

Schwingungsüberwachung an Prozessgas-Schraubenkompressoren

Dipl.-Ing. J. Wennemar, Dipl.-Ing. N. Tewes, Oberhausen

Zusammenfassung

Eine kontinuierliche Schwingungsüberwachung an Schraubenkompressoren dient der Vermeidung von Schäden sowie der frühzeitigen Erkennung von Änderungen des Maschinenzustandes. Als Messgeräte werden Aufnehmer für Gehäuse-schwingungen (in mm/s) oder Wellenschwingungen (in μm) verwendet. Beide Systeme gestatten eine Untersuchung des Frequenzspektrums der Schwingungen und damit einen Rückschluss auf die Schwingungsursache. Bei der Gehäuseschwingungsmessung werden weniger Aufnehmer benötigt, so dass geringere Kosten anfallen. Ferner ist bei Gehäuseschwingungsmessungen ein Vergleich zwischen Maschinen unterschiedlicher Größe und/oder Drehzahl leichter möglich als mit Wellenschwingungsmessungen, da die Grenzwerte der Schwinggeschwindigkeit drehzahlunabhängig und in bestimmten Grenzen auch größenunabhängig sind. Es werden Grenzwerte gemäß verschiedener internationaler Normen angegeben.

Summary

Continuous vibration measurement is used to prevent damages and for early detection of changes in the machine behaviour. For this purpose casing vibration probes which measure vibration velocity in mm/s or shaft vibration probes which measure shaft displacement in μm are used. Both measuring systems enable the user to analyze frequency spectra and to identify possible sources of vibration. The casing velocity measurement has the advantage of needing less vibration probes and thus is less expensive. A further advantage of casing velocity measurement is that a comparison between machines of different sizes and/or speed is easier, as the limits for casing velocity are the same for different speeds and within certain restrictions for different sizes. Vibration limits taken from international standards are given.

1 Einleitung

Prozessgas-Schraubenkompressoren werden mit verschiedenen Instrumenten zur Zustandsüberwachung ausgerüstet. Dazu gehört beispielsweise eine Überwachung des Saugdrucks, der Verdichtungsendtemperatur, der Schmierölversorgung und des Schwingungszustandes. Der genaue Umfang der Instrumentierung wird je nach den Erfordernissen der speziellen Maschine und den individuellen Kundenwünschen festgelegt.

Die Schwingungsüberwachung eines Schraubenkompressors kann zu folgenden Zwecken durchgeführt werden:

- Bereitstellung von Abnahmekriterien
- Alarmierung und Abschaltung im Betrieb zur Vermeidung von Maschinenschäden
- Informationen zur Diagnose laufender Maschinen

Bild 1 zeigt eine typische einstufige Prozessgas-Schraubenkompressoranlage.

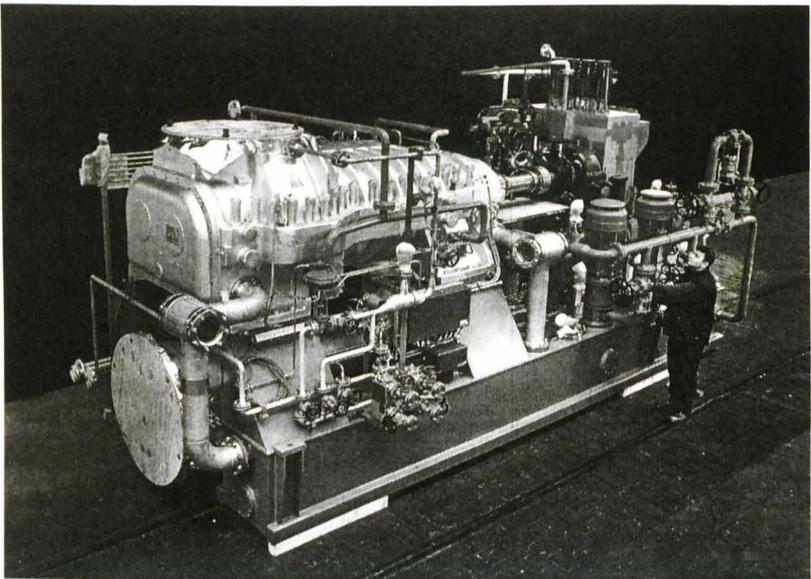


Bild 1: Einstufige Prozessgas-Schraubenkompressoranlage

Fig. 1: Single stage process-gas screw compressor unit

2 Besonderheiten des Schraubenkompressors

Im Vergleich zu anderen Kompressorarten weisen Schraubenkompressoren verschiedene Besonderheiten im Hinblick auf ihr Schwingungsverhalten auf. Verglichen mit Kolbenkompressoren haben Schraubenkompressoren wegen ihrer rein rotierenden Massen prinzipbedingt niedrigere Schwingungswerte. Im Vergleich zu Turbo- kompressoren sollte berücksichtigt werden, dass Schraubenkompressoren immer mit Drehzahlen unterhalb der 1. biegekritischen Drehzahl betrieben werden. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass die Schraubenkompressorläufer nicht nur durch Unwuchten sondern auch durch die pulsierenden Gaskräfte zu Schwingungen angeregt werden. Bild 2 zeigt beispielhaft den Vergleich der auf ein Rotorlager einwirkenden Kräfte, die aus den wechselnden Gaskräften bzw. aus Unwuchten gemäß verschiedener Auswuchtgüten resultieren. Die pulsierenden Gaskräfte sind demnach weitaus größer als die Unwuchtkräfte. Ein erhöhter Schwingungsmesswert muss also nicht zwingend durch einen schlechten Auswuchtzustand hervorgerufen werden. Zur Beurteilung des Laufzeugs sollten daher Schwingungen oberhalb der doppelten Hauptrotordrehfrequenz ausgefiltert werden. Dadurch werden Schwingungen mit der Hauptrotordrehzahl noch sicher erfasst, aber Schwingungen mit Ausstoßfrequenz sicher ausgefiltert.

3 Schwingungsmesssysteme

3.1 Gehäuseschwingungsmessung

Diese Messung ist für Maschinen mit Gleitlagern oder Wälzlagern geeignet. Es handelt sich um eine indirekte Messung, da die Bewegung der Rotoren in ihren Auswirkungen über die Lager auf die Gehäusestruktur betrachtet wird.

Zur Messung der Gehäuseschwingungen werden entweder die Messung per Beschleunigungsaufnehmer (Accelerometer) und Transformation des Messsignals in Schwinggeschwindigkeit oder die direkte Messung der Schwinggeschwindigkeit eingesetzt.

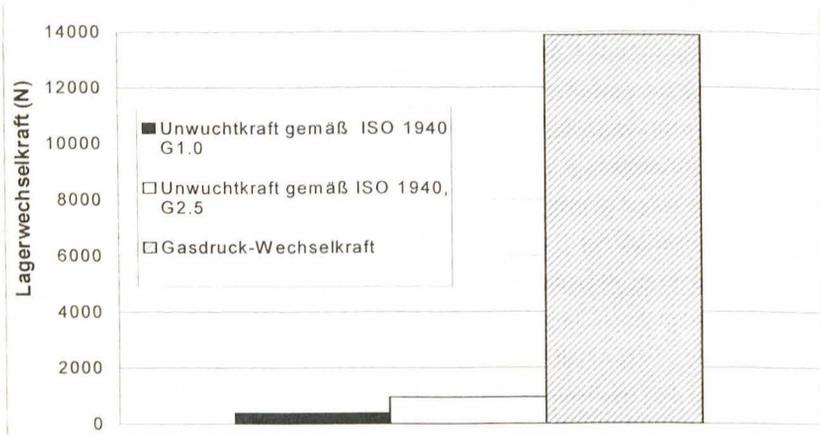


Bild 2: Vergleich der wechselnden Kräfte an einem Schraubenkompressorlager für einen Schraubenkompressor mit 510 mm Rotordurchmesser bei max. Umfangsgeschwindigkeit, Saugdruck 1 bar und Enddruck 4 bar

Fig. 2: Comparison of pulsating forces on a screw compressor bearing for a screw-compressor with 510 mm rotor diameter at max. tip speed, suction pressure 1 bar and discharge pressure 4 bar

Zur Bewertung des mechanischen Laufverhaltens ist es bei der Gehäuseschwingungsmessung notwendig, die bei Schraubenmaschinen unter Umständen sehr intensiven Gaspulsationen mittels eines Tiefpassfilters für das Monitoring auszublenden, da der Frequenzbereich der Messaufnehmer nicht nur den Drehfrequenzbereich der Rotoren abdeckt. Falls das Signal nicht gefiltert wird, besteht die Möglichkeit, dass Anregungen der Struktur z.B. durch Gaskräfte (Pulsationen) das Messergebnis beeinflussen und ein falsches Bild des Laufverhaltens ergeben.

Nachfolgend wird ein Profil mit 4 Hauptrotorzähnen und 6 Nebenrotorzähnen vorausgesetzt. Dann liegt die 1. harmonische Frequenz der Gaspulsationen (=Ausstoßfrequenz) bei der 4-fachen Hauptrotordrehfrequenz. Häufig tritt auch bei der 2. und sogar 3. Harmonischen der Ausstoßfrequenz (= 8- bzw. 12-fache Hauptrotordrehfrequenz) noch eine hohe Amplitude der Schwingschnelle auf. Beurteilt und

entsprechend gefiltert wird der Bereich von der halben Nebenläufer- bis zur 2-fachen Hauptläuferdrehfrequenz.

Bei drehzahlvariablen Kompressoren ist der zu filternde Bereich schwieriger festzulegen, da für einstufige Anlagen die Ausstoßfrequenz ($=4 \cdot \text{Hauptrotordrehzahl}$) bei Drehzahlabenkung auf 50% gerade die obere Filtergrenzfrequenz ($=2 \cdot \text{Nenn-drehzahl}$) erreicht. Bei zweistufigen Anlagen treten diese Frequenzüberschneidungen schon bei höheren Teillastdrehzahlen auf, da meist die Ausstoßfrequenzen der ND-Stufe deutlich niedriger als die der HD-Stufe sind. Man wird hier mit Kompromissen leben müssen.

Für die Messung der Gehäuseschwingungen werden folgende Aufnehmer benötigt:
 Optimal: Je ein Aufnehmer in horizontaler und vertikaler Richtung in der saug- bzw. druckseitigen Lagerebene der Maschine und ein axialer Aufnehmer, d.h. in Summe 5 Aufnehmer.

Minimal: ein Aufnehmer pro Maschine an einer Stelle mit typischerweise hohen Schwingungen.

Die Bilder 3 und 4 zeigen die Anordnung der Aufnehmer am Gehäuse.

Im Vergleich zu Wellenschwingungsmessungen sind Gehäuseschwingungsmessungen billiger, da man mit weniger Messausrüstung noch eine sinnvolle Überwachung durchführen kann. Die Vergleichbarkeit verschiedener Maschinen-größen einer Gattung ist besser als bei Wellenschwingungsmessungen, da die Grenzwerte für die Schwinggeschwindigkeit i. a. größenunabhängig sind. Gehäuseschwingungsmessungen sind verwendbar für Maschinen mit Gleitlagern oder Wälzlagern, jedoch sind für wälzgelagerte Maschinen wegen der steiferen Ankopplung der Rotoren ans Gehäuse im allgemeinen höhere Schwingungswerte zu erwarten als bei gleitgelagerten Maschinen. Da die Messaufnehmer für Gehäuseschwingungsmessungen an glatten Flächen außen am Gehäuse angebracht werden, können diese meist auch an bestehenden Maschinen problemlos nachgerüstet werden. Auch die Messung mit Handgeräten, die per Magnethalterung an verschiedenen Gehäusestellen platziert werden können, ist möglich.

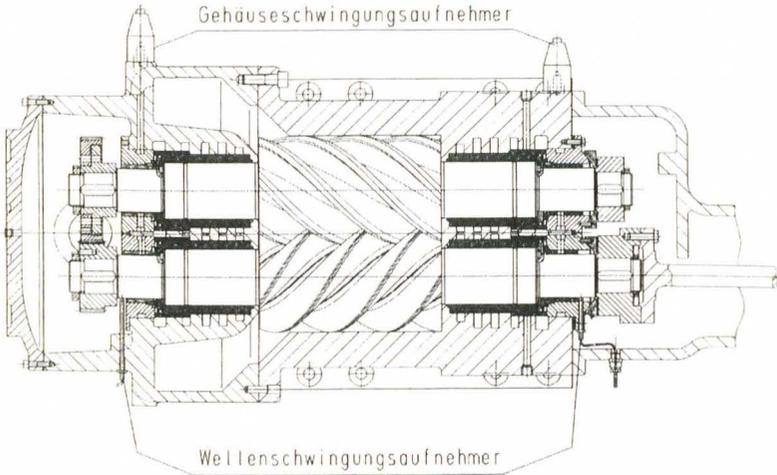


Bild 3: Anbringung von Gehäuseschwingungsaufnehmern bzw. Wellenschwingungsaufnehmern

Fig. 3: Mounting of casing vibration probes and shaft vibration probes

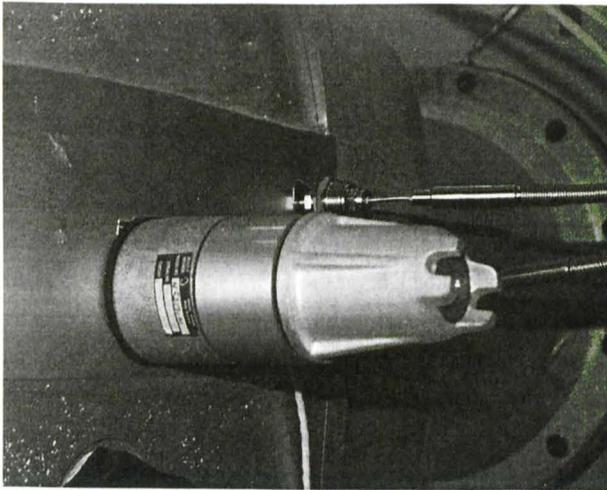


Bild 4: Anbringung von Gehäuseschwingungsaufnehmern

Fig. 4: Mounting of casing vibration probes

3.2 Wellenschwingungsmessung

Diese Messung ist nur bei gleitgelagerten Maschinen sinnvoll. Dabei wird der Abstand zwischen einer fest im Gehäuse verschraubten Aufnehmerspitze und der Wellenoberfläche gemessen. Die Messung erfolgt meist berührungslos mittels Wirbelstromsonde. Daher werden sowohl an die Güte der Wellenoberfläche und des Wellenrundlaufs als auch an den maximal zulässigen Restmagnetismus im Bereich der Messstelle erhöhte Anforderungen gestellt. Wegen Abweichungen von der ideal runden und magnetisch isotropen Welle wird ein maximaler sogenannter „run-out“ zugelassen, der ein Fehlersignal darstellt. Der run-out wird bei langsamer Drehung der Welle ermittelt. Dabei sollten keine Wellenschwingungen auftreten. Wenn bei langsamer Wellendrehzahl dennoch an den Wellenschwingungsaufnehmern ein Signal gemessen wird, ist das ein Hinweis auf geometrische oder magnetische „Unrundheiten“ der Welle. Dieses Signal darf bei der Betriebsmessung vektoriell von dem gemessenen Wert subtrahiert werden, da es keine Schwingungsamplitude sondern eine Messverfälschung darstellt.

Die Messstelle liegt normalerweise dicht neben den Gleitlagern (Bild 3). Da die Bewegungsrichtung des Wellenmittelpunktes im Lager nicht a priori bekannt ist, müssen pro Messebene 2 senkrecht zueinander stehende Aufnehmer eingesetzt werden. Der gemessene Schwingweg der beiden Aufnehmer kann stark voneinander abweichen. Die Rekonstruktion des wirklichen Weges des Wellenmittelpunktes (Orbit) und die jeweilige Winkellage des Rotors kann nur unter Zuhilfenahme der Phaseninformation aus dem Key Phasor durch vektorielle Addition der Einzelschwingwege erfolgen. Die Beurteilung der Messergebnisse ist in /3/ erläutert.

Niederfrequente Schwingungen der Gesamtmaschine auf ihrem Fundament werden im Gegensatz zur Gehäuseschwingungsmessung bei der Wellenschwingungsmessung nicht mit erfasst. Dies hat den Vorteil, dass die Beurteilung des Laufzustandes nicht durch Überlagerung von Fremdschwingungen verfälscht wird. Auch bei der Wellenschwingungsmessung kann mittels einer Fourier-Analyse ein Frequenzspektrum der Schwingungen dargestellt werden, das einen Rückschluss auf die Schwingungsursache ermöglicht.

Für die Wellenschwingungsmessung werden folgende Aufnehmer benötigt:

2 Wellenschwingungsaufnehmer (Proximity Probe) je Lager, 1 Key Phasor je Welle.

Vorteil der Wellenschwingungsmessung: Sie liefert direkte Information über die Bewegung des Wellenmittelpunktes im Lager. Sie ist besonders nützlich bei überkritisch laufenden Maschinen.

4 Einsatzzweck der Schwingungsüberwachung

4.1 Bereitstellung von Abnahmekriterien

Im allgemeinen ist die Einhaltung vordefinierter Schwingungsgrenzwerte auf dem Prüfstand bzw. bei der Inbetriebnahme des Kompressors in der Gesamtanlage eine Voraussetzung für die Freigabe des Kompressors durch den Hersteller und die Abnahme durch den Kunden. Diese Grenzwerte werden entweder aus Herstellerstandards, aus allgemeinen Standards oder aus speziellen Kundenstandards für die jeweilige Maschinengattung entnommen.

4.2 Alarmierung und Abschaltung im Betrieb zur Vermeidung von Maschinenschäden

Dies ist der bekannteste Zweck der Schwingungsüberwachung. Es wird ein einzelner Wert (gefiltert auf Drehfrequenz oder ungefilterter Summenwert) an das Auswertegerät geliefert und mit einem voreingestellten Grenzwert verglichen. Eine Analyse der Schwingungsursache ist hiermit nicht möglich, da nur ein Wert der Schwinggröße innerhalb des gemessenen Frequenzbereiches angezeigt wird. Meist erfolgt vor einer Abschaltung ein Alarm, der dem Bedienungspersonal bei rechtzeitiger Alarmierung Gelegenheit zu Korrekturmaßnahmen gibt. Falls diese nicht zu einer Reduzierung des Schwingungsniveaus führen oder der Anstieg des Schwingungsniveaus zu schnell erfolgt, wird die Maschine bei Überschreiten voreingestellter Grenzwerte automatisch abgeschaltet. Je nach Ursache des Schwingungsanstiegs können damit Maschinenschäden verhindert oder der Schadensumfang minimiert werden. Die Alarmierung kann direkt verdrahtet („hardwired“) oder per elektronischer Steuerung

erfolgen. Meist wird die Abschaltung „hardwired“ sein, da diese Technik i.a. schneller schaltet als eine elektronische Steuerung, die u.U. wegen langsamer Abtastraten mehrere Sekunden Verzögerung beinhaltet.

Beispiele für Problemfälle, die zu einem erhöhten Schwingungsniveau führen können, sind:

- Ausrichtfehler
- Unwuchten
- Lagerschäden
- Rotoranlauf

4.3 Informationen zur Diagnose laufender Maschinen

Die unter 4.2 aufgeführten Überwachungen der Summenwerte haben den Nachteil, dass sie fast nie eine Aussage über die Ursache für den Schwingungsanstieg ermöglichen. Das wichtigste Hilfsmittel zur Ursachenfindung ist die Analyse der Schwingungen im Frequenzspektrum. Die kommerziell erhältlichen Geräte ermöglichen eine Fourier-Transformation, mit deren Hilfe direkt ein Frequenzspektrum erstellt wird. Bild 5 zeigt ein Beispiel für ein solches Frequenzspektrum, in dem einzelne Amplitudenspitzen bei bestimmten Frequenzen besonders auffallen. Diese Frequenzen sind üblicherweise die Rotordrehfrequenzen und die Ausstoßfrequenz sowie deren Harmonische. Je nach Aufbau der Anlage kann auch die Motordrehfrequenz am Kompressorgehäuse gemessen werden.

Für drehzahlvariable Maschinen können Frequenzspektren über dem Drehzahlbereich aufgenommen werden. Eine Reihung von Frequenzspektren, die bei verschiedenen Drehzahlen ermittelt wurden, ist in Bild 6 im „Wasserfall-Diagramm“ dargestellt. Hierbei werden die gemessenen Schwingungsamplituden über der jeweils gemessenen Drehzahl („Hochachse“) und der betrachteten Frequenz („Rechtsachse“) dargestellt.

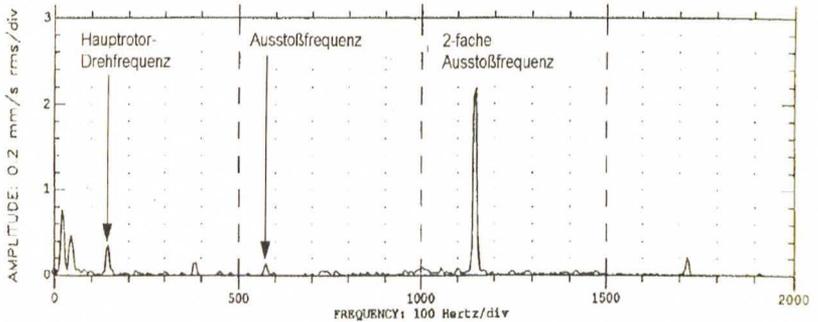


Bild 5: Beispiel für ein Frequenzspektrum der Gehäuseschwingungen
 Fig. 5: Example of a frequency spectrum of casing vibrations

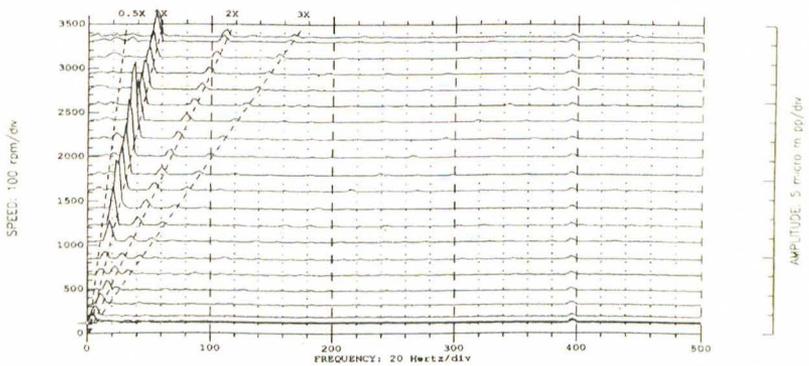


Bild 6: Beispiel für ein „Wasserfall-Diagramm“
 Fig. 6: Example of a „cascade diagram“

Oft zeigt in einem Maschinenstrang mit verschiedenen Drehzahlen ein Vergleich der hervorstechenden Frequenzen mit den jeweiligen Rotordrehzahlen das verursachende Bauteil auf (z.B. kann bei 3 verschiedenen Drehzahlen für Motor, Getriebe, Haupt- und Nebenrotor der Kompressor als Verursacher von Schwingungen mit Motorfrequenz ausgeschlossen werden).

Die in 4.2 genannten Problemfälle können durch Frequenzanalyse identifiziert werden:

- **Ausrichtfehler:** diese äußern sich in erhöhten Schwingungen mit zweifacher Rotordrehzahl.
- **Unwucht:** führt zu permanent erhöhtem Schwingungsniveau, das mit der Drehzahl stark ansteigt. Im Frequenzspektrum ist das Schwingungsniveau bei einfacher Rotordrehzahl stark erhöht. Meist bleibt Zeit, die Maschine kontrolliert abzuschalten, ohne dass es zu einem Schaden kommt.
- **Lagerschaden:** da dieser meist langsam eintritt, bleibt für das Betriebspersonal Zeit zum Reagieren. Meist kann die Maschine noch eine Zeitlang betrieben werden, bis der Prozess ein gezieltes Abschalten des Kompressors zulässt.
- **Thermischer Anlauf:** führt meist wegen starken Anstieg des Schwingungsniveaus zum sofortigen Abschalten. Je nach Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs kann der Rotorschaden limitiert werden.

Die Diagnose kann mittels tragbarer Auswertegeräte vor Ort oder auch per Fernüberwachung erfolgen. Die Fernüberwachung wird in [77] erläutert.

5 Beurteilung der Messwerte und Diskussion der Grenzen

Grundsätzlich bestehen für die Beurteilung von Schwingwerten 2 Möglichkeiten:

- Vergleich mit Messwerten derselben Maschine aus Vorperioden (z.B. Neubauzustand) und Untersuchung auf signifikante Änderungen
- Vergleich mit festen Grenzwerten

5.1 Vergleich mit Messwerten aus Vorperioden

Diese Möglichkeit wird leider selten angewandt. Eine Maschine, die einen längeren Zeitraum problemlos in Betrieb war, kann unabhängig von ihrem absoluten Schwingungsniveau als unkritisch angesehen werden, solange dieses Schwingungsniveau sich nicht wesentlich ändert. Eine Alarmierung sollte dann erfolgen, wenn dieses empirisch ermittelte Schwingungsniveau bei unveränderten Betriebsbedingungen deutlich ansteigt.

5.2 Vergleich mit festen Grenzwerten

5.2.1 Grenzwerte nach API 619 für Gehäuseschwingungen und Wellenschwingungen

Allgemein anerkannte Grenzwerte für Gehäuseschwingungsmessungen und Wellenschwingungsmessungen von Schraubenkompressoren sind in /1/ und /2/ gegeben. Danach ist der Grenzwert für Gehäuseschwingungen 5 mm/s RMS (Root Mean Square) im gesamten Frequenzbereich und 2.8 mm/s RMS bei einzelnen Frequenzen d.h. insbesondere bei der Drehfrequenz.

Nach /1/ ergibt sich für Wellenschwingungen der Grenzwert als Minimum von $63 \mu\text{m}$ oder dem Wert aus

$$A = \sqrt{\frac{1.03 \cdot 10^7}{n}}$$

A = Grenzwert der ungefilterten doppelten Amplitude in μm

n = Wellendrehzahl in 1/min

In /2/ wird der Festwert $63 \mu\text{m}$ durch 50% des minimalen Lagerspiels ersetzt.

Bild 7 zeigt die zulässige Wellenschwingung über der Drehzahl.

5.2.2 Grenzwerte nach ISO 7919 bzw. VDI 2059 für Wellenschwingungen

Die internationale Norm ISO 7919 Teil 1 und 3 /3/ entspricht im wesentlichen der VDI Richtlinie 2059 Blatt 1 und 3 /4/.

DIN ISO 7919 /3/ liefert Grenzwerte der Spitze-Spitze-Wellenschwingung $S_{(p-p)}$ für sogenannte Bewertungszonen A bis D. Die vereinfachte Definition der Zonen ist:

- Zone A: Schwingungen von neu in Betrieb gesetzten Maschinen liegen gewöhnlich in dieser Zone.
- Zone B: Maschinen mit Schwingungen innerhalb Zone B können im Dauerbetrieb laufen.
- Zone C: Dieses Schwingungsniveau ist nicht für Dauerbetrieb geeignet. Für begrenzte Zeit kann die Maschine weiterlaufen.
- Zone D: Dieses Schwingungsniveau kann die Maschine schädigen.

Die Grenzwerte für die Bewertungszonen sind durch folgende Formeln gegeben:

$$\text{Zonengrenze A/B: } S_{(p-p)} = 4800/\sqrt{n} \quad \text{in } \mu\text{m}$$

$$\text{Zonengrenze B/C: } S_{(p-p)} = 9000/\sqrt{n} \quad \text{in } \mu\text{m}$$

$$\text{Zonengrenze C/D: } S_{(p-p)} = 13200/\sqrt{n} \quad \text{in } \mu\text{m}$$

mit $S_{(p-p)}$: Spitze-Spitze Wert des Schwingweges
 n : Rotordrehzahl in 1/min

Bild 7 zeigt einen Vergleich der Grenzwerte für Wellenschwingungen nach ISO 7919 und API 619.

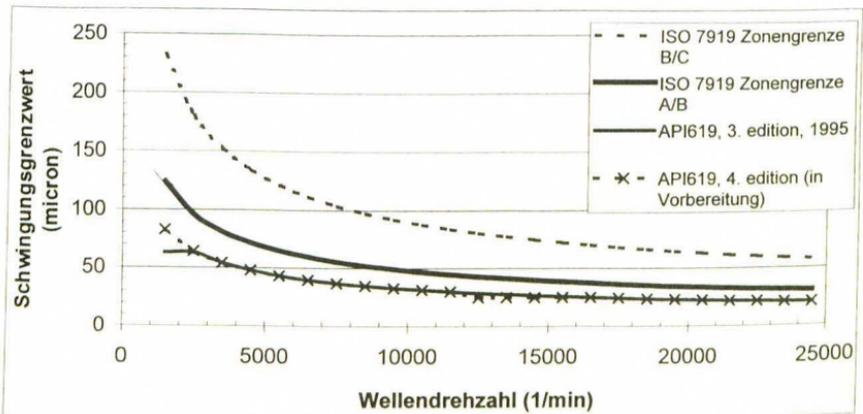


Bild 7: Grenzwerte der Wellenschwingung nach ISO 7919 und API 619

Fig. 7: Limits of shaft vibration according to ISO 7919 and API 619

5.2.3 Grenzwerte nach ISO 10816 für Gehäuseschwingungen

ISO 10816 /5/ erläutert die Gehäuseschwingungsmessungen und zeigt Grenzwerte für verschiedene Maschinengattungen auf. Schraubenkompressoren werden aber in ISO 10816 Teil 3 explizit ausgeschlossen. Diese Norm kann daher nur zur allgemeinen Information über Gehäuseschwingungsmessungen dienen.

4.2.4 Vergleich der verschiedenen Standards

Die jeweiligen Teile 1 der ISO 7919 /3/ bzw. der ISO 10816 /5/ erläutern die Messverfahren und geben allgemeine Informationen. Wellenschwingungsgrenzwerte für Schraubenkompressoren findet man in ISO 7919 Teil 3; jedoch wird diese Norm für Schraubenkompressoren kaum verwendet. Obwohl ISO 10816 Teil 3 für industrielle Maschinen mit einer Leistung > 15 kW und Drehzahlen zwischen 120 1/min und 15000 1/min spezifiziert ist, werden darin Schraubenkompressoren vom Anwendungsbereich der angegebenen Grenzwerte ausgeschlossen.

Die frühere VDI-Richtlinie 2056 gab wertvolle Hinweise, ist aber leider ersatzlos zurückgezogen.

Der für Prozessgas-Schraubenkompressoren weltweit angewandte und generell akzeptierte Standard ist API 619 (/1/ bzw. /2/). Von API und ISO wird angestrebt, die voraussichtlich 2003 erscheinende 4. Ausgabe der API 619 unverändert als ISO 10440 zu übernehmen. Damit liegen von Herstellern und Betreibern international anerkannte Standards für Schwingungsüberwachung an Schraubenkompressoren vor.

5 Literatur

- /1/ API Standard 619 Rotary Type Positive Displacement Compressors for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services,
3. edition 1995

- /2/ API Standard 619 Rotary Type Positive Displacement Compressors for Petroleum and Natural Gas Industries
4. edition in Vorbereitung, Veröffentlichung geplant 2003

- /3/ ISO 7919 Mechanical vibration of non-reciprocating machines – Measurements on rotating shafts and evaluation criteria
Part 1: General guidelines
Part 3: Coupled industrial machines

- /4/ VDI 2059 Wellenschwingungen von Turbosätzen
Blatt 1: Grundlagen für die Messung und Beurteilung
Blatt 3: Wellenschwingungen von Industrieturbosätzen

- /5/ ISO 10816 Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts
Part 1: General guidelines
Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15000 r/min when measured in situ

- /6/ VDI 2056 Beurteilungsmaßstäbe für mechanische Schwingungen von Maschinen (Die Richtlinie ist ersatzlos zurückgezogen.)

- /7/ Vollservice für Schraubenkompressoranlagen mittels Telemonitoring
Gödde Ralf, Tagungsband VDI-Tagung Schraubenmaschinen 2002