

1 Schäden durch Schwingungen und Pulsationen

Schäden an Rohrleitungen und Armaturen werden überwiegend durch Schwingungen und Pulsationen ausgelöst. Die sowohl innerhalb als auch außerhalb des Rohrsystems entstehenden Ursachen sind vielschichtig und weit reichend:

- Ungedämpfte oder nicht ausreichend gedämpfte mechanische Schwingungen und dampfseitige Pulsationen der Kältemittelverdichter, die in das Rohrsystem übertragen werden.
- Pulsierende und taktende Regelventile infolge fehlerhafter Auslegung.
- Intermittierend fördernde Rohrleitungen, hervorgerufen durch strömungstechnisch unzulängliche Dimensionierung und/oder Montage sowie durch abrupte Umlenkung der Kältemittelströmung.

Hydraulische Stöße: In diesem Zusammenhang müssen auch hydraulische Stöße, hervorgerufen durch beschleunigte Flüssigkeiten, betrachtet werden. Da die Ursachen der davon ausgelösten Schwingungen und Pulsationen einen Sonderfall darstellen, wird dieser Punkt in einem gesonderten Kapitel („Schäden durch beschleunigte Kältemittelflüssigkeiten“) behandelt.

Schwingungen und Pulsationen sind wesentliche Auslöser für Störungen an Kälteanlagen, leider oft in Verbindung mit Schäden, die auch zu Betriebsausfällen führen. Nachstehend soll primär untersucht werden, mit welchen Maßnahmen sich Schwingungsschäden möglichst bereits in der Planungs- und Montagephase verhindern lassen und wie diese möglichst auch nachträglich in die Praxis umgesetzt werden können.

Bei der Erstinbetriebnahme sollte auf jeden Fall das Schwingungsverhalten der verschiedenen Bauteile beobachtet und soweit wie möglich unter verschiedenen Betriebsbedingungen geprüft werden. Die Kälteanlagenbauer verfügen nur in Ausnahmefällen über Messgeräte zur quantitativen Bewertung von Schwingungen und Pulsationen. Deshalb kann meist nur eine subjektive Beurteilung erfolgen. Falls sich ungewöhnliche Schwingungen nicht beseitigen lassen, sollte grundsätzlich der Planer und/oder der Hersteller des betroffenen Bauteils verständigt werden, um ein gemeinsames Vorgehen abzustimmen.

1.1 Schwingungen und Pulsationen durch Kältemittelverdichter

Typische Beispiele für Schwingungen im Kältemittelkreislauf sind vor allem die von Verdichtern und in geringerem Maße die von Lüftern oder Pumpen ausgelösten mechanischen Schwingungen. Schwingungen der Verdichter werden hauptsächlich durch freie Kräfte aus Momenten, weniger durch freie Massenkräfte, erzeugt. Werden diese Schwingungen nicht ausreichend gedämpft, so hat dies für das Rohrsystem gravierende Folgen.

Zusätzlich entstehen Schwingungen durch Pulsationen in bewegten Fluiden, d. h. in Dämpfen und Flüssigkeiten durch ungleichmäßige Bewegungs- und Druckerzeugung. Diese Pulsationen werden im Medium wellenförmig weitergeleitet, teilweise in Verbindung mit Reflexion und Überlagerung der Pulsationswellen. Die verschiedenen Schwingungsformen lösen neben den Vibrationen von Anlagenteilen auch eine erhöhte Geräuschemission aus.

Kältemittelverdichter, speziell Hubkolbenverdichter, können durch ihre oszillierende Dampfsäule erhebliche Schwingungen besonders auf das druckseitige Rohrsystem übertragen. Bei einem Hubkolbenverdichter ergibt sich die Grundfrequenz f_g der Anregung mit:

$$f_g = \frac{n}{60} \cdot H \text{ (Hz oder sec}^{-1}\text{)}$$

dabei ist:

n die Drehzahl in min^{-1} ,

H die Anzahl der Arbeitshübe pro Umdrehung.

Zudem entstehen Drücke, die das Rohrsystem einschließlich der Rohrhalterungen schwellend beanspruchen. Dabei steigt die Leistungsaufnahme bei gleichzeitig fallender Kälteleistungszahl (COP: coefficient of performance, das Verhältnis aus Kälteleistung und Antriebsleistung).

Durch den periodischen Ansaug- und Ausstoßbetrieb der Kolbenverdichter werden die Pulsationen des Kältemitteldampfes zwangsläufig in die Rohre übertragen. Dabei sind Amplitude und Frequenz u. a. abhängig von:

- der Zylinderanzahl,
- der Drehzahl der Verdichter,
- der Befederung der Verdichterventile und
- dem *schädlichen Raum*.

Schädlicher Raum (auch „Schadraum“ oder „Totraum“ genannt): Im oberen Totpunkt der Raum zwischen Kolben und Zylinderdeckel sowie die im Arbeitsventil nicht ausgefüllten Räume. Eine Verkleinerung des schädlichen Raums verbessert den Füllungsgrad λ_f , auch volumetrischer Wirkungsgrad η_{vol} genannt, und erhöht damit den Liefergrad. Eine zu extreme Reduzierung des schädlichen Raums verursacht gefährliche Druckspitzen.

- Besonders Einzylinder-Hubkolbenverdichter können druckseitig große Amplituden erzeugen.
- Bei Schraubenverdichtern resultiert die Impulsfrequenz aus der Rotordrehzahl und der Anzahl der Gewindegänge sowie aus der jeweiligen Unter- oder Überverdichtung.
- Bei Spiralverdichtern („Scrolls“) erfolgt die Schwingungserregung weitgehend analog zu den vorher genannten Abhängigkeiten: Die Grundfrequenz der Pulsation folgt der Antriebsfrequenz, damit verhält sich der „Scroll“ ähnlich einem Einzylinder-Hubkolbenverdichter.
- Turboverdichter neigen, bedingt durch die große Anzahl der Schaufeln und die hohen Drehzahlen, nur zu schwachen Druckpulsationen.
- Zusätzliche Dampfschwingungen in den Druck- und Saugleitungen können – abhängig von ihrer Bauweise – Pulsationen der Rohrleitungen noch verstärken.
- Dampfschwingungen in Rohrsystemen sind zwar nicht völlig zu verhindern, lassen sich aber durch geeignete Maßnahmen soweit dämpfen, dass Schäden vermieden werden. Die verdichterseitig ausgelösten mechanischen Schwingungen verursachen bei fehlenden Gegenmaßnahmen ebenfalls Schäden im Rohrsystem. Beide Schwingungsformen sind weder phasen- noch frequenzgleich. Dadurch können bei einer zumindest teilweisen Überlagerung, abhängig vom Grad der Dämpfung, mehr oder weniger ausgeprägte Zufallsschwingungen entstehen.

Zufallsschwingungen: Schwingungen mit permanent schwankenden Amplituden, Frequenzen und ständig wechselnden Phasenlagen. Der Schwingungsverlauf ist nicht vorhersehbar, da dieser – im Gegensatz von z. B. sinusförmigen oder sinusähnlichen Schwingungen – keiner Kontinuität folgt. Typische Kenngrößen sind u. a. verschiedene Mittelwerte und die Verteilungsdichte.

1.1.1 Typische Schadensfälle und ihre Behebung

Zufallsschwingungen wirken zusätzlich zum Betriebsdruck als Schwingbeanspruchung mit hoher Schwingspielzahl auf die Rohrwandungen und auf die Rohrhalterungen. Zusätzlich können im *Resonanzfall* so starke Erschütterungen auftreten, dass in Extremfällen sogar schwere Gebäudeschäden verursacht werden.

Resonanzfall, Resonanz: Ein Resonanzfall oder Resonanz liegt vor, wenn eine von außen wirkende Erregerfrequenz gleich der Eigenfrequenz eines schwingfähigen Systems ist. Das schwingfähige System wird dabei periodisch zu erzwungenen Schwingungen angeregt. Dabei „schaukelt“ sich die Schwingung immer mehr auf, bis die Amplitude der erzwungenen Schwingung einen maximalen Wert erreicht oder bis – im Extremfall – die „Resonanz-Katastrophe“ eintritt. Dann geraten beispielsweise Rohrabschnitte oder ganze Trassen bei bestimmten Betriebsbedingungen immer wieder in Schwingungen bis ein Schadensfall entsteht.

Da außerdem die relevanten Festigkeitskennwerte bei Schwingbeanspruchung erheblich schlechter sind als die für statische oder schwellende Lastfälle, treten folgende Schäden – überwiegend durch Ermüdungsbrüche – in Rohrsystemen häufig auf:

- Rissbildung und Brüche an Löt- oder Schweißnähten, Rohren und Rohrbögen. **Folge** der Leckage ist neben der Kältemittlemission ein teilweiser *Verlust der Kältemittelfüllung*.

Kältemittelverlust: Ein Kältemittelausbruch kann nicht *plötzlich* zu einem vollständigen Füllungsverlust führen, da sich das Kältemittel immer in verschiedenen Apparaten und Rohrleitungen befindet und im flüssigen Zustand ein Volumen einnimmt, welches deutlich kleiner ist als das kältemittelseitige Volumen der Anlage.

- Brüche von Schrauben an Flanschverbindungen. Folgen sind Kältemittelleckagen über die Dichtungen.
- Lösen, Verformungen und Brüche von Rohrhalterungen. Weitere Schäden können dabei an der Isolierung sowie am Mauerwerk des Gebäudes entstehen.
- Zeitweiser oder dauernder Ausfall von Komponenten, die mit dem Kältemittelverdichter oder den Rohrleitungen ungedämpft verbunden sind, wie z.B. Druckschalter, Magnetventile oder Teile der elektrischen Ausrüstung. Folgen können diverse Schäden, vom teilweisen Kältemittelverlust bis zum Verdichterschaden mit Ausfall der Kälteanlage, sein.
- Nach Ausbruch von Ammoniak ist ergänzend zu den einschlägigen Vorschriften (u. a. die Norm prEN 378 Teil 4, die Unfallverhütungsvorschrift BGV D4 [früher VBG 20] und die TAA- [Technischer Ausschuss für Anlagensicherheit] -Regeln TRAS 10) zu beachten, dass Ammoniak bereits im unteren ppm-Bereich bei normaler Luftfeuchte u. a. mit Kupfer reagiert. Kupfer und kupferhaltige Legierungen werden dabei durch Korrosion angegriffen und zerstört. Dadurch können innerhalb kurzer Zeit irreparable Schäden am elektrischen Teil der Anlage auftreten.

Behebung

Welche Maßnahmen zur Reparatur der genannten Schäden eingeleitet werden müssen, lässt sich abhängig vom Schadensbild nur individuell vor Ort entscheiden: Bei kleinen Leckstellen kann die Erneuerung einer Lötnaht ausreichen, während bei großen Schäden ganze Rohrabschnitte ausgetauscht und/oder durch zusätzliche Komponenten ergänzt werden müssen. Besonderer Augenmerk sollte auf Rohrbögen gelegt werden: Werden die bei der Umlenkung entstehenden Impulse von den Rohralterungen ohne gefährliche Vibrationen aufgenommen und in die Wand weitergeleitet?

Entscheidend bei der Schadensbehebung sind neben der Reparatur die eindeutige Ermittlung und gleichzeitig die Beseitigung der Schadensursache. Wird das versäumt, so stellt sich über kurz oder lang der gleiche Schaden wieder ein.

1.1.2 Schadensursachen erkennen und beheben

Schäden durch mechanische Schwingungen und Pulsationen sollten möglichst schon in der Planungs- und Montagephase durch präventive Maßnahmen weitgehend vermieden werden. (Siehe u. a. EN 378-2, Abs. 6.3)

Wesentlich dazu ist eine gedämpfte und schwingungsarme Aufstellung der Kältemittelverdichter auf geeignete Grundrahmen und Fundamente. Ein im Verhältnis zum Verdichter und ggf. zum Antriebsmotor und Grundrahmen schweres Fundament dämpft infolge seiner trägen Masse diese Schwingungen. Fundamente für Verdichter sind statischen und dynamischen Belastungen unterworfen und können die Masse der darauf montierten Maschinen deutlich überschreiten. Als weitere oder zusätzliche Maßnahme zur Schwingungsdämpfung haben sich auf den jeweiligen Bedarfsfall abgestimmte Gummimetalllager und Stahlfederelemente bewährt. Ihre Dämpfungswirkung erstreckt sich ausschließlich auf die Übertragung der Verdichterschwingungen auf den Untergrund. Bewährt – besonders bei offenen Verdichtern größerer Kälteleistung – hat sich eine starre Verbindung vom Kältemittelverdichter einschließlich Antriebsmotor und Grundrahmen mit einem schweren Fundamentklotz. Dieser Fundamentklotz ruht, gemäß Abb. 1-1, auf Gummimetallagern, die auf einen niedrigen Sockel montiert werden. Mit diesem „Klotz am Bein“, kann der Verdichter – im wahrsten Sinne des Wortes – keine „großen Sprünge“ machen, d.h. die Amplituden oder maximalen Auslenkungen der Schwingungen werden stark verkleinert. Außerdem muss die Übertragung von Vibrationen und Körperschall auf das Gebäude verhindert oder zumindest gedämpft werden. Dazu kann das Fundament beispielsweise durch Maschinenfundamentplatten – meist aus einer Kautschuk-Gummi-Mischung – oder durch Korkplatten vom Fußboden getrennt werden. Bei Montage der Kältemittelver-

dichter – einschließlich der späteren Komplettierung durch Anbauteile – auf die elastisch erstellten Fundamente muss jede starre Verbindung zum Gebäude vermieden werden. Andernfalls würden Körperschallbrücken entstehen. Die Auslegung der Fundamente und die Verhinderung der Übertragung von Vibrationen und Körperschall auf das Gebäude können nur für jeden Bedarfsfall individuell erfolgen.

Die Weiterleitung der verbleibenden mechanischen Schwingungen auf das Rohrsystem lässt sich durch Wellschläuche – korrekte Montage vorausgesetzt – weitgehend verhindern.

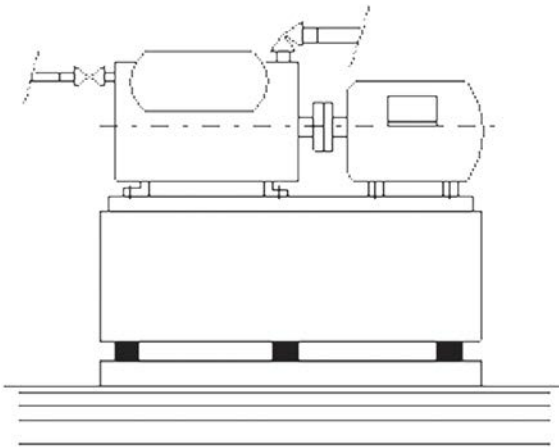


Abb. 1-1 Montage eines Verdichters mit Antriebsmotor und Grundrahmen auf Fundamentklotz

Einsatz von Wellschläuchen

Wellschläuche, dargestellt in Abb. 1-2, sind flexible Rohrverbindungen in Form von Schlauchleitungen oder Metallschläuchen. Die äußere Umflechtung besteht meist aus Bronze, Tombak, Messing oder Edelstahl. Innen eingelagert ist ein Wellrohr, teilweise zusätzlich ausgefüttert mit einem Kunststoffschlauch, beispielsweise aus PTFE. Temperaturabhängige Längendehnungen an Rohrleitungen lassen sich durch Axialkompensatoren aufnehmen.



Abb. 1-2 Welschlauch ausgeführt als flexibler Metallschlauch (Metallschlauchfabrik Pforzheim)

Auslegung

Gängige Anschlüsse sind Löt- oder Schweißstutzen und Flanschverbindungen. Diese werden passend zu den Nennweiten der Druck- und Saugleitungen ausgewählt. Grundsätzlich sind Wellschläuche einem Verschleiß unterworfen. Die Lebensdauer lässt sich gem. EN DIN 10380 bestimmen.

Für kleine Rohrdurchmesser können flexible Schlauchleitungen unter Beachtung des minimal erforderlichen Biegeradius bezogen auf dynamische Beanspruchung eingesetzt werden.

Montage

Der Einbau erfolgt möglichst nahe an den Druck- und Sauganschlüssen hinter den Absperrventilen des Kältemittelverdichters. Wesentlich für eine Aufnahme der Schwingungen und Bewegungen ist, dass die andere Welschlauchseite mit einem stabilen und ruhigen Festpunkt möglichst dicht am Wellrohr verbunden wird. Sind die Entfernungen zwischen den Verdichterrohrstutzen und den Festpunkten zu groß, so können zwei Welschläuche, einer direkt hinter den Verdichterrohrstutzen der zweite vor dem Festpunkt, eingebaut werden. Die Masse des zwischen den Welschläuchen zu montierenden Rohrstücks lässt sich im Bedarfsfall von elastischen Abhängern abfangen, wie in Abb. 1-3 gezeigt. Die Abhänger nehmen das Gewicht der Rohrverbindung zwischen den Wellrohren auf (für Rohre ab ca. DN 50/2" mit über 5 m Länge). Diese müssen so aufgebaut sein, dass die Übertragung von Körperschall auf das Gebäude verhindert oder stark gedämpft wird.

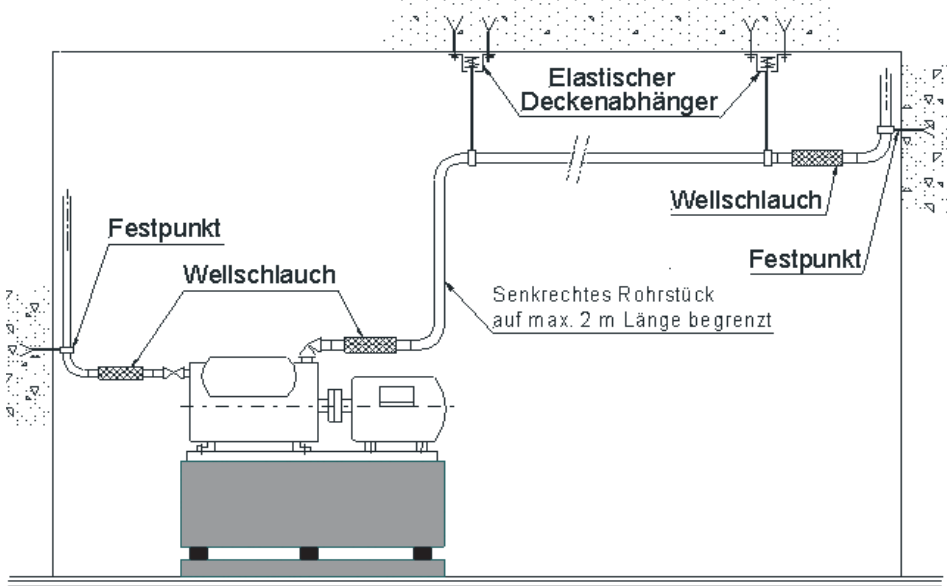


Abb. 1-3 Rohrverbindung mit zwei Welschläuchen und elastischer Deckenabhangung

Sowohl durch die hohen Drücke auf der Druckseite als auch aus Festigkeitsgründen sind Welschläuche manchmal zu steif, um die Schwingungen vom Kältemittelverdichter ausreichend zu dämpfen. Eine Verbesserung können dann beispielsweise zwei direkt hintereinander geschaltete Welschläuche bringen. Welschläuche sind

nur in der Lage Schwingungen und Bewegungen rechtwinklig zu ihrer Längsachse aufzunehmen. Damit bietet sich bei Hubkolbenverdichtern die Montage in Längsrichtung oder parallel zur Kurbelwelle an (Abb. 1-4). Im Beispiel links wird das Wellrohr durch die axial wirkenden Schwingungen wechselnden Zug- und Druckschwingungen ausgesetzt und kurzzeitig zerstört. Im Beispiel rechts ist das Wellrohr achsparallel zur Kurbelwelleneinrichtung eingebaut. Die Verdichtungsschwingungen wirken rechtwinklig zur Wellrohrachse ohne vorzeitige Verschleißwirkung auszulösen. Ein Wellenschlauch kann keine Schwingungen in Richtung seiner Achse aufnehmen. Sollten die baulichen Gegebenheiten keinen Einbau in oder parallel zur Kurbelwellenrichtung zulassen, so sind bei diesen Anwendungsfällen zwei Schläuche – mit einem 90°-Bogen verbunden – um einen rechten Winkel versetzt einzubauen. Die Montage der Wellschläuche muss torsionsfrei und spannungsfrei, d.h. ohne dass diese dabei gelängt oder gedehnt werden, erfolgen.

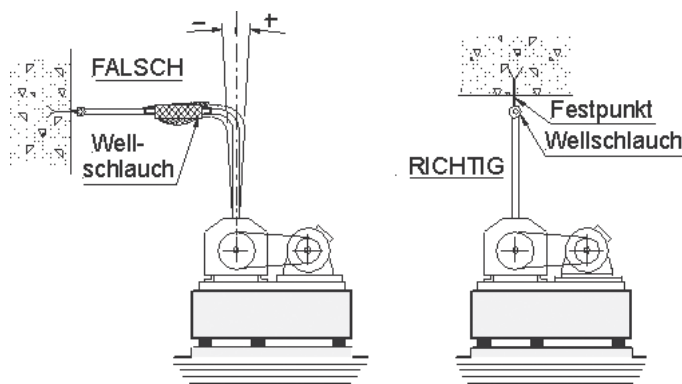


Abb. 1-4 Einbau eines Wellrohrs mit einem Hubkolbenverdichter

Zur Dämpfung der aus der oszillierenden Dampfsäule entstehenden Pulsationen lassen sich Muffler, auch Geräusch- oder Pulsationsdämpfer genannt, einsetzen. Korrekte Auslegung und Montage vorausgesetzt, können diese eine Weiterleitung in die Rohrleitungen weitgehend und ausreichend verhindern.

Einsatz von Mufflern

Muffler oder Geräuschdämpfer werden überwiegend druckseitig und nur vereinzelt saugseitig eingebaut. Besonders Kältemittelverdichter neuerer Konstruktion verfügen bereits häufig über integrierte Pulsationsdämpfer. Diese vermindern zumeist deutlich eine Anregung des Rohrsystems durch Dampfschwingungen. Auch Ölabscheider wirken aufgrund ihres Volumens pulsationsdämpfend.

Mindestens dann, wenn sich in einem Rohrabschnitt die *Resonanzen der Dampfschwingungen und der mechanischen Schwingungen* überlagern, bietet sich die Montage eines externen Mufflers, in Abb. 1-5 im Schnitt dargestellt, an.

Der Muffler bewirkt neben dem Verschieben der Resonanzfrequenz noch eine beträchtliche Amplitudenverminderung. Das wird durch Einbau mehrerer Umlenkbleche im „Topf“ des Mufflers erreicht. Damit wird die Geschwindigkeit des überhitzten Dampfs verkleinert, der Weg verlängert, in den Umlenkungen entsteht eine Durchmischung, die leichten Expansions- und Stauverluste am Ein- und Austritt der Anschlussstutzen in und aus dem „Topf“ glätten die Pulsationen noch zusätzlich. Zur Optimierung seiner Wirkung lässt sich nach dem Einbau bei einigen Mufflern der durchströmte Querschnitt von außen verstellen.

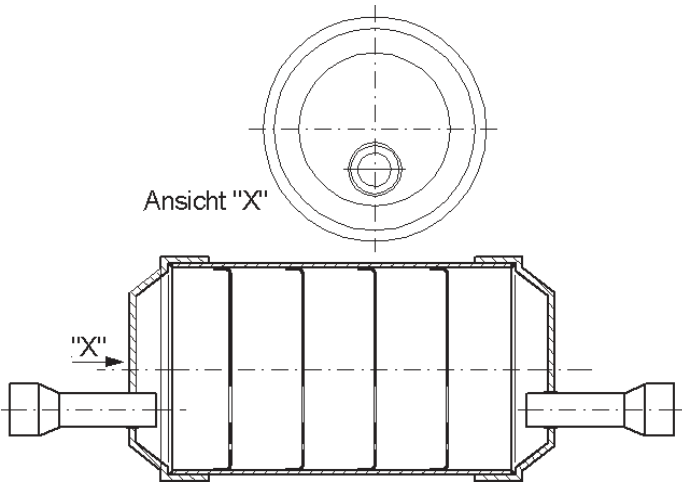


Abb. 1-5 Aufbau und Wirkungsweise eines Mufflers

Resonanz infolge von Dampfschwingungen und mechanischen Schwingungen beseitigen oder verlagern: Zwar kann bereits der Einbau eines blinden Rohrstücks die Resonanzfrequenz des Systems verlagern, der Erfolg dieser Maßnahme lässt sich aber bei einer Begehung vor Ort oder bei einem Reklamationsgespräch nicht eindeutig und ausreichend abschätzen. Erwähnt sei, dass sich schädliche Resonanzen auch durch Einbau einer Blende oder oft mittels Voreinstellung eines Handdrossel- oder Handabsperrventils in der Druckleitung beseitigen und verschieben lassen. Nachteilig und deshalb häufig inakzeptabel ist dabei die erhöhte Leistungsaufnahme durch den zusätzlichen Druckverlust. Wirkungsvoller ist deshalb in der Regel der Einbau eines Mufflers.

Auslegung

Die Baugröße des Mufflers wird häufig so bestimmt, dass seine Anschlussgröße dem Rohraußendurchmesser entspricht. Dabei setzt man eine fachlich korrekte Auslegung der Rohrleitung voraus. Vorzuziehen ist, die Auswahl nach Kältemittel, Kälteleistung, Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur vorzunehmen. In diesem Fall geht der Massen- oder Volumenstrom in die Auslegung ein. Wird

außerdem noch der k_v -Wert des Mufflers und ggf. die Unterkühlung des flüssigen Kältemittels berücksichtigt, so kann man sich einen Überblick über den entstehenden Druckabfall verschaffen. Bei Anwendungen mit Hubkolbenverdichtern beträgt das Mufflervolumen normalerweise ein Mehrfaches des Hubvolumens.

Zur wirkungsvollen Anpassung an die jeweiligen Betriebsverhältnisse sollte jedem im Verbund betriebenen Kältemittelverdichter ein separater Muffler zugeordnet werden. Es ist ein Trugschluss, dass der Druckabfall von Mufflern energetisch nachteilig sein muss. Die Auswirkungen der ungedämpften Pulsationen auf die Leistungsaufnahme sind in der Regel weitaus negativer als der Nachteil eines geringen Druckabfalls im Muffler.

Montage

Muffler werden im Regelfall druckseitig hinter dem Festpunkt des Wellschlauchs, vorzugsweise waagrecht liegend und ohne Rohrbögen in die Rohrleitungen eingebaut. Empfehlenswert ist ein zweiter Festpunkt hinter dem Muffler. Die Montage sollte, wie in Abb. 1-6 dargestellt, in einer Ebene mit dem Wellschlauch ohne Rohrbögen erfolgen. Damit wird die Impulswirkung – besonders bei Lastwechseln – als Folge der Richtungsänderung des strömenden Dampfes vermieden.

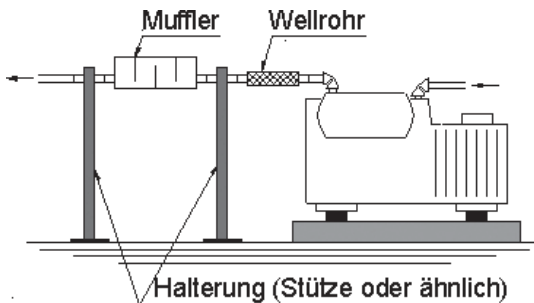


Abb. 1-6 Beispiel für die Montage eines Wellschlauchs mit nachgeschaltetem Muffler

1.2 Entstehung und Verhinderung von Pulsationen, Schwingungen und Körperschall in Rohrsystemen

Strömende Fluide können in Rohrleitungen Schwingungen erzeugen. Deren Ausmaß nimmt mit der Strömungsgeschwindigkeit zu. Besonders Regelarmaturen und Formstücke oder Fittings wirken infolge von Umlenkungen und/oder Geschwindigkeitsänderungen von Volumenströmen als latente, manchmal als erkennbare Schwingungserreger.