

14. Workshop Kolbenverdichter 2010

27. / 28. Oktober 2010

Vortrag 10

- Der richtige Halt ist entscheidend -

Der Einfluss von Rohrleitungsstützen auf die
Schwingungssituation an Rohrleitungen

Dipl.-Ing. Robert Missal

KÖTTER Consulting Engineers KG

Einleitung

Rohrleitungen werden in erster Linie dazu verwendet, um ein Medium von A nach B zu transportieren. Sie sind zwar in der Regel für die jeweilige Transportaufgabe durch eine geeignete Wahl des Materials, der Wandstärken, der Durchmesser und der Verbindungen angepasst worden, zählen aber dennoch zu den oftmals wenig beachteten Bauteilen im Anlagenbau. In vielen Anwendungsfällen ist dies auch durchaus gerechtfertigt, jedoch gibt es auch Anwendungsfälle, in denen der Rohrleitung eine erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte. Dies betrifft sowohl die Führung der Rohrleitung als auch insbesondere die Halterung der Rohrleitung, da diese Faktoren einen erheblichen Einfluss auf die Schwingungssituation an einer Rohrleitung haben.

Auswahl geeigneter Rohrleitungshalterungen

Rohrleitungshalter haben die Aufgabe, die Rohrleitung zu lagern und zu führen. Sie stellen die Verbindung der Rohrleitung zum Baukörper her und übernehmen dabei folgende Aufgaben:

- Aufnahme der Gewichtslasten
- Aufnahme der thermischen Dehnungen
- Aufnahme der dynamischen Kräfte
- Aufnahme der Betriebskräfte aus anormalen Betriebs- und Störfällen
- Lagerung der Rohrleitung
- Führung der Rohrleitung
- Vermeidung von ungewollten Zwängungen und dadurch bedingten Zusatzbelastungen auf die Rohrleitung.

Sie müssen sowohl statische als auch dynamische Lasten aufnehmen und können wie folgt unterteilt werden (Abbildung 1):

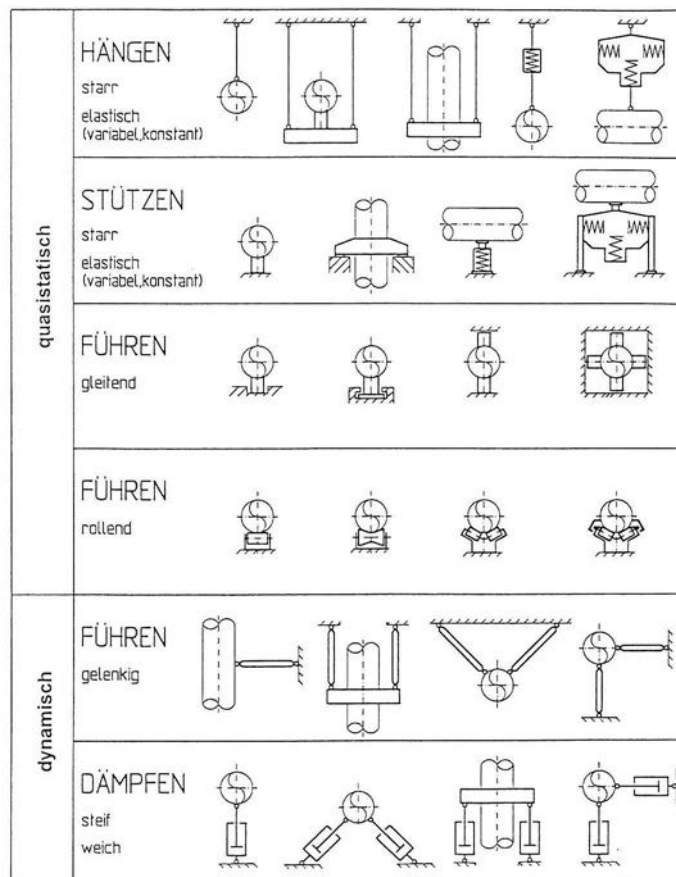


Abbildung 1: Aufgaben von Rohrleitungshaltern.

Bei der Auswahl geeigneter Halterungen sind daher im Wesentlichen die folgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- statische Belastung (Gewichtskräfte)
- thermische Belastung (Kräfte aufgrund thermischer Dehnung)
- dynamische Belastung.

Während die Ermittlung der statischen Belastung in vielen Fällen noch recht einfach ist, muss für die Ermittlung der thermischen Belastung einer Rohrleitung schon ein deutlich größerer Aufwand betrieben werden. Da aber mittlerweile viele Rohrleitungsberechnungsprogramme auch die thermische Ausdehnung der Rohrleitung berechnen können, kann mit diesen Hilfsmitteln auch die thermische Belastung von Rohrleitungshalterungen berechnet werden.

Für die überschlägige Ermittlung der thermischen Ausdehnung von Rohrleitungen kann in erster Näherung mit einem Wärmeausdehnungskoeffizienten von 10 bis $20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ gerechnet werden, wobei der niedrigere Wert für z. B. St35 und der höhere Wert für hochlegierte Stähle, wie z. B. X8CrNiMoVNb1613, anzusetzen ist. Bei einer Länge von 100 m Rohrleitung und einer Temperaturdifferenz von 100 °C ergibt sich somit je nach Material der Rohrleitung eine thermisch bedingte Längenänderung von 100 mm bis 200 mm.

Für die Berechnung der dynamischen Belastung ist die Kenntnis der dynamischen Kräfte erforderlich. Diese Kräfte entstehen u. a. durch stochastische oder periodische Druckschwankungen in den Rohrleitungen und müssen von den Halterungen aufgenommen werden.

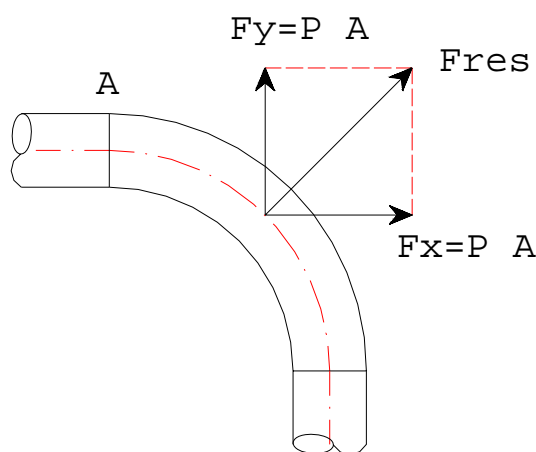


Abbildung 2: Durch Druckschwankungen verursachte Reaktionskräfte auf einen 90 ° Krümmer, P: Innendruck, A: Querschnittsfläche der Leitung.

Die Höhe der Druckschwankungen hängt nicht nur von den angeschlossenen Maschinen oder von dem Prozess sondern auch von der Rohrleitungsführung und den Einbauteilen in der Rohrleitung ab. So können z. B. durch akustische Resonanzen innerhalb des Rohrleitungssystems die von der Maschine erzeugten Druckpulsationen um ein Vielfaches verstärkt werden. Aus diesem Grund ist die Berechnung der Druckschwankungen oftmals sehr komplex und nur durch den Einsatz spezieller Rechenprogramme möglich.

Bei Rohrleitungen, die sowohl thermisch als auch dynamisch belastet werden, kommt die Problematik hinzu, dass zur ungehinderten Aufnahme der Wärmedehnungen die Halterung als Loslager ausgeführt werden sollte, während aus der Berechnung der dynamischen Kräfte eine möglichst steife Halterung erforderlich ist.

Darüber hinaus muss die Halterung so konzipiert sein, dass möglichst keine Wartung oder regelmäßige Kontrolle erforderlich ist, denn durch die massiven Personaleinsparungen bei den Anlagenbetreibern ist meist kein zur Durchführung derartiger Kontrollen geeignetes Personal mehr vor Ort.

Unter Beachtung dieser Aspekte ist der Rohrleitungshalter ein recht komplexes Bauteil, welches möglichst optimal auf den jeweiligen Einsatzfall angepasst werden sollte.

Beispiele für Standardhalter

Zur Halterung von Rohrleitungen sind auf dem Markt viele standardisierte Halter verfügbar.

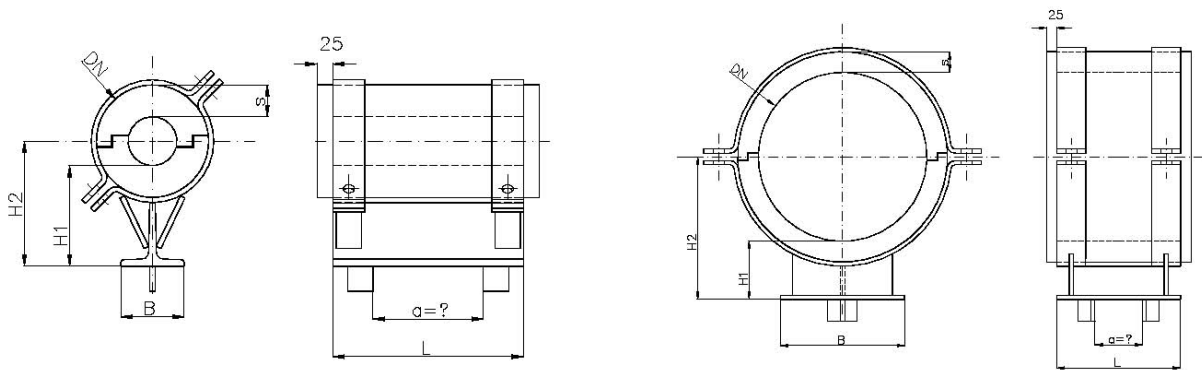


Abbildung 3: Festpunktlager mit Anschweißnocken (Quelle: Hesterberg).

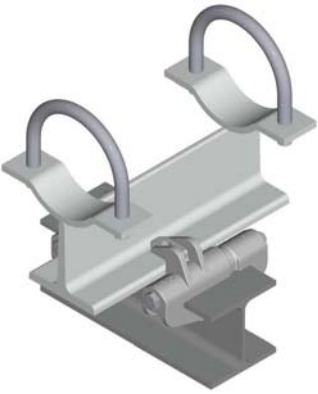

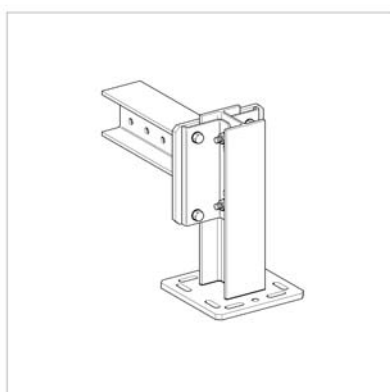
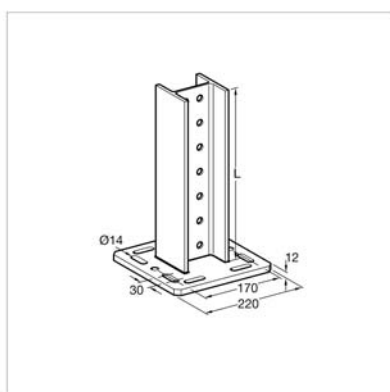
Führungslager mit Abhebesicherung <i>Guide support with lift-off safety device</i>	Festpunkt / Fixpoint
<p>Kombination: Rohrlager TA 30 F und Klemmsystem KS32203</p> <p><i>Combination: Pipe support TA 30 F and clamping system KS32203</i></p> 	<p>Kombination: Rohrlager SV150G mit Festpunktnocken aus T50 sowie Klemmsystem KS32103</p> <p><i>Combination: Pipe support SV150G with fixpoint tappets T50 and clamping system KS32103</i></p> 

Abbildung 4: Führungslager und Festpunkt mit Klemmsystem (Quelle: Hesterberg).

Dem Geschick des Anlagenplaners und Rohrleitungsbauers bleibt es nun überlassen, aus den vielen verfügbaren Standardhalterungen die für den jeweiligen Einsatzfall optimalen Halterungen auszuwählen. Da neben dem Lager auch die Verbindung zwischen dem Lager und dem Baukörper entscheidend für die richtige Halterung der Rohrleitung ist, muss auch bei der Auswahl der Verbindung sehr sorgfältig vorgegangen werden. Zwar gibt es auch hier eine Vielzahl standardisierter Systeme, allerdings bestehen sehr große Unterschiede in den Steifigkeiten. Deshalb ist es ohne entsprechende Erfahrung schwierig, die geeignete Konstruktion auszuwählen.



Technische Daten

Ausführung: Grundplatte verschweißt mit IPBI 100
Material: Stahl, HCP

Typ	L [mm]	G [kg]	Verp. [Stück]
TKO 100 x 250	250	8,6	1
TKO 100 x 350	350	10,4	1
TKO 100 x 400	400	11,2	1
TKO 100 x 450	450	11,9	1
TKO 100 x 500	500	12,7	1
TKO 100 x 550	550	13,7	1
TKO 100 x 600	600	14,2	1
TKO 100 x 650	650	15,0	1
TKO 100 x 700	700	16,6	1
TKO 100 x 750	750	17,2	1
TKO 100 x 800	800	17,9	1
TKO 100 x 850	850	18,7	1
TKO 100 x 900	900	19,6	1
TKO 100 x 950	950	20,3	1
TKO 100 x 1000	1000	21,2	1
TKO 100 x 1100	1100	22,3	1
TKO 100 x 1200	1200	25,2	1
TKO 100 x 1300	1300	25,8	1
TKO 100 x 1400	1400	28,6	1
TKO 100 x 1500	1500	30,1	1
TKO 100 x 2000	2000	39,0	1

Abbildung 5: Standardisierte Rohrleitungsstützen (Quelle: Sikla).

Rohrleitungshalter zur Aufnahme dynamischer Kräfte

Die bisher betrachteten Halter können sowohl als Festlager als auch als Führungslager eingesetzt werden. Unter Verwendung von speziellen Gleitlagern können thermische Ausdehnungen der Rohrleitung aufgenommen und dennoch eine definierte Führung der Rohrleitung erzielt werden.

Bei dynamisch z. B. durch Pulsationen oder Schwingungen belasteten Rohrleitungen kann grundsätzlich zur Aufnahme der dynamischen Kräfte ein Festlager verwendet werden. Allerdings muss in diesem Fall sichergestellt werden, dass die Rohrleitung bei thermischer Ausdehnung nicht unzulässig verspannt wird. Bei Haltern, die auf hohen Stützen oder Rohrbrücken montiert sind, ist es oft weniger problematisch, wenn Festlager verwendet werden, da die Wärmedehnung durch die Elastizität der Stützen aufgenommen werden kann. So halten sich die Zusatzkräfte in Grenzen. Sind die Festlager allerdings auf kurzen und / oder sehr steifen Stützen montiert, können die thermischen Dehnungen die Sicherheit der Rohrleitung gefährden. In einem derartigen Fall kann dann z. B. der Einsatz von Lagern geprüft werden, die mit Hilfe von Federelementen die Rohrleitung nur bis zu einer voreingestellten Maximalkraft halten.



Abbildung 6: Rohrleitungshalter mit Tellerfedern.

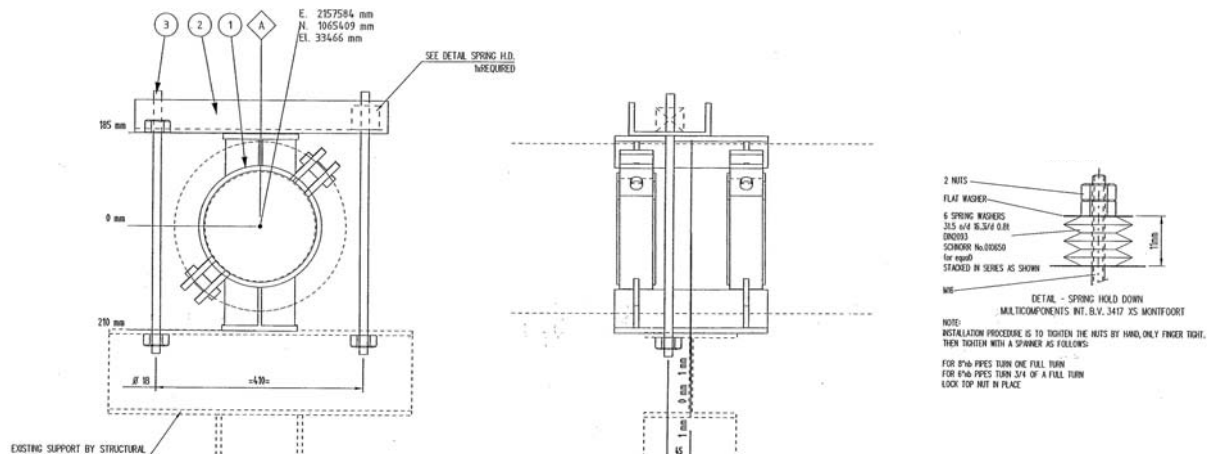


Abbildung 7: Rohrleitungshalter mit Tellerfedern.

Für größere Verschiebungen werden darüber hinaus sogenannte Stoßbremsen eingebaut. Diese federbelasteten Halter sorgen dafür, dass bei größeren Auslenkungen eine Federkraft die Rohrleitung zusätzlich fixiert.

Ein weiteres Bauteil, welches bei Rohrleitungen zur Aufnahme dynamischer Belastungen eingesetzt wird, ist der Rohrleitungsdämpfer. Dieses Bauteil nimmt in der Regel keine statischen Kräfte auf, sondern wandelt die Bewegungsenergie der Rohrleitung durch die Bewegung eines Stempels in einem Dämpfungsmedium in Wärmeenergie um.

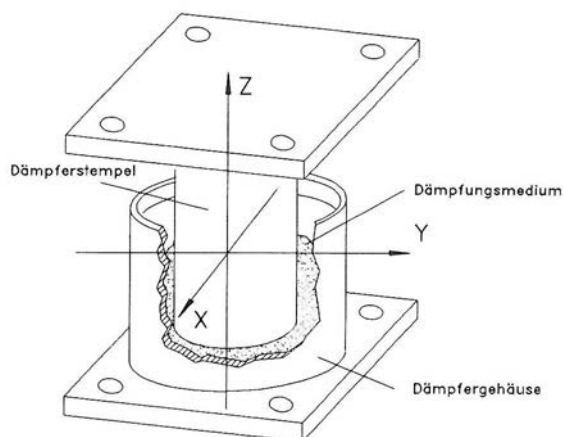


Abbildung 8: Aufbau eines Rohrleitungsdämpfers (Quelle: Gerb).

Fallbeispiel für eine richtig ausgelegte Rohrleitungshalterung

Zur Veranschaulichung des Einflusses der Rohrleitungshalterung auf die Schwingungssituation sind nachfolgend einige Berechnungsergebnisse dargestellt. Das Beispiel beschreibt eine Rohrleitung an einem 2-stufigen Kolbenverdichter, wobei hier nur der Verlauf der Rohrleitung auf der Druckseite der 1. Stufe vom Verdichter bis zum Kühler und vom Kühler zurück zur Saugseite der 2. Verdichterstufe betrachtet wird.

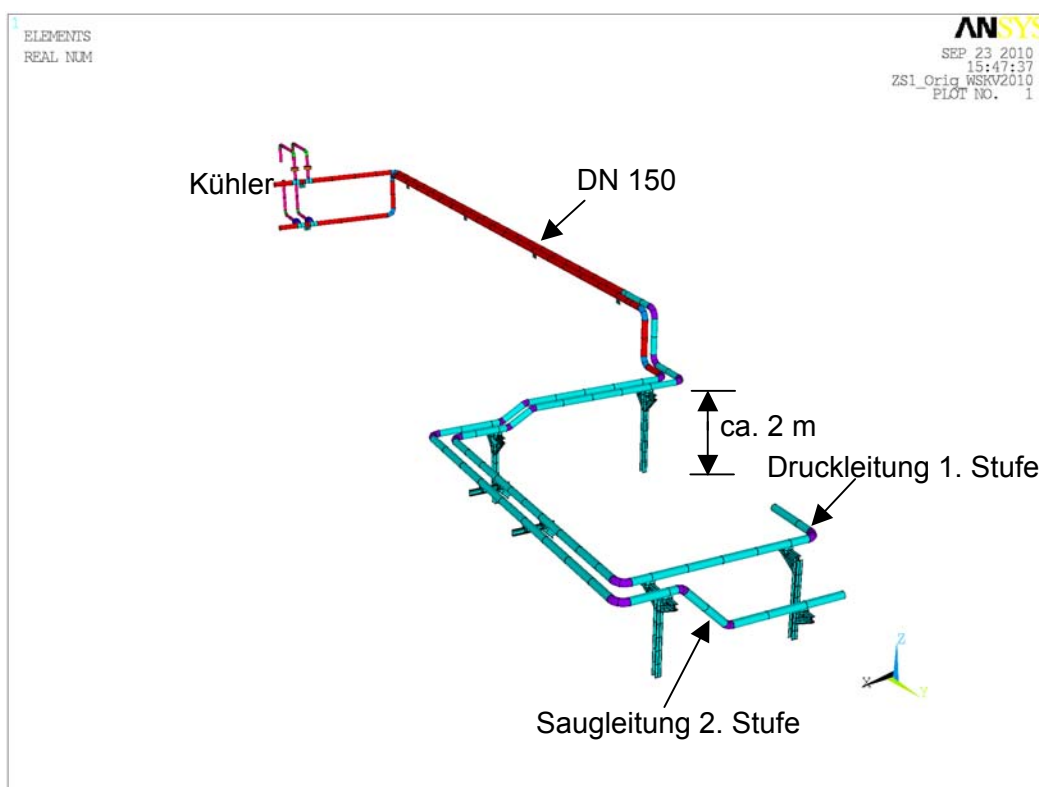


Abbildung 9: Rohrleitungsverlauf der Druckleitung der 1. Stufe und der Saugleitung der 2. Stufe.

Für dieses Projekt wurden im Rahmen einer Pulsationsstudie die Druckpulsationen in den Rohrleitungen berechnet. Darauf aufbauend wurde die Reaktion der Rohrleitung berechnet (siehe Abbildung 10).

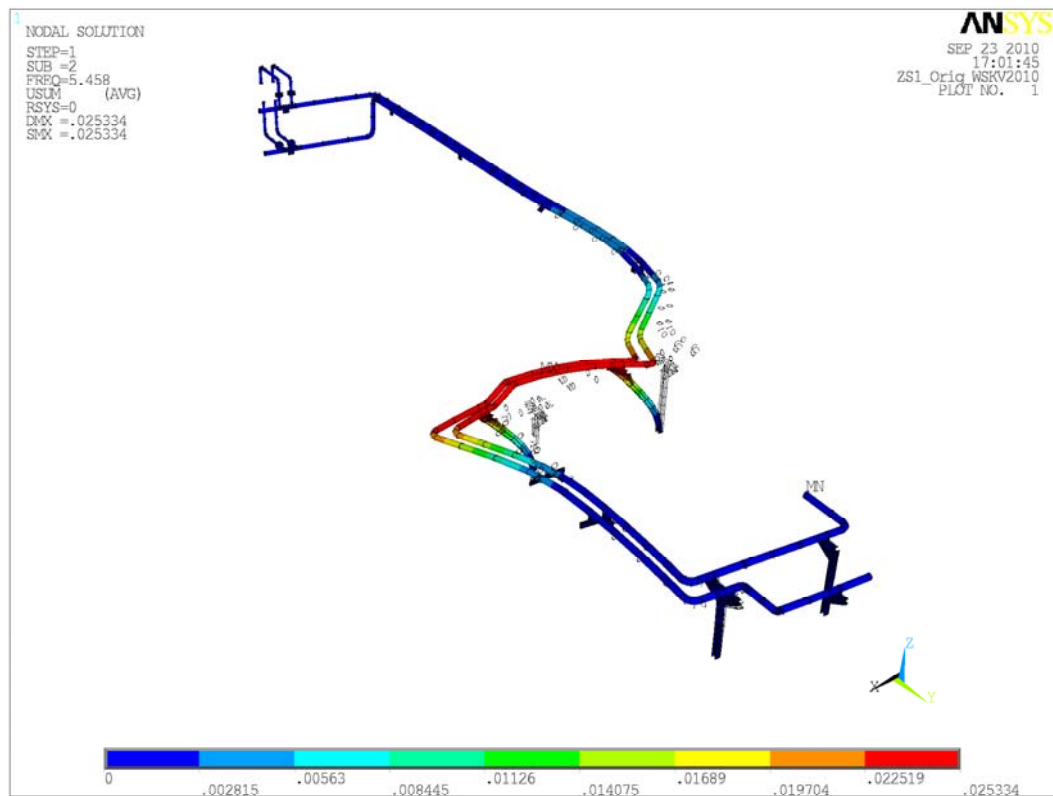


Abbildung 10: Verformung der Rohrleitung bei einer Frequenz von 5,5 Hz.

Da die Frequenz 5,5 Hz von dem Kolbenverdichter angeregt wird, war die in der Abbildung 10 dargestellte Verformung der Rohrleitung so nicht akzeptabel. Die maximale Schwinggeschwindigkeit an der Rohrleitung wurde mit 150 mm/s RMS berechnet. Die Abbildung 10 zeigt, dass die große Bewegung der Rohrleitung auf die unzureichende Steifigkeit der Rohrleitungsstützen zurückzuführen ist. Zur Verbesserung der Schwingungssituation wurden daher verschiedene Modifikationen der Stützen berechnet. Im ersten Ansatz wurden die Stützen derart modifiziert, dass die Steifigkeit in x-Richtung wesentlich vergrößert wurde.

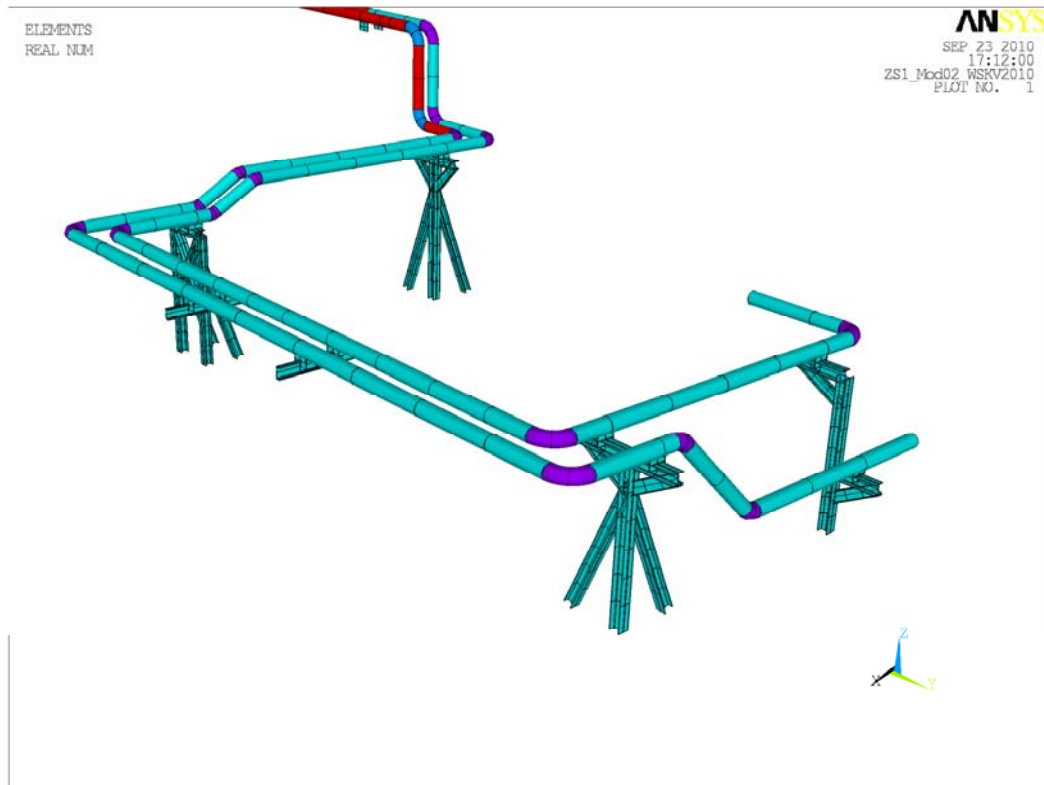


Abbildung 11: Erste Modifikation der Rohrleitungsstützen.

Für diese Variante wurden an der Rohrleitung maximale Schwinggeschwindigkeiten von ca. 24 mm/s RMS berechnet. Obwohl dieser Vorschlag zu einer deutlichen Reduzierung der Schwinggeschwindigkeiten geführt hat, wurden vom Betreiber Bedenken hinsichtlich der massiven Stützen geäußert. Als Modifikation wurde eine Veränderung der Stützen vorgeschlagen, die nur eine geringfügige Versteifung in x-Richtung bewirkte (Abbildung 12). Dies führte dazu, dass die Eigenfrequenz in einen noch ungünstigeren Frequenzbereich verschoben wurde und die Schwingungen dadurch auf über 230 mm/s RMS angestiegen sind.



Abbildung 12: Zweite Modifikation der Rohrleitungsstützen.

Als Kompromiss wurden dann die Stützen in den Ecken mit Diagonalstreben versteift, so dass in der Hauptbewegungsrichtung die Steifigkeit weiter vergrößert wurde (Abbildung 13). Durch diese geringfügige Modifikation der vom Kunden favorisierten Lösung wurden die berechneten Schwinggeschwindigkeiten auf nur noch 13 mm/s RMS gesenkt.

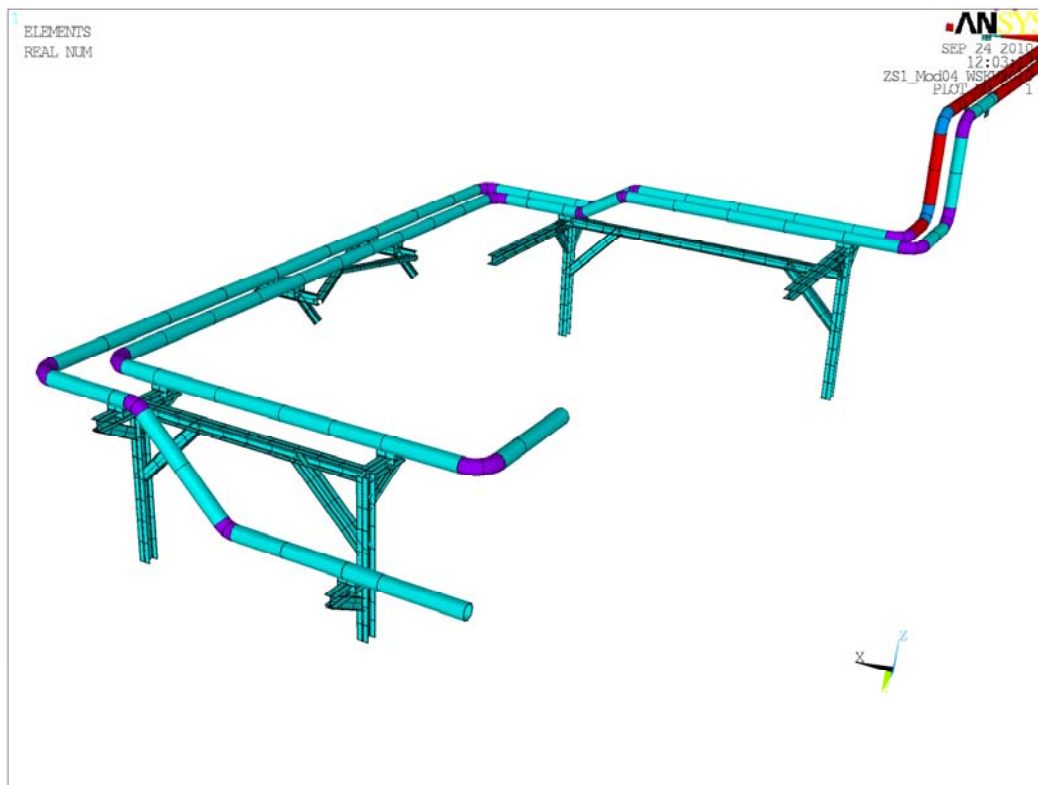


Abbildung 13: Endgültige Modifikation der Rohrleitungsstützen.

Wie aus dem Beispiel zu erkennen ist, führen die dynamischen Kräfte, die aus den Druckpulsationen in den Rohrleitungen entstehen, aufgrund der zu weichen Rohrleitungsstützen zu erheblichen Rohrleitungsschwingungen. Die daraus resultierenden Spannungen von über 27 N/mm^2 p-p waren nicht akzeptabel, so dass verschiedene Modifikationen der Stützen geprüft wurden.

Mit der letztendlich favorisierten Stützenkonstruktion konnten die Schwingungen an den Rohrleitungen von 150 mm/s RMS auf 13 mm/s RMS verringert werden. Die Schwachstelle an der Halterung der Rohrleitung war nicht die Befestigung der Rohrleitung an dem Halter sondern die Steifigkeit der Rohrleitungsstützen. Ist an dieser Stelle die Steifigkeit nicht ausreichend, können die dynamischen Kräfte von immerhin 1.200 N nicht aufgenommen werden und die Rohrleitung wird durch die hohen Schwinggeschwindigkeiten zu stark belastet.

Fallbeispiel für die Sanierung einer Rohrleitungshalterung

In einer Raffinerie wurden vom Betriebspersonal subjektiv sehr hohe Rohrleitungsschwingungen beanstandet. Die Rohrleitung war auf der Druckseite eines 2-zylindrigen, 1-stufigen Kolbenverdichters montiert. Die beiden Zylinder waren doppeltwirkend zur Verdichtung von Frisch- und Kreisgas. Die Verdichterfrequenz war fest und betrug 370 RPM.

Obwohl der Verdichter Baujahr 1970 war, sind die Schwingungen erst Mitte 2008 beanstandet worden. Dass die Situation erst so spät bemängelt wurde, kann daran liegen, dass der Volumenstrom der Anlage mit Hilfe einer Saugventilhalterung geregelt werden kann und die Schwingungssituation eine deutliche Abhängigkeit vom Betriebszustand aufweist.

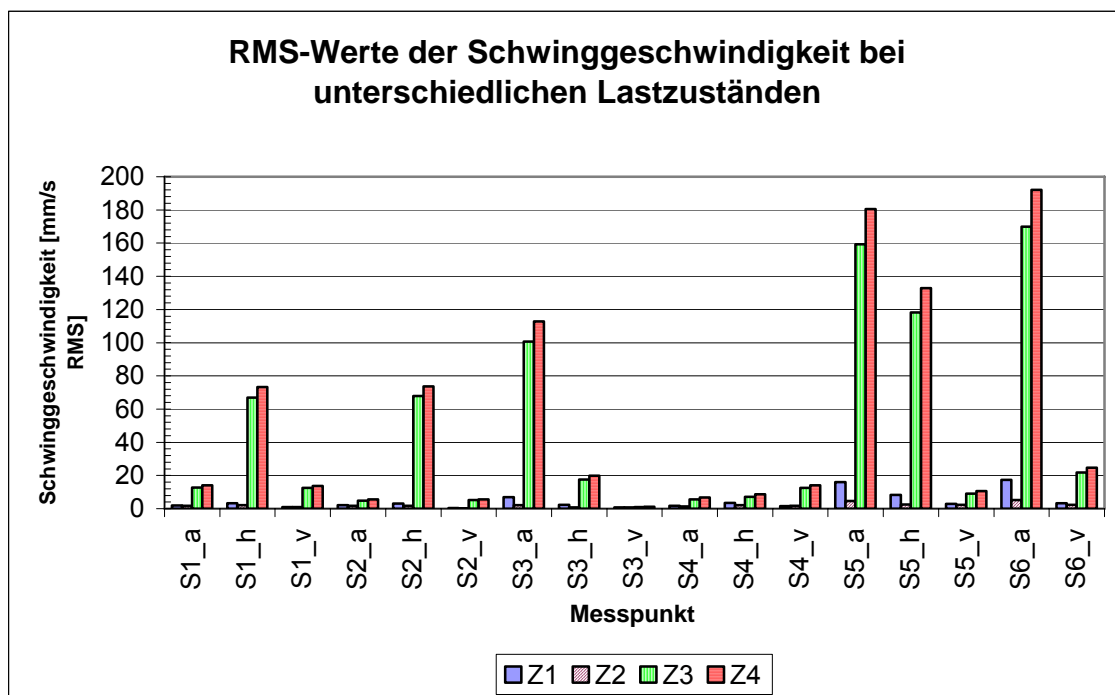


Abbildung 14: Effektivwerte der gemessenen Rohrleitungsschwingungen bei unterschiedlichen Betriebszuständen.

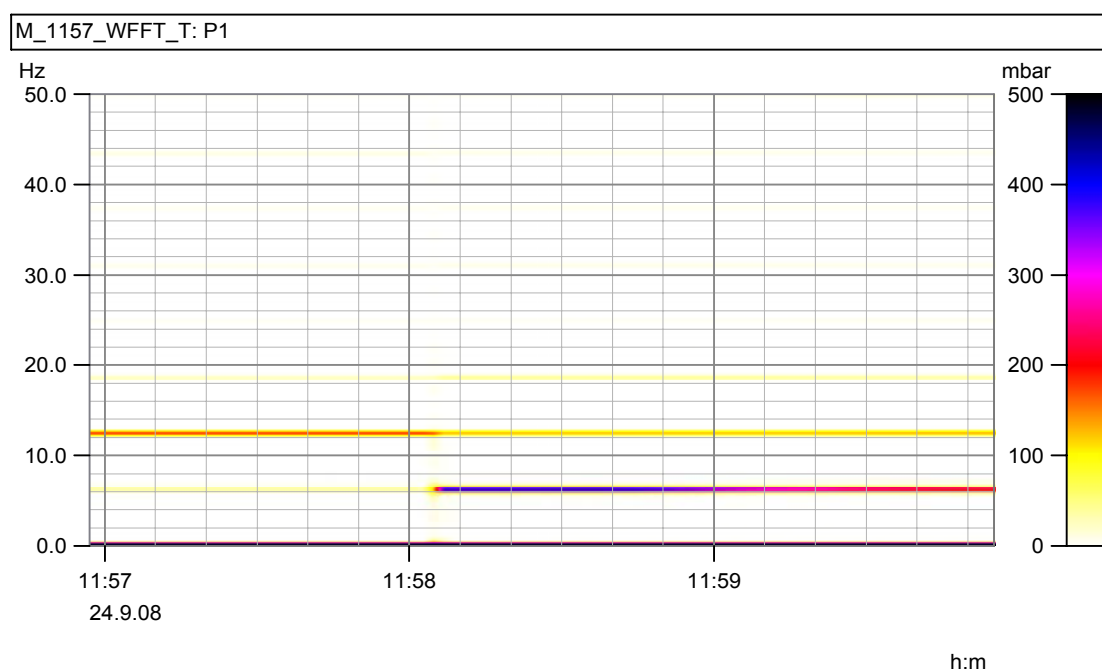
Die zugehörigen Betriebszustände sind wie folgt definiert:

Zustand	Volumenstrom [%]	
	Frischgas	Kreisgas
Z1	100	100
Z2	75	100
Z3	50	100
Z4	25	100

Tabelle 1: Betriebszustände der Verdichteranlage.

Wie aus der Abbildung 14 zu erkennen ist, traten die hohen Rohrleitungsschwingungen nur bei den Betriebszuständen Z3 und Z4 auf, wenn der Volumenstrom des Frischgasverdichters 50 % oder geringer war.

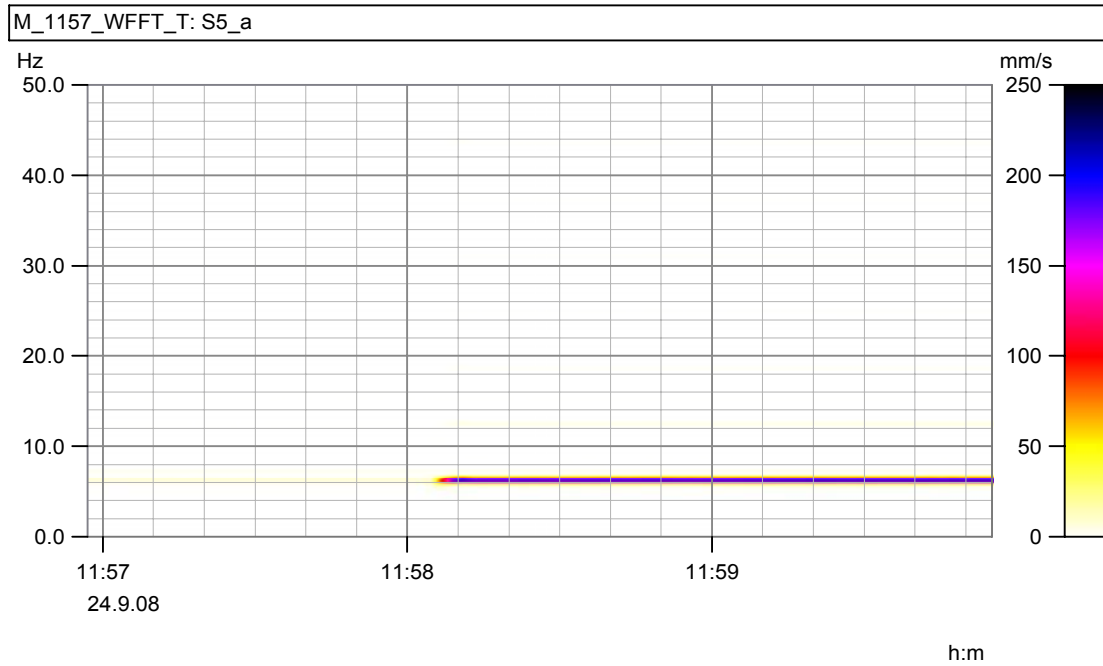
Die Volumenstromregelung wurde mit Hilfe einer Saugventilabhebung realisiert, d. h. bei Volumenströmen $\leq 50\%$ ist ein Verdichtungsraum des Frischgaszylinders deaktiviert, da das Saugventil zwangsweise geöffnet bleibt. Als Konsequenz dieser Fahrweise ändert sich die Frequenz der Druckpulsationen im Medium, weil der Zylinder nur noch einfachwirkend statt doppelwirkend arbeitet.



24.09.08 11:56:57

Abbildung 15: Farbspektrogramm der FFT-Analyse der Druckpulsationen am Messpunkt P1 (Saugleitung Frischgasseite), bis 11:58 Uhr 75 %, ab 11:58 Uhr Frischgas 25 %.

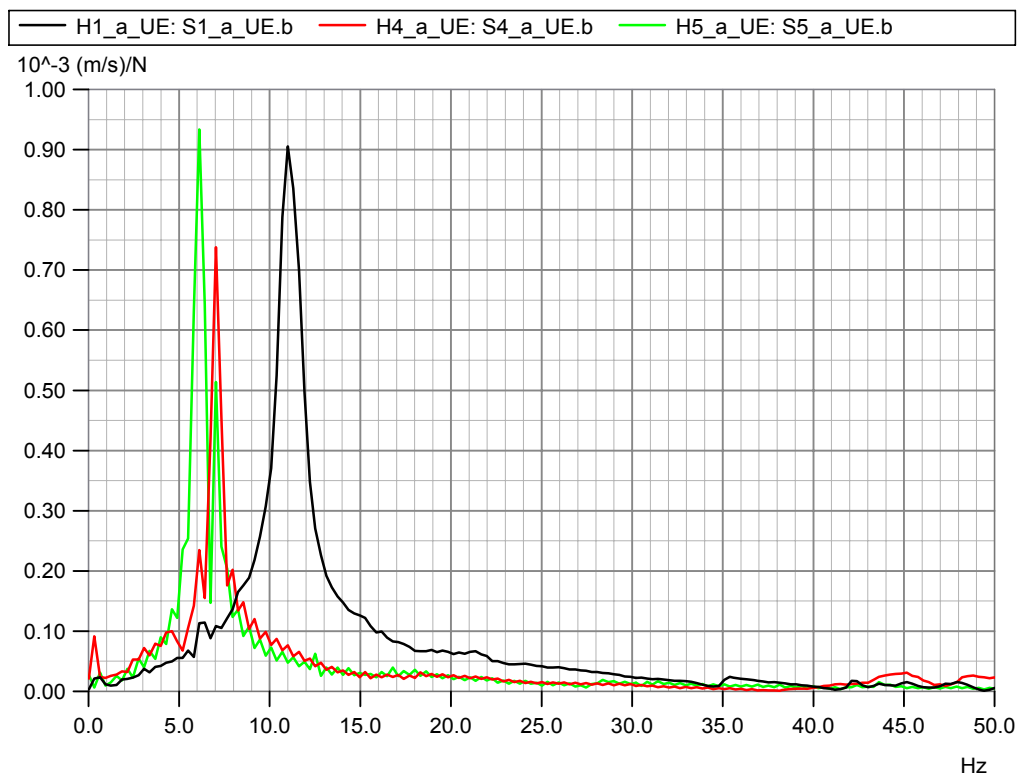
Da die Rohrleitungsschwingungen von den Druckpulsationen angeregt werden, ändert sich damit auch die Frequenz der Rohrleitungsschwingungen.



24.09.08 11:56:57

Abbildung 16: Farbspektrogramm der FFT-Analyse der Schwinggeschwindigkeit am Messpunkt S5 in axialer Richtung, bis 11:58 Uhr Frischgas 75 %, ab 11:58 Uhr Frischgas 25 %.

Erschwerend kam in diesem Fall hinzu, dass die Struktureigenfrequenz der Rohrleitung in dem Bereich mit den erhöhten Schwingungen bei ca. 6 Hz lag. Diese Frequenz entspricht der Pulsationsfrequenz des Zylinders in der einfachwirkenden Fahrweise.

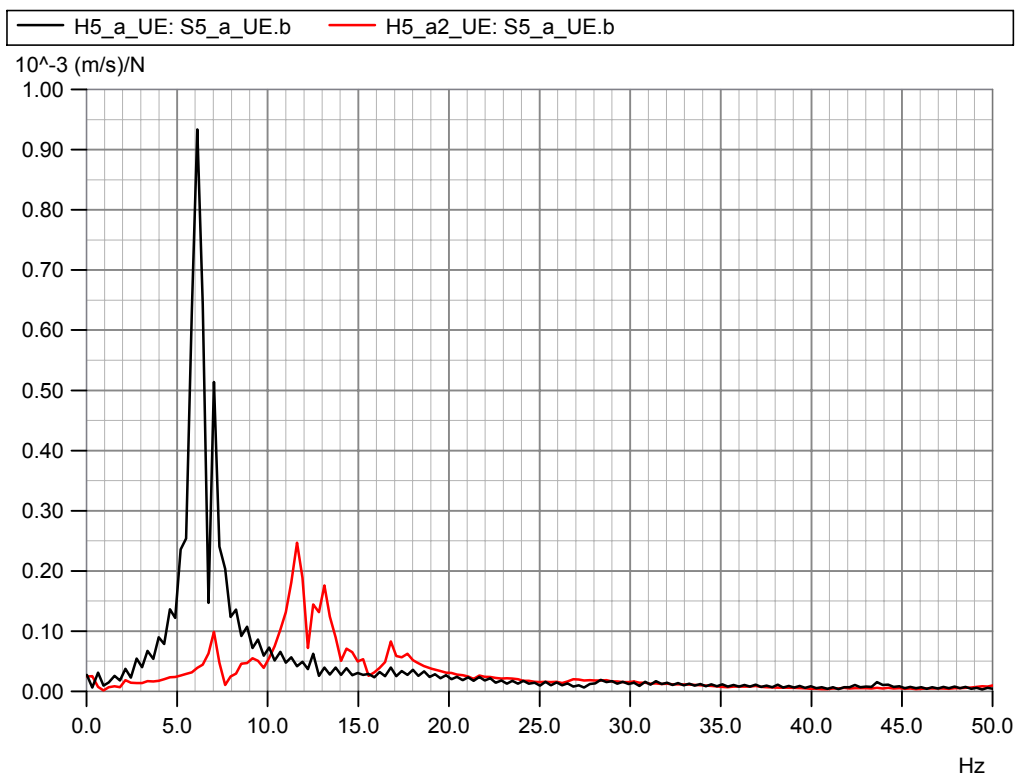


23.09.08 15:33:29

Abbildung 17: Gemessene Übertragungsfunktionen an den Messpunkten S1_a (schwarze Kurve), S4_a (rote Kurve) und S5_a (grüne Kurve).

Die durch Anschlagversuche ermittelte Eigenfrequenz am Messpunkt S5_a lag bei ca. 6 Hz. Am Messpunkt S1_a war die Rohrleitung wesentlich steifer gehalten, so dass hier die gemessene Eigenfrequenz bei ca. 11 Hz lag. Dies führte dazu, dass die Rohrleitungsschwingungen bei Volumenströmen $\leq 50\%$ am Messpunkt S5_a deutlich höher waren als am Messpunkt S1_a (Abbildung 14).

Als Minderungsmaßnahme wurde die Rohrleitungshalterung noch während der Messung mit Hilfe von Kanthölzern modifiziert, so dass insbesondere am Messpunkt S5_a in axialer Richtung eine wesentlich größere Steifigkeit vorhanden war. Die Eigenfrequenz der Struktur konnte mit Hilfe dieser provisorischen Fixierung von vorher 6 Hz auf ca. 11,5 Hz verschoben werden.



23.09.08 15:10:41

Abbildung 18: Gemessene Übertragungsfunktion am Messpunkt S5_a ohne (schwarze Kurve) und mit (rote Kurve) Fixierungen.

Die verwendeten Kanthölzer sind in der Abbildung 19 dargestellt.

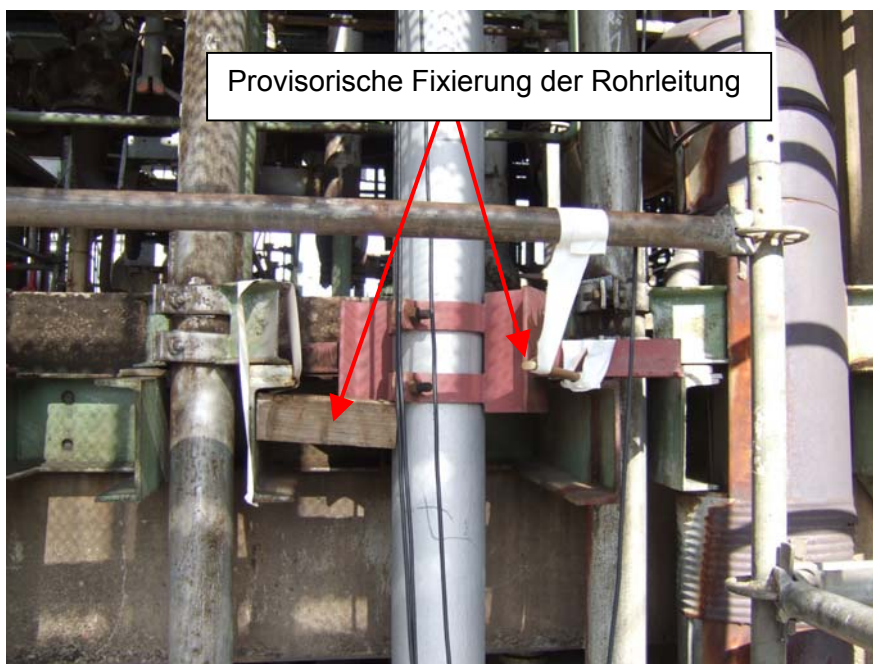


Abbildung 19: Provisorische Fixierung der Rohrleitung.

Mit Hilfe dieser provisorischen Fixierung war es möglich, die Auswirkung einer steiferen Rohrleitungshalterung auf die Schwingungssituation an der Rohrleitung noch während der Messung zu demonstrieren.

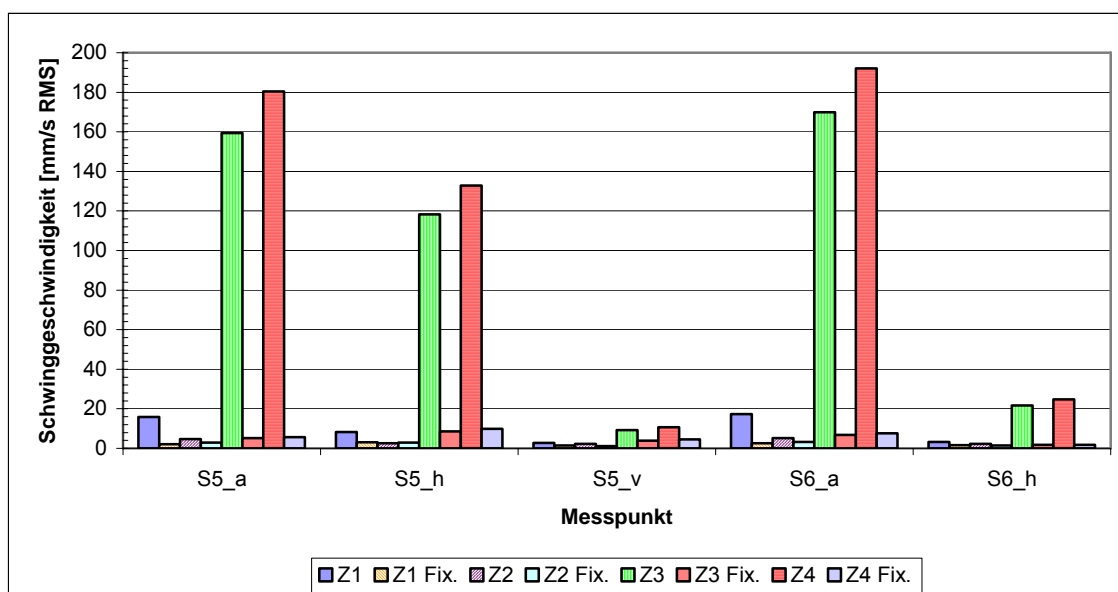


Abbildung 20: Vergleich der Rohrleitungsschwingungen bei unterschiedlichen Betriebszuständen mit (Z...Fix) und ohne (Z...) provisorische Fixierung.

Die Abbildung 20 zeigt, dass die Schwinggeschwindigkeit an der Rohrleitung durch die provisorische Fixierung auf Werte unter 10 mm/s RMS reduziert werden konnte. Es wurde daher empfohlen, die Rohrleitung an dieser Stelle mit einem Halter zu versehen, der die Rohrleitung ausreichend fixiert.

Auch in diesem Beispiel wird deutlich, wie stark die Schwingungssituation an der Rohrleitung von dem richtigen Halterungskonzept beeinflusst wird.

Zusammenfassung

Durch die Auswahl von Rohrleitungshaltern einschließlich der zugehörigen Rohrleitungsstützen wird die Schwingungssituation an den Rohrleitungen gravierend beeinflusst. Zur Vermeidung übermäßiger Rohrleitungsspannungen muss die jeweilige Belastung berücksichtigt werden. Bei kritischen Anwendungen können die Auswirkungen der Halter und Stützen auf die Schwingungssituation bereits in der Planungsphase berechnet und optimiert werden. Die tatsächliche Schwingungssituation sollte an diesen Rohrleitungen nach der Inbetriebnahme messtechnisch überprüft werden.