Einkapselung von Staub (Arbeitsschutz)
- Nachteile:
 - erhöhter Investitionsbedarf (z.B. gegenüber Bandförderanlagen)
 - hoher spezifischer Energiebedarf
 - ggf. Partikelerosion
 - ggf. Apparateverschleiß

Pneumatische Förderanlagen

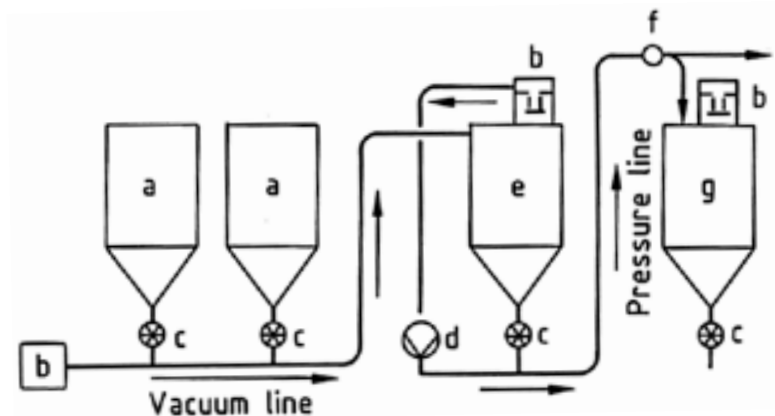
Saugförderung:



pneumatische Saugförderanlage

- mehrere Dosierer, ein Empfangssilo,
- begrenztes $\Delta p \rightarrow$ begrenzte Förderstrecke
- kein Produktverlust

Saug-Druckförderung:



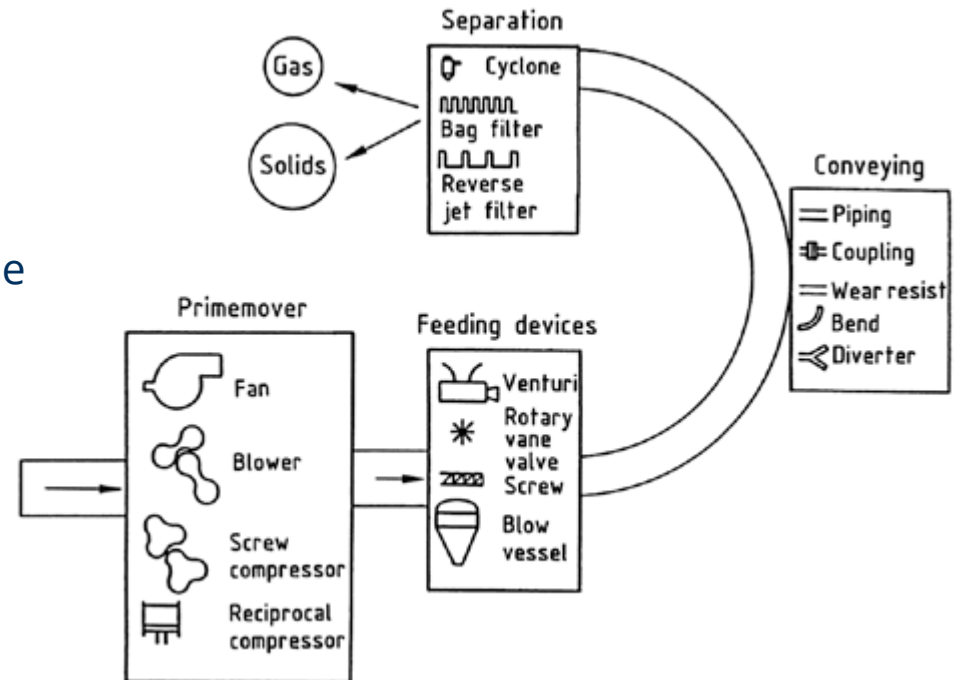
Saug-Druckförderanlage

- mehrere Dosierer, mehrere Empfangssilos
- hohes $\Delta p \rightarrow$ lange Förderstrecke
- kein Produktverlust

Bildquelle: *Ullmann's Encyclopaedia of Industrial Chemistry*. 7th ed. Wiley-VCH, 2004

Komponenten pneumatischer Förderanlagen

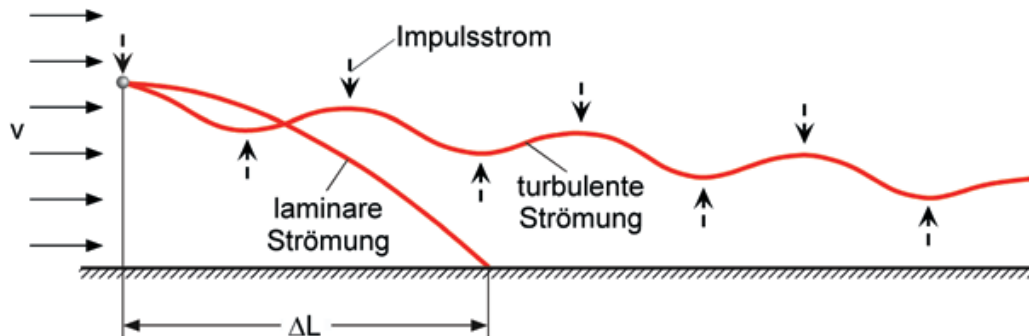
- Druckerzeuger
 - Gebläse, Kompressor
 - Vakuumpumpe
- Dosierapparate
 - Druckkessel
 - Förderschnecke, Zellschleuse
- Leitungen
 - Rohrleitungen, Schläuche
 - Krümmer, Verteiler
- Abtrennung
 - Aerozyklon
- Entstaubung
 - Beutelfilter



8.2 Pneumatischer Transport - *Förderzustände* -

Partikeltransport in Gasströmungen

- mögliche Prozesse beim pneumatischen Transport
 - Sedimentation (Migration)
 - konvektive Mitnahme im Gas durch Strömungskräfte
 - turbulente Diffusion
 - Mitbewegung in einer Partikelsträhne oder in einem Partikelfropfen



M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik*, 3. Aufl.; Springer Vieweg, 2020; Abb. 16.2

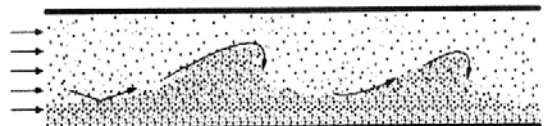
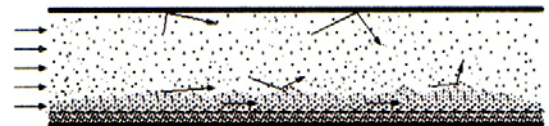
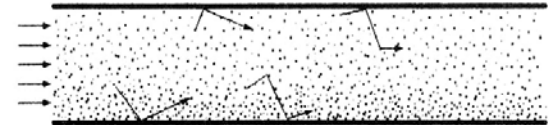
- Förderbedingungen
 - für vertikalen Transport:
 $\text{Gasgeschwindigkeit} > \text{Sinkgeschwindigkeit}$
 - für horizontalen Einzelpartikeltransport:
 $\text{Gasgeschwindigkeit} > \text{Mitnahmegeschwindigkeit} \approx 2 \times \text{Verstopfungsgeschwindigkeit}$

Einteilung der Förderzustände

- Unterscheidung nach Transportrichtung
 - Horizontalförderung
 - Vertikalförderung
- nach Bewegung der Partikel
 - Dünnstromförderung: individueller Transport aller Partikel in Gasphase
 - Dichtstromförderung: zumindest teilweise kollektiver Transport als Düne, Ballen etc.
- nach Verteilung der Partikel über Rohrquerschnitt:
 - abhängig von Leerrohrgeschwindigkeit v_F und Gutbeladung μ
 - *s. nächste Folien*

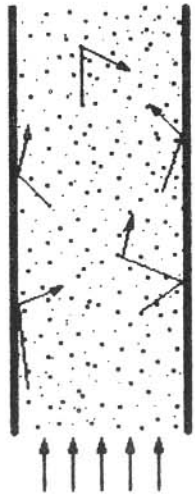
Pneumatische Förderzustände

- Flugförderung
 - Partikel gleichmäßig über Querschnitt verteilt
 - $v_F = 20 \dots 40 \text{ m/s}$, $\mu = 0.1 \dots 10$, $\varepsilon \geq 98\%$
 - stabile Förderung, über große Strecken, relativ niedrige Δp
- Strähnenförderung
 - neben Flugförderung bewegte Strähnen an Rohrwand
 - $v_F = 20 \dots 30 \text{ m/s}$, $\mu = 10 \dots 50$
 - z.T. Strähnenförderung mit ruhender Ablagerung
- Ballen- und Dünenförderung
 - langsam bewegte Haufen (*Ballen*) bis hin zu Dünen mit hohem Anteil unbewegter Partikel
 - $v_F = (0.1)1 \dots 25 \text{ m/s}$, $\mu = 20 \dots 50$
 - instabil \rightarrow Wechsel der Förderzustände o. Verstopfung möglich
- Pfropfenförderung
 - abschnittsweise Verstopfung \rightarrow *Pfropfen*
 - $v_F = 1 \dots 5 \text{ m/s}$, $\mu = 30 \dots 150$
 - Wandreibung des Pfropfen überwunden werden
 - Verstopfungsgefahr (insbesondere kohäsive Güter)

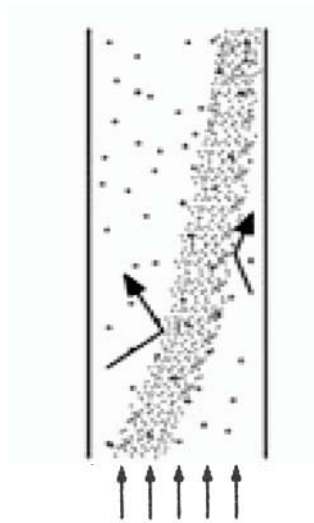


M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik 2*, Springer, **1994**; S. 364 f.

Pneumatische Förderzustände – vertikal



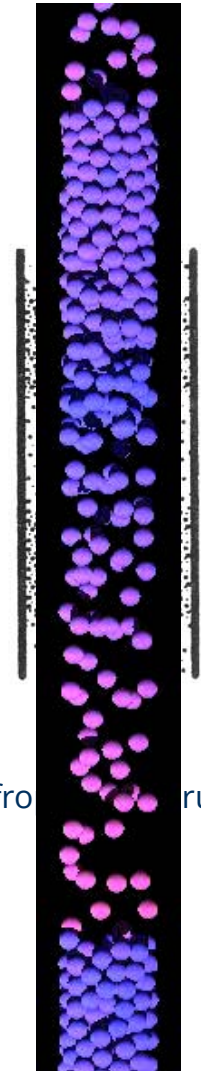
Flugförderung



Strähnenförderung



Ballenförderung



Pfropfbeförderung

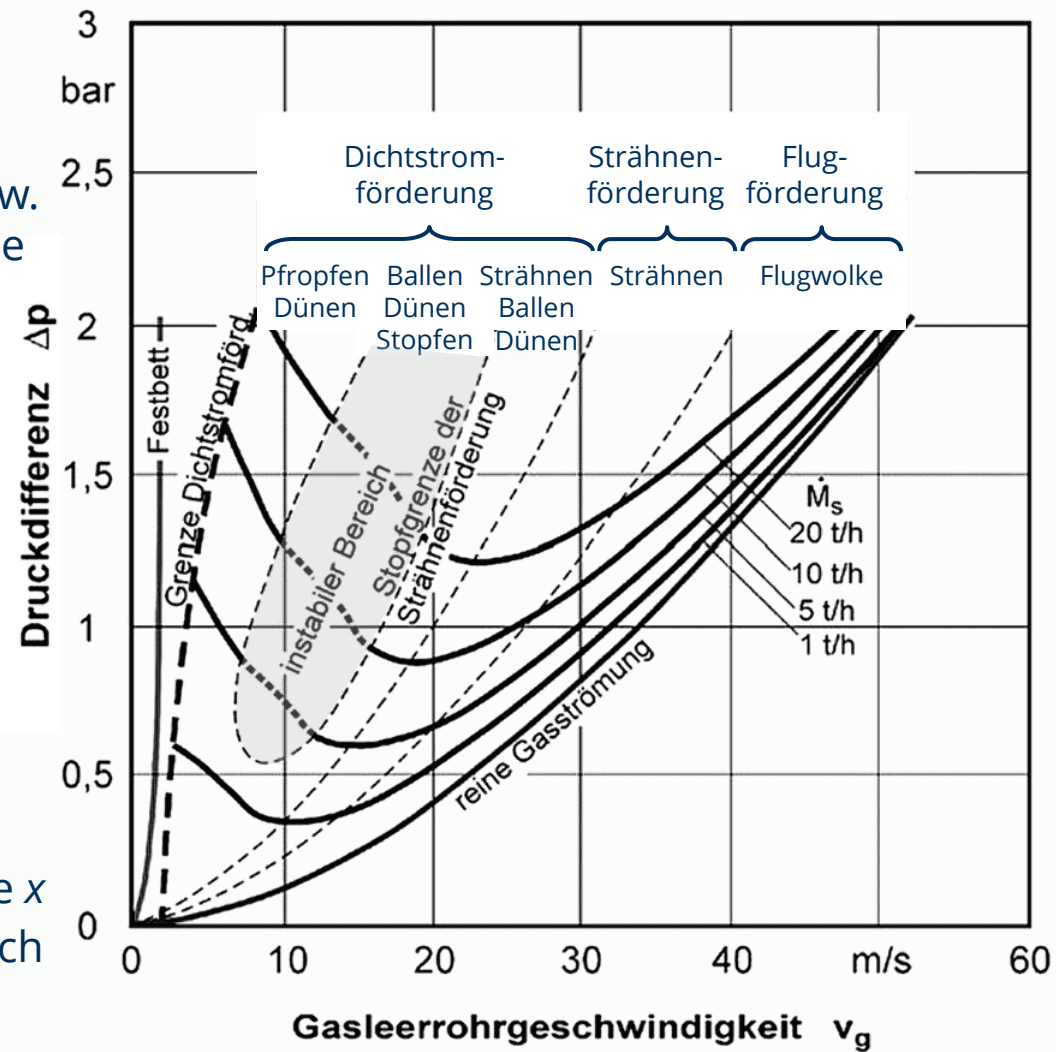
M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik 2*; Springer, **1994**; S. 365.

M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik*, Springer, **2012**; S. 510

H.-J. Herrmann: <http://www.icp.uni-stuttgart.de/movies/>

Zustandsdiagramm pneumatischer Förderung

- Darstellung
 - Druckverlust vs. Leerrohrgeschw. für gegebene Gutmassenströme
- Aussagen:
 - Δp steigt mit Gutstrom (\dot{M}_s)
 - Kurve $\Delta p(v_F)$ mit Minimum
 - $v_F < v_{F,min}$:
 $v_F \downarrow \rightarrow$ mehr Ablagerung $\rightarrow \Delta p \uparrow$
 - $v_F > v_{F,min}$:
 $v_F \uparrow \rightarrow$ mehr Turbulenz $\rightarrow \Delta p \uparrow$
 - instabiler Bereich für kleine v_F
 \rightarrow Stopfgrenze
- Praxis:
 - Bereiche abh. von Partikelgröße x
 - kleine x : breiter instabiler Bereich

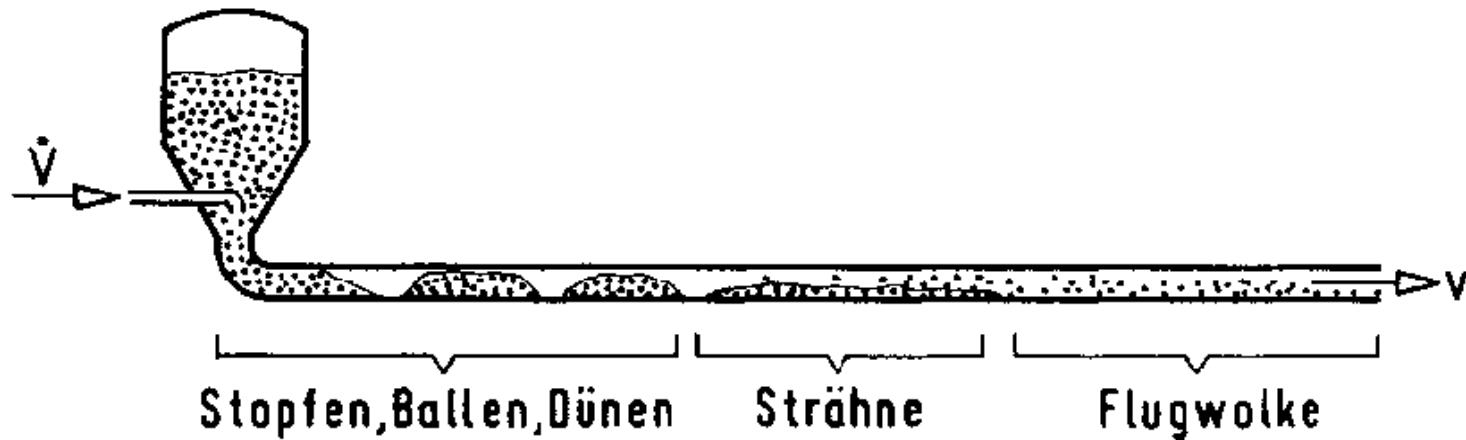


M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik*; Springer, 2012; S. 509.

Einordnung und Vergleich der Förderzustände

- je höher μ , desto günstiger spezifischer Luftverbrauch, aber desto höher Verstopfungsgefahr
- je niedriger v_F , desto geringer Partikelabrieb und Apparateverschleiß, d.h.
 - Flugförderung → abriebfeste Materialien (z.B. Salz, Mehl)
 - druckempfindliche Materialien (z.B. Granulate, beschichtete Partikel) → Pfropfenförderung (1...5 m/s, $\mu = 30...150$) oder vibrationsgestützte Dünenförderung mit sehr niedrigem v_F (0.1...1 m/s, $\mu = 30...50$)
- maximaler Leistungsverbrauch ($\Delta p_v \cdot \dot{V}$) bei Flugförderung und Verstopfung
- Leistungsminimum für Dichtstromförderung → Maßnahmen zur Stabilisierung dieser Strömungszustände
- Vertikalförderung:
 - in vielen ähnlich wie Horizontalförderung
 - geringeres $v_{F,Stopf}$ und geringeres Δp als Horizontalförderung
- Materialeinfluss (Größe, Form, Dichte)
 - auf Bereichsgrenzen und Ausprägung (Düne, Ballen, etc.)
 - auf Wandreibung und Verstopfungsgefahr (kritisch: feine Partikel < 350 μ m)

Änderung des Förderzustandes bei langen Förderstrecken



Bildquelle: W. Krambrock, *Chemie Ingenieur Technik*, 54(9):793-803, 1982.

8.3 Pneumatischer Transport

- Berechnungen zur Dünnstromförderung -

Grenzgutbeladung für Flugförderung

- Ansatz:

- aufgebrauchte kinetische Energie ermöglicht Gas- und Guttransport und „nebenbei“ das In-Schwebe-Halten der Partikel
- bzw. Bewegungsenergie des Gases \gg erforderliche Hubarbeit
- d.h.

$$\frac{P_{\text{kinet}}}{P_{\text{Hub}}} = \frac{\lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2} \rho v_F^2 \cdot A v_F}{\mu \cdot \rho A L \cdot g \cdot v_S} = \frac{\frac{1}{2} \lambda \cdot v_F^3}{\mu \cdot D \cdot g \cdot v_S} \gg 1$$

D & L = Rohrdurchmesser+länge, λ = Rohreibungsbeiwert, v_S = Sinkgeschwindigkeit

→ Gutbeladung für Flugförd.:

$$\mu = \frac{\dot{m}_{\text{Gut}}}{\dot{m}_{\text{Luft}}} \ll \frac{\frac{1}{2} \lambda \cdot v_F^3}{D \cdot g \cdot v_S}$$

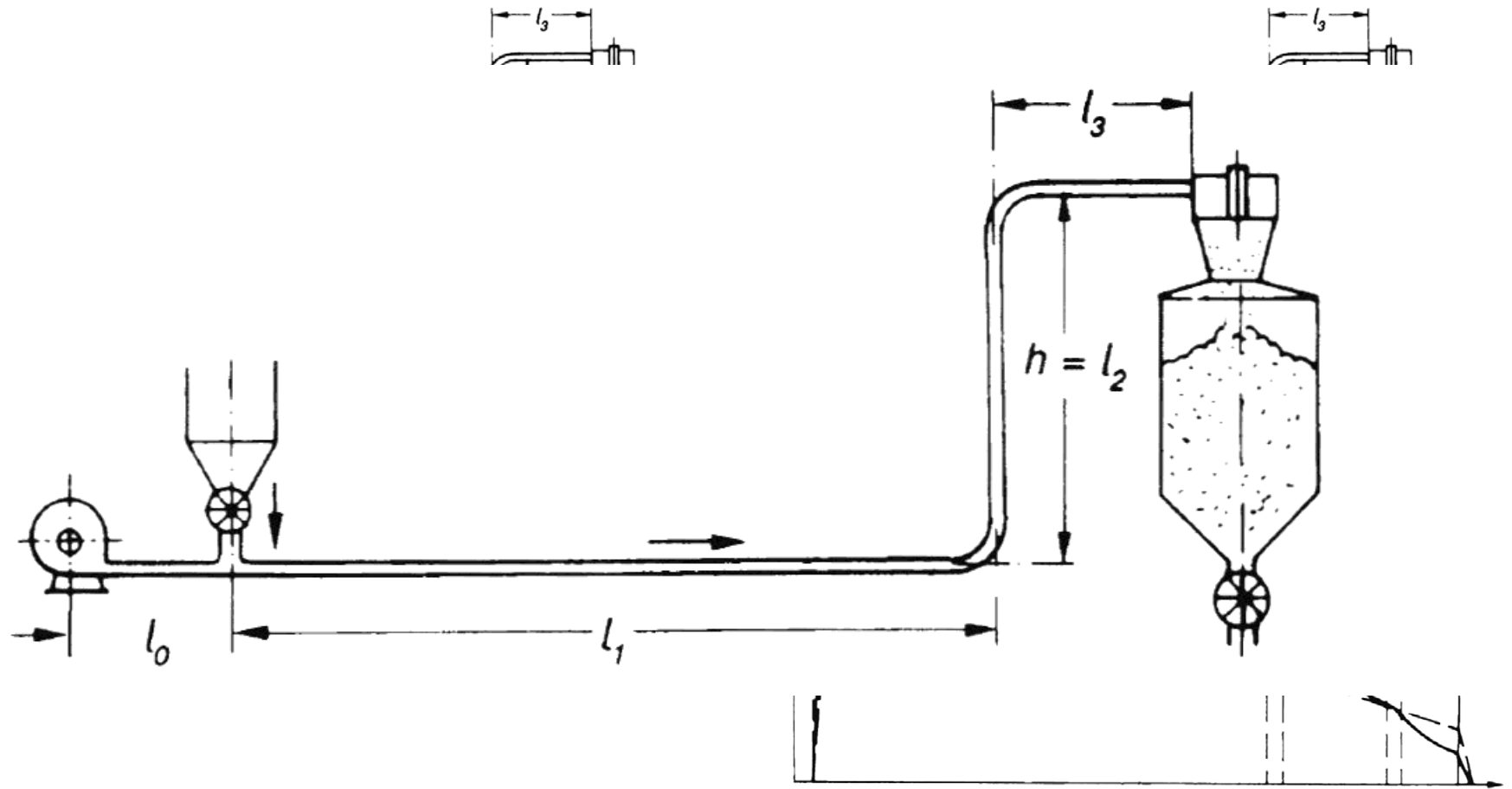
- Grenzgutbeladung nach Muschelknautz:

$$\mu_G = 0,02 \dots 0,04 \cdot \frac{\lambda \cdot v_F^3}{g \cdot D \cdot v_S} \cdot \left(1 + \frac{v_S}{v_F}\right)^{2-A}$$

A = Exponent des Potenzansatz für Widerstandsbeiwertes von Kugeln $c_W = B/Re^A$

- Faktor 0,02 ← enge Verteilung, kugelförmige Partikel
- Faktor 0,04 ← breite Verteilung, nicht-kugelige Partikel

Druckverlust in pneumatischen Förderanlagen



Muschelknautz, *Druckverlust in pneum. Förderanlagen*. In. *VDI-Wärmeatlas*; Springer, **2013**; S. 1384.

Druckverlust bei Dünnstromförderung

- Gesamtdruckverlust: $\Delta p_V = \Delta p_F + \Delta p_S$
- Gasströmung: $\Delta p_F = \left(\lambda \frac{L}{D} + \sum \xi \right) \cdot \frac{\rho}{2} v_F^2$
- Feststofftransport
 - Hubarbeit: $\Delta p_{S,H} = \mu \frac{v_F}{v_P} \cdot \rho_F g \Delta H$ $\Delta H = \text{Höhendifferenz}$
 - Stöße mit der Wand: $\Delta p_{S,W} = \mu \cdot \lambda_S^* \frac{v_P}{v_F} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho}{2} v_F^2$
 $\lambda_S^* = \text{Stoßreibungsbeiwert, ca. 0.001 ... 0.01}$
 - Strahlenreibung: $\Delta p_{S,R} = \mu \frac{v_F}{v_P} \cdot \alpha_{\text{str}} f_R \cdot \rho g L_{\text{hor}}$
 $L_{\text{hor}} = \text{horizon. Länge, } \alpha_{\text{Str}} = \text{Strahlenanteil, } f_R = \text{Reibungskoeffizient}$
 - Beschleunigung: $\Delta p_{S,B} = 2\mu \cdot \left(\frac{v_P}{v_F} + n_K \cdot \frac{\Delta v_P}{v_F} \right) \cdot \frac{\rho}{2} v_F^2$
 $n_K = \text{Krümmeranzahl, } \Delta v_P = \text{Verlangsamung im Krümmer}$

8.4 Pneumatischer Transport

- *Pfropfenförderung* -

Prinzip der Pfropfenförderung

- Begriffe
 - Pfropfen: kurze, verschiebbare Schüttgutsäule im Förderrohr, $\varepsilon_{\text{Pfropfen}} > \varepsilon_{\text{Festbett}}$
 - Stopfen: unbewegliche Schüttgutsäule im Förderrohr, $\varepsilon_{\text{Stopfen}} \approx \varepsilon_{\text{Festbett}}$
- Pfropfenförderung
 - Druckdifferenz über Propfenlänge verursacht
 - ... schwache Gasströmung durch den Propfen
 - ... eventuell *by-pass*-Strömung an Wand
 - ... Druckkraft auf gesamten Pfropfen → Überwindung der Wandreibung
- Voraussetzungen für stabilen Betrieb
 - Begrenzung der Pfropfenlänge
 - zeitkonstante Massenströme von Fördergut und Gas
 - Einbauten zum Auflösen von Verstopfungen
 - Begrenzung der Förderleitung

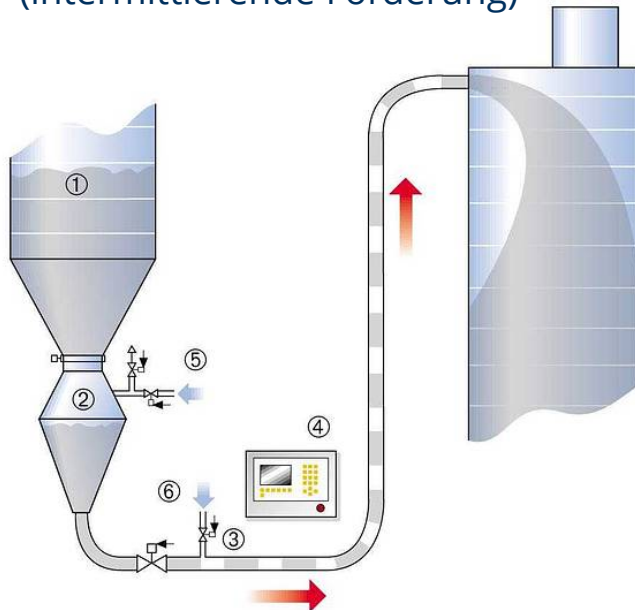
Anwendung der Pfpfenförderung

- Produktspektrum:
 - rieselfähige Pulver, grobkörnige Güter und Granulate (z.B. Milchpulver, Kunststoffpellets, Sprühgranulate)
 - für druckempfindliche Produkte (z.B. Instantgetränke-Granulate)
 - möglichst nicht komprimierbar
- Vergleich mit Flugförderung:

Vorteile	Nachteile
schonend für Fördergut	höherer Druckverlust
geringerer Verschleiß der Rohrwände und Krümmer	Gefahr der Stopfenbildung → entsprechende Einbauten und Druckreserve
geringerer Förderluftvolumenstrom	höhere Investitionskosten
kleinere Entstaubungsanlagen	stabile Pfpfen nur über relativ kurze Strecken erreichbar
Entmischung des Fördergutes (partiell) vermeidbar	Auslegung erfordert umfangreiche Materialkennzeichnung
Reduzierung des Geräuschpegels	

Realisierung von Pfropfenförderung

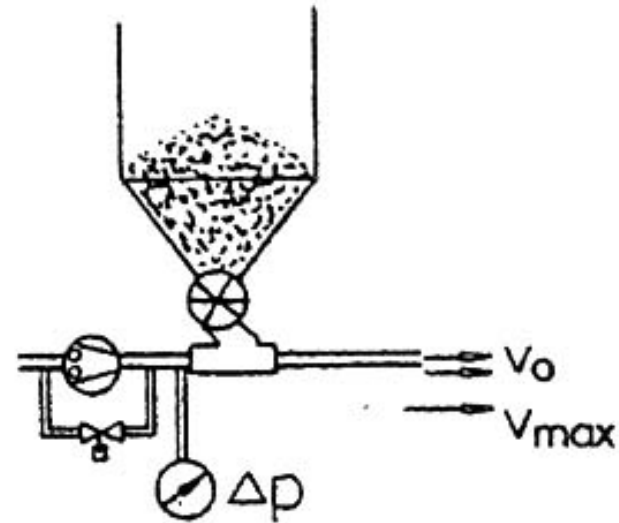
Impulsverfahren:
(intermittierende Förderung)



- stetig ausströmende Schüttgutsäule
- Propfenbildung durch Luftimpulse
- Nachteil: ständig wiederkehrende Beschleunigung aller in der Leitung befindlichen Pfropfen

Fa. Gericke: *Prospekt Nr. 622*

Takt-Schub-Förderung:



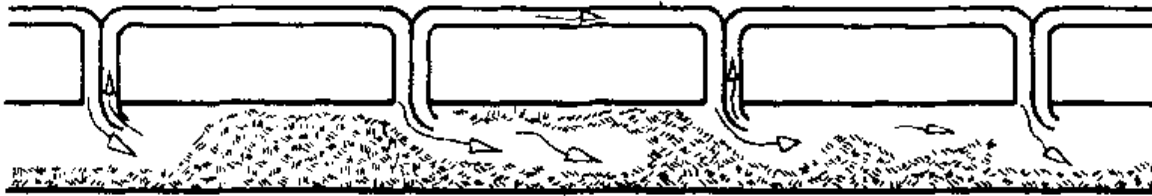
- stetig ständig durchströmt Förderleitung
- intervallweise Zuführung der Schüttgutsäule aus dem Aufgabebehälter → kurze Pfropfen
- sehr gut geeignet für kurze Förderstrecken

W. Krambrock, *Verfahrenstechnik*, 12 (4):191-201, **1978**.

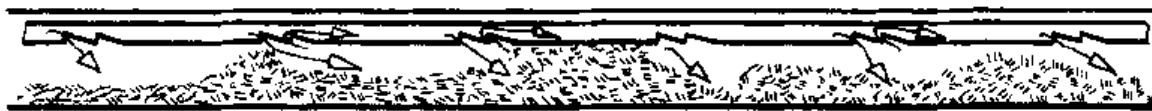
Stopfenauflösung mit Hilfe von Umgehungsluft

(d.h. kein Bedarf nach einer zusätzlichen Druckluftversorgung)

Umgehung von Stopfen durch externe, **periodische Bypassleitungen**



Umgehung von Stopfen durch interne **Rohrleitungen**

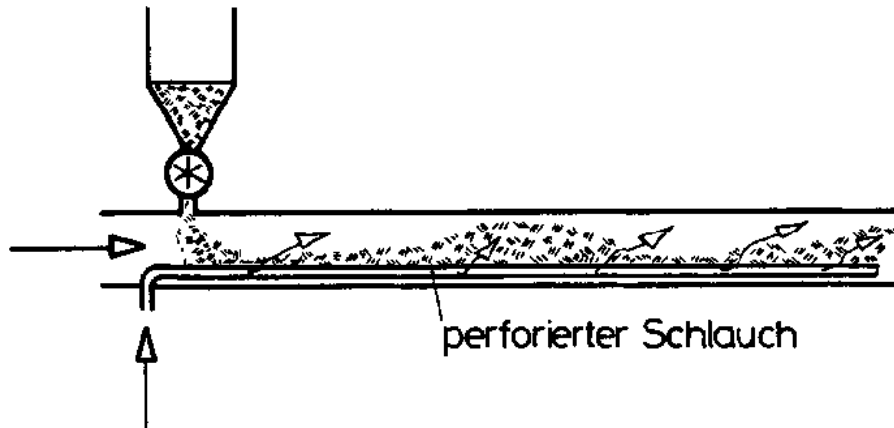


Bildquelle: W. Krambrock, *Chemie Ingenieur Technik*, 54(9):793-803, 1982.

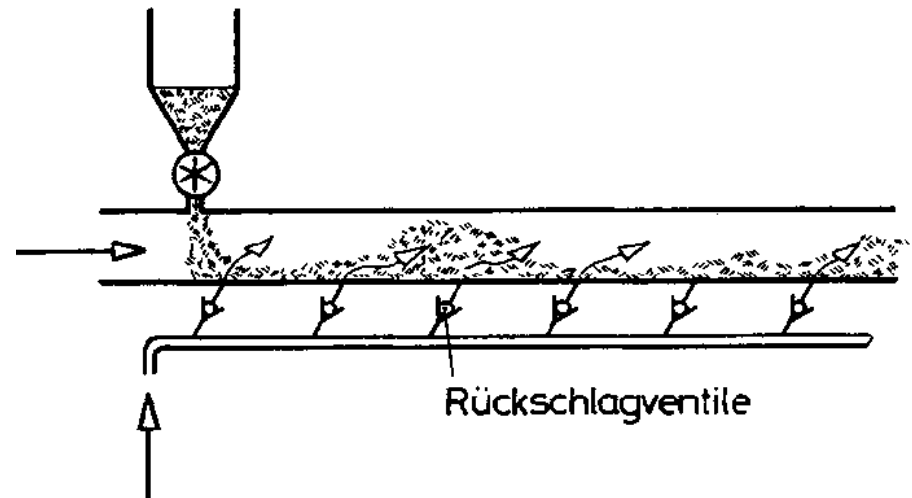
Stopfenauflösung mit Hilfe von Zusatzluft

(d.h. mit zusätzlichem Luftreservoir oder Kompressor)

Einblasen der Zusatzluft über
perforierte Schläuche

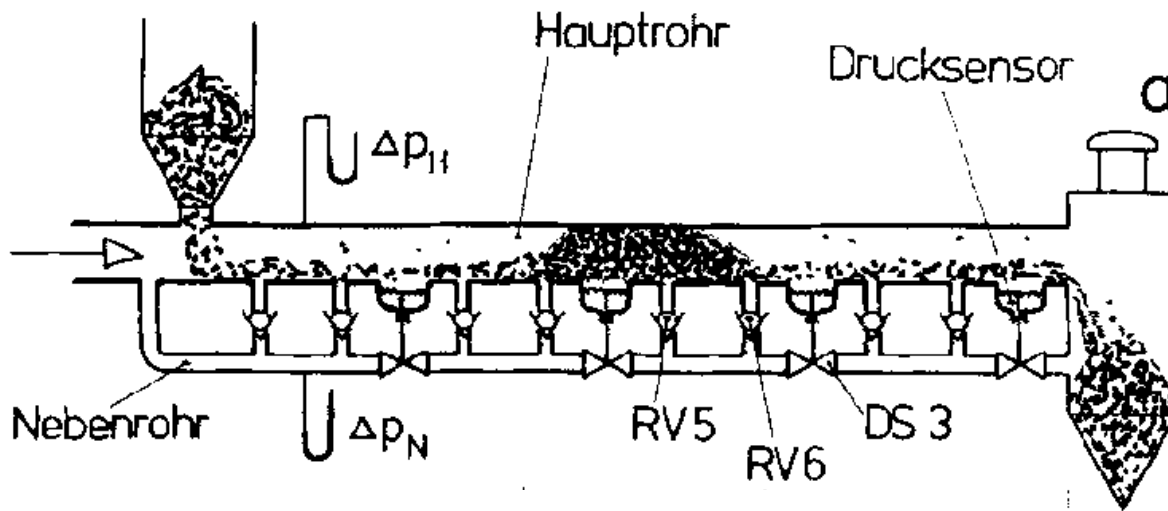


Einblasen der Zusatzluft über
Rückschlagventile an festen Stellen



Bildquelle: W. Krambrock, *Chemie Ingenieur Technik*, 54(9):793-803, 1982.

Apparativer Aufwand für Zusatzluft



Bildquelle: W. Krambrock, *Chemie Ingenieur Technik*, 54(9):793-803, 1982.

8.5 Pneumatischer Transport

- *Literatur* -

Literatur zum pneumatischen Transport

- U. Muschelknautz: Druckverlust in pneumatischen Förderanlagen. In: VDI e.V. (Hrsg.), *VDI-Wärmeatlas*, 11. Aufl., **Kap. L3.3**; Springer-Verlag Berlin Heidelberg **2013**; [doi:10.1007/978-3-642-19981-3_88](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3_88)
- M. Stieß: *Mechanische Verfahrenstechnik Bd. 2*; Springer, Berlin, **1997**; [doi:10.1007/978-3-662-08599-8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-08599-8); → Kap. 11.2
- G. E. Klinzing, F. Rizk, R. Marcus, L. S. Leung: *Pneumatic Conveying of Solids. A theoretical and practical approach*. In series: *Particle Technology Series*, vol. 8. Springer, Dordrecht, **2010**; [doi:10.1007/978-90-481-3609-4](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3609-4)
- M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik. Grundlagen und apparative Umsetzungen*; 3. Auflage. Springer Vieweg, **2020**; [doi:10.1007/978-3-662-60012-2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-60012-2); → Kap. 16