



SCHWEDES + SCHULZE

SCHÜTTGUTTECHNIK - SILO - PNEUMATIK

Pneumatische Förderung



Über Schwedes + Schulze Schüttguttechnik GmbH



SCHWEDES + SCHULZE

SCHÜTTGUTTECHNIK - SILO - PNEUMATIK

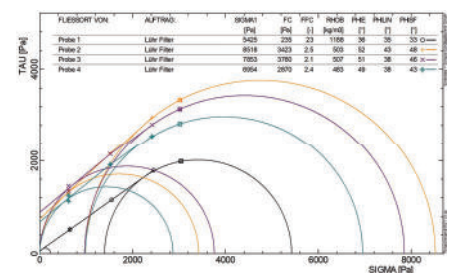
1991 von Prof. Dr. Jörg Schwedes und Prof. Dr. Dietmar Schulze gegründet.

Arbeitsgebiete Silotechnik

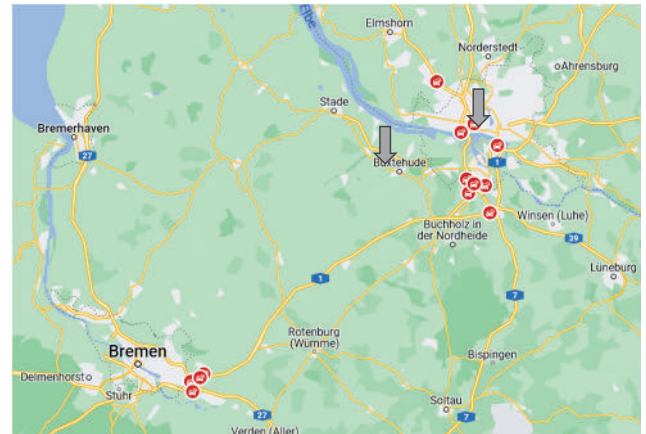
- Verfahrenstechnische Siloauslegung zur Vermeidung der „8 Siloprobleme“.
- Messen von Fließeigenschaften.
- Ermittlung der Daten zur Bestimmung der Kennwerte nach DIN EN 1991-4.
- Optimierung von Siloanlagen.
- Gutachten zu Siloschäden.

Arbeitsgebiete Pneumatische Förderung

- Verfahrenstechnische Dimensionierung pneum. Förderanlagen.
- Energieoptimierung.
- Leistungssteigerung.
- Troubleshooting.



- Geboren 1975, verheiratet, 2 Kinder
- Ausbildung zum Chemiefacharbeiter (Chemikant)
- Studium der Verfahrenstechnik in HH → Diplom
- 10 Jahre Produktlinienmanager bei der Claudius Peters GmbH / Claudius Peters Projects GmbH in Buxtehude für die Bereiche Silotechnik / pneumatische Förderung / PCI Technik
- 12 Jahre Leiter Anlagenbau bei der KREISEL GmbH & Co. KG für die Bereiche Silotechnik & pneumatische Förderung am Standort Hamburg
- Seit 2023 Inhaber der Schwedes + Schulze Schüttguttechnik GmbH in Apensen (Niedersachsen)



Begriffe

- Granulat: $d_{50} > 100 \mu\text{m}$
- Feines Schüttgut: Pulver = Puder = Staub: $d_{50} < 100 \mu\text{m}$
- Druck:
- Kraft / Fläche mit der SI-Einheit [Pa]
 - 100.000 Pa = 1 bar
 - In der Regel wird über Überdrücke bar(ü) gesprochen, selten von Absolut-Drücken bar(abs):
1bar(ü) → 2,013 bar(abs) [bei 0 m Höhenlage]
 - 1 bar entspricht 10 t Gewicht auf 1 m² Fläche!
- Rückdruck: Druck in einer Förderleitung inkl. Beschleunigungsdruckverlust, ohne Zusatzdruckverluste durch die Einschleusorgane oder z.B. Düsen, Trockner, Kühler
- Beladung μ : Massenstrom Schüttgut pro Massenstrom Luft [kg/kg]
Bsp.: 1 Zementsack (25 kg) in 1 m³ Luft entspricht einer Beladung von 21 kg/kg

Bezeichnung	Bezugstemperatur	Bezugsdruck	Bemerkung	Relative Feuchtigkeit	Schreibweise	Bemerkung
Normbedingung	273,15 K = 0°C	1,01325 bar(abs)	DIN1343	0 %	Nm ³ , m _n ³	Europa
Standardbedingungen	293,15 K = 20°C	1,0 bar(abs)	IUPAC/DIN1217	0 %	-	Chemie
Standardbedingungen	293,15 K = 20°C	1,0 bar(abs)	DIN1945-1	p(H ₂ O) = 0 Pa (trocken)	-	Druckluftindustrie
Standardbedingungen	293,15 K = 20°C	1,0 bar(abs)	ISO8778	65 %rF	-	Druckluftindustrie
ISA	288,15 K = 15°C	1,01325 bar(abs)	ISO2533	0 %	-	Luftfahrt

Norm: 0 °C, 1,013₍₂₅₎ bar(abs)

Einheit Unité Unit	bar	mbar	Pa N/m ²	kPa kN/m ²	MPa MN/m ²	at kp/cm ²	atm	mmWS mmCE kp/m ²	mWS mCE 10 ³ kp/m ²	Torr mmHg mmQS	psi lbf/in ²	kgf/cm ²
1 bar	1	1'000	10 ⁵	100	0.1	1.02	0.987	1.02 · 10 ⁴	10.2	750	14.5	1.02
1 mbar	0.001	1	100	0.1	10 ⁻⁴	1.02 · 10 ⁻³	0.987 · 10 ⁻³	10.2	0.0102	0.750	0.0145	1.02 · 10 ⁻³
1 Pa 1 N/m²	10 ⁻⁵	0.01	1	0.001	10 ⁻⁶	1.02 · 10 ⁻⁵	0.987 · 10 ⁻⁵	0.102	1.02 · 10 ⁻⁴	0.0075	1.45 · 10 ⁻⁴	1.02 · 10 ⁻⁵
1 kPa 1 kN/m²	0.01	10	1'000	1	0.001	0.0102	9.87 · 10 ⁻³	102	0.102	7.5	0.145	0.0102
1 MPa 1 MN/m²	10	10 ⁴	10 ⁶	1'000	1	10.2	9.87	1.02 · 10 ⁵	102	7'500	145	10.2
1 at 1 kp/cm²	0.981	981	0.981 · 10 ⁵	98.1	0.0981	1	0.968	10 ⁴	10	736	14.22	1
1 atm	1.013	1'013	1.013 · 10 ⁵	101.3	0.1013	1.033	1	1.033 · 10 ⁴	10.332	760	14.696	1.033
1 mmWS 1 mmCE	0.981 · 10 ⁻⁴	0.098	9.807	9.81 · 10 ⁻²	9.81 · 10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	9.68 · 10 ⁻⁵	1	0.001	0.0736	1.422 · 10 ⁻³	10 ⁻⁴
1 mWS 1 mCE	0.0981	98.07	9'807	9.81	9.81 · 10 ⁻³	0.1	0.0968	1'000	1	73.6	1.422	0.1
1 Torr 1 mm Hg	1.333 · 10 ⁻³	1.333	133.322	0.133	0.133 · 10 ⁻³	1.36 · 10 ⁻³	1.316 · 10 ⁻³	13.595	1.359 · 10 ⁻²	1	1.934 · 10 ⁻²	1.36 · 10 ⁻³
1 psi 1 lbf/in²	6.895 · 10 ⁻²	68.95	6'895	6.895	6.895 · 10 ⁻³	7.031 · 10 ⁻²	0.06805	703.1	0.7031	51.7	1	7.031 · 10 ⁻²
1 kgf/cm²	0.981	981	0.981 · 10 ⁵	98.1	0.0981	1	0.968	10 ⁴	10	736	14.22	1

- Hohe Anpassungsfähigkeit der Förderstrecke 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 (+)

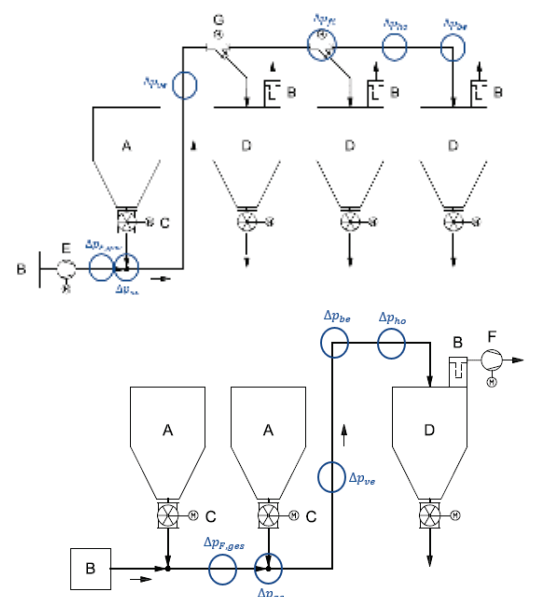
- Vergleichsweise hoher Leistungsbedarf (-),
- Verschleiß von Rohrleitungen und Einschleusorganen (-),
- Bis ca. 10 mm Körnung wirtschaftlich einsetzbar (-),
- Produktabrieb, der ggf. aufwändige Förderluftreinigungen erforderlich macht (-),
- Gefährdung durch Staubexplosionen (-),
- Schallemissionen der Druckerzeuger und bei Granulaten der Rohrleitung (-).

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

Druckverlusttherme Druckförderung

Der Gesamt-Druckverlust Δp_{ges} einer Förderanlage setzt sich aus den in den Abbildungen dargestellten Druckverlusttermen zusammen:

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



$$\Delta p_{ges} = \Delta p_{F,ges} + \Delta p_{S,ac} + \Delta p_{S,ve} + \Delta p_{S,fi} + \Delta p_{S,ho} + \Delta p_{S,be}$$

$$-\Delta p_{S,ho} = \mu \cdot \lambda_S \cdot \frac{\Delta L_R}{D_R} \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot v_F^2$$

Der pneumatische Transport erfolgt aufgrund von Impulsübertragung zwischen der Luft und der Schüttgutpartikel.

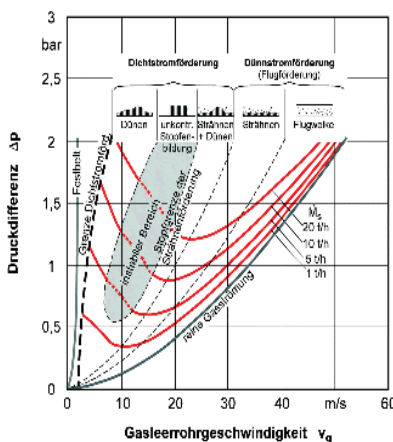
$$I = m \cdot v$$

Impuls: Bewegungszustand eines Objektes / einer Partikel [kg x m/s], [Ns]

m = Masse !!!!! [kg]

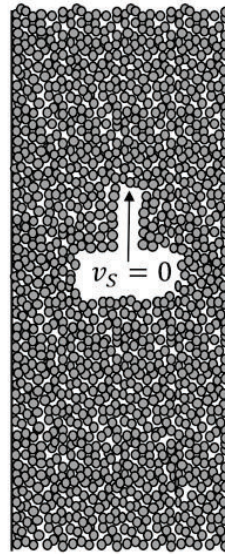
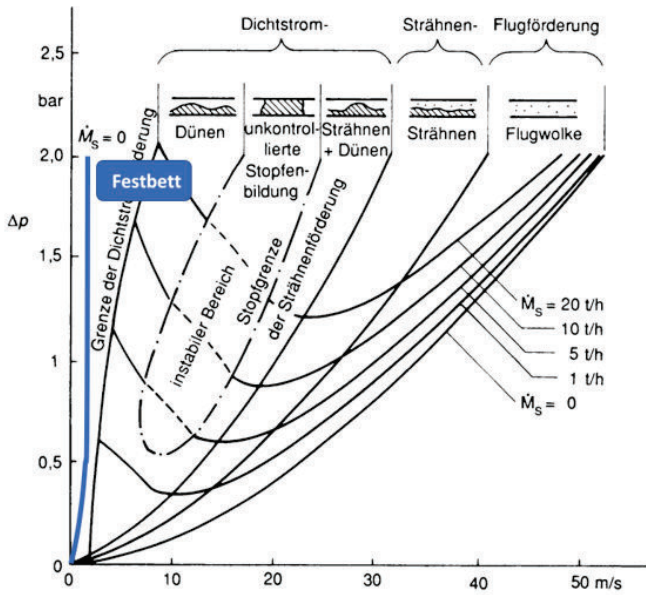
v = Geschwindigkeit [m/s]

Zustandsdiagramm



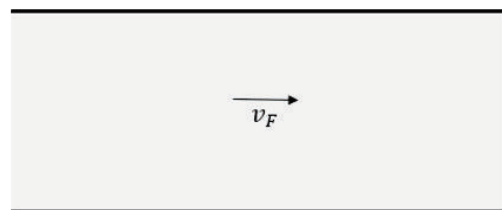
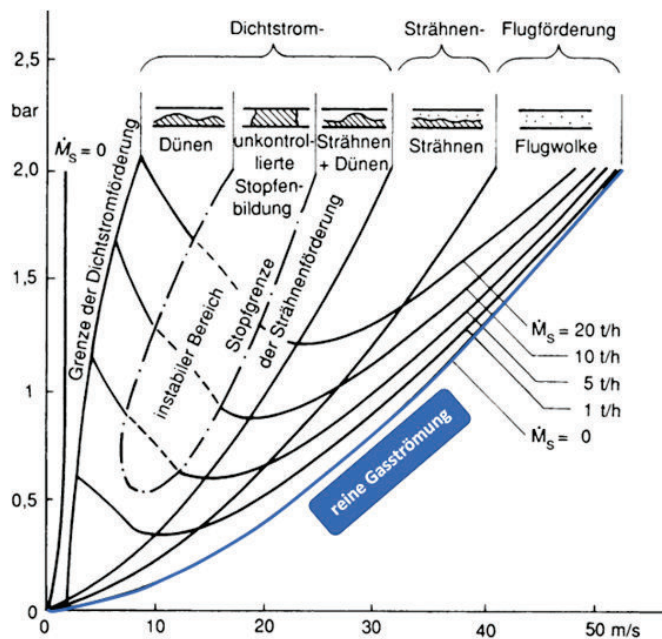
- Die für die Ermittlung der Widerstandsbeiwerte λ_s durchzuführenden Förderversuche werden in der Regel in einem Zustandsdiagramm oder auch Förderdiagramm genannt (engl.: state diagram or two-phase flow diagram), aufgetragen.
- Das durch Zenz und Othmar 1960 [4] eingeführte Diagramm zeigt die Förderzustände, die sich beim pneumatischen Transport einstellen.
- Dabei wird der Druckverlust Δp über der Luftgeschwindigkeit v_F aufgetragen.
- Ein Zustandsdiagramm kann für den horizontalen, vertikalen oder gesamten Rohrleitungsverlauf erstellt werden. Ein jedes Diagramm ist ausschließlich für den Rohrdurchmesser und den Rohrleitungsverlauf (Rohrleitungslänge, Anzahl und Position der Umlenkungen, Hubstrecken) und die Kombination Feststoff und Fördergas gültig, für die die zugehörigen Förderversuche durchgeführt wurden.
- Die Abbildung zeigt ein Zustandsdiagramm nach Muschelknautz [5].

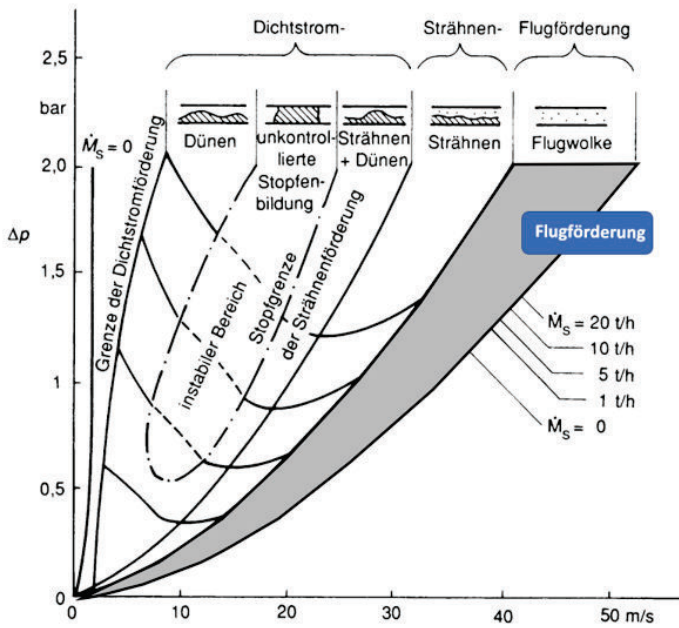
Zustandsdiagramm - Festbett



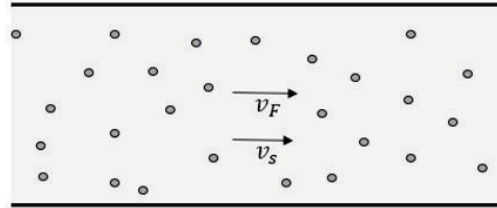
- Links dieser Kurve ist kein pneumatischer Transport von Schüttgut möglich.
- Das Rohr ist vollständig mit dem in Ruhe befindlichen Schüttgut gefüllt.
- Gas, welches das Schüttgut durchströmt, fließt mit einer Geschwindigkeit unterhalb der Lockerungspunktgeschwindigkeit.

Zustandsdiagramm – reine Gasströmung

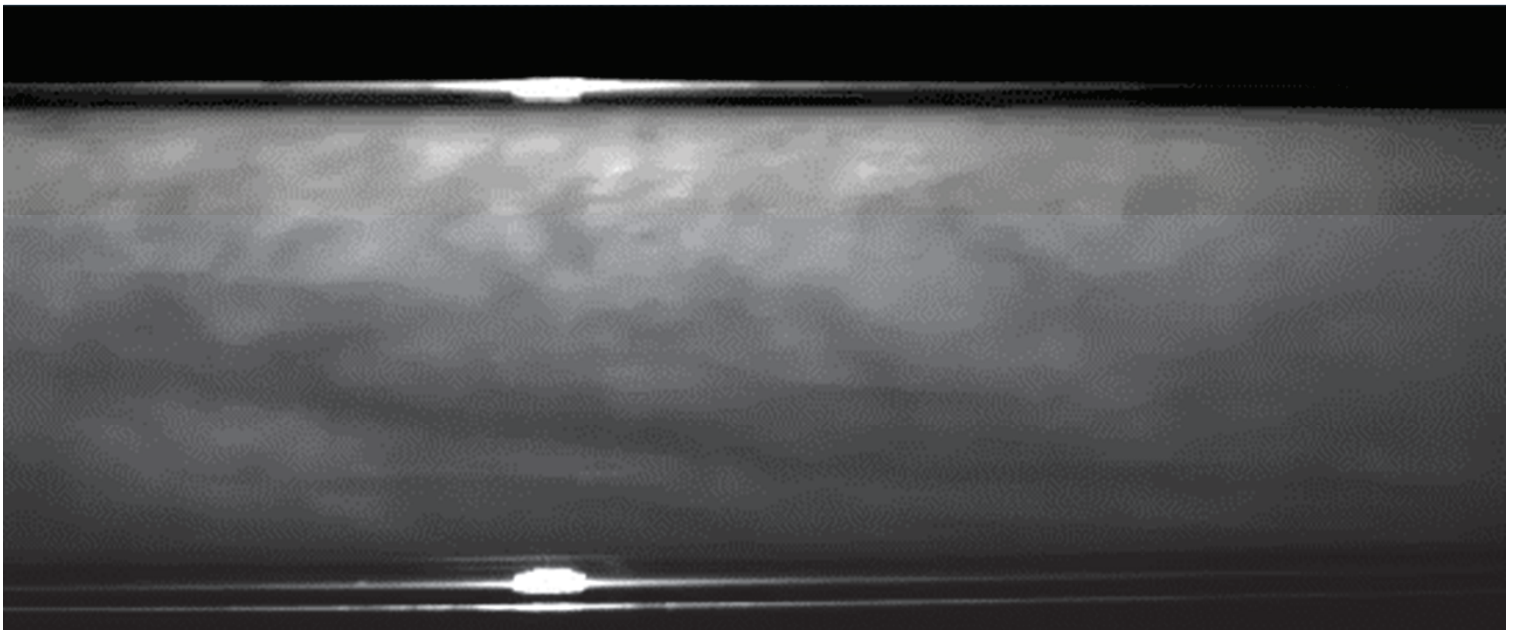


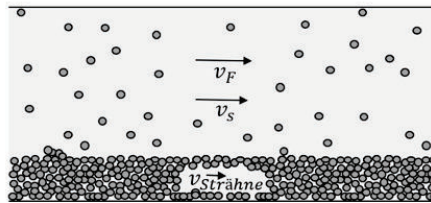
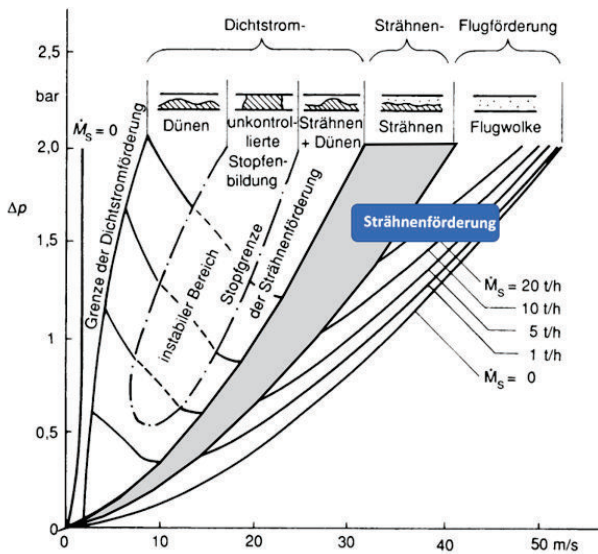


- Wird der Gasströmung bei hoher Strömungsgeschwindigkeit v_F Schüttgut hinzugegeben und bleiben alle Partikel über den Rohrquerschnitt annähernd gleich verteilt, so liegt eine Flugförderung vor.

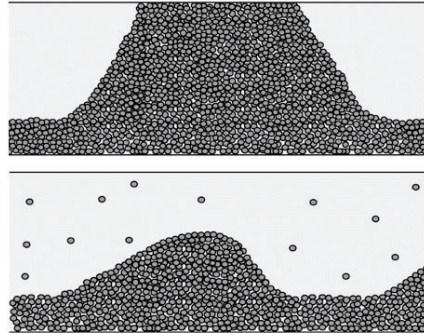
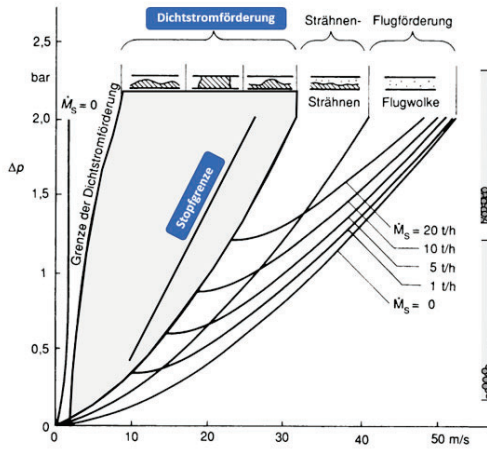


Video Flugförderung

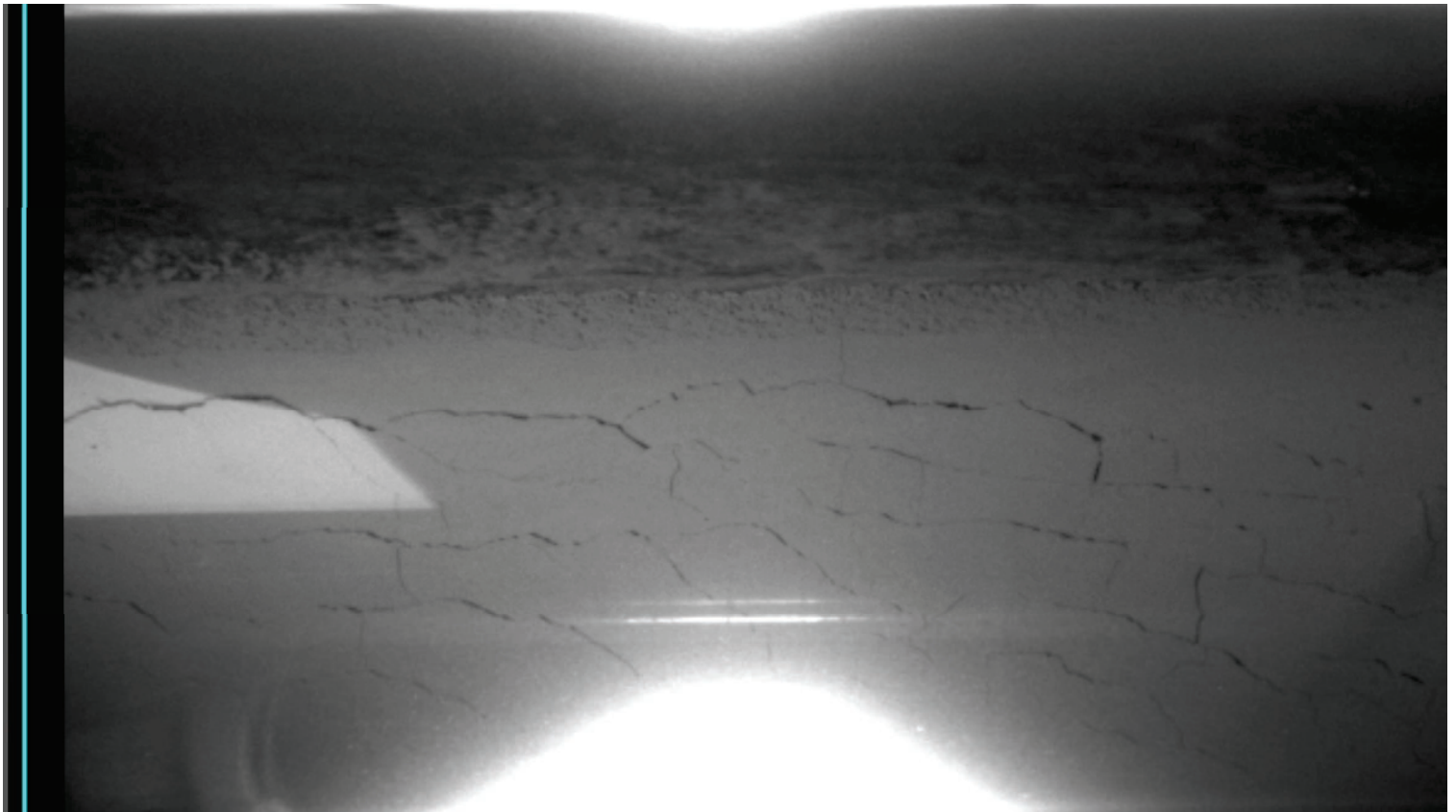


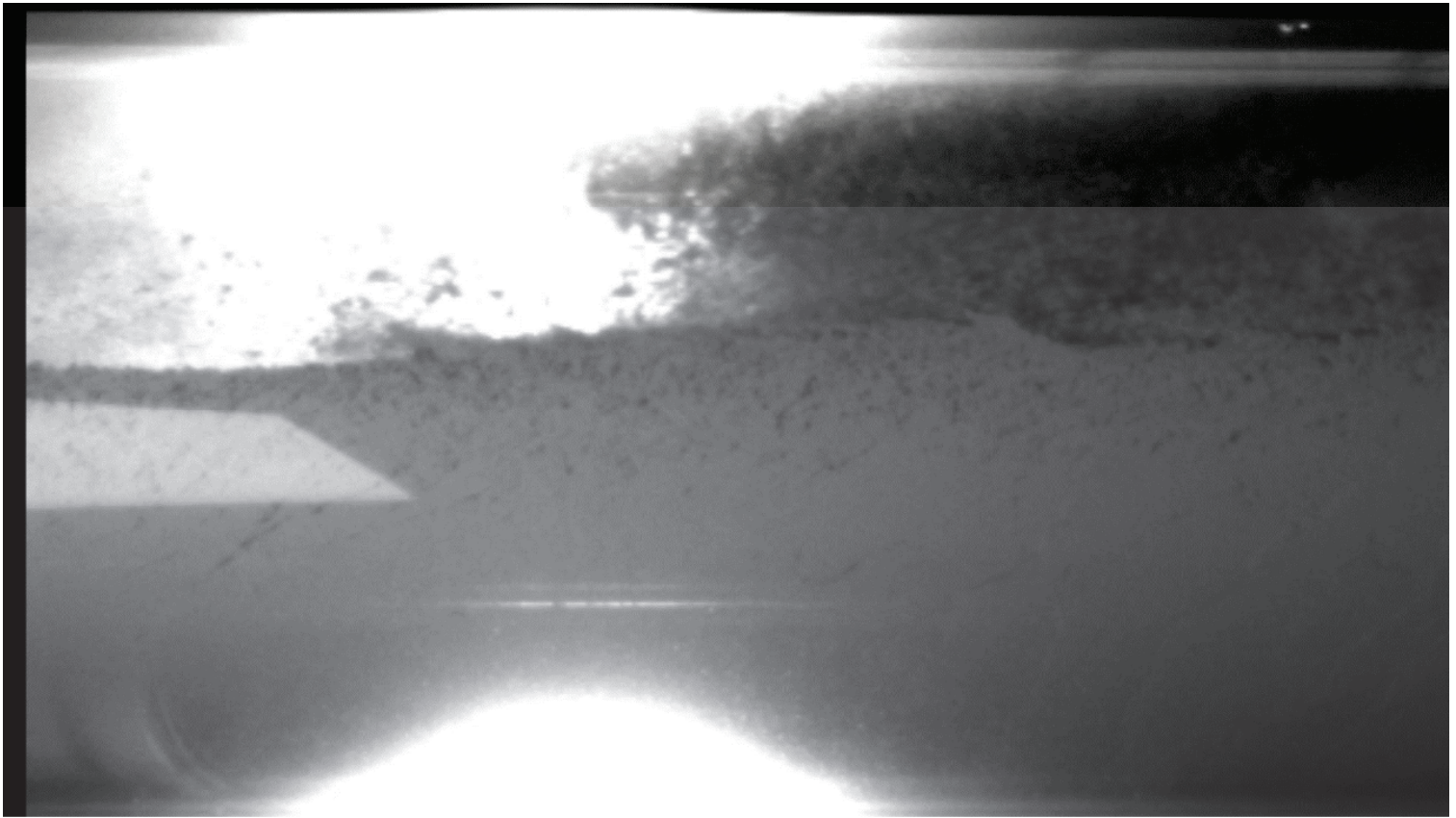


- Der Übergang zwischen den Strömungsformen ist bei Granulaten mit einer Monokornverteilung abrupt und eindeutig identifizierbar.
- Bei Unterschreitung der Sedimentationsgeschwindigkeit fällt nahezu das gesamte Schüttgut aus der Flugphase aus und strömt am Rohrboden weiter. Meistens wird dabei der Bereich der reinen Strähnenförderung übersprungen und es entsteht eine Strähnenförderung mit darüber hinweg laufenden Dünen und Ballen unten.
- Bei Granulatförderung ist dieses der Punkt des Druckverlustminimums.
- Feinkörnige Schüttgüter liegen in der Regel nicht als Monokorn vor. Die Korngrößenverteilung sorgt dafür, dass das Schüttgut bei Reduzierung über einen Geschwindigkeitsbereich hinweg aus dem Luftstrom ausfällt und als Strähne über den Rohrboden gleitet.
- G.Welschof [1] hat in detaillierten Messungen nachgewiesen, dass mit zunehmender Beladung μ und abnehmender Luftgeschwindigkeit das Strömungsprofil der Luft über dem Rohrquerschnitt asymmetrisch wird [2]. Die Luft strömt dabei vor allem in der oberen Rohrhälfte.
- Die Grenzgeschwindigkeit am Übergang von der Flugförderung zur Strähnenförderung wird Sedimentationsgeschwindigkeit $v_{F, Sa}$ (engl.: saltation velocity) genannt.

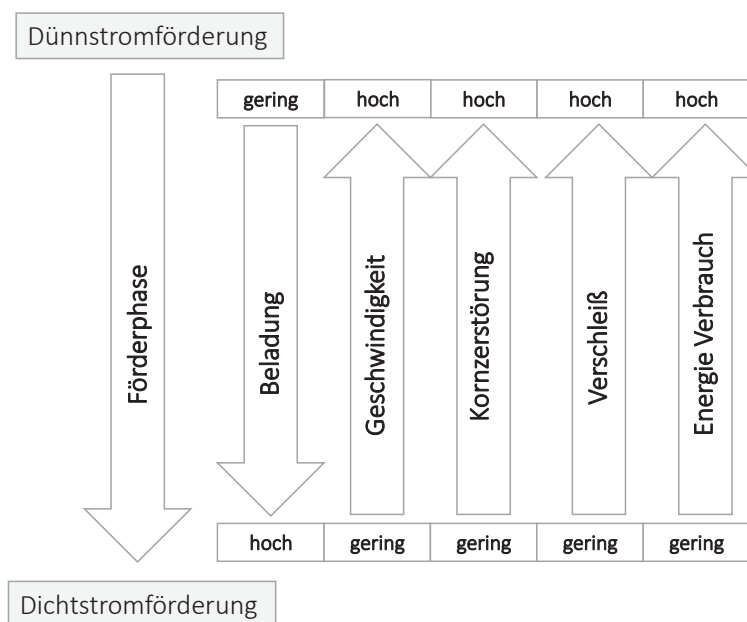
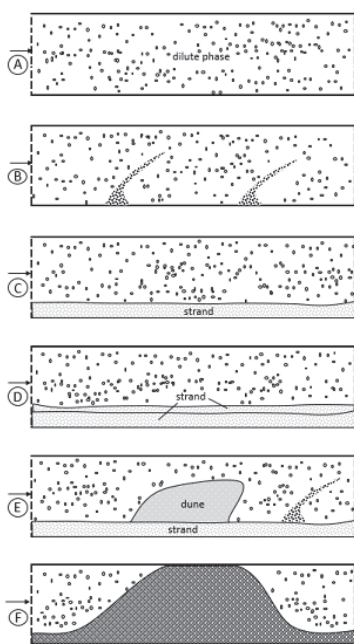


- Wird die Fördergeschwindigkeit weiter gesenkt, so fällt weiter Schüttgut aus der Flugphase aus. Am Rohrboden bilden Sie Ablagerungen, die von Dünen oder Strahlen überströmt werden.
- Die Förderung von Pfropfen wird auch als Dichtstromförderung bezeichnet. Die Pfropfen werden jedoch aktiv erzeugt, indem die Schüttgut- und Luftzugabe geregelt wird.

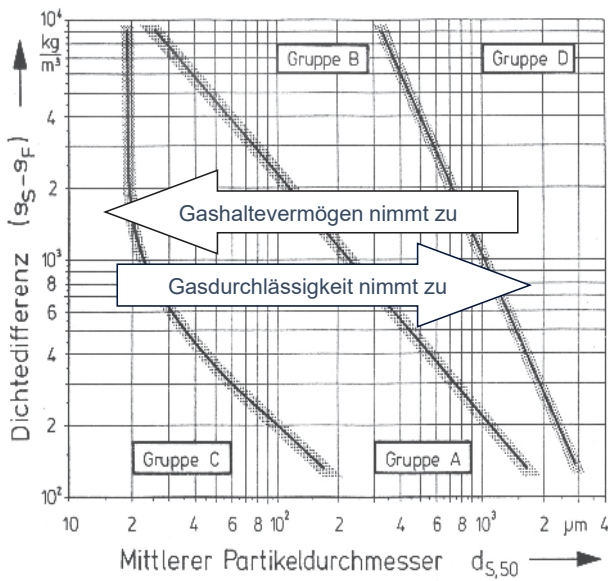




Dichtstrom vs. Dünnstrom

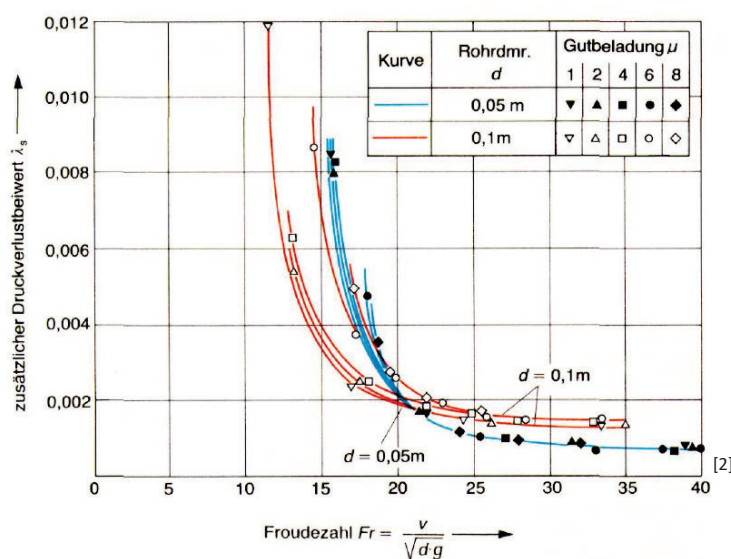


Geldart Klassifikation



- 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.

horizontaler Druckverlust durch Feststoffreibung



$$\Delta p_{ho} \propto \text{Massenstrom} \cdot \text{schüttgutspez. Wert} \cdot \frac{\text{Rohrlänge}}{\text{Rohrdurchmesser}} \cdot \text{Geschwindigkeit}$$

Der Druckverlustbeiwert kann nur auf Basis von Förderversuchen bestimmt werden. Er kann nicht auf Grundlage von Labor-Schüttgutuntersuchungen berechnet werden!!!!



Einschleusorgan	Schnecken- pumpe	Druck- gefäß	Düsen- förderer	Zellenrad- schleuse
max. Material Volumenstrom [m³/h]	500	400	6	300
max. Förderlänge [m]	1.000	10.000	100	1.000
max. Förderdruck [bar]	1,5 (2,5)	20	0.15	1,5 – 3,5*
max. Temperatur [°C]	250	250	800	200

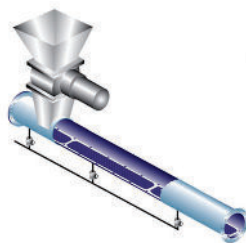
- Membranpumpe
- Airlift
- Standpipe
- Scheibendosierer
- Tankfahrzeug (Druckgefäß)
- Doppelpendelklappe

*je nach Mohs'scher Härte des Schüttgutes

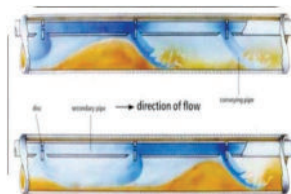
Glattrohr



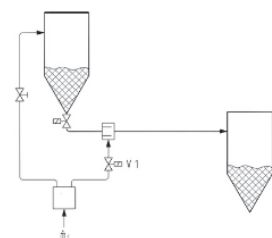
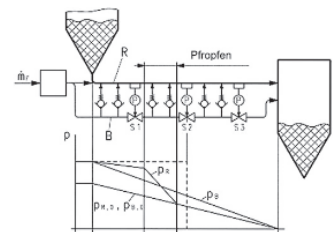
Rohrleitung mit
Belüftungselementen

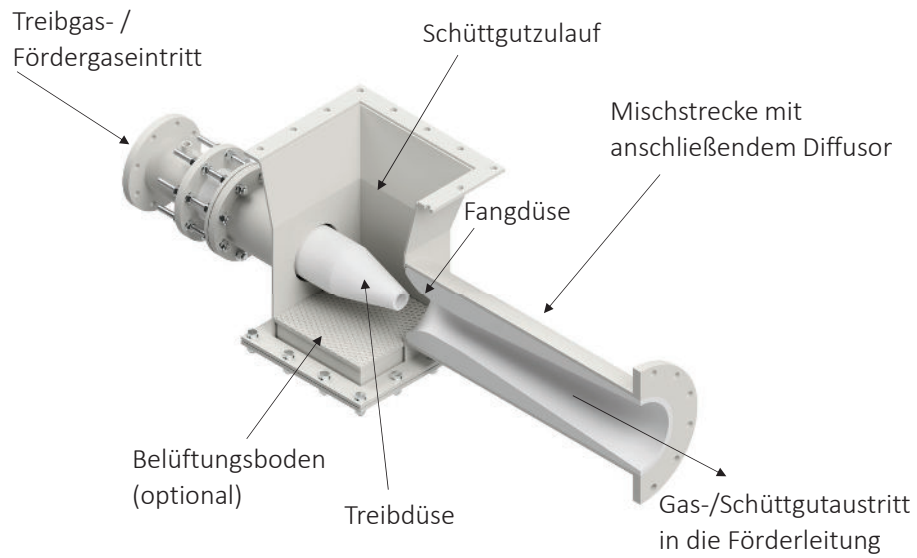


Rohr-in-Rohr-
System



Bypass-System

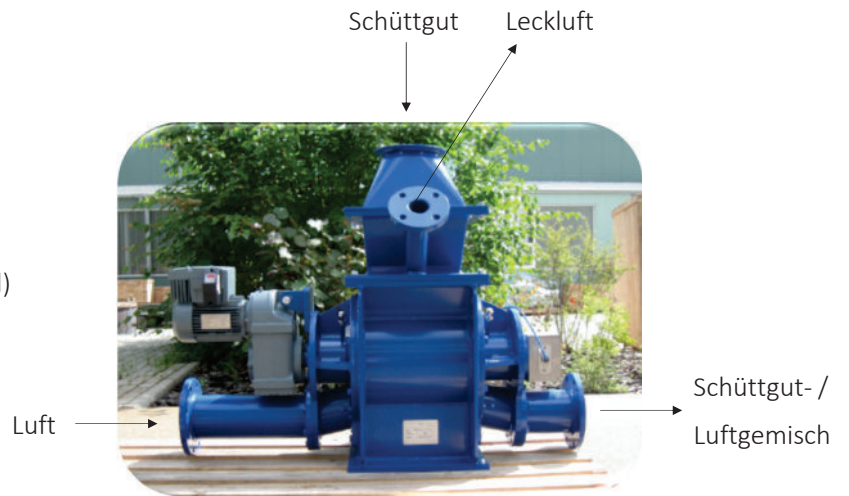
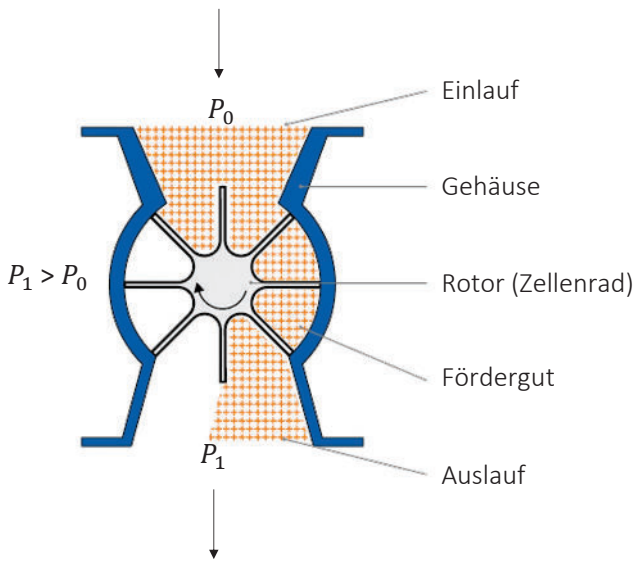




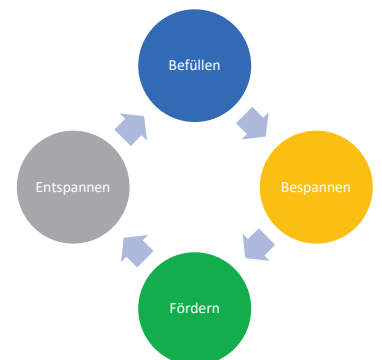
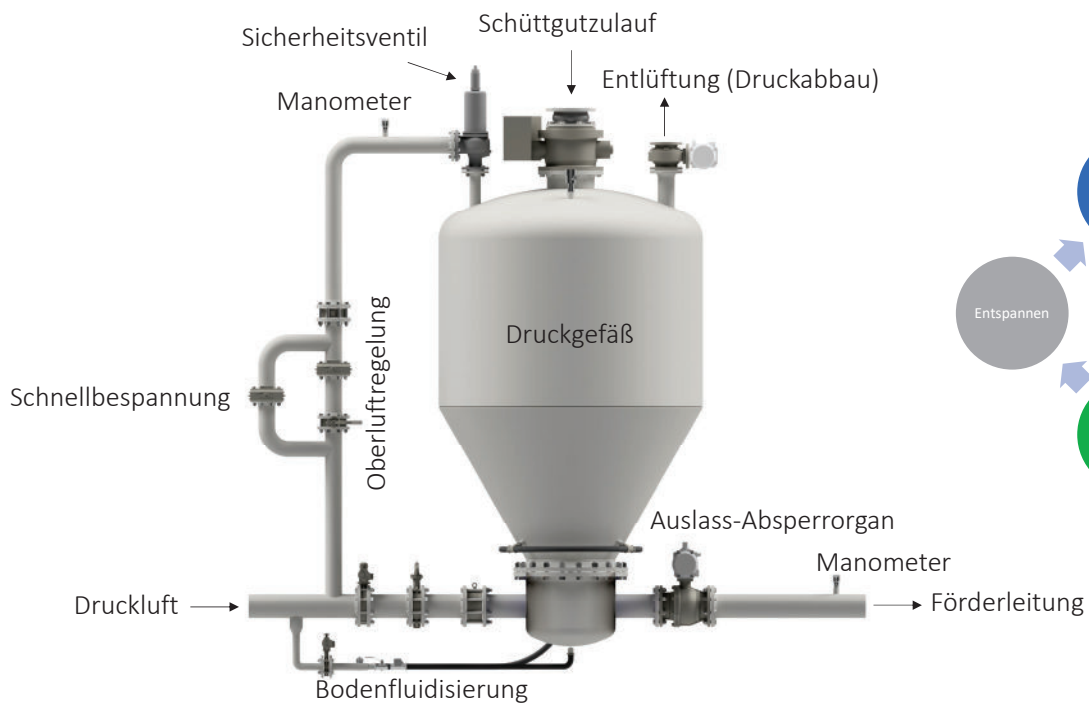
Fuller-Kinyon®

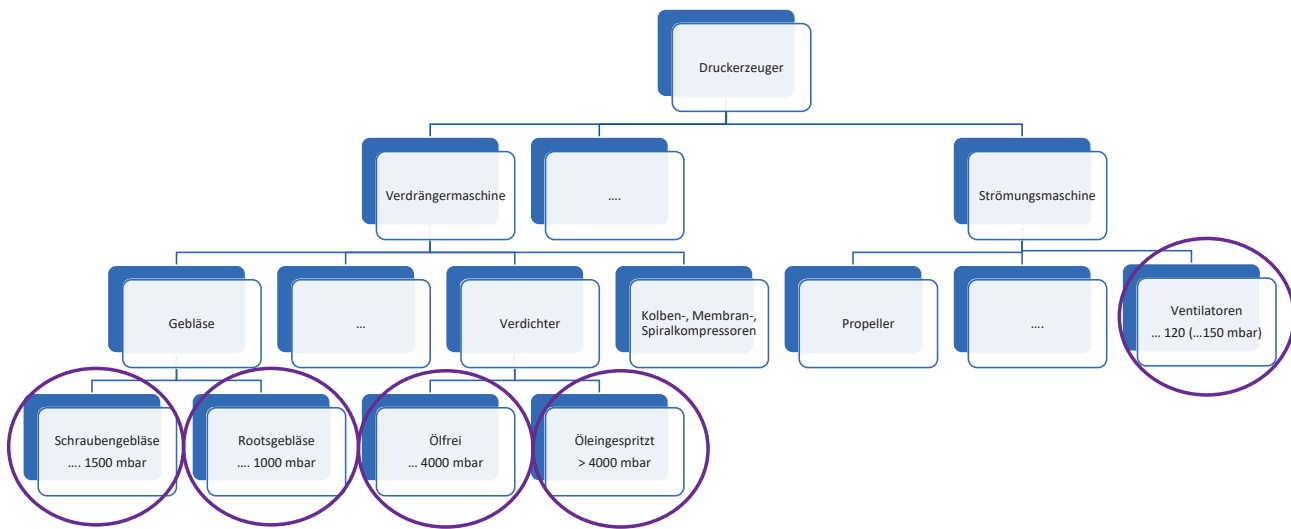
FK N screw pump

Standard-Varianten



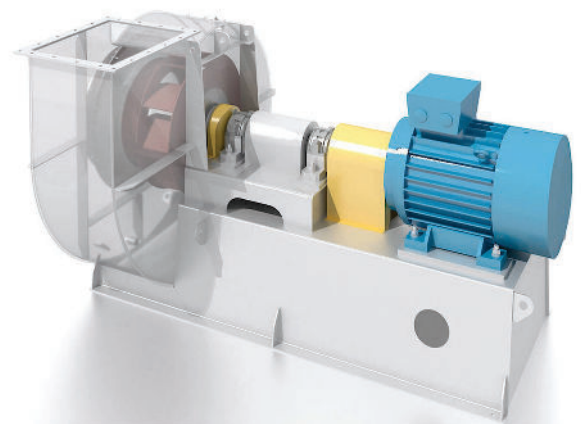
Aufbau Einzeldruckgefäß





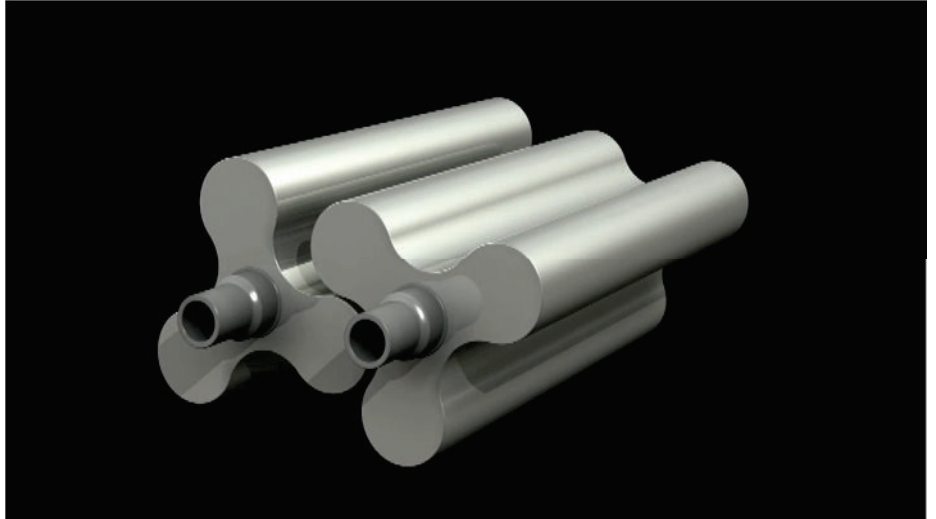
Ventilator

- Ein Ventilator ist eine Strömungsmaschine.
- Die Energieübertragung erfolgt mittels Rotorblätter, Flügel oder Schaufeln, die derart profiliert sind, dass durch die Umströmung eine Druckdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite entsteht [3, WIKI].
- Das max. Druckniveau ist auf 100 ... (150 mbar) begrenzt.
- Die Luft strömt i.d.R. zentral in den Rotor ein, wird dann um 90° umgelenkt, durch den hochtourig drehenden Rotor erfasst und beschleunigt.
- Es gibt eine Vielzahl von Schaufelgeometrien und Gehäuseformen.
- Vorteil: große Fördervolumenströme
- Nachteil: flache Kennlinie, geringe Druckdifferenz

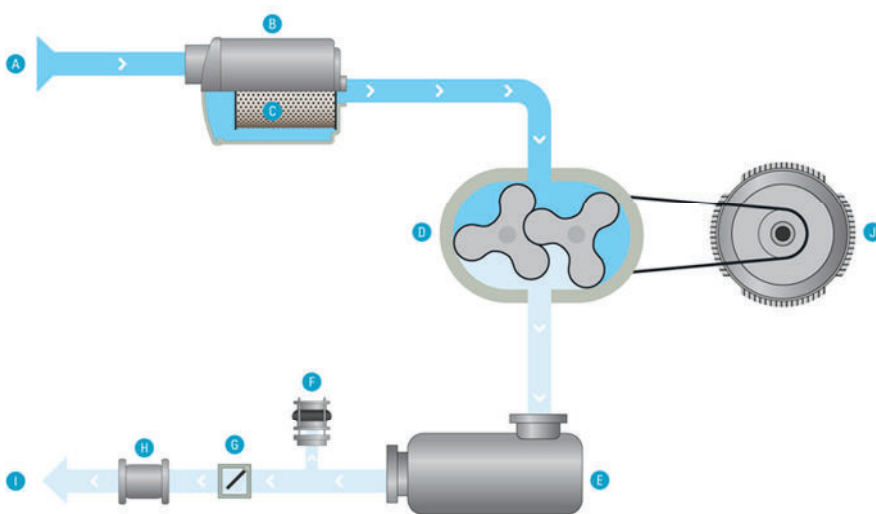


Gebälse - Funktion

- 3-flügeliges Element
- Luftgekühlte Drehkolbengebläse
- Für eine Druckerhöhung bis 1,0 bar(g)
- Keine interne Verdichtung
- i.d.R. Riementrieb



Gebälse - Aufbau



- A Air inlet
- B Intake silencer
- C Intake filter
- D Oil free lobe blower element
- E Pulsation damper
- F Start-up & safety valve
- G Check valve
- H Compensator
- I Air out
- J Motor

○ Dry compressed air
● Air



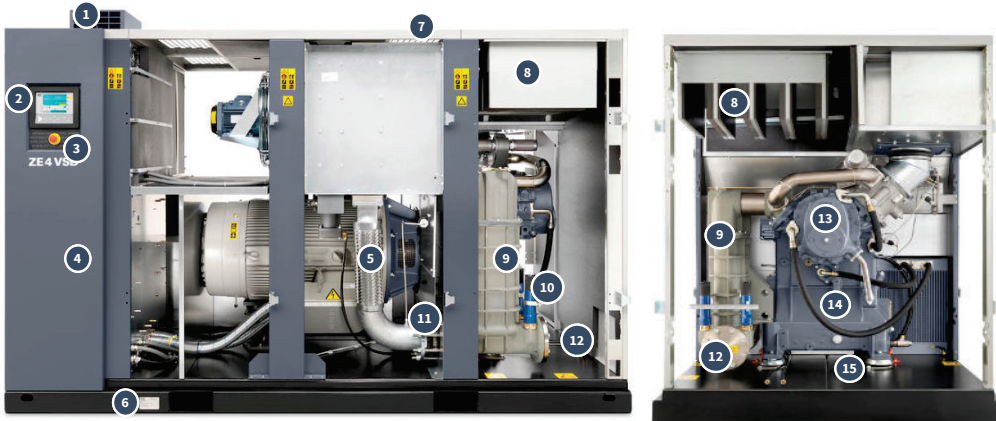
- 1 3-flügelige Gebläsestufe
- 2 Grundträger mit Schalldämpfer
- 3 Antrieb
- 4 Sicherheitsventil
- 5 Keilriementrieb
- 6 Ansaugschalldämpfer
- 7 Motorwippe, Riemenspannung
- 8 Anfahrventil (Option)
- 9 Auslass mit Gummimuffe

Schraubenverdichter
Schraubenkompressor



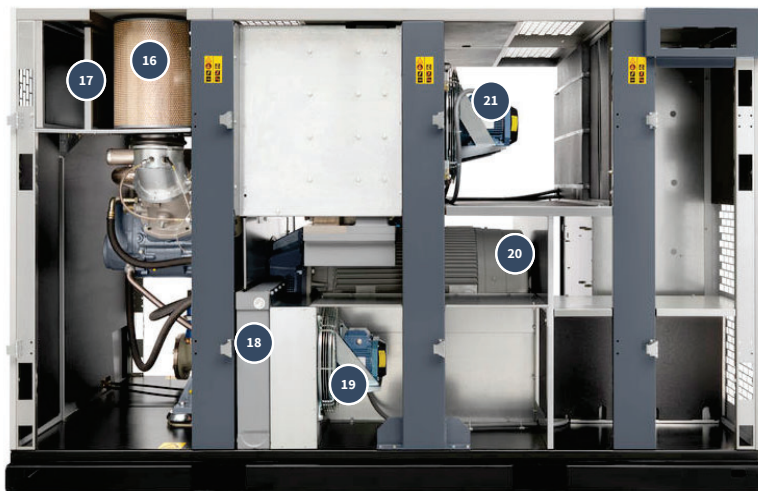
Verdichter – Aufbau

- 2-rotiges Schraubenelemente (einstufig)
- luftgekühlt
- Für eine Druckerhöhung bis 4,0 bar(g)
- **Mit interner Verdichtung**

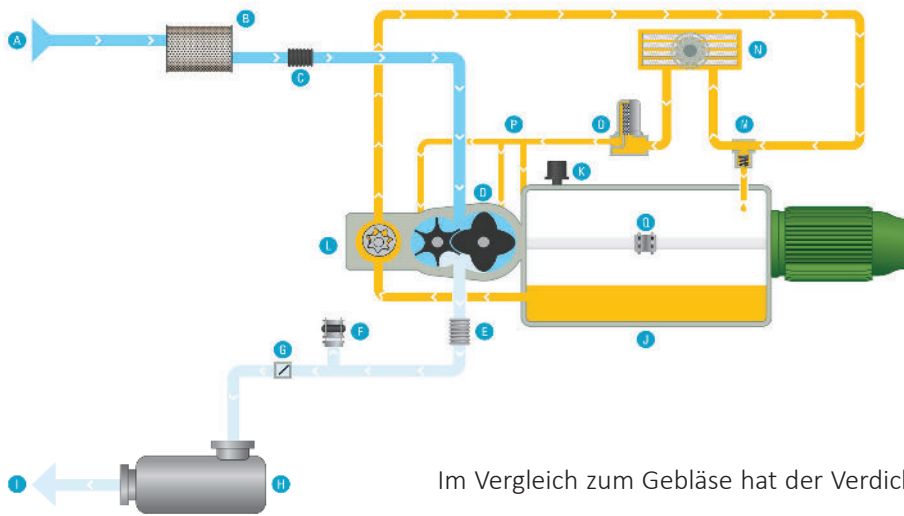


- 1 FU-Kühlluftauslass
- 2 Elektronik
- 3 Not-Aus
- 4 Schaltschrank
- 5 Kompensator
- 6 Grundrahmen mit Gabelstaplertaschen
- 7 Kühlluftaustritt
- 8 Kühlluftaustritt inkl. Schalldämpfer
- 9 Luftauslass-Schalldämpfer
- 10 Sicherheitsventil
- 11 Rückschlagklappe
- 12 Druckluftaustritt
- 13 Schraubenelement
- 14 Getriebe
- 15 Schwingungsdämpfer

Verdichter – Aufbau



- 16 Ansaugfilter
- 17 Lufteintritt
- 18 Ölkühler
- 19 Lüfter für Ölkühler
- 20 Motor
- 21 Kombikühler:
Vor- & Nachkühler (Option)



Atlas Copco

- A Air inlet
- B Intake filter
- C Flexible connection
- D Oil free screw blower element
- E Flexible connection
- F Start-up and safety valve
- G Check valve
- H Pulsation damper
- I Air out
- J Oil carter
- K Breather
- L Oil pump
- M Bypass valve
- N Oil cooler
- O Oil filter
- P Oil injection to bearings & gears
- O Gears

○ Dry compressed air

● Air

● Oil

Im Vergleich zum Gebläse hat der Verdichter noch einen Ölkreislauf zur Kühlung.

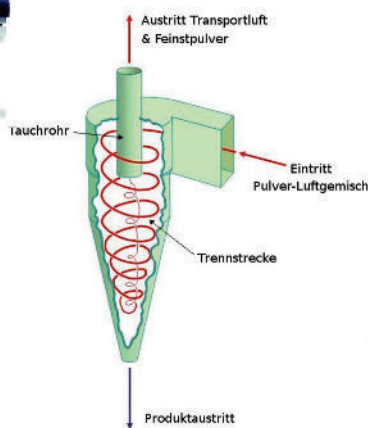
Förderluftaufbereitung

Kompressor → Druckluftnachkühler (intern/extern) → Kondensat fällt aus → Zyklonabscheider → (Trockner) → Druckluftfilter (Öl/Staub) → Prozess

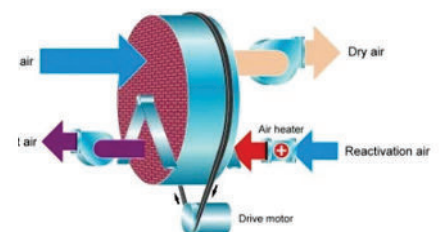
Luft-Luft-Nachkühler
Luft-Wasser-Nachkühler



Kondensatabscheider



entsprechend Druckluftqualitätsklasse



- Ventilatoren sind bis 100 mbar (.....150 mbar) einsetzbar mit ungünstigstem Wirkungsgrad.
- Ventilatoren liefern die größten Luftmengen.
- Gebläse sind bis 1000 mbar einsetzbar. Robustes, einfaches Design mit mittlerem Wirkungsgrad.
- Schraubengebläse sind bis 1500 mbar einsetzbar, mit besserem Wirkungsgrad als Gebläse ab 450 mbar.
- Ölfreie Verdichter haben höchste Wirkungsgrade.
- In der Regel sind Druckluftnachkühler, Kondensatabscheider, Zyklonabscheider, Trockner ab einem Druckniveau von 1-2bar(ü) notwendig.
- Für den pneumatischen Transport sind steile Volumenstrom-Kennlinien notwendig.



	Gebläse	Schrauben-gebläse	Schrauben-verdichter (ölfrei)	Kompressor-station
Aerzen	✓	✓	✓	✗
Atlas Copco	✓	✓	✓	✓
Boge	✗	✗	✓	✓
Kaeser	✓	✓	✓	✓
Ingersoll Rand	✗	✗	✗	✓

Ventilatoren:

- FPZ
- Reitz
- Airtech
- Elektror
- u.v.m.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

Mario Dikty
Schwedes + Schulze Schüttguttechnik GmbH
Teichstrasse 4
D-21641 Apensen
+ 49 4167 699 56 89
+ 49 176 236 18 669
m.dikty@schwedes-und-schulze.de
www.schwedes-und-schulze.de

Literatur und Quellen

- [1] Welschhof, G.: Pneumatische Förderung bei großer Fördergutkonzentration. VDI-Forschungsheft 492 (1962). Düsseldorf
- [2] Siegel, W.: Pneumatische Förderung. Vogel Buchverlag (1991)
- [3] Stegmaier, W.: Zur Berechnung der horizontalen pneumatischen Förderung feinkörniger Feststoffe. F+h-fördern und heben 28, Nr. 5/6 (1978), S.363-366
- [4] Zenz, F. A., Othmer, F.D.: Fluidization and Fluid-Particle Systems. Reinhold chemical Engineering Series (1960)
- [5] Muschelknautz, U.: Druckverlust bei der pneumatischen Förderung. In: VDI-Wärmeatlas (2013), S. 1382-1399