

Schwedes + Schulze Schüttguttechnik GmbH

VT-Toolbox

Version 2.0.2

Programme zur Berechnung verfahrenstechnischer Parameter und pneumatischer Förderanlagen.

© 2025-2030 Mario Dikty

Inhalt

	Seite
2.1 Eingabezellen	6
2.2 Einheiten.....	7
2.3 Navigation	7
3.1 Einleitung.....	9
3.2 Strömungsformen	10
3.3 Druckverlustberechnung	12
3.3.1 Druckverlustberechnung der Gasphase	14
3.3.2 Druckverlustberechnung der Feststoffbeschleunigung	16
3.3.3 Druckverlustberechnung der Feststoffumlenkung [5].....	17
3.3.4 Druckverlustberechnung der horizontalen Schüttgutströmung	17
3.3.5 Druckverlustberechnung der vertikalen Schüttgutströmung.....	22
3.3.6 Zusammenfassung aller Druckverlustterme	23
5.1 Eingabe des Förderleitungsverlaufes.....	25
5.2 Dichtstromförderung von Kunststoffgranulat nach Muschelknautz und Krambock	27
5.2.1 Einsatzgrenzen des Programmes.....	28
5.2.2 Eingabe der Schüttgutdaten.....	28
5.2.3 Eingabe der Anlagendaten	29
5.2.4 Berechnungsergebnisse	30
5.3 Druckförderung auf Basis der Widerstandsbeiwerte von Siegel [3].....	32
5.3.1 Einsatzgrenzen des Programmes.....	32
5.3.2 Eingabe der Schüttgutdaten.....	32
5.4 Saugförderung auf Basis der Widerstandsbeiwerte von Siegel [3]	37
5.4.1 Einsatzgrenzen des Programmes.....	37
5.4.2 Eingabe der Schüttgutdaten.....	37
5.5 Druckförderung auf Basis der Berechnung des Widerstandsbeiwertes von Stegmaier für feine Schüttgüter ($d_{s,50} \leq 150 \mu\text{m}$)	38
5.5.1 Einsatzgrenzen des Programmes.....	38
5.5.2 Eingabe der Schüttgutdaten.....	38
5.5.3 Nebenrechnungen	39
5.6 Saugförderung auf Basis der Berechnung des Widerstandsbeiwertes von Stegmaier für feine Schüttgüter ($d_{s,50} \leq 150 \mu\text{m}$)	40
5.7 Bewertung der Ergebnisse	40
5.8 Bemerkung zur Auslegung von Gebläsen und Verdichtern	41
6.1 Berechnung der Wärmedehnung von Rohrleitungen	43
6.2 Geschwindigkeiten in Rohrleitungen	44
6.3 Umrechnung von Geschwindigkeiten und Volumenströmen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur.....	44
6.3.1 Norm- vs. Betriebsbedingungen.....	44
6.3.2 Gasgleichung.....	45
6.3.3 Höhenlage.....	46
6.4 Partikel-Sinkgeschwindigkeit	47
6.5 Lockerungspunktgeschwindigkeit	48
6.6 Zellenradschleusendimensionierung nach ISO 3922	49
6.7 Druckverlust von Luftleitungen nach VDI-Wärmeatlas.....	52

6.7.1	Druckverlust für 10m Rohrleitung	53
6.7.2	Druckverlust eines 90° Bogens.....	54
6.8	Geldart-Diagramm (in Bearbeitung).....	54

1 Lizenz

Lesen Sie diese Lizenz sorgfältig vor Benutzen dieses Produktes. Mit der Benutzung dieses Produktes erkennen Sie an, dass Sie diese Lizenz gelesen haben und ihren Bedingungen zustimmen.

Lizenzbedingungen

Schwedes + Schulze Schüttguttechnik GmbH („wir“ oder „uns“) stellt Ihnen Medien bereit, die ein Computer-Programm (das „Programm“), die Lizenz (die „Lizenz“) und Anwender-Handbuch (zusammen das „Produkt“) beinhalten, und gewährt Ihnen das Recht, das Produkt in Anlehnung an die Bedingungen dieser Lizenz zu benutzen. Das Urheberrecht und alle anderen Rechte an diesem Produkt bleiben bei uns.

Das Programm ist ausschließlich als Web-Version verfügbar.

Sie dürfen nicht:

1. anderweitig als in der Lizenz beschrieben dieses Produkt benutzen oder Kopien davon anfertigen;
2. das Programm zurückübersetzen, dekompileieren oder disassemblieren, soweit diese Einschränkung nicht durch anwendbare Gesetze verboten ist; das Programm modifizieren oder einzelne oder alle Teile des Programms mit anderen Programmen verbinden.
3. Ihre Zugangsdaten an Dritte weitergeben.

Gültigkeit

Diese Lizenz gilt so lange, wie Sie das Produkt benutzen. Die Lizenz endet jedoch, sobald Sie irgendeine der hier angeführten Bedingungen verletzen. Die Garantie- und Haftungsbegrenzungen, die im Folgenden aufgeführt werden, gelten auch über den Ablauf der Lizenz hinaus.

Garantie- und Haftungsbegrenzung

Das Produkt auf einer „so wie es ist“-Basis bereitgestellt, also ohne irgendwelche anderen Garantien, ausdrücklich oder inbegriffen, einschließlich solcher auf Tauglichkeit für einen besonderen Zweck, oder solche, die auf Gesetzen, Regelungen oder üblichen Gebräuchen beruhen. Das vollständige Risiko bezüglich der Ergebnisse und der Funktion des Produktes wird von Ihnen getragen. Wir übernehmen keine Haftung gegenüber Ihnen oder irgendwelcher anderer Personen oder Organisationen für irgendwelche indirekten, mittelbaren oder unmittelbaren Schäden, einschließlich, aber nicht begrenzt auf, Verlust von Einnahmen oder Gewinn, verlorene oder beschädigte Daten oder anderen kommerziellen oder ökonomischen Verlust, auch wenn wir von der Möglichkeit eines solchen Schadens informiert worden waren

oder sie absehbar war; oder für Ansprüche Dritter. Die Summe unserer Haftung gegenüber Ihnen ist auf den Betrag begrenzt, der von Ihnen für das Produkt bezahlt wurde. Wir übernehmen keine Haftung für Fehlbedienungen des Programmes.

Benutzerqualifikation

Das Programm ist mit verfahrenstechnischem Sachverstand anzuwenden. Das Programm darf nur von Verfahrenstechnik-Ingenieur:innen benutzt werden. Wenden Mitarbeiter:innen ohne verfahrenstechnische Ausbildung des Programms an, so kann es zu schwerwiegenden Fehlinterpretationen kommen. Diese Fehlbedienung ist durch das Programm nicht auszuschließen. Zusätzlich empfehlen wir die Teilnahme an der Schwedes + Schulze GmbH Schulung zum Thema „Pneumatische Förderung“, um einen Einblick in die Grundlagen der VT-Toolbox zu bekommen. In dieser Schulung werden die in der VT-Toolbox angewandten Auslegungsansätze vorgestellt.

Allgemeines

Diese Lizenz ist das vollständige Übereinkommen zwischen uns, ersetzt jedes andere Übereinkommen oder Verabredungen, mündlich oder geschrieben, und wird außer von einem geschriebenen und unterschriebenen Übereinkommen nicht verändert. Diese Lizenz gilt und wird angewandt in Anlehnung an die Gesetze der Bundesrepublik Deutschland. Falls irgendeine Bedingung dieser Lizenz von einem zuständigen Gericht als illegal, undurchführbar oder ungültig erklärt wird, wird diese von der Lizenz abgetrennt, während die anderen Bedingungen ihre volle Gültigkeit behalten.

Copyright

© 2025-2030 Mario Dikty

Die Inhalte dieses Handbuches und des dazugehörigen Rechnerprogramms „S+S Toolbox-V.N.N.N“ sind das Eigentum von Schwedes + Schulze Schüttguttechnik GmbH und sind urheberrechtlich geschützt. Jede Reproduktion im Ganzen oder zum Teil ist verboten.

Fragen

Falls Probleme mit der Bedienung des Programmes auftauchen, richten Sie Ihre Fragen bitte an:

Schwedes + Schulze Schüttguttechnik GmbH
Teichstrasse 4
21641 Apensen
E-mail: m.dikty@schwedes-und-schulze.de

2 Bevor Sie beginnen...

Es wird vorausgesetzt, dass der Benutzer mit den Grundlagen der pneumatischen Förderung und der Verfahrenstechnik im Allgemeinen vertraut ist. Dies bedeutet, dass der Benutzer fähig ist, das Programm in der richtigen Art zu benutzen und die Ergebnisse sorgfältig und kritisch zu interpretieren. Eingabefehler werden vom Programm nicht automatisch erkannt und eliminiert. Falsche Eingaben führen zu falschen Ergebnissen oder schlimmstenfalls zu einem Programmabbruch mit Datenverlust. Der Benutzer ist verantwortlich für jedes Berechnungsergebnis.

2.1 Eingabezellen

Die Eingabezellen sind nicht gesperrt. Alle nicht gesperrten Zellen sind mit Eingabedaten zu füllen, damit eine Berechnung durchgeführt werden kann. Alle weiteren Zellen sind gesperrt, um versehentliches Überschreiben von Berechnungsgleichungen zu vermeiden.

Weiß hinterlegte Zellen sind Eingabezellen.

Grau hinterlegte Zellen sind Ergebniszellen. Sie zeigen die relevanten Berechnungsergebnisse. Sie werden automatisch berechnet.

Rot hinterlegte Zellen zeigen Eingaben außerhalb des Gültigkeitsbereiches oder Ergebnisse, die nicht zulässig sind, da sie z.B. zu einer Rohrleitungsverstopfung führen können.

Bild 1 zeigt ein Beispiel der Zelltypen.

Daten des Schüttgutes	
Mittlerer Partikeldurchmesser:	3 - 5 mm
Minimale Schüttguttemperatur:	°C eingeben °C
Schüttdichte:	Dichte eingeben kg/m³
Spezifische Wärmekapazität:	1500 J/kg/K
Dynamische Viskosität:	- Pas
Fördergasendgeschwindigkeit:	Geschwindigkeit eingeben m/s

Bild 1: Beispiel für Zellfarben

2.2 Einheiten

In der Regel sind die Eingabedaten in SI-Einheiten einzugeben. Einige Werte, wie z.B. Korngrößen werden partiell in [mm], oder Massenströme in [kg/h] eingegeben. Der Benutzer erkennt die notwendige Einheit des Eingabewertes an der jeweiligen Zelle neben der Eingabezelle. Bild 2 zeigt die Eingabezellen von Schüttgutparametern. Der „mittlere Partikeldurchmesser“ ist hier in [mm] einzugeben.

Daten des Schüttgutes

Mittlerer Partikeldurchmesser:	3 - 5	mm
Minimale Schüttguttemperatur:	°C eingeben	°C
Schüttdichte:	Dichte eingeben	kg/m³
Spezifische Wärmekapazität:	1500	J/kg/K
Dynamische Viskosität:	-	Pas
Fördergasendgeschwindigkeit:	Geschwindigkeit eingeben	m/s

Bild 2: Beispielhafte Eingabeparameter mit Einheitenangabe

2.3 Navigation

Das Feld „Zurück zur Auswahl“ gibt eine Übersicht der Programme / Module. Durch Anklicken der grauen Buttons (Bild 3) gelangt der Bediener in das jeweilige Programm.

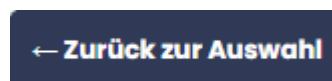


Bild 3: Ausschnitt des Navigationsfeldes „Zurück zur Auswahl“

Auf jeder Seite gibt es mindestens 2 weitere Buttons (Bild 4). Einer führt die Berechnung nach Eingabe der Eingabeergebnisse aus („Berechnen“).

Achtung: Haben Sie eine Lizenz erworben, die Ihnen nur eine begrenzte Anzahl Berechnungen erlaubt, so wird pro Start einer Berechnung, diese in Abzug Ihrer noch möglichen Berechnungen gebracht.

Die Durchführung von Berechnungen aus den zusätzlichen Modulen (alles außerhalb pneumatischer Berechnungen) ist während der Lizenzlaufzeit frei. Sie können dort so viele Berechnungen durchführen, wie Sie möchten.

Der zweite Button druckt das Berechnungsergebnis oder den Inhalt der jeweiligen Seite als PDF. Der Dateiname, der frei umbenennbar ist, wird durch das Programm

vorgegeben. Der Dateiname wird für die PDF in Anlehnung des gewählten Berechnungsmoduls vorgegeben.



Bild 4: Start einer Berechnung und Ausdruck der Ergebnisse

3 Grundlagen der pneumatischen Förderung

3.1 Einleitung

Technisch findet der pneumatische Transport eine Vielzahl Anwendung, um Schüttgüter mittels eines Fördergases, in der Regel Luft, durch eine Rohrleitung, in der Regel in kreisrunder Ausführung, zu transportieren. Dieses erfolgt entweder im Saug- oder Druckbetrieb. Bild 5 zeigt den schematischen Aufbau beider Systeme. Beide Systeme zeichnet ein negatives Druckgefälle in Strömungsrichtung aus. Die Grundoperationen einer Saug- oder Druckanlage sind identisch:

- Einschleusung des Schüttgutes in die Förderleitung
- Transport durch die Förderleitung aufgrund einer negativen Druckdifferenz
- Trennung des Schüttgutes vom Fördergas am Empfangspunkt (Ausnahmen sind z.B. direkte Reaktor- oder Brennerbeschickungen bei der Druckförderung, wie z.B. die Kohlefeuerung in der Kraftwerks- oder Zementindustrie)
- Druckerzeugung (Überdruck bei der Druckförderung, Unterdruck bei der Saugförderung).

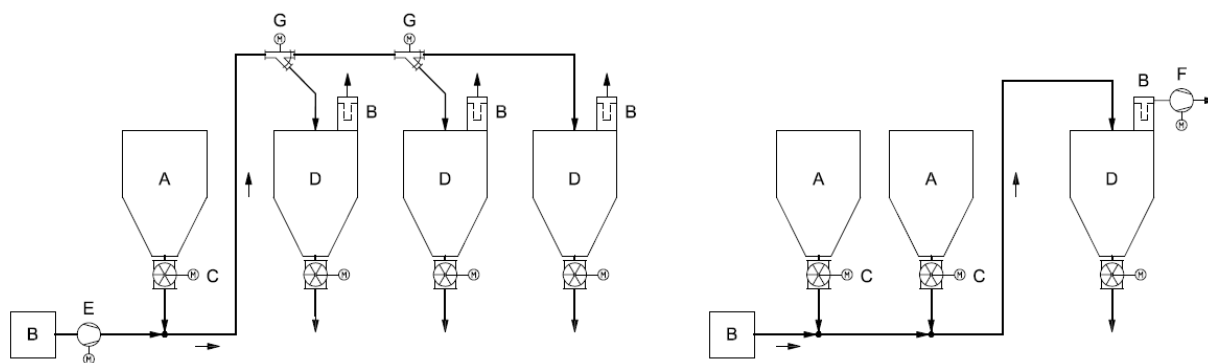


Bild 5: Druckanlage (links) / Sauganlage (rechts) in Anlehnung an [1] mit A-Vorratssilo, B-Filter, C-Schleuse, D-Empfangssilo, E-Überdruckerzeuger, F-Unterdruckerzeuger, G-Förderleitungsweichen

Die Einschleusung des Schüttgutes in die Förderleitung im Druckbetrieb erfolgt mittels Zellenradschleuse, Druckgefäß, Schneckenpumpe, Injektor (Düsenförderer), Klappensystemen oder bei dem ausschließlich vertikalen Transport mittels Airlift. Am Empfangspunkt wird das Schüttgut zur Weiterverarbeitung vom Transportgas getrennt. Dieses erfolgt mittels Zyklonen und Filtern. Bei z.B. der Brennerbeschickung erfolgt keine Trennung der 2 Phasen. Das Brennstoff-Luft-Gemisch wird direkt der Brennerlanze zugeführt. Das Transportgas dient gleichzeitig als Verbrennungsluft.

Die Rohrleitung wird i.d.R. rund ausgeführt. Je nach Anwendungsfall kann Baustahl oder, wie in der chemischen und Lebensmittelindustrie üblich, Edelstahl verwendet werden. Wanddicken variieren von 1 mm bis zu 10 mm.

Die Druckluftherzeugung hängt direkt vom Fördersystem ab. Während Druckgefäßsysteme mit Kompressoren ausgestattet werden, versorgen Gebläse (bis 1,0

bar(ü)) und Verdichter (bis 2,0 bar(ü)) Schneckenpumpen und Zellenradschleusen. Klappen und Injektoren werden nahezu ausschließlich mit Gebläsen kombiniert. Ausnahmen von den oben aufgeführten Kombinationen sind möglich.

Ob ein pneumatisches Fördersystem eingesetzt wird, und einem mechanischen bevorzugt wird, hängt von vielen Kriterien ab. Meistens fällt die Entscheidung zugunsten der pneumatischen Förderung, wenn der Förderweg entweder sehr lang oder die Strecke zwischen dem Start- und Empfangspunkt durch Umlenkungen und Höhenunterschiede geprägt ist. Weitere Kriterien zugunsten (+) und zu Ungunsten (-) der pneumatischen Förderung sind [5]:

- Hohe Anpassungsfähigkeit der Förderstrecken an örtliche Gegebenheiten (+),
- umweltfreundliche Gestaltung (keine Staubemission) (+),
- Vielfalt an Schaltungsmöglichkeiten durch Rohrweichen (+),
- geringer Wartungsaufwand für die Förderleitung (+),
- Verwendung von Schutzgas bei luftempfindlichen Feststoffen (+),
- Förderung von toxischen und gefährlichen Schüttgütern (+),
- breite Anwendbarkeit für unterschiedlichste Feststoffe (+),
- direkter Transport in Systeme die unter Überdruck stehen (+),
- geringere Anschaffungskosten (+),
- geringerer Platzbedarf (+),
- Durchführung von chemischen oder physikalischen Prozessen während der Förderung (+),
- vergleichsweise hoher Leistungsbedarf (-),
- Verschleiß von Rohrleitungen und Einschleusorganen (-),
- Bis ca. 10 mm Körnung wirtschaftlich einsetzbar (-),
- Produktabrieb, der ggf. aufwändige Förderluftreinigungen erforderlich macht (-),
- Gefährdung durch Staubexplosionen (-),
- Schallemissionen der Druckerzeuger und bei Granulaten der Rohrleitung (-).

3.2 Strömungsformen

Der Strömungszustand beschreibt das Fließverhalten des Schüttgutes in der Förderleitung. Er ist nicht immer im gesamten System konstant. Während z.B. am Anfang der Förderleitung das Schüttgut noch in Form von Dünen (siehe Definition unten) durch das Rohr fließt, kann es am Ende der Förderleitung, je nach Systemkonfiguration, als Flugförderung (siehe Definition unten) das Förderrohr verlassen. Die in dieser Übersichtsarbeit verwendete Definition der Strömungsformen in der Horizontalförderung wurde in Anlehnung an Weber [6] und Klinzing et al. [7] gewählt und in Bild 6 grafisch dargestellt:

- Modus A - Flugförderung: Es gibt keine Strähne und keine Ablagerung.
- Modus B - Cluster: Auf dem Rohrboden bilden sich Cluster / kleine Dünen aus. Zwischen den Clustern fließen Partikel mit höherer Geschwindigkeit.
- Modus C - Strähnenförderung: Eine Strähne (fast ebene Oberfläche), beweglich oder nicht, existiert auf dem Boden des Rohres.
- Modus D - Geschichtete Strömung: Eine Strähne fließt über eine untere Strähne. Die untere Strähne kann sich bewegen oder nicht.
- Modus E - Dünenströmung: Eine Düne (unebene Oberfläche, Geometrie in Anlehnung an eine Sanddüne) fließt durch das Rohr. Eine untere Strähne (fließend oder nicht) kann vorhanden sein, muss aber nicht vorhanden sein.
- Modus F - Pfropfenströmung: Pfropfen strömen mit geringer Geschwindigkeit durch das Rohr. Die Geometrie ist wie eine Sanddüne, die den gesamten vertikalen Rohrquerschnitt ausfüllt. Die Pfropfen nehmen an der Vorderseite Schüttgut auf und verlieren am Ende Schüttgut.

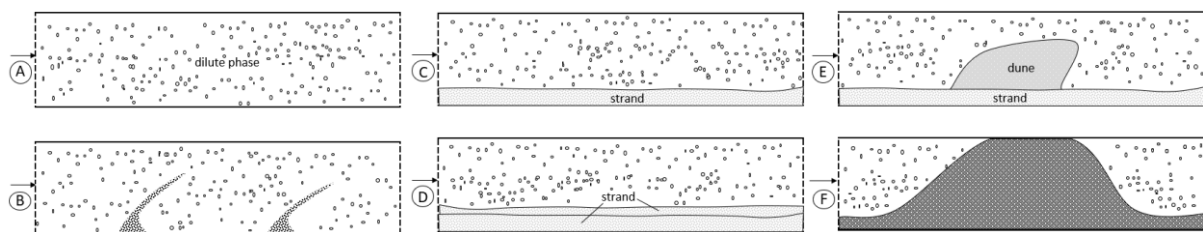


Bild 6: Strömungsformen bei der pneumatischen Förderung

Bei der Flugförderung herrschen hohe Strömungsgeschwindigkeiten, feine Schüttgüter ($d_{s,50} < 100 \mu\text{m}$) verhalten sich hier wie grobe Schüttgüter / Granulate. Sie fließen nahezu gleichmäßig über den Rohrquerschnitt verteilt.

Wenn die Transportgasgeschwindigkeit auf/unter die Sedimentationsgeschwindigkeit (engl. Saltation velocity) sinkt, beginnt sich die Zweiphasenströmung zu trennen, was als Strähnenförderung bezeichnet wird. Ein Teil des Feststoffs gleitet als Strähne auf dem Rohrboden, während der andere Teil fliegend über die Strähne transportiert wird. Die Strähne wird im Wesentlichen durch aufprallende Partikel angetrieben. Im Vergleich zu grobkörnigem Material ($d_{s,50} > 100 \mu\text{m}$) neigt feinkörniges Material schon bei höheren Luftgeschwindigkeiten zur Strähnenbildung. Wird die Luftgeschwindigkeit weiter reduziert, können sich einzelne Strähnen zu Dünen oder Pfropfen zusammenschieben. Dünen fließen wie Wellen durch die Förderleitung, da Scherkräfte auf die am Boden fließende Strähnenoberfläche wirken.

Die Dünenförderung ist bei groben Partikeln und die Pfropfenförderung bei feinkörnigen Schüttgütern eine instationäre Strömung, bei der die Gefahr von Rohrverstopfungen besteht. Es können sich geschlossene Pfropfen bilden, die, wenn sie länger sind, aufgrund der Keilwirkung und der geringen Gasdurchlässigkeit des Schüttgutes die Förderleitung verstopfen. Bei diesen Förderbedingungen ist eine sichere pneumatische Förderung oft nur mit zusätzlichen Hilfsmitteln, wie z. B. einem internen Belüftungsrohr zur Erhöhung der Turbulenz im System, zu erreichen. Bei grobkörnigen Gütern sind solche Keilwirkungen im Pfropfen gering, so dass auch hier eine problemlose Förderung erreicht werden kann.

3.3 Druckverlustberechnung

Zur Dimensionierung einer pneumatischen Förderanlage sind der notwendige Förderleitungsdruckverlust Δp_{ges} und die benötigte Fördergasmenge $\dot{V}_F$ von größtem Interesse. Massenstrom, Rohrleitungsverlauf und Transportmedium sind i.d.R. prozess- und anlagenbedingt vorgegeben. Somit verbleibt für die Dimensionierung ausschließlich die Wahl des Rohrleitungsdurchmessers d_R oder bei vorgegebenem Rohrdurchmesser die Wahl des gewünschten Druckverlustes. Als Ergebnis werden der Rohrleitungsdruckverlust und die zugehörige Fördergasmenge gewonnen.

Der Gesamt-Druckverlust Δp_{to} (*engl. total*) einer Förderanlage setzt sich aus den in Bild 7 und 8 dargestellten Druckverlusttermen zusammen:

- $\Delta p_{F,ges}$ = Druckverlust durch Fördergas (engl: Fluid)
- Δp_{ac} = Druckverlust durch Feststoffbeschleunigung (engl: acceleration)
- Δp_{ve} = vertikaler Druckverlust durch Feststoffreibung (engl: vertical)
- Δp_{fi} = Druckverlust durch Einbauten (Weiche, Klappe, etc.) (engl: fitting)
- Δp_{ho} = horizontaler Druckverlust durch Feststoffreibung (engl: horizontal)
- Δp_{be} = Druckverlust durch Feststoffumlenkung (engl: bend)

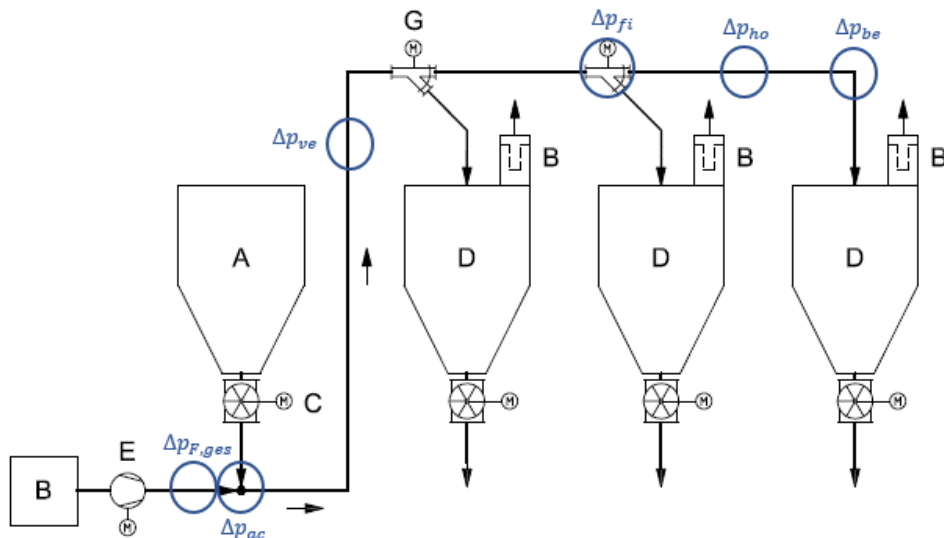


Bild 7: Aufbau und Druckverluste einer pneumatischen Druckförderung (mit A: Startsilos, B: Filter, C: Einschleusorgan, D: Empfangssilos, E: Druckerzeuger, G: Förderleitungsweiche)

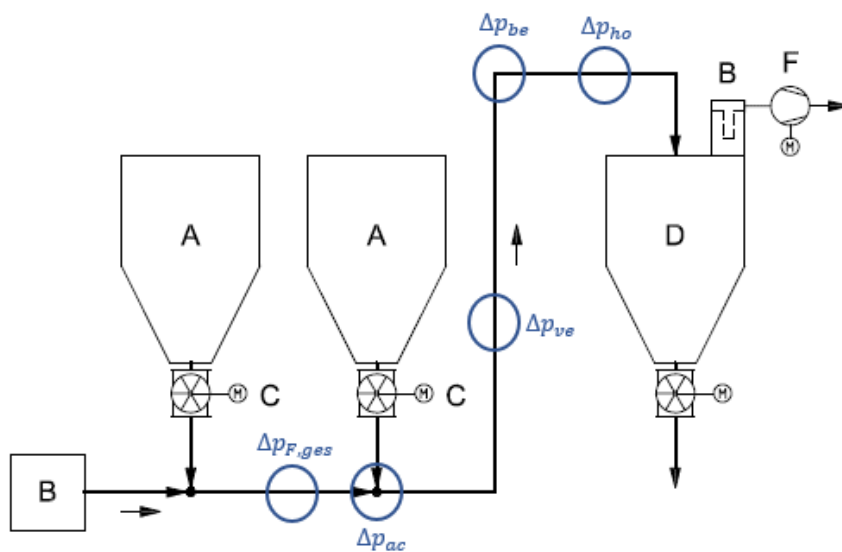


Bild 8: Aufbau und Druckverluste einer pneumatischen Saugförderung (mit A: Startsilos, B: Filter, C: Einschleusorgan, D: Empfangssilos, F: Sauggebläse)

Der Gesamtdruckverlust ergibt sich daraus zu:

$$\Delta p_{to} = \Delta p_{F,ges} + \Delta p_{ac} + \Delta p_{ve} + \Delta p_{fi} + \Delta p_{ho} + \Delta p_{be} \quad (1)$$

Der Druckverlust durch Einbauten Δp_{fi} ist abhängig von der Geometrie der Einbauten. Vergleichbar zur Einphasenströmung gibt es für Einbauten spezifische Widerstandsbeiwerte λ_{fi} , die zusätzlich schüttgutabhängig sind.

$$\Delta p_{fi} = \sum_k \lambda_{fi} \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot v_F^2 \quad (2)$$

k stellt dabei die Summe der Widerstände dar.

Als erstes wird im Nachfolgenden der Druckverlust der Einphasenströmung der Gasströmung $\Delta p_{F,ges}$ hergeleitet. Anschließend werden die Druckverluste der weiteren Terme erarbeitet. Es wird angenommen, dass die Gasströmung inkompressibel ist und unbeeinflusst von der gleichzeitig vorhandenen Schüttgutströmung bleibt.

3.3.1 Druckverlustberechnung der Gasphase

Der Druckverlust der Gasphase $\Delta p_{F,ges}$ mit der Rohrwand wird über die Wandschubspannungen erzeugt. Diese kann mit Hilfe der Impulsbilanz hergeleitet werden:

$$-\dot{m}_F \cdot dv_F = A_R \cdot dp_F - F_{F,R} \quad (3)$$

Die Impulsstromänderung in der vorstehenden Gleichung beschreibt die augenblickliche Beschleunigung der betrachteten Masse. Bei Vernachlässigung dieses Terms wird eine inkompressible Strömung vorausgesetzt und die Bilanzen dürfen nur über kurze Längen dL , in den die Geschwindigkeitsänderungen entsprechend klein sind, gelöst werden. Somit ergibt sich die Widerstandskraft $F_{F,R}$ für den inkompressiblen Fall zu:

$$F_{F,R} = A_R \cdot dp_F = \frac{\pi}{4} \cdot d_R^2 \cdot dp_F \quad (4)$$

Die Widerstandskraft $F_{F,R}$ entsteht durch die Reibkraft, hervorgerufen durch die Wandschubspannung $\tau_{F,R}$:

$$F_{F,R} = \tau_{F,R} \cdot A = \tau_{F,R} \cdot \pi \cdot d_R \cdot L_R \quad (5)$$

Mit der Wandschubspannung $\tau_{F,R}$:

$$\tau_{F,R} = \lambda_W \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot v_F^2 \quad (6)$$

Der Rohrreibungsbeiwert λ_F ist dabei definitionsgemäß:

$$\lambda_F = 4 \cdot \lambda_W \quad (7)$$

Nun werden die Gleichungen zusammengeführt, umgestellt und aufgelöst:

$$dp_F = \lambda_F \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot v_F^2 \cdot \frac{L_R}{d_R} \quad (8)$$

Da das Schüttgut einen Teil des Bilanzraumes einnimmt, ist die Gl. (8) durch den Volumenanteil des Fördergases zu erweitern:

$$-dp_F = \varepsilon_F \cdot \lambda_F \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot v_F^2 \cdot \frac{L_R}{d_R} \quad (9)$$

Als Unbekannte verbleibt der Rohrreibungsbeiwert λ_F . Blasius [8] gibt für den Widerstandsbeiwert für glatte Rohre die Gl. (38) an:

$$\lambda_F = 0,0054 + \frac{0,3964}{Re^{0,3}} \quad (10)$$

Mit Hilfe der Gl. (9) kann somit der Druckverlust hydraulisch glatter Rohre berechnet werden. Der Gültigkeitsbereich der Gleichung deckt mit $2 \cdot 10^4 \leq Re \leq 2 \cdot 10^6$ den gesamten Bereich der pneumatischen Förderung ab.

Über das Moody-Diagramm [9] in Bild 9 besteht zusätzlich die Möglichkeit den Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit der Rohrrauigkeit k_s zu bestimmen.

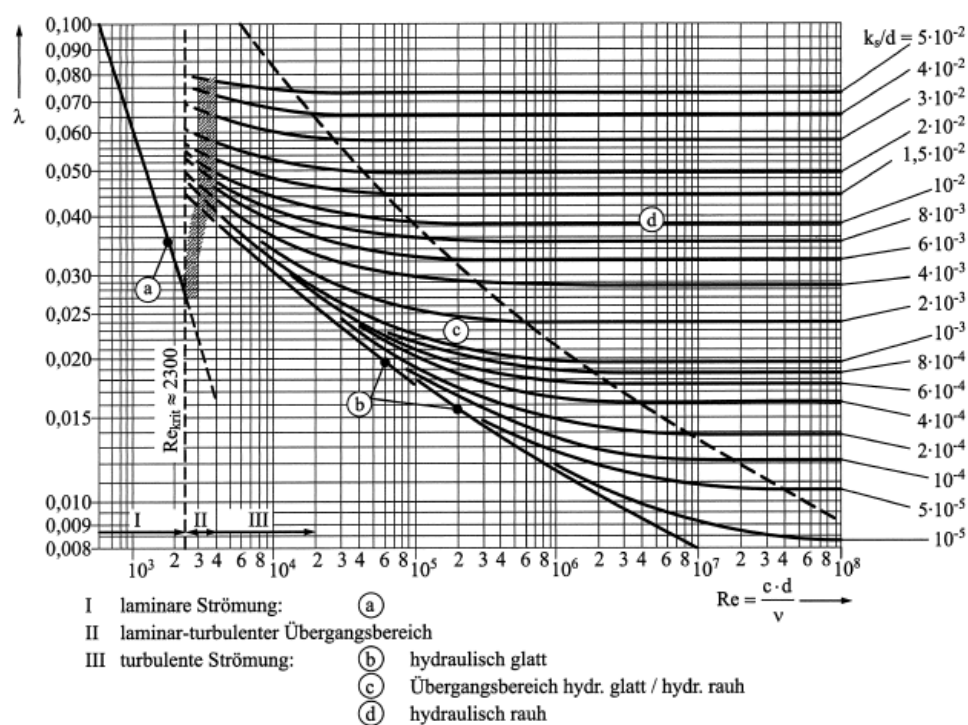


Bild 9: Moody-Diagramm für technisch raue gerade Rohre [9]

Bei der Berechnung der Druckdifferenz in komplexen Rohrleitungen müssen außer den Verlusten in den geraden Rohrstrecken auch diejenigen, die aus Einbauten, Querschnittsänderungen und Umlenkungen sowie die, die aus der Gasexpansion entstehen, berücksichtigt werden. In der Praxis hängt der Widerstandsbeiwert λ_{fi} allein von der Geometrie ab und ist im voll turbulenten Bereich weitestgehend unabhängig von der Reynoldszahl. Um den Gesamtwiderstand eines Rohrleitungssystems zu berechnen, werden sämtliche Teilwiderstände in einer Rohrleitung addiert [11]:

$$-\Delta p_{F,ges} = \sum_i \left(\varepsilon_F \cdot \lambda_F \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot v_F^2 \cdot \frac{L_F}{d_F} \right) + \sum_j \left(\lambda_{f,i} \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot v_F^2 \right) \quad (11)$$

i stellt dabei die Summe der Rohrelemente da, j die der zusätzlichen Widerstände.

3.3.2 Druckverlustberechnung der Feststoffbeschleunigung

Wird das Schüttgut über das Einschleusorgan (Zellenradschleuse, Schneckenpumpe, Klappe, Airlift, Düsenförderer oder Druckgefäß) in die Förderleitung gegeben, muss es beschleunigt werden. In der Regel ist die Startgeschwindigkeit des Schüttgutes nahezu 0, die Beschleunigungsendgeschwindigkeit ist immer kleiner als die Fördergasgeschwindigkeit. Das sich im stationären Zustand einstellende Geschwindigkeitsverhältnis ist der sogenannte Schlupf c_{SL} :

$$c_{SL} = \frac{v_S}{v_F} \quad (12)$$

Für den Schlupf feinkörniger Schüttgüter gibt Hilgraf [5] folgende Gleichungen an:

$$c_{SL} = 1 - \frac{w_{Tr}}{v_F} \quad (13)$$

$$\text{mit: } w_{Tr} = 2,28 \cdot \frac{\eta_F}{d_S \cdot \rho_F} \cdot Ar^{0,419} \quad (14)$$

und der Archimedes-Zahl:

$$Ar = \frac{d_{S,50}^3 \cdot g}{\eta_F^2} \cdot \rho_F \cdot (\rho_P - \rho_F) \quad (15)$$

Weitere Berechnungsansätze für den Schlupf finden sich in [16].

Für die Beschleunigung des Schüttgutes in einer Phase folgt:

$$-\dot{m}_S \cdot dv_S = A_R \cdot dp_{ac} \quad (16)$$

Zu eindeutigeren Darstellung des Druckverlustes wird die Beladung μ eingeführt. Sie stellt das Verhältnis des Schüttgutmassenstromes $\dot{m}_S$ zum Fördergasmassenstrom $\dot{m}_F$ dar. Der Vorteil der Beladung μ ist, dass sie Druck- und Temperatur unabhängig und entlang der gesamten Förderstrecke L_R konstant ist:

$$\mu = \frac{\dot{m}_S}{\dot{m}_F} = \frac{\dot{V}_S \cdot \rho_S}{\dot{V}_F \cdot \rho_F} = \frac{(1-\varepsilon_F) \cdot v_S \cdot \rho_S \cdot A_R}{\varepsilon_F \cdot v_F \cdot \rho_F \cdot A_R} \quad (17)$$

Die Änderung der wahren Geschwindigkeit v_S der Gl. (16) beträgt:

$$\Delta v_S = v_{S,in} - v_{S,out} = v_{S,in} - 0 = \frac{v_{S,in}}{v_{F,in}} \cdot v_{F,in} = c_{SL} \cdot v_{F,in} \quad (18)$$

Eine Zusammenführung der Gl. (16-18) bringt die klassische Darstellung des Beschleunigungsdruckverlustes:

$$\Delta p_{ac} \cdot A_R = -\varepsilon_F \cdot c_{SL} \cdot v_F \cdot \mu \cdot v_F \cdot \rho_F \cdot A_R \quad (19)$$

$$\Delta p_{ac} = -\varepsilon_F \cdot c_{SL} \cdot \mu \cdot \rho_F \cdot v_{F,in}^2 \quad (20)$$

Aufgrund dessen, dass $\varepsilon_F \gg \varepsilon_S$ ist, geht $\varepsilon_F \rightarrow 1$ und Gl. (20) kann, wie in der Literatur üblich, wie folgt geschrieben werden:

$$-dp_{ac} = c_s \cdot \mu \cdot \rho_F \cdot v_{F,in}^2 \quad (21)$$

3.3.3 Druckverlustberechnung der Feststoffumlenkung [5]

In einem Rohrbogen kommt es aufgrund der Partikelträgheit und der an der Partikel wirkenden Zentrifugalkraft zu einer Entmischung der Gasphase und der Feststoffphase. Das Schüttgut wird durch die Wandreibung abgebremst und muss nach dem Bogen wiederbeschleunigt werden. Somit ist der Druckverlust, der durch eine Umlenkung Δp_{be} erzeugt wird, der Druckverlust, der für die Wiederbeschleunigung benötigt wird. Es werden die Gl. (16-18) wiederverwendet und adaptiert.

$$-\dot{m}_S \cdot dv_S = A_R \cdot dp_{be} \quad (22)$$

$$\text{mit: } \Delta v_S = v_{S,in} - v_{S,out} = \frac{\Delta v_S}{v_{S,in}} \cdot v_{S,in}$$

$$\text{folgt: } -\Delta p_{be} = \varepsilon_F \cdot \mu \cdot v_F \cdot \rho_F \cdot (v_{S,out} - v_{S,in}) \quad (23)$$

Weitere Ansätze zum Druckverlust für Feststoffumlenkungen sowie Ansätze, die die Lage und Ausrichtung von Bögen berücksichtigen, finden sich in [11, 12, 19 - 24].

3.3.4 Druckverlustberechnung der horizontalen Schüttgutströmung

Der Druckverlustterm der horizontalen Strömung wird in Anlehnung an Hilgraf [5] hergeleitet. Er führt zu einer Darstellung die bereits Gasterstädt 1924 [35] analog zum Berechnungsansatz für den Druckverlust der unbeladenen Rohrströmung vorstellt.

Die Impulsbilanz der Mehrphasenströmung kann unter Voraussetzung einer inkompressiblen pneumatischen Förderung im stationären Zustand wie folgt vereinfacht dargestellt werden:

$$-dp_{S,ho} = (1 - \varepsilon_F) \cdot \frac{F_{R,S}}{A_R} \quad (24)$$

Der Widerstand des Feststoffes $F_{S,R}$ wird bei der Flugförderung primär durch die Partikel-/Wandkontakte hervorgerufen. Zur Darstellung des Druckverlustes wird der Widerstandsbeiwert λ_S^* eingeführt, er stellt die Reibung in Form von Stoßverlusten zwischen dem Schüttgut und der Rohrwand da. Analog Gl. (9) kann der Druckverlust für die Schüttgutphase erarbeitet werden:

$$-dp_{S,ho} = (1 - \varepsilon_F) \cdot \lambda_S^* \cdot \frac{\rho_S}{2} \cdot v_S^2 \cdot \frac{dL_R}{dR} = \frac{dm_S}{A_R} \cdot \lambda_S^* \cdot \frac{v_S^2}{2 \cdot d_R} \quad (25)$$

Mit abnehmender Geschwindigkeit fällt das Schüttgut aus der Gasphase aus und sammelt sich am Rohrboden, wo es als Strähne mit verlangsamter Geschwindigkeit transportiert wird. Ist die Geschwindigkeit so gering, dass keine Partikel in der Flugphase strömen, entsteht der Druckverlust, hervorgerufen durch das Schüttgut, ausschließlich durch die Gleitreibung des Schüttgutes am Rohrboden. Der Feststoffwiderstand ist somit das Produkt aus reibender Masse m_S , der Gewichtskraft g und dem Reibbeiwert β_R :

$$F_{ho,S} = dm_S \cdot g \cdot \beta_R = (dV_{S,R} \cdot \rho_P) \cdot g \cdot \beta_R = (dL_R \cdot (1 - \varepsilon_F) \cdot A_{S,R} \cdot \rho_P) \cdot g \cdot \beta_R \quad (26)$$

Hierbei ist zu beachten, dass $A_{S,R}$ die Fläche des Rohrquerschnittes ist, den das Schüttgut abdeckt.

In der Praxis überlagern sich beide Strömungsformen, die der Flugförderung Gl. (25) und die der reinen Strähnenförderung Gl. (26), und somit beide Widerstände. Somit können die Gl. (25) und Gl. (26) zusammengeführt werden. Zur besseren Nutzbarkeit der resultierenden Gleichung wird die Schüttgutmasse m_S wie folgt ersetzt:

$$dm_S = \dot{m}_S \cdot dt = \frac{\dot{m}_S \cdot dL_R}{v_S} \quad (27)$$

Daraus folgt:

$$-dp_{ho,S} = \frac{\dot{m}_S \cdot dL_R}{v_S \cdot A_R} \cdot \left(\lambda_S^* \frac{v_S^2}{2 \cdot d_R} + g \cdot \beta_R \right) \quad (28)$$

Die übliche Darstellungsform des horizontalen Schüttgutdruckverlustes $dp_{ho,S}$ wird erzielt, wenn die Beladung μ , der Schlupf c_{SL} und die Rohr-Froude-Zahl Fr_R in (28) eingesetzt werden. Die Froude-Zahl Fr_R ist definiert zu:

$$Fr_R = \frac{v_F^2}{g \cdot d_R} \quad (29)$$

Es folgt:

$$-dp_{ho,S} = \varepsilon_F \cdot \mu \cdot \lambda_S \cdot \frac{dL_R}{d_R} \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot v_F^2 \quad (30)$$

mit dem Gesamt-Widerstandsbeiwert λ_S nach [43]:

$$\lambda_S = c_{SL} \cdot \lambda_S^* + \frac{2 \cdot \beta_R}{c_{SL} \cdot Fr_R} \quad (31)$$

Der Reibbeiwert β_R kann dabei folgende Werte annehmen [5]:

Flugförderung:	$\beta_R = \frac{w_S}{v_F}$, mit der Sinkgeschwindigkeit w_S
Strähnenförderung:	$\beta_R = \tan \varphi_W$, mit dem Wandreibungswinkel φ_W
Pfropfenförderung:	$\beta_R = \kappa \cdot \tan \varphi_W$, mit $\kappa > 1$ als Verstärkungsfaktor, hervorgerufen durch Schüttgutverteilungen

Im Bereich der Flugförderung überwiegt Gl. (25):

$(c_{SL} \cdot \lambda_S^*) \gg \frac{2 \cdot \beta_R}{c_{SL} \cdot Fr_R}$, hieraus folgt das $\lambda_S \cong konst.$ ist. Der Druckverlust ist somit proportional zur Massenträgheitskraft.

Im Bereich der Dichtstromförderung überwiegt Gl. (26):

$\frac{2 \cdot \beta_R}{c_{SL} \cdot Fr_R} \gg (c_{SL} \cdot \lambda_S^*)$, hieraus folgt das $\lambda_S \cong \frac{1}{Fr_R}$ ist. Der Druckverlust ist somit proportional zur Gewichtskraft.

Neben dem aus der Kräftebilanz heraus gewonnenen Ansatz zur Berechnung des horizontalen Druckverlustes $dp_{ho,s}$ gibt es weitere, meist schüttgutspezifische empirische Ansätze zur Ermittlung des horizontalen Druckverlustterms [16, 17, 25 - 31], wobei diese i.A. auf einem λ_S – Wert entsprechend basieren.

Der λ_S wird durch eine große Anzahl Schüttgut- und anlagenspezifischer Kenngrößen beeinflusst. Empirische Ansätze berücksichtigen die Beladung μ , den Partikeldurchmesser $d_{S,50}$ sowie die Froude-Zahl Fr . Die Korngrößenverteilung; die Paarung Wandwerkstoff / Schüttgut oder die Partikelform werden in der Regel nicht berücksichtigt. In der Literatur [11, 13, 14, 15, 18, 19] verfügbare Werte sind Schüttgut spezifisch und nicht allgemeingültig anzuwenden. [10] gibt für feinkörnige Schüttgüter ($d_{S,50} < 150 \mu m$) für den λ_S die folgende Gleichung an:

$$\lambda_S = 2,1 \cdot \frac{Fr_P^{0,25}}{Fr_R} \cdot \frac{1}{\mu^{0,3}} \cdot \left(\frac{d_R}{d_{S,50}} \right)^{0,1} \quad (32)$$

Die von Stegmaier [26] verwendeten Froude-Zahlen sind genau zu betrachten. Es werden die Partikel-Froude-Zahl Fr_P , sowie die Rohr-Froude-Zahl Fr_R angewendet. Der kennzeichnende Durchmesser der Partikel-Froude-Zahl ist der mittlere Partikeldurchmesser $d_{S,50}$. Die zugehörige Geschwindigkeit ist die Sinkgeschwindigkeit der Einzelpartikel. Es ist zu beachten, dass die Streuung der Messwerte um die Ausgleichsgerade sehr hoch ist [33]. **Bild 10 zeigt die von Stegmaier veröffentlichten Messergebnisse und deren Lage im Messwertefeld. Zur genauen Bestimmung des Widerstandswertes sind Förderversuche in Versuchsanlagen notwendig. Die von Stegmaier bereitgestellte Gleichung (32) für den Widerstandsbeiwert ist eine Gleichung mit nicht geringer Streuung. Wird dieser Berechnungsansatz angewandt, so sind ausreichend Zuschläge bei den Berechnungsergebnissen zu berücksichtigen.**

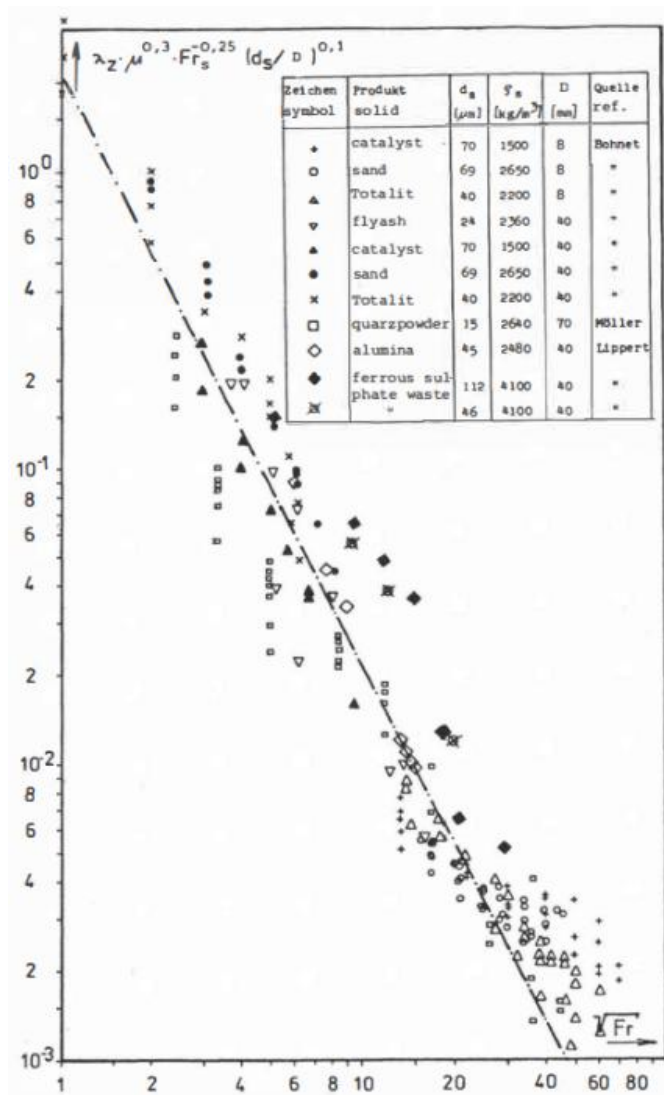


Bild 10: Widerstandsbeiwerte nach Stegmaier für feinkörnige Produkte [10, 33]

Bild 11 zeigt beispielhaft die Widerstandsbeiwerte zweier Polystyrol-Granulate, die über der Froude-Zahl Fr_R aufgetragen sind. Es ist ersichtlich, dass der Widerstandsbeiwert λ_s keine Konstante ist und in Abhängigkeit weiterer Faktoren steht. Bild 11 zeigt die Abhängigkeit von der Beladung μ und vom Rohrdurchmesser d_R .

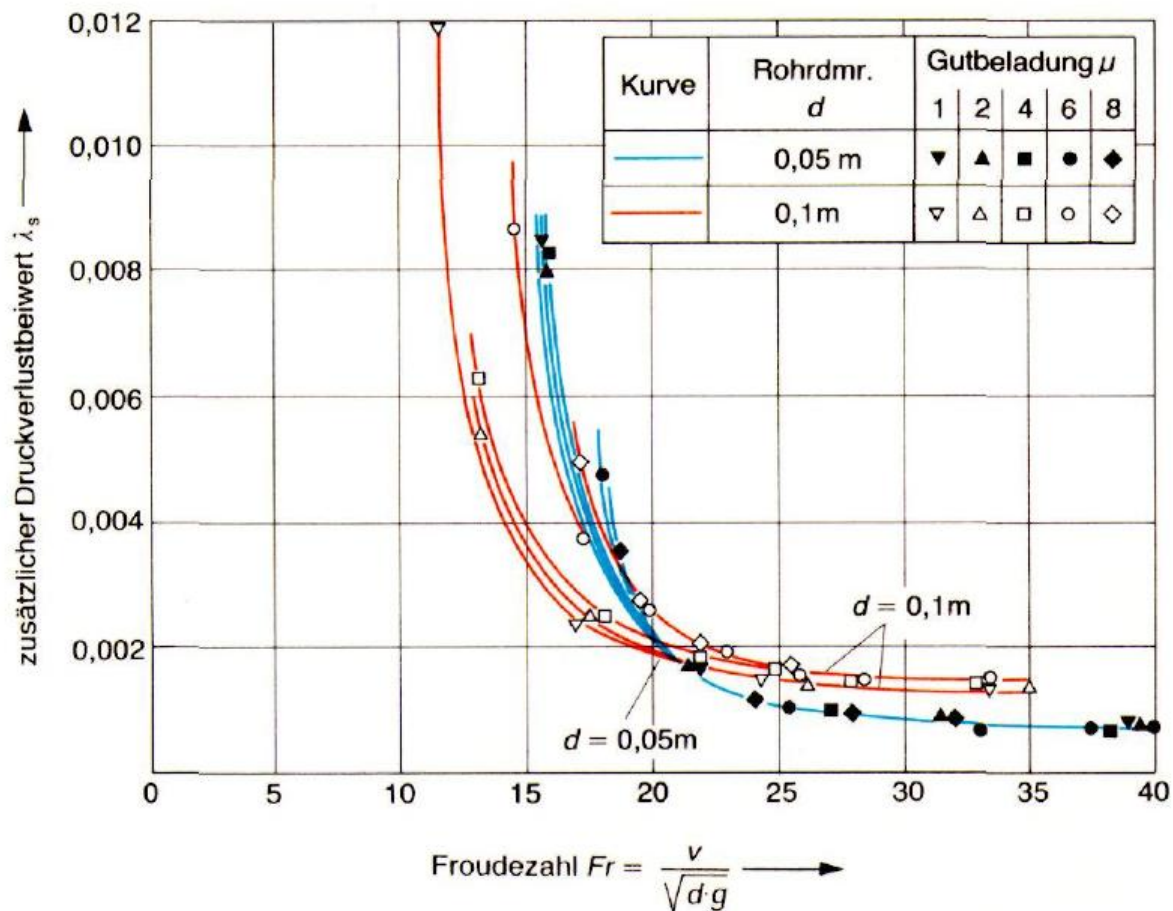


Bild 11: Abhängigkeit des Druckverlustbeiwertes von der Froude-Zahl bei der waagerechten Förderung von zwei Polystyrol-Granulaten ($d_{50} = 1,27 \text{ mm}, 2,70 \text{ mm}$) in Rohren mit 50 und 100 mm Durchmesser, nach [17, 32]

Siegel [2] hat in seinem Buch Widerstandsbeiwerte auf Basis eigener und fremder Messungen veröffentlicht. Für jedes aufgeführte Schüttgut gibt er einen Widerstandsbeiwert an. Diese Werte gibt er in linearer Abhängigkeit des Rohrdurchmessers an. Die Praxis zeigt jedoch, dass die Widerstandsbeiwerte:

1. nicht konstant sind,
2. in Abhängigkeit der Froude-Zahl stehen,
3. in Abhängigkeit der Beladung stehen,
4. in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers stehen,
5. die Abhängigkeit der Punkte 2-4 exponentiell sein können, somit ist der Exponent 1, den er bei Abhängigkeit zum Rohrdurchmesser gewählt hat primär bei Granulaten anwendbar. Bei feinen Schüttgütern weicht der Exponent von 1 ab.

Dieser Ungenauigkeit der Berechnung muss mit ausreichend Reserven begegnet werden.

3.3.5 Druckverlustberechnung der vertikalen Schüttgutströmung

Der Druckverlust der vertikalen Strömung dp_{ve} setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Erstens, den Druckverlust durch Schüttgut-/Schüttgutkontakte, Schüttgut- und Gaswandreibung und zweitens dem Hubdruckverlust für Schüttgut und Gas, wobei letzterer im Allgemeinen vernachlässigt werden kann. Bild 12 zeigt die Kräftebilanz am vertikalen Rohrelement. Die relevanten Kräfte sind:

- Feststoffreibung: $F_{S,S}$
- Wandreibung: $F_{S,R}$
- Schleppkraft durch Partikelumströmung: $F_{S,W}$
- Druckkräfte: F_P
- Auftriebskraft $F_{S,A}$
- Gewichtskraft $F_{S,G}$

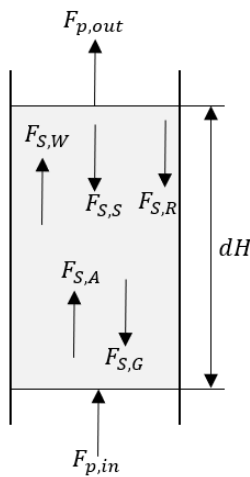


Bild 12: Kräftebilanz an einem vertikalen Rohrleitungselement am Schüttgut

Die Gleitreibung $F_{S,R}$ an der Rohrwand ist vernachlässigbar klein. Die Feststoffreibung $F_{S,W}$ entspricht auf Basis von Messungen [34] im Dichtstrombereich dem 0,45...0,5-fachen der horizontalen Reibung:

$$-dp_{ve,S,W} = (0,45 \dots 0,50) \cdot \varepsilon_F \cdot \mu \cdot \lambda_{S,ve} \cdot \frac{dH_R}{d_R} \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot v_F^2 \quad (33)$$

Für die Hubarbeit muss, die im vertikalen Abschnitt befindliche Schüttgutmasse von der Druckdifferenz getragen werden. Unter Verwendung der Gl. (12) und Gl. (27) folgt aus der Kräftebilanz der vertikale Druckverlust:

$$-dp_{S,ve,Hub} = \varepsilon_F \cdot g \cdot \mu \cdot \rho_F \cdot \frac{dH_R}{c_{SL}} \quad (34)$$

Für den gesamten vertikalen Druckverlust $dp_{S,ve}$ folgt aus der Addition der Gl. (33) und Gl. (34):

$$-dp_{S,ve} = (\varepsilon_F \cdot \mu \cdot \rho_F \cdot dH_R) \cdot \left(\frac{g}{c_{SL}} + (0,45 \dots 0,50) \cdot \frac{\lambda_S}{d_R} \cdot \frac{v_F^2}{2} \right) \quad (35)$$

Weitere Berechnungsansätze für den vertikalen Druckverlust oder für den Widerstandsbeiwert, in der Regel Schüttgut spezifisch, finden sich in [36 - 41].

3.3.6 Zusammenfassung aller Druckverlustterme

Die einzelnen Terme können entsprechend Tabelle 1 bestimmt werden:

Benennung	Gleichung
Gesamt-Druckverlust	$-\Delta p_{ges} = \Delta p_{F,ges} + \Delta p_{ac} + \Delta p_{ve} + \Delta p_{fi} + \Delta p_{ho} + \Delta p_{be}$
Druckverlust Fördergas	$-\Delta p_{F,ges} = \sum_i \left(\varepsilon_F \cdot \lambda_F \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot v_F^2 \cdot \frac{L_R}{d_R} \right) + \sum_j \left(\lambda_E \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot v_F^2 \right) + \Delta p_{F,ac} (\approx 0) + \Delta p_{F,ve} (\approx 0)$
Druckverlust Feststoffbeschleunigung	$-\Delta p_{ac} = \varepsilon_F \cdot c_{SL} \cdot \mu \cdot \rho_F \cdot v_F^2$
Vertikaler Feststoff-Druckverlust	$-\Delta p_{ve} = (\varepsilon_F \cdot \mu \cdot \rho_F \cdot H_R) \cdot \left(\frac{g}{c_{SL}} + (0,45 \dots 0,50) \cdot \frac{\lambda_S}{d_R} \cdot \frac{v_F^2}{2} \right)$
Feststoffdruckverlust durch Einbauten	$-\Delta p_{fi} = \sum_k \lambda_{fi} \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot v_F^2$
Horizontaler Feststoffdruckverlust	$-\Delta p_{ho} = \varepsilon_F \cdot \mu \cdot \lambda_S \cdot \frac{L_R}{d_R} \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot v_F^2$ (λ_S ist auf Basis praktischer Versuche zu ermitteln)
Druckverlust durch Feststoffumlenkung	$-\Delta p_{be} = (1 - \varepsilon_F) \cdot \mu \cdot v_F \cdot \rho_F \cdot (v_{s,out} - v_{s,in})$
Beladung	$\mu = \frac{\dot{m}_S}{\dot{m}_F} = \frac{\dot{V}_S \cdot \rho_S}{\dot{V}_F \cdot \rho_F} = \frac{(1 - \varepsilon_F) \cdot v_S \cdot \rho_S \cdot A_R}{\varepsilon_F \cdot v_F \cdot \rho_F \cdot A_R}$
Schlupf	$c_{SL} = \frac{v_S}{v_F} = 1 - \frac{w_{Tr}}{v_F}$ $w_{Tr} = 2,28 \cdot \frac{\eta_F}{d_S \cdot \rho_F} \cdot Ar^{0,419}$ $Ar = \frac{d_{S,50}^3 \cdot g}{\eta_F^2} \cdot \rho_F \cdot (\rho_P - \rho_F)$
Volumenanteil	$1 = \varepsilon_F + \varepsilon_S$

Tabelle 1: Druckverlustterme einer pneumatischen Förderung

Experimentelle Untersuchungen sind notwendig, da der Widerstandsbeiwert λ_S nicht auf Basis von mechanischen Schüttgutuntersuchungen, wie z.B. Schüttdichte, Partikeldichte, Korngrößenverteilung, bestimmbar ist. Ähnlich verhält es sich mit der minimalen Fördergasanfangsgeschwindigkeit. Sie muss in Förderversuchen bestimmt werden, um eine Rohrleitungsverstopfung zu vermeiden.

4 Inhalt der VT - Toolbox

Die Toolbox beinhaltet primär die Auslegung kontinuierlicher pneumatischer Förderungen. Die Einschleusorgane, wie Druckgefäße, Düsenförderer oder Schneckenpumpen werden mit der Toolbox nicht dimensioniert. Im Bereich der pneumatischen Förderung stehen folgende Programme zur Verfügung:

- Dichtstromförderung von Kunststoffgranulat nach Muschelknautz und Krambock [2]
- Flug- / Strähnenförderung auf Basis der Widerstandsbeiwerte von Siegel [3]
- Flug- / Strähnenförderung auf Basis der Widerstandsbeiwertgleichung von Stegmaier für feine Schüttgüter ($d_{s,50} < 150 \mu\text{m}$) [4]
- Flug- / Strähnenförderung auf Basis des Scale-Up Models von Hilgraf [46]
- Saugförderung: Flugförderung auf Basis der Widerstandsbeiwerte von Siegel [3]
- Saugförderung: Flugförderung auf Basis der Widerstandsbeiwertgleichung von Stegmaier für feine Schüttgüter ($d_{s,50} < 150 \mu\text{m}$) [4]

Neben den Berechnungsansätzen der pneumatischen Förderung beinhaltet die VT-Toolbox folgende Module, die das tägliche Arbeiten erleichtern soll:

- Wärmeausdehnung von Rohrleitungen
- Geschwindigkeiten in Rohrleitungen
- Umrechnung von Geschwindigkeiten und Volumenströmen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur
- Partikel-Sinkgeschwindigkeit
- Rohrtabelle nach DIN 10220, geschweißt (Ersatz für DIN 2458)
- Lockerungspunktgeschwindigkeit
- Entscheidungsmatrix für den Schüttguttransport
- Zellenradschleusenauslegung nach ISO 3922
- Druckverlustberechnung von Luftleitungen
- Geldart-Diagramm

5 Bedienung der Toolbox (Pneumatische Förderung)

5.1 Eingabe des Förderleitungsverlaufes

Bei allen pneumatischen Berechnungsmodulen ist die Eingabe des Förderleitungsverlaufes identisch. Unterhalb des Eingabebereiches der Anlagendaten sind die Daten zum Rohrleitungsverlauf einzutragen. Die Rohrleitung wird in folgende Bereiche unterteilt:

- Horizontale Länge [m]
- Vertikale Höhe [m]
- 90° Bogen [-]

Schräge Leitungsverläufe (Steigungswinkel $> 5^\circ$) sind nicht zulässig.

Negative vertikale Förderungen (z.B. von Übertage nach Untertage) können mit dem Programm nicht berechnet werden. Eine negative Höheneingabe ist nicht zulässig. Kurze negative Förderleitungen sind als Hubstrecken einzugeben. Der energetische Druckrückgewinn ist erst ab Beladungen > 35 und mehreren hundert Metern nennenswert relevant.

Das Programm gibt die Möglichkeit bis zu 30 Rohrleitungsabschnitte zu nutzen (Bild 14). Die Anlage muss nicht auf 30 Teilabschnitte aufgeteilt werden. Es müssen somit nicht alle 30 Abschnitte ausgefüllt werden. Dort wo kein Wert eingetragen wird, ist eine 0 „Null“ einzutragen oder kein Wert einzutragen.

Pro Abschnitt sollte entweder eine horizontale Länge, eine vertikale Höhe oder ein 90° Bogen eingetragen werden. Dieses erhöht die Berechnungsgenauigkeit. Es sollten in einem Abschnitt somit nicht mehrere Eingaben getätigt werden. Dieses ist möglich, reduziert jedoch geringfügig die Berechnungsgenauigkeit.

Bei den Bögen können von „1“ abweichende Werte eingegeben werden. Ein 45° Bogen kann somit mit dem Wert 0,5 eingetragen werden, ein 30° Bogen mit dem Wert $1/3$.

Bei den pneumatischen Förderungen, die im Überdruck betrieben werden, hat die Eingabe des Rohrleitungsverlaufes von hinten nach vorne zu erfolgen. Somit ist in der ersten Zeile der letzte Rohrleitungsabschnitt einer Förderleitung einzutragen.

Bei den Saugförderberechnungen ist in der ersten Zeile der Anfang der Förderleitung einzutragen, somit andersherum als bei der Druckförderung. Der Grund liegt in dem Berechnungsablauf.

Es empfiehlt sich die horizontalen und vertikalen Längen mit max. 10 m pro Abschnitt einzutragen. Dieses erhöht die Berechnungsgenauigkeit.

Die lichte Länge des Bogens ist in den horizontalen und vertikalen Längen zu berücksichtigen.

Bei den Druckförderanlagen nach Siegel, Hilgraf und Stegmeier ist die Berechnung einer gestaffelten Rohrleitung möglich. Der Rohrdurchmesser ist hier, entgegen den anderen Berechnungsansätzen, im Bereich der Rohrleitungsabschnitte einzutragen. Somit ist für jeden Berechnungsabschnitt der Rohrlungsdurchmesser anzugeben. Werden Rohrdurchmessersprünge (Staffelung) eingetragen, so prüft das Programm diese auf Sinnhaftigkeit.

In den oben genannten Berechnungsansätzen wird ebenfalls eine Überprüfung der Stopfgrenze durchgeführt. Da diese vom Rohrdurchmesser abhängt, wird sie pro Rohrleitungsabschnitt geprüft (siehe Bild 13). Das Prüfungsergebnis wird durch eine rote (Rohrleitungsstaffelung ungültig) und grüne (Rohrleitungsstaffelung gültig) Zellfarbe dargestellt. Beim Ansatz nach Stegmaier wird neben der Stopfgrenze auch ein Beladungsgrenzfaktor berechnet. Übersteigt die Beladung einen oberen Grenzwert, so wird dieses ebenfalls durch eine rote Zellfarbe dargestellt.

Abschnitt	Horizontale Länge [m]	Vertikale Höhe [m]	Anzahl 90° [-]	Rohrinnen- durchmesser [m]	Staffel- prüfung [-]	örtlicher Druck [Pa]	örtliche Geschwindig- keit [m/s]	örtliche Dichte [kg/m³]	Stopfgrenze [m/s]
Förderleitungsende	0	0	0	0.150		101325	24.00	1.205	11.84
Abschnitt 1			1	0.150	1.00	101325	24.00	1.205	11.84
Abschnitt 2	5			0.150	1.00	101589	23.94	1.208	11.84
Abschnitt 3			1	0.150	1.00	102224	23.79	1.216	11.83
Abschnitt 4		9		0.150	1.00	102486	23.73	1.219	11.83
Abschnitt 5		9		0.150	1.00	102667	23.69	1.221	11.83
Abschnitt 6			1	0.150	1.00	102849	23.64	1.223	11.83
Abschnitt 7	10			0.150	1.00	103109	23.58	1.226	11.82
Abschnitt 8	10			0.150	1.00	104380	23.30	1.241	11.81
Abschnitt 9	10			0.150	1.00	105651	23.02	1.257	11.80
Abschnitt 10	10			0.150	1.00	106921	22.74	1.272	11.78
Abschnitt 11	10			0.150	1.00	108192	22.48	1.287	11.77
Abschnitt 12	10			0.150	1.00	109463	22.22	1.302	11.76
Abschnitt 13	10			0.150	1.00	110734	21.96	1.317	11.75
Abschnitt 14	10			0.150	1.00	112004	21.71	1.332	11.73
Abschnitt 15	10			0.150	1.00	113275	21.47	1.347	11.72
Abschnitt 16	10			0.150	1.00	114546	21.23	1.362	11.71
Abschnitt 17			1	0.150	1.00	115816	21.00	1.377	11.70
Abschnitt 18		6		0.150	1.00	116047	20.96	1.380	11.70
Abschnitt 19			1	0.150	1.00	116182	20.93	1.382	11.70
Abschnitt 20	6			0.150	1.00	116412	20.89	1.385	11.69
Abschnitt 21				0.150	1.00	117175	20.75	1.394	11.69
Abschnitt 22				0.150	1.00	117175	20.75	1.394	11.69

Bild 13: Eingabe des Förderleitungsverlaufes

Bild 14 zeigt einen beispielhaften Rohrleitungsverlauf, so wie in Bild 13 eingetragen.

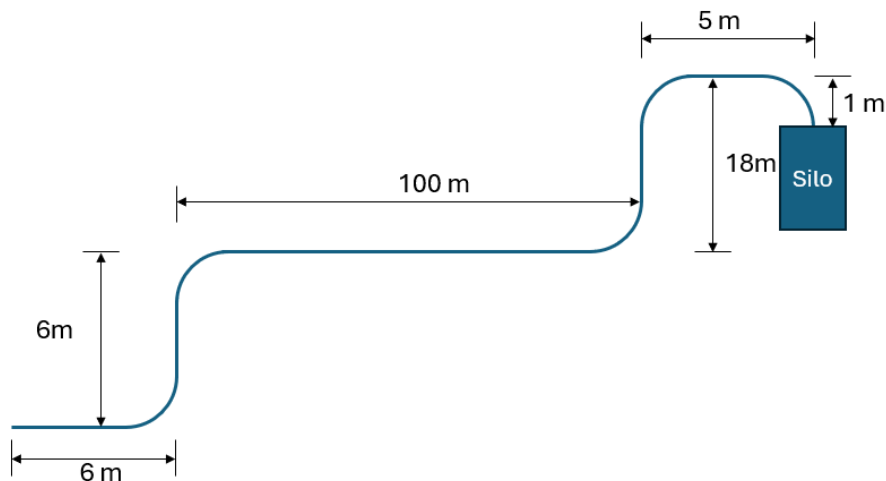


Bild 14: Beispielhafter Rohrleitungsverlauf

Am Ende der Tabelle werden die horizontalen Abschnitte, die vertikalen Abschnitte und die Anzahl der äquivalenten 90° Bögen addiert. Dieses dient zur Kontrolle der Eingabe.

5.2 Dichtstromförderung von Kunststoffgranulat nach Muschelknautz und Krambock

Die Dimensionierung der Dichtstromförderung von Kunststoffgranulat wird nach [2] berechnet. Bei dieser Förderung werden Pfropfen durch die Rohrleitung gefördert. Diese Pfropfen entsprechend Bild 6 Modus F nehmen an der Pfropfenfront im Rohr liegendes Granulat auf und geben es am Ende des Pfropfens ab, so dass immer ein Bodenbelag in unterschiedlicher Stärke auf dem Rohrboden verweilt. Bild 15 zeigt solch eine Förderung. Quelle [44] zeigt ein Video zu den Strömungsformen anhand von Kunststoffgranulat. **Der Berechnungsansatz ist nur für trockenes, nicht klebriges, reines Kunststoffgranulat ohne Feinanteil gültig.**

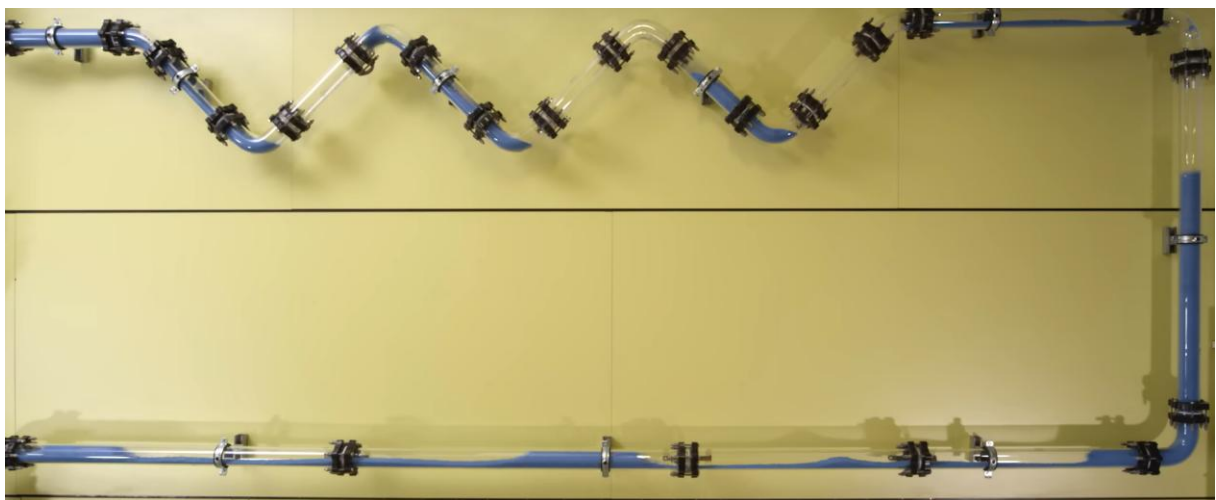


Bild 15: Dichtstromförderung von Kunststoffgranulat der Firma Coperion GmbH [44]

5.2.1 Einsatzgrenzen des Programmes

Neben dem im weiteren aufgeführten Grenzen sollte das Programm innerhalb der folgenden Grenzen betrieben werden:

Gesamtdruckverlust: $\leq 6 \text{ bar(ü)}$

Förderleitungsdurchmesser: $\leq \text{DN200}$

5.2.2 Eingabe der Schüttgutdaten

Für die Durchführung der Berechnung einer Dichtstromförderung nach [2] sind neben dem Förderleitungsverlauf folgende zusätzliche Daten notwendig:

- **Minimale Schüttguttemperatur:** Da die Berechnung des pneumatischen Transportes auf Basis der Impulsübertragung erfolgt, ist der Massenstrom des Fördergases entscheidend. Der Massenstrom fällt, wenn bei gegebenen Volumenstrom die Dichte fällt. Die Dichte wiederum fällt mit steigender Fördergastemperatur. Wird die Anlage mit einer zu hohen Schüttguttemperatur dimensioniert, so fehlt Impuls bei geringeren Schüttguttemperaturen. Um alle Betriebszustände sicher abzubilden ist die geringste Schüttguttemperatur im bestimmungsgemäßen Betrieb zu wählen.
- **Schüttdichte in Anlehnung der DIN ISO 697.** Es gibt nicht die „eine“ Schüttdichte. Je nach Prozess ist eine entsprechende Dichte anzuwenden. Dieses kann die Schüttdichte z.B. nach DIN 51705, DIN ISO 697 oder DIN 66137 sein. Für den pneumatischen Transport kann die locker in einen Behälter mit 1 Liter Volumen gefüllte Schüttgutmasse bezogen auf das Volumen von 1 Liter als Schüttdichte genutzt werden. Beim Einfüllen ist darauf zu achten, dass sich keine Schüttgutbrücken oder Lufteinschlüsse bilden, die die Dichte verfälschen.
- **Fördergasendgeschwindigkeit:** sie ist so zu wählen, dass die Fördergasanfangsgeschwindigkeit, die unter „Berechnungsergebnisse“ (Bild 16) ausgegeben wird, die Bedingung erfüllt $> 2,5 \text{ m/s}$ zu sein. Wird die Bedingung nicht erfüllt, so wird die Berechnung trotzdem durchgeführt, die Zelle wird dann „hellrot“ markiert. **Wird die Anlage mit diesen Parametern gebaut, so wird es zu Verstopfungen der Rohrleitung kommen. Es ist somit nicht zulässig dieses Berechnungsergebnisse zu verwenden. Die Berechnung verlässt ihren Gültigkeitsbereich.**

Ergebnisse		
Δp horizontal:	1.9139	bar
Δp vertikal:	0.4039	bar
Δp Beschleunigung:	0.0033	bar
Δp Luft:	0.0001	bar
Gesamtdruckverlust:	2.3248	bar
Fördergasvolumenstrom:	415	Nm³/h
Feststoffbeladung:	37.27	-
Mischtemperatur:	20.00	°C
Anfangsgeschwindigkeit:	2.13	m/s

Bild 16: Prüfung der Fördergasanfangsgeschwindigkeit unter Berechnungsergebnisse

5.2.3 Eingabe der Anlagendaten

Für die Durchführung der Berechnung einer Dichtstromförderung nach [2] sind neben dem Förderleitungsverlauf und den Schüttgutdaten folgende zusätzliche Daten notwendig (Bild 17):

- Förderrohrinnendurchmesser [mm]
- Anlagenhöhe über Normalnull: Die Anlagenhöhe wirkt auf die Fördergasendgeschwindigkeit. Die durch den Bediener in Kapitel 5.2.2 eingegebene Endgeschwindigkeit wird auf Basis der Anlagenhöhe korrigiert. Mit steigender Anlagenhöhe fällt der Umgebungsdruck und somit die Luftdichte. Da die Berechnung des pneumatischen Transportes auf Basis der Impulsübertragung erfolgt, ist der Massenstrom des Fördergases entscheidend. Der Massenstrom fällt, wenn bei gegebenen Volumenstrom die Dichte fällt. Damit der notwendige Massenstrom eingehalten wird, wird die Fördergasendgeschwindigkeit automatisch korrigiert.
- Massenstrom [kg/h] Schüttgut während der Förderphase
- Fördergastemperatur [°C]: Mit der Fördergastemperatur, der Schüttguttemperatur, dem Massenstrom und der spez. Wärmekapazität wird die Mischtemperatur bestimmt. Damit wird wiederum die Beladung ermittelt. Sie ist eine entscheidende dimensionslose Kennzahl zur Bestimmung des Druckverlustes. Bei der Wahl der Fördergastemperatur sollte der Bediener die Abkühlung zwischen Druckerzeuger und Schüttgutaufgabe berücksichtigen. Eine niedrige Fördergastemperatur liegt auf der sicheren Seite der Berechnung.

- Gegendruck der Anlage [Pa]: endet der pneumatische Transport in einem Reaktor oder Behälter mit einem erhöhten Innendruck, so ist das in dem Feld „Gegendruck der Anlage“ zu berücksichtigen. Der Gegendruck beeinflusst das Geschwindigkeits- und Druckverlustprofil der Förderung.

Anlagendaten		
Rohrinnendurchmesser:	100	mm
Anlagenhöhe:	0	m
Massenstrom:	15000	kg/h
Fördergastemperatur:	20	°C
Umgebungsdruck:	1.01	bar
Gegendruck der Anlage:	0	Pa
Druck am Leitungsende:	101325	Pa
Fördergasendgeschwindigkeit auf Anlagenhöhe:	24.00	m/s

Bild 17: Eingabedaten der pneumatischen Förderanlage

5.2.4 Berechnungsergebnisse

Bild 18 zeigt die Ausgabedaten der Berechnung. Folgende Daten werden ausgegeben:

1. Summe der horizontalen Druckverluste [bar(ü)]: Δp horizontal
2. Summe der vertikalen Druckverluste [bar(ü)]: Δp vertikal
3. Beschleunigungsdruckverlust [bar(ü)]: Δp Beschleunigung
4. Druckverlust der Luftströmung [bar(ü)]: Δp Luft
5. Gesamtdruckverlust [bar(ü)]: es ist die Summe der Druckverluste der Pos. 1,2,3,4. Es ist der Förderleitungsrückdruck, ohne zusätzliche Druckverluste, wie Pulsationen, Luftleitungsdruckverluste, Druckverluste für z.B. Kühler, Trockner, Abscheider etc.
6. Fördergasvolumenstrom [Nm³/h (0 °C, 1,013bar(abs.))]. Es ist die Fördergasmenge, die nach dem Einschleusorgan in der Förderleitung zum pneumatischen Transport notwendig ist. Zusätzliche Luftmengen, wie z.B. die Leckluft einer Zellenradschleuse, sind in dieser Luftmenge nicht berücksichtigt. Sie müssen in Abhängigkeit des Einschleusorgans durch den Bediener separat betrachtet werden. Es ist zusätzlich zu beachten, dass die Fördergasmenge bei 0 °C und 1,013 bar(abs.), somit Normbedingungen nach DIN1343, angegeben wird. Druckerzeugerlieferanten geben die Luftmenge häufig bei 20 °C an. Das ist ein Unterschied von 7,3 % Luftmenge. Somit ist auf die Angabe der

Bezugsbedingungen zu achten.

7. Beladung: Sie ist das Verhältnis von Schüttgutmassenstrom zu Fördergasmassenstrom in der Einheit [-].
8. Mischtemperatur: Es ist die Mischtemperatur am Förderleitungsanfang zwischen Fördergas und Schüttgut. Abstrahlungswärme über die Rohrleitung wird nicht berücksichtigt.
9. Fördergasanfangsgeschwindigkeit: *Sie muss bei der Dichtstromförderung von Kunststoffgranulat > 2,5 m/s betragen.* Sie ergibt sich aus der Fördergasendgeschwindigkeit, der Mischtemperatur und dem Druckverhältnis aus Enddruck (Druck am Leitungsende) zu Anfangsdruck (Gesamtdruckverlust).

Ergebnisse		
Δp horizontal:	3.0464	bar
Δp vertikal:	0.5446	bar
Δp Beschleunigung:	0.0140	bar
Δp Luft:	0.1103	bar
Gesamtdruckverlust:	4.2152	bar
Fördergasvolumenstrom:	632	Nm³/h
Beladung:	18.34	-
Mischtemperatur:	20.00	°C
Fördergasanfangsgeschwindigkeit:	5.16	m/s

Bild 18: Berechnungsergebnisse

5.3 Druckförderung auf Basis der Widerstandsbeiwerte von Siegel [3]

In diesem Kapitel werden nur die zu Kapitel 5.2 abweichenden Ein- und Ausgabe-
werte erläutert.

5.3.1 Einsatzgrenzen des Programmes

Neben dem im weiteren aufgeführten Grenzen sollte das Programm innerhalb der
folgenden Grenzen betrieben werden:

Gesamtdruckverlust: ≤ 2 bar(ü)

Förderleitungsdurchmesser: $\leq$ DN200

5.3.2 Eingabe der Schüttgutdaten

Der Berechnung sind 57 Schüttgüter hinterlegt. Tabelle 2 zeigt die Schüttgüter mit
den hinterlegten Schüttgutdaten. Bis auf die Fördergasanfangsgeschwindigkeit kön-
nen sie im Programm nicht verändert werden, denn der Widerstandsbeiwert ist fest
mit den Werten verknüpft.

Fördergut	Mittlere Partikel- durchmes- ser [mm]	Partikel- dichte [kg/m ³]	Schütt- dichte [kg/m ³]	Fördergasanfangs- geschwindigkeit [m/s]	Widerstands- beiwert λ_s
Ackerbohnen	8,1	1390	830	23-27	0,04
Aktivkohle	0,003	1860	340	20-23	0,06
Bentonit	0,04	2680	720	25-27	0,1
Bitterlupinen	6,1	1340	830	23-27	0,04
Gerste	4	1420	690	20-25	0,04
Glaskugeln	1,14	2990	1780	22-27	0,06
Glimmer, gebrannt	2	2520	100	18-22	0,03
Glimmer, roh	0,93	2550	830	25-30	0,09
Grünmalz	4,5	1320	400	23-27	0,06
Hafer	3,4	1340	510	22-25	0,04
Holzlamellen	100x50x4	720	500	23-27	0,08
Holzspane	50 x 20 x 1	470	150-400	22-25	0,04
Holzwolle	200 x 3 x 3	470	20	20-25	0,04
Hornschotenklee	1,1	1420	830	22-25	0,04
Kartoffelflocken	10 x 10 x1	1200	300	20-23	0,04
Kraftfutter	0,86	1370	540	22-25	0,06
Mais, feucht	8,7	1250	680	22-27	0,06
Mais, trocken	7,7	1300	680	22-25	0,04
Maisgrieß	0,75	1440	650	23-25	0,06
Maismehl	0,19	1400	460	23-25	0,1
Makrolonggranulat	3,2	1230	670	22-25	0,04
Malz	3,7	1370	540	20-22	0,04
Malzschrot	0,7	1480	400	22-25	0,06

Methylzellulose	0,35	1230	370	22-25	0,06
Natriumbikarbonat	0,063	2700	1070	22-25	0,1
Papphülsen	100x20	970	50	18-20	0,04
Phenolharz	0,65	1380	520	20-25	0,06
Polyethylengranulat	3,5	1070	500	20-25	0,04
Polyethylenpulver	0,25	1070	450	20-25	0,1
Polyesterchips	6 x 4 x 2	1400	700	23-27	0,06
Polypropylengranulat	3,5	1000	500	20-25	0,04
Polypropylenpulver	0,22	1000	570	20-25	0,1
Polystyrolgranulat	3,5	1070	600	20-25	0,04
PVC-Pulver	0,2	1320	570	20-25	0,1
Reis	2,7	1620	800	20-25	0,06
Reishülsen	2,5	1280	105	18-20	0,04
Roggen	3	1180	620	22-25	0,04
Sägemehl	0,7	470	190	20-25	0,04
Seifennudeln	20 x 5	1100	600	23-27	0,08
Sojabohnen	6,3	1270	690	22-25	0,04
Sommerraps	1,9	1140	680	20-25	0,04
Stahlkugeln	1,08	7850	4420	25-35	0,12
Steinsalz	1,6	2190	1200	22-27	0,08
Styroporkugeln	3,5	84	29	10-20	0,04
Trockentreber	0,96	680	260	20-22	0,04
Weißsenf	2,1	1190	700	20-25	0,04
Weizen	3,9	1380	730	22-27	0,04
Weizenkleie	1	1470	300	20-25	0,06
Weizenmehl	0,09	1470	540	18-23	0,08
Weizennachmehl	0,15	1470	370	20-25	0,06
Winterwicken	3,4	1390	820	22-25	0,04
Zellulosepulver	0,04	1380	230	20-25	0,04
Zement	0,05	3100	1420	20-25	0,15
Zementrohmehl	0,05	3100	960	20-25	0,13
Zichorie	25	1320	300	23-27	0,06
Zinkoxid	0,1	4850	2000	25-30	0,15
Zucker	0,52	1610	860	20-25	0,08

Tabelle 2: Schüttgutdaten nach [3]

Bild 19 zeigt, dass das zu fördernde Schüttgut über ein Dropdown Feld ausgewählt werden kann. Wurde das Schüttgut ausgewählt, so werden die Felder:

- Widerstandsbeiwert
- Schüttdichte
- Partikeldichte

automatisch gefüllt.

Daten des Schüttgutes

Schüttgut: -- Material auswählen --

Schlupf:

Widerstandsbeiwert:

Fördergasendgeschwindigkeit: Gasg

Schüttdichte:

Mittlerer Partikeldurchmesser:

Spezifische Wärmekapazität des Schüttgutes: Empfeh

Minimale Schüttguttemperatur:

Dynamische Viskosität:

Fördergasendgeschwindigkeit auf Anlagenhöhe:

-- Material auswählen --

- Aktivkohle
- Gerste
- Bentonit
- Hornschotenklee
- Papphülsen
- Zellulosepulver
- Zement
- Zichorie
- Mais, trocken
- Mais, feucht
- Maismehl
- Maisgrieß
- Kraftfutter
- Trockentreber

Bild 19: Auswahl des Schüttgutes

- Schlupf: Es ist das Verhältnis von Schüttgutgeschwindigkeit zu Fördergasleerrohrgeschwindigkeit. Ist der Schlupf nicht bekannt so sollte er zu 0,7 gewählt werden.
- Fördergasendgeschwindigkeit: Bei feinen Schüttgütern ($d_{s,50} \leq 100 \mu\text{m}$) sollte die Endgeschwindigkeit so gewählt werden, dass die Stopfgrenze (blauer Rahmen) in der Tabelle der eingegebenen Rohrleitungsabschnitte (Bild 20) immer mindestens 3 m/s oberhalb der lokalen Geschwindigkeit liegt (grüner Rahmen).

Unabhängig von Siegel empfehlen wir für **feine Schüttgüter** ($d_{50} < 100 \mu\text{m}$) Fördergasendgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Förderleitung bei Rückdrücken bis 1,0 bar(ü) wie folgt (mit steigendem Förderleitungsrückdruck oder steigender Schüttdichte $> 1000 \text{ kg/m}^3$ ist die Geschwindigkeit anzuhäben):

- $\leq \text{DN}80$: $> 18 \text{ m/s}$
- $\text{DN}80 \dots \text{DN}100$: $> 20 \text{ m/s}$
- $\text{DN}100 \dots \text{DN}125$: $> 22 \text{ m/s}$
- $\text{DN}125 \dots \text{DN}150$: $> 23 \text{ m/s}$
- $\text{DN}150 \dots \text{DN}200$: $> 24 \text{ m/s}$

Abschnitt	Horizontale Länge [m]	Vertikale Höhe [m]	Anzahl 90° [-]	Rohrinnen- durchmesser [m]	Kontrolle der Staffelung [-]	Lokaler Druck [Pa]	Lokale Geschwindigkeit [m/s]	Lokale Dichte [kg/m³]	Stopfgrenze [m/s]
Förderleitungsende	0	0	0	0.20		101325.00	25.00	1.14	14.77
Abschnitt 1			1	0.20	1.00	101325.00	25.00	1.14	14.77
Abschnitt 2	6			0.20	1.00	102872.26	24.62	1.15	14.69
Abschnitt 3			1	0.20	1.00	104831.68	24.16	1.18	14.58
Abschnitt 4		9		0.20	1.00	106327.19	23.82	1.19	14.49
Abschnitt 5		9		0.20	1.00	108685.18	23.31	1.22	14.37
Abschnitt 6			1	0.20	1.00	111033.08	22.81	1.25	14.25
Abschnitt 7	10			0.20	1.00	112445.06	22.53	1.26	14.18
Abschnitt 8	10			0.20	1.00	115432.74	21.94	1.30	14.03
Abschnitt 9	10			0.20	1.00	118343.09	21.40	1.33	13.89
Abschnitt 10	10			0.20	1.00	121181.87	20.90	1.36	13.77
Abschnitt 11	10			0.20	1.00	123954.15	20.44	1.39	13.65
Abschnitt 12	10			0.20	1.00	126664.42	20.00	1.42	13.53
Abschnitt 13	10			0.20	1.00	129316.70	19.59	1.45	13.42
Abschnitt 14	10			0.20	1.00	131914.58	19.20	1.48	13.32
Abschnitt 15	10			0.20	1.00	134461.30	18.84	1.51	13.22
Abschnitt 16	10			0.20	1.00	136959.79	18.50	1.54	13.13
Abschnitt 17			1	0.20	1.00	139412.70	18.17	1.56	13.04
Abschnitt 18		6		0.20	1.00	140537.25	18.02	1.58	13.00
Abschnitt 19			1	0.20	1.00	142079.31	17.83	1.59	12.94
Abschnitt 20	6			0.20	1.00	143182.75	17.69	1.61	12.90

Bild 20: Prüfung der Stopfgrenze feiner Schüttgüter

- Fördergasendgeschwindigkeit:** Bei Granulaten ($d_{s,50} \geq 100 \mu\text{m}$) sollte die Endgeschwindigkeit so gewählt werden, dass die empfohlene Fördergasanfangsgeschwindigkeit im Feld „Anlagendaten“ (grüne Markierung in Bild 22) erreicht wird. Die reale Fördergasanfangsgeschwindigkeit der Berechnung zeigt sich im grün hinterlegten Bereich der Ergebnisse (blaue Markierung in Bild 21). Die untere Angabe der empfohlenen Fördergasanfangsgeschwindigkeit bezieht sich auf Leitungen $\leq \text{DN}80$, die obere Angabe auf Leitungen der Größe DN200. Die Fördergasanfangsgeschwindigkeit wird unter Berechnungsergebnisse (Bild 21) ausgegeben. Die Prüfung wird nicht automatisch durchgeführt. Sie muss durch den Bediener erfolgen. Die Fördergasendgeschwindigkeit ist so lange anzupassen, bis die oben beschriebene Bedingung erfüllt ist.

Ergebnisse		
Δp horizontal:	0.3033	bar
Δp vertikal:	0.0625	bar
Δp Bögen:	0.0668	bar
Δp Beschleunigung:	0.0217	bar
Δp Luft:	0.0482	bar
Gesamtdruckverlust:	0.5025	bar
Fördergasvolumenstrom:	2486	Nm³/h
Beladung:	6.22	-
Mischtemperatur:	37.63	°C
Fördergasanfangsgeschwindigkeit:	16.71	m/s

Bild 21: Ausgabedaten / Ergebnisse

- Spezifische Wärmekapazität: Mit ihr wird die Mischtemperatur bestimmt. Ist die spez. Wärmekapazität nicht bekannt, so kann mit einem Wert von 750 J/kg/K gearbeitet werden. Die folgende Auflistung zeigt spez. Wärmekapazitäten diverser Schüttgüter:

Flugasche:	840 J/(kg·K)
Zement:	750 J/(kg·K)
Holz:	2100 J/(kg·K)
Spanplatten:	2100 J/(kg·K)
Beton:	1000 J/(kg·K)
Polyurethan:	1500 J/(kg·K)
Polystyrol:	1500 J/(kg·K)
Schafwolle:	1300 J/(kg·K)
Mineralwolle:	800 J/(kg·K)
Schwefel:	720 J/(kg·K)
Aluminium:	921 J/(kg·K)

Anlagendaten

Empfehlung Förderanfangsge:	25-30	m/s
Rohrinnendurchmesser:	200	mm
Anlagenhöhe:	0	m
Massenstrom:	20000	kg/h
Fördergastemperatur:	20	°C
Umgebungsdruck:	1.01	bar
Gegendruck der Anlage:	0	Pa
Druck am Leitungsende:	101325.00	Pa

Bild 22: Anlagendaten

5.4 Saugförderung auf Basis der Widerstandsbeiwerte von Siegel [3]

In diesem Kapitel werden nur die zu Kapitel 5.2 und 5.3 abweichenden Ein- und Ausgabewerte erläutert.

5.4.1 Einsatzgrenzen des Programmes

Neben dem im weiteren aufgeführten Grenzen sollte das Programm innerhalb der folgenden Grenzen betrieben werden:

Gesamtdruckverlust: $\leq 0,75$ bar(ü)

Förderleitungsdurchmesser: $\leq$ DN200

Das Programm erlaubt die Berechnung außerhalb der oben aufgeführten Grenzen. Hier sind die Berechnungen mit verfahrenstechnischen Erfahrungen abzugleichen.

5.4.2 Eingabe der Schüttgutdaten

Der einzige Unterschied zur Druckförderung aus Kapitel 5.3 ist die Eingabe zur Fördergeschwindigkeit. Die Geschwindigkeit am Förderleitungsanfang ist bei der Druck- wie bei der Saugförderung die niedrigste Geschwindigkeit entlang der Förderleitung. Entlang der Leitung fällt der Druck und somit steigt die Geschwindigkeit. Bei der Saugförderung ist mit kleinen Beladungen zu arbeiten. Die im Programm empfohlene Anfangsgeschwindigkeit (Bild 22) ist zu wählen. Sie ist unabhängig von der Feinheit des Schüttgutes zu wählen. Mit der Fördergasgeschwindigkeit, dem Rohrdurchmesser und dem Schüttgutmassenstrom wird die Beladung bestimmt. Überschreitet die Beladung eine Grenzbeladung die im Bereich der „Anlagendaten“ (Bild 23) bestimmt wird, so wird eine Kommentarfeld unterhalb der Eingabedaten eingeblendet. Um das verfahrenstechnische Problem zu lösen:

- die Förderanfangsgeschwindigkeit anzuheben, oder
- der Rohrleitungsinwenddurchmesser anzuheben, oder
- der Massenstrom zu senken.

Grenzwert K für Saugsysteme: -

Resulting max permissible load μ : kg/kg

Berechnungsverfahren sollten nur bis Rohrleitungsdurchmesser DN200 / 8" angewandt werden. Je kürzer die Längen gewählt werden, desto besser.

Solid loading ratio exceeds max permissible load!

Bild 23: Berechnungsfeld der max. zulässigen Beladung für Saugförderungen im Feld „Anlagendaten“

Grenzwert K für Saugsysteme: -

Resulting max permissible load μ : kg/kg

Feststoffbeladung: -

Mischtemperatur: °C

Bild 24: Berechnungsergebnisse mit überschrittener Beladung

5.5 Druckförderung auf Basis der Berechnung des Widerstandsbeiwertes von Stegmaier für feine Schüttgüter ($d_{s,50} \leq 150 \mu\text{m}$)

In diesem Kapitel werden nur die zu Kapitel 5.2 - 5.4 abweichenden Ein- und Ausgabewerte erläutert.

5.5.1 Einsatzgrenzen des Programmes

Neben dem im weiteren aufgeführten Grenzen sollte das Programm innerhalb der folgenden Grenzen betrieben werden:

Gesamtdruckverlust: $\leq 1,0 \text{ bar(ü)}$

Förderleitungsdurchmesser: $\leq \text{DN}200$

5.5.2 Eingabe der Schüttgutdaten

- Mittlerer Partikeldurchmesser: In diesem Berechnungsprogramm wird der Widerstandsbeiwert nicht als Konstante einer Tabelle entnommen, er wird mit Gl. (32) nach [10] bestimmt. Er wird für jeden Berechnungsabschnitt separat berechnet. Dafür ist die Eingabe des mittleren Partikeldurchmessers $d_{s,50,3}$, des Rohrdurchmessers sowie der Schütt- und Partikeldichte notwendig.

Daten des Schüttgutes		
Mittlerer Partikeldurchmesser:	0.033	[mm]
Minimale Schüttguttemperatur:	20	[°C]
Schüttdichte:	770	kg/m³
Partikeldichte:	2660	kg/m³
Spezifische Wärmekapazität des Schüttgutes:	750	J/(kg·K)
Wandreibungswinkel:	35	[°]
Dynamische Viskosität:	0.00001820	Pas
Fördergasendgeschwindigkeit:	24	m/s
Fördergasendgeschwindigkeit auf Anlagenhöhe:	24.00	m/s

Bild 25: Schüttgut Eingabedaten zur Berechnung der Druckförderung

- Bei der Förderung nach Siegel musste ein Schlupf selbst gewählt werden. In diesem Berechnungsmodul wird der Schlupf anhand der Wandreibung berechnet. Der Wandreibungswinkel liegt je nach Wandwerkstoff-Schüttgutpaarung zwischen 15 – 35°. Je feiner ein Schüttgut ist, desto größer wird in der Regel des Wandreibungswinkel. Es gehen jedoch noch weitere Faktoren, wie Kornform, Dichte, Feuchtigkeit, Korngrößenverteilung etc. in den Wandreibungswinkel ein. Der Wandreibungswinkel kann mit dem Jenike Schergerät

[45] bestimmt werden. Liegt dem Bediener kein Wert zum Wandreibungswinkel vor, so sollte er in Edelstahl- zu 25° - 30° und in Baustahlleitungen zu 30° - 35° gewählt werden.

- Fördergasendgeschwindigkeit: Sie ist vorzugeben. Nach Eingabe aller Daten ist im Abschnitt „Prüfung Stopfgrenze nach Muschelknautz/Krambock“ die Stopfgrenze zu überprüfen (Bild 26). Ist die Fördergasendgeschwindigkeit zu niedrig gewählt worden, so ist die Fördergasanfangsgeschwindigkeit so niedrig, dass es zur Anlagenverstopfung kommen wird. Wenn alle Zellen der „Stopfgrenze“ und „Beladungsbegrenzungsfaktor der Stopfgrenze“ grau hinterlegt sind, dann ist die Fördergasendgeschwindigkeit ausreichend hoch gewählt worden. Wir empfehlen, die in Kapitel 5.3.2 aufgeführten Fördergasendgeschwindigkeit ebenfalls einzuhalten.

Abschnitt	Horizontale Länge [m]	Vertikale Höhe [m]	Anzahl 90° [-]	Rohrinnendurchmesser [m]	Staffelprüfung [-]	Örtlicher Druck [Pa]	Stopfgrenze [m/s]	Beladungsbegrenzungsfaktor [-]	Örtliche Geschwindigkeit [m/s]
Förderleitungsende	0	0	0	0.100		101325	8.93	0.021	24.00
Abschnitt 1			1	0.100	1.00	101325	8.93	0.021	24.00
Abschnitt 2	6			0.100	1.00	106752	8.78	0.022	22.78
Abschnitt 3			1	0.100	1.00	108973	8.72	0.023	22.32
Abschnitt 4		9		0.100	1.00	114003	8.59	0.024	21.33
Abschnitt 5		9		0.100	1.00	117317	8.51	0.025	20.73
Abschnitt 6			1	0.100	1.00	120730	8.43	0.025	20.14
Abschnitt 7	10			0.100	1.00	125248	8.33	0.026	19.42
Abschnitt 8	10			0.100	1.00	129590	8.24	0.027	18.77
Abschnitt 9	10			0.100	1.00	134083	8.15	0.028	18.14
Abschnitt 10	10			0.100	1.00	138732	8.07	0.029	17.53
Abschnitt 11	10			0.100	1.00	143543	7.98	0.030	16.94
Abschnitt 12			1	0.100	1.00	148519	7.90	0.031	16.37
Abschnitt 13		6		0.100	1.00	152147	7.84	0.032	15.98
Abschnitt 14			1	0.100	1.00	155119	7.79	0.033	15.68
Abschnitt 15	6			0.100	1.00	158583	7.74	0.033	15.34
Abschnitt 16				0.100	1.00	161882	7.69	0.034	15.02
Abschnitt 17				0.100	1.00	161882	7.69	0.034	15.02

Bild 26: Tabelle zum Rohrleitungsverlauf mit Daten zur Stopfgrenze

5.5.3 Nebenrechnungen

Im Bereich „Nebenrechnungen“ werden Rechnungen durchgeführt, um Parameter für den Widerstandsbeiwert und um den Schlupf zu bestimmen.

Nebenrechnungen
Sinkgeschwindigkeit des einzelnen Partikels
Nach Stokes: $Re < 1,1$ [m/s]
Nach Allen: $1,1 < Re < 500$ [m/s]
Nach Newton: $500 < Re < 2 \times 10^5$ [m/s]
Gewählte Sinkgeschwindigkeit: [m/s]
Schlupf k-Wert Bestimmung: [-]
Re-Prüfung: [-]
 $V(t,s)$: [m/s]
Schlupf: [-]
Froude (Terminal): [-]

Bild 27: Nebenrechnungen

5.6 Saugförderung auf Basis der Berechnung des Widerstandsbeiwertes von Stegmaier für feine Schüttgüter ($d_{s,50} \leq 150 \mu\text{m}$)

Die Eingabe und Ausgabe der Daten erfolgt wie in den Kapiteln 5.3 - 5.6 erläutert.

Die Einsatzgrenzen des Programmes sind:

Gesamtdruckverlust: $\leq 0,5 \text{ bar(ü)}$

Förderleitungsdurchmesser: $\leq \text{DN}200$

5.7 Bewertung der Ergebnisse

Die Berechnungsprogramme geben drei primäre Ergebnisse:

- Rohrleitungsdurchmesser
- Gesamtdruckverlust
- Fördergeschwindigkeit / Volumenstrom

Diese Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Förderleitung. Zusätzliche Druckverluste, durch z.B.:

- Luftleitungen
- Rückschlagklappen
- Funkenfänger
- Luftkühler
- Trockner
- Kondensatabscheider
- Zyklonabscheider
- Druckgefäßverrohrungen
- Düsen von Schneckenpumpen

sind nicht Bestandteil der Berechnung. Sie müssen separat ermittelt werden.

Zusätzliche Luftmengen wie z.B. Leckluftmengen von Zellenradschleusen oder Trocknungsluftmengen von Adsorptionstrocknern sind ebenfalls nicht Bestandteil der Berechnung. Sie müssen separat ermittelt werden.

Wir empfehlen die Auslegung des Druckerzeugers wie folgt:

Druck:

1. Gesamtdruckverlust aus der Berechnung des jeweiligen Berechnungsprogrammes
2. Addition von 15 % Druckschwankungen
3. Addition von 20 % Auslegungsungenauigkeit
4. Addition zusätzlicher oben aufgeführter Druckverluste
→ das führt zum Nenndruck des Druckerzeugers

Volumenstrom:

1. Fördergasvolumenstrom aus der Berechnung des jeweiligen Berechnungsprogrammes
2. Addition zusätzlicher Volumenströme, wie Leckluftmenge
→ das führt zum Nennvolumenstrom des Druckerzeugers

5.8 Bemerkung zur Auslegung von Gebläsen und Verdichtern

Bei der Auslegung des Druckerzeugers nutzen sie die installierte Antriebsleistung der ausgewählten Maschine aus. Bild 30 zeigt das Ergebnis einer Gebläseauslegung mit dem AERZEN Webkonfigurator (www.aerzen.com) [Solche Auslegungstools stellen alle namenhaften Druckerzeugerlieferanten zur Verfügung]. Das Ergebnis zeigt ein GM25S. Die Gebläsegröße (Gebläsestufe) gibt die konstruktive Grenze des Volumenstroms vor. Jedoch hat jede Gebläse- / Verdichterstufe eine minimale und maximale Luftmenge. Beispiel: Die vom Bediener eingebenden Daten haben zu einem Gebläse entsprechend Bild 30 (links) geführt. Der installierte Motor hat eine Leistung von 37kW. Die Kupplungsleistung beträgt jedoch „nur“ 30,6 kW. Dieser Druckerzeuger wird somit so ausgeliefert, dass er eine Luftmenge von 1051 Nm³/h bei einer Druckdifferenz von max. 750 mbar liefert. Fehlt in der pneumatischen Förderanlage jedoch Luftmenge oder Druckdifferenz, so ist das Gebläse vorerst nicht in der Lage das zu liefern. Das Gebläse müsste umgebaut werden (Wechsel des Riementriebes, Getriebes oder / und Sicherheitsventils). Legen Sie den Druckerzeuger so aus, dass Sie den Motor vollumfänglich ausnutzen. Sie können das Gebläse zu gleichen Kosten bei gleichem Motor mit mehr Luftmenge oder mehr Druckreserve beziehen. Dafür müssen Sie die Auslegung entsprechend anpassen. Bild 30 (rechts) zeigt das gleiche Gebläse mit gleichem Motor mit 120 mbar mehr Druckreserve. Beachten Sie, dass das die pneumatische Förderung nicht beeinflusst. Ein Gebläse erzeugt nur den Druck, bezieht den Motorstrom, den es aus der pneumatischen Förderanlage entgegengesetzt bekommt. Der mehrinstallierte Druck beeinflusst somit nicht den Energieverbrauch der Anlage, sondern erhöht die Anlagenverfügbarkeit.

Der gewählte finale Druck des Druckerzeugers muss in Einklang mit den konstruktiven Grenzen der Gesamtanlage stehen. Kommt es in der Förderanlage zu einer Rohrleitungsverstopfung, so steht der max. Druck in der Anlage an. In dem oben aufgeführten Beispiel wären das 870 mbar.

Medium	Luft			Medium	Luft		
Volumenstrom ¹	Q ₁	m ³ /min	19,2	Volumenstrom ¹	Q ₁	m ³ /min	18,9
Volumenstrom ¹	Q ₁	m ³ /h	1150	Volumenstrom ¹	Q ₁	m ³ /h	1136
Volumen im Normzustand bezogen auf T1=273K, p1=1,013 bar, rF=0%	Q _N	Nm ³ /h	1051	Volumen im Normzustand bezogen auf T1=273K, p1=1,013 bar, rF=0%	Q _N	Nm ³ /h	1038
Massenstrom	ṁ	kg/h	1375	Massenstrom	ṁ	kg/h	1358
Dichte im Ansaugzustand	ρ	kg/m ³	1,195	Dichte im Ansaugzustand	ρ	kg/m ³	1,195
Relative Feuchte	rF	%	80	Relative Feuchte	rF	%	80
Eintrittsdruck (abs.)	p ₁	bar	1,013	Eintrittsdruck (abs.)	p ₁	bar	1,013
Austrittsdruck (abs.)	p ₂	bar	1,763	Austrittsdruck (abs.)	p ₂	bar	1,883
Druckdifferenz	Δp	mbar	750	Druckdifferenz	Δp	mbar	870
Eintrittstemperatur	t ₁	°C	20	Eintrittstemperatur	t ₁	°C	20
Austrittstemperatur	t ₂	°C	92	Austrittstemperatur	t ₂	°C	105
Hauptrotordrehzahl	n _{HR}	min ⁻¹	3960	Hauptrotordrehzahl	n _{HR}	min ⁻¹	3960
Kupplungsleistung	P _k	kW	30,6	Kupplungsleistung	P _k	kW	35,1
Motordrehzahl	n _{Mot}	min ⁻¹	2970	Motordrehzahl	n _{Mot}	min ⁻¹	2970
Motorleistung	P _{Mot}	kW	37	Motorleistung	P _{Mot}	kW	37

Bild 28: Gebläsedaten eines GM25S, die Berechnung wurde mittels Aerzen Webconfigurator online durchgeführt

6 Bedienung der VT - Toolbox (Zusatz-Module)

Die VT-Toolbox enthält Zusatz-Module, womit Berechnungen in Bezug auf pneumatische Förderungen oder allgemeine verfahrenstechnische Berechnungen durchgeführt werden können. Diese sind:

- Berechnung der Wärmeausdehnung von Rohrleitungen
- Berechnung von Geschwindigkeiten in Rohrleitungen
- Umrechnung von Geschwindigkeiten und Volumenströmen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur
- Berechnung der Partikel-Sinkgeschwindigkeit
- Berechnung des Lockerungspunktgeschwindigkeit
- Zellenradschleusenauslegung nach ISO 3922
- Druckverlustberechnung von Luftleitungen
- Geldart-Diagramm

6.1 Berechnung der Wärmedehnung von Rohrleitungen

Dieses Modul ist z.B. relevant, wenn die Ausdehnung Aufgrund von Wärmeleitung in Bezug auf Fest- und Loslagerpunkte bestimmt werden muss. Rohrbögen, die z.B. mit Schmelzbasalt ausgekleidet werden, sind sehr spannungsempfindlich. Treten am Bogen Spannungen aufgrund von Wärmedehnung auf, so sind Rohrkompensatoren zu setzen, die die Wärmeausdehnung aufnehmen. Wieviel Ausdehnung aufgenommen werden muss, ist somit zu berechnen. Die Wärmedehnung ΔL von Rohrleitungen wird nach Gl. 36 bestimmt:

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T \quad (36)$$

Mit:

- Wärmedehnung ΔL [m]
- α = Längen- /Wärmeausdehnungskoeffizient [1/K]
- L = gesamte betrachtete Rohrleitungslänge [m]
- ΔT = Temperaturdifferenz zwischen der Rohrleitung und der Umgebung [K]

Im Modul werden Wärmeausdehnungskoeffizienten für verschiedene Stähle bei unterschiedlichen Temperaturen angegeben.

Eingabedaten	
Temperaturdifferenz	150 K
Wärmeausdehnungskoeffizient	12 [10 ⁻⁶ /K]
Länge der Rohrleitung	65 m
Längenänderung	117.00 mm

Bild 29: Modul Wärmeausdehnung von Rohrleitungen

6.2 Geschwindigkeiten in Rohrleitungen

Dieses Modul (Bild 30) berechnet die Geschwindigkeiten in Rohrleitungen. Im oberen Bereich wird die Geschwindigkeit für einen vorgegebenen Rohrrinnendurchmesser bestimmt. Unterhalb der Berechnung wird die Geschwindigkeiten für die Standardrohrgrößen von DN15 bis DN600 automatisch berechnet. Es ist zu beachten, dass der Betriebsvolumenstrom der Volumenstrom in der Rohrleitung ist, der zu dem Druck und der Temperatur in der Rohrleitung gehört.

Eingabedaten	
Betriebsvolumenstrom	2 m³/s
Rohrdurchmesser (lichte Weite)	200 mm
Geschwindigkeit	63.66 m/s

Bild 30: Modul Geschwindigkeiten in Rohrleitungen

6.3 Umrechnung von Geschwindigkeiten und Volumenströmen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur

Wie in Kapitel 6.2 erwähnt, sind die Betriebsbedingungen bei der Bestimmung von Volumenströmen, Geschwindigkeiten oder Gasdichten zu berücksichtigen.

6.3.1 Norm- vs. Betriebsbedingungen

Über das Boyle-Mariotte Gesetz können Betriebsbedingungen (Dichte $\rho_{1,2}$, Temperatur $T_{1,2}$ und Druck $p_{1,2}$) ineinander umgerechnet werden. Von dem Eingangsniveau (1) kann auf das Ausgangsniveau (2) entsprechend Gl. 37 umgerechnet werden.

$$\frac{\rho_1 \cdot T_1}{p_1} = \frac{\rho_2 \cdot T_2}{p_2} \quad (37)$$

In der Regel ist die Temperatur T innerhalb der Rohrleitung als konstant anzusetzen, so vereinfacht sich die Gleichung (38) zu:

$$\frac{\rho_1}{p_1} = \frac{\rho_2}{p_2} \quad (38)$$

Sind nicht Dichten, sondern Volumenströme umzurechnen, so kann der Volumenstrom eingeführt werden:

$$\frac{\dot{V}_1 \cdot p_1}{T_1} = \frac{\dot{V}_2 \cdot p_2}{T_2} \quad (39)$$

Der Begriff Norm wird in diesem Zusammenhang oft fälschlicherweise verwendet. Normbedingungen nach DIN 1343 von z.B. Luft sind:

- 0 °C = 273,15 K
- 1,01325 bar(abs.)
- 0 % relative Feuchte
- 1,293 kg/m³

Boyle-Mariotte Gesetz / Höhenlage / Gasgleichung

Normbedingungen (DIN 1343)		Gegebene Betriebsbedingungen		Gegebene Betriebsbedingungen		Gegebene Betriebsbedingungen	
Dichte	1,293 kg/m ³	Temperatur	0 °C	Temperatur	0 °C	Temperatur	0 °C
Temperatur	0,0 °C	Druck	0 bar(g)	Druck	0 bar(g)	Druck	0 bar(g)
Druck	1,01325 bar	Betriebsvolumenstrom	0 m ³ /s	Geschwindigkeit	0 m/s	Normvolumenstrom	0 m ³ /s
		Normvolumenstrom	- m ³ /s	Geschwindigkeit	- m/s	Betriebsvolumenstrom	- m ³ /s

Bild 31: Modul Boyle-Mariotte

6.3.2 Gasgleichung

Mittels der idealen Gasgleichung können Druck, Dichte und Temperatur bestimmt werden. Dafür sind folgende zusätzlichen Gasdaten notwendig:

- Allg. Gaskonstante R [J/(mol·K)]
- Molmasse M [g/mol]
- Kritischer Druck p_{krit} : bar(abs)_{krit}
- Kritische Temperatur T_{krit} : [°C]_{krit}

Im Zusatz-Modul sind diese Daten für: Argon, Helium, Kohlendioxid, Luft, Methan, Sauerstoff und Stickstoff hinterlegt. Wird das entsprechende Gas ausgewählt und eines der drei Gasdaten (Dichte, Druck, Temperatur) vorgegeben, so wird der ausstehende Parameter ausgegeben.

Gas equation: $p \cdot V = n \cdot R_g \cdot T \rightarrow p \cdot R = p \cdot \frac{R}{M}$

Allgemeine Gaskonstante R		Gegebener Druck		Gegeben Dichte		Gegeben Dichte	
Allgemeine Gaskonstante R	8,31447 J/(mol·K)	Gegebener Druck	0 bar(g)	Gegeben Dichte	0 kg/m ³	Gegeben Dichte	0 kg/m ³
Gas	Air	Temperatur	0 °C	Temperatur	0 °C	Druck	0 bar(g)
Molmasse M	- g/mol	Gesucht Dichte	- kg/m ³	Gesucht Druck	- bar(g)	Gesucht Temperatur	- °C
Kritischer Druck	- bar						
Kritische Temperatur	- °C						

Bild 32: Modul Gasgleichung

6.3.3 Höhenlage

Je höher die Anlagen über Normalnull gebaut werden soll, desto geringer ist die Luftdichte. Ein Druckerzeuger saugt eine feste Luftmenge $[m^3/s]$ an, keine Masse. Wird z.B. ein Gebläse anstatt auf 0 m auf 500 m aufgestellt, ändert sich am Gebläse die Ansaugluftmenge nicht. Die Ansaugluftmasse ändert sich in Abhängigkeit der reduzierten Dichte. Bild 33 zeigt den Berechnungsabschnitt.

Höhe über Normal-Null

Dichte auf der Höhe

Druck auf der Höhenlage

(Calculation of pressure and density depending on altitude at 15 °C)

m eingeben

kg/m³

bar

Bild 33: Modul Höhenlage

Tabelle 3 zeigt den Luftdruck und die Luftdichte in Abhängigkeit der Höhe. Im Zusatz-Modul können die Luftdichte und der Luftdruck durch Eingabe der Höhe, bezogen auf 15 °C, genau bestimmt werden. Mittels Kapitel 6.3.2 können diese Werte auf andere Temperaturen umgerechnet werden.

Höhe [m]	Druck [bar(abs)]	Dichte [kg/m³]	Höhe [m]	Druck [bar(abs)]	Dichte [kg/m³]	Höhe [m]	Druck [bar(abs)]	Dichte [kg/m³]
-400	1,062	1,284	750	0,927	1,120	1900	0,809	0,978
-350	1,056	1,277	800	0,921	1,114	1950	0,804	0,972
-300	1,050	1,269	850	0,916	1,107	2000	0,799	0,966
-250	1,043	1,262	900	0,910	1,101	2050	0,794	0,960
-200	1,037	1,254	950	0,905	1,094	2100	0,790	0,955
-150	1,031	1,247	1000	0,900	1,088	2150	0,785	0,949
-100	1,025	1,239	1050	0,894	1,081	2200	0,780	0,943
-50	1,019	1,232	1100	0,889	1,075	2250	0,776	0,938
0	1,013	1,225	1150	0,884	1,069	2300	0,771	0,932
50	1,007	1,217	1200	0,879	1,062	2350	0,767	0,927
100	1,001	1,210	1250	0,873	1,056	2400	0,762	0,921
150	0,995	1,203	1300	0,868	1,050	2450	0,758	0,916
200	0,989	1,196	1350	0,863	1,044	2500	0,753	0,910
250	0,983	1,189	1400	0,858	1,037	2550	0,749	0,905
300	0,978	1,182	1450	0,853	1,031	2600	0,744	0,900
350	0,972	1,175	1500	0,848	1,025	2650	0,740	0,894
400	0,966	1,168	1550	0,843	1,019	2700	0,735	0,889
450	0,960	1,161	1600	0,838	1,013	2750	0,731	0,884
500	0,955	1,154	1650	0,833	1,007	2800	0,727	0,879
550	0,949	1,147	1700	0,828	1,001	2850	0,722	0,873
600	0,943	1,141	1750	0,823	0,995	2900	0,718	0,868
650	0,938	1,134	1800	0,818	0,989	2950	0,714	0,863
700	0,932	1,127	1850	0,813	0,983	3000	0,710	0,858

Tabelle 3: Luftdruck und Luftdichte in Abhängigkeit der Höhe

6.4 Partikel-Sinkgeschwindigkeit

Die Sinkgeschwindigkeit (engl.: terminal velocity) einer Einzelpartikel w_{Te} in ruhendem Gas ist das Ergebnis der angreifenden Kräfte aus Widerstandskraft F_W , Gewichtskraft F_G und Auftriebskraft F_A .

Für den laminaren Bereich ($Re < 1,1$), dem Stokes'schen Bereich, gilt:

$$w_{Te} = \frac{1}{18} \cdot g \cdot d_S^2 \cdot \frac{\rho_P - \rho_F}{\eta_F} \quad (40)$$

mit: ρ_P = Partikeldichte [kg/m^3]

ρ_F = Fluidichte [kg/m^3]

η_F = dynamische Viskosität des Fluids [Pas]

Für den Übergangsbereich ($1,1 < Re_P < 500$), dem Allenschen Bereich, gilt:

$$w_{Te} = \frac{18 \cdot \eta_F}{d_{S,50} \cdot \rho_F} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{1}{9} \cdot \sqrt{Ar}} - 1 \right)^2 \quad (41)$$

$$\text{mit: } Ar = \frac{d_{S,50}^3 \cdot g}{\eta_F^2} \cdot \rho_F \cdot (\rho_P - \rho_F) = \text{Archimedes-Zahl [-]} \quad (42)$$

Für den turbulenten Bereich ($500 < Re_P < 2 \cdot 10^5$), dem Newtonschen Bereich, gilt:

$$w_{Te} = 1,74 \cdot \left(g \cdot d_{S,50} \cdot \frac{\rho_P - \rho_F}{\rho_F} \right)^{0,5} \quad (43)$$

Die Gültigkeitsbereiche werden mit der Partikel-Reynoldszahl Re_P geprüft:

$$Re_P = \frac{w_{Te} \cdot d_{S,50} \cdot \rho_F}{\eta_F} \quad (44)$$

Zur Berechnung der Partikel-Sinkgeschwindigkeit werden folgende Parameter benötigt:

- Mittlerer Partikeldurchmesser [mm]
- Partikeldichte (es ist nicht die Schüttdichte), sie kann auch mit der Rohdichte gleichgesetzt werden [kg/m^3]
- Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
- Luftdruck [bar(ü)]

Die Partikel-Sinkgeschwindigkeit wird im Modul für alle drei Bereiche berechnet. Anschließend wird die Re-Zahl Prüfung durchgeführt. Alle Werte werden dargestellt. Die Sinkgeschwindigkeit für den gültigen Reynolds Bereich wird unten separat ausgegeben (siehe blaue Markierung in Bild 34).

Eingabedaten		Sinkgeschwindigkeit der Einzelpartikel		Reynolds Zahl	
Mittlerer Partikeldurchmesser	1 mm	Nach Stokes: $Re(p) < 1$	46,38924 m/s	Nach Stokes	1976,7895 -
Partikeldichte	2000 kg/m³	Nach Allen: $1.1 < Re(p) < 500$	3,93509 m/s	Nach Allen	167,6863 -
Lufttemperatur	140 °C	Nach Newton: $500 < Re(p)$	4,83038 m/s	Nach Newton	265,8377 -
Luftdruck	2 bar(g)				
Luftdichte	2,5426 kg/m³				
Dynamische Viskosität	0,00002347 Pas				
Archimedes Zahl	90472,0832 -				

Sinkgeschwindigkeit der Einzelpartikel	3,93509 m/s
--	-------------

Bild 34: Berechnung der Sinkgeschwindigkeit der Einzelpartikel

6.5 Lockerungspunktgeschwindigkeit

Bleibt der Druckverlust der vertikal durchströmten Schüttung oberhalb einer kritischen Gasgeschwindigkeit konstant, so wird diese Grenzgeschwindigkeit als Lockerungsgeschwindigkeit bezeichnet. Ab dem sogenannten Lockerungs- oder Wirbelpunkt sowie über den gesamten Wirbelbettbereich wird das Bettgewicht von der anliegende Druckdifferenz getragen. Die Geschwindigkeit am Lockerungspunkt wird wie folgt berechnet:

$$v_{F,L} = 42,9 \cdot \frac{1 - \varepsilon_L}{d_{S,SD}^*} \cdot \frac{\eta_F}{Q_F} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{g}{3214} \cdot \frac{\varepsilon_L^3}{(1 - \varepsilon_L)^2} \cdot (d_{S,SD}^*)^3 \cdot \frac{(Q_P - Q_F) \cdot Q_F}{\eta_F^2}} - 1 \right) \quad (45)$$

Die Eingabedaten zeigt Bild 35. Aus den Eingabedaten zum Gas wird die dynamische Viskosität bestimmt. Aus Schütt- und Partikeldichte wird die Porosität berechnet.

Die Lockerungspunktgeschwindigkeit wird einmal in der Einheit [m/s] und einmal in der Einheit [mm/s] angegeben.

Eingabedaten		Ergebnisse	
Gasdichte	2 kg/m³	Sauterdurchmesser	25,0000 µm
Schüttlichte	1900 kg/m³	Dynamische Viskosität	0,000023 Pas
Partikeldichte	3000 kg/m³	Hohlraumanteil (Porosität)	0,6667 [-]
Gastemperatur	140 °C	Lockerungspunktgeschwindigkeit	0,0046 m/s
Sauterdurchmesser	0,025 mm	Lockerungspunktgeschwindigkeit	4,6452 mm/s

Bild 35: Berechnung der Lockerungspunktgeschwindigkeit

6.6 Zellenradschleusendimensionierung nach ISO 3922

Die ISO 3922 gibt Maße für neun Zellenradschleusengrößen an. Die ISO ist keine Norm, die bei den Zelleradschleusenlieferanten Anwendung findet. In der Regel haben die Zellenradschleusen der auf dem Markt verfügbaren Zelleradschleusenlieferanten von der ISO abweichende Abmaße und Rotorvolumina. Die ISO stellt jedoch die typischen Baugrößen vor. Jeder Baugröße wurde ein Rotorvolumen zugeordnet (Bild 36). Nutzen Sie dieses Berechnungsmodul, so müssen Sie das Rotorvolumen mit dem final gewählten Zelleradschleusenlieferantenabgeglichen werden.

Rotordurchmesser [mm]	lichte Rotorbreite [mm]	Rotorvolumen [m³]	Drehzahl [1/min]	Rotor Umfangsgeschwindigkeit [m/s]	Leckagegasmenge [Nm³/h]
160	160	0.0023	214.6357	1.7981	109.2966
200	200	0.0044	109.8935	1.1508	118.4047
250	250	0.0086	56.2655	0.7365	147.6343
315	315	0.0172	28.1274	0.4639	196.8048
400	400	0.0352	13.7367	0.2877	246.1911
500	500	0.0687	7.0332	0.1841	301.4447
630	630	0.1374	3.5159	0.1160	356.0091
800	800	0.2813	1.7171	0.0719	498.4127
1000	1000	0.5495	0.8791	0.0460	697.7778

Bild 36: Baugrößen und technische Daten von ZRS nach ISO 3922

Das Programm berechnet aus der Schüttdichte ρ_S , dem Massenstrom $\dot{M}_S$ und dem Füllungsgrad den theoretischen Volumenstrom $\dot{V}_{ZRS,S}$, der durch die Schleuse gefördert werden muss:

$$\dot{V}_{ZRS,S} = \frac{100 \%}{\text{Füllungsgrad}} \cdot \frac{\dot{M}_S}{3,6 \cdot \rho_S} \quad (46)$$

Der Füllungsgrad der Schleuse ist in der Praxis 100 %. Es hat sich jedoch im Markt die Nutzung des Begriffs Füllungsgrad etabliert. Gemeint ist damit jedoch in der Regel die Reduzierung der Zulaufdicke um diesen Faktor. Eine Zelle wird zu 100% gefüllt, das dabei in die Zelle fließende Schüttgut ist aufgelockert und liegt nicht mit der Schüttdichte vor, sondern mit einer reduzierten Schüttdichte, auch Zulaufdicke genannt. Bei Zellenradschleusen für den pneumatischen Transport wird diese Zulaufdicke durch die Leckluft weiter reduziert. Je feiner und leichter ein Schüttgut ist und je größer die Druckdifferenz an der Schleuse ist, und somit, je größer die Leckluftmenge ist, die dem einfließenden Schüttgut entgegen strömt, desto geringer wird die Zulaufdicke. Das wird jedoch dann als Füllungsgrad beschrieben. Dem Programm ist eine Gleichung, für die für den Füllungsgrad in Abhängigkeit der Schüttdichte und der Druckdifferenz hinterlegt. Einflussgrößen wie Zulaufbedingungen,

Zellenradschleusengeometrie, Rotordrehzahl etc. sind nicht berücksichtigt. Somit dient dieser Wert als erste Orientierung. Auch hier ist eine finale Abstimmung dem Zellenradschleusenlieferanten notwendig. Bild 37 zeigt den Verlauf des Füllungsgrades mit der hinterlegten Gleichung in Abhängigkeit der Schüttdichte und der Druckdifferenz.

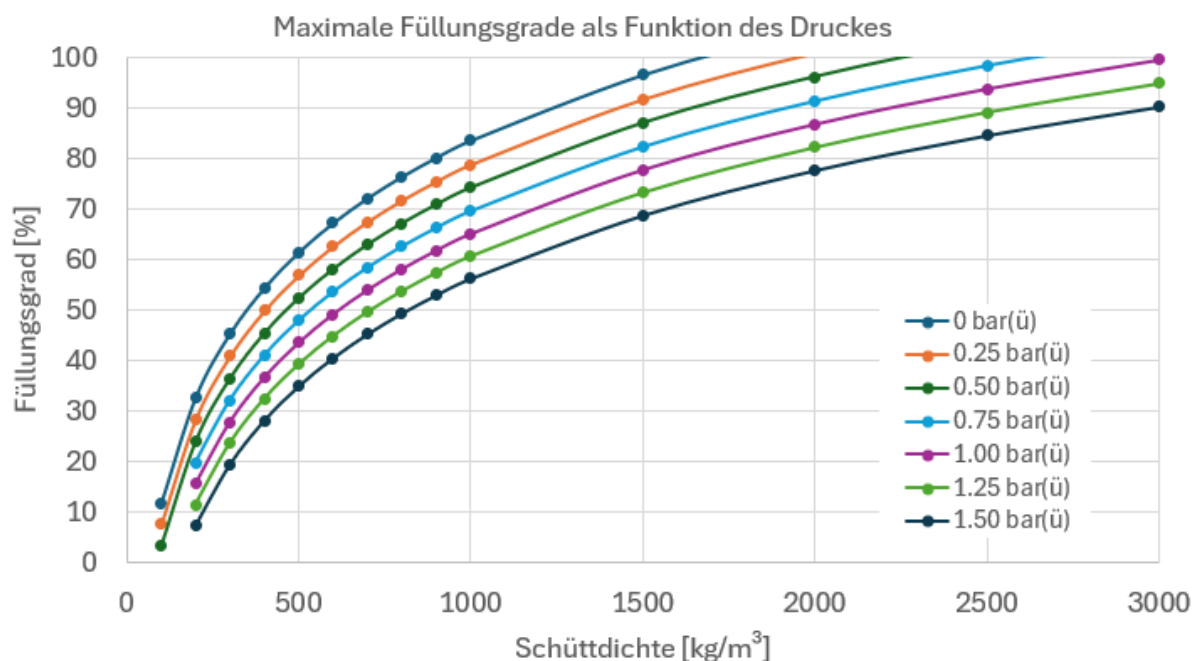


Bild 37: Füllungsgrad feiner Schüttgüter in Abhängigkeit der Schüttdichte und der Druckdifferenz

Die Drehzahl der Zellenradschleuse wird aus dem Rotorvolumen und dem theoretischen Volumenstrom des Schüttgutes bestimmt:

$$n_{ZRS} = \frac{\dot{V}_{ZRS,S} \cdot 60}{\text{Rotorvolumen}} \quad (47)$$

Die Leakagegasmenge wird in Nm³/h angegeben. Sie hängt im starken Maße von der Konstruktion der Zellenradschleuse ab. Die in der Tabelle aufgeführten Werte beziehen sich auf einen Spalt zwischen Rotor und Gehäuse von 0,2 mm im Betrieb. Der Spalt wird im Betrieb durch die Schüttguttemperatur bestimmt. Je wärmer das Schüttgut im Betrieb ist, desto mehr dehnt sich der Rotor aus. Er nimmt in der Regel innerhalb von Minuten die Temperatur des Schüttgutes an. Das Gehäuse erwärmt sich ebenfalls, jedoch nicht so stark wie der Rotor, da das Gehäuse die Wärme an die Umgebung abstrahlen kann. Somit ist der Spalt im Betrieb unter Berücksichtigung der maximalen Schüttguttemperatur zu definieren. Die Leakagegasmenge bezieht sich auf eine geschlossene Rotorkonstruktion (Bild 38 links). Wird eine offener Rotor, der in Durchblassschleusen eingesetzt wird, so ist die Leckluftmenge in erster Näherung um 50 % anzuheben. Die genauen Leckluftmengen erhalten Sie vom Zellenradschleusenlieferanten.

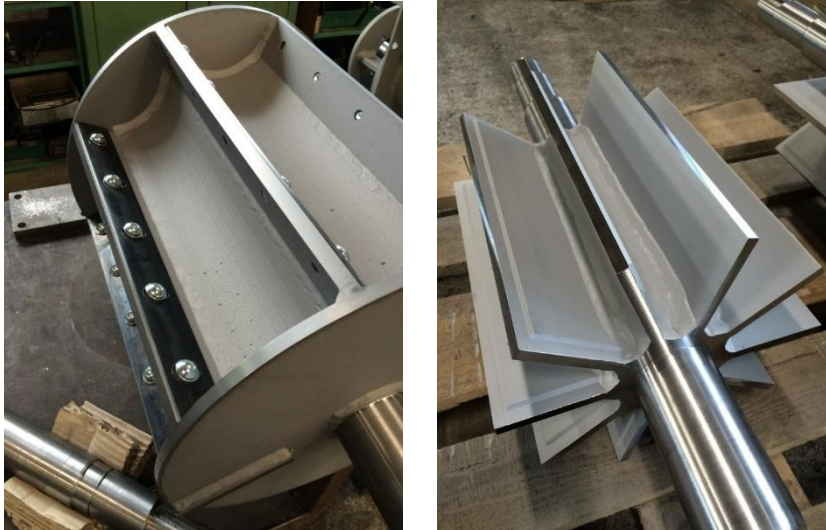


Bild 38: Foto eines offenen (rechts) und geschlossenen Rotors (links)

Folgende zusätzliche Hinweise sind im Programm aufgeführt:

- Bei ATEX-Anwendung ist die max. Umfangsgeschwindigkeit auf ≤ 1.0 m/s zu beschränken.
- Bei Fallhöhen des Schüttgutes vor der ZRS > 1 m ist der Füllungsgrad zu reduzieren. Durch das Fallen des Schüttgutes wird die Zulaufdichte reduziert und somit auch der Füllungsgrad.
- Zeigt das Schüttgut ein sehr gutes/langes Lufthaltevermögen, so ist der Füllungsgrad zu reduzieren. Durch die dem Schüttgut entgegenströmende Leckluft wird das Schüttgut aufgelockert. Bei feinen Schüttgütern (Geldart-Gruppe A & C) ist der Einfluss zu berücksichtigen.
- Eine ZRS als Einschleuseinheit direkt unter einem Silo kann zu starken Pulsationen führen, da die Leckluft nicht gleichmäßig abgeführt wird. Sie kann sich im Zulauf aufstauen, da sie nicht durch die Schüttgutsäule abströmen kann. Bei groben Schüttgütern (Geldart-Gruppe D) kann die Leckluft ungehindert durch die darüber liegende Schüttung abströmen. Je feiner ein Schüttgut wird, desto mehr Widerstand wird der Luft entgegengebracht.
- Leckluft ist bei feinen Schüttgütern (Geldart-Gruppe A & C) vom Einlaufschüttgutstrom zu separieren. Wir empfehlen die Installation von Leckluftsammlern um die Leckluft vom Einlauf zu separieren. Eine 100-ige Leckluftabführung ist zwar mit Leckluftsammlern auch nicht möglich, jedoch erhöht ein Leckluftsammler die Zulaufdichte im erheblichen Maße.
- Es empfiehlt sich ein leichter Unterdruck in der Entstaubungsleitung von -1 ... -3 mbar. Der Leckluftsammler sollte in einem geringen Unterdruck gehalten werden, damit sichergestellt ist, dass ausreichend Filterkapazität zur Verfügung steht.

- Der Verschleißschutz der Schleuse ist der Druckdifferenz und dem Abrasionsverhalten des Schüttgutes anzupassen.

6.7 Druckverlust von Luftleitungen nach VDI-Wärmeatlas

Dieses Modul berechnet den Druckverlust von horizontalen Luftleitungen und von 90° Bögen. Die Eingabedaten (Bild 39) dienen zur Berechnung der betrieblichen Fördergasgeschwindigkeit und Gasdichte. Sie sind für die Einphasenströmung neben den konstruktiven Daten (Rohrdurchmesser und Rohrrauigkeit) die relevanten Berechnungsparameter. Der Volumenstrom wird in Normbedingungen eingegeben. Die Rauigkeit wird der Tabelle 4, die im Programm hinterlegt ist, auf Basis des gewählten Werkstoffes (blaue Markierung in Bild 41) gewählt.

Material	Rauigkeit K (mm)
Bitumen-beschichtetes Gussrohr, neu	0.15
Gussrohr, neu	0.26
Gussrohr, rostig	4
Gussrohr, leicht gerostet	1.5
Betonrohr, glatter Putz	0.3
Betonrohr, grob	1.2
Kupferrohr, gezogen	0.0015
Stahlblech verzinkt, normal	0.15
Stahlblech verzinkt, glatt (Lüftungsrohr)	0.07
Bleirohr, gezogen	0.0015
Mauerwerk mit Standardfugen	1.3
Messingrohr, gezogen	0.0015
Kunststoffrohr	0.0015
Glatte Bretter	0.2
Genietetes Stahlrohr	0.9
Grobe Bretter	0.7
Stahlrohr geschweißt, gleichmäßig gerostet	0.4
Stahlrohr geschweißt, leicht gerostet	1.5
Stahlrohr geschweißt, neu	0.1
Stahlrohr geschweißt, gereinigt	0.2
Stahlrohr geschweißt, stark gerostet	4
Stahlrohr geschweißt, neu, bituminiert	0.02
Nahtloses Stahlrohr, nach Gebrauch gereinigt	0.2
Nahtloses Stahlrohr, mäßig gerostet/auflieg	0.4
Nahtloses Stahlrohr, stark aufliegend	3
Nahtloses Stahlrohr, neu	0.04

Tabelle 4: Absolute Rauigkeit K für verschiedene Materialien in [mm]

6.7.1 Druckverlust für 10m Rohrleitung

Aus dem Gegendruck und der Lufttemperatur wird der Druckverlust entsprechend Gleichung (8) iterativ bestimmt:

$$dp_F = \lambda_F \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot v_F^2 \cdot \frac{L_R}{d_R} \quad (8)$$

Eingabedaten		
Volumenstrom	600	Nm³/h
Druck am Ende	0	bar
Lufttemperatur	45	°C
Rohrinnendurchmesser	100	mm
Material	Nahtloses Stahlrohr, neu	-
Rauigkeit K	0.04	mm

Bild 39: Eingabedaten

Der Rohrreibungsbeiwert der Luft λ_F wird einmal für die laminare Rohrströmung ($Re < 2320$) und für die turbulente Rohrströmung ($Re > 2320$) bestimmt.

$$Re < 2320: \quad \lambda_F = \frac{64}{Re} \quad (48)$$

$$Re > 2320: \quad \lambda_F = \left(\frac{1}{2 \cdot \lg\left(\frac{d_R}{K}\right) + 1,14} \right)^2 \quad (49)$$

Ob der laminare oder der turbulente Ansatz gültig ist, wird farblich dargestellt. Sind die Zellen rot hinterlegt, so sind diese Berechnungsergebnisse nicht innerhalb des zugehörigen Reynolds Bereiches.

Druckverlust (10 m Rohrleitung)		
Laminar flow ($Re < 2320$)		
Widerstandsbeiwert	0.0005	-
Druckverlust	15.32	Pa
Druckverlust	0.15	mbar
Turbulent flow ($Re > 2320$)		
Widerstandsbeiwert	0.0159	-
Druckverlust	538.43	Pa
Druckverlust	5.38	mbar

Bild 40: Berechnungsergebnis für eine laminare und turbulente Strömung

Als Faustformel zur Berechnung des Druckverlustes von Luftleitungen kann Gleichung (50) genutzt werden:

$$dp_F = 0,02 \cdot \frac{\overline{\rho_F}}{2} \cdot v_F^2 \cdot \frac{L_R}{d_R} \quad (50)$$

Pro Bogen kann L_R um 5 m erhöht werden.

6.7.2 Druckverlust eines 90° Bogens

Für die Berechnung des Druckverlustes eines 90° Bogens gibt es im VDI-Wärmeatlas keinen allgemeingültigen Ansatz. Es wird der Werkstoff unabhängige gegebene Widerstandsbeiwert eines 90° Krümmers in Abhängigkeit des r/d -Verhältnisses für $Re > 10^5$ gewählt (Bild 43). Dieser Berechnungsweg ist ausreichend genau für Luftleitungen in pneumatischen Förderanlagen. Es zeigt sich, dass der Druckverlust eines Bogens engsten r/d -Verhältnisses von 1 bei kleiner ist als der Druckverlust einer 1 - 5 m horizontaler Rohrleitung.

Druckverlustberechnung eines 90° - Bogens

Entsprechend VDI Wärmeatlas gibt es keinen Ansatz zur Berechnung des Druckverlustes eines 90° Krümmers in Abhängigkeit des Werkstoffes und des Radius/Durchmesserverhältnisses (r/d), der allgemeingültig ist. Für $Re > 100.000$ kann der Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit des r/d -Verhältnisses für 90°-Bögen wie folgt bestimmt werden:

r/d-Verhältnis	3	-	
Widerstandsbeiwert	0.12	-	
Druckverlust	71.21	Pa	
Druckverlust	0.71	mbar	

Bild 41: Berechnungsergebnis für einen 90° Bogen

6.8 Geldart-Diagramm (in Bearbeitung)

Geldart [8] hat auf Basis eigener und fremder Messungen ein Klassifikationssystem entwickelt, das trockene Schüttgüter hinsichtlich ihres Fluidisationsverhaltens in Gas/Feststoff Wirbelschichten in vier Gruppen:

- A (aeratable),
- B (bubbles),
- C (cohesive),
- D – einteilt.

Auf der Ordinate ist die Differenz zwischen der Partikeldichte und der Gasdichte, auf der Abszisse ein kennzeichnender Partikeldurchmesser, in der Originalarbeit $d_{s,SD}$, hier vereinfachend und mit ausreichender Genauigkeit $d_{s,50}$, aufgetragen.

Den vier Gruppen werden folgende Eigenschaften zugeordnet:

GELDART GRUPPE D

- Große und / oder sehr schwere Partikel.
- Hohe Gasgeschwindigkeit im Wirbelbett.
- Gasblasengeschwindigkeit ist kleiner als Zwischenraumgasgeschw.
- Teilweise Bildung von so genannten „spouded beds“.
- Schlechtes Durchmischungsverhalten, evtl. Segregation von Teilchen.

GELDART GRUPPE B

- Blasenbildung setzt mit beginnender Fluidisierung ein.
- Geringe Ausdehnung des Wirbelbettes.
- Nach Abschaltung der Fluidisierluft kollabiert das Wirbelbett sehr schnell.
- Gasblasen steigen deutlich schneller als das Zwischenraumgas.
- Keine Obergrenze für das Blasenwachstum.

GELDART GRUPPE A

- Feinkörnige Partikel und / oder geringere Partikeldichte.
- Starke zwischenpartikuläre Kräfte.
- Blasengröße in einer Wirbelschicht ist relativ klein.
- Nach Abschaltung der Fluidisierung kollabiert das Wirbelbett sehr langsam.
- Gasblasengeschwindigkeit ist höher als Zwischenraumgasgeschwindigkeit.

GELDART GRUPPE C

- Hohe zwischenpartikuläre Kräfte.
- Schwer zu fluidisieren.
- Bett wird wie ein Kolben in einem Zylinder angehoben.
- Rattenlochbildung (einzelne bis zur Bettoberfläche reichende freie Kanäle).
- Fluidisation lässt sich meist nur durch Einsatz mech. Rührer erzwingen.

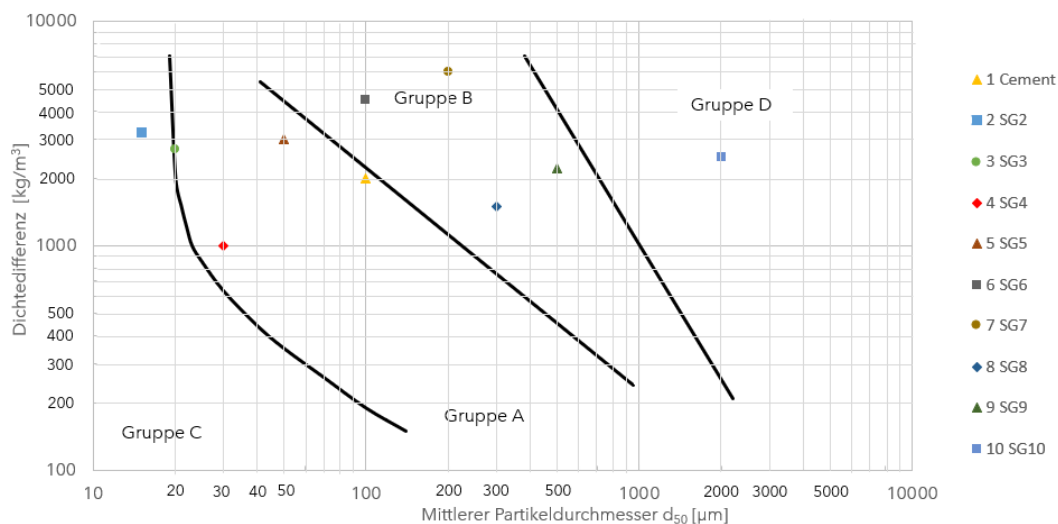


Bild 42: Geldart-Diagramm mit beispielhaft eingetragenen Schüttgütern

In dem Programm sind beispielhaft einige Schüttgutdaten eingetragen. Die grauen Felder sind zu füllen, damit positioniert sich die entsprechende Markierung im Diagramm. Bis zu 10 Schüttgüter können im Diagramm gleichzeitig dargestellt werden.

7 Symbolverzeichnis

Lateinische Zeichen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
Ar	[-]	Archimedes-Zahl
A_R	[m ²]	Rohrquerschnittsfläche
c_{SL}	[-]	Schlupf
d_s	[m]	Partikeldurchmesser
$d_{S,50}$	[m]	Mittlerer Partikeldurchmesser
$d_{S,SD}^*$	[m]	Sauter-Durchmesser
d_R	[m]	Rohrdurchmesser
g	[m/s ²]	Gravitationsbeschleunigung
H_R	[m]	Höhe, Höhenlage
L_R	[m]	Rohrleitungsabschnittslänge
$\dot{m}$	[kg/s]	Massenstrom
n_{ZRS}	[1/min]	Drehzahl der Zellenradschleuse
p	[N/m ²]	Druck
T	[K],[°C]	Temperatur
v_F	[m/s]	Fluidgeschwindigkeit (Leerrohrgeschwindigkeit)
v_S	[m/s]	Schüttgutgeschwindigkeit, Partikelgeschwindigkeit
$\dot{V}$	[m ³ /s]	Volumenstrom
w_{Tr}	[m/s]	Sinkgeschwindigkeit der Einzelpartikel

Griechische Zeichen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
α	[K ⁻¹]	Längenausdehnungskoeffizient
Δ	[-]	Differenz
ε	[-]	Volumenanteil
ε_F	[-]	Volumenanteil des Fluides
ε_S	[-]	Volumenanteil des Schüttgutes
η_F	[Pas, kg/(m·s)]	Dynamische Viskosität des Fluides
λ_F	[-]	Rohrreibungsbeiwert
λ_{fi}	[-]	Widerstandsbeiwert einer Einaute
μ	[-]	Beladung
ρ	[kg/m ³]	Dichte

ρ_F	[kg/m ³]	Fluiddichte
ρ_P	[kg/m ³]	Partikeldichte
ρ_S	[kg/m ³]	Schüttdichte

Indizes

Symbol	Bezeichnung
<i>ac</i>	Beschleunigung (acceleration)
<i>be</i>	Bogen (bend)
<i>F</i>	Fluid
<i>fi</i>	Fitting
<i>ges</i>	Gesamt
<i>ho</i>	horizontal
<i>in</i>	In den Bilanzraum einströmend
<i>out</i>	Aus dem Bilanzraum ausströmend
<i>s</i>	Solid / Schüttgut
<i>to</i>	total
<i>ve</i>	vertikal

8 Literatur

- [1] Muschelknautz, E., Krambrock, W.: Vereinfachte Berechnung horizontaler pneumatischer Förderleitungen bei hoher Gutbeladung. Chemie Ingenieur Technik 41, 1164/72, Jahr 1969
- [2] Siegel, W.: Pneumatische Förderung. Würzburg, Vogel Verlag, 1991
- [3] Stegmaier, W.: fördern + heben. 28/5,6, S.363 – 366, 1978
- [4] Marcus, R.D.; Rizk, F.; Meijers, S.J.: Solids handling. In: Ullmann's Encyclopedia of industrial chemistry, 7. Aufl, Wiley-VCH, Weinheim (2002)
- [5] Hilgraf, P.: Pneumatische Förderung. Springer, Berlin (2019)
- [6] Weber, M.: Strömungsfördertechnik. Krausskopf-Verlag (1973)
- [7] Dhodapkar, S. V.; Klinzing, G. E.: Pressure fluctuations in pneumatic conveying systems. Powder Technology 74/2 (1993), 179-195
- [8] Blasius, H.: Das Ähnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten. Forschungsarbeiten des VDI, Heft 131 (1913)
- [9] Moody L.F.: Friction factors of pipe flow. Trans Am Soc Mech Eng 66 (1944), S. 671-684
- [10] Stegmaier, W.: Zur Berechnung der horizontalen pneumatischen Förderung feinkörniger Feststoffe. F+h-fördern und heben 28, Nr. 5/6 (1978), S.363-366
- [11] Sharma, A.; Mallick, S.S.: Modelling pressure drop in bends for pneumatic conveying of fine powders. Powder Technology 356 (2019), S.273-283
- [12] Mason, D.J.; Levy, A.; Marjanovic, P.: The influence of bends on the performance of pneumatic conveying systems. Advanced Powder Technology Vol.9/3 (1998), S.197-206
- [13] Bohnet, M.: Fortschritte bei der Auslegung pneumatischer Förderanlagen. Chem.-Ing.-Tech. 55/7 (1983), S.524-539
- [14] Sharma, K.; Mallick, S.S.; Mittal, A.; Wypych, P.: Modelling solids friction for fluidized dense-phase pneumatic conveying. Particulate science and technology, Vol. 20/4 (2020), S.391-403
- [15] Setia, G.; Mallick, S.S.; Pan, R.; Wypych, P.: Modelling solids friction factor for fluidized dense-phase pneumatic transport of powders using two layer flow theory. Powder Technology 294 (2016), S.80-92
- [16] Molerus, O.: Zur Beschreibung feststoffbeladener Strömungen. Chem.-Ing.Tech. 49/12 (1977), S. 945-955
- [17] Siegel, W.: Experimentelle Untersuchungen zur pneumatischen Förderung körniger Stoffe in waagerechten Rohren und Überprüfung der Ähnlichkeitsgesetze. VDI-Forschungsheft 538. Düsseldorf: VDI-Verlag (1970)

- [18] Jones, M.G.; Williams, K.C.: Solids Friction Factors for Fluidized Dense-Phase Conveying. *Particulate Science and Technology* 21 (2003), S.45-56
- [19] Chamber, A.J.; Marcus, R.D.: Pneumatic conveying calculations, *Proceedings of 2nd International Conference on Bulk Materials Storage. Handling and transportation, Wollongong Australia (1968)*, S.49-52
- [20] Westmann, M.A.; Michaelidis, E.E.; Thomson, F.M.: Pressure losses due to bends in pneumatic conveying. *J.Pipelines* 7 (1987), S.15-20
- [21] Pan, R.: *Improving Scale-up Procedures for the Design of Pneumatic Conveying Systems (1992)*
- [22] Pan, R.; Wypych, P.W.: Dilute and dense phase pneumatic conveying of fly ash. *Proc.6th Int. Con. Bulk Mater, Storage Transp. Wollongong Australia (1998)*, S.183-189
- [23] He, C.; Chen, X.; Wang, J.; Ni, H.; Xu, Y.; Zhou, H.; Xiong, Y.; Shen, X.; Chunhui, H.; Xianmei, C.; Jianhao, W.; Hongliang, N.; Yupeng, X.; Haijun, Z.; Yuanquan, X.; Xianglin, S.: Conveying characteristics and resistance characteristics in dense phase pneumatic conveying of rice husk and blendings of rice husk and coal at high pressure. *Powder Technol.* 227 (2012), S.51-60
- [24] Cai, L.; Liu, S.; Pan, X.; Guiling, X.; Gaoyang, Y.; Xiaoping, C.; Changsui, Z.: Comparison of Pressure drops through different bends in dense-phase pneumatic conveying system at high pressure. *Exp.Thermal Fluid Sci.* 57 (2014), S. 11-19
- [25] Papai, L.: Pneumatic grain conveying. *Hungarian Bulletin Nr. XII/I-4 of the department VI. Hungarian Academy of Science Budapest (1954)*
- [26] Vollheim, R.: Der pneumatische Transport staubförmiger Güter in senkrechten Rohrleitungen in Verbindung mit Einschleusung durch Wirbelschichten. *Maschinenbautechnik* 6/5 (1967), S. 237-241
- [27] Schuchart, P.: Widerstandsgesetze für den Feststofftransport in geraden Rohren und Rohrkrümmern. *Dissertation Technische Universität Berlin (1968)*
- [28] Siegel, W.: Berechnung von pneumatischen Saug- und Druckförderanlagen. *Fördern und Heben* 33 (1983), Nr. 10 S.737-740, Nr. 11 S. 817-822
- [29] Vogt, E.G.; White, R.R.: Friction in the flow of suspension. *Ind.Engng.Chem.* 40/9 (1948), S. 1731-1738
- [30] Hitchcock, J.A.; Jones. C.: The pneumatic conveying of spheres through straight pipes. *British Journal of applied Physics* 9/6 (1958), S. 218-222
- [31] Weber, M.: Grundlagen der hydraulischen und pneumatischen Rohrförderung. *VDI-Bericht 371, Transrohr 80 VDI Verlag Düsseldorf (1980)*, S. 23-29
- [32] Siegel, W.: *Pneumatische Förderung. Vogel Buchverlag (1991)*

- [33] Weber, M.: Correlation analysis in the design of pneumatic transport plant. Bulk solids handling 2 (1982), S.231-233
- [34] Werner, D.: Einfluss der Korngrößenverteilung bei der pneumatischen Dichtstromförderung in vertikalen und horizontalen Rohren. Dissertation TH Karlsruhe (1982)
- [35] Gasterstädt, J.: Die experimentellen Untersuchungen des pneumatischen Fördervorganges. VDI-Forschungsheft 265 (1924)
- [36] Capes, C.E.; Nakamura, K.: Vertical Pneumatic Conveying: An Experimental Study with Particles in the Intermediate and Turbulent Flow Regimes. The Canadian Journal of Chemical Engineering 51 (1973), S.31-38
- [37] Yang, W.-C.: Correlations for Solid Friction Factors in Vertical and horizontal Pneumatic Conveyings. AIChE 20/3 (1974), S.605-607
- [38] Patro, P., Dash, S., K.: Two-fluid modelling of turbulent particle-gas suspensions in vertical pipes. Powder Technology 264 (2014). S.320-331
- [39] Plasynski, S., I., Klinzing, E.G.: High-pressure vertical pneumatic transport investigation. Powder Technology 79 (1994), S.95-109
- [40] Kerker, L.: Druckverlust und Partikelgeschwindigkeit bei der vertikalen Gas-Feststoffströmung. Verfahrenstechnik 11/9 (1977), S.549-557
- [41] Stegmaier, W.; Weber, M.: Untersuchungen zur pneumatischen Dichtstromförderung in horizontalen und vertikalen Rohren. Verfahrenstechnik 12/12 (1978), S.794-799
- [42] Zenz, F. A., Othmer, F.D.: Fluidization and Fluid-Particle Systems. Reinhold chemical Engineering Series (1960)
- [43] Muschelknautz, E.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Druckverluste pneumatischer Förderleitungen unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von Gutreibung und Gutgewicht. VDI 476 (1959)
- [44] https://www.youtube.com/watch?v=48VxWo_qpMA
- [45] Jenike AW (1964) Storage and flow of solids. Bull. No. 123, Engng. Exp. Station, Univ. Utah, Salt Lake City
- [46] Hilgraf, P.: Auslegung pneumatischer Dichtstromförderung auf der Grundlage von Förderversuchen - Untersuchungen zum Scale-up. ZKG 42/11, Bauverlag, 1991.
- [47] Geldart, D.: Types of gas fluidization. Powder Technology 7, S.285-292, 1973