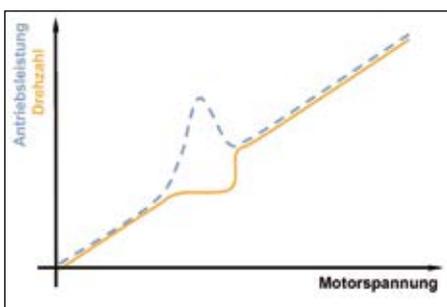


Der Sommerfeld-Effekt Energiesparen durch Schwingungsminimierung

Arnold Sommerfeld (1868-1951) war ein theoretischer Physiker, der vielen Ingenieuren durch seine Arbeiten über Gleitlagerungen bekannt ist (Sommerfeldzahl).

Im Jahr 1901 führte Sommerfeld einem erstaunten Fachpublikum ein kleines Experiment vor: Auf einer biegeweichen Tischplatte montierte er einen Elektromotor mit Unwucht. Diesen Motor konnte er durch einen Spannungsregler in der Drehzahl verfahren. Sommerfeld hatte die Aufstellung so gewählt, dass eine Resonanz im Anregungsbereich der Unwucht vorhanden war. Als nun die Motorspannung kontinuierlich erhöht wurde, konnte man einen besonderen Effekt beobachten (siehe Abbildung): Zunächst stiegen Drehzahl und Antriebsleistung mit der Spannung an. Im Bereich der Resonanz verharrte das System in der Drehzahl, während die Antriebsleistung überproportional anstieg. Motor und Platte begannen deutlich zu schwingen. Oberhalb der Resonanzfrequenz schien die Drehzahl sprunghaft auf ein Niveau zu wechseln, wie es ohne Resonanz erwartet werden konnte.



▲ Abbildung: Antriebsleistung und Drehzahl eines Motors mit Unwucht in Abhängigkeit der Motorspannung bei Resonanzaufstellung

Der Sommerfeld-Effekt wurde von uns auch auf dem 17. Workshop Kolbenverdichter 2013 vorgeführt. Warum begeistert dieses Experiment damals wie heute die Ingenieure? Überträgt man dieses Verhalten auf eine reale technische Maschine, kann man zum einen festhalten, dass der Betrieb in einer Aufstellungsresonanz mit erhöhten mechanischen Schwingungen verbunden ist. Die-

se stellen eine Belastung beispielsweise für die Wellenlager dar und führen zu einem erhöhten Verschleiß. Darüber hinaus zeigt dieser Versuch deutlich, dass man das Übel erhöhter Schwingungen auch noch teuer bezahlen muss, da ein Teil der Antriebsleistung nicht in die gewünschte Rotation der Welle überführt wird, sondern der Aufrechterhaltung der Schwingung dient.

**Auf der Grundlage von 2.000 Voll-
laststunden und einem
angenommenen Strompreis von
150 €/MWh liegt der finanzielle Vorteil
bei 30.000 € in einem Jahr.**

Wie deutlich dieser Nutzleistungsverlust ausfallen kann, demonstrierte eindrucksvoll ein aktuelles Projekt an einer Erdgasverdichteranlage: Ein neu errichteter Kolbenverdichter war hier auf einem Fundament aufgestellt worden, bei dem die erste Eigenfrequenz durch den Betrieb des drehzahlfesten Verdichters angeregt wurde. In der Konsequenz der erhöhten Fundamentalschwingungen wurden ganze Gebäude im Umfeld angeregt. Eine kombinierte messtechnisch-theoretische Untersuchung zeigte die Minderungsmöglichkeiten durch eine Fundamentsanierung auf. Nachdem diese abgeschlossen war, erfolgte die Bestimmung des Leistungsbedarfs des Motors vor und nach der Sanierungsmaßnahme. Bei einer Nennleistung von ca. 4,2 MW ist hier durch die Optimierung der Aufstellung ein Rückgang der erforderlichen Antriebsleistung von ca. 100 kW festgestellt worden. Auf der Grundlage von 2.000 Volllaststunden und einem angenommenen Strompreis von 150 €/MWh liegt der finanzielle Vorteil bei 30.000 € in einem Jahr.

Sollten Sie die Schwingungen am Fundament Ihrer Maschine jetzt mit anderen Augen sehen, dann rufen Sie uns gerne an.

Dr.-Ing. Christian Jansen
christian.jansen@koetter-consulting.com

Schlüsselübergabe

Lenz: Lieber Herr Kötter, mit Bedauern haben wir Sie Anfang des Jahres in den wohlverdienten Ruhestand verabschieden müssen. Für diesen neuen Lebensabschnitt wünschen wir Ihnen alles Gute!

Kötter: Als Inhaber eines Unternehmens, das man gegründet, fast 36 Jahre lang geführt und gestaltet hat, fiel diese Entscheidung zwar nicht ganz leicht, aber sie wird ja in guten Händen weitergeführt.

Lenz: Wir wissen, dass Sie gerne Golf spielen. Werden Sie die freie Zeit nutzen, um Ihr handicap noch weiter zu verbessern?

Kötter: Naja, jeder erreicht auch hier irgendwann seine natürliche Leistungsgrenze. Aber ich werde mir einige aufgeschobene Wünsche erfüllen und mehr Zeit mit der Familie verbringen. Bestimmt schaue ich auch bei KÖTTER Consulting Engineers von Zeit zu Zeit auf einen Kaffee vorbei. Bedanken möchte ich mich bei den Mitarbeitern: Sie sind ein wundervolles Team. Vor allem möchte ich mich aber bei unseren Kunden für die langjährige, gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit bedanken. Ihnen, Herr Dr. Lenz und Frau Grobosch als den beiden langjährigen Geschäftsführern, wünsche ich ein weiterhin glückliches Händchen in der erfolgreichen Weiterführung des Unternehmens.

Lenz: Herzlichen Dank Herr Kötter. Alles Gute für Ihre weitere Zukunft!



Dipl.-Ing.
Erwin W. Kötter



Dr.-Ing. Johann Lenz

▶▶▶ INHALT ▶▶▶

- ▶ Der Sommerfeld-Effekt
- ▶ Rohrleitungsschwingungen effizient reduziert
- ▶ Schwingungsprobleme an einem Gebläseantriebsmotor
- ▶ Akustische Quer- und mechanische Schalenmoden in Rohrleitungen
- ▶ Auflösung "Good Vibrations-Rätsel"
- ▶ Termine der KCE-Akademie

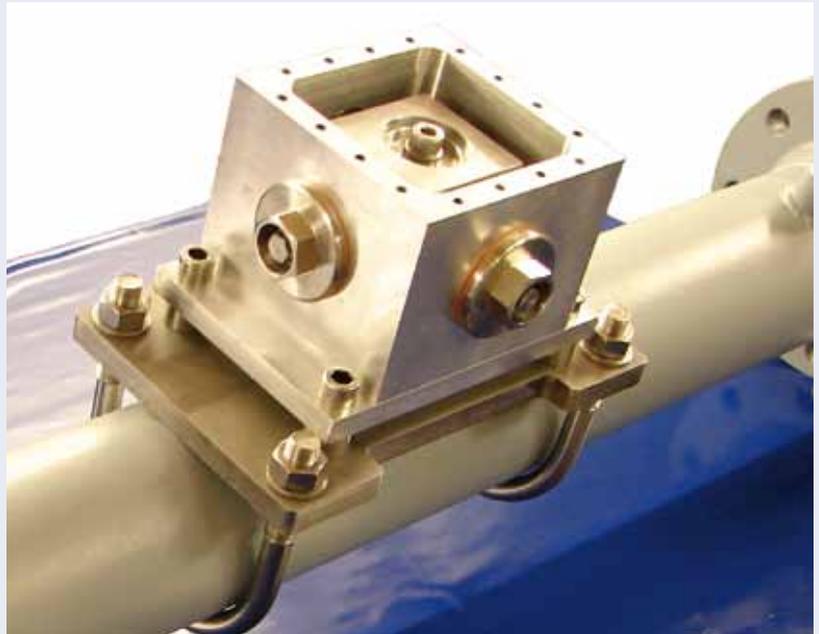
Rohrleitungsschwingungen effizient reduziert

Bei der Neuinbetriebnahme einer Kolbenverdichteranlage (zwei baugleiche, vertikale Kolbenverdichter) zur Beimischung von Luft zu hochkalorischem Erdgas wurden an den unmittelbar an die 4. Stufe angrenzenden Rohrleitungen erhöhte Schwingungen an beiden Verdichtern festgestellt. Die ermittelten effektiven Schwinggeschwindigkeiten lagen in Abhängigkeit von der Betriebsdrehzahl bei bis zu 195 mm/s. Als kurz-

Einzelne Drehzahlbereiche wurden als kurzfristige Minderungsmaßnahme gesperrt.

fristige Minderungsmaßnahme zur Aufrechterhaltung des Verdichterbetriebs wurden daher einzelne Drehzahlbereiche gesperrt. Mittelfristig waren konstruktive Minderungsmaßnahmen für einen dauerhaften Betrieb der Anlage jedoch unabdingbar.

Eine detaillierte Analyse der aufgezeichneten Messergebnisse offenbarte eine strukturmechanische Eigenfrequenz des Rohrleitungsabschnitts bei beiden Verdich-



▲ Abbildung 1: Schwingungstilger Magic Cube



▲ Abbildung 2: Vergleich der eff. Schwinggeschwindigkeiten vor und nach der Tilgerinstallation

tern als wesentliche Schwingungsursache. Aufgrund der variablen Betriebsdrehzahl und der besonders schwach ausgeprägten Dämpfung des Rohrleitungsabschnitts bietet sich der Einsatz eines Schwingungstilgers als eine besonders effiziente Minderungsmaßnahme für diesen Anwendungsfall an. Dementsprechend sollte hier der von KÖTTER Consulting Engineers (KCE) patentierte Schwingungstilger Magic Cube

zum Einsatz kommen, Abbildung 1.

Nach der Auslegung des Tilgers wurde im Labor von KCE eine Detailanpassung durchgeführt. Vor Ort wurde im Rahmen einer messtechnischen Untersuchung die Dämpfung des Tilgers optimiert. Der Vergleich der effektiven Schwinggeschwindigkeiten der Rohrleitung in horizontaler Richtung vor und nach Installation der Installation des Magic Cube bestätigt den Erfolg der Minderungsmaßnahme, Abbildung 2.

M.Sc. Patrick Tetenborg
patrick.tetenborg@koetter-consulting.com

Schwingungsprobleme an einem Gebläseantriebsmotor

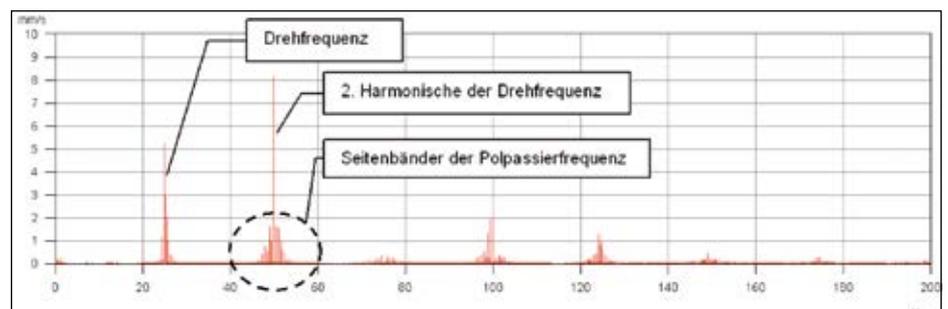
An dem Elektromotor (2.000 kW, 1.490 min⁻¹, 4-polig) eines Radialgebläses zur Bereitstellung von Luft für eine Crackeranlage traten nach einem Anlagenstillstand niederfrequente Geräusche und Schwingungen auf. KÖTTER Consulting Engineers wurde beauftragt, die Ursache für dieses Schwingungs-

phänomen zu ermitteln. In einem ersten Schritt wurde die Schwingungssituation an der Gebläseanlage mit mehreren Sensoren zeitsynchron erfasst. Der Vergleich mit den geltenden Richtwerten am Elektromo-

tor zeigte eine deutliche Überschreitung. Schäden am E-Motor konnten nicht ausgeschlossen werden. Zur Klärung der Ursache wurde u.a. eine hochauflösende Frequenzanalyse durchgeführt. Abbildung 1 zeigt das Spektrum der gemessenen Schwinggeschwindigkeit am Motorlager für den Frequenzbereich von 0 Hz bis 200 Hz. Markant sind die vorhandenen Seitenbänder der Polpassierfrequenz neben der Drehfrequenz sowie deren Harmonischen. Die höchsten Amplituden treten bei der doppelten Dreh-

Der Frequenzverlauf deutet darauf hin, dass nicht alle Rotorstäbe voll funktionsfähig sind.

tor zeigte eine deutliche Überschreitung. Schäden am E-Motor konnten nicht ausgeschlossen werden. Zur Klärung der Ursache wurde u.a. eine hochauflösende Frequenzanalyse durchgeführt. Abbildung 1 zeigt das Spektrum der gemessenen Schwinggeschwindigkeit am Motorlager für den Frequenzbereich von 0 Hz bis 200 Hz. Markant sind die vorhandenen Seitenbänder der Polpassierfrequenz neben der Drehfrequenz sowie deren Harmonischen. Die höchsten Amplituden treten bei der doppelten Dreh-

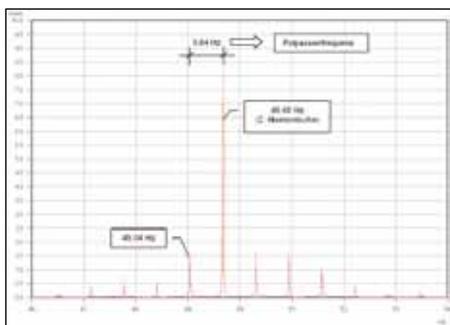


▲ Abbildung 1: Spektrum der Schwinggeschwindigkeit am Motorlager

Fortsetzung von Seite 2 ▶

frequenz auf. Der Frequenzbereich um die 2. Harmonische ist vergrößert in der Abbildung 2 dargestellt.

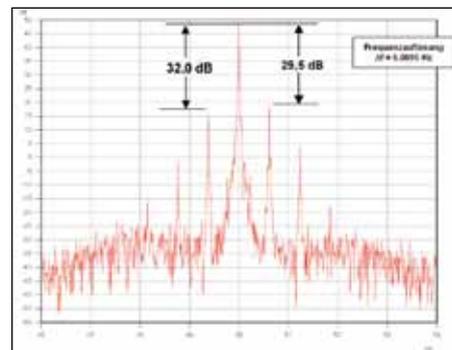
Neben der Drehzahlharmonischen von $f = 49,68 \text{ Hz}$ tritt mit kleinerer Amplitude die Polpassierfrequenz mit deren Harmonischen auf. Der Frequenzverlauf deutet darauf hin, dass nicht alle Rotorstäbe voll funktionsfähig sind. So generieren z. B. angebrochene Rotorstäbe Seitenbänder der



▲ Abbildung 2: Schmalbandanalyse im Bereich von 46 Hz bis 54 Hz

Polpassierfrequenz bei der Drehfrequenz sowie deren Harmonischen ($2x$, $3x$, $4x$ etc.). Als weiteres Indiz zeigt die Frequenzanalyse eine Amplitudenerhöhung bei der Rotorstabpassierfrequenz mit Seitenbändern der doppelten Netzfrequenz (hier nicht dargestellt), was auf das Vorhandensein von lockeren Rotorstäben hindeutet. Zur weiteren Überprüfung des Zustands der Rotorstäbe wurde eine Messung und Analyse des Motorstroms durchgeführt. Verglichen wird die Amplitude der Netzfrequenz mit der Amplitude der Seitenbänder (in dB). Die Abbildung 3 zeigt das Frequenzspektrum des Motorstroms für den Frequenzbereich 46 Hz bis 54 Hz.

Aus wissenschaftlichen Untersuchungen ist bekannt, dass der Zustand eines Rotors von Elektromotoren über die Information der Pegeldifferenz (in dB) zwischen der Amplitude der Netzfrequenz und der Amplitude der benachbarten Polpassierfrequenzen abgeschätzt werden kann. Die hier ermittelten Pegeldifferenzen von



▲ Abbildung 3: Vergleich der Amplitude der Netzfrequenz mit der Amplitude der Seitenbänder (links)

29,5 dB bzw. 32,0 dB deuten auf massive Schäden am Rotor hin. Aus diesem Grund wurde eine kurzfristige Überprüfung des Rotorzustandes empfohlen. Dabei wurde unter anderem festgestellt, dass der Kurzschlussring des Rotors komplett in axialer Richtung gerissen war, was das Ergebnis der messtechnischen Untersuchung bestätigte.

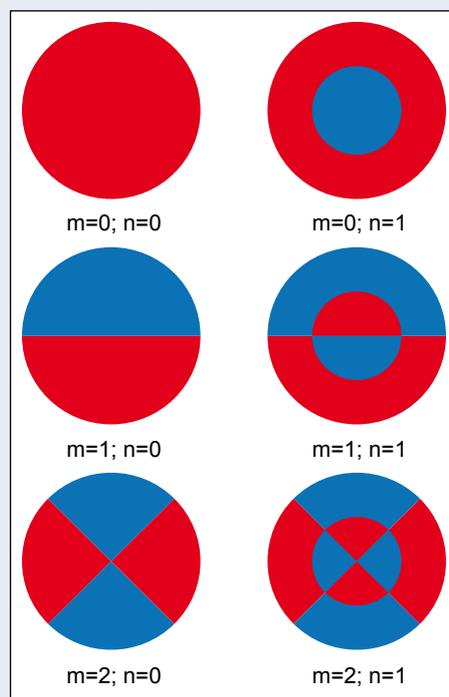
Dipl.-Ing. Patrick Waning
patrick.waning@koetter-consulting.com

Akustische Quer- und mechanische Schalenmoden in Rohrleitungen

Rohrleitungssysteme transportieren Gase und Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Temperaturen, Drücken und Fließgeschwindigkeiten. Druckpulsationen werden z.B. durch den Einsatz von Verdichtern erzeugt und breiten sich über große Entfernungen in der Rohrleitung aus. Bei hohen Pulsationsfrequenzen, wie sie beispielsweise von einem Schraubenverdichter erzeugt werden, ist es möglich, dass die Rohrleitungsschale bzw. -wand zu Schwingungen angeregt wird und sehr schmalbandige und hochfrequente Einzeltöne als Luftschall abstrahlt. Dieser Prozess wird hier näher erläutert.

Durch hohe Pulsationsfrequenzen kann es zu Oberflächenschwingungen der Rohrleitungen kommen, die hochfrequente Einzeltöne als Luftschall abstrahlen.

Tieffrequente Druckpulsationen mit einer großen Wellenlänge breiten sich in der Rohrleitung als ebene Welle aus. Akustische Wellen mit Wellenlängen kleiner als der Durchmesser der Rohrleitung können sich auch quer zur Strömungsrichtung ausbilden und an den Rohrleitungswänden reflektiert werden. Durch die Interferenz zwischen der radial hin- und rücklaufenden Schallwelle entstehen sogenannte Quermoden. In Abbildung 1 sind unterschiedliche Druckverteilungen über dem Querschnitt der



▲ Abbildung 1: Schematische Darstellung akustischer Quermoden mit radialen Knotenlinien m und kreisförmigen Knotenlinien n .

Rohrleitung schematisch dargestellt. Die erste Reihe zeigt die Druckverteilung bei Moden mit nur radialen Knotenlinien m und in der zweiten Reihe kommen kreisförmige Knotenlinien n hinzu.

Die strukturmechanischen Eigenschwingungen der Rohrleitungswand werden als me-

chanische Schalenmoden bezeichnet. Sie können sich sowohl in Rohrleitungsrichtung als auch kreisförmig über den Querschnitt der Rohrleitung ausbilden. Die Eigenfrequenzen dieser Schwingungen hängen von den geometrischen Abmessungen und den Materialeigenschaften des Rohres ab. In Abbildung 2 sind vier mechanische Schalenmoden über den Knotenparameter i schematisch dargestellt.

In der Praxis treten oft laute Einzeltöne bei einer Koinzidenz zwischen den akustischen Quermoden und den mechanischen Schalenmoden auf, die durch hochfrequente Pulsationsfrequenzen angeregt werden können. Eine Koinzidenz liegt vor, z.B. wenn eine akustische Quermode mit einer mechanischen Schalenmode zusammentrifft. Hochfrequente Pulsationsfrequenzen werden, wie bereits erwähnt, z.B. durch Schraubenverdichter erzeugt.

Maßnahmen

Die Koinzidenz zwischen den akustischen Quermoden und den mechanischen Schalenmoden sollte bei Rohrleitungen und Behältern vermieden werden, da hierbei neben unangenehmen akustischen Effekten auch erhöhte Materialspannungen auftreten. Hierzu kann bereits im Vorfeld eine Berechnung sowohl der akustischen als auch der mechanischen Schwingformen und -frequenzen erfolgen. Mögliche Minde-

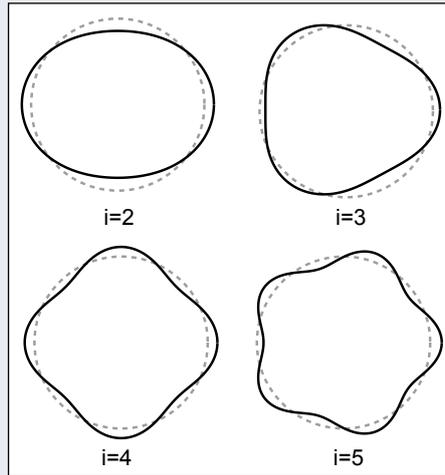
Fortsetzung Seite 4 ▶

Fortsetzung von Seite 3 ▶

rungsmaßnahmen, wie z.B. der Einbau von speziellen Bauteilen oder eine Aussteifung der Behälter- oder Rohrleitungswände, lassen sich so in der Planungsphase einarbeiten. Aufwendige Umbauten der Rohrleitungen, die meist mit einem Anlagenstillstand verbunden sind, können somit vermieden werden. Jedoch ist auch nachträglich der Einsatz von bestimmten Maßnahmen noch möglich, z.B. wenn bei bestehenden Anlagen unerwartet Resonanzprobleme durch die Änderung von Betriebsbedingungen auftreten.

Wenn Sie Fragen haben, nehmen Sie gerne Kontakt mit uns auf.

Dipl.-Ing., M.Sc. Timm Schaer
timm.schaer@koetter-consulting.com



▲ Abbildung 2: Schematische Darstellung mechanischer Schalenmoden über dem Knotenparameter i .

Auflösung „Good Vibrations-Rätsel“

Zur Good Vibrations Jubiläums-Ausgabe 2013 haben uns zahlreiche Zuschriften und Rückmeldungen erreicht. Über die rege Teilnahme an unserem Good Vibrations-Rätsel, bei dem es ein iPad zu gewinnen gab, haben wir uns sehr gefreut. Gesucht wurde das Lösungswort „RHEINE“!

Der glückliche Gewinner wurde aus den korrekten Einsendungen im Rahmen unserer Weihnachtsfeier ermittelt. Im Januar 2014 konnten wir ihm seinen Preis in Übach-Palenberg überreichen. **Wir gratulieren Herrn Klaus Lückge, Neuman & Esser, ganz herzlich und wünschen ihm viel Freude mit seinem neuen iPad.**

Die nächste Gelegenheit, ein iPad zu gewinnen, haben die Teilnehmer unseres Workshops Gasmengenmessung, der am 26. und 27. März 2014 in Rheine stattfindet.



▲ Abbildung: Heike Nyhuis, KÖTTER Consulting Engineers und Klaus Lückge, Neuman & Esser

Termine KCE-Akademie

SEMINAR & WORKSHOP in Kooperation mit



Durchfluss- und Mengemessung in Rohrleitungen

am 25. März 2014

Referenten: Dr.-Ing. Christian Jansen
und Prof. Dr.-Ing. Andreas Brümmer
KCE-Akademie, Rheine

7. Workshop Gasmengenmessung Gasanlagen, Gastechnik

am 26. und 27. März 2014

KCE-Akademie, Rheine

EMAUG 2014

am 17. und 18. Februar 2014

Die European Modal Analysis User Group trifft sich in der KCE-Akademie in Rheine.

Technische Akustik Teil I+II

Seminar am 19. und 20. März 2014

Referent: Dipl.-Ing. Arno Schällig
KCE-Akademie, Rheine

Schwingungen und Pulsationen in Kolbenkompressorsystemen

Seminar am 2. April 2014

Referent: Dr.-Ing. Jan Steinhausen
KCE-Akademie, Rheine

Besuchen Sie uns auf diesen Fachtagungen

Torsional Vibration Symposium

vom 21. bis 23. Mai 2014
in Salzburg

KCE-Vortrag über „Experience with torsional vibration measurements and calculations of reciprocating compressors“ sowie KCE-Ausstellungsstand

VDI-Tagung Schwingungsüberwachung 2014

am 20. und 21. Mai 2014
in Leonberg

KCE-Vortrag über „Schwingungsreduzierung durch gezielte Verdichterabstimmung“

KÖTTER Consulting Engineers GmbH & Co. KG

Bonifatiusstraße 400
D-48432 Rheine
Tel. +49 5971 9710-0
Fax +49 5971 9710-43
E-Mail: info@koetter-consulting.com

Handelsregister Steinfurt HRA 4948
Ust-IDNr.: DE 814 561 321
Komplementär:
KÖTTER Consulting Engineers Verw.-GmbH
Geschäftsführer: Margret Grobosch, Dr.-Ing. Johann Lenz

www.koetter-consulting.com

KÖTTER Beratende Ingenieure Berlin GmbH

Balzerstraße 43
D-12683 Berlin
Tel. +49 30 526788-0
Fax +49 30 5436016
E-Mail: berlin@koetter-consulting.com

Handelsregister Berlin HRB-Nr. 44230
Ust-IDNr.: DE 157 53 44 94
Geschäftsführer: Dipl.-Ing. Bernd Fleischer

www.kbi-berlin.de

