

Erfolgreiche Inbetriebnahme einer Turboverdichteranlage

Zur Anpassung der Druckverhältnisse in einer neuen GuD-Anlage, wurde im Zuge der Erweiterung eines norddeutsche Gaskraftwerkes der Bau einer Verdichterstation geplant. Mit zwei magnetgelagerten Turboverdichtern wird hier bei einer Drehzahl von bis zu 11.400 1/min auf einen maximalen Förderdruck von 100 bar Erdgas in einem angeschlossenen Röhrenspeicher verdichtet. Beide Turboverdichter besitzen zwei Stufengruppen und können sowohl 1-stufig als auch 2-stufig gefahren werden.

Um bereits in der Planungsphase alle Voraussetzungen für eine reibungslose Inbetriebnahme der Verdichterstation zu schaffen, wurde KÖTTER Consulting Engineers (KCE) beauftragt, eine Pulsationsstudie durchzuführen. Dazu wurde in einem ersten Schritt das Rohrleitungssystem in einem akustischen Berechnungsmodell abgebildet. Die Ergebnisse der akustischen Berechnungen zeigten, dass es bei verschiedenen Betriebsfällen zu einer Überlagerung von Wirbelablösefrequenzen an nicht durchströmten Rohrleitungsbereichen (z. B. geschlossenen Bypässe etc.) mit akustischen Eigenformen des Rohrleitungssystems kommt. Durch diese Resonanzen werden Druckpulsationen im Anlagensystem verursacht, die ihrerseits zu überhöhten Rohrleitungsschwingungen und einer negativen Beeinflussung des Betriebsverhaltens der Verdichter führen können.

Um den Einfluss der Druckpulsationen auf das Rohrleitungssystem zu bewerten, wurden in einem weiteren Schritt die zu erwartenden Rohrleitungsschwingungen bei

Betrieb der Anlage durch eine Betriebschwingungsanalyse ermittelt. Dazu wurde ein strukturmechanisches FEM-Berechnungsmodell des Rohrleitungssystems erstellt und die Kräfte infolge von Druckpulsationen auf dieses aufgebracht. Die Berechnungen zeigten, dass für bestimmte Betriebsfälle mehrere Rohrleitungsbereiche zu unzulässig hohen mechanischen Schwingungen angeregt wurden. Die ebenfalls durchgeführte Bewertung der berechneten Druckpulsationen in Bezug auf das Betriebsverhalten der Verdichter zeigte, dass hier weitestgehend keine negativen Beeinflussungen zu erwarten sind.

Zur Vermeidung erhöhter mechanischer Rohrleitungsschwingungen empfahl KCE eine Kombination aus akustischen und mechanischen Maßnahmen. So wurde beispielsweise ein Ventil versetzt, um die akustische Länge des Rohrleitungsabschnittes zu reduzieren. Hierdurch wurde eine Erhöhung der akustischen Eigenfrequenzen der Rohrleitung erreicht, so dass diese nicht mehr mit der Wirbelfrequenzablösung zusammenfällt, das heißt keine Resonanz mehr auftritt. In Bereichen, in denen aus prozesstechnischen Gründen keine Veränderungen am Rohrleitungssystem möglich waren, wurden kritische Rohrleitungsbereiche durch das Einsetzen zusätzlicher Stützen ausgesteift. Damit wird die mechanische Eigenfrequenz aus dem akustischen Anregungsbereich heraus nach oben verschoben.

Nach Abschluss der Installationsarbeiten an den beiden Turboverdichtern erfolgte unter messtechnischer Begleitung durch KCE die Inbetriebnahme der Verdichteranlage. Diese verlief aus schwingungstechnischer Sicht einwandfrei. Die spezifizierten Orientierungswerte für Rohrleitungsschwingungen wurden deutlich unterschritten. Hier zeigt sich wieder einmal, dass durch Pulsationsstudien bereits in der Planungsphase schwingungstechnische Probleme vermieden werden können.



▲ Abbildung: Magnetgelagerte Turboverdichteranlage mit angeschlossenen Rohrleitungssystem

Ingenieurstudium vor Lehramt...!

Eine für uns schöne Nachricht, spricht doch seit Jahren alles immer nur noch über den auf uns zu kommenden Mangel an Fachkräften. Demographisch gesehen ist dieses Problem sicherlich auch noch vorhanden und für bestimmte (ländliche) Regionen zeichnet sich schon jetzt ein Besorgnis erregender Mangel ab. Die Nachricht aber, dass sich Abiturienten eher für ein Ingenieurstudium als andere Studiengänge und darunter auch das in den letzten Jahren im Vergleich dazu vorne liegende Lehramtstudium entscheiden, gibt uns große Hoffnung!



Das HIS-Institut für Hochschulforschung hat heraus gefunden, dass dreieinhalb Jahre nach dem Schulabschluss drei Viertel der Abitur-Absolventen ein Studium – oftmals kombiniert mit einer Berufsausbildung – aufgenommen haben. Am beliebtesten sind bei der Wahl dieser Studiengänger die Wirtschaftswissenschaften. Erstmals zeigte sich dabei, dass sich mehr Studienberechtigte für ein Maschinenbaustudium entschieden als für ein Lehramtsstudium!

Der Nachwuchs sei uns willkommen!

Auch wir bilden übrigens in Kooperation mit der FH Lingen schon seit einigen Jahren im dualen System erfolgreich Wirtschaftsingenieure – „unseren Nachwuchs“ – aus!

Ihr Erwin W. Kötter

▶▶▶ INHALT ▶▶▶

- ▶ Erfolgreiche Inbetriebnahme einer Turboverdichteranlage
- ▶ Ertüchtigung einer Kolbenverdichteranlage
- ▶ Fundament beruhigt
- ▶ Troubleshooting am Hochofen
- ▶ KÖTTER App für Smartphones

Ertüchtigung einer Kolbenverdichteranlage

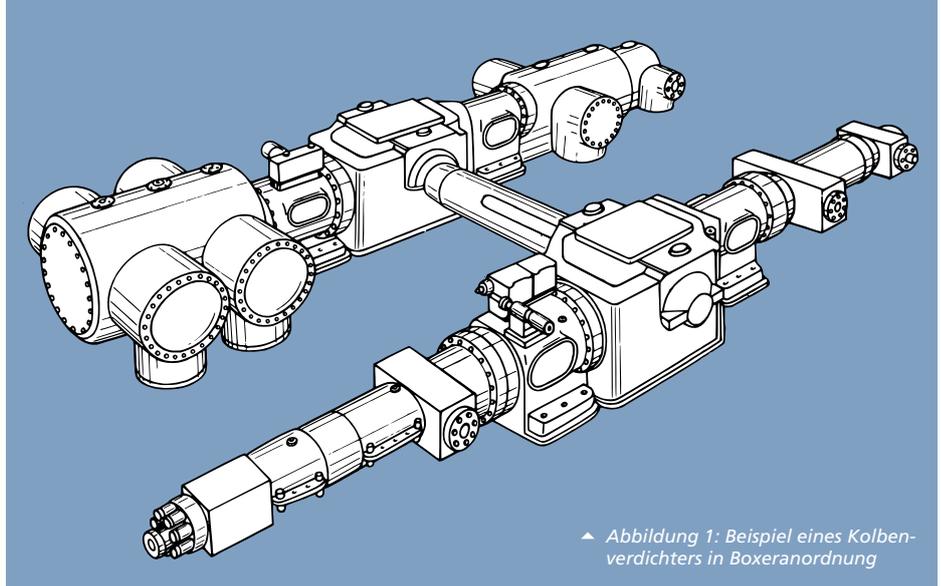
In einem Erdgasspeicher in Osteuropa sind in den 70er und 80er Jahren insgesamt fünf Kolbenverdichter installiert worden. Die Maschinen verdichten Erdgas in zwei Stufen von 17 bar auf maximal 140 bar bei einer festen Verdichterdrehzahl von 370 1/min. Zur Steigerung des Wirkungsgrades bei Teillastbetrieb wurde an den Zylindern der 1. Verdichterstufe eine Saugventilregelung nachgerüstet. Seit dieser Zeit werden vom Betriebspersonal deutlich erhöhte Schwingungen beobachtet. Es wurde befürchtet, dass dies zu Schäden an den Verdichtern führen könnte. Daher wurde im Rahmen einer messtechnischen Untersuchung die aktuelle Situation und der tatsächliche Grund dieser neu aufgetretenen Schwingungen ermittelt und beurteilt.

Da das Betriebspersonal ausschließlich von einer Verschlechterung der Schwingungssituation an den Zylindern der ersten Verdichterstufe sprach, wurden insbesondere an den Rohrleitungen und Zylindern dieser Stufe Druck- und Schwingungssensoren installiert. Mit Hilfe dieser Sensoren war es

An den Zylindern waren gefährliche Strukturresonanzen für die Schwingungsüberhöhung verantwortlich.

möglich, sowohl die Druckpulsationen in den Rohrleitungen und Zylindern als auch die Schwingungen zeitgleich bei den unterschiedlichen Betriebszuständen zu erfassen. Der Saugdruck der Verdichter wurde während der Messungen ebenso variiert wie der Volumenstrom, so dass ein möglichst vollständiger Überblick über die Schwingungssituation gewonnen wurde.

Die Messergebnisse zeigten, dass offensichtlich die Schwingungssituation an den Zylindern sowohl vom Ansaugdruck als



▲ Abbildung 1: Beispiel eines Kolbenverdichters in Boxeranordnung

auch vom Volumenstrom beeinflusst wird. So wurden z. B. bei einem Ansaugdruck von 26 bar und 32% Last Schwingungsgeschwindigkeiten von 15 mm/s RMS gemessen, während bei gleichem Ansaugdruck und geringfügig größerer Belastung von 38% nur 7 mm/s RMS protokolliert wurden.

Bei der Saugventilregelung wird das Saugventil des Zylinders mit Hilfe eines Aktuators so lange offen gehalten, bis genau noch die Menge Gas im Zylinder ist, die auch komprimiert werden soll (siehe Abb. 2). Im Vergleich zu einer Volumenstromregelung, z. B. durch eine Bypassregelung, hat dieses Verfahren den Vorteil, dass nur das Gas verdichtet wird, welches auch tatsächlich gefördert werden soll, so dass unter energetischen Gesichtspunkten deutliche Vorteile im Teillastbetrieb vorhanden sind. Da mit dieser Methode der zeitliche Druckverlauf im Zylinder beeinflusst wird, ändern sich die Amplituden der Druckpulsationen in dem angeschlossenen Rohrleitungssystem. Dieses kann dazu führen, dass in Abhängigkeit vom Volumenstrom deutlich unterschiedliche Schwingungen an Rohrleitungssystemen und Verdichter gefunden werden.

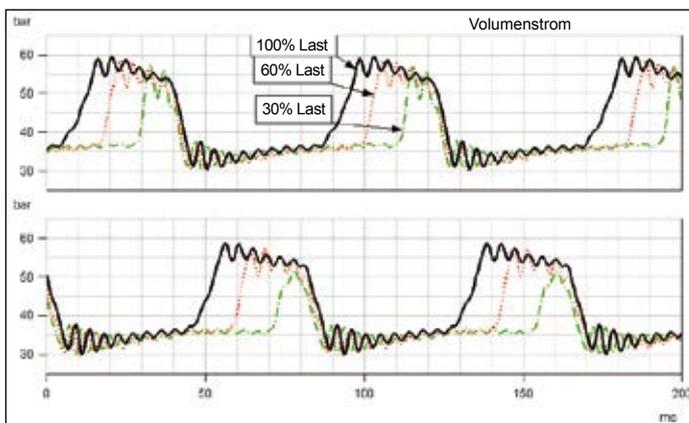
In dem hier beschriebenen Fall war durch die Volumenstromregelung in bestimmten Lastbereichen eine Vergrößerung der Schwingungen am Zylinder im Frequenzbereich von 180 Hz bis 190 Hz bewirkt worden. Die zeitgleich gemessenen Druck-

pulsationen zeigen keine markant erhöhten Amplituden in diesem Frequenzbereich, so dass in diesem Fall eine Strukturresonanz am Zylinder bei ca. 180 Hz bis 190 Hz zu diesen erhöhten Schwingungen führte.

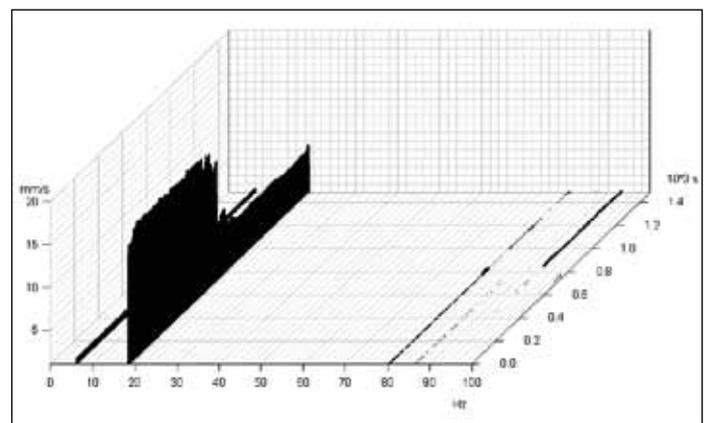
Auch an den anderen Zylindern waren im Wesentlichen Strukturresonanzen für die Schwingungsüberhöhung verantwortlich, allerdings lagen die dominanten Frequenzen hier in einem deutlich niedrigeren und damit für die Strukturbelastung gefährlicheren Bereich. Da der Verstärkungsmechanismus noch während der Messung erkannt wurde, konnte mit einem Provisorium zur Fixierung der Druckrohrleitung am Zylinder, bereits die Auswirkung einer Verschiebung der Struktureigenfrequenz auf die Schwingungssituation am Zylinder gezeigt werden (Abb. 3).

Als Maßnahme zur Verbesserung der Schwingungssituation wurde daher die Verschiebung der Struktureigenfrequenzen der Zylinder vorgeschlagen. Da darüber hinaus in dem Anlagenpiping Rohrleitungsabschnitte mit deutlich überhöhten Schwingungsgeschwindigkeiten gefunden wurden, wurden zusätzlich Maßnahmen zur Verringerung der Druckpulsationen in den Rohrleitungen empfohlen.

Dipl.-Ing. Robert Missal
missal@koetter-consulting.com



▲ Abbildung 2: Indizierdruckverlauf im deckelseitigen (oberes Diagramm) und kurbelseitigen (unteres Diagramm) Zylinder bei unterschiedlichem Volumenstrom (Last).



▲ Abbildung 3: FFT-Analysen der Schwingungsgeschwindigkeiten am Zylinder 5 (ab ca. $t = 850$ s ist die Druckrohrleitung vor Ort zusätzlich gehaltert worden.)

Fundament beruhigt

Zur Erweiterung eines Erdgasspeichers wurde neben den bestehenden Kolbenverdichtern eine neue Turboverdichteranlage installiert. Um die in das Fundament eingeleiteten dynamischen Kräfte zu reduzieren, war der Turboverdichter auf ein elastisches Fundament mit Stahlfederelement aufgestellt.

Bevor die neue Anlage in Betrieb genommen wurde, traten beim Einzelbetrieb der benachbarten Kolbenverdichter jedoch schon Fundamentalschwingungen am Turboverdichter auf. Eine durchgeführte schwingungstechnische Untersuchung ergab, dass Schwingungen durch den Betrieb der Kolbenverdichter (aufgrund der niedrigeren

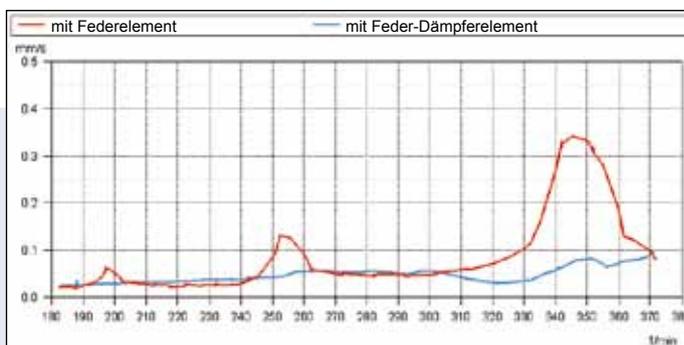


Abbildung: Vertikale, effektive Schwinggeschwindigkeiten an den Fundamentmesspunkten vor und nach Einbringung der zusätzlichen Dämpfung.

Fundamenteigenfrequenzen) auf das Fundament des Turboverdichters übertragen werden. Als Minderungsmaßnahme wurde vorgeschlagen, die vorhandenen Federelemente mit zusätzlicher viskoser Dämpfung auszustatten. Die Auslegung der Dämpfer wurde durch eine strukturdynamische Berechnung durchgeführt.

Nach Umbau der Maßnahme wurde eine überprüfende Messung am Fundament bei

verschiedenen Drehzahlen des benachbarten Kolbenverdichters vorgenommen.

Es zeigte sich, dass keinerlei Resonanz-erhöhungen mehr festzustellen waren (siehe Abb.) und die Anlage auch bei Parallelbetrieb des Turboverdichters ohne schwingungstechnische Probleme übergeben werden konnte.

Dr.-Ing. Johann Lenz
lenz@koetter-consulting.com

Troubleshooting am Hochofen Ausfall von einzelnen Komponenten verursacht hohe Kosten

Zur Reduzierung der Produktionskosten werden in Stahlwerken zunehmend Koks durch alternative Energieträger, wie z. B. Kohle ersetzt. Um Kohle einsetzen zu können wird diese zu Kohlenstaub gemahlen und in einem hochbelasteten Stickstoffstrom pneumatisch in den Hochofenprozess eingebracht.

Der Ausfall einzelner Komponenten des Gesamtprozesses kann bei einem Hochofen große Wiederherstellungs- und Ausfallkosten verursachen.

Für ein Stahlwerk in Osteuropa wurde von einem deutschen Anlagenbauer eine Kohlen-Mahl- und Trocknungsanlage geplant und umgesetzt. Die Stickstoffversorgung sollte dabei von 4 Kolbenkompressoren sichergestellt werden.

Während der Inbetriebnahme wurden starke Schwingungen beobachtet. Mehrfach musste die Anlage auf Grund abgerissener Stützen und Schäden an den Rohrleitungen abgeschaltet werden. Nachbesserungen vor Ort blieben erfolglos. Die Schwingungssituation der Anlage blieb unbefriedigend.



Abbildung: Stahlwerk in Osteuropa

KÖTTER Consulting Engineers führte daraufhin kurzfristig eine messtechnische Analyse durch. Dazu wurden die Rohrleitungsschwingungen und die Druckpulsationen in der Anlage bei unterschiedlichen, aber typischen Betriebsbedingungen untersucht. Leistungsfähige Mehrkanalmesstechnik erlaubt dabei umfassende Einblicke in die dynamischen Eigenschaften der Anlage.

Durch die sehr starken Schwingungen wurden Stützen abgerissen und Rohrleitungen beschädigt. Die Anlage musste abgeschaltet und nachgebessert werden.

Mit Hilfe numerischer Modelle der Anlage und auf der Basis der Messdaten wurden dann gezielt akustische und mechanische Minderungsmaßnahmen ausgearbeitet.

Dem Kunden wurde der Einbau von Blenden und Pulsationsbehältern sowie eine Modifikation des Halterungskonzeptes vorgeschlagen. Auf der Saugseite der Kompressoren konnte alleine mit Blenden eine hinreichende Pulsationsminderung erreicht werden. Für die Druckseite wurden auf Grund der hohen Anforderungen eine Kombination aus Blende und einem abgestimmten Dreikammerbehälter favorisiert.

Nach der Umsetzung der Maßnahmen läuft die Anlage zur Zufriedenheit des Betreibers seitdem ohne weitere Ausfälle.

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

KÖTTER App für Smartphones

Seit Oktober 2011 kann KÖTTER Consulting Engineers eine iPhone App anbieten: die **KÖTTERvib** zur Beurteilung von Maschinenschwingungen.

Mit der KÖTTER-App haben Sie das ideale Werkzeug zur Hand: Einfach und intuitiv die gewünschte Maschinenkategorie auswählen, dann Details wie Aufstellungsart, Leistung, etc. definieren und den bei Ihnen vorliegenden Messwert eingeben.

Die KÖTTERvib zeigt Ihnen die relevanten Richtwerte für Schwinggeschwindigkeiten als Beurteilungsgrundlage für Messungen an nicht-rotierenden Bauteilen an, ordnet Ihren Messwert ein und zeigt Ihnen, ob Ihr Wert kritisch ist.

Sollten Sie bei der Beurteilung und der Ursachenanalyse Hilfe benötigen, dann kontaktieren Sie gerne unsere Ingenieure:

KÖTTER Consulting Engineers
GmbH & Co. KG,
Tel. +49 5971 9710-0,
info@koetter-consulting.com

**Download der App unter:
www.koetter-consulting.com/app**

Hinweis: Natürlich setzt die Verwendung der KÖTTERvib voraus, dass die Messung der Schwinggeschwindigkeit normgerecht erfolgt.

Wenig Arbeit ist eine Bürde,
viel Arbeit eine Freude.

(Victor Hugo, französischer Dichter)

Neuer Dr.-Ing. für KCE

Mit einem „sehr gut“ schloss Christian Jansen im Dezember 2011 erfolgreich seine Promotion ab! Im Rahmen seiner wissenschaftlichen Tätigkeit beschäftigte sich Herr Jansen sich mit Methoden zur In-situ-Diagnostik von Niedertemperaturbrennstoffzellen.



▲ Dr.-Ing. Christian Jansen

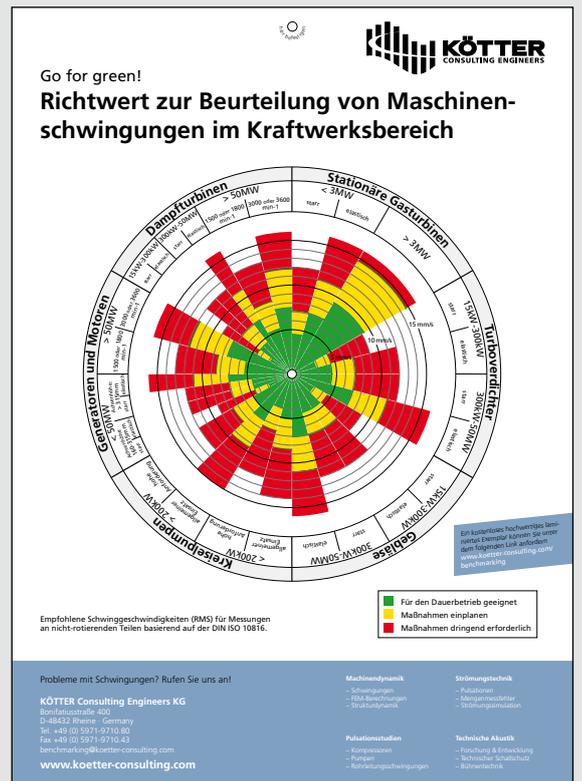
Herr Jansen studierte zunächst an der ehemaligen FH Bergbau in Bochum Maschinentechnik mit der Vertiefung Energietechnik. Nach bestandenen Diplom wechselte er an das Institut für Energie- und Umwelttechnik der Universität Duisburg-Essen. Seit 2009 ist Herr Jansen im Fachbereich Maschinen und Anlagen bei KÖTTER Consulting Engineers tätig. Unter anderem befasst er sich hier mit Aufgabenstellungen der Strömungsmesstechnik und der Maschinendynamik und unterstützt weltweit unsere Kunden im Troubleshooting.

Go for green!

Um Ihnen bei der Beurteilung von Schwingungen zu helfen, hat KÖTTER Consulting Engineers ein Poster mit Richtwerten erstellt. Das laminierte Poster erhalten Sie kostenfrei bei uns. Wenn Sie interessiert sind und mehr wissen möchten, z.B. eine kurze Einführung dazu, dann besuchen Sie gerne unsere Internetseite unter Verwendung des folgenden Links: www.koetter-consulting.com/benchmarking.

Bei Fragen stehen wir Ihnen natürlich gerne auch telefonisch zur Verfügung:

Dr.-Ing. Christian Jansen,
Tel. 05971-9710.30



VORANKÜNDIGUNG

16. Workshop Kolbenverdichter 2012 am 24./25. Oktober, KCE-Akademie in Rheine

Mehr Infos bei Heike Nyhuis und
Martina Brockmann: Tel. +49 5971 9710-65
heike.nyhuis@koetter-consulting.com
martina.brockmann@koetter-consulting.com

www.koetter-consulting.com
www.kce-akademie.de

Schwingungen und Pulsationen in Kolben- kompressorsystemen Seminar am 23. Oktober 2012,

Grundlagen der Schwingungslehre,
akustische und strukturelle
Schwingungen (z. B. an Rohrleitungen)
in Bezug auf Kolbenverdichtersysteme.

Mehr Infos bei Heike Nyhuis und
Martina Brockmann: Tel. +49 5971 9710-65
heike.nyhuis@koetter-consulting.com
martina.brockmann@koetter-consulting.com

www.kce-akademie.de

Im Internet finden Sie nur, was Sie suchen. Das aber verengt den Blickwinkel doch sehr.

(Frank A. Meyer, Medienentwickler)

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: Dipl.-Ing. Erwin Kötter,
Margret Grobosch,
Dr.-Ing. Johann Lenz

KÖTTER Beratende Ingenieure Berlin GmbH

Balzerstraße 43
D-12683 Berlin
Tel. +49 30 526788-0
Fax +49 30 5436016
E-Mail: info@kbi-berlin.de

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



www.koetter-consulting.com