

Wasserstoffeinspeicherung mit bestehenden Erdgasverdichtern

Pulsationstechnische Aspekte beim Einsatz von Kolbenverdichtern

Johann Lenz und Patrick Tetenborg

Regel- und Messtechnik, Wasserstoff, Kolbenverdichter, Pulsationsverhalten, Schallgeschwindigkeit

Zur Verdichtung von Wasserstoff mit bestehenden Erdgasverdichtern wird sich aufgrund verschiedener Parameter eine neue Ära der Kolbenverdichter entwickeln. Um aus schwingungstechnischer Sicht weiterhin einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, sind die geänderten Randbedingungen infolge der veränderten Fluideigenschaften und deren Einfluss auf die Dynamik des Kolbenverdichtersystems nicht zu vernachlässigen. Durch den markanten Unterschied zwischen den Schallgeschwindigkeiten von Wasserstoff und Erdgas gibt es verschiedene Einflüsse auf das Pulsationsverhalten, die im vorstehenden Artikel unterteilt nach Anregung und Übertragung vorgestellt und diskutiert werden. Es zeigt sich, dass eine pauschale Aussage über das zu erwartende Pulsations- und dadurch bedingt auch Schwingungsverhalten nicht möglich ist. Es wird daher dringend empfohlen, die Umstellung einer bestehenden Erdgasanlage auf zunehmenden Wasserstoffanteil möglichst frühzeitig schwingungstechnisch zu analysieren. Hierzu bieten sich theoretische Studien – sogenannte Pulsationsstudien – an, die bereits frühzeitig mögliche Probleme bei der Umstellung aufdecken können und die gezielte Auslegung von effektiven Maßnahmen ermöglichen. Parallel kann auch eine kontinuierliche Überwachung der Anlage die schwingungstechnische Sicherheit – bei zunehmenden Wasserstoffanteilen im Förderfluid – signifikant erhöhen.

Hydrogen storage with existing natural gas compressors – Pulsation aspects in the use of reciprocating compressors

The compression of hydrogen with existing natural gas compressors will usher a new era of piston compressors due to various parameters. In order to ensure a safe operation from a vibration engineering point of view, the changed boundary conditions and their influence on the dynamics of the reciprocating compressor system cannot be neglected. Due to the distinctive difference between the velocities of sound for hydrogen and natural gas, there are various influences on the pulsation behavior, which have been presented and discussed.

Therefore, it is highly recommended that the conversion of an existing natural gas plant to increasing hydrogen content is analyzed from a vibration engineering point of view as early as possible. Theoretical studies - so-called pulsation studies - are suitable for this purpose, as they can reveal potential problems during the conversion at an early stage and enable the targeted design of effective measures. At the same time, optimized monitoring of the plant can significantly increase vibration safety in the event of an increase of hydrogen components in the production fluid.

1. Einführung

Im Rahmen der Umstellung auf nachhaltige Energielösungen wird die Verwendung von Wasserstoff als Energieträger zunehmend favorisiert. Wasserstoff ist das che-

mische Element mit der geringsten Atommasse. Unter Bedingungen, die normalerweise auf der Erde herrschen, kommt nicht der atomare Wasserstoff H vor sondern der molekulare Wasserstoff H₂ als geruchloses Gas (**Bild 1**).

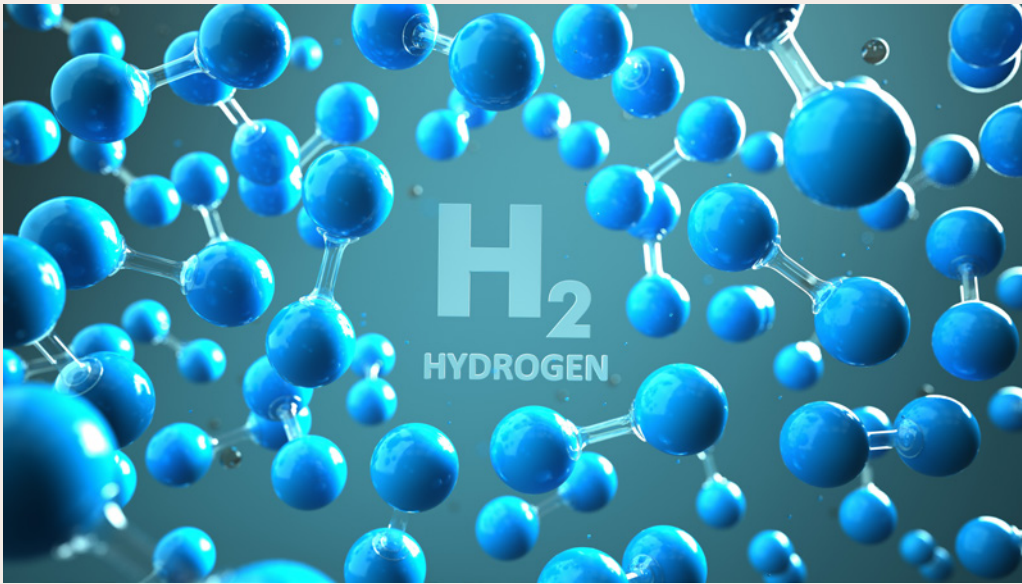


Bild 1: Molekularer Wasserstoff - der Energieträger der Zukunft

Tabelle 1: Vergleich pulsationsrelevanter Stoffeigenschaften (Referenzbedingung: Temperatur 0 °C und 1 bar Druck)

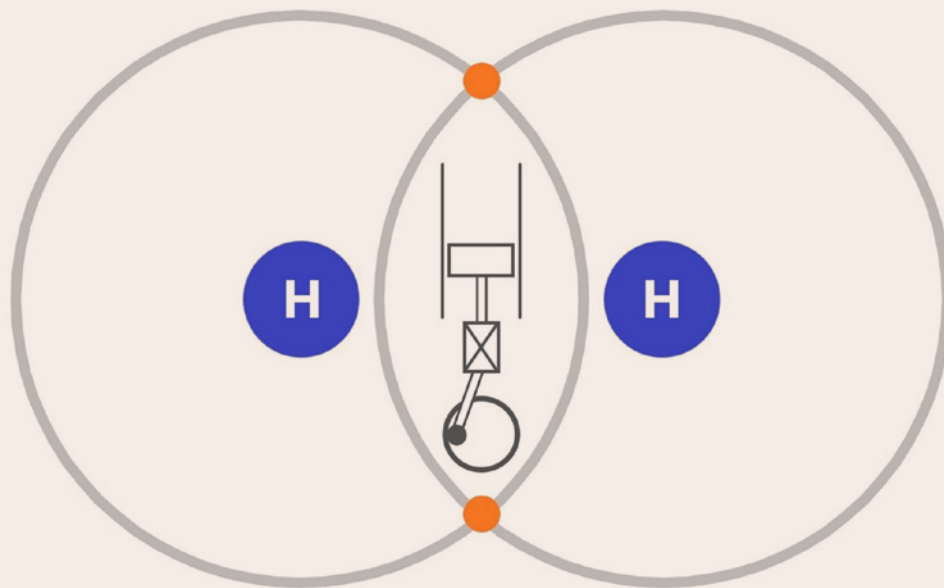
| Medium | Dichte | Schallgeschwindigkeit | Impedanz | Isentropenexponent |
|-----------------------|--|--|--|--------------------|
| | $\rho = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ | $a = \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ | $Z = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$ | $\kappa = [-]$ |
| Luft | 1,29 | 332 | 428 | 1,4 |
| Methan (H-Gas) | 0,72 | 430 | 310 | 1,32 |
| Wasserstoff | 0,09 | 1.265 | 114 | 1,42 |

Der Einsatz von Wasserstoff eröffnet ein hohes Potenzial zur Minderung der Treibhausgas-emissionen. Mit der nationalen Wasserstoffstrategie bekennt sich die Bundesregierung zu einer vielfältigeren Anwendung von Wasserstoff [1]. Wasserstoff soll in Zukunft den wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele im Zuge der Energiewende leisten. Das über 500.000 km lange Erdgasnetz und die existierenden Erdgasspeicher bieten in diesem Zusammenhang günstige Transport- und gewaltige Speichermöglichkeiten für den möglichst regenerativ erzeugten Wasserstoff [2]. Zur Umsetzung dieses Ansatzes sind schon viele technische Fragen geklärt worden. Im nachfolgenden Beitrag geht es um die Verdichtung des Wasserstoffes mit bestehenden Verdichteranlagen aus dem Erdgasbereich. Dabei wird grundsätzlich zwischen den beiden Verdichterbauarten Turboverdichter (Strömungsmaschine) und Kolbenverdichter (Verdrängermaschine) unterschieden.

Der Einsatz von bestehenden Turboverdichtern zur Verdichtung von Wasserstoff ist aus strömungstechnischer Sicht nicht ohne Weiteres möglich. Vergleicht man

die Grundeigenschaften von Erdgas und Wasserstoff miteinander (siehe **Tabelle 1**), fallen neben der unterschiedlichen Dichte insbesondere die stark unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten ins Gewicht. Aus rein strömungstechnischer Sicht ist eine Verdichtung von Wasserstoff mit einem bestehenden Turboverdichter nur dann mit vergleichbarer Effizienz möglich, wenn die auf die Schallgeschwindigkeit bezogenen Geschwindigkeitsdreiecke am Laufradein- und -austritt gleich bleiben (Mach'sche Ähnlichkeit). Da zwischen Erdgas und reinem Wasserstoff die Schallgeschwindigkeiten nahezu um den Faktor vier variieren, wäre für reinen Wasserstoff ein um den Faktor vier größerer Durchsatz bei einer gleichzeitig um den Faktor vier höheren Drehzahl (Umfangsgeschwindigkeit) erforderlich. Dieses ist für bestehende Turboverdichter-Anlagen kaum zu realisieren. Aber auch für Neuanlagen ergibt sich für das Gasverdichtungsverhältnis bei Wasserstoff ein grundlegendes Problem, so dass insbesondere für eine übliche Druckerhöhung von Wasserstoff Verdrängermaschinen favorisiert werden (**Bild 2**).

Bild 2: Verdichtung von Wasserstoff mit Kolbenverdichtern



Bei Kolbenverdichtern ermöglicht hingegen deren Verdichtungsprinzip eine vom Fördermedium näherungsweise unabhängige Einsatzmöglichkeit. Dennoch ist die Umstellung einer bestehenden Kolbenverdichteranlage auf Wasserstoff alles andere als trivial. Denn beim Umstieg auf ein anderes Fördermedium werden der Verdichter, die Pulsationsdämpfer sowie das Rohrleitungs- bzw. Speichersystem mit gänzlich anderen Stoffeigenschaften konfrontiert. Diese haben einen wesentlichen Einfluss auf das Pulsationsverhalten der gesamten Anlage und können dadurch zu einem veränderten Schwingungsverhalten der Anlage führen.

Es stellt sich die Frage, welchen Einfluss die Wasserstoffverdichtung auf die dynamischen Kräfte an einem vorhandenen Erdgas-Kolbenverdichter und am angeschlossenen Rohrleitungssystem hat. Inwiefern kann der bestehende Erdgasverdichter aus dynamischer Sicht für Wasserstoff genutzt werden? Im nachfolgenden Artikel wird ein empfohlener Weg hierfür skizziert. Dazu erfolgt einleitend die Beschreibung und Erläuterung der Vorgehensweise bei der pulsationstechnischen Betrachtung zur Aufstellung eines Kolbenverdichtersystems. Anschließend werden die entscheidenden Änderungen bei einer Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff vorgestellt und diskutiert.

2. Pulsationstechnische Aspekte an Kolbenverdichteranlagen

Der Kolbenverdichter (**Bild 3**) wird aufgrund seiner oszillierenden Arbeitsweise oft in Marktsegmenten eingesetzt, wo er sich durch seine Robustheit und seinem aus-

gezeichneten Wirkungsgrad gegenüber anderen Verdichterbauarten durchsetzt. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist der breite Betriebsbereich, in dem Kolbenverdichter eingesetzt werden können. Vorteilhaft zeigt sich diese Eigenschaft beispielsweise bei den im Verlauf des Jahres stark schwankenden Kavernendrücken eines Erdgasspeichers. Hier können Kolbenverdichter zur Gaseinspeicherung bei nahezu beliebigen Druckverhältnissen eingesetzt werden. Nachteilig zeigt sich hingegen der hohe Instandhaltungsaufwand, aber auch die dynamischen Kräfte, die sowohl am Verdichter selbst als auch am angeschlossenen Rohrleitungssystem zu erhöhten Schwingungen führen können. Um die auftretenden Schwingungen bereits in der Planungsphase in den Griff zu bekommen, werden im Vorfeld Berechnungen in Form einer Pulsationsstudie durchgeführt. Ein wesentliches Ergebnis dieser Pulsationsstudie ist die Auslegung und Dimensionierung der in der Regel individuell gefertigten Pulsationsdämpfer. Diese werden möglichst nahe an die Zylinderflansche installiert und ermöglichen eine erste signifikante Reduktion der durch den Verdichterbetrieb induzierten Druckpulsationen.

Eine Pulsationsstudie besteht in der Regel aus einem akustischen und einem strukturmechanischen Teil und wird – je nach den vorliegenden Randbedingungen – in unterschiedlichen Ausführungsschritten und Detailtiefen durchgeführt. Die genauen Berechnungsausführungen sind in dem API Standard 618 (American Petroleum Institute) [3] festgelegt. Die akustischen Berechnungen beziehen sich auf die „Gassäulenschwingungen“ innerhalb der Rohrleitung bzw. der Behälter und des Verdichters. Erfahrungsgemäß bieten sich eindimensionale Strömungs-



Bild 3: Typische Kolbenverdichterinstallation in 4-Zylinder Boxeranordnung mit saug- und druckseitigen Pulsationsdämpfern zur Erdgasverdichtung

mulationen im Zeitbereich an, um das zu erwartende Pulsationsniveau im Betrieb von Kolbenverdichteranlagen bereits in der Planungsphase zu berechnen. Eine Simulation kann beispielsweise auf der eindimensionalen Navier-Stokes-Gleichung Gl. (1), der Kontinuitätsgleichung Gl. (2), der Energiegleichung Gl. (3) sowie der Zustandsgleichung Gl. (4) basieren (hier nur in der einfachen Form für konstante Rohrleitungsquerschnitte und isentrope Zustandsänderungen benannt).

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{p}{\rho^\kappa} = \text{konstant} \quad (3)$$

$$p = \rho RTZ \quad (4)$$

mit:

$v(x, t)$ = Strömungsgeschwindigkeit

$p(x, t)$ = statischer Druck

$\rho(x, t)$ = Dichte

$T(x, t)$ = Temperatur

κ = Isentropen-/Polytropenexponent

R = spezifische Gaskonstante

Z = Realgasfaktor

μ = dynamische Viskosität

Dieses System partieller nichtlinearer Differentialgleichungen lässt sich durch eine Koordinatentransformation auf Linien unbestimmter Querableitung (Charakteristi-

ken) und damit auf gewöhnliche Differentialgleichungen zurückführen. Durch eine Raum-Zeit-Diskretisierung wird das Strömungsfeld anschließend entlang der Charakteristiken numerisch integriert.

Das dazugehörige Modell beinhaltet sämtliche Maschinen- und Anlagenbereiche, die unmittelbar an dem Verdichtungsprozess beteiligt sind: Arbeitsraum, Ventile, Gaspassage im Verdichter, Pulsationsdämpfer, Wärmetauscher sowie Rohrleitungen und Armaturen.

In der Regel wird beim Öffnen des Druck- bzw. Saugventils eine Gassäulenschwingung entfacht, die sich im angeschlossenen Rohrleitungssystem in Wellenform fortpflanzt. Diese Gassäulenschwingungen bzw. Druckpulsationen sind neben den mechanischen und geometrischen Betriebsparametern auch von den wesentlichen Stoffeigenschaften abhängig. Ein Vergleich zwischen Erdgas und Wasserstoff zeigt, dass hier sowohl pulsationsmindernde als auch pulsationsverstärkende physikalische Zusammenhänge auftreten. Daher ist eine individuelle Betrachtung eines jeden Anwendungsfalls notwendig, um die Eignung von Bestandsanlagen für den Wasserstoffbetrieb zu bewerten. Um die auftretenden Effekte besser einordnen zu können, werden diese nachfolgend beschrieben.

3. Was ändert sich mit Wasserstoff?

Um zu verdeutlichen, dass durch den Betrieb mit Wasserstoff zahlreiche physikalische Einflüsse zu einem veränderten Betriebsverhalten führen, sind die wesentlichen Einflüsse in **Bild 4** dargestellt. Grundsätzlich lassen sich der Verdichtungsprozess sowie das Ansaugen und Ausschleiben in bzw. aus der Arbeitskammer dem eigentli-

chen Arbeitsprinzip des Verdichters zuordnen. Die Veränderung der Akustik auf Seiten des Pulsationsdämpfers sowie der Einfluss auf die Rohrleitungsakustik beschreiben wiederum die resultierende Interaktion des Verdichters mit der Anlage.

3.1 Verdichtungsvorgang

Die wesentliche Änderung während der eigentlichen Verdichtung in der Arbeitskammer eines jeden Kompressors ist der deutlich steilere Druckanstieg in Abhängigkeit vom Kammervolumen (siehe auch **Bild 4** oben links). Dieser resultiert aus dem stoffspezifischen Isentropenexponenten. Aufgrund der sehr schnell stattfindenden Verdichtung in der Arbeitskammer kann hier in guter Näherung von einem isentropen Vorgang ausgegangen werden. Bei gleichem Kammervolumen zu Beginn der Verdichtung wird der Enddruck deutlich schneller erreicht, welches formal über die Isentropenbeziehung Gl. (5) betrachtet werden kann:

$$\frac{p_{\text{End}}}{p_{\text{Saug}}} = \left(\frac{V_s + V_H}{V_{\text{End}}} \right)^\kappa \quad (5)$$

Anhand des formalen Zusammenhangs für die Arbeitskammer eines Kolbenverdichters wird deutlich, dass bei größeren Isentropenexponenten und gleichem Druck-

verhältnis (ρ) bereits zu einem früheren Zeitpunkt das benötigte Kammervolumen zur Erreichung des Enddrucks erreicht wird.

Dieser Effekt tritt gleichermaßen auch bei der Expansion nach Beendigung des Ausschlebens auf. Hier resultiert der steilere Druckverlauf über dem Kammervolumen in einer früher beginnenden Ansaugphase, da der Saugdruck eher unterschritten wird und die Saugventile somit frühzeitig öffnen.

Dadurch führt der Umstieg auf Wasserstoff zu einem größeren Volumenstrom gegenüber dem Betrieb mit Erdgas. Dieser Effekt ist jedoch nebensächlich, wenn man die Relation der beiden Stoffdichten berücksichtigt. Diese unterscheiden sich je nach Zustand etwa um den Faktor 9. Daraus resultiert ein deutlich niedrigerer Fördermassenstrom.

3.2 Ansaugen / Ausschleiben

Die Änderungen während der eigentlichen Verdichtung in der Arbeitskammer haben auch Auswirkungen auf den Ansaug- und Ausschleibevorgang. In **Bild 4** oben rechts ist der druckseitige Ausschleibevorgang anhand der Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Kurbelwinkels dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Verdichterventile bei dem Betrieb mit Wasserstoff etwas früher öff-

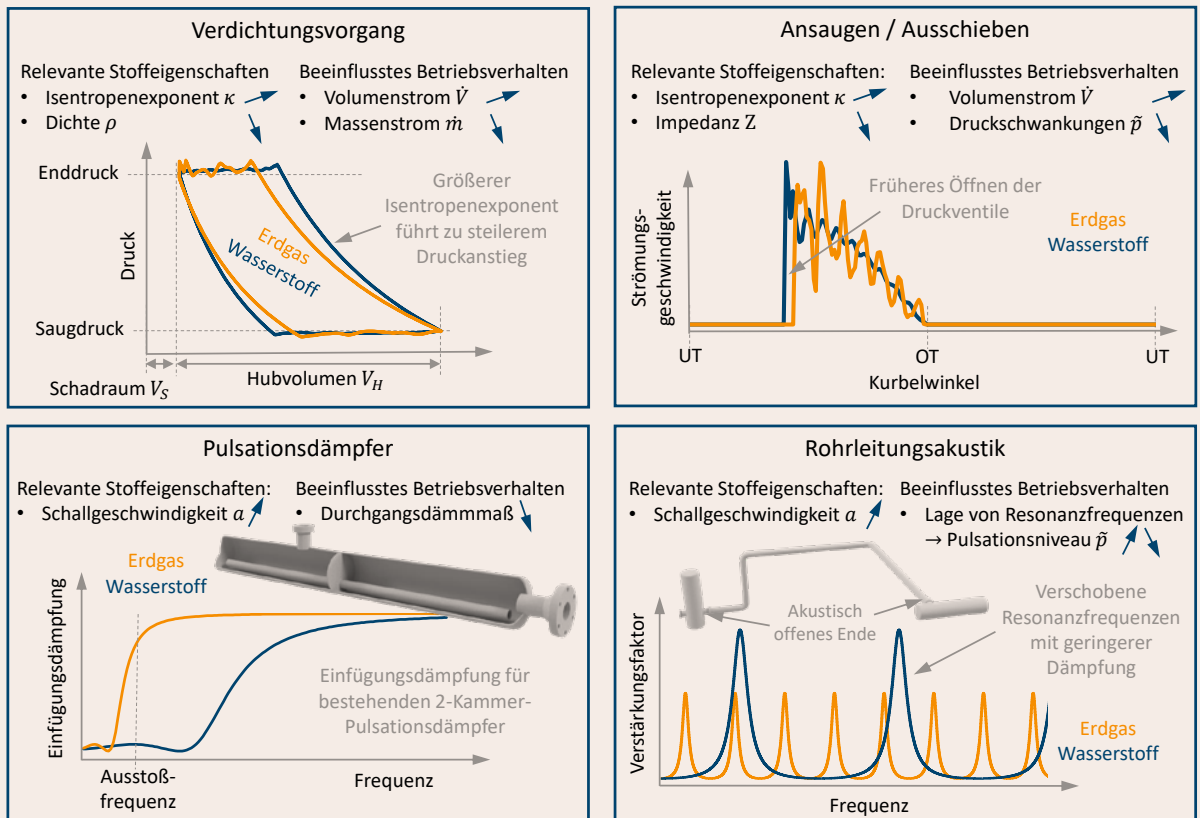


Bild 4: Einfluss von Wasserstoff auf das Pulsationsverhalten von Kolbenverdichteranlagen

nen, da der Enddruck eher erreicht wird. Auf der Saugseite gelten dieselben Zusammenhänge in äquivalenter Weise.

Dadurch verändert sich die spektrale Zusammensetzung der akustischen Anregung durch den periodischen Ansaug- oder Ausschiebetrieb. Während der Einfluss auf die Anregungsintensität bei der Ausstoßfrequenz des Verdichters meist eine untergeordnete Rolle spielt, kann das veränderte Ansaug- und Ausschiebetriebverhalten jedoch einzelne höherharmonische Komponenten deutlich beeinflussen.

Ein wesentlicher Effekt führt jedoch zu einem positiven Einfluss auf das resultierende Pulsationsniveau. Die deutlich niedrigere Schallimpedanz (Produkt aus Schallgeschwindigkeit und Dichte des Mediums) führt zu niedrigeren Druckschwankungen bei gleichbleibenden Geschwindigkeitsschwankungen. Während die induzierten Geschwindigkeitsschwankungen also aufgrund des ähnlichen Volumenstroms auf einem gleichartigen Niveau bleiben, sind die induzierten Druckschwankungen hier niedriger.

3.3 Pulsationsdämpfer

Die Auslegung der Pulsationsdämpfer entscheidet maßgeblich über das schwingungstechnische Betriebsverhalten einer Kolbenverdichteranlage. Daher werden diese in der Regel individuell für den jeweiligen Prozess ausgelegt und gefertigt. Eine entscheidende Einflussgröße ist dabei die Schallgeschwindigkeit des Fördermediums. Ändert sich diese Schallgeschwindigkeit - wie oben genannt - um den Faktor vier, ist die bestehende Auslegung häufig. Daher ist es unabdingbar zu prüfen, welches Pulsationsverhalten sich beim Betrieb mit Wasserstoff einstellt.

In **Bild 4** unten links ist exemplarisch die Dämpferwirkung für einen hochwertigen Pulsationsdämpfer in 2-Kammer-Bauweise mit dazwischen liegendem „Choke-Tube“ dargestellt. Diese Bauform wird häufig für Erdgasverdichter gewählt, da die dominante Ausstoßfrequenz bereits stark gedämpft und somit nicht an das Rohrleitungssystem weitergeleitet wird. Wird derselbe Verdichter nun jedoch mit Wasserstoff betrieben, verschiebt sich die akustische Einfügungsdämpfung aufgrund der deutlich höheren Schallgeschwindigkeit des Fördermediums. Infolgedessen wird die Ausstoßfrequenz nun deutlich weniger stark gedämpft. Erhöhte Schwingungen bei der Ausstoßfrequenz des Verdichters können somit die unmittelbare Folge sein.

3.4 Rohrleitungsakustik

Die aus dem Pulsationsdämpfer austretenden Pulsationen treffen anschließend auf das Rohrleitungssystem. Je nach Aufbau der Anlage sind die Rohrleitungssysteme mehr oder weniger komplex. Unabhängig von der Komplexität können in jedem Rohrleitungsabschnitt sogenannte „akustische Resonanzen“ auftreten.

Kostenfreies Webinar am 22.4.2021, 10.00 Uhr

Wasserstoffspeicherung mit bestehenden Erdgasverdichtern?

– Strömungs- und pulsationstechnische Gesichtspunkte –

Referenten:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Brümmer, Technische Universität Dortmund

Dr.-Ing. Johann Lenz, Kötter Consulting Engineers GmbH & Co. KG

Anmeldung unter:

www.koetter-consulting.com/webinar

Eine akustische Resonanz tritt immer dann ein, wenn die Länge eines akustischen Rohrleitungsabschnitts (z. B. Austritt Pulsationsdämpfer bis Eintritt nachfolgender Behälter oder Querschnittsprung) und die Anregungsfrequenz einer Erregerquelle unter Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit in einem konkreten Verhältnis zueinander stehen. Das kritische Verhältnis für eine solche akustische Resonanz ist abhängig von den Randbedingungen. Ein geschlossener Rohrleitungsabzweig wird in diesem Kontext als „akustisch geschlossen“ bezeichnet, während ein Rohrleitungsanschluss an einem Behälter (z. B. Filterabscheider oder Pulsationsdämpfer) einem „akustisch offenen“ Ende entspricht.

In **Bild 4** unten rechts wird deutlich, dass in Rohrleitungsabschnitten üblicherweise eine Vielzahl von akustischen Resonanzen auftreten können. Der wesentliche Unterschied zwischen der Lage der Resonanzfrequenz bei Erdgas und Wasserstoff resultiert erneut aus den stark unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten. Zusätzlich zeigt sich als unangenehmer Nebeneffekt, dass die bei der Planung von Bestandsanlagen zur Dämpfung akustischer Resonanzen installierten Drosselemente (in der Regel einfache Blenden oder Pulsations-Dämpferplatten) einen deutlich niedrigeren Dämpfungseinfluss besitzen. Dadurch treten Resonanzeffekte beim Förderfluid Wasserstoff stärker hervor als bei dem Betrieb mit Erdgas.

Literatur

- [1] Nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung zu einer vielfältigeren Anwendung von Wasserstoff (<https://www.bmu.de/download/nationale-wasserstoffstrategie/>)

- [2] Bick, D. S. und Schmücker, A.: H²-Tauglichkeit des Ferngasnetzes der Open Grid Europe- Status, erforderliche Anpassungen und Fahrplan zur Umsetzung. Tagungsband zum 34. Oldenburger Rohrleitungsforum
- [3] API STD 618: Reciprocating Compressors for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services, 5th Edition, December 2007

Formelzeichen

- v (x, t) = Strömungsgeschwindigkeit
- p (x, t) = statischer Druck
- $\rho(x,t)$ = Dichte
- T (x,t) = Temperatur
- κ = Isentropen-/Polytropenexponent
- R = spezifische Gaskonstante
- Z = Realgasfaktor
- μ = dynamische Viskosität



Autoren

Dr.-Ing. **Johann Lenz**
 Kötter Consulting Engineers GmbH & Co. KG |
 Rheine |
 Tel.: +49 5971 9710-47 |
 j.lenz@koetter-consulting.com



Dr.-Ing. **Patrick Tetenborg**
 Kötter Consulting Engineers GmbH & Co. KG |
 Rheine |
 Tel.: +49 5971 9710-46 |
 p.tetenborg@koetter-consulting.com

BUCHBESPRECHUNG

Rohrleitungen

Grundlagen – Planung – Montage.

Autor/en: Wilfried Franke, Bernd Platzer
 Hanser Fachbuchverlag
 2. überarbeitete Auflage, 2020, s/w.
 Gebund, 322 Seiten
 ISBN: 3446464573
 EAN: 9783446464575



Das vorliegende Lehrbuch vermittelt einen Überblick über die vielfältigen Aspekte des Rohrleitungsbaus und die zum Einsatz kommenden Armaturen. Neben wichtigen Grundbegriffen werden die für die strömungs- und wärmetechnische Auslegung notwendigen Beziehungen bereitgestellt. Weitere Schwerpunkte sind die konstruktive Bemessung, die Verlegung und die Montage von Rohrleitungen.

Beispiele erläutern die Anwendung theoretischer Aussagen und erleichtern den Gebrauch für das Selbststudium neben den Vorlesungen. Ein Tabellenanhang gibt Werkstoffkennwerte für die Berechnung sowie geltende Berechnungs- und sonstigen Vorschriften wieder.

Das Lehrbuch richtet sich an Studierende der Verfahrenstechnik, des Apparate- und Anlagenbaus, der Gebäudetechnik und ähnlicher Studiengänge mit Kenntnissen in den ingenieurwissenschaftlichen Grundfächern. Auch in der beruflichen Praxis tätige Ingenieure, Konstrukteure und Techniker können in ihm Anregungen zur Beantwortung anstehender Fragen finden.

Für die zweite Auflage des Buches wurden Kapitel 4. „Verlegung von Rohrleitungen“ und Kapitel 5. „Montage“ komplett überarbeitet.