Schraubenkompressoren für den Einsatz an Silofahrzeugen

Dr.-Ing. C. Achtelik, Oberhausen

Zusammenfassung

Der Beitrag beschäftigt sich im Detail mit der Verwendung von Schraubenkompressoren für den pneumatischen Transport aus mobilen Einheiten. Anhand des Zustandsdiagramms der pneumatischen Förderung werden die Förderungsarten sowie die Anforderungen an die entsprechenden Lufterzeuger hergeleitet. Es wird dargelegt, daß Verdrängermaschinen (Kolbenoder Schraubenkompressoren) für diesen Anwendungsfall besser als Strömungsmaschinen geeignet sind. Des weiteren werden die Vorteile der ölfrei verdichtenden Schraubenkompressoren, die in der Regel zum Einsatz kommen, gegenüber den anderen Verdrängermaschinen beschrieben. Weitere Anforderungen an die Schraubenkompressoren ergeben sich durch die Einbaubedingungen am Fahrzeug und dessen Umfeld (z.B. Platzbedarf). Abschließend wird anhand eines Beispiels eine moderne Kompressorinstallation vorgestellt.

1. Grundlagen der pneumatischen Förderung

Unter pneumatischer Förderung versteht man den Transport von Schüttgütern mit Luft. Dabei strömt in der Regel das Fördermedium zusammen mit dem Fördergut in einer Rohrleitung. Es liegt demnach in einer pneumatischen Förderanlage, die bei Silofahrzeugen aus dem Lufterzeuger mit den dazugehörigen Luftleitungen, dem Silokessel, der daran anschließenden Rohrleitung und dem "Zielort" besteht, eine Mehrphasenströmung vor.

Zur theoretischen Beschreibung und Berechnung einer solchen Mehrphasenströmung ist es notwendig, die Bewegung eines Einzelkorns im Luftstrom zu definieren. Als Einflußgrößen der Kornbewegung nennt Siegel /1/ u.a. die Kornmasse, den Korndurchmesser, die Kornform, den Stoß des Korns auf die Rohrwand, den Stoß des Korns auf ein weiteres Korn sowie die Turbulenz der Rohrströmung mit und ohne Fördergut. Trotz der Kenntnis dieser einzelnen Einflußgrößen hat die theoretische Berechnung bis heute aber noch kein in der Praxis verwendbares Ergebnis für die Auslegung von pneumatischen Förderanlagen liefern können. Um die pneumatische Förderung und die Mehrphasenströmung zu beschreiben, empfiehlt /1/ daher das sogenannte "Zustandsdiagramm der pneumatischen Förderung" zu verwenden (Bild 1).

In ihm werden die einzelnen Förderzustände, die sich beim Transport eines Förderguts im Luftstrom einstellen, anschaulich dargestellt. Dazu ist der Druckverlust Δp über der Luftgeschwindigkeit v bei konstantem Gutmassenstrom Q_s aufgetragen. Es handelt sich hierbei um eine rein qualitative Darstellung, die vom jeweiligen Fördergut, dem Rohrdurchmesser, der Förderlänge, der Förderhöhe und der Anzahl der Krümmer abhängt.

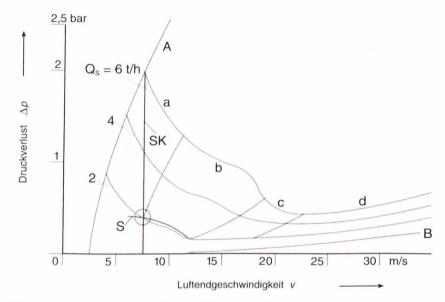


Bild 1: Zustandsdiagramm der pneumatischen Förderung

Dem Diagramm ist zu entnehmen, daß nur innerhalb der Linien A und B Fördergut transportiert werden kann. Für eine Förderung zwischen der y-Achse und der Linie A ist die Luftgeschwindigkeit und zwischen der x-Achse und der Linie B der Druck zu gering. In dem Bereich, den die Linien A und B aufspannen, lassen sich für die Kurven konstanten Massenstromes $\mathbf{Q}_{\mathbf{S}}$ vier Bereiche a-d unterscheiden (Bild 1 und Bild 2).

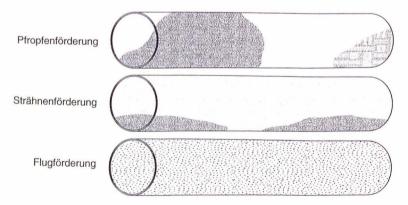


Bild 2: Darstellung der verschiedenen Förderungsarten

Der Bereich a kennzeichnet die Pfropfenförderung, die sich durch hohe Druckverluste und niedrige Strömungsgeschwindigkeiten auszeichnet. Sie tritt in der Regel bei Medien hoher Dichte, wie z.B. Zementpulver oder Mehl auf.

Die Strähnenförderung (Bereich c) ist dadurch charakterisiert, daß der Druckverlust bei einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit ein Minimum aufweist. Die Einzelkörner bewegen sich mehr als Strähne in der unteren Rohrhälfte durch die Förderleitung. Zwischen den Bereichen a und c befindet sich ein instabiler Bereich, bei dem die Förderung zwischen Pfropfen- und Strähnenförderung und damit zwischen unterschiedlich hohem Druckniveau hin- und herwandert. Der Bereich d wird Flugförderung genannt. Aufgrund der hohen Luftgeschwindigkeit fliegen die Körner annähernd gleichmäßig über den Rohrquerschnitt verteilt im Luftstrom. Vor allem Kunststoffgranulate werden derart gefördert. Zu erkennen ist weiterhin, daß die Druckverluste mit zunehmender Geschwindigkeit wieder ansteigen. Dies ist darin begründet, daß die Körner öfter an die Rohrwand schlagen sowie mit anderen kollidieren; einzelne Körner werden dabei oft zerschlagen. Die weit verbreitete Meinung, daß durch eine möglichst hohe Luftgeschwindigkeit (= hoher Volumenstrom) die Entladung schneller und günstiger bei gleichen Querschnitten der Förderleitungen durchgeführt werden kann, trifft demnach nicht zu.

2. Vergleich Strömungsmaschine / Verdrängermaschine

Obwohl das in Kapitel 1 dargestellte Zustandsdiagramm nur Modellcharakter besitzt, lassen sich an ihm auch die Anforderungen an die Luftversorgung herleiten. Betrachtet man das Zustandsdiagramm als Anlagenkennlinie, so kann - ähnlich der Vorgehensweise bei einphasigen Strömungen - die Maschinenkennlinie z.B. des Gebläses oder des Kompressors in das Diagramm eingezeichnet werden. Der Schnittpunkt zwischen Anlagen- und Maschinenkennlinie kennzeichnet dann einen möglichen Betriebspunkt. Im Bild 1 ist die Kennlinie einer Strömungsmaschine S (z.B. Gebläse) und einer Verdrängermaschine SK (z.B. Kolben- oder Schraubenkompressor) bei einer konstanten Antriebsdrehzahl eingezeichnet. Der Betriebspunkt ergibt sich hier bei Q_s =2 t/h und einer Luftgeschwindigkeit von v=7,5 m/s.

Es ist zu erkennen, daß bei einer Erhöhung des Gutmassenstroms von z.B. $Q_s=2$ t/h auf $Q_s=4$ t/h die Verdrängermaschine aufgrund ihrer steilen Kennlinie immer annähernd die gleiche Luftgeschwindigkeit liefert. Es stellt sich ein stabiler Betriebspunkt ein (z.B. Schnittpunkt der Linien SK und $Q_s=4$ t/h). Die Charakteristik der Strömungsmaschine, bei der eine Druckerhöhung eine Abnahme des Volumenstroms bei konstanter Drehzahl bedingt, führt dazu, daß außerhalb des Betriebspunktes kein reeller Schnittpunkt bzw. stabiler Betriebspunkt gefunden werden kann. Die Anlage würde verstopfen.

Generell erzeugen Rohrverstopfungen, wie sie bei der Pfropfenförderung vorkommen, kurzfristige Drucksteigerungen. Die Unempfindlichkeit der Verdrängermaschinen gegen diese Drucksteigerungen ist bei allen pneumatischen Förderanlagen ein genereller Vorteil der Verdrängermaschinen gegenüber den Strömungsmaschinen.

3. Anforderungen an Kompressoren für Silofahrzeuge

Für die Transporte von Schüttgütern mit Fahrzeugen verwendet man weltweit Silofahrzeuge mit Druckbehältern. Je nach Verwendungszweck sind die Behälter unterschiedlich aufgebaut. Einen Überblick der einzelnen Bauarten kann entsprechenden Prospekten von Fachfirmen entnommen werden /2,3/. Bild 3 zeigt beispielsweise ein Fahrzeug mit einem sogenannten Kippsilo bei der Entladung von chemischen Granulaten.



Bild 3 : Fahrzeug mit Kippsilo bei der Entladung

Die Entladung der Schüttgüter wird in der Regel durch eine pneumatische Druckförderung mit Betriebsdrücken von 2 bar realisiert. Diese hat gegenüber der Niederdruckförderung, die mit Überdrücken von p=1-1,7 bar arbeitet, den Vorteil der kürzeren Entladungszeit. Des weiteren können mit ihr größere Entfernungen und Höhenunterschiede überbrückt werden.

Für die Druck- und Luftmengenerzeugung werden Kompressoren benötigt, die - je nach Fördergut - Überdrücke zwischen 1,5 bis 2,5 bar und Volumenströme im Bereich von 400 m³/h bis 1000 m³/h liefern müssen. In diesem Bereich der pneumatischen Förderung aus mobilen Einheiten werden ausschließlich Verdrängermaschinen aufgrund der in Kapitel 2 beschriebenen Vorteile verwendet. Insbesondere die ölfrei verdichtenden Schraubenkompressoren besitzen gegenüber anderen Kompressorbauarten, wie z.B. Kolbenkompressoren oder Vielzellenverdichtern mit und ohne Ölschmierung die folgenden Vorteile:

- ölfreie Verdichtung der angesaugten LuftRealisierung hoher Druckverhältnisse
- Rein Abrieb, der die geförderte Luft verunreinigen kann
- Unempfindlichkeit gegen kurzfristige Drucksteigerungen, die durch Verstopfung der Rohrleitung verursacht werden können
- geringes Gewicht und geringe Abmessungen (speziell im Vergleich zu den Kolbenkompressoren)

Aus der Tabelle 1 sind die typischen Kennwerte eines Schraubenkompressors für den pneumatischen Transport aus mobilen Einheiten zu entnehmen. Dazu gehört der maximale Betriebsüberdruck von 2,5 bar am Austritt des Kompressors und der Ansaugvolumenstrom von 286 - 700 m³/h bei einer Kupplungsleistung von 20-48 kW.

GHH-RAND			CS 80/1 (Kompressorstufe)		
Medium			atmosphärische Luft		
Ansaugtemperatur		°C	20		
Ansaugdruck, abs.		bar	1		
Antriebsdrehzahl		1/min	1000	1500	2000
Betriebsüberdruck		bar	1,5		
Ansaugvolumenstrom		m ³ /h	302	524	730
Kupplungsleistung		kW	16	25	35
Ansaugtemperatur, max.		°C	53	63	63
Betriebsüberdruck		bar	2,0		
Ansaugvolumenstrom		m³/h	286	510	717
Kupplungsleistung		kW	20	30	41
Ansaugtemperatur, max.		°C	33	48	50
Betriebsüberdruck		bar	2,5		
Ansaugvolumenstrom		m³/h		496	704
Kupplungsleistung		kW		35	48
Ansaugtemperatur, max.		°C		34	38
Abmessungen	Länge	mm	621		
	Breite	mm	386		
	Höhe	mm	345		
Gewicht		kg	135		

Tabelle 1: Technische Daten eines typischen Schraubenkompressors für den pneumatischen Transport aus mobilen Einheiten

4. Anforderungen an eine Schraubenkompressorinstallation

Um einen trockenlaufenden Schraubenkompressor für den pneumatischen Transport zu verwenden, muß zuerst die Frage des Kompressorantriebes geklärt werden. Generell gibt es drei Antriebsmöglichkeiten:

٦	separater Antrieb durch einen Diesel- oder Elektromotor
	(direkter) hydraulischer Antrieb
	Antrieb durch den Nebenantrieb des Lastwagens.

Die wirtschaftlichste Art, den Kompressor anzutreiben ist, den Nebenantrieb des Lastwagens zu nutzen und auf einen separaten Antrieb, der die Nutzlast des Fahrzeugs deutlich reduzieren kann, zu verzichten. Je nach Kompressortyp und Nebenantriebsübersetzung kann der Kompressor direkt oder über einen dazwischen geschalteten Keilriementrieb vom Fahrzeugmotor angetrieben werden.

Ein weiteres wichtiges Kriterium der Kompressorinstallation ist die Geräuschdämpfung. Durch den periodischen Ausschubvorgang der Zahnlücken an den Steuerkanten und durch die Strömungsgeräusche - verursacht durch Ablösungen und Wirbelbildungen in den Gaskanälenentsteht eine erhebliche Lärmbelastung mit einem Schalldruckpegel der größer als 100 dB (A) in 1m Abstand sein kann /4/. Der Schraubenkompressor muß daher mit einem Saug- und Druckschalldämpfer und/oder einer Schallhaube versehen werden. Druckschalldämpfer der neuesten Generation aus speziellen wärmebeständigen Aluminiumlegierungen kombinieren verschiedene Dämpfungsmechanismen wie Absorptions-, Reflexions- und Interferenzdämpfung /5,6/. Sie reduzieren den Schall und vor allem die als extrem unangenehm empfundenen hochfrequenten Ausschubgeräusche auf einen Schalldruckpegel von ca. 83dB (A) in 1m Abstand /7/, so daß voluminöse Schallhauben nicht verwendet werden müssen. Auf die Verwendung von Absorptionsschalldämpfern sollte generell verzichtet werden, da die Gefahr besteht, daß Absorptionsmaterial in das Fördergut gelangen kann.

Weitere Anforderungen ergeben sich bei der Förderung von Getreide- oder Futtermittelstäuben, bei denen eine Drucklufttemperatur von 120 °C gemäß den Unfallverhütungsvorschriften /8/ nicht überschritten werden darf. In diesen Fällen ist die Verwendung eines Druckluftkühlers zur Reduzierung der Drucklufttemperatur zwingend vorgeschrieben. Zu berücksichtigen ist des weiteren, daß der für die Kompressorinstallation zur Verfügung stehende Platz an Fahrzeugen sehr gering ist. Die Kompressorinstallation sollte daher geringe Gesamtabmessungen bei gleichzeitig geringem Gewicht aufweisen.

5. Beispiel einer ausgeführten Installation

Den Aufbau eines Kompressoraggregates zeigt Bild 4. Der Kompressor und der Keilriemenantrieb sind auf einer Traverse montiert (1). Zusätzlich ist der Kompressor mit einem Saugfilter (2), Vorschalldämpfer (3), Druckschalldämpfer (4) und einer Druckluftkühlung (5) ausgestattet. Auf dem Filtergehäuse ist die Steuerungseinheit (6) befestigt, zu der neben dem Wartungsanzeiger, dem Öldruckmanometer und der Drucklufttemperaturanzeige auch ein Potentiometer gehört, mit dem die Drehzahl des Ventilators vom Druckluftkühler stufenlos verstellt werden kann. Des weiteren besteht das Kompressoraggregat noch aus diversen Rohrleitungen, Kleinteilen und Verkleidungsteilen (7).

Vor der eigentlichen Montage des Kompressoraggregates ist sicherzustellen, daß die Übersetzungen (Nebenantrieb und Keilriementrieb) sowie die Drehmomente aufeinander abgestimmt worden sind. Des weiteren müssen die notwendigen Mindestplatzverhältnisse am LKW sichergestellt sein. Auch die Drehrichtung des Nebenantriebes ist zu berücksichtigen. Je nach Drehrichtung des Nebenantriebes muß der Kompressor relativ zur Fahrtrichtung um 180° gedreht werden.

Das gesamte Kompressoraggregat wird mit Hilfe einer Traversenhalterung, die vorher am LKW-Rahmen ausgerichtet und mit der Haupttraversenhalterung des Aggregates verschweißt wurde, am Fahrzeugrahmen verschraubt. Zu berücksichtigen sind dabei die jeweiligen Aufbaurichtlinien des Fahrzeugherstellers und der einzuhaltende Beugungswinkel der Gelenkwelle. Durch eine Gelenkwelle wird der Keilriementrieb des Aggregates mit dem Nebenantrieb des LKW verbunden.

Gemäß der EG Maschinenrichtlinie wird durch die Verbindung des Kompressors mit dem Motor das Aggregat zur "Maschine". Die gesamte Anordnung muß daher vor Inbetriebnahme eine ordnungsgemäße CE Kennzeichnung erhalten.

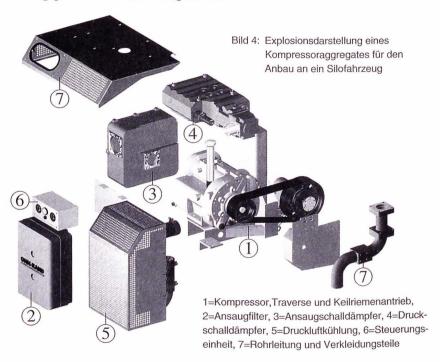


Bild 5 zeigt abschließend die fertige Kompressorinstallation an einer Sattelzugmaschine mit einem Radstand von 3,6 m und einem Tankinhalt von 600 I.



Bild 5: Fertig montiertes Kompressoraggregat 1 an einer Sattelzugmaschine

6. Schlußbemerkung

Für den pneumatischen Transport aus mobilen Einheiten, bei dem Silofahrzeuge mit Druckbehältern eingesetzt werden, kommen vorwiegend ölfrei verdichtende Schraubenkompressorenaggregate zum Einsatz. In diesem Marktsegment haben die Schraubenkompressoren ebenfalls die früher verwendeten Kolben- und Vielzellenkompressoren weitgehend verdrängt. Zukünftige Anforderungen an Entwicklungen ergeben sich aus dem Umfeld des Fahrzeuges. Dazu gehören die Verringerung des Gewichtes sowie der Abmessungen. Auch weitere Fortschritte auf dem Gebiet der Schallreduzierung sind zu erwarten. Des weiteren müssen die neuen europäischen Verordnungen (z.B. Maschinenrichtlinie, Druckbehälterverordnung) zukünftig berücksichtigt werden.

Literaturverzeichnis

- /1/ Siegel, W., Pneumatische Förderung, Vogel Verlag 1991
- /2/ Feldbinder Spezialfahrzeugwerke GmbH, diverse Prospekte über FFB-Siloanhänger Stand: 1998
- /3/ Spitzer Silo Fahrzeugwerke GmbH & Co. KG, diverse Prospekte über Silo-Kippfahrzeuge, Silo-Aufbau und Silo-Anhänger, Stand: 1997
- /4/ Kötter Beratende Ingenieure, Messbericht Nr. 11011A.001 vom 28.10.1991
- /5/ Riwo Air Equipment, Hochleistungs-Komponenten für Schraubenkompressoren
- /6/ Betriebsanleitung SILU CG600, SILU CG600 Intercooler, SILU CS700, SILU CS700 Intercooler, GHH-RAND Druckschrift 006/97 d, 1997
- /7/ Akustec, Schalltechnischer Bericht Nr. 98-209-1 vom 13.05.1998
- /8/ VBG 16, UVV Verdichter