

Ursachen, Beurteilung und Reduzierung von Rohrleitungsschwingungen

1.) Zusammenfassung

Die Beurteilung von Rohrleitungsschwingungen stellt den Betreiber von Rohrleitungssystemen oft vor eine unlösbare Aufgabe. Einfach anwendbare Richtlinien, etwa vergleichbar mit den Richtwerten für die Beurteilung von Maschinenschwingungen, gibt es nicht, da die Unterschiede in den Einbau- und Einsatzbedingungen zu groß sind. Auf der Grundlage von einfachen Modellen wird eine Möglichkeit aufgezeigt, schwingungsbedingte Spannungen in Rohrleitungen abzuschätzen.

Ursachen und Minderungsmaßnahmen von Rohrleitungsschwingungen werden anhand von Beispielen aus der Praxis vorgestellt und diskutiert.

2.) Einleitung

In industriellen Anlagen sind Schwingungen von Rohrleitungssystemen nicht ungewöhnlich. Betreiber dieser Anlagen haben oftmals im Laufe der Betriebszeit gelernt, diese Schwingungen auf der Grundlage von Erfahrungswerten zu beurteilen und zu akzeptieren.

Bei Neuanlagen gibt es aber das Problem, daß diese Erfahrungswerte nicht vorliegen. Wenn dann während der Inbetriebnahme erste Alarmzeichen auftreten, wie subjektiv starke Schwingungen, Geräusche durch Sekundäreffekte, abfallende Schrauben u.ä., so ist der Bedarf für die objektive Beurteilung der Situation gegeben.

Durch die Messung von Rohrleitungs-, Maschinen- und Fundamentalschwingungen sowie Druckpulsationen in der Rohrleitung ist die Beschreibung der Anregungs- und Übertragungsmechanismen sowie eine Beurteilung der Situation möglich. Darüber hinaus können auf der Grundlage der vorliegenden Meßwerte wirkungsvolle Minderungsmaßnahmen zur Verbesserung der Situation ausgearbeitet werden.

3.) Ursache für Rohrleitungsschwingungen

Die Ursache von Rohrleitungsschwingungen kann zum einen die mechanische Ankoppelung von schwingenden Bauteilen, wie z.B. Motoren, Verdichter oder Fundament, sein. Zum anderen kann eine Schwingungsanregung aber auch durch pulsierende Medien innerhalb der Rohrleitung erfolgen.

Die starre Ankoppelung an schwingende Bauteile findet man in der Praxis häufig (z.B. pneumatische Steuerleitungen). Diese werden an schwingenden Bauteilen wie Ventile und Rohrleitungen starr befestigt, so daß hier eine unmittelbare Schwingungsanregung erfolgt. Zusätzlich ist bei diesen Steuer- und Meßleitungen der Abstand zwischen den Befestigungspunkten meist relativ groß. Ein Zusammentreffen von Anregungs- und Eigenfrequenz führt dann oft zum Abriß dieser Leitungen.

Die Schwingungsanregung durch Pulsationen im Medium ist auf die diskontinuierliche Förderung vieler Verdichter zurückzuführen. Insbesondere bei Kolbenverdichtern werden durch die Arbeitsweise des Verdichters Druckpulsationen mit Amplituden von mehr als 2 % vom statischen Druck in der Rohrleitung erzeugt. Treffen die Anregungsfrequenzen durch den Verdichter und die akustische Resonanz des angeschlossenen Rohrleitungssystems zusammen, werden die Druckpulsationen zusätzlich verstärkt.

An Rohrleitungseinbauten, Umlenkung u.ä. verursachen die Pulsationen Kräfte, die oft die statischen Anforderungen von Rohrleitungsstützen bei weitem überschreiten.

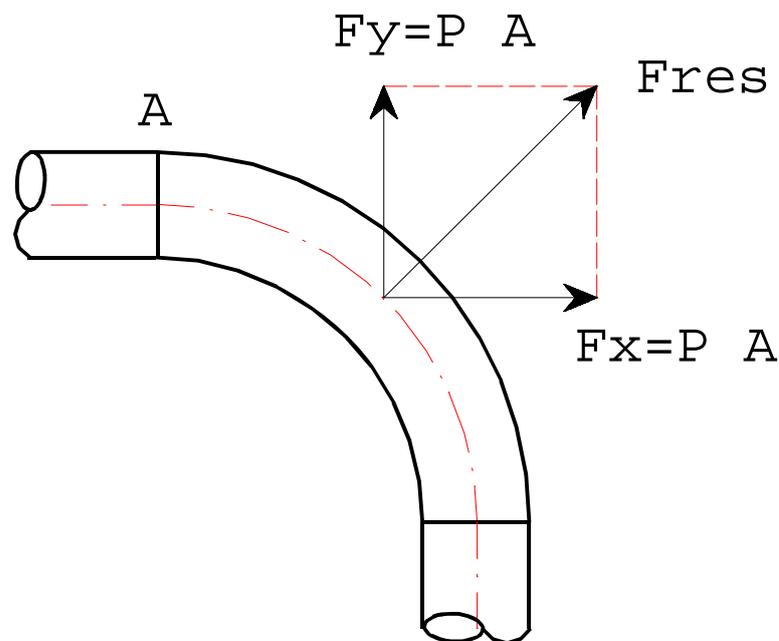


Abb. 1: Krafteinwirkung bei Umlenkung durch einen 90° Krümmer

Eine weitere Möglichkeit der Schwingungsanregung kann durch Druckschwankungen im Medium erfolgen, die beispielsweise durch periodische Wirbelablösungen verursacht werden. In der Regel sind diese Schwingungen aber hochfrequent, d.h. über 500 Hz, so daß die Bewegung der Rohrleitung bei diesen Frequenzen sehr klein ist.

4.) Messung und Beurteilung von Rohrleitungsschwingungen

Die Messung von Rohrleitungsschwingungen kann zwar bei erdverlegten oder Rohrleitungen für heiße Medien schwierig sein, stellt aber in der Regel kein unlösbares Problem dar. Mit Hilfe von Schwingungssensoren, die von außen an die Rohrleitung geklebt, geschraubt oder mit Hilfe eines Magneten angekoppelt werden, lassen sich die Schwingungen relativ einfach messen.

Durch die Filterung der Schwingungssignale und Analyse mit Hilfe der Fast Fourier Transformation können die dominierenden Frequenzen ermittelt werden.

Während die Messung der Rohrleitungsschwingungen im allgemeinen kein Problem darstellt, ist die Beurteilung der gemessenen Werte schwierig. Normen und Richtlinien, wie sie beispielsweise aus dem Bereich der Maschinenschwingungen bekannt sind (VDI 2056 [1], DIN ISO 10816 [2]), existieren nicht für die Beurteilung von Rohrleitungsschwingungen. Auch sind die Richtwerte dieser Normen nicht ohne weiteres auf den Bereich der Rohrleitungsschwingungen übertragbar, da sowohl die Art und Anzahl der schwingungsgefährdeten Bauteile als auch die Art der Schwingungsanregung nicht vergleichbar ist.

Um dennoch eine schnell anwendbare Beurteilungsgrundlage zu schaffen, haben einige Maschinenhersteller die VDI 2056 um bestimmte Gruppen erweitert, nach denen Rohrleitungsschwingungen beurteilt werden können. Eine derartige Herstellerrichtlinie ist die NEN 7-4-1 [3] des Kolbenverdichterherstellers Neuman & Esser. Diese Richtlinie gibt beispielsweise für die Maschinengruppe D "Kolbenmaschinen auf hochabgestimmten festen Fundamenten, Rohrleitungen an diesen Maschinen starr befestigt" die folgenden Beurteilungsstufen vor:

Beurteilungsstufe	Schwinggeschwindigkeit in mm/s eff.	
	Gruppe D	Gruppe T
gut	$\leq 4,5$	$\leq 2,8$
Brauchbar	$\leq 11,2$	$\leq 7,1$
Noch zulässig	≤ 28	≤ 18
Unzulässig	> 28	> 18

Tabelle 1: Beurteilungsstufen der NEN 7-4-1, Maschinengruppen D und T

Die Maschinengruppe T bezieht sich auf *"Größere Kraft- und Arbeitsmaschinen mit nur umlaufenden Massen und tiefabgestimmten Fundamenten, Rohrleitungen in Rohrleitungssystemen, wobei gleichgültig ist, ob an Kolben-, Schrauben- oder Turbomaschinen angeschlossen"*.

Für die Beurteilung der Rohrleitungsschwingungen kann die Messung der Schwinggeschwindigkeit als Summenwert in einem Frequenzbereich von 5 bis 1000 Hz nur eine grobe Orientierung liefern. Das, was im allgemeinen für einen Rohrleitungsabriß verantwortlich ist, ist die Spannung in der Rohrleitungswandung. Diese Spannung wird durch den statischen Innendruck in der Rohrleitung, Montage bedingte Spannungen und zusätzlich Spannungen durch Rohrleitungsschwingungen vorgegeben.

In [4] werden Werte für zulässige Rohrleitungsschwingungen genannt, die auf Erfahrungen aus der petrochemischen Industrie basieren. Hier wird jedoch abweichend zu den obengenannten Richtlinien eine Bewertung der Frequenzen der Schwingungen vorgenommen.

zulässige Schwinggeschwindigkeiten für Rohrleitungen in der petrochemischen Industrie
nach Wachel/von Nimitz, bzw. TÜV

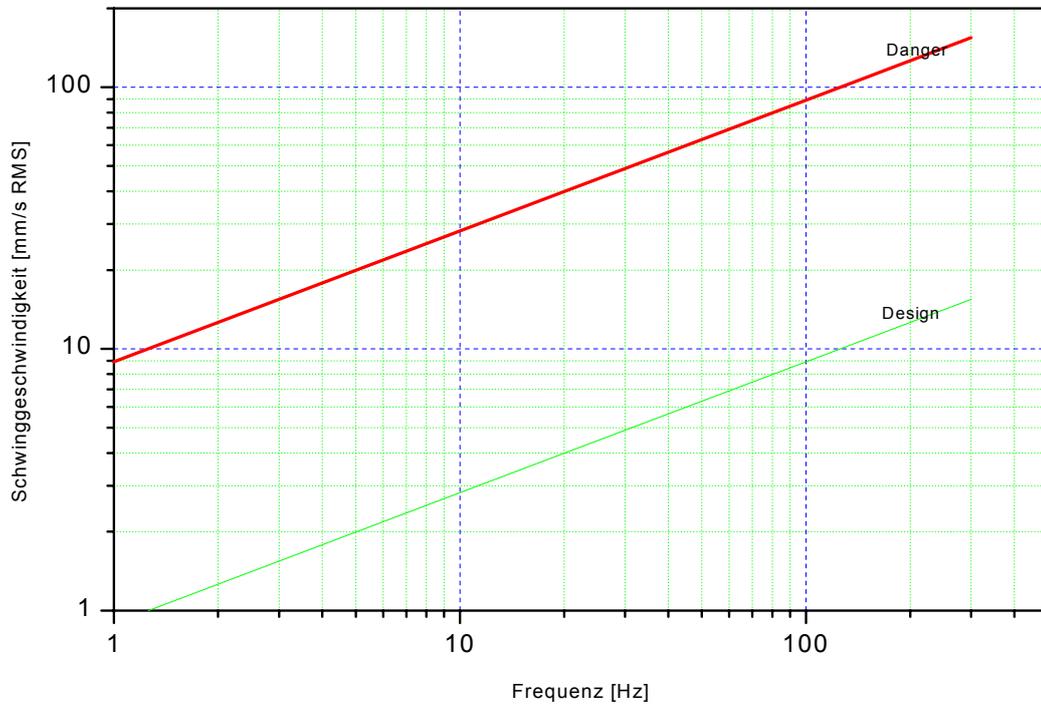


Abb. 2: Zulässige Schwinggeschwindigkeiten als Funktion der Schwingfrequenz [4]

Die zusätzlich durch Rohrleitungsschwingungen verursachten Spannungen sind von dem Material, den geometrischen Abmessungen der Rohrleitung, den Auflager- bzw. Befestigungsbedingungen der Rohrleitung und der Durchbiegung der Rohrleitung abhängig. Für den Schwingweg, also die durch Schwingungen verursachte Durchbiegung, gilt

$$s = \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (1)$$

mit

- s = Schwingweg [m]
- v = Schwinggeschwindigkeit [m/s]
- f = Schwingfrequenz [Hz]

Auf der Grundlage der Abb. 2 ist daher auch eine Darstellung der maximalen Schwingwege als Funktion der Frequenz geläufig.

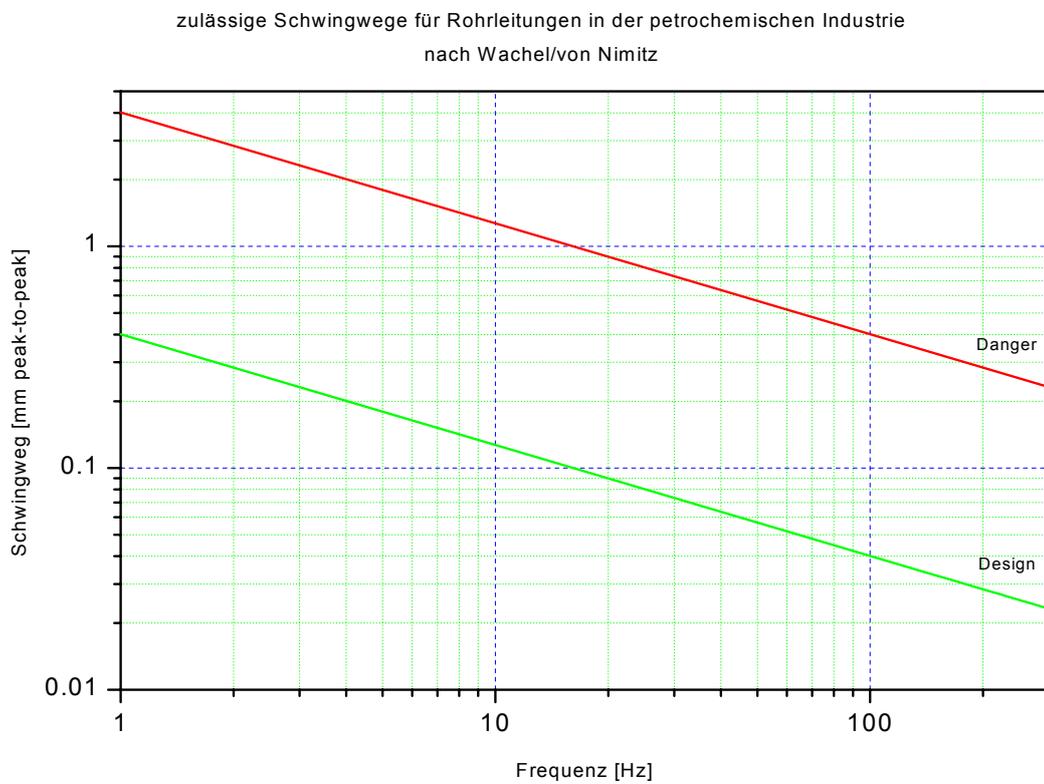


Abb. 3: Zulässiger Schwingweg als Funktion der Schwingfrequenz [4]

Da Rohrleitungsschwingungen insbesondere dann zu Materialermüdungen führen, wenn die Eigenfrequenz der Rohrleitung bzw. von Rohrleitungsabschnitten mit der Anregungsfrequenz zusammenfällt, können in diesem Fall die Spannungen in der Rohrleitung wie folgt abgeschätzt werden (die Herleitung der Formel kann in [4] nachgelesen werden):

$$\sigma_{\max} = K_d \cdot s \cdot \frac{D}{L^2} \cdot SCF \quad (2)$$

mit

σ_{\max}	=	maximale Spannung	[psi]
K_d	=	Deflection Stressfactor	[-]
s	=	maximaler Schwingweg	[mils]
D	=	Außendurchmesser der Rohrleitung	[in]
L	=	Länge der Rohrleitung	[feet]
SCF	=	Stress concentration factor	[-]

Die Werte für K_d sind abhängig von der Rohrleitungsführung und können den Abbildungen im Anhang entnommen werden. Für unterschiedliche Rohrleitungen sind hier jeweils für die erste und zweite Eigenfrequenz mit dem FE-Programm ANSYS die Faktoren für unterschiedliche Längenverhältnisse berechnet und grafisch aufgetragen worden.

Wird die Berechnungsgleichung für die Ermittlung der maximalen Spannung nach der maximal zulässigen Schwinggeschwindigkeit umgestellt, so ergibt sich

$$V_{\max} = \frac{\sigma_{zul}}{K_v \cdot SF \cdot SCF} \quad (3)$$

mit

V_{\max}	=	maximale Schwinggeschwindigkeit an der Rohrleitung	[in/s]
SF	=	Sicherheitsfaktor	[-]
SCF	=	Stress concentration factor	[-]

Für einen Werkstoff mit einer zulässigen Spannung von $\sigma_{zul} = 13000$ psi, einem K_v von 318, einem Sicherheitsfaktor von 2 und einem Stress concentration factor von 5, ergibt sich für die maximal zulässige Schwinggeschwindigkeit in der Resonanz

$$v_{max} = 4 \text{ in/s} \cdot 102 \text{ mm/s} \quad 0 - p$$

Diese Abschätzung zeigt, daß selbst bei diesen hohen Schwinggeschwindigkeiten Spannungen von nur 90 N/mm^2 (13000 psi) zu erwarten sind. Die Werte der Tabelle 1 sind daher als sehr konservativ einzustufen.

Die oben durchgeführte Berechnung gilt nur bei einer Anregung der Rohrleitung im Bereich der Eigenfrequenz. Treffen Anregungs- und Eigenfrequenz nicht zusammen, so muß eine zusätzliche Korrekturgröße eingeführt werden.

Ein ähnlicher Weg für die Beurteilung von Rohrleitungsschwingungen ist in [5] beschrieben. Für die Berechnung der maximalen durch Schwingungen verursachten Spannungen wird hier angegeben:

$$\sigma_{max} = f_M \cdot f_\sigma \cdot f_\phi \cdot v_{max} \cdot r_a \cdot \sqrt{\frac{E \cdot \mu}{I}} \quad (4)$$

mit

σ_{max}	=	maximale Spannung	[N/m ²]
f_M	=	Korrekturfaktor zur Erfassung von Einzelmassen	[-]
f_σ	=	Spannungserhöhungsfaktor	[-]
f_ϕ	=	Eigenformkennwert	[-]
v_{max}	=	maximale Schwinggeschwindigkeit	[m/s]
r_a	=	Radius der Rohrleitung außen	[m]
E	=	Elastizitätsmodul der Rohrleitung	[N/m ²]
μ	=	Massebelegung der Rohrleitung	[kg/m]
I	=	Flächenmoment	[m ⁴]

Auch in diesem Fall wird versucht, durch Einführung von Korrekturfaktoren, die die Eigenschaften der betrachteten Rohrleitung berücksichtigen, auf die durch Schwingungen verursachten Spannungen zu schließen.

Die Beurteilung der Situation erfolgt dann durch den Vergleich der berechneten mit den zulässigen Spannungen für das jeweilige Material, Einsatzbedingungen und Belastungsart.

Da also bei den hier beschriebenen Methoden jeweils auf die Spannung in der Rohrleitung als Beurteilungsgröße zurückgegriffen wird, stellt sich die Frage, warum nicht direkt die Spannungen gemessen werden.

Die Messung der Spannungen in einem Bauteil erfolgt in der Regel mit Dehnungsmeßstreifen. Die Meßstreifen werden an den Stellen auf die Rohrleitung geklebt, an denen die höchsten Spannungen erwartet werden. Da das Kleben und Verdrahten der DMS sehr zeitaufwendig ist, ist im allgemeinen durch z.B. orientierende Schwingungsmessungen und theoretische Betrachtungen die Stelle der Rohrleitung zu ermitteln, an der die höchsten Spannungen auftreten.

Sind diese Stellen bekannt, kann durch eine Messung der tatsächlich auftretenden Spannungen bei Betrieb der Anlage die Situation erfaßt und beurteilt werden.

Erst die Messung der tatsächlichen Spannungen im Einsatzfall liefert das genaue Ergebnis.

5.) Reduzierung von Rohrleitungsschwingungen

Für die Sanierung der Schwingungssituation an Rohrleitungen ist die genaue Kenntnis der Anregungs- und Übertragungsmechanismen erforderlich. Sind die Rohrleitungsschwingungen durch das Zusammentreffen von akustischer oder Struktureigenfrequenz mit der Anregungsfrequenz der angeschlossenen Maschine bedingt, kann zunächst durch die Verschiebung der Resonanzfrequenz eine Verbesserung der Situation erzielt werden.

Die Struktureigenfrequenz einer Rohrleitung kann durch das Anbringen zusätzlicher Stützen verändert werden. Hierbei muß die Stütze eine ausreichende Steifigkeit besitzen, da ansonsten keine genügende Verschiebung der Eigenfrequenz erzielt werden kann. Eine weitere Maßnahme könnte z.B. in der Abstützung und Verlegung von Rohrleitungsarmaturen bestehen, die mit ihrer konzentrierten Masse einen erheblichen Einfluß auf die Lage der Eigenfrequenz haben können.

Sind akustische Eigenfrequenzen für die Rohrleitungsschwingungen verantwortlich, so kann durch

- die Veränderung von Rohrleitungslängen oder
- die Veränderung von Rohrleitungseinbauten oder
- den Einbau von zusätzlichen pulsationsmindernden Maßnahmen

die Pulsation in der Rohrleitung verringert werden.

Eine derartige Maßnahme kann z.B. der Einbau von Pulsations-Dämpferplatten nach dem KÖTTER-Prinzip sein. Durch den Einbau an einer vorher berechneten Stelle im Rohrleitungssystem können akustische Resonanzen zerstört und Pulsationsminderungen bis zu 95 % realisiert werden. Da die Dämpferplatte im Laufe der letzten 15 Jahre unter akustischen und strömungstechnischen Gesichtspunkten optimiert wurde, ist der bleibende Druckverlust im Vergleich zu einer herkömmlichen Blende bei vergleichbarer akustischer Wirkung deutlich geringer.

6.) Beispiel aus der Praxis

Anregung im Bereich der mechanischen Eigenfrequenz

In einer Kolbenverdichteranlage sind Rohrleitungsschwingungen an Rohrleitungen zwischen der 1. und 2. Stufe bemängelt worden. Messungen von Druckpulsationen und Rohrleitungsschwingungen bestätigen zunächst die hohen Schwingungen an einzelnen Rohrleitungsabschnitten.

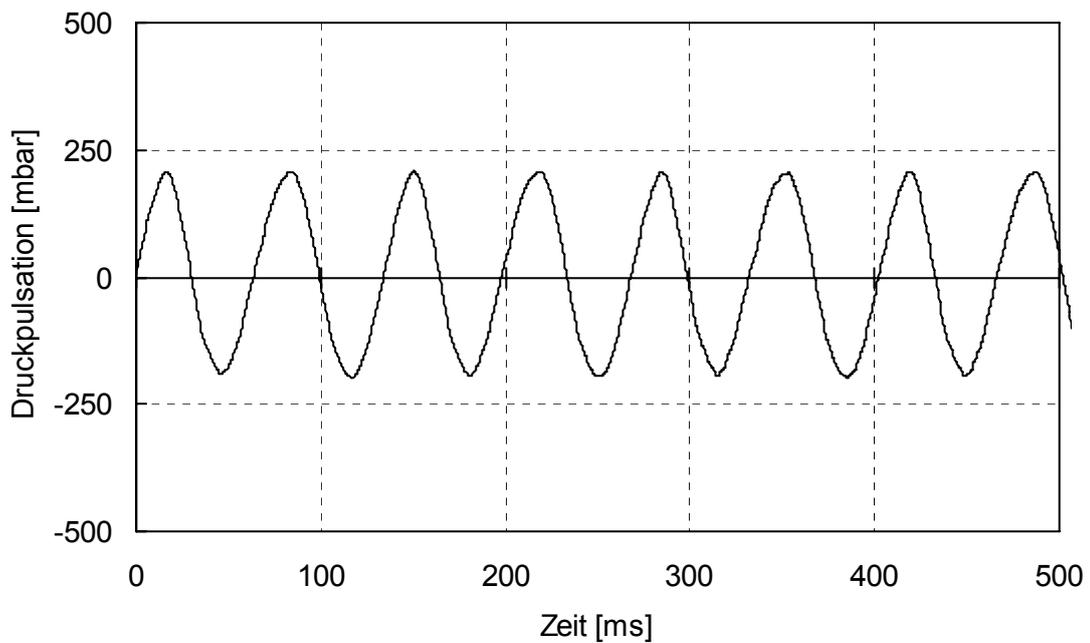


Abb. 4: Zeitverlauf der Druckpulsationen in der Saugleitung (1. Stufe)

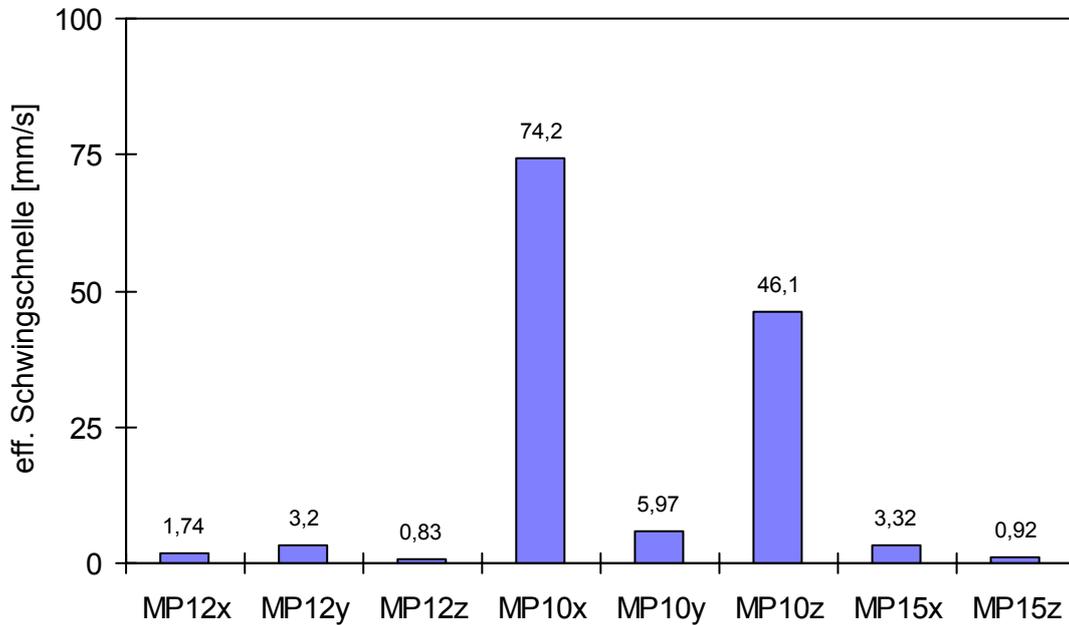


Abb. 5: Effektive Schwingschnelle auf der Rohrleitung an den unterschiedlichen Meßpunkten

Aus Abb. 4 ist eine dominierende Frequenz von ca. 15 Hz abzulesen. Die Drehzahl des Kolbenverdichters beträgt 446 U/min. Da die Zylinder doppelt wirkend sind, ergeben sich 2 Druckstöße pro Umdrehung, d.h. 14,9 Hz. Die Druckpulsationen führen zu Schwingungen an den Rohrleitungen, die insbesondere an dem Meßpunkt 10 in x- und z-Richtung (Abb. 5) zu erheblichen Schwingungen führen. (Die Lage der Meßpunkte ist im Anhang skizziert). Die Frequenz der Schwingung beträgt ebenfalls 15 Hz.

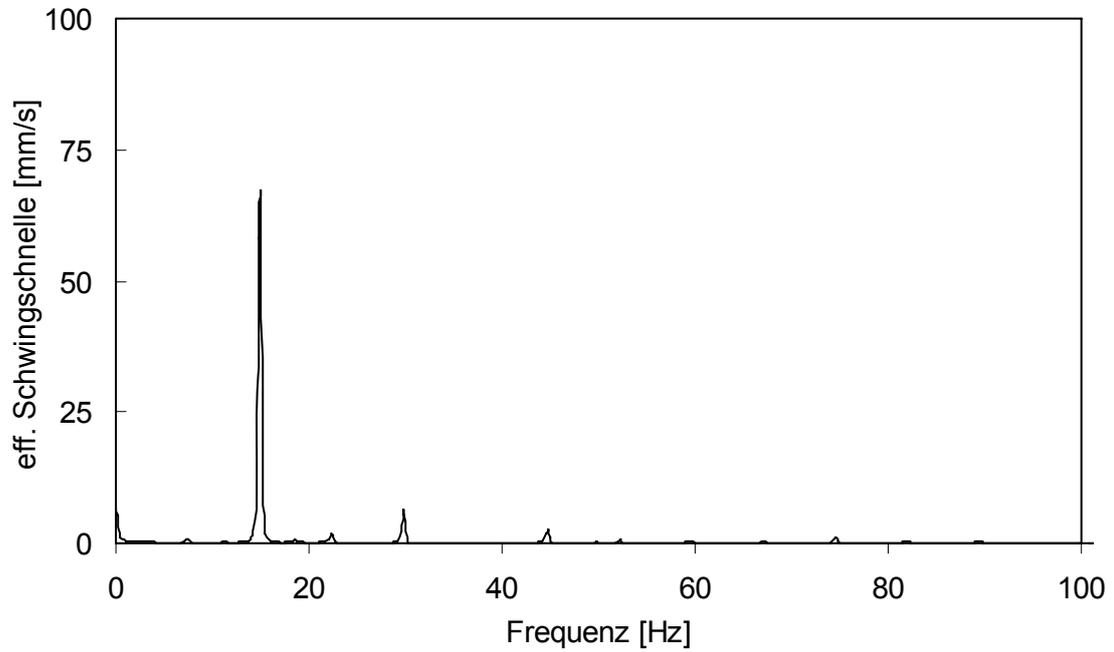


Abb. 6: Spektrum der Schwinggeschwindigkeit am Meßpunkt MP 10 in x-Richtung

Aus der FFT-Analyse der Schwinggeschwindigkeit (Abb. 6) ist zu entnehmen, daß die Schwingung der Rohrleitung in dieser Richtung nahezu monofrequent ist. Anschlagversuche zeigten, daß eine Eigenfrequenz der Rohrleitung im Bereich der Anregungsfrequenz des Kolbenverdichters liegt.

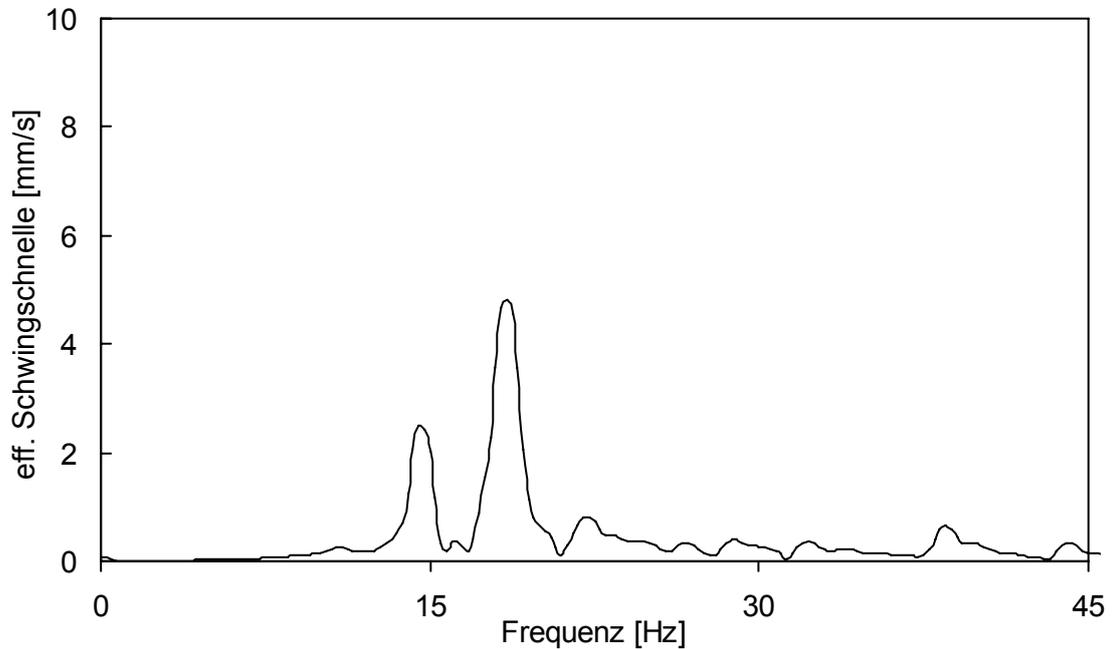


Abb. 7: Spektrum der Schwingschnelle an der Rohrleitung im Bereich des Meßpunktes 10 bei einer Impulsanregung und abgeschaltetem Kolbenverdichter

Da die Schwingungsüberhöhung in diesem Fall auf das Zusammentreffen von strukturmechanischer Eigenfrequenz der Rohrleitung und Anregungsfrequenz des Kolbenverdichters zurückzuführen war, wurde als Minderungsmaßnahme eine zusätzliche Stütze im Bereich des Meßpunktes MP 10 vorgeschlagen. Alternativ hierzu hätte auch eine Verringerung der Anregung, d.h. der Druckpulsationen in der Rohrleitung z.B. durch Pulsations-Dämpferplatten zum Ziel geführt. Hier war jedoch der nachträgliche Einbau der Stütze mit wesentlich weniger Aufwand verbunden, so daß diese Minderungsmaßnahme favorisiert wurde.

7.) Literatur

- [1] VDI 2056, Ausgabe Oktober 1964
Beurteilungsmaßstäbe für mechanische Schwingungen von Maschinen
- [2] DIN ISO 10816
Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messung an nicht rotierenden Teilen, Teil 1 bis 6
- [3] NEN 7-4-1
Extension VDI 2056, Groups T, D, S
- [4] Wachel, Morton, Atkins
Piping Vibration analysis
Proceedings of the nineteenth turbomachinery symposium
- [5] Bietenbeck, Petruschke
Beurteilung von Rohrleitungsschwingungen auf der Basis von Schwinggeschwindigkeiten