

# Diagnose- und Überwachung an Schraubenverdichtern

## Signalplots beschreiben das Betriebsverhalten zur erfolgreichen Diagnose und Überwachung

Dipl.-Ing. **Dieter Franke** VDI, Ingenieurbüro Dieter Franke, Dresden;  
**Mathias Luft**, PRÜFTECHNIK Condition Monitoring GmbH, Freiberg

### Kurzfassung

Wälzgalagerte Schraubenverdichter stellen als Diagnoseobjekte durch die Überlagerung des Körperschall aus dem Schraubeneingriff, dem Zahneingriff der Getriebestufen und von den Wälzlagern mit den Axiallagern erhöhte Anforderungen an die Diagnose und Überwachung. Die VDI 3832 zur Wälzlagerdiagnose liefert hier eine gute Methodik auch für die sich im Körperschall überlagernden Einzellager in den meist kompakten Gehäusen. Schraubeneingriff, Gleichlaufgetriebe und Getriebestufen sind nach bekannter Methodik der Getriebediagnose mittels Körperschall diagnostizierbar, setzen aber entsprechende Spezialkenntnisse voraus.

Gleichfalls ist die Diagnose und Überwachung des Maschinezustand in der Schwingstärke durch die alles dominierende und zum Teil maskierende Ausstoßfrequenz mit besonderen Anforderungen verbunden. Hier gibt die neue VDI 3836 wichtige Hinweise, die jedoch für die vielfältigen Verdichtertypen und Einsatzfälle zum Teil erweitert angewendet werden sollte.

An typischen Fallbeispielen einstufiger wälzgelagerter Schraubenverdichter werden diese Zusammenhänge in diesem Vortrag jeweils anschaulich dargestellt.

### 1. Beispiele der Diagnose und Überwachung der Schwingstärke

Die Messung und Bewertung der Schwingstärke-Kennwerte wird in VDI 3836 nach [1] ausführlich beschrieben. In einem Frequenzbereich B ab 2 bzw. 10 Hz erfassen die Kennwerte die erste und zweite Ordnung der Drehfrequenz. Der Frequenzbereich A erfasst den Bereich bis zur dritten Ausstoßfrequenz.

Bei Messungen mit mobiler Messtechnik wird danach je nach Baugröße an Haupt- und Nebenläufern in den drei Hauptachsen der größte der Messwerte erfasst und in eine der vier Maschinengruppen bewertet. Für die Dauerüberwachung ist aus Kostengründen meist nur ein Aufnehmer je Läuferseite einsetzbar, der entsprechend nicht immer die Richtung der maximale Schwingstärke wie bei einer mobilen Messung erfassen kann, da wie später ausge-

führt noch weitere Gesichtspunkte bei der Messstellenwahl hinzukommen die zu Kompromissen führen.

Bei Kältemittel-Verdichtern in den ersten Betriebsjahren werden die Grenzwerte dieser VDI in den meisten Fällen deutlich unterschritten. Bild 1 zeigt im ersten Beispiel Geschwindigkeitsspektren an vier baugleichen neuen Kältemittelverdichtern (Aufbau nach Bild 2) mit Rms-werten im Ausstoßfrequenzbereich von 1,1 bis 2,5 mm/s, die jeweils als Maximalwerte mit einem Onlinesystem gewonnen wurden und den Grenzwert für Langzeitbetrieb von 10,0 mm/s deutlich unterschreiten. Der Kennwert wird hier von der ersten Ordnung der Ausstoßfrequenz bestimmt.

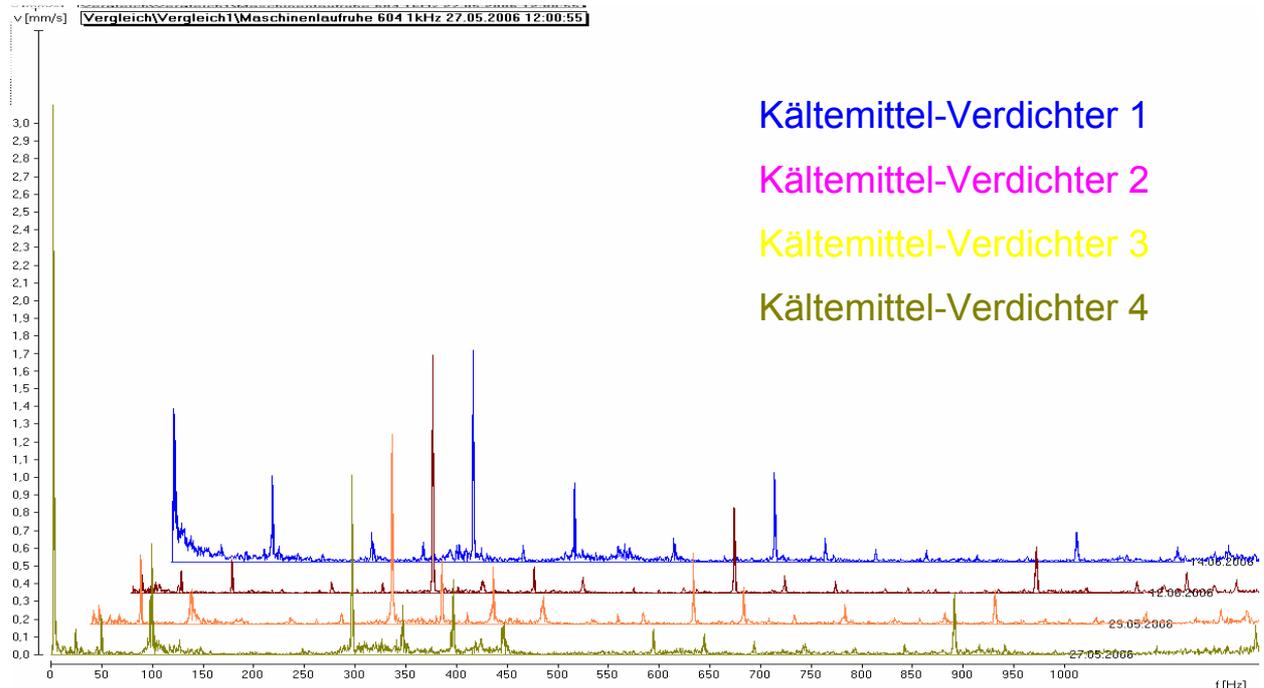


Bild 1: Geringe Variation der Schwingstärke vier neuer baugleicher Verdichter

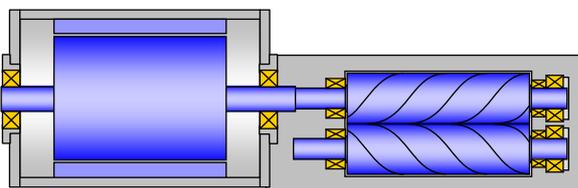


Bild 2: Kältemittelverdichter in Seitenansicht für ca. 7 bar Betriebsenddruck

Einmalige oder relativ selten ausgeführte Messungen mit mobiler Messtechnik in der Anlage sind hierbei allerdings oft nur eingeschränkt repräsentativ, wie in einem ersten Beispiel ge-

zeigt werden soll. Ursache dafür ist ein starker Einfluss des Betriebsdruckes auf alle Kennwerte in den meisten Fällen. Die Pegel der Ordnungen der Ausstoßfrequenz, die den Kennwert im Frequenzbereich A bestimmen schwanken selbst dann relativ stark, wenn wie in dem zweiten Beispiel von dem Onlinesystem nur in einem eingegrenzten Betriebsdruck-bereich gemessen wurde. Bild 3 und Tabelle 1 zeigen die Schwankung der Ordnungen der Ausstoßfrequenz an einem Verdichter um bis über Faktor 10.

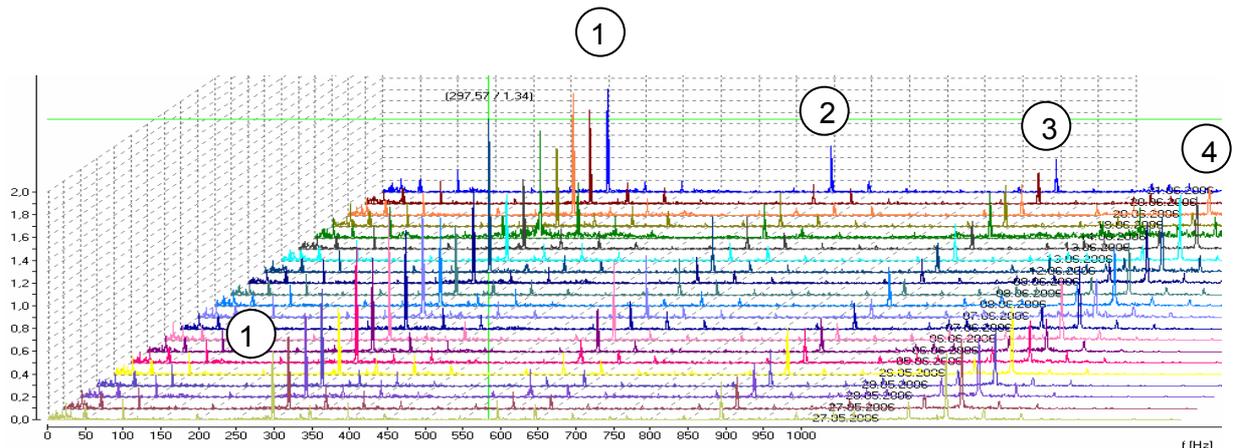


Bild 3: Kaskadendiagramm des Geschwindigkeitsspektrums eines neu in Betrieb genommenen Kältemittelverdichters mit integriertem Antrieb, (2985 1/min, ca. 175 kW) mit der Variation der 1. - 4. Ordnung der Ausstoßfrequenz bei einer dargestellten Messung pro Tag

Tabelle 1 Schwankungen der Ordnungen der Ausstoßfrequenz

| Frequenz     | v rms 10-1000Hz   | Frequenz     | v rms 10-1000Hz   |
|--------------|-------------------|--------------|-------------------|
| 1. $f_{Aus}$ | 0,6 bis 1,3 mm/s  | 2. $f_{Aus}$ | 0,05 bis 0,7 mm/s |
| 3. $f_{Aus}$ | 0,15 bis 0,4 mm/s | 4. $f_{Aus}$ | 0,08 bis 0,6 mm/s |

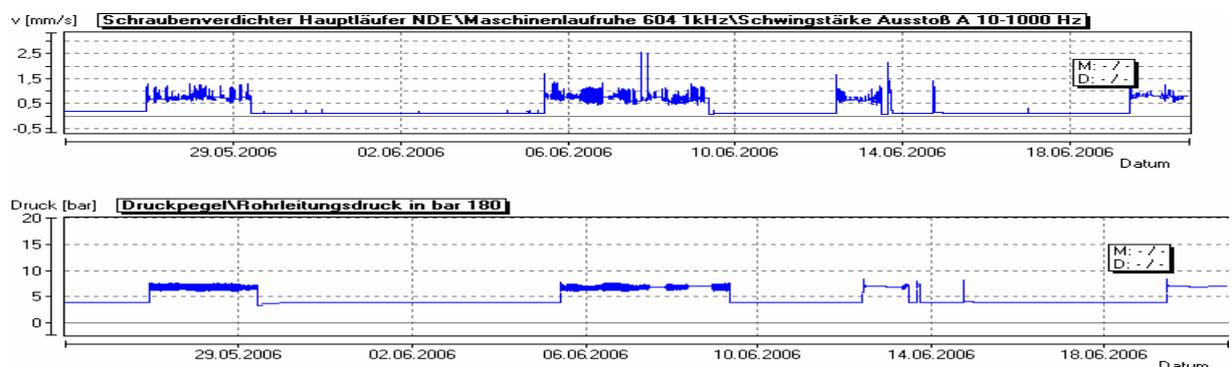


Bild 4: Trendverlauf v rms im Frequenzbereich A von 0,45 bis 2,55 mm/s

Bild 4 zeigt daraus einen beispielhaften Trend des Kennwertes im Frequenzbereich A mit Schwankung von 0,5 bis 2,6 mm/s über einen Betriebsdruck von 6,2 bis 7,7 bar. Daraus er-

gibt sich eine einfache Überwachung gegenüber den in VDI 3836 vorgeschlagenen Grenzwerten.

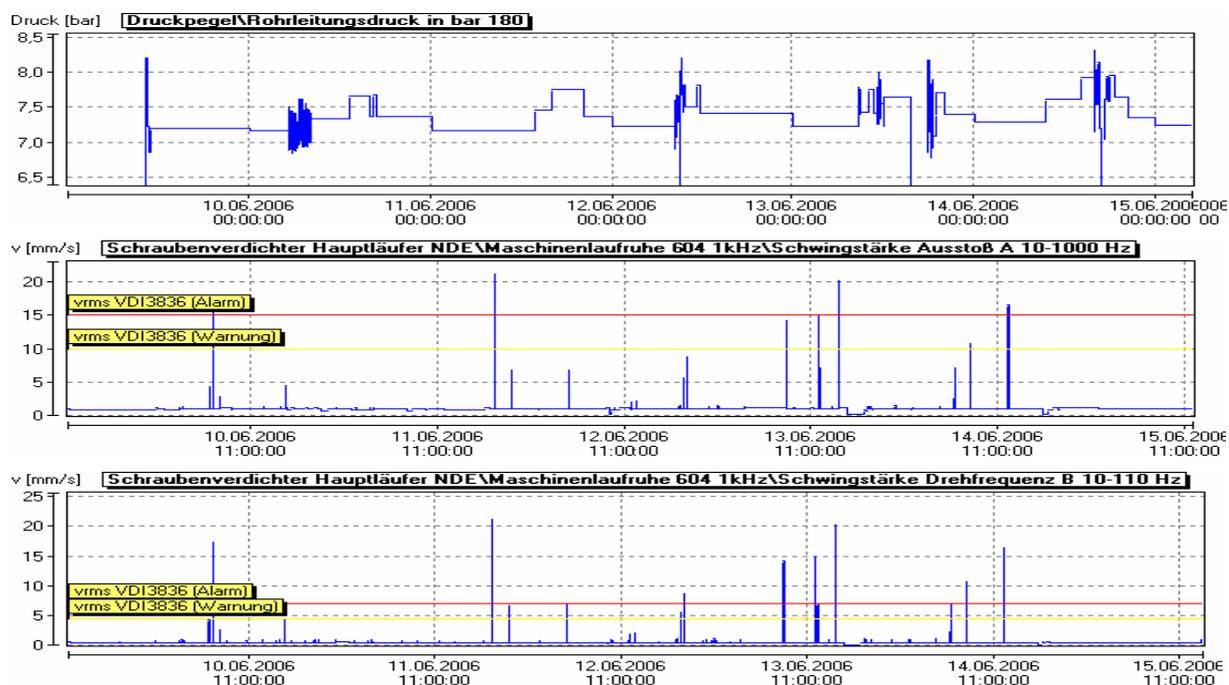


Bild 5: Trendkurven am vg. Verdichter für p stat in bar und v rms Frequenzbereich oben A unten B

Bild 5 zeigt Trendverläufe des unteren Verdichters im Bild 1 mit einzelnen kurzzeitigen hohen Schwingstärkewerten im Ausstoß- sowie im Drehfrequenzbereich. Im sonst ereignislosen Dauerbetrieb liegen die Rms-werte an dieser Maschine bei 1 bis 1,5 mm/s, die kurzzeitigen Spitzen jedoch bei 7 bis über 20 mm/s. Derartige Ereignisse an Schraubenverdichtern sind funktionsgemäß nur mit Onlinesystemen feststellbar. Da diese Spitzen nur an einer von vier Maschinen auftreten, müssen sehr kurzzeitig fehlerhafte Betriebsweisen in der Maschine vorliegen. Aus der Anlagenanbindung und Betriebsweise ergibt sich für diesen der vier Kältemittelverdichter keine Besonderheit. Eine Ursachenermittlung dauerte zum Berichtszeitpunkt dafür noch an.

Das zweite Beispiel eines sehr ähnlichen Kältemittelverdichtertyps wie nach Bild 2 mit 2990 rpm und 232 kW zeigt im Bild 5 deutlich erhöhte Schwingstärken an einem von zwei Verdichtern nach dem ersten Betriebsjahr. Allerdings dominiert hier die vierte Ordnung der Ausstoßfrequenz die Schwingstärke, die nach o. g. VDI nicht in die Bewertung eingehen würde. Aus Sicht der Maschinenbelastung wäre dies jedoch nicht repräsentativ, weshalb hier der Rms-wert auch in Abweichung zur VDI 3836 bis zur vierten Ordnung gebildet wurde. Die Maschine nach Bild 6 überschreitet nur dann mit 13,7 den Grenzwert von 10,0 mm/s und ist so nur

für den Kurzzeitbetrieb zugelassen. Streng nach VDI 3836 wäre diese Maschine in Gruppe 3 weich aufgestellt im Bereich nur bis zur dritten Ordnung mit 8,7 mm/s für Langzeitbetrieb zulässig. Folgeschäden der hohen Anregung in diesem Fall an der ersten Maschine waren dann auch Risse im angeschlossenen Rohrleitungssystem. Allerdings ist hier wie in den meisten Fällen eine Abhilfe an der Maschine vor Ort nicht möglich. Ausnahmen bilden Verdichter mit externem Antrieb mit Riemen oder über Kupplung, wenn dort die Ursache des Schwingstärke-Anstiegs zu finden ist.

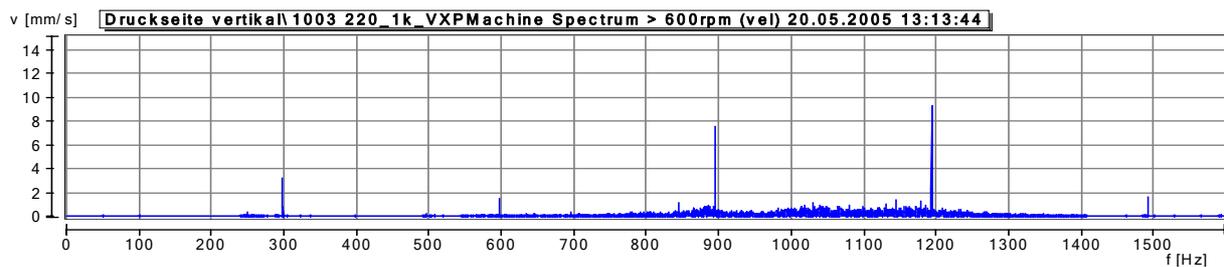


Bild 6: Beispiel 2 - Geschwindigkeitsspektrum eines Kältemittelverdichters mit integriertem Antrieb ohne Getriebe (2990 rpm, 232 kW) mit  $v_{rms}$  13,7 mm/s in vertikaler Richtung, 13,0 mm/s horizontal und axial 9,1 mm/s mit Ausstoßfrequenz bei 300 Hz.

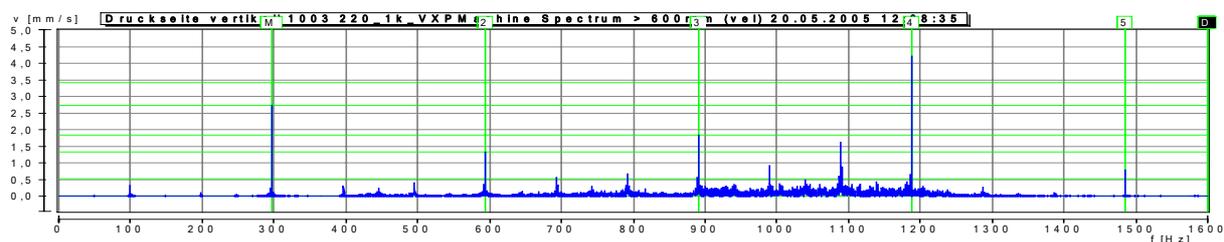


Bild 7a: Geschwindigkeitsspektrum eines baugleichen Kältemittelverdichters mit  $v_{rms}$  6,1 mm/s in vertikaler Richtung, 5,4 mm/s horizontal und axial 3,8 mm/s

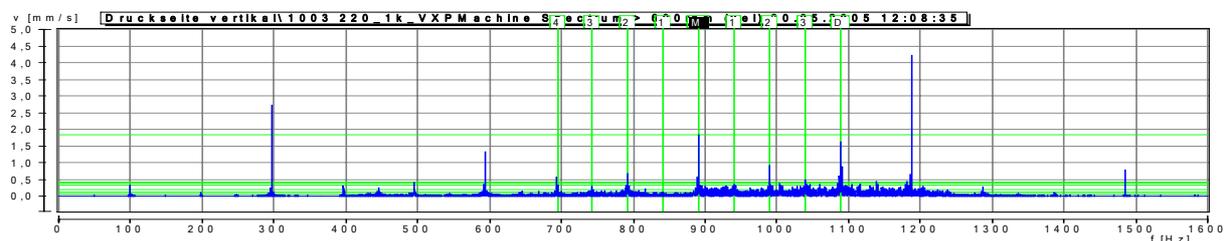


Bild 7b: wie 5a, hier Seitenbänder mit (50) 100 Hz beiderseits der Ausstoßfrequenz 300 Hz

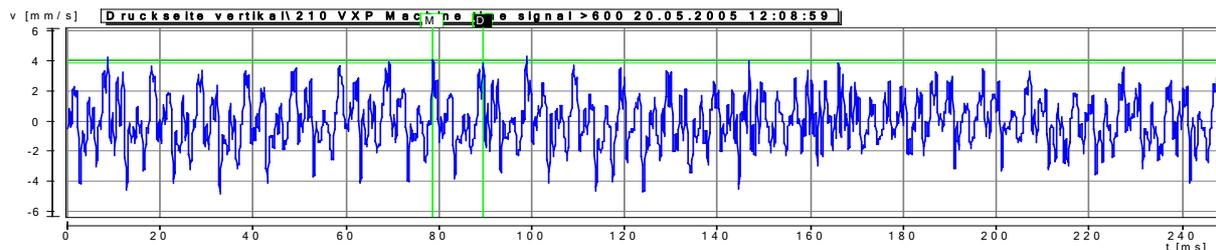


Bild 7c: Impulsfolge von 100 Hz im Zeitsignal für 7b M- zu D-Cursor 10 ms.

Der zweite baugleiche Verdichter im Bild 7a bis 7c zeigt eine für den Langzeitbetrieb zulässige Schwingstärke im Frequenzbereich A von 6,1 mm/s. Bild 7a zeigt die Vielfache der Ausstoßfrequenz wie im Bild 6. Die zwischen den Ordnungen der Ausstoßfrequenz liegenden Spitzen können leicht als Vielfache der einfachen und doppelten der Drehfrequenz des Hauptläufers verwechselt werden. Bild 7 b und 7 c zeigt jedoch, dass es sich dabei um Impulsfolgen mit der doppelten Drehfrequenz des Hauptläufers in Bezug zur Ausstoßfrequenz handelt.

Das dritte Beispiel ist ein Verdichtertyp für Stickstoffförderung von Pulver mit Gleichlaufgetriebe und einer Antriebs-Getriebestufe mit gekuppeltem Antriebsmotor, dessen Aufbau und Funktionsweise im Bild 8 dargestellt ist. Die Antriebsdrehzahl 2990 rpm = 49,83 Hz wird in der Zahnradstufe zum Hauptläufer auf 7831 rpm = 130,52 Hz übersetzt und zum Nebelläufer im Gleichlaufgetriebe und dem Schraubenverhältnis von 6 zu 4 auf 5221 rpm = 87,01 Hz.

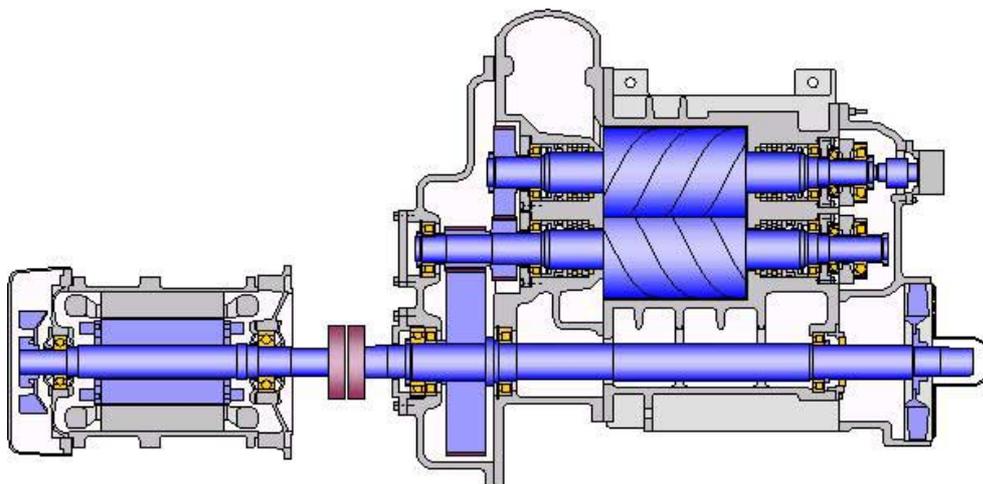


Bild 8: Aufbau und Funktionsweise des Stickstoffverdichters zur Pulverförderung, Draufsicht mit Übersetzungsstufe, Getriebewelle, Haupt- und Nebelläufer und dem Gleichlaufgetriebe

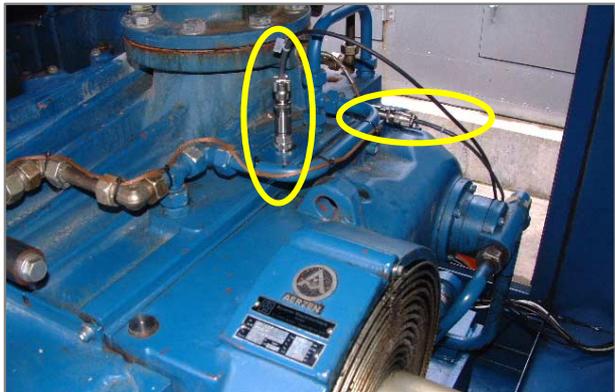


Bild 9a: Aufnehmer B-Seite radial horizontal und axial    Bild 9b: Aufnehmer B-Seite vertikal

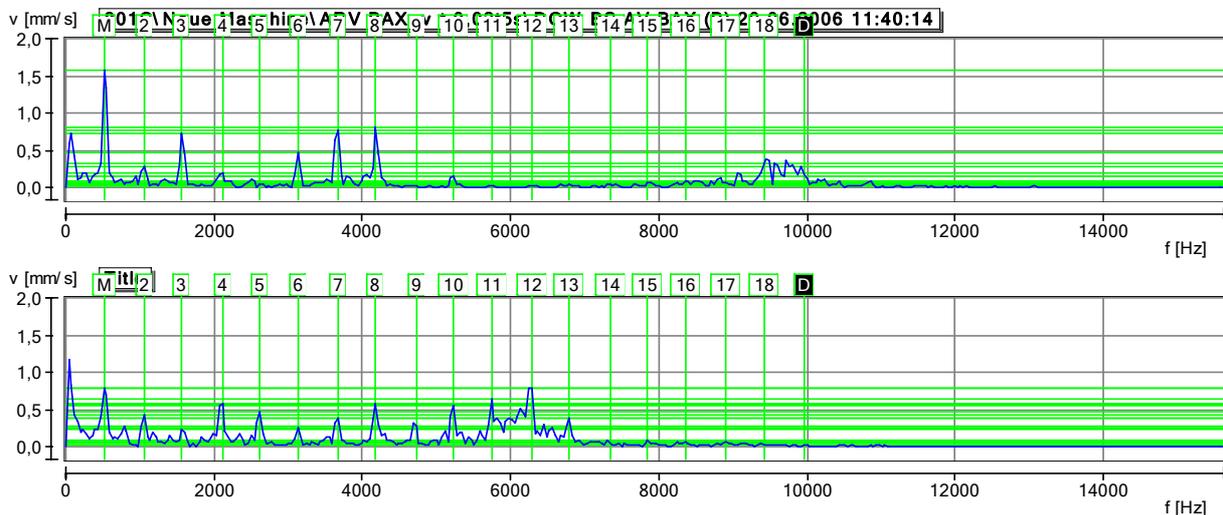


Bild 10: Geschwindigkeitsspektrum bis 10 kHz des Stickstoffverdichters – Vielfache der Ausstoßfrequenz bei 523 Hz oben am Hauptläufer radial vertikal an der Antriebsseite unten an B-Seite axial, mit mobilen Messsystem erfasst

Für Maschinentest-Zwecke wurde hier temporär ein VIBNODE Onlinesystem installiert, dass in Bild 9a bis 9c mit den Aufnehmern gezeigt wird. Auch hier liegt neben der 2. Ordnung ein Leistungsanteil der Schwingstärke bei der 7. Ordnung der Ausstoßfrequenz wie im Bild 10 sichtbar ist, was in diesem Fall in erweiterter Anwendung der o. g. VDI beachtet werden sollte. Bild 10 zeigt ein Ergebnis aus einer mobilen Messung mit Magnetankopplung mit Vielfachen der Ausstoßfrequenz radial bis zur 8. Ordnung und im Resonanzbereich bis zur 18. Ordnung und im unteren Graphen in axialer Richtung linear bis zur 8. und im Resonanzbereich bis zur 13. Ordnung.

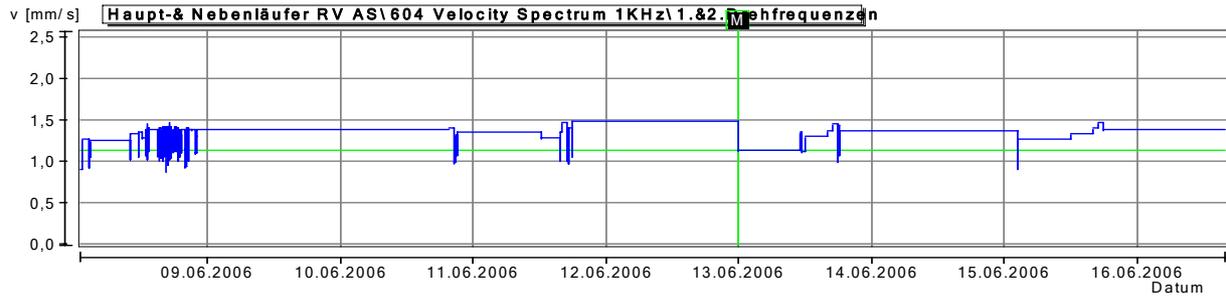


Bild 11a: Schwingstärke Drehfrequenzbereich B - radial vertikal an Antriebsseite

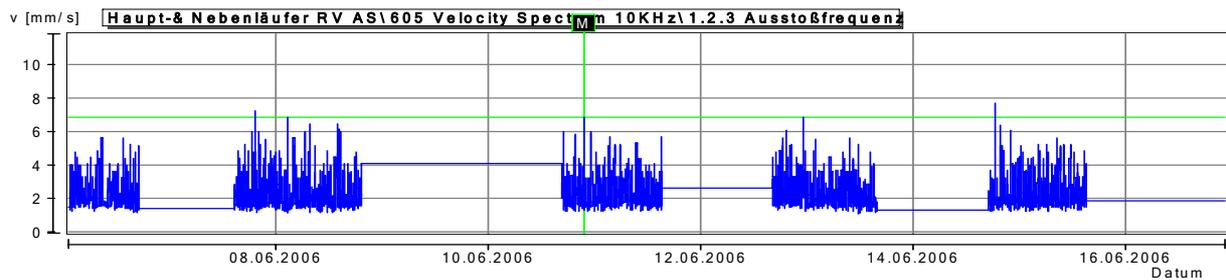


Bild 11b: Schwingstärke Ausstoßfrequenzbereich B- radial vertikal an Antriebsseite

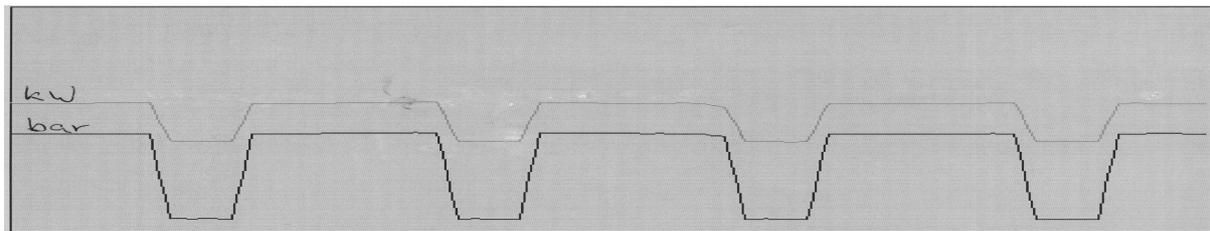


Bild 11c: Prozessdaten Leistung und Enddruck

In den Trendverläufen Bild 11 a und 11b zeigt sich ein niedriger Wert für den Frequenzbereich B mit 1,0 bis 1,5 mm/s und einen stark schwankenden Verlauf für den Bereich A mit 1,5 bis 7,5 mm/s. Beides wird für die weich aufgestellte Maschine in Gruppe 2 als für den Langzeitbetrieb zulässig bewertet. Die Ursache der Schwankung ist im Bild 11c sichtbar im Zyklusbetrieb und den Druckschwankungen von 3,1 min Leerlauf-Druck mit 0,17 bar bei 97 kW Leistung bis zu 9,1 min bei vollem Förderdruck bei 1,38 bar mit 137 kW sowie 0,6 min Druckanstieg und -abfall insgesamt über 60 min im Förderbetrieb. In Abhängigkeit des Druckes auch im Zusammenhang mit dem Anlagendruck schwankt entsprechend die Schwingstärke im Ausstoßfrequenzbereich. Eine Drucksteuerung der Messung war hier naturgemäß im Rahmen der temporären Überwachung nicht möglich.

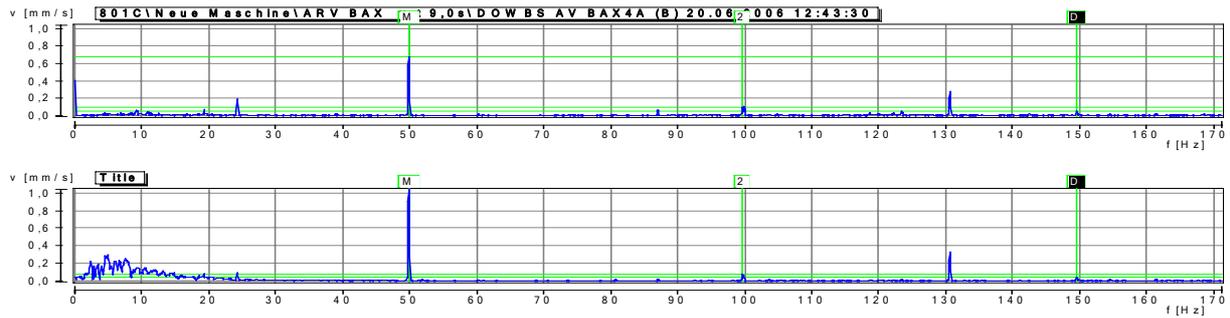


Bild 12a: Geschwindigkeitsspektrum bis 170 Hz mit den Drehfrequenzen Antriebs- Getriebewelle 49,88 Hz, Hauptläufer 130 Hz und Nebenläufer 87 Hz, an A-Seite des Hauptläufers oben radial vertikal, unten an B-Seite axial

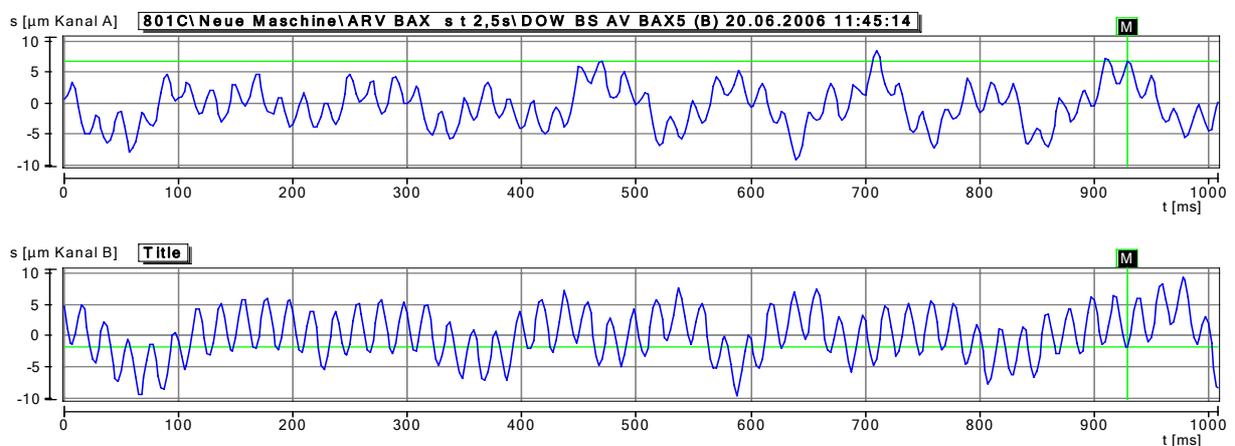


Bild 12 b: Zeitsignal Schwingweg bis 1000 ms in µm, an A-Seite des Hauptläufers oben radial vertikal, unten axial an B-Seite

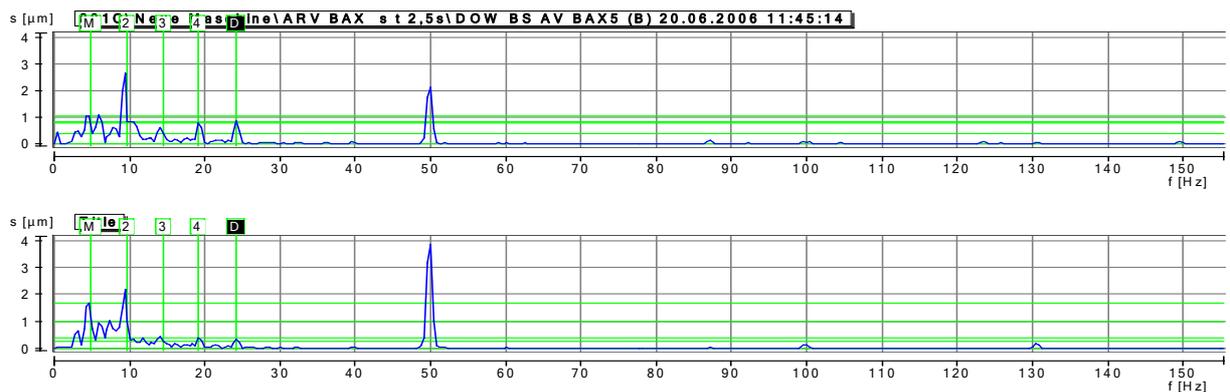


Bild 12c: Schwingwegspektrum bis 170 Hz aus 12b berechnet mit den Drehfrequenzen Antriebs-Getriebewelle 49,88 Hz, Hauptläufer 130 Hz und Nebenläufer 87 Hz sowie der Schwebungsfrequenz von 4,80 Hz, oben an A-Seite des Hauptläufers radial vertikal, unten axial an B-Seite

Der Drehfrequenzbereich des Verdichters wird in den Bildern 12 a bis 12 c hoch aufgelöst gezeigt. Die Drehfrequenz des Nebenläufers ist typischerweise nur mit geringem Pegel kaum erkennbar. Die Graphen 12 a und c zeigen nur geringe drehfrequente Anregungen. Niederfrequente Phänomene werden besser im Schwingweg wie im Bild 12 b und 12 c abgebildet, so um z.B. hörbare Schwebung im Verdichtungsprozess- oder Druckleitungssystem feststellen zu können.

## **2. Diagnose der Wälzlager, des Schraubeneingriffs- und Getriebe-Zahneingriffs**

Die Wälzlagerdiagnose sollte nach VDI 3832 [5] mit einem Signalplot der Schwingbeschleunigung aus hochfrequent abgetasteten Zeitsignal, Breitbandspektrum mindestens bis 10 kHz, Grundspektrum und Hüllkurvenspektrum erfolgen. Entsprechend ist dafür eine hochfrequent auswertbare Messkette von der Aufnehmerankopplung über den Aufnehmertyp bis zur Abtastrate hin einzusetzen, wofür entsprechende Hinweise auch in VDI 3839 Blatt 1 [3] und Blatt 2 [4] zu finden sind.

Für die Diagnose des Zahneingriffs- und Schraubeneingriffs sind prinzipiell die gleichen Signale im Plot verwendbar, wobei je nach Zahneingriffs- und Drehfrequenzen die Frequenzbereiche der Signale anzupassen sind. Zusätzlich wird hier ein hochfrequentes Geschwindigkeitssignal bis zu Vielfachen der Zahneingriffsfrequenz benötigt.

Bild 13a zeigt für das Beispiel 3 einen Stickstoffverdichter das hochfrequent abgetastete Zeitsignal, wobei oben das Signal auf der A-Seite vom Hauptläufer radial vertikal gezeigt wird und unten das Signal axial auf der B-Seite. Sichtbar ist hier in axialer Richtung die Modulation der elften Ordnung der Ausstoßfrequenz mit der Ausstoßfrequenz selbst. Diese relativ hohe Körperschallanregung mit einer hohen Harmonischen der Ausstoßfrequenz trat in der Überwachung auch mit dem Onlinesystem auch mit anderen wechselnden höheren Ordnungen der Ausstoßfrequenz temporär auf.

Wesentlich für eine Bewertung eines schadensfreien Zustandes ist hier das es keine ausgeprägten mechanische Resonanzgebiete im hochfrequenten Bereich erkennbar sind. Die Modulation mit der Ausstoßfrequenz ist in Bild 13 c und die mit der dazu überlagerten Drehzahl des Hauptläufers im Bild 13 d im Spektrum markiert.

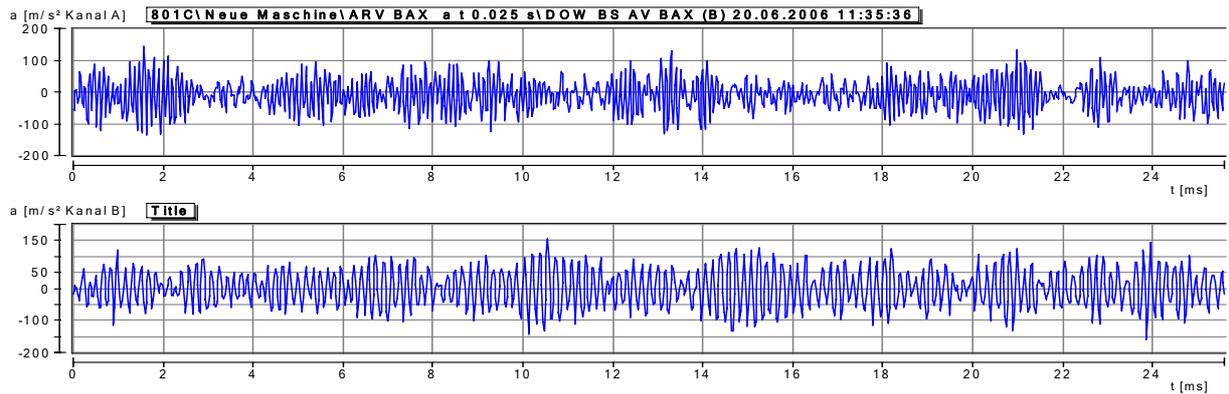


Bild 13a: Zeitsignal Schwing-Beschleunigung hochfrequent abgetastet bis 25 ms, an A-Seite des Hauptläufers oben radial vertikal, unten axial an B-Seite

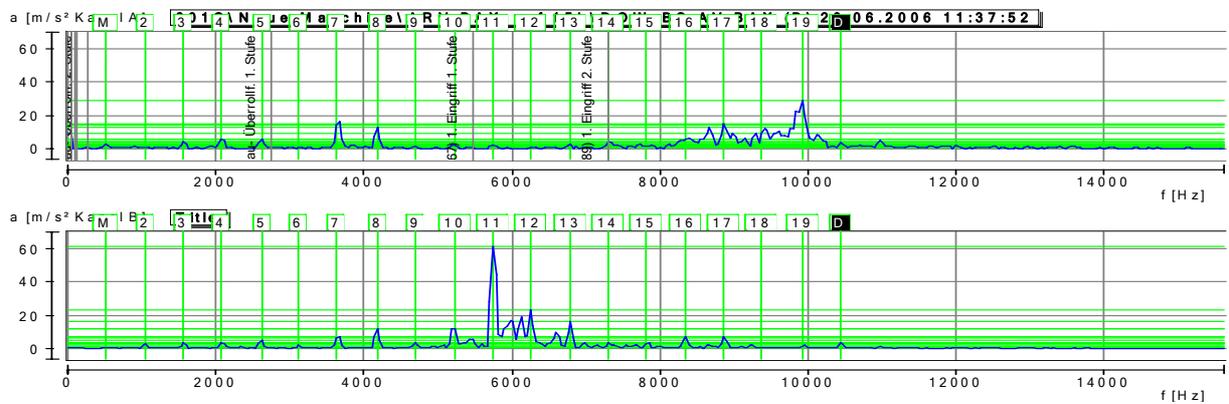


Bild 13b: Geschwindigkeitsspektrum bis 15 kHz aus 14a berechnet mit Vielfachen  $f_{Aus}$

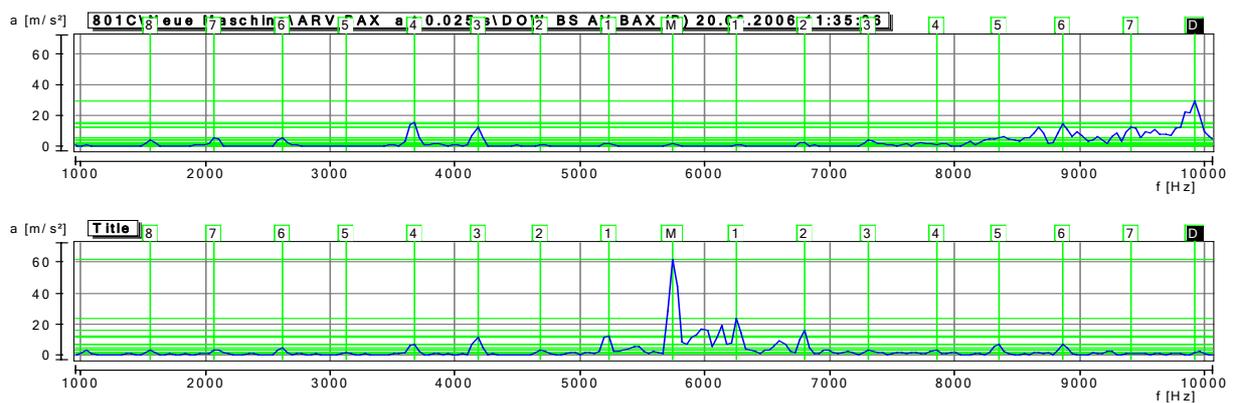


Bild 13c: Zoom im Bild 14b, axial bei der 11. Ordnung der Ausstoßfrequenz = 5742,19 Hz mit Seitenbändern  $f_{Aus} = 522,46$  Hz

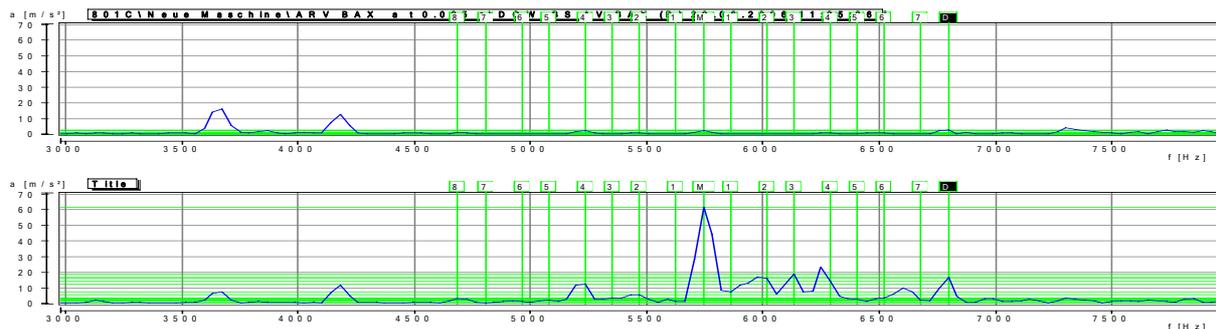


Bild 13d: Zoom im Bild 14b, axial bei 11.O.= 5742,19 Hz mit Seitenbändern  $f_{nHL} = 131,38$  Hz

Bild 14 zeigt den bei der Schwingstärke bereits ausgeführten Einfluss der Druckschwankung im Beispiel 3 auch hier in der Beschleunigung im Bereich 3 bis 10 kHz, was mit dem Druckverlauf im Bild 11c gut korreliert. Um hier einen typischen Körperschallkennwert überwachen zu können, muss der Enddruck mit erfasst werden.

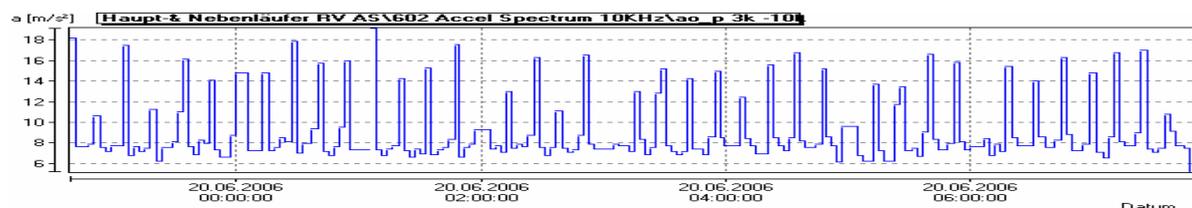


Bild 14: Schwankung der Schwingbeschleunigung im Bereich zwischen 3 und 10 kHz durch Druckschwankung zwischen Förderdruck 1,4 bar und Leelaufdruck 0,2 bar im Zyklus nach Bild 11c an A-Seite des Hauptläufers radial vertikal

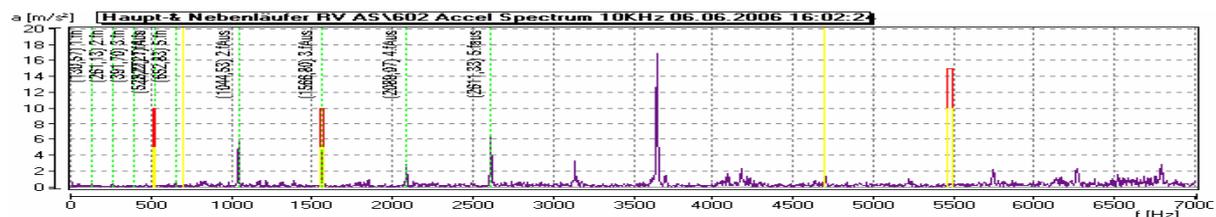


Bild 15: Verdichter an A-Seite HL radial vertikal, a(f) 1.-13.f Aus , 5. bei 6 m/s<sup>2</sup> 7. bei 17 m/s<sup>2</sup>

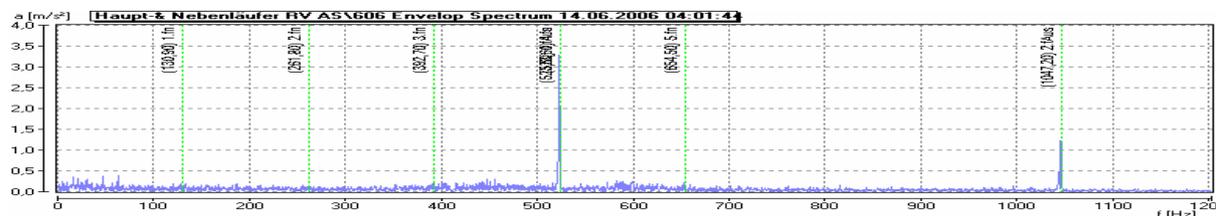


Bild 16: Verdichter an A-Seite des Hauptläufers radial vertikal, Hüllkurvenspektrum bis 1,2 kHz a HKD (f) 1.-2. f Aus; 1. bei 3,3 m/s<sup>2</sup> 2. bei 1,3 m/s<sup>2</sup>

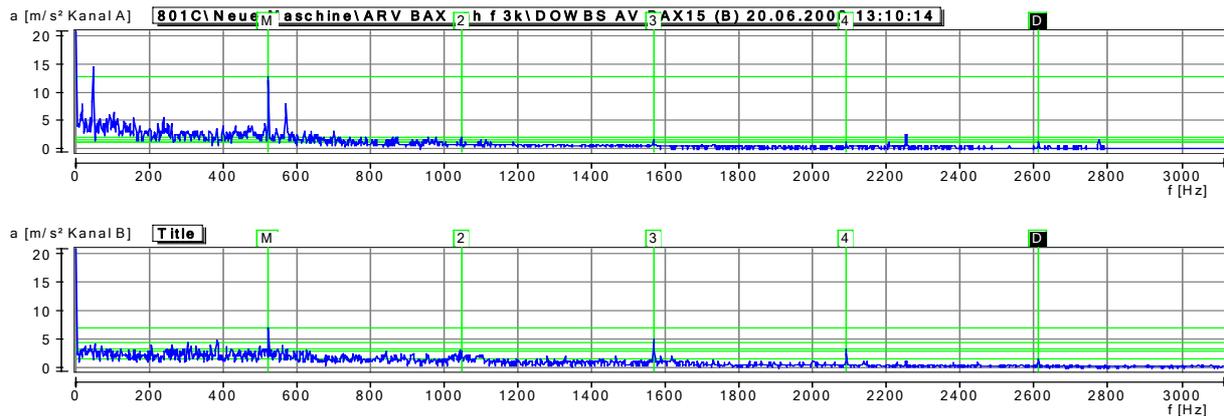


Bild 17: Grundspektrum bis 3,2 kHz, Verdichter des Hauptläufers, oben an A-Seite radial vertikal, unten axial an B-Seite, a (f) 1.-5. f Aus; 1. bei 13,3 m/s<sup>2</sup> 2. bei 2,0 m/s<sup>2</sup>

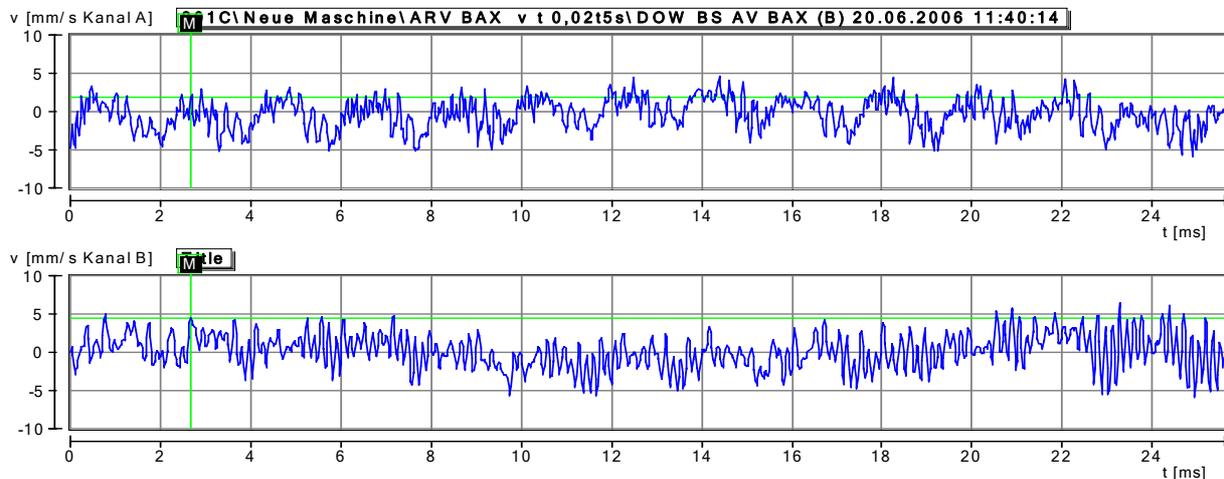


Bild 18a: Zeitsignal Schwing-Geschwindigkeit hochfrequent abgetastet bis 25 ms, an A-Seite des Hauptläufers oben radial vertikal, unten axial an B-Seite

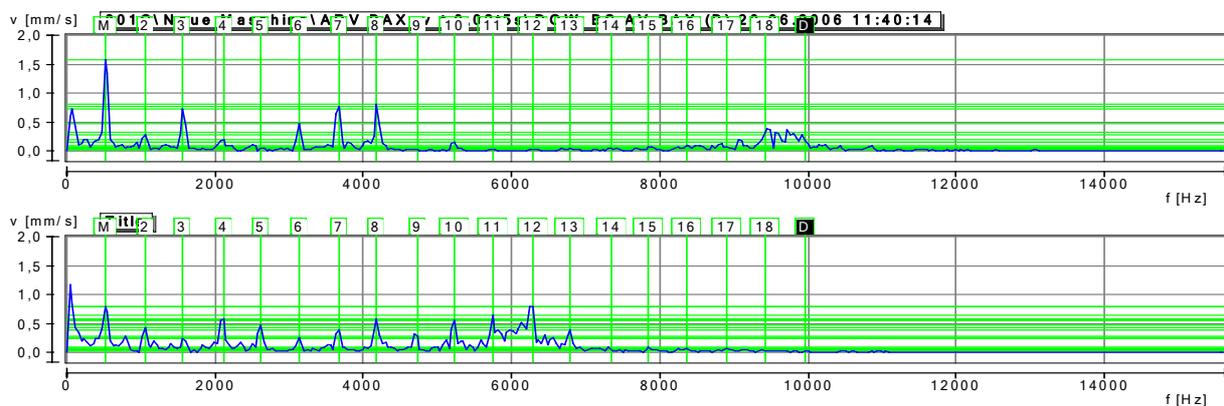


Bild 18b: Geschwindigkeitsspektrum bis 15 kHz aus 18a berechnet mit Vielfachen f Aus

Bild 15 und 17 des Grundspektrums und Bild 16 mit dem Hüllkurvenspektrum zeigen im

wesentlichen die Schadensfreiheit der Wälzlager, da die typischen Überrollfrequenzen der Wälzlager hier nicht detektierbar sind. Die hochfrequenten Stoßanregungen mit der Ausstoßfrequenz sind auch im Hüllkurvenspektrum als Demodulationen sichtbar.

Die Zahneingriffsfrequenzen sind ebenso nur mit sehr niedrigem Pegel in den vorherigen Signalen wie auch in den Geschwindigkeitsspektren 18 a und 18b vertreten, was ein Merkmal für eine Schadens- und Fehlerfreiheit der Zahneingriffe darstellt.

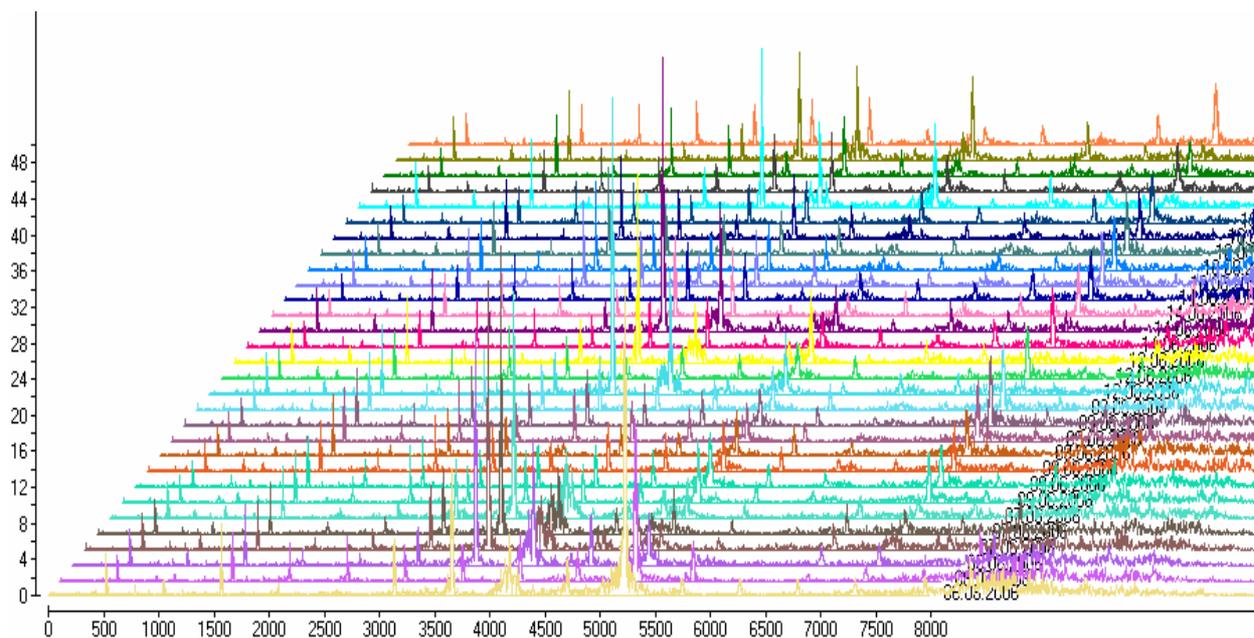


Bild 19: Beispiel 3, Stickstoffverdichter, Breitbandspektrum der Beschleunigung mit Effektivwerten  $a_{rms}$  16 bis 23  $m/s^2$  - B-Seite Hauptläufer radial vertikal – hier ein Signal pro Tag

Die Körperschallspektren des Stickstoffverdichters aus Beispiel 3 mit einem dargestellten Breitbandspektrum pro Tag von der B-Seite mit den Zahnradantrieben zeigen im Bild 19 eine deutlich höhere Variation in den Pegeln der Ordnungen der Ausstoßfrequenz als oben gezeigt in der Maschinenschwingung, wie es aber bei hochfrequenten Signalen typisch ist. Diese starke Variation schränkt die Aussagefähigkeit von mobilen Einmal-Messungen deutlich ein und muss ebenso in der Projektierung von Online-Überwachungen beachtet werden, in denen diese Variation erfasst werden kann.

### 3. Diagnose mit zusätzlichen Messungen

Weitere Diagnosemöglichkeiten an Schraubenverdichtern stellen Luftschallmessungen mit Messmikrofon, Motorstromanalysen mit Stromzange an den Stromphasen des Antriebsmotors und Signalmessungen des dynamischen Drucks mit Druckaufnehmern an der Druckleitung dar, die vorzugsweise parallel zu Körperschallmessungen ausgeführt werden.



Bild 20: Schallschutzgehäuse mit Onlinesystem und Messmikrofon zur mobilen Messung

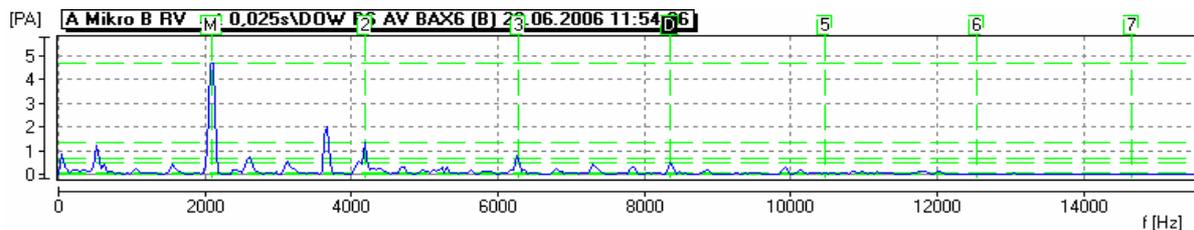


Bild 21a: Oben Schallpegelmessung, dominant Vielfache 4. Ordnung der Ausstoßfrequenz

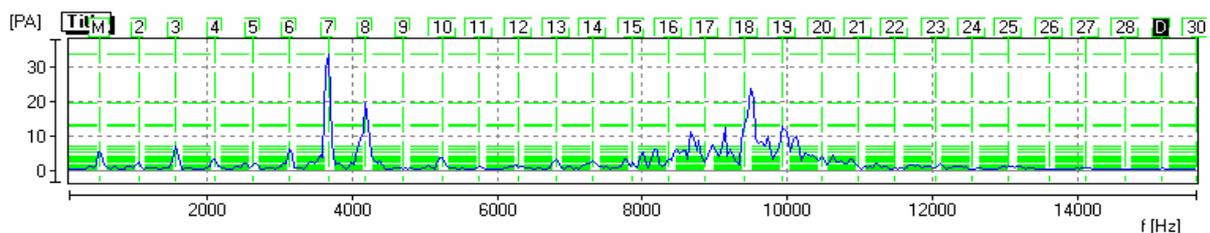


Bild 21b: synchron zu 21 a gemessene Beschleunigung an A-Seite des Hauptläufers vertikal

Bild 20 a zeigt die Befestigung des Messmikrofons zur Luftschallmessung zur mobilen Diagnosemessung und das VIBNODE- Onlinesystem für das Beispiel 2. Bild 21a zeigt oben die Luftschallpegelmessung mit den dominierenden Vielfachen der Ausstoßfrequenz, insbesondere der 4. Ordnung, die auch audio-akustisch dominierend wahrgenommen wird und die bis auf die 7. und 8. Ordnung etwas unterschiedlich zum unten abgebildeten Körperschallspekt-

rum sind. Die Unterschiede begründen sich in den in den Schall-Abstrahlungsphänomenen der Gehäuseflächen und in Auswirkungen der Schallschutz-kabine. Im Bild 21b werden in den Spektren aus 21a die dominante vierte Ausstoßfrequenz mit Seitenbändern der Ausstoßfrequenz selbst gezeigt.

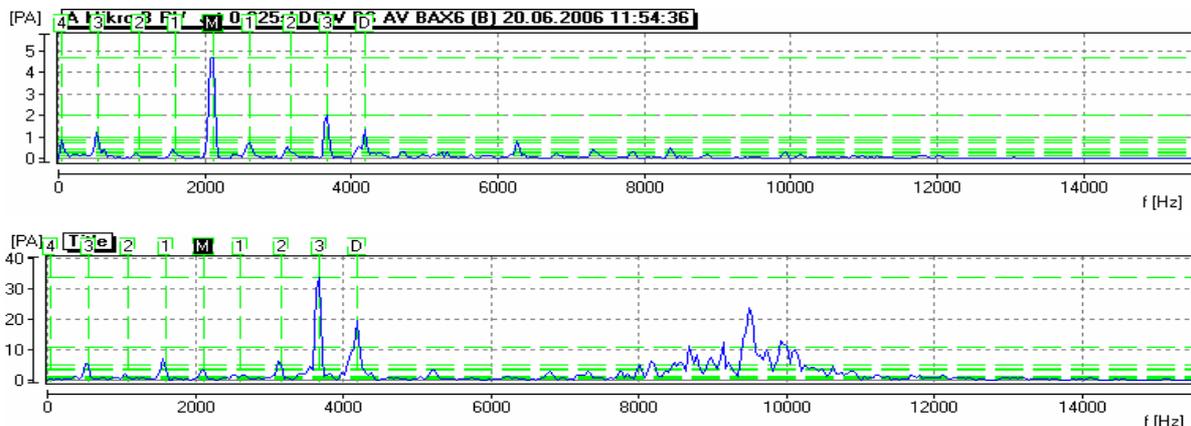


Bild 21c: Oben Schallpegelmessung, dominant 4. Ordnung der Ausstoßfrequenz – unten Beschleunigung an A-Seite des Hauptläufers radial vertikal

Bild 22a und 22b zeigt für Beispiel 1 ebenso das Breitbandbeschleunigungsspektrum im Vergleich zum Luftschallspektrum. Die oben genannten Phänomene sind hier trotz deutlich unterschiedlicher Verdichtertypen hier vergleichbar anzutreffen.

Insgesamt hat die Luftschallmessung einen integrierenden Charakter, womit gute Übersichtsbewertungen durchgeführt werden können und womit vor Ort beobachtete audioakustische Phänomene nachgewiesen und diagnostiziert werden können.

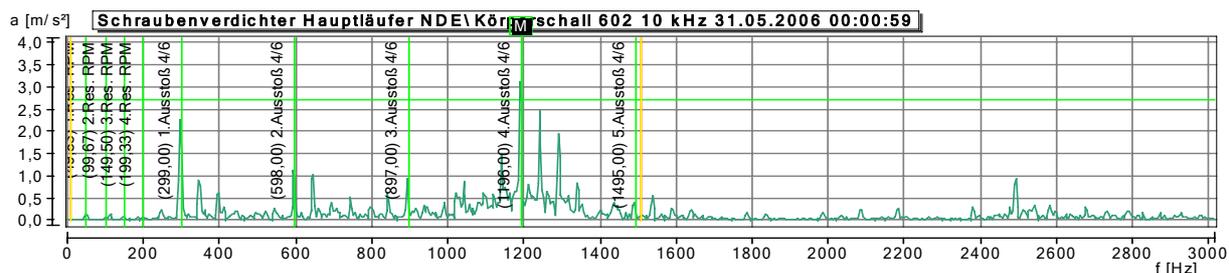


Bild 22a: Beispiel 1 Beschleunigungs- Breitbandspektrum mit Vielfachen der Ausstoßfrequenz und der Drehfrequenz Hauptläufer radial vertikal B-Seite

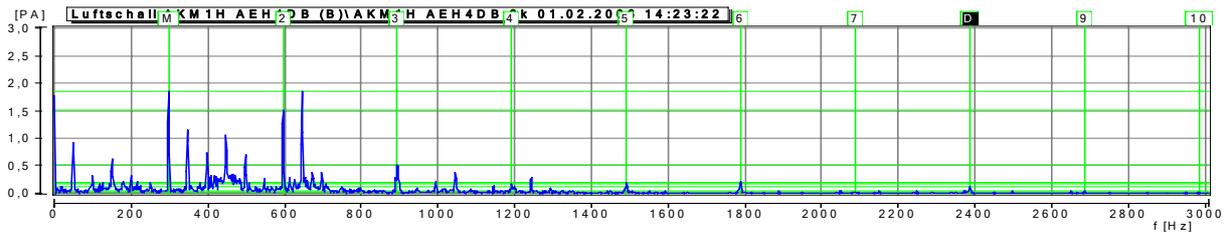


Bild 22b: Beispiel 1 Luftschallspektrum mit Vielfachen  $f$  Aus und Drehfrequenz Hauptläufer

Bild 22 c und d zeigen einen Vergleich des Beschleunigungs- Grundspektrums mit dem vom Druckaufnehmer aufgenommenen Spektrum an der Druckleitung des Verdichters aus Beispiel 1.

Der Druckaufnehmer liefert im wesentlichen nur die erste Ordnung der Ausstoßfrequenz, wobei aber hier direkt die Pulsation der Drucksäule des Verdichters überwacht werden kann.

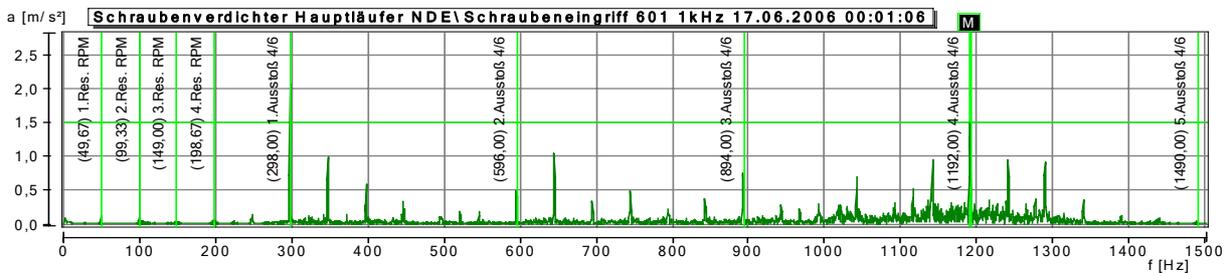


Bild 22c: Beispiel 1 Beschleunigungs- Grundspektrum mit Vielfache Ausstoßfrequenz und Drehfrequenz Hauptläufer radial vertikal B-Seite

$p_{dyn}$

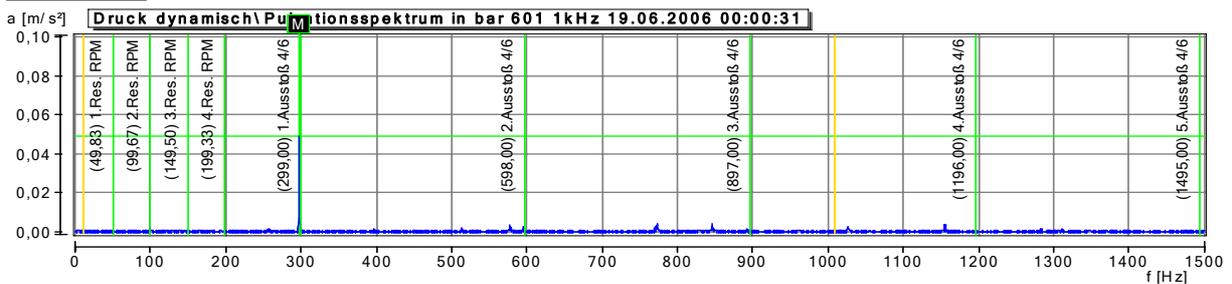


Bild 22d: Beispiel 1 Spektrum des dynamischen Drucks in Druckleitung mit Ausstoßfrequenz

#### 4. Literatur

- [1] VDI 3836 Entwurf Messung und Beurteilung mechanischer Schwingung von Schraubenverdichtern und Rootsgebläsen - Ergänzung von DIN ISO 10816-3; Ausgabe 2005-03
- [2] DIN ISO 10816-3: " Mechanische Schwingungen - 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", Ausgabe 1998-12
- [3] VDI 3839 Blatt 1: Hinweise zur Messung und Interpretation der Schwingungen von Maschinen - Allgemeine Grundlagen, Ausgabe 2001-03
- [4] VDI 3839 Blatt 2: Hinweise zur Messung und Interpretation der Schwingungen von Maschinen - Schwingungsbilder für Anregungen aus Unwuchten, Montagefehlern, Lagerungsstörungen und Schäden an rotierenden Bauteilen , Ausgabe 2001-06
- [5] VDI 3832 Entwurf: " Schwingungs- und Körperschallmessung zur Zustandsbeurteilung von Wälzlagern in Maschinen und Anlagen", Ausgabe 2005-01