

# good VIBRATIONS

November 2012

Maschinen und Anlagen

## Nachbericht Workshop Kolbenverdichter im Oktober 2012: Erfolgreicher Workshop Kolbenverdichter im Neubau der KCE-Akademie

In den neuen Räumlichkeiten der KCE-Akademie haben sich am 24. und 25. Oktober über 130 Teilnehmer aus Deutschland und dem europäischen Ausland für den 16. Workshop Kolbenverdichter getroffen.

Referenten und Teilnehmer waren von der modernen Medientechnik, der hervorragenden Akustik und der angenehmen Atmosphäre begeistert. Auch die Aussteller fanden optimale Bedingungen vor, da ihre Messestände nun „mitten im Geschehen“, d.h. am Ausgang zu den Vortragsräumen sowie zwischen Catering und Versuchsvorfürungen aufgebaut werden konnten.



▲ Das Eingangsportal der neuen KCE-Akademie

Kugelkompressor vor, der als Kompressor der Zukunft auf reges Interesse stieß. Dipl.-Ing. Harry Lankenau, Firma NEAC Compressor Service GmbH & Co. KG, referierte zum Thema „Lastwechsel am Kreuzkopfbolzenlager eines Kolbenverdichters“. Aus Brüssel reiste Luc Bertheloot von der Firma Air Liquide Industries Belgium an und sprach über „Maintenance practices and experienced failure modes in Air Liquide plants“.

In den Pausen konnten sich die Gäste verschiedene Versuchsvorfürungen anschauen, die von den KÖTTER-Ingenieuren vorbereitet wurden. So wurden Schallquellen



▲ Der Hüttlin-Kugelkompressor

Ein sorgfältig ausgewähltes Vortragsprogramm bot dem Fachpublikum Informationen zu innovativen technischen Entwicklungen und spannende Erfahrungsberichte aus der Praxis. So stellte z.B. Herr Dr. h.c. Herbert Hüttlin der Firma Innomot AG seinen Hüttlin-Kugelmotor sowie seinen

durch eine akustische Kamera geortet, die Beurteilung von Rohrleitungsschwingungen mit Hilfe eines „Armaturenbaums“ erläutert und die Auswirkung von Pulsationen anhand einer Schraubenfeder veranschaulicht.

Natürlich wurden alle Teilnehmer während des Workshops und der Abendveranstaltung wieder kulinarisch verwöhnt, so dass bei gutem Essen und bei Kaffee und Kuchen auch anregende Diskussionen geführt, neue Kontakte geknüpft und alte Kontakte vertieft werden konnten.

Heike Nyhuis

heike.nyhuis@koetter-consulting.com

„Ich plane mein Jahr rund um den Termin des Workshop Kolbenverdichter.“

(Robert Dartmann, Teilnehmer aller 16 Workshops Kolbenverdichter)

## Technik der Zukunft beherrschen!

*Dem rasanten Tempo, in dem heute neue Techniken entwickelt werden und neue Produkte auf den Markt strömen, kann der Mensch manchmal nur schwer folgen.*

*So steht auch bei „alten“ Erfindungen wie z.B. dem Kolbenverdichter die Entwicklung nicht still. Moderne Werkstoffe werden eingesetzt, Konstruktionstechniken angepasst, die Leistung steigt, das Medium verändert sich...*



*Unsere Aufgabe als Ingenieure ist es, neue Entwicklungen voranzutreiben und die modernste Technik einzusetzen. Es gilt aber auch, Fehler auszuschließen und Risiken zu minimieren.*

*Unser jährlicher Workshop Kolbenverdichter bietet mit Fachreferaten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Praxis ein Forum für den fachlichen Austausch und bringt alle Experten der Branche zusammen. Auch dies ist ein Weg, um die Technik der Zukunft zu beherrschen.*

Ihr Erwin W. Kötter

### ▶▶▶ INHALT ▶▶▶

- ▶ Erfolgreicher Workshop Kolbenverdichter im Neubau der KCE-Akademie
- ▶ Geräuschprobleme an einer Kolbenverdichteranlage beseitigt
- ▶ Maschinenfundamente
- ▶ Messtechnische Begleitung von Inbetriebnahmen
- ▶ Schwingungsschäden an Thermometer-Schutzrohren
- ▶ Pulsationskontrolle in Kolbenverdichtersystemen – Messtechnische Überprüfung von Bestandsanlagen
- ▶ Veranstaltungshinweise der Technischen Akademie Esslingen

### Termin vormerken!

## 17. Workshop Kolbenverdichter 2013

am 16./17. Oktober 2013,  
KCE-Akademie in Rheine

Mehr Infos bei Heike Nyhuis:  
Tel. +49 5971 9710-65  
heike.nyhuis@koetter-consulting.com

[www.koetter-consulting.com](http://www.koetter-consulting.com)

## Geräuschprobleme an einer Kolbenverdichteranlage beseitigt

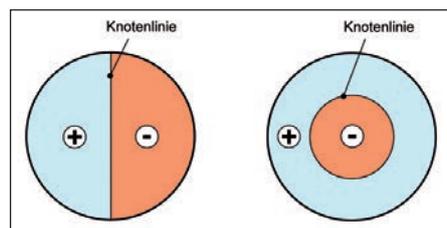
In einer neuen Erdgasverdichterstation wurden drei baugleiche, drehzahlgeregelte, 2-stufige Kolbenkompressoren installiert. Nach der Inbetriebnahme wurden vom Betreiber bei bestimmten Anlagenfahrweisen deutlich wahrnehmbare Geräusche festgestellt. Erste Messungen durch den Betreiber zeigten, dass es sich im Wesentlichen um eine Art Pfeifgeräusch bei einer Frequenz von ca. 1 kHz handelte. Da hierdurch auch außerhalb der Verdichterhallen eine nicht akzeptable Lärmsituation entstanden war, wurde KÖTTER Consulting Engineers mit einer messtechnischen Untersuchung beauftragt. Ziel der Untersuchung war, den genauen Entstehungsort der Geräusche zu lokalisieren und den Anregungsmechanismus aufzudecken. Auf Basis dieser Ergebnisse sollten Maßnahmen zur Verbesserung der Geräuschsituation aufgezeigt werden.

Bei der Messung wurden sowohl die Druckpulsationen und Schwingungen im Rohrleitungssystem der drei Verdichter sowie der Luftschall an unterschiedlichen Positionen innerhalb und außerhalb der Verdichterhallen zeitgleich mit einem mehrkanaligen Messdatenerfassungssystem bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen aufgezeichnet.

Es wurde – unabhängig davon, welcher Verdichter in Betrieb war – ein dominanter Einzelton im Luftschall bei einer Frequenz von ca. 950 Hz festgestellt. Dieser trat ebenfalls in den Druckpulsationen sowie als Körperschall an der Oberfläche der jeweiligen saugseitigen Rohrleitung und am Pulsationsdämpfer der 1. Stufe auf. Des Weiteren zeigte sich, dass die Frequenz – anders als z. B. bei einer periodischen Wirbelablösung an einer Tauchhülse – unabhängig von der

Strömungsgeschwindigkeit nahezu konstant blieb. Dieses Verhalten deutete darauf hin, dass es sich um eine Anregung sogenannter akustische „Quermoden“ handelte.

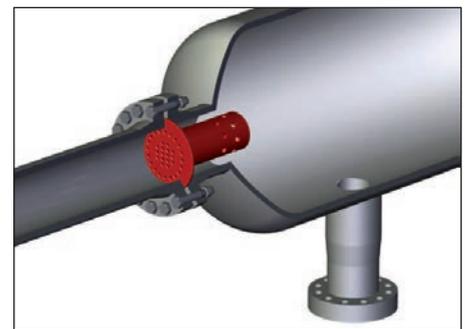
Im Gegensatz zu Schallwellen, die sich in Richtung der Rohrleitungsachse ausbreiten, bilden sich die als Quermoden bezeichneten akustischen Resonanzen quer zur Strömungsrichtung aus. Die Abbildung 1 zeigt hierzu beispielhaft die Ausbildung der ersten Quermoden mit diagonaler und konzentrischer Knotenlinie. Für höherfrequente Quermoden treten entsprechend weitere Knotenlinien auf.



▲ Abbildung 1: Druckverteilung der untersten Quermoden mit diagonaler (links Mode 1/0) und konzentrischer Knotenlinie (rechts Mode 0/1)

Außerdem ließen die Körperschallmessungen am Leitungssystem vermuten, dass durch die akustischen Resonanzen auch mechanische Schalenmoden (Eigenformen) der Rohrleitungen und des Pulsationsdämpferbehälters angeregt wurden. Hierdurch war auch die beobachtete starke Schallabstrahlung in die Umgebung zu erklären. Diese Vermutung wurde durch die Ergebnisse der anschließend durchgeführten Berechnungen bestätigt.

Als Quelle für die Anregung der Quermoden wurde eine breitbandige und relativ energiereiche Wirbelablösung an der Loch-



▲ Abbildung 2: Einbauposition des Quermodenbrechers

blende am Eintrittsflansch der saugseitigen Pulsationsdämpfer ermittelt.

Zur Verbesserung der bemängelten Geräuschsituation wurde auf Basis der patentierten Pulsations-Dämpferplatte nach dem KÖTTER-Prinzip ein speziell auf diesen Anregungsmechanismus und die Frequenz abgestimmter Quermodenbrecher entwickelt und anstelle der ursprünglich montierten herkömmlichen Lochblende eingebaut (siehe Abbildung 2).

Hierbei musste besonders darauf geachtet werden, dass dieses neue Bauteil die gleiche pulsationsdämpfende Wirkung wie die bisher eingebaute Lochblende besitzt, gleichzeitig aber die Ausbildung des festgestellten Quermoden an dieser Stelle verhindert.

Nach Einbau des Quermodenbrechers und der Wiederinbetriebnahme der Anlage zeigte sich, dass trotz des variablen Betriebsbereiches keine störenden Geräusche mehr auftreten und der Betreiber die Anlage uneingeschränkt betreiben konnte.

Dipl.-Ing. Martin Westermann

[martin.westermann@koetter-consulting.com](mailto:martin.westermann@koetter-consulting.com)

## Maschinenfundamente

Auch wenn die statische und dynamische Auslegung von Maschinenfundamenten heute Stand der Technik ist, wird ihre langfristige Bedeutung meist unterschätzt. Eine solide Verankerung einer Maschine entscheidet maßgeblich über die Lebenserwartung einer Anlage.

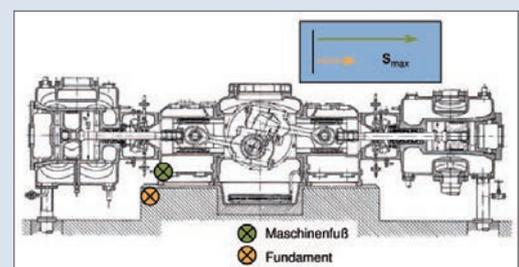
Wie alle Komponenten unterliegen auch die Fundamente einer Maschine einem permanenten Verschleiß und einer Alterung durch verschiedene Umwelteinflüsse wie Temperatur und Feuchtigkeit. Im Laufe ihrer Einsatzdauer müssen Fundamente hohe statische Lasten und zusätzlich meist beträchtliche dynamische Lasten aufnehmen.

Wechselkräfte können im Extremfall dafür sorgen, dass sich ein Fundament praktisch „aufreißt“. Entsteht auf diese Weise ein

mechanisches Spiel, kann ein komplexes Zusammenspiel von veränderter Anregung und Resonanzverhalten zu unzulässig hohen Schwingungen der Maschine und den angeschlossenen Systemen führen.

Häufig wird bei einem Schaden am Fundament der Maschine, wie zum Beispiel dem Abriss eines Bolzens, eine statische Überbeanspruchung unterstellt. Meist wird dann der Bolzen erneuert, jedoch tritt oft nach kurzer Zeit erneut ein vergleichbarer Schaden ein.

Eine messtechnische Ermittlung der tatsächlichen Relativbewegungen zwischen Maschine und Fundament bei laufender Maschine kann bei der Identifikation eines dynamischen Aufstellungsproblems helfen. Mit der Erfassung weiterer Messgrößen wie z.B. Druck und Schwinggeschwindigkeiten und gründlicher Analyse lassen sich



▲ Relativbewegungen zwischen Maschine und Fundament

in vielen Fällen Mechanismen für erhöhte dynamische Belastungen ausfindig machen. Darauf aufbauend entstehen mitunter Lösungsansätze und Minderungsmaßnahmen durch welche die Ursache der erhöhten dynamischen Belastung der Aufstellung wirkungsvoll behoben werden kann.

Dr.-Ing. Christian Jansen

[christian.jansen@koetter-consulting.com](mailto:christian.jansen@koetter-consulting.com)

## Messtechnische Begleitung von Inbetriebnahmen

Chemieanlagen sind hoch spezialisierte Anlagen und auf ein Produkt maßgeschneidert. Im Laufe der Zeit bildet sich um eine solche Basisanlage eine Art Ökosystem von Nebenanlagen mit denen Stoffkreisläufe geschlossen und Produktlücken geschlossen werden. Die Optimierung führt zu einer kontinuierlichen Anpassung und Modifikation dieser Anlagen.

Der Umbau dieser Anlagen ist in vielen Fällen umfangreich und umfasst zum Beispiel den Austausch der Primärkomponenten, wie Reaktoren, Pumpen und Verdichter aber in einfachen Fällen auch nur die Änderung der Rohrleitungsführung. Nicht immer ist dabei klar, dass dies auch einen erheblichen Eingriff in die Dynamik der Anlage darstellt und in erhöhten Wechselbeanspruchungen der Werkstoffe enden kann.

In einem konkreten Beispiel wurde eine verfahrenstechnische Anlage in einem Chemiewerk auf ein neues Produkt umgestellt. Aufgrund der geringen Leistung der Maschine wurde auf eine numerische Pulsationsstudie (z.B. nach API 618) verzichtet. Während der ersten Inbetriebnahme fiel jedoch einer der Kolbenverdichter mit einem kapitalen Schaden aus. Wie sich später herausstellte, war ein Rohrventil den dynamischen Belastungen nicht gewachsen. Durch diesen

Vorfall sensibilisiert wurden Pulsationsdämpfer ausgelegt und KÖTTER Consulting Engineers mit der messtechnischen Begleitung der Inbetriebnahme betraut.

**Eine Änderung der Rohrleitungsführung stellt einen erheblichen Eingriff in die Dynamik der Anlage dar.**

Zu diesem Zweck wurden Schwingungsaufnehmer auf den Maschinen und Rohrleitungen montiert und zudem Pulsationsmesstechnik installiert. Alle diese Sensoren wurden auf ein mehrkanaliges Messsystem aufgelegt und während der gesamten Inbetriebnahmephase der Anlage wurden die Daten aufgezeichnet und analysiert.

Damit war es möglich, zu jedem Zeitpunkt eine Aussage über die Schwingungssituation in der Anlage zu treffen und eine aus schwingungstechnischer Sicht sichere Inbetriebnahme zu gewährleisten.

Eine solche messtechnisch begleitete Inbetriebnahme hilft nicht nur die Maschinen abzusichern. Wenn – wie in diesem Fall – ein unerwarteter Schaden eingetreten ist, dann sind selbstverständlich die verantwortlichen Ingenieure verunsichert. Zu wissen, dass



▲ Isolierte Rohrleitungen

man neben allen verfahrenstechnischen Vorgängen auch über den dynamischen Zustand der Anlage Bescheid weiß, gibt ein gutes Gefühl.

Dr.-Ing. Christian Jansen  
christian.jansen@koetter-consulting.com

## Schwingungsschäden an Thermometer-Schutzrohren

In fast allen Bereichen der Industrie werden zur Messung der Temperaturen von gasförmigen und flüssigen Medien in Druckleitungen häufig Tauchhülsen (Thermometer-Schutzrohre) entweder in zylindrischer oder konischer Ausführung eingesetzt. Üblicherweise ragen diese mit der temperaturempfindlichen Spitze bis in die Mitte der Rohrleitung hinein. Diese Schutzrohre müssen den Drücken und Kräften in der Leitung bzw. im strömenden Medium standhalten. Hierfür geben Normen entsprechende Auslegungskriterien vor.

Häufig unterschätzt wird jedoch die Empfindlichkeit der Schutzrohre auf Schwingungsanregung durch Wirbelablösung. Fallen die Wirbelablösefrequenz am Schutzrohr und Struktureigenfrequenz zusammen, kann dieses zu großen Schwingamplituden an der Schutzrohrspitze führen. Im schlimmsten Fall kommt es in kurzer Zeit zur Materialermüdung und das Schutzrohr reißt an der Einbaumuffe ab. Gas- oder Flüssigkeitsaustritte können dann verheerende Wirkung haben. Überschlägige Auslegungskriterien zur Vermeidung werden in den Normen zwar angegeben, dennoch zeigt die Erfahrung, dass die rechnerische

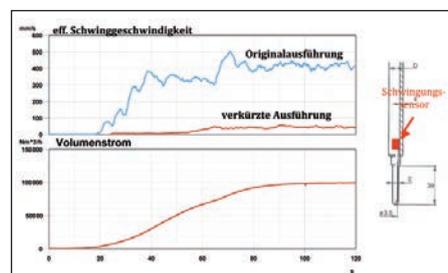
Abschätzung der Schutzrohr-Eigenfrequenz einerseits relativ unsicher ist, andererseits die Strömungsgeschwindigkeit am Schutzrohr falsch eingeschätzt werden kann.

Ein solcher Fall konnte jüngst während einer Messung festgestellt werden (Abbildung 1). Ein Thermometer-Schutzrohr wurde ca. 0,5 m hinter einem Gasregelventil in eine DN300-Leitung eingebaut. Nach kurzer Zeit konnten bereits Materialrisse an der gefährdetsten Stelle (Übergang zur Einbaumuffe) festgestellt werden. Daraufhin wurde ein Miniatur-Schwingungssensor von innen in die Spitze eines neuen Schutzrohres eingesetzt. Beim nachfolgenden Betrieb des Gas-

regelventils wurden extrem hohe Schwinggeschwindigkeiten von bis zu 500 mm/s eff. gemessen (entspricht einer Auslenkung von rund 2 mm an der Spitze und einer Werkstoffspannungsamplitude von 200 N/mm<sup>2</sup> am Übergang zur Einbaumuffe). Das Schutzrohr schwingt hierbei in seiner Eigenfrequenz.

**Die Empfindlichkeit der Schutzrohre auf Schwingungen durch Wirbelablösung wird häufig unterschätzt.**

Ursache hierfür ist, dass das Geschwindigkeitsprofil stromab des Regelventils sehr unregelmäßig ist und das Schutzrohr mit einer hohen Gasgeschwindigkeit angeströmt wird. Hierbei wird es durch Wirbelablösung permanent in seiner Eigenfrequenz ange-regt. Abhilfe brachte hier eine Verkürzung des Schutzrohres um ca. 1/3 der Anströmlänge. Die mechanische Eigenfrequenz des Schutzrohres wurde weit nach oben geschoben und konnte durch die Gasströmung nicht mehr angeregt werden.



▲ Abbildung 1: Eff. Schwinggeschwindigkeit an der Schutzrohrspitze, Minderung durch Verkürzung der Anströmlänge

Dipl.-Ing. Franz-Josef Düttmann  
franz-josef.duettmann@koetter-consulting.com

## Pulsationskontrolle in Kolbenverdichtersystemen – Messtechnische Überprüfung von Bestandsanlagen

Oszillierende Massen, schwankende Antriebsmomente und pulsierende Kräfte in angeschlossenen Rohrleitungen sind konstruktionsbedingte dynamische Belastungen von Kolbenverdichtern. Dies bedeutet hohe Wechselkräfte und damit auch potentiell hohe Schwingungsamplituden und dynamische Belastungen der Werkstoffe in einer solchen Anlage. Aus diesem Grund wird bei der Planung einer neuen Kolbenverdichteranlage eine sogenannte Pulsationsstudie erstellt. Auf Basis eines numerischen Modells werden hierbei die aus dem Betrieb zu erwartenden Gaskräfte ermittelt und pulsationsmindernde Maßnahmen ausgelegt. Zum Einsatz kommen dabei zum Beispiel Blenden, Pulsations-Dämpferplatten oder Pulsationsbehälter. Diese Bauteile besitzen eine spezifische Charakteristik und müssen sorgfältig dimensioniert werden, um eine optimale Wirkung bei minimalem Druckverlust zu erzielen.

Durch ihre pulsationsdämpfenden Eigenschaften tragen diese Einbauten zur dauerhaften schwingungstechnischen Absicherung der gesamten Anlage bei. Durch Überbeanspruchung kann es z.B. in Pulsationsbehältern zum Versagen einzelner Einbauten kommen. Je nach Schadensausmaß

wird die Funktion dabei eingeschränkt oder sogar aufgehoben. Oft ist dies ein langsam fortschreitender Prozess, der sich meist nicht durch eine Leckage oder durch eine plötzliche Änderung des Schwingungsverhaltens einer Verdichteranlage bemerkbar macht. Deshalb bleibt ein solcher Schaden häufig unerkannt. Wenn überhaupt wird er erst dann erkannt, wenn Sekundäreffekte dazu führen, dass Rohrleitungen reißen oder Maschinenschwingungen Abschaltwerte überschreiten.

Kann man in ihrer Wirkung eingeschränkte Pulsationsdämpfer messtechnisch erkennen? Prinzipiell: Ja. Üblicherweise sind die Möglichkeiten, eine Verdichteranlage mit Pulsationsmesstechnik auszustatten, jedoch eingeschränkt, so dass z.B. die Wirkung eines Behälters nicht direkt ermittelt werden kann. In diesem Fall muss mindestens eine der folgenden Bedingungen erfüllt sein:

- ▶ Es liegen Vergleichsdaten, z.B. aus einer Abnahmemessung, vor.
- ▶ Ein numerisches Modell der Anlagenakustik existiert oder kann erstellt werden, um die aktuelle Pulsationssituation zu bewerten.



▲ Manometer

In jedem Fall kann anhand einer Übersichtsmessung durch den Vergleich der Pulsationsmesswerte mit Richtwerten eine objektive Bewertung vorgenommen werden.

In diesem Rahmen bietet es sich an, ebenfalls die Maschinen- und Rohrleitungsschwingungen synchron zu den Druckpulsationen zu erfassen. Die Auswirkungen überhöhter Druckpulsationen können damit meist direkt ermittelt werden. Damit kann dann eine Einschätzung der Anlagensicherheit für den Zeitraum bis zur einer eventuell erforderlichen Sanierung erfolgen.

Dr.-Ing. Christian Jansen  
christian.jansen@koetter-consulting.com

29./30. November 2012  
KCE-Akademie, Rheine:

### Aktuelle Themen aus dem Bereich der Technischen Akustik

Leitung: Prof. Dr.-Ing. I. Veit  
und Dipl.-Ing. A. Schällig

[www.kce-akademie.de](http://www.kce-akademie.de)

03./04. Dezember 2012  
KCE-Akademie, Rheine:

### Erschütterungen und Sekundärschall

Leitung: Dr.-Ing. F. Krüger

Mehr Informationen und Online-  
Anmeldung zu allen Veranstaltungen  
unter [www.kce-akademie.de](http://www.kce-akademie.de)

10./11. Dezember 2012  
KCE-Akademie, Rheine

### Grundlagen der Maschinenakustik

Leitung: Prof. Dr.-Ing. R. Angert  
und Dr.-Ing. D. Giljohann

[www.kce-akademie.de](http://www.kce-akademie.de)

KÖTTER Consulting Engineers  
GmbH & Co. KG

Bonifatiusstraße 400  
D-48432 Rheine  
Tel. +49 5971 9710-0  
Fax +49 5971 9710-43  
E-Mail: [info@koetter-consulting.com](mailto:info@koetter-consulting.com)

Handelsregister Steinfurt HRA 4948  
USt-IDNr.: DE 814 561 321  
Komplementär:  
KÖTTER Consulting Engineers Verw.-GmbH  
Geschäftsführer: Dipl.-Ing. Erwin Kötter,  
Margret Grobosch,  
Dr.-Ing. Johann Lenz

KÖTTER Beratende Ingenieure  
Berlin GmbH

Balzerstraße 43  
D-12683 Berlin  
Tel. +49 30 526788-0  
Fax +49 30 5436016  
E-Mail: [berlin@koetter-consulting.com](mailto:berlin@koetter-consulting.com)

Handelsregister Berlin HRB-Nr. 44230  
USt-IDNr.: DE 157 53 44 94  
Geschäftsführer: Dipl.-Ing. Bernd Fleischer



[www.koetter-consulting.com](http://www.koetter-consulting.com)