

14. Workshop Kolbenverdichter 2010

27. / 28. Oktober 2010

Vortrag 08

**Erfolgreiche Reduktion fundamentinduzierter
Vibrationen am Beispiel einer Neuinstallation
eines Sekundärkompressors K10**

Ing. Dieter Stoll
Burckhardt Compression AG

Dr.-Ing. Jan Steinhausen
KÖTTER Consulting Engineers KG

Zusammenfassung

Bei der Inbetriebsetzung eines Sekundärkompressors sind beim mechanischen Probelauf Vibrationen vor allem am Maschinenfundament aufgetreten, welche den zulässigen Grenzwert stark überschritten. Um den Sachverhalt der Vibrationsproblematik neutral bewerten zu können, wurde KÖTTER Consulting Engineers als neutraler Gutachter beigezogen. Nähere Abklärungen zeigten, dass die Gründung des Kompressorfundamentes ursächlich war. Die durchgeführten Messungen vor Ort zeigten ein starkes Vibrieren des gesamten Kompressorfundaments. An Stelle der bevorzugten Sanierung mittels Betonschlitzwänden wurde eine Betonmilcheinspritzung gewählt.

Da keine Erfahrungen vorlagen mit dieser Art von Sanierung und ein zwar verbessertes aber immer noch über dem Grenzwert liegendes Schwingungsniveau zu erwarten war, wurde ein sogenanntes „Safety Analysis“ Verfahren festgelegt, welches ein schrittweises Bewerten des Vibrationsverhaltens erlaubte.

Die gemachten Erfahrungen zeigen, dass im vorliegenden Fall die Sanierung mittels Betonmilch zufriedenstellende Resultate liefert. Der Kompressor läuft mit Werten leicht über den definierten Grenzwerten, jedoch ohne bis heute erkennbaren Einfluss auf die Lebensdauer der Bauteile. Zudem erlaubt die Art der Analyse, das ganze an den Sekundärkompressor angeschlossene Rohrleitungssystem zu bewerten und dabei für einzelne Punkte am Rohrleitungssystem spezifische Vibrationsgrenzwerte festlegen zu können.

1. Sekundärkompressoren

Um 1950 wurden die ersten kommerziellen LDPE-Anlagen gebaut. Um die erwünschten Molekülketten zur Erzeugung von LDPE zu erhalten, war ein Druck von mind. 1.500 bar gefordert. Der hohe Enddruck wird mittels drei verschiedenen Kompressortypen erreicht. Es sind dies Primärkompressor, er verdichtet das frische Ethylen von ca. 15 bar auf 300 bar, Sekundärkompressor, er verdichtet von 300 bar auf den gewünschten Enddruck (bis 3.500 bar) und der Boosterkompressor, er verdichtet das nicht in Reaktion getretene Gas von Atmosphäre auf Primärverdichtervordruck 15 bar, siehe nachfolgende schematische Darstellung des LDPE-Prozesses. Bemerkung: Heutzutage werden der Boosterkompressor und der Primärkompressor auf einer Welle - sprich in einer Maschine - ausgeführt.

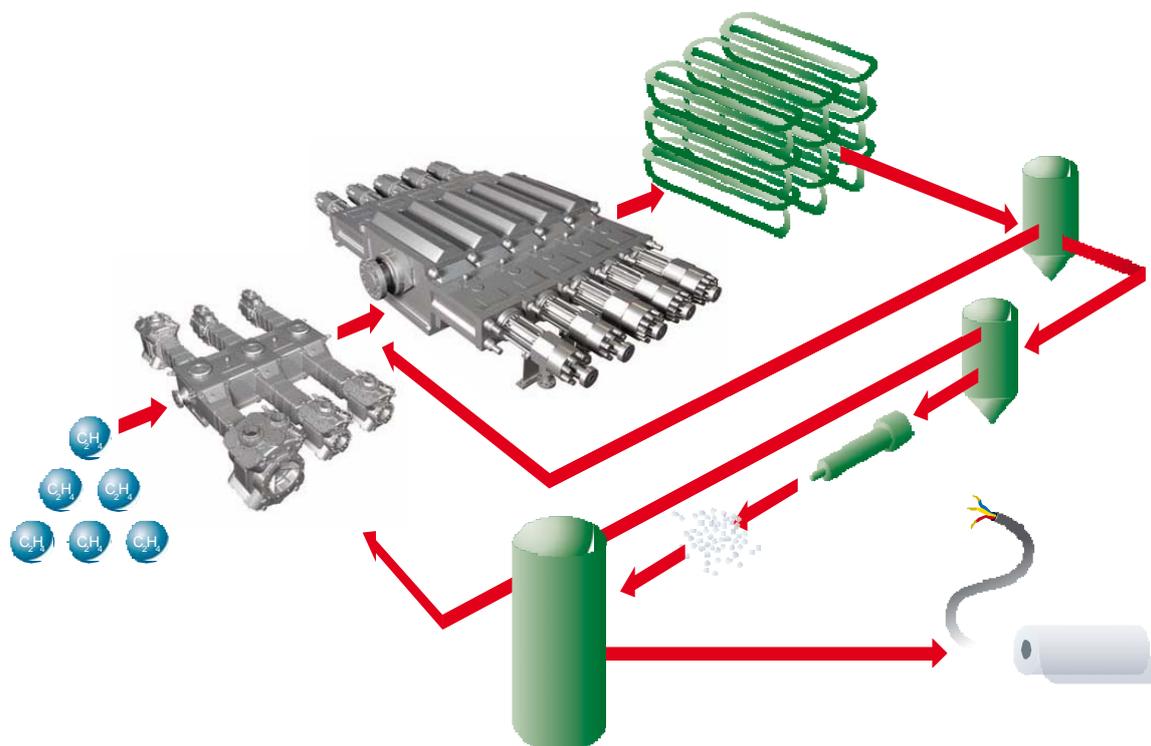


Abbildung 1: LDPE-Prozess, Primär-/Boosterkompressor links im Bild, Sekundärkompressor in der Mitte des Bildes.

Die Anforderung betreffend Kapazität an die ersten zu liefernden Sekundärkompressoren war aus heutiger Sicht bescheiden, ungefähr 5.000 kg/h. Aufgrund langjähriger Erfahrung mit Kompressoren bis zu 1.000 bar, konnte Burckhardt Compression AG zu dieser Zeit attraktive, technisch zuverlässige Lösungen zur Handhabung dieser hohen Drücke anbieten.

Die vertikalen Sekundärkompressoren der ersten Generation hatten viel Erfolg und nahezu alle LDPE-Anlagen, die damals gemäss der ICI-Lizenz gebaut wurden, waren mit Burckhardt Compression AG Kompressoren ausgestattet. Es wurden gegen 120 Sekundärkompressoren der vertikalen Bauart hergestellt.

Um mit den stetig steigenden Anforderungen bezüglich Kapazität und Enddruck Schritt halten zu können, wurde Ende der 60iger Jahre eine neue Typenreihe auf den Markt gebracht für größere Kapazitäten und höhere Enddrücke. Der neue Kompressortyp F wurde mit acht Zylindern ausgerüstet (vier erste Stufe und vier zweite Stufe) und hatte eine Kapazität von 40.000 kg/h, einen Enddruck von 2.700 bar und eine Leistung an der Welle von 6.500 kW. Diese neue Produktreihe war von Anfang an erfolgreich. Sie genügt heute noch den Anforderungen, die unsere Kunden an solche speziellen Maschinen stellen, insbesondere hinsichtlich Verlässlichkeit und Sicherheit.

Ein weiterer Höhepunkt der Entwicklung solcher Hochdruckkompressoren wurde mit dem Bau des weltweit größten Kolbenkompressors erreicht. Der neue Typ K mit zehn Zylindern wurde von Burckhardt Compression AG Ende der 70iger Jahre erstmals ausgeliefert. Die damaligen Leistungswerte waren 114.000 kg Ethylengas pro Stunde von 250 auf 2.150 bar. Die Leistungsaufnahme des Elektromotors betrug 17.000 kW und das Gewicht der nackten Maschine ohne Elektromotor ungefähr 300 t. Die Produktion dieser Anlage mit 150.000 t LDPE pro Kompressor pro Jahr ist ebenso beeindruckend. Mittlerweile wurden auch diese Leistungsdaten bei weitem übertroffen. Der bislang größte Kompressor K12 (12 Zylinder) mit den in Abbildung 2 aufgeführten Daten wurde 2009 in Saudi-Arabien in Betrieb genommen.

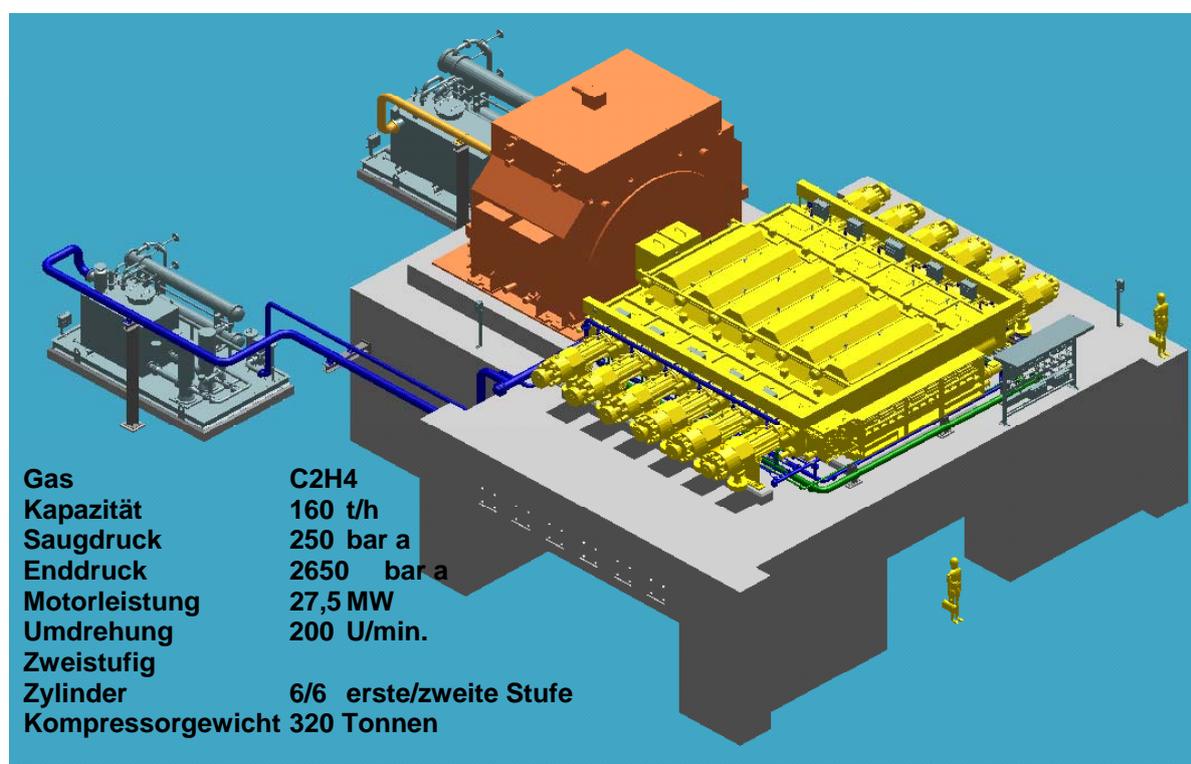


Abbildung 2: Sekundärkompressor K12.

Der größte Teil der von Burckhardt Compression AG gelieferten Sekundärkompressoren ist noch in Betrieb, obwohl manche von ihnen vor mehr als 50 Jahren in Betrieb kamen.

2. Einleitung

Der nachfolgend beschriebene Fall betrifft eine LDPE-Anlage im Mittleren Osten. Die Anlage mit einer Jahresproduktion von 300 kt/a ist mit einem K10 Kompressor von Burckhardt Compression AG bestückt. Die Aufstellung des Sekundärkompressors wurde 2003 begonnen. Nach mehreren Unterbrechungen war der Kompressor Ende 2005 für den mechanischen Probelauf bereit. Der mechanische Probelauf umfasst das Betreiben des Kompressors mittels des dafür ausgelegten Elektromotors bei einer Nenndrehzahl von 200 U/min. Die Plunger in den Hochdruckpackungen sind nicht installiert. Es findet somit keinerlei Gastransport in den Hochdruckzylindern statt. Der mechanische Probelauf dient einzig der Überprüfung des Elektromotors sowie der triebwerkseitigen Lagerstellen. Die Dauer des Probelaufes beträgt ca. zwei bis drei Stunden.

Die Inbetriebsetzung wird nach erfolgreichem mechanischen Probelauf mit dem Stickstofflauf weitergeführt. Im Stickstofflauf wird zum ersten Mal Gas verdichtet. Aufgrund der unterschiedlichen Gaseigenschaften zwischen Stickstoff und Ethylen kann nur bis 700 bar verdichtet werden.

Anschließend findet der sogenannte „Cooled Run“ statt. Er soll zeigen, ob der Kompressor bei entsprechend ausgelegtem Enddruck betrieben werden kann und ob die Gesamtanlage dicht ist. Werden diese beiden Anforderungen erfüllt, wird die Produktion gestartet.

3. Vibrationsprobleme zum ersten Mal erkannt

Während des mechanischen Probelaufs Ende 2005 wurde durch Burckhardt Compression AG festgestellt, dass stärkere Vibrationen auf dem Fundament als bei vergleichbaren Anlagen in Erscheinung treten. Mittels einfacher, tragbarer Geräte konnte dies bestätigt werden.

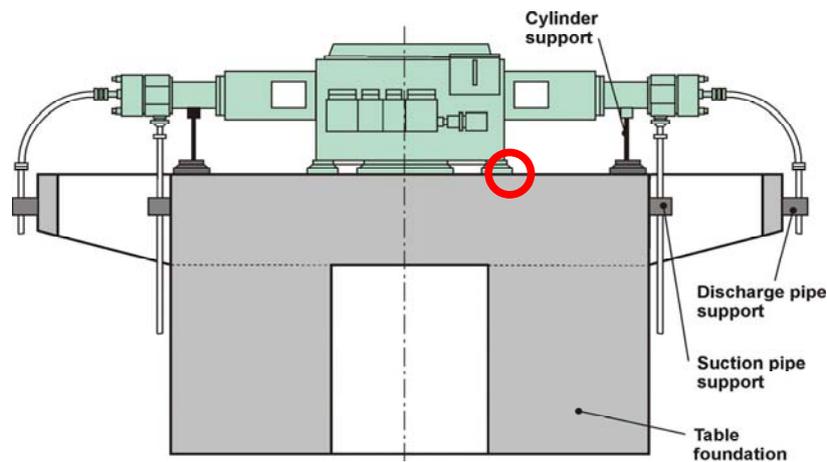


Abbildung 3: Kompressorfundament.

Eine Wiederholung des mechanischen Probelaufes und der Beizug von KÖTTER Consulting Engineers zeigte sehr deutlich das folgende Resultat:

- Erste Ordnung bei 3.3 Hz ist dominant
- Das ganze Fundament bewegt sich
- Sekundärkompressor ist richtig mit dem Fundament verbunden
- Keine Beschädigungen (Risse) am Fundament festgestellt
- Freie Kräfte und Momente gemäss Berechnung Burckhardt Compression AG geprüft
- Max. Verschiebung (Amplitude in horiz. Richtung) am Fundamenttisch 219 μm
- Max. Geschwindigkeit von 4.6 mm/s am Fundamenttisch.

Dem gegenüber stehen die folgenden Grenzwerte

- Max. Amplitude des Schwingweges am Fundament 80 μm
- Max. Schwinggeschwindigkeit am Fundament 1,7 mm/s.

Diese hohen Abweichungen zu den Vorgaben erlaubten nicht, diesen Kompressor bei Enddruck zu betreiben. Erhöhte Vibrationen sind sicherheitsrelevant und bergen die Gefahr von frühzeitigem Ausfall des Kompressors unter Umständen mit gravierenden Folgen für Mensch und Material.

4. Gegenmaßnahmen

In erster Linie wurden die Auslegung des Kompressors und des Fundamentes betrachtet. Das Terrain des Aufstellortes des Kompressors war aufgeschütteter Sand in Meeresnähe. Der Untergrund bestand also vornehmlich aus Salzwasser und Sand. Es stellte sich nach einer eingehenden Ursachenanalyse heraus (s. Abschnitt 6 „Schwingungsmessungen vor Ort“, dass im Wesentlichen die Gründung des Maschinenfundaments nicht den Anforderungen entsprach. Es wurden unterschiedliche Lösungsvarianten diskutiert, von denen zwei näher in Betracht gezogen wurden:

- Maßnahme am Fundament: Einsatz von Schlitzbetonwänden
- Bodenverbesserung mittels Betonmilchinjektion.

Da die Variante Betonmilchinjektion für solche Anwendungen nicht bekannt war, wurde die Variante Schlitzbetonwände ausgearbeitet. Das Resultat verlangte nach einer vollen Umschließung des bestehenden Kompressorfundamentes auf 50 x 50 m. Die Höhe oder versenkbare Tiefe der Schlitzwände wurde mit 30 m berechnet. Die resultierende Amplitude am Fundament beträgt 73 μm gemäß Studie von KÖTTER Consulting Engineers. Da der Aufwand für das Erstellen der Schlitzbetonwände in erster Linie aus Zeitgründen zu aufwändig erschien, entschied sich der Kunde für das Betonmilchinjektionsverfahren.

Neben den auf das Fundament und auf den Boden bezogenen Lösungen, würde sich auch eine mechanische Lösung anbieten. Mittels einer Kraft und Moment optimierten Kurbelwelle wäre es möglich, die Vibrationen ebenfalls zu verringern. Da neben der rein mechanischen Betrachtung für den Betrieb der Anlage auch pulsationsrelevante Argumente für das Design der Kurbelwelle bestanden und zudem die Lieferfrist einer Kurbelwelle zum damaligen Zeitpunkt ausserordentlich lang war, wurde auf diese Variante verzichtet.

Die Betonmilchinjektion dauerte massiv länger als erwartet und sie hatte den großen Nebeneffekt, dass in der näheren Umgebung einige andere Fundamente und Installationen auf den veränderten Untergrund reagierten. Das Justieren betroffener Installationen verursachte weiteren Verzug. Da auch Straßen und Wege betroffen waren, lief das Wasser nicht mehr in die entsprechend dafür vorgesehenen Ablaufschächte mit dem negativen Effekt, dass sich lokale Seen auf der Anlage bildeten.

5. Vorgehensweise für das Inbetriebsetzen - Grenzwerte

Für das weitere Betreiben der Anlage mussten aufgrund der nicht bekannten Ausgangslage entsprechende Grenzwerte und Maßnahmen definiert werden, so dass unter den beteiligten Parteien Klarheit herrschte, was im entsprechenden Fall des Erreichens dieser Werte geschehen würde oder musste.

Burckhardt Compression AG (BCA) nahm dazu wie folgt Stellung:

- BCA akzeptiert die über dem Grenzwert liegenden 150 µm (0-P) Amplitude am Fundament, um die Produktion starten zu können. BCA erwartet keine drastischen Konsequenzen in Bezug auf die Lebensdauer der Kompressorkomponenten.
- Der Betrieb der Anlage bei Schwingungen höher als 8 mm/s ist nicht akzeptabel.
- Der Sekundärkompressor soll mit einem adäquaten Monitoringsystem ausgerüstet werden.
- BCA empfiehlt eine umfassende Vibrationsauswertung der gesamten Verdichteranlage, um weitere Optimierungsmöglichkeiten (z.B. am Leitungssystem) zu erkennen.

Zusätzlich wurde folgender Ablauf definiert:

„Safety Analysis“ Verfahren

Das untenstehende Flussdiagramm soll das Vorgehen in der Beurteilung von Rohrleitungsschwingungen aufzeigen.

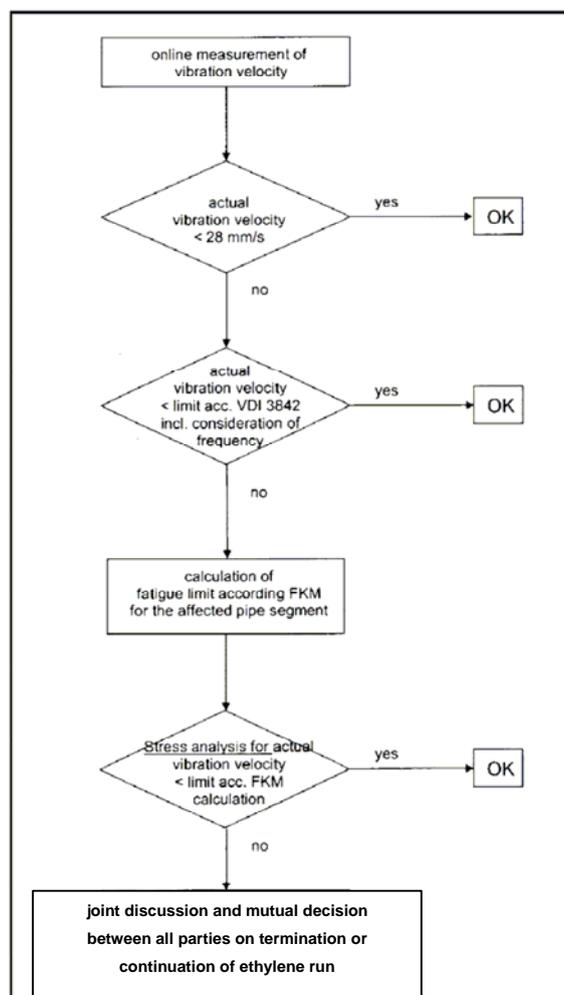


Abbildung 4: Flussdiagramm „Safety Analysis“ Verfahren.

Bei der ersten Entscheidung wird aufgrund der gemessenen Vibrationsgeschwindigkeit gemäß Burckhardt Compression AG interner Richtlinie beurteilt. Sind die Werte unterhalb von 28 mm/s RMS, sind keine weiteren Schritte nötig. Übersteigen die Werte diese Marke, wird mittels einer Frequenzanalyse der entsprechende Frequenzbereich gemäß VDI 3842 eingeschränkt und noch einmal beurteilt. Sollten sich immer noch höhere Werte zeigen, so wird unter Zuhilfenahme des bestehenden Rechenmodells die Spannungsbelastung an dem definierten und gemessenen Punkt berechnet. Unter Berücksichtigung entsprechender Sicherheitsfaktoren wird bestimmt, ob der Schwingwert zulässig ist oder nicht.

6. Schwingungsmessungen vor Ort

6.1 Ziel der Messungen

Nachdem beim ersten mechanischen Probelauf im Dezember 2005 überhöhte Schwingungen am Maschinenfundament des Sekundärkompressors festgestellt wurden, wurde zur Ursachenanalyse eine umfangreiche messtechnische Untersuchung im Frühjahr 2006 in der Anlage vor Ort durchgeführt. Fokus war hier eine detaillierte Vermessung der Bewegungen des Kompressorfundamentes während eines weiteren mechanischen Probelaufs des Kompressors.

Später, im Rahmen der „Safety Analysis“ ab Mai 2006, d. h. nach der Bodeninjektion, wurden dann Schwingungsmessungen während der Inbetriebnahmephase der Anlage vorgenommen. Diese dienten nicht nur zur Kontrolle und Überwachung der Fundament- und Maschinenschwingungen sondern auch der Rohrleitungsschwingungen an dem saug- und druckseitigen Leitungssystem des zweistufigen Sekundärkompressors.

6.2 Ursachenanalyse

6.2.1 Vorgehen

Zur Ursachenanalyse der erhöhten Fundamentalschwingungen wurden an zahlreichen ausgewählten Positionen des Fundaments die Schwinggeschwindigkeiten zeitgleich mit einem Mehrkanalmesssystem erfasst. Einen Auszug der erfassten Messpositionen zeigt die Abbildung 5. An allen Messpositionen am Fundament wurde in drei Raumrichtungen x, y und z gemessen. Um Schwachstellen der gesamten Fundamentierung, die aus Pfahlgründung, Pfahlkopfplatte, Betontisch und der Verbindung Betontisch-Fundament besteht, aufdecken zu können, wurden auch zwei Messpunkte auf der Pfahlkopfplatte (Pile Cap) ca. 2 m unter Flur vorbereitet, MP9 und MP10, siehe Abbildung 5. Darüber hinaus wurden die Maschinenschwingungen von Kompressor und elektrischem Antrieb an unterschiedlichen Positionen gemessen.

6.2.2 Messergebnisse

Die höchsten Schwinggeschwindigkeiten auf dem Fundament wurden in horizontaler y-Richtung am Messpunkt MP1 mit 4,6 mm/s bei 3,3 Hz (entspricht Drehzahl 200 1/min) festgestellt, siehe Abbildung 7. Die Messergebnisse zeigten, dass sich das gesamte Fundament mit der Pfahlkopfplatte wie ein Starrkörper verhielt und eine Kippbewegung vollführte, siehe Abbildung 8. Das bedeutete, dass die Gründung des Kompressorfundamentes keinen ausreichenden Widerstand gegen die freien Kräfte und Momente des Kompressorkurbeltriebs leisten konnte.

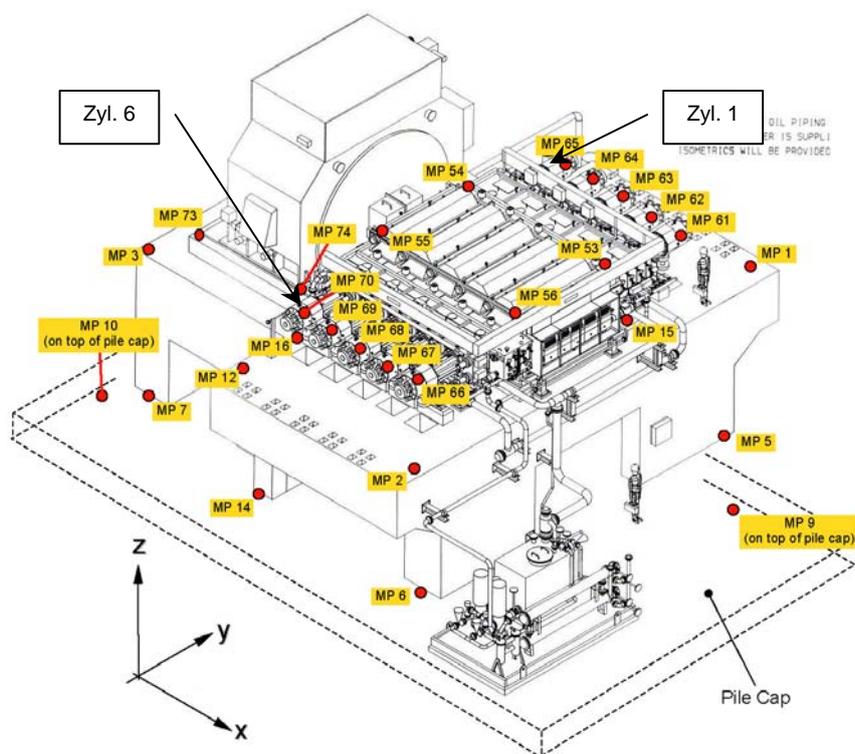


Abbildung 5: Schwingungsmesspunkte an Fundament, Sekundärkompressor und E-Motor.



Abbildung 6: Befestigung der Sensorik auf dem Betonfundament mittels angedübelten Adapterblöcken, hier Messpunkt MP1, dreiachsig (x, y, z) Erfassung der Schwinggeschwindigkeit.

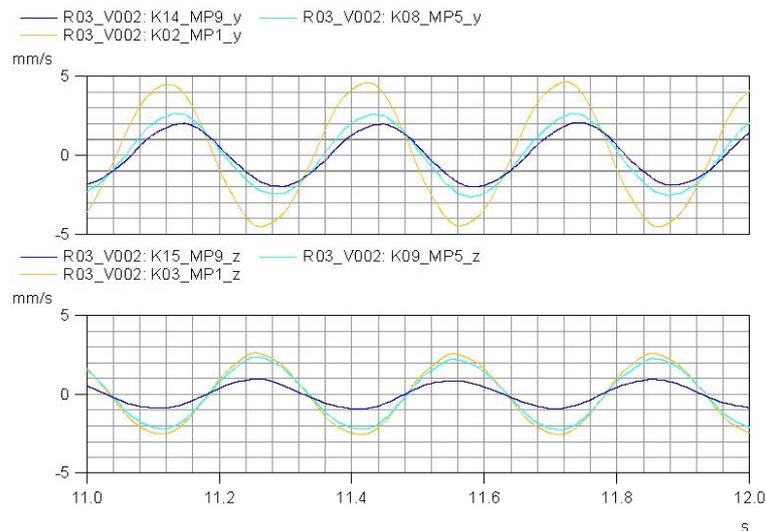


Abbildung 7: Gemessene Schwinggeschwindigkeiten in y- (oben) und z-Richtung (unten) an den Messpunkten MP9, MP5 und MP1.

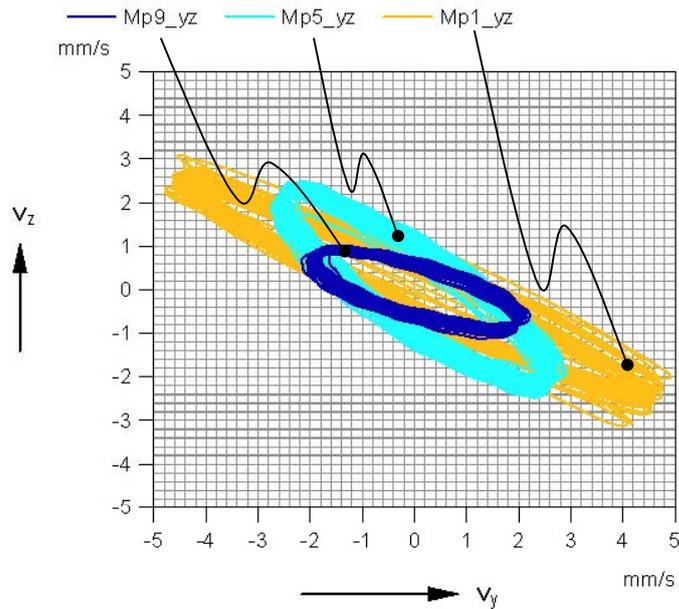


Abbildung 8: Bewegung in der y/-z-Ebene (Orbitdarstellung), gemessene Schwinggeschwindigkeiten an den Messpunkten MP9, MP5 und MP1, vgl. Abb. 7.

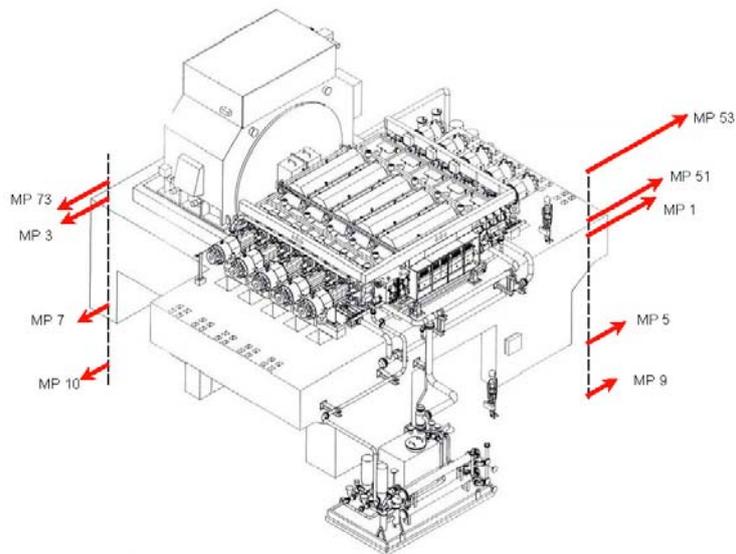


Abbildung 9: Relative Auslenkungen (Betrag) in y-Richtung über der Höhe aufgetragen. Anmerkung: Der Pfeilursprung entspricht nicht der physikalischen Messposition.

6.3 Messungen zur „Safety Analysis“

Für die Erarbeitung von Lösungen zur Ertüchtigung des Fundamentes wurde unter anderem durch KÖTTER Consulting Engineers eine Berechnungsstudie durchgeführt. Hierbei wurde die gesamte Aufstellung inklusive der Pfahlgründung in einem 3D-FEM-Modell abgebildet. Die Ergebnisse zeigten, dass ein Schwingungsniveau von 80 µm Schwingwegamplitude mit aufwändigen Tiefbaumaßnahmen erreicht werden konnte. Die umgesetzte Lösung der Bodenverbesserung durch die Low-Pressure-Injection zeigte nach dem ersten Probelauf eine Verbesserung, erreichte jedoch erwartungsgemäß nicht, wie bereits oben erwähnt, das ursprüngliche Ziel.

Im Rahmen einer Sicherheitsanalyse („Safety Analysis“) wurde das Vorgehen für die weitere Inbetriebnahme der Anlage festgelegt. Nach Akzeptanz des auf dem Fundament erreichten Schwingungsniveaus von Burckhardt Compression AG sollten die nächsten Schritte umfassend durch schwingungstechnische Messungen begleitet und überwacht werden. Daher sollten neben den Fundament- und Maschinenschwingungen insbesondere auch die Rohrleitungsschwingungen des Sekundärkompressorsystems erfasst und bewertet werden.

Teil der Sicherheitsanalyse war in einem ersten Schritt die rechnerische Kontrolle der Auswirkung des erhöhten Fundamentalschwingungsniveaus auf das Rohrleitungssystem. Das Berechnungsmodell wurde dabei mit den in der Anlage erfassten Messdaten abgeglichen.

Während der weiteren Inbetriebnahme traten am Rohrleitungssystem lokal Überschreitungen der frequenzabhängigen Orientierungswerte für zulässige Schwinggeschwindigkeiten nach VDI 3842 auf. Dies betraf vor allem die druckseitigen Rohrleitungen der ersten Stufe, siehe Beispiel in Abbildung 11. Hier wurden zum Teil Sofortmaßnahmen getroffen, wie z. B. das Einsetzen von provisorischen Abstützungen, Holzkeilen etc., die später durch entsprechende Stahlkonstruktionen ersetzt wurden, siehe Abbildungen 12 und 13. Für die Bereiche, in denen nicht ohne weiteres konstruktive Maßnahmen umgesetzt werden konnten, wurden die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten in Auslenkungen umgerechnet. Diese wurden als Eingabe für eine rechnerische Spannungskontrolle mit dem FEM-Modell des Hochdruckleitungssystem genutzt.

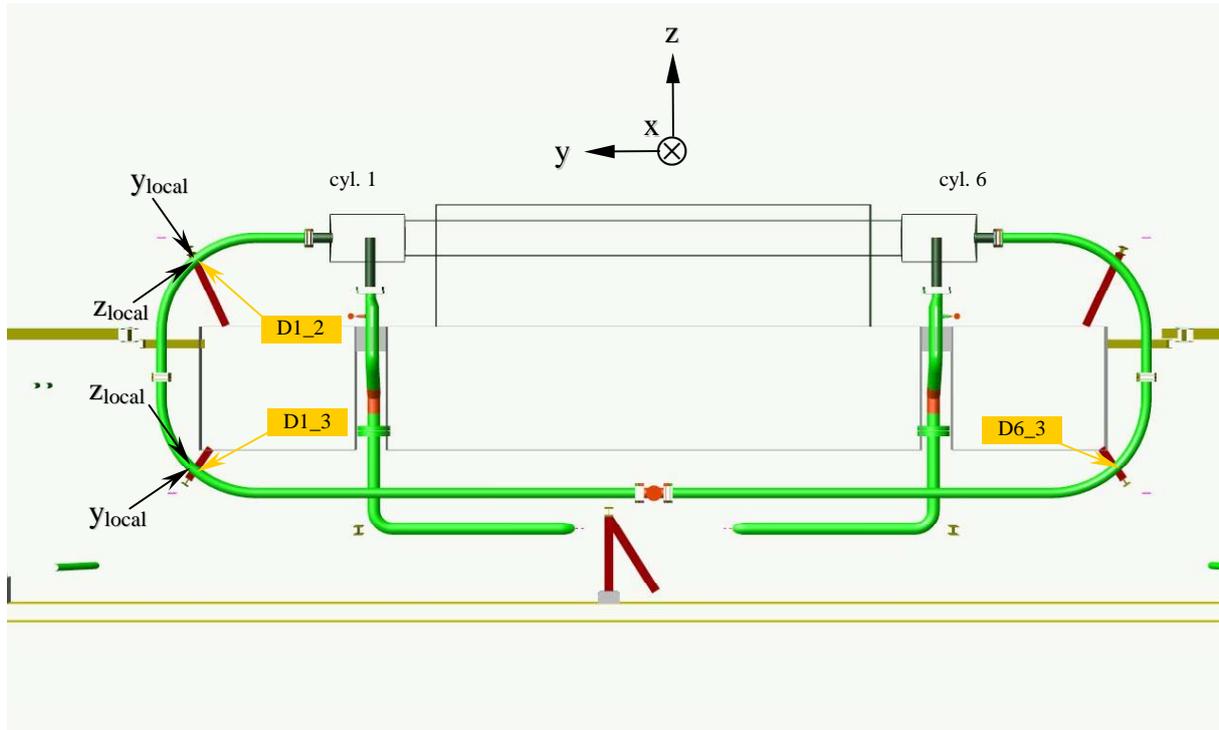


Abbildung 10: Messpositionen am verdichternahen Rohrleitungssystem des Sekundärkompressors, Schnittzeichnung durch Maschine und Fundament in der y/z-Ebene (vgl. a. Abb. 5), Leitungen der 1. Stufe Zylinder 1 und 6.

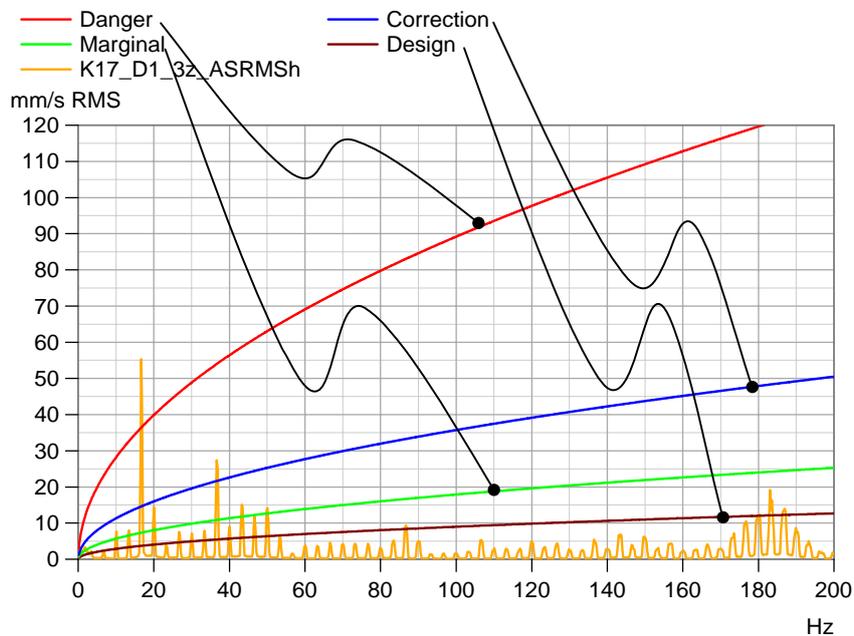


Abbildung 11: Peak-Hold-Spektrum der in z-Richtung gemessenen Schwinggeschwindigkeit an Messposition D1_3 während des Ethylen-Startup der Anlage, frequenzabhängige Orientierungswerte nach VDI Richtlinie 3842.



Abbildung 12: Messpunkt D1_3 vor Modifikation der Abstützung.

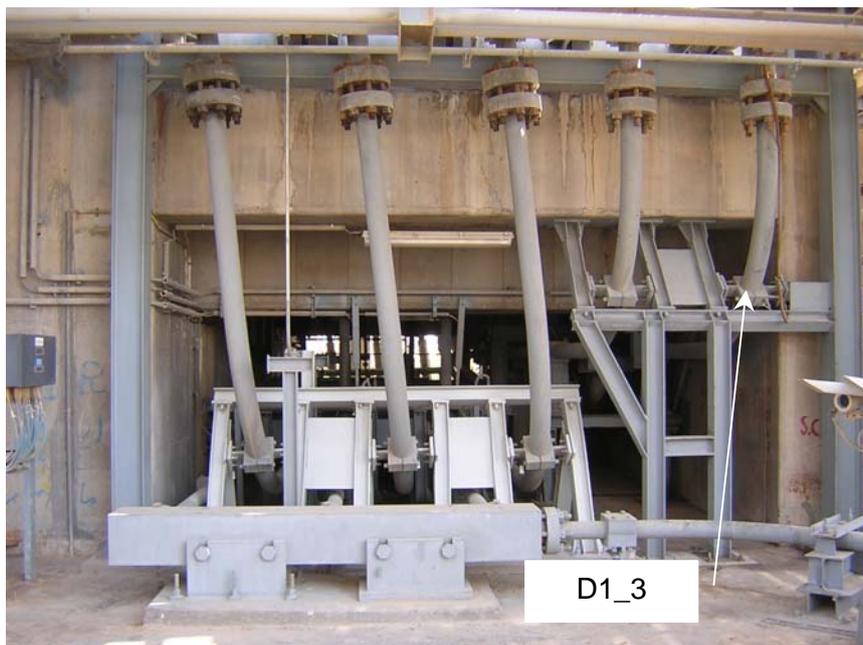


Abbildung 13: Messpunkt D1_3 mit Modifikation der Abstützung.

7. Resultat der Inbetriebsetzung

Beim ersten Mal Anfahren mit Prozessgas (Cold Run) zeigte sich ein ruhiger Lauf bis zum Erreichen des Enddrucks von 2.800 bar, welcher nach dem Starten des Kompressors bei Saugdruckbedingungen (250 bar) innerhalb von 3,5 Stunden erreicht wurde. Die Gehäusevibrationen lagen deutlich unterhalb des Grenzwertes von 8 mm/s RMS.

Maximal erreichten die Gehäusevibrationen 5,3 mm/s RMS. Auch die weitere Überprüfung der Vibrationswerte an den Zylindern zeigte keinerlei Auffälligkeiten. Die Amplituden am Fundament lagen beim Hochfahren auf Enddruck Ende 2007 bei max. 175 µm und damit nicht wesentlich höher als bei den vorangegangenen Probeläufen.

Zu prüfende und zu verbessernde Punkte waren die Modifikationen an den Leitungshalterungen wie bereits unter Abschnitt 6 beschrieben. Aufgrund dieser Modifikationen wurden zu überwachende Vibrationspunkte zum einen auf dem Fundament und zum anderen an den Hochdruckrohrleitungen bestimmt und in das installierte PROGNOST® Online-Überwachungs- und Diagnosesystem übernommen.

8. Stand heute

Ende 2009 wurden zur Kontrolle nochmals Schwingungsmessungen an der Anlage durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Fundamentalschwingungen ihr Niveau von der Inbetriebnahme beibehalten haben.

Die Maschinenschwingungen am Sekundärkompressor lagen an allen Messpunkten deutlich unterhalb des Grenzwertes von 8 mm/s RMS.

9. **Fazit**

Der Kompressor läuft unabhängig von den erhöhten Fundamentalschwingungen seit zwei Jahren zuverlässig.

Aufgrund des nicht bekannten Langzeitverhaltens der Bodeninjektionen wurden folgende Empfehlungen abgegeben:

- Mittels Online-Überwachungs- und Diagnosesystem das Betriebsverhalten des Kompressors kontinuierlich verfolgen, um entsprechende Änderungen frühzeitig feststellen zu können.
- Neben dem Kompressor sollen neuralgische Punkte am Rohrleitungssystem kontinuierlich beobachtet werden.
- Eine vertiefte Überprüfung der Rohrleitungsspannungen soll alle zwei bis drei Jahre durchgeführt werden.