

## **Neue VDI-Richtlinie 3836 „Messung und Beurteilung mechanischer Schwingungen von Schraubenverdichtern und Rootsgebläsen“**

Dipl.-Ing. **K. Geyer**, CompAir Drucklufttechnik GmbH, Simmern

### **Kurzfassung**

Der Anstoß zu dieser VDI-Richtlinie kam aus der Tagung „Schraubenmaschinen 2002“. Im Workshop „Schwingungsrichtlinie“ wurden dort erste Anforderungen und Inhalte gesammelt und diskutiert.

Die Richtlinie VDI 3836 ist das Ergebnis einer Gemeinschaftsarbeit des Ausschusses A322/C22 „Messung und Beurteilung der Schwingungen von Schraubenverdichtern“, der seine Arbeit im März 2003 unter der Obmannschaft von Dr.-Ing. T. Schwirzer, Berlin aufnahm.

Im März 2005 ist die Richtlinie als „Gründruck“ erschienen, mit der Herausgabe des „Weißdruckes“ ist im Herbst 2006 zu rechnen.

Die in der Richtlinie VDI 3836 behandelten Verdichter sind als Folge der zyklischen Arbeitsweise der rotierenden Drehkolben in ihrem Schwingungsverhalten zwischen den Hubkolben- und Turboverdichtern einzuordnen. Sie verfügen nicht über oszillierende Massen, erzeugen aber einen mit der Ausstoßfrequenz pulsierenden Ausschub des Arbeitsfluids.

Die Inhalte der o.g. Richtlinie werden vorgestellt, die Messung und Bewertung der Schwingungen von 4 Gruppen von Schraubenverdichtern und Rootsgebläsen gezeigt und an Hand ausgewählter Praxisbeispiele erläutert.

### **Abstract**

This guideline VDI 3836 was initiated during the conference „Schraubenmaschinen 2002“, where in a workshop first requirements on a vibration standard for screw-type compressors were collected.

The guideline VDI 3836 is the outcome of collaborative work carried out by Committee A322/C22 „Measurement and evaluation of the vibration of screw compressors“ in the VDI/NALS Vibration Department.

Due to the cyclic mode of operation of the rotating piston, the screw-type compressors covered by guideline VDI 3836 from vibration point of view should be classified between recipro-

cating piston compressors and turbo compressors. Although these compressors have no oscillating mass forces, the working fluid is delivered with pulsations corresponding to the output frequency.

The content of the new standard „Measurement and evaluation of mechanical vibration of screw-type compressors and Roots blowers“ is shown and illustrated on examples.

## **1. Einleitung**

Industrielle Anwendungen von Schraubenmaschinen sind ein fester Bestandteil der seit 1984 regelmäßig an der Universität Dortmund durchgeführten Schraubenmaschinentagungen.

So ist auch das Schwingungsverhalten der Schraubenmaschinen immer wieder in Vorträgen behandelt worden.

Tatsächlich bestand aber eine Lücke bei der Bewertung der Schwingungen von Schraubenmaschinen im nationalen und internationalen Regelwerk. Auf diesen Punkt wurde bei der Schraubenmaschinentagung 2002 Bezug genommen.

Ein Überblick über vorhandene Normen und Richtlinien wurde in [1] gegeben. Neben einer Parallelsektion mit drei weiteren Vorträgen zum Themenbereich Schwingungen wurde ein Workshop „Schwingungsrichtlinie“ durchgeführt und dort erste Anforderungen und Inhalte einer solchen Schwingungsrichtlinie für Schraubenverdichter gesammelt und diskutiert.

Damit war die Schraubenmaschinentagung 2002 praktisch zur Geburtsstunde der nun vorliegenden VDI-Richtlinie 3836 geworden.

## **2. Richtlinienausschuss A322/C22**

Über die VDI Gesellschaft Energietechnik (GET) wurde ein Antrag an den Fachbeirat der VDI Gesellschaft Entwicklung, Konstruktion und Vertrieb (EKV) gestellt, die Arbeit zur Erstellung einer Schwingungsrichtlinie für Schraubenmaschinen aufzunehmen.

Dem wurde zugestimmt, und der Ausschuß VDI/NALS A322/C22 begann seine Arbeit im März 2003 unter der Obmannschaft von Dr.-Ing. Thomas Schwirzer.

An der Erstellung der Richtlinie VDI 3836 haben außerdem mitgewirkt:

Dr.-Ing. Ulrich Dämgen

Dipl.-Ing. Dieter Franke

Dipl.-Ing. Klaus Geyer

Dr.-Ing. Ralf Gödde

Dipl.-Ing. Dieter Hüttermann

Dipl.-Ing. Jürgen Kockel

Die VDI-Richtlinie 3836 stellt eine Ergänzung zur DIN ISO 10816-3 (bzw. DIN ISO 10816-3:1998-12) dar. Dort sind Drehkolbenverdichter (z.B. Schraubenverdichter) explizit von der Bewertung ausgenommen [2].

### 3. Schwingungsverhalten von Schraubenverdichtern

Die in der Richtlinie VDI 3836 behandelten Verdichter sind als Folge der zyklischen Arbeitsweise der rotierenden Drehkolben in ihrem Schwingungsverhalten zwischen den Hubkolben- und Turboverdichtern einzuordnen. Sie verfügen nicht über oszillierende Massen, erzeugen aber einen mit der Ausstoßfrequenz pulsierenden Ausschub des Arbeitsfluids.

Während bei den trocken laufenden Verdichtern durch das Gleichlaufgetriebe die Haupt- und Nebenläufer berührungsfrei verdichten, befinden sich bei den ölüberfluteten Verdichtern Haupt- und Nebenläufer im Zahneingriff. Das hat die schwingungstechnische Besonderheit zur Folge, dass bei den ölüberfluteten Verdichtern die Zahneingriffsfrequenz der Rotoren den gleichen Zahlenwert hat wie die Ausstoßfrequenz. Diese Frequenz (Zahneingriffsfrequenz der Rotoren bzw. Ausstoßfrequenz) und ihre Harmonischen spielen bei der Schwingungsanregung dieser Maschinen eine entscheidende Rolle. [3]

Die Ausstoßfrequenz bzw. die Zahneingriffsfrequenz der Rotoren kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$f_z = z_{HL} \cdot f_{n,HL} = z_{NL} \cdot f_{n,NL} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

mit

$z$  – Zähnezahl

Index HL – Hauptläufer

Index NL – Nebenläufer

$f_n$  – Drehfrequenz [Hz]

Die Drehfrequenzen von Haupt- und Nebenläufer und ihre Harmonischen werden ebenfalls im Frequenzspektrum auftauchen. Amplituden bei den Drehfrequenzen und der 2. Harmonischen der Drehfrequenz sollten bei entsprechend guter Auswuchtung der Rotoren und guter Maschinenausrichtung nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Bei Verdichtern mit Keilriemenantrieb kann bei fehlerhaften Keilriemen die Riemenbiegefrequenz im Spektrum erscheinen.

$$f_k = k \cdot (\pi \cdot D_s \cdot n_s) / l_k \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

mit

$k$  – Scheibenzahl

$D_s$  – Durchmesser Riemenscheibe

$n_s$  – Drehzahl Riemenscheibe

$l_k$  - Keilriemenlänge

Bei Getriebeantrieb sind Zahneingriffsfrequenzen zu beachten. Je nach Art der Ankopplung des Schraubenverdichters an die Antriebsmaschine können auch Schwingungserregungen der Antriebsmaschine übertragen werden. Einige Praxisbeispiele mit Schwingungen verursacht durch Unwuchten bzw. fehlerhafte Keilriemen sind in [7] besprochen.

Welche Messgröße oder welche Messgrößen müssen nun herangezogen werden, um das Schwingungsverhalten eines Schraubenverdichters bewerten zu können?

An dieser Stelle möchte ich auf die VDI Richtlinie 2056 [4] hinweisen, die 1960 zum ersten Mal erschien und die eine bahnbrechende Arbeit auf dem Gebiet der Bewertung von Maschinenschwingungen darstellt. Hier wurde auch der Begriff der „Schwingstärke“ eingeführt, als eine einfach zu messende, zusammenfassende, das Schwingverhalten einer Maschine auf einfachste Weise kennzeichnende Größe.

Als Maß für die Schwingstärke wird auf Grund theoretischer Überlegungen und praktischer Erfahrungen der Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit gewählt [4].

Die Definition des Effektivwertes der Schwinggeschwindigkeit und seine Beziehung zu anderen Schwingungsgrößen kann [4] oder [6] entnommen werden (siehe auch Gleichung (5)). Eine verbale Beschreibung liefert [5]:

Die maßgebende Kenngröße für die Schwingungen stationärer Maschinenbauteile ist der Effektivwert  $v_{\text{eff}}$  der Schwinggeschwindigkeit.  $v_{\text{eff}}$  wird im Englischen mit  $v_{\text{rms}}$  (root-mean-square value) bezeichnet. Der Effektivwert ist definiert als die Wurzel aus dem Mittelwert der quadrierten Augenblickswerte innerhalb eines vorgegebenen Zeitabschnittes. Der Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit ist ein Maß für den Energieinhalt der Schwingungen und damit für die Wirkung auf die Maschine selbst und für die Schwingungsemission in die Umgebung. Der Effektivwert wird von der dominierenden Frequenzkomponente getragen und enthält keine Informationen über die spektrale Zusammensetzung. Veränderungen der Schwingfrequenz oder sich anbahnende Schäden mit neuen Frequenzkomponenten geringer Amplitude sind im Effektivwert nicht erkennbar [5].

Tatsächlich lagen auch für Schwingungsmessungen an Schraubenverdichtern die meisten Messerfahrungen vor für Messungen der Schwinggeschwindigkeit. Die Bewertung solcher Messungen wurde z.B. in Werksnormen definiert oder die VDI 2056 wurde zu Grunde gelegt. Betrachtet man ein typisches an einem Schraubenverdichter gemessenes Frequenzspektrum der Schwinggeschwindigkeit (Bild 1), so zeigt sich eine Schwierigkeit bei der Bewertung. Zum einen muß ein relativ hoher, breitbandig gemessener Summenwert des Effektivwertes der Schwinggeschwindigkeit zugelassen werden (Ursache sind die Amplituden bei der Aus-

stoßfrequenz und deren Harmonischen), zum anderen muß dafür gesorgt werden, daß Auswuchtung und Ausrichtung der Maschine in angemessener Weise erfolgt sind.

Das Spektrum in Bild 1 wird dominiert von der 2. Harmonischen der Ausstoßfrequenz bzw. Zahneingriffsfrequenz der Rotoren. Der RMS-Wert von 5,4 mm/s liegt dabei noch weit unter dem zulässigen Grenzwert von 10 mm/s (Tabelle 1). Erst der Blick auf das Spektrum liefert jedoch eine Aussage über die Herkunft der Schwingungen und die Wertigkeit der einzelnen Komponenten im gemessenen Summenwert von RMS = 5,4 mm/s. Mit anderen Worten eine hohe Amplitude von beispielsweise 10 mm/s bei der Drehfrequenz würde den RMS- Wert auf ca. 8,5 mm/s erhöhen, was immer noch unterhalb des Grenzwertes wäre. Ein solch hoher Schwingungsanteil bei der Drehfrequenz kann aber nicht akzeptiert werden.

Die Lösung dieses Problems kann nur sein, daß wie in VDI 3836 vorgegeben, zwei Frequenzbereiche zur Bewertung herangezogen werden.

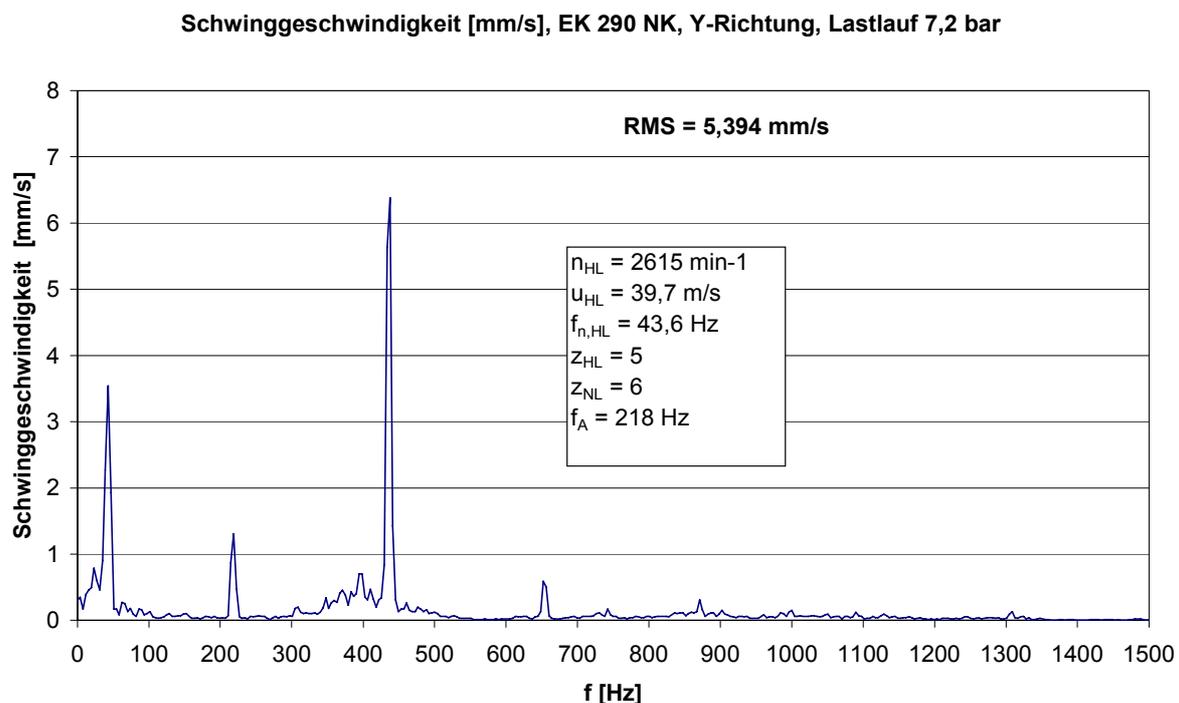


Bild 1: Typisches Spektrum öleingespritzter Schraubenverdichter (Maschinengruppe 3), Keilriemenantrieb, elastische Aufstellung

Die VDI 2056 weist auch auf die Gesichtspunkte hin, nach denen sich die Beurteilung der Maschinenschwingungen richtet:

- Schwingbeanspruchung in den Maschinen sowie ihrer Umgebung (Lagerung, angeschlossene Maschinenteile, Fundamente, Boden)

- Arbeitsqualität von Arbeitsmaschinen und Geräten, z.B. Bearbeitungsmaschinen.
- Sicherung eines störungsfreien Betriebes, der z.B. durch unzulässige Läuferausschläge beim Durchfahren von Resonanzen, Lösung von Reibungsschlüssen durch Rüttelkräfte u.a. in Frage gestellt sein kann.
- Physische und psychische Belastung des Menschen [4].

#### 4. Geltungsbereich der Richtlinie VDI 3836 – Einteilung in Maschinengruppen

In der Richtlinie VDI 3836 werden Kriterien für die Bewertung der Schwingungen von Schraubenverdichtern und Rootsgebläsen genannt, wenn Messungen an den nicht-rotierenden und an den rotierenden Bauteilen von Maschinen am Aufstellungsort ausgeführt werden. Diese sind auch anwendbar bei Abnahmemessungen an Verdichterstufen auf Prüffeldern beim Hersteller.

Grundsätzlich gilt die Richtlinie VDI 3836 für starr oder elastisch aufgestellte Verdichter mit Leistungen nach Tabelle 1, wenn der Antrieb über einen Elektromotor oder eine Dampfturbine erfolgt. Bei mehrstufigen Verdichtern in Kompaktbauweise sind die Bewertungskriterien auf jede der Stufen anzuwenden. Für Maschinen kleinerer Leistung kann die Anwendung dieser Richtlinie zwischen Hersteller und Kunde vereinbart werden.

Die Richtlinie VDI 3836 gilt nicht für Verdichter mit Antrieb durch Verbrennungsmotoren. Die Bewertungskriterien der Richtlinie VDI 3836 gelten nicht für die Schwingungen der antreibenden Maschinen. Diese sind nach den hierfür geltenden Normen zu beurteilen.

Die Richtlinie VDI 3836 gilt für Messungen an den in Abschnitt 2.2 genannten Messorten an der Verdichterstufe selbst und unter Betriebsbedingungen, die in Abschnitt 2.5 erläutert sind. Bei Messungen an den nicht-rotierenden Teilen ist die Bewertungsgröße der Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit in zwei Frequenzbereichen mit unterschiedlichen Obergrenzen.

Der **Frequenzbereich A** überdeckt alle wesentlichen mechanischen und strömungstechnischen Schwingungsanregungen. Im zusätzlichen **Frequenzbereich B** werden nur die Schwingungsanteile mit einfacher und doppelter Drehfrequenz der Rotoren erfasst, die üblicherweise von Unwuchten herrühren. Für beide Bereiche werden im Abschnitt 4 der VDI 3836 Beurteilungen genannt.

Wenn bei Verdichtern mit gleitgelagerten Rotoren die Rotorschwingungen relativ zu den Lagern gemessen werden, ist die Kenngröße der größte Wert der Schwingungsbreite (Spitze-Spitze-Wert  $s_{(p-p)}$  des Schwingweges).

Die im Abschnitt 4, der VDI 3836 genannten Beurteilungskriterien gelten nur für diejenigen Schwingungen, welche die Maschine selbst erzeugt, nicht jedoch für Schwingungen, die von der antreibenden Maschine oder von externen Quellen auf den Verdichter übertragen werden.

Die im Abschnitt 4, der VDI 3836 genannten Beurteilungskriterien sind nicht geeignet, den Zustand von eingebauten Wälzlagern und Getrieben bei Verdichtern zu beurteilen. Hinweise zur Messung und Beurteilung des Körperschalls von Wälzlagern finden sich in der Richtlinie VDI 3832 [8].

Lagerdiagnosemessungen an öleingespritzten Schraubenverdichtern und deren Auswertung werden z.B. in [7] beschrieben.

Die von der Richtlinie VDI 3836 erfassten Maschinen werden in vier Gruppen eingeteilt:

- Gruppe 1: Schraubenverdichter mit Gleitlagern und Gleichlaufgetriebe.  
In diese Gruppe fallen üblicherweise Schraubenverdichter für Prozessgase.
- Gruppe 2: Schraubenverdichter mit Wälzlagern oder Wälz- und Gleitlagern und Gleichlaufgetriebe.  
In diese Gruppe fallen üblicherweise ölfreie Schraubenverdichter zur Druckluftherzeugung
- Gruppe 3: Schraubenverdichter ohne Gleichlaufgetriebe.  
In diese Gruppe fallen üblicherweise die ölüberfluteten Schraubenverdichter.
- Gruppe 4: Rootsgebläse mit Wälzlagern und Gleichlaufgetriebe [3].

## 5. Bewertung der Gehäuse- und Rotorschwingungen von Schraubenverdichtern und Rootsgebläsen

Zur Bewertung gemessener Schwingungen werden zwei Kriterien herangezogen. Das ist zum einen die Schwingungsgröße selbst und zum anderen die Änderung der Schwingungsgröße – also eine Trendbetrachtung.

Für die Bewertung der Gehäuseschwingungen eines Schraubenverdichters ist der größte an einem der festgelegten Meßorte festgestellte Schwingwert in beiden Frequenzbereichen maßgebend.

Maschinengruppe	Aufstellung	Zonengrenze	Frequenzbereich A	Frequenzbereich B
<b>Gruppe 1</b> Schraubenverdichter mit Gleitlagern und Gleichlaufgetriebe P / 55 kW	starr	I/II	8,0	3,0
		II/III	12,0	4,5
	elastisch	I/II	10,0	4,5
		II/III	15,0	7,0
<b>Gruppe 2</b> Schraubenverdichter mit Wälzlagern oder Wälz- und Gleitlagern und Gleichlaufgetriebe P / 37 kW	starr	I/II	10,0	3,0
		II/III	15,0	4,5
	elastisch	I/II	12,0	4,5
		II/III	18,0	7,0
<b>Gruppe 3</b> Schraubenverdichter ohne Gleichlaufgetriebe P / 55 kW	starr	I/II	8,0	3,0
		II/III	12,0	4,5
	elastisch	I/II	10,0	4,5
		II/III	15,0	7,0
<b>Gruppe 4</b> Rootsgebläse mit Wälzlagern P / 22 kW	starr	I/II	10,0	4,5
		II/III	15,0	7,0
	elastisch	I/II	12,0	7,0
		II/III	18,0	11,0

Tabelle 1: Empfohlene Grenzwerte für die Gehäuseschwingungen als Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit in mm/s

Um eine qualitative Beurteilung der an einem Verdichter gemessenen Schwingwerte vornehmen zu können, ist es sinnvoll drei Bewertungszonen zu definieren:

**Zone I:** Verdichter, deren Schwingungen in dieser Zone liegen, werden als geeignet angesehen, ohne Einschränkungen im Dauerbetrieb zu laufen.

**Zone II:** Verdichter in dieser Zone weisen hohe Schwingungswerte auf. Es ist in jedem Einzelfall notwendig zu prüfen, ob die gemessenen Werte unter Berücksichtigung der jeweiligen Konstruktion und der Betriebsbedingungen für einen unbegrenzten Dauerbetrieb zulässig sind. Im Allgemeinen darf der Verdichter aber für eine begrenzte Zeit in diesem Zustand betrieben werden, bis sich eine günstige Gelegenheit für Abhilfemaßnahmen ergibt.

**Zone III:** Verdichter, deren Schwingungswerte in dieser Zone liegen, werden meistens für eine Untersuchung und Instandsetzung abgeschaltet, da ihre Schwingungswerte als so hoch angesehen werden, dass Schäden an der Maschine entstehen können [3].

Darüber hinaus muß geprüft werden, ob es sich um eine starre oder elastische Maschinenaufstellung handelt.

Beispiele für unterschiedliche Maschinenaufstellungen sind im Anhang von VDI 3836 dargestellt.

Bei gleitgelagerten Schraubenverdichtern (Gruppe 1) ist es üblich, zur Bewertung des Schwingverhaltens auch die relativen Wellenschwingungen zu messen. Dies erfolgt in Anlehnung an DIN ISO 7919-3 bzw. VDI 2059. Auch hierfür sind in VDI 3836 Grenzwerte für die Bewertungszonen angegeben:

$$\text{Zonengrenze I/II} \quad S_{(p-p)} = \frac{14800}{\lg(n) \cdot \sqrt{n}} \quad \mu\text{m} \quad (3)$$

$$\text{Zonengrenze II/III} \quad S_{(p-p)} = \frac{25000}{\lg(n) \cdot \sqrt{n}} \quad \mu\text{m} \quad (4)$$

## 6. Einige Bemerkungen zur Schwingungsmessung selbst

Nachdem im vorigen Abschnitt bereits Bewertungskriterien für Gehäuse- und Wellenschwingungen an Schraubenverdichtern und Rootsgebläsen genannt wurden, stellt sich noch die Frage nach dem wann und wo diese Schwingungen gemessen werden sollen.

VDI 3836 gibt hierzu eine Reihe von Hinweisen und Beispielen, verweist aber auch auf weitere Normen, wie z.B. VDI 3839 [5].

Bei Schwingungsmessungen ist zu beachten, daß sich der Verdichter in einer stabilen Lastlaufphase befinden muß.

Die Messaufnehmer, es handelt sich dabei in den meisten Fällen um piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer, müssen an definierten Messorten der Verdichterstufe angebracht werden. Ein Beispiel für Messorte und Messrichtungen an einem zweistufigen Schraubenverdichter der Maschinengruppe 2 ist auf Bild 2 zu sehen.

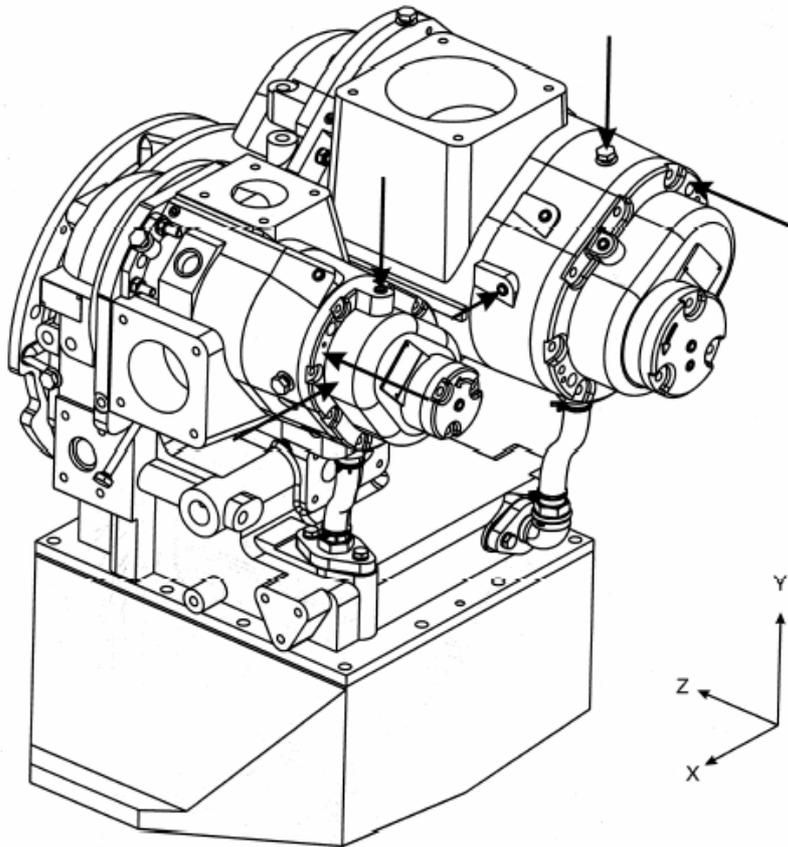


Bild 2: Messorte und Messrichtungen an einer zweistufigen, ölfreien Schraubenverdichtereinheit in Kompaktbauweise (Maschinengruppe 2)

Letztlich erfolgt die Festlegung der Messorte durch den Hersteller unter Beachtung einiger allgemeiner Kriterien:

- Die Zugänglichkeit der Messorte bei laufender Maschine muß gewährleistet sein.
- Messungen sollten in Lagernähe auf der Saugseite und/oder der Druckseite des Verdichters durchgeführt werden in den drei Messrichtungen eines rechtwinkligen x-y-z-Koordinatensystems.
- Die ausgewählten Messorte sollen repräsentativ die Schwingungen der Verdichterstufe widerspiegeln. Bei der Dauerüberwachung eines Verdichters werden meist nur ein oder zwei Gehäuseschwingungsaufnehmer eingesetzt. Es ist darauf zu achten, dass Messorte

und Messrichtung nach Erfahrung ausreichende Informationen über die Größe der Maschinenschwingung liefern [3].

- Grundsätzlich sollte bei der Messung der Gehäuseschwingungen gewährleistet sein, dass die von den Rotoren und der Lagerung induzierten Schwingungen gut vom Entstehungsort zum Aufnehmer übertragen werden. Allgemeine Hinweise zur Wahl des Messortes und zur Montage von Aufnehmern werden im Abschnitt 5 von VDI 3839, Blatt 1, und in DIN ISO 5348 gegeben. Spezielle Hinweise zur Messung des Körperschalls von Wälzlagern finden sich in VDI 3832 (z.Z. Entwurf) [8].

Auf der Maschine sollten die Messorte so gekennzeichnet sein, dass Wiederholungsmessungen an den exakt gleichen Messorten durchgeführt werden können.

## 7. Interpretation von Messergebnissen

Wird ein Kennwert bzw. Summenwert zur Bewertung von Maschinenschwingungen herangezogen,

so fehlt eine Zuordnung der einzelnen Schwingungsanteile zu Frequenzen und damit die Information über die Herkunft der Schwingungen.

Von daher ist ein Blick auf das Spektrum immer sinnvoll, wenn Schwingungen identifiziert und analysiert werden sollen.

Der nach VDI 3836 maßgebende Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit in den Frequenzbereichen A und B kann entweder vom Messgerät ermittelt werden, indem der Frequenzbereich entsprechend eingestellt wird oder der Effektivwert wird aus dem Spektrum berechnet.

Für den Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit gilt:

$$v_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2}(\hat{v}_1^2 + \hat{v}_2^2 + \dots + \hat{v}_n^2)} \quad (5)$$

mit  $\hat{v}$  = Scheitelwert der Schwinggeschwindigkeit

Eine solche Berechnung ist sinnvoll für den Frequenzbereich B, oder generell wenn nur wenige Amplituden mit Formel (5) aufsummiert werden müssen.

Dies soll am Beispiel des Spektrums von Bild 1 gezeigt werden.

Das Spektrum wurde bis 1500 Hz gemessen, nach den in VDI 3836 genannten Kriterien muß die Frequenzobergrenze des Bereichs A in diesem Fall mindestens bei 1000 Hz liegen. Der Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit liegt bei 5,4 mm/s und erfüllt damit die Anforderungen nach Tabelle 1 für die Zone I.

Der Frequenzbereich B wird bestimmt zu:  $2,2 * f_{n,HL} = 95,92 \text{ Hz}$ , aufgerundet auf 100 Hz. Im Frequenzbereich B befinden sich zwei nennenswerte Amplituden der Schwinggeschwindigkeit. Eine mit 0,79 mm/s bei ca. 23,4 Hz und eine mit 3,54 mm/s bei ca. 43 Hz. Mit Gleichung

(5) berechnet sich der Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit im Bereich B zu 2,56 mm/s. Betrachtet man nur das Amplitudenmaximum von 3,54 mm/s so wird der RMS-Wert zu 2,50 mm/s. Damit wird auch für den Frequenzbereich B die Zonengrenze I/II deutlich unterschritten – das Schwingverhalten dieser Maschine ist als gut einzuschätzen.

Bei Verdichtern mit variablen Drehzahlen und Belastungen müssen mehrere Messungen durchgeführt werden, die den Betriebsbereich erfassen, in welchem der Verdichter für längere Zeit betrieben wird.

Zur Beurteilung der Schwingungen eines Verdichters mit variabler Drehzahl reicht es üblicherweise aus, eine Messung bei der maximalen Drehzahl  $n_{\max}$  und der minimalen Drehzahl  $n_{\min}$ , sowie bei der Hälfte dieser Drehzahlspanne durchzuführen. Bei diesen Drehzahlen sollen jeweils jene zugesicherten Eintritts- und Austrittsdrücke eingestellt werden, bei denen die maximale Leistungsaufnahme auftritt [3].

Betrachtet man den großen Regelbereich drehzahl geregelter Antriebe, der häufig von 100% bis 10 oder 15% reicht, so ist die Gefahr von Systemresonanzen tatsächlich sehr groß.

Um solche Gefahren zu erkennen, ist es zweifellos nicht ausreichend nur drei Messungen durchzuführen. Der Hersteller hat hier die Verantwortung den gesamten Regelbereich schrittweise abzufahren und das Schwingverhalten von Verdichter und Anbauteilen zu beobachten.

So wird in VDI 3836 empfohlen:

Erfahrungsgemäß gibt es in drehzahlregelbaren Verdichteranlagen mitunter durch Schwingungen verursachte Störungen an Anbauteilen. Diese treten unabhängig vom Schwingungsniveau des Verdichters auf, also auch dann, wenn das Niveau niedrig ist. Sie können durch ungünstige Ankopplung, Übereinstimmung einer Eigenfrequenz des Anbauteils mit einer Anregungsfrequenz des Verdichters oder des Antriebes, sowie durch geringe Dämpfung im Anbauteil verursacht sein. Wenn solche Anbauteile zu untersuchen sind, empfiehlt sich ein langsames Durchfahren des Drehzahlbereiches bei gleichzeitiger Messung der Schwingung an dem fraglichen Anbauteil [3].

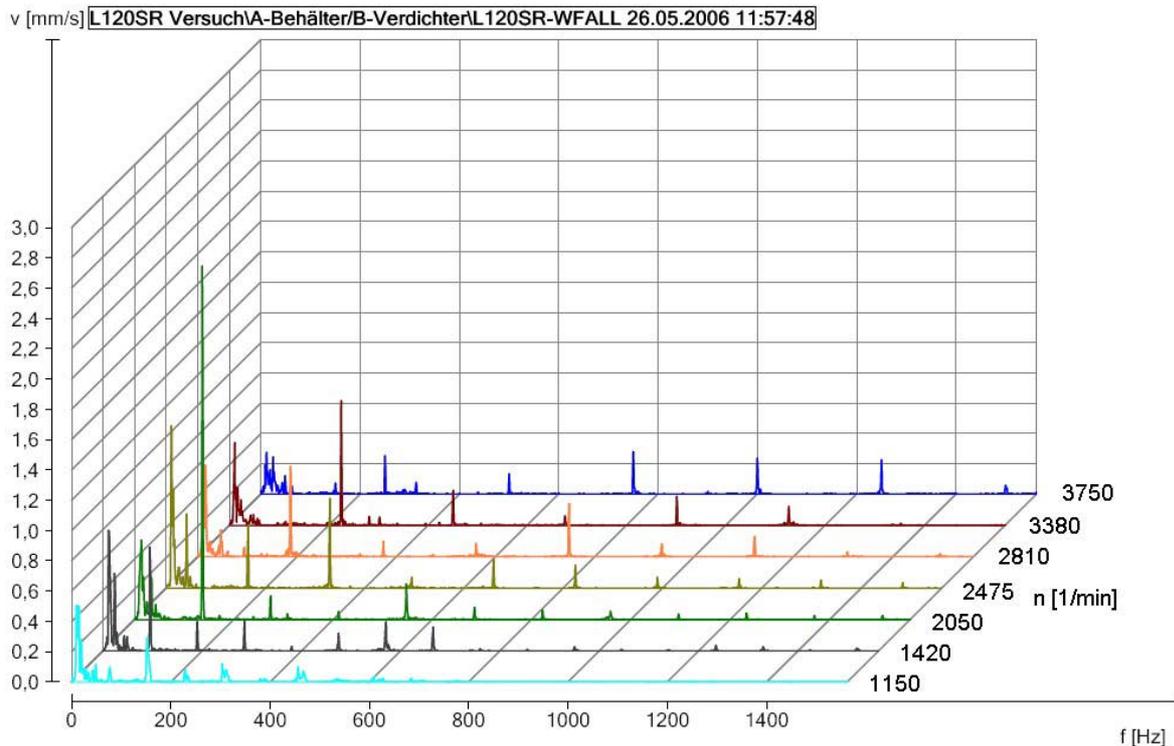


Bild 3: Wasserfalldiagramm, gemessen an einem Ölbehälter, Drehzahlbereich: 1150 ...3750 min<sup>-1</sup>

Ein Beispiel für eine Schwingungsmessung an einer drehzahlgeregelten Anlage der Maschinengruppe 3 zeigt Bild 3. Im Wasserfalldiagramm ist zu sehen, daß bei ca. 2050 min<sup>-1</sup> (Ausstoßfrequenz um 140 Hz) eine Schwingung des Ölbehälters mit der Ausstoßfrequenz angeregt wird. Das Niveau der Schwingung ist jedoch mit etwa RMS = 2,5 mm/s niedrig.

### Literatur

- [1] Schwirzer, Th. Grundlagen und Anwendungsbereiche der Normen der Serien DIN ISO 10816 und DIN ISO 7919 – Beurteilungskriterien für Lager- und Wellenschwingungen – begleitende VDI Richtlinien, VDI Berichte Nr. 1715, VDI-Verlag Düsseldorf 2002
- [2] DIN ISO 10816-3:1998-12; Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen; Teil 3: Industrielle Maschinen mit Nennleistungen über 15 kW und Nenndrehzahlen zwischen 120 min<sup>-1</sup> und 15000 min<sup>-1</sup> bei Messungen am Aufstellungsort (ISO 10816-3:1998), Berlin: Beuth Verlag
- [3] VDI-Richtlinie 3836 Entwurf; Messung und Beurteilung mechanischer Schwingungen von Schraubenverdichtern und Rootsgebläsen, Ergänzung von DIN ISO 10816-3, März 2005, Berlin: Beuth Verlag

- [4] VDI-Richtlinie 2056, Beurteilungsmaßstäbe für mechanische Schwingungen von Maschinen, Oktober 1964, Berlin: Beuth Verlag
- [5] VDI-Richtlinie 3839, Blatt1, Hinweise zur Messung und Interpretation der Schwingungen von Maschinen, Allgemeine Grundlagen, März 2001, Berlin: Beuth Verlag
- [6] DIN ISO 10816-1:1997-08; Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen; Teil 1: Allgemeine Anleitungen, Berlin: Beuth Verlag
- [7] Geyer, K., Franke, D. Wälzlagerdiagnose an und Schwingungsverhalten von öleingespritzten Schraubenverdichtern mit Keilriemenantrieb, VDI Berichte Nr. 1715, VDI-Verlag Düsseldorf 2002
- [8] VDI-Richtlinie 3832 Entwurf, Körperschallmessungen zur Zustandsbeurteilung von Wälzlagern in Maschinen und Anlagen, Januar 2005, Berlin: Beuth Verlag