

Störende Schwingungen?

Strömungstechnische Optimierung
von Fördersystemen



Achema-Highlights
Messe-Neuheiten
für die Prozessindustrie

Schüttguttechnik
Abfüllanlage befördert 150
unterschiedliche Zusatzstoffe

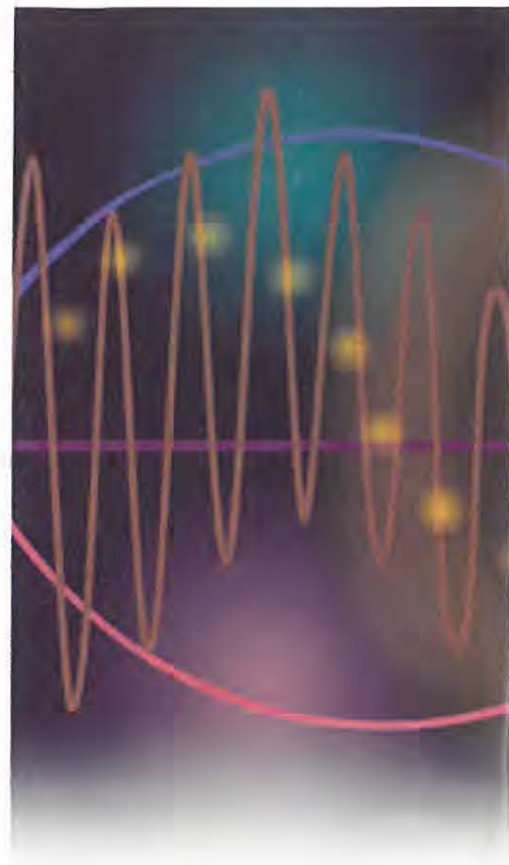
Messtechnik
Präzise Analyse mit
Leitfähigkeitssensoren

Keine Probleme mit Schwingungen

Strömungstechnische Ausführung von pneumatischen Fördersystemen

Christian Jansen

Die verfahrenstechnische Behandlung von Schüttgütern ist im Vergleich zu Gas- und Flüssigkeitsanwendungen im Allgemeinen komplexer, die Anlagen erreichen zum Teil beeindruckende Dimensionen. Deshalb sollte ein besonderes Augenmerk auf die strömungstechnische Ausführung der Systeme gelegt werden.



Der Transport der Feststoffe in der Schüttgutindustrie erfolgt unter anderem über Vibrationsrinnen, Förderschnecken oder pneumatisch über Fluidrinnen und Trägergase. Vor allem in der großindustriellen Anwendung erreichen die Anlagen für die pneumatische Förderung mit Rohrennweiten über DN 2000 beeindruckende Dimensionen. Im Rahmen der Entwicklung dieser Prozesse wird dabei ein besonderes Augenmerk auf die strömungstechnische Ausführung der Systeme gelegt.

Es gilt unter anderem, bei optimalem Druckverlust die Ladung sicher zu tragen, Abrasion zu vermeiden und eine Vielzahl von Betriebsbedingungen (z. B. Anfahren, Teillast, Vollast, Notabschaltungen) abzudecken. Numerische Strömungsrechnungen sind Stand der Technik, um Teilaspekte dieser Aufgabenstellungen zu bearbeiten.

Die Rohrleitungssysteme dieser Anlagen sind komplex und verfügen neben den Hauptleitungen auch über teildurchströmte und im Normalbetrieb nicht durchströmte bzw. überströmte Segmente sowie Einbauten. Alle diese Konfigurationen sind geeignet, instationäre Strömungseffekte in Form von ablösenden Wirbeln hervorzurufen.

Ursache für Wirbel

Der allgemein bekannte Fall einer Wirbel hervorrufenden Struktur ist der quer ange-

strömte kreisrunde Störkörper (**Bild 01**). Die Ursache der Wirbelbildung ist in der instabilen Grenzschicht der Strömung zu suchen. Technisch genutzt wird diese Eigenschaft der Struktur für die Durchflussmessung mittels Wirbelzähler.

Die ablösenden Wirbel sind mit einer lokalen Absenkung des statischen Druckes verbunden. Diese können mit einem geeigneten Sensor stromab des Störkörpers als periodische Druckschwankungen festgestellt werden. Die Frequenz f , mit der sich diese Wirbel ablösen, verhält sich reziprok zu einer charakteristischen Größe des Störkörpers (z. B. dem Außendurchmesser D_a eines Stabes) sowie proportional zur Anströmgeschwindigkeit w und der sogenannten Strouhal-Zahl St .

$$f = \frac{St \cdot w}{D_a} \quad (1)$$

Die Strouhal-Zahl ist von der Reynolds-Zahl abhängig. Für die Beschreibung der Wirbelablösung an kreisrunden Störkörpern in Rohrleitungen kann für technisch relevante Strömungsgeschwindigkeiten und damit verbundenen Reynolds-Zahlen in guter erster Näherung ein konstanter Wert angenommen werden. Charakteristisch für diese Form der Wirbelablösung an einem umströmten Körper ist damit die mit dem Betriebsvolumenstrom ansteigende Frequenz der Druckschwankungen stromab der Wirbelquelle.

Als ein weiterer Verursacher von Wirbeln und damit verbundenen Druckpulsationen in Rohrleitungen sind überströmte Rohrleitungsabzweige bekannt (**Bild 02**). Unter bestimmten Bedingungen ist diese Konfi-

guration geeignet, starke Druckpulsationen auch im Hauptstrom hervorzurufen. Genau dann, wenn die Frequenz der ablösenden Wirbel eine ähnliche Größe wie eine akustische Eigenform der überströmten Rohrleitung erreicht, entsteht eine Wechselwirkung der durch die akustische Resonanz verstärkten Druck- und Geschwindigkeitschwankungen und der Wirbelablösung an der Ablösekante.

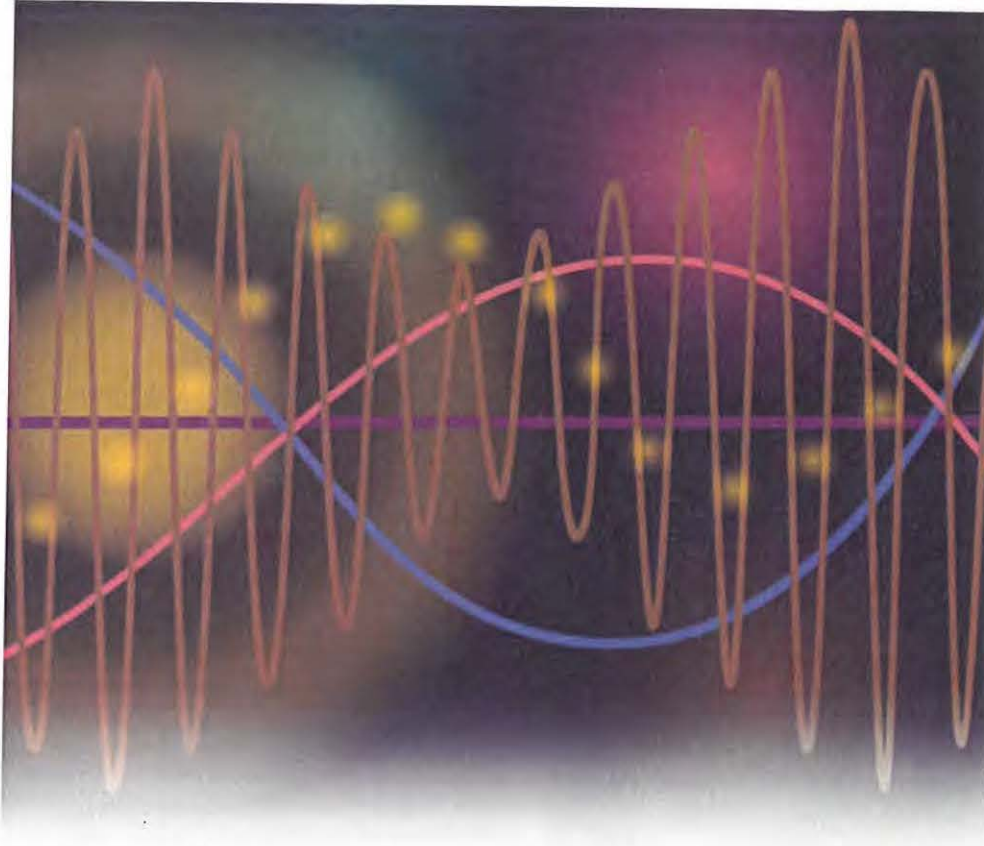
Es kommt zum sogenannten Einrasten. Dies bedeutet, dass die Wirbelablösefrequenz in gewissen Grenzen auch bei steigender Strömungsgeschwindigkeit konstant bleibt. Häufig wird in diesen Fällen der sprunghafte Amplitudenanstieg auf Frequenzen beobachtet, die durch benachbarte akustische Eigenformen des nicht durchströmten Abschnittes bestimmt werden.

Stehende Wellen

Die Ausbildung solcher „stehender Wellen“ in einem Rohrleitungssystem bewirkt, dass in der Folge des nicht stationären Druckes eine zusätzliche dynamische Belastung auftritt: An Rohrbögen, an Querschnittsprüngen und an Behältern werden Druckpulsationen in Wechselkräfte umgesetzt, die zu einer Schwingungsanregung der Strukturen führen. Bei Rohrleitungsnennweiten oberhalb von DN1000 führen bereits Druckamplituden von wenigen mbar zu resultierenden Kräften in einer Größenordnung von einigen kN.

Besonders in den Fällen, in denen Pulsationsfrequenzen und Struktureigenfrequenzen zusammentreffen, äußern sich diese in erhöhten Schwingungen, die häufig

Autor: Dr.-Ing. Christian Jansen,
Fachgebietsleiter Strömungstechnik,
Kötter Consulting Engineers, Rheine



nicht durch einfache Maßnahmen zu mindern sind. Die Folge können in diesen Fällen wiederkehrende schwingungsinduzierte Schäden an Rohrleitungen und Bauteilen sein. Die möglichen Abhilfemaßnahmen müssen detailliert auf die Situation abgestimmt werden. Beispielhaft sind hier typische akustische Maßnahmen in Form einer Pulsationsdämpferplatte als auch strukturelle Maßnahmen wie der Schwingungstilger (Magic Cube) zu erwähnen (Bild 03).

Fallbeispiel Fliehkraftabscheider

Im Folgenden wird der Lösungsweg anhand eines konkreten Fallbeispiels dargestellt: In einer großindustriellen Anlage werden Gesteine thermisch behandelt, um organische Bestandteile aus den Sedimenten zu extrahieren. Im Rahmen eines aufwändigen und technologisch anspruchsvollen Prozesses werden die Sedimente zunächst einem heißen Trägergasstrom über-

geben und pneumatisch 40 m vertikal gefördert. Im Anschluss an diese Flugphase – in der das Material getrocknet wird – müssen die Feststoffe aus dem Gasstrom getrennt werden. Dies erfolgt mittels eines gewaltigen Fliehkraftabscheiders (Zyklon). Dieser besitzt einen Durchmesser von über 6 m und eine Höhe von 21 m.

Im Rahmen der Inbetriebnahme dieser Anlage wurden auffällig erhöhte Schwingungen am sogenannten Dom des Zyklons bemerkt, die einen sicheren Betrieb der Anlage unmöglich machten. Erste Messungen durch die Anlagenbetreiber bestätigten eine nicht ausreichende Dauerfestigkeit der Anlage in diesem Zustand.

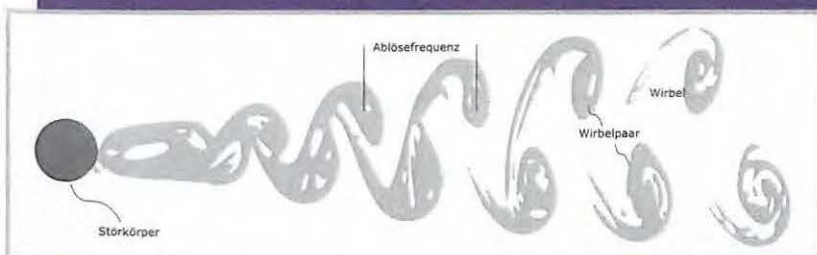
Im Rahmen einer zielgerichteten messtechnischen Untersuchung durch die Firma Kötter Consulting Engineers wurde das Rohrleitungssystem mit speziellen Druckaufnehmern ausgestattet, um mögliche Wirbelablösegebiete bei Anlagenbetrieb zu identifizieren und Druckpulsationen in den Rohrleitungen zu bestimmen. Darüber hin-

aus wurden in den relevanten Anlagenbereichen Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer montiert, um Strukturschwingungen zu ermitteln.

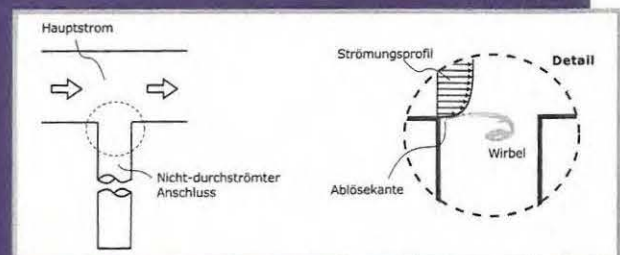
Insgesamt wurden 40 temporäre Messstellen eingerichtet und mittels einer Verkabelung von insgesamt 2500 m an eine zentrale Datenerfassung angeschlossen. Diese Messkonfiguration erlaubt es, das Anfahren und den Betrieb der Anlage kontinuierlich und mit hoher zeitlicher Abtastung und Auflösung dynamisch zu vermessen. Damit war es möglich, Betriebszustände und -bedingungen zu ermitteln, in denen reproduzierbar hohe Schwingwerte am Dom des Zyklons auftraten.

Ergebnisse der Messungen

Anhand eines Spektrogramms der Druckpulsationen im Bereich des Zyklons für eine Betriebsfahrt kontinuierlich ansteigenden Volumenstromes wurden Druckschwankungen im Bereich von 5 bis 7 Hz festge-



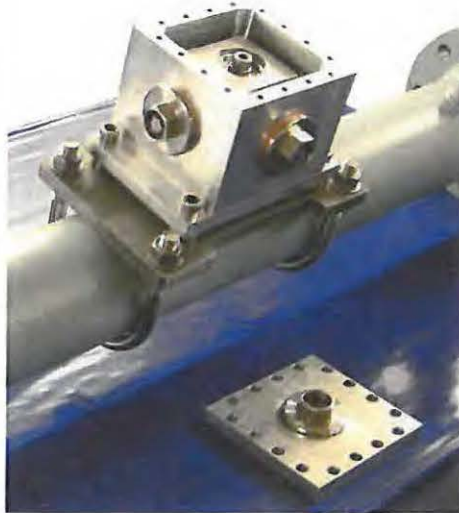
01 Quer angeströmter, kreisrunder Störkörper mit Wirbelstraße



02 Überströmtes Rohrleitungssegment mit ablösendem Wirbel



03 Typische Minderungsmaßnahmen für Akustik und Strukturmechanik: patentierte Pulsationssdämpferplatte, links und Schwingungstilger, rechts



stellt (Bild 05). Eine direkte Erregung durch die Gebläse, z. B. in Form der Schaufelpassierfrequenz, war ausgeschlossen. Es konnte festgestellt werden, dass die Frequenz der Druckpulsationen in einem nahezu linearen Verhältnis zum Volumenstrom stand. Auf der Grundlage der Messdaten konnte damit eine Wirbelablösung innerhalb des Rohrleitungssystems als Erregerquelle identifiziert werden. Eine Verstärkung und eine Wechselwirkung mit einem Resonator in Form des „Einrastens“ der Pulsationsfrequenz waren nicht offensichtlich.

Mittels einer einfachen Abschätzung wurden die aus den Druckpulsationen resultierenden dynamischen Kräfte auf den Zyklon berechnet. Im Falle einer Rohrweite von 2 m rufen die Druckschwankungen an einem 90°-Bogen Wechselkräfte in einer Größenordnung von ca. 2,2 kN hervor. Die

weitere Analyse zeigte, dass diese allein nicht für die überhöhten Schwingungen verantwortlich sein konnten.

Anschließend wurde daher die Strukturmechanik des Abscheiders im kurzen Anlagenstillstand detailliert untersucht. Zu diesem Zweck wurde ein abgestimmter Unwuchterreger montiert und das Resonanzverhalten analysiert (Bild 04). Eine Koinzidenz von Struktureigenfrequenzen und der Pulsationsfrequenz zeigten sich eindeutig. Damit war die Wirkungskette bestehend aus Erregung, Übertragung und Verstärkung offengelegt und effiziente Minderungsmaßnahmen konnte eingeleitet werden.

Eine Optimierung der Strömungsführung und Vermeidung der Wirbelablösung sind meistens mit beträchtlichem Aufwand verbunden. Es sind umfangreiche numerische Simulationen oder maßstabsgerechte

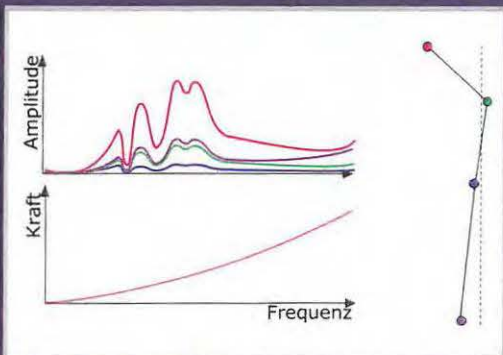
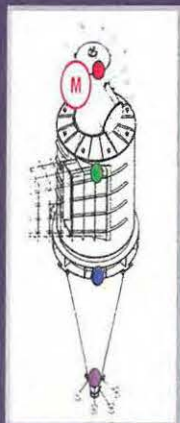
Modellversuche erforderlich, um die Wirksamkeit geplanter Modifikationen zu bewerten. Da aus den Versuchen mit dem Unwuchtmotor das Übertragungsverhalten der Anlage bekannt war, konnte nachgewiesen werden, dass eine Unterbindung der Wirbelablösungen für einen dauerhaften Betrieb nicht zwingend erforderlich war. Die Minderung der Resonanzüberhöhungen durch eine gezielte Verschiebung der Eigenfrequenzen des Zyklons wurde daher favorisiert. Zu diesem Zweck wurde ein Finite Elemente Modell (FEM) des Zyklons erstellt.

Der Vergleich des Modells mit den Messergebnissen wies dabei ungewöhnlich deutliche Abweichungen auf. Eine mögliche Ursache dafür können unter anderem schwingungsbedingte Vorschädigungen sein. Bei der Vor-Ort-Kontrolle wurden Risse im Fußbereich des Doms gefunden. Diese wurden saniert und darüber hinaus wurden der Dom und das Dach des Zyklons durch zusätzliche Stahlprofilbleche verstärkt.

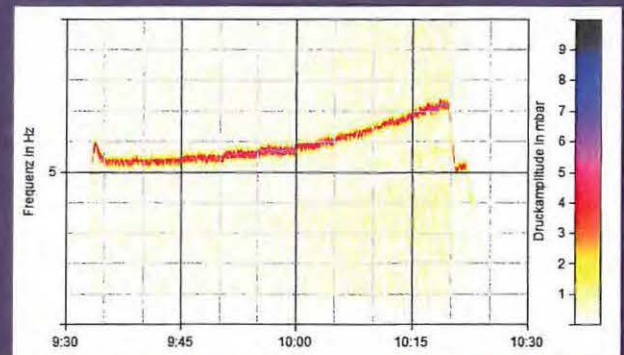
Im Großanlagenbau führen technische Schwierigkeiten bei der Inbetriebnahme schnell zu einem hohen Zeit- und Kostendruck. Aus diesem Grund war die Kontrolle der Wirksamkeit der Maßnahmen auch für die späteren Betreiber von hoher Bedeutung. Mithilfe einer abschließenden Betriebsschwingungsmessung wurde der entsprechende Nachweis geführt und die Anlage konnte schwingungstechnisch problemfrei dem Betreiber übergeben werden.

Fotos: Fotolia, Kötter Consulting Engineers

www.koetter-consulting.com



04 Zyklon mit Lage des Unwuchterregers, Übertragungsverhalten und Resonanzschwingungsform



05 Spektrogramm der Druckpulsationen während einer Betriebsfahrt auf den maximalen Volumenstrom