

## Auffällige Schwingungen einer Pumpe in Rohöl-Pipeline wirkungsvoll reduziert

In der Einspeisestation einer Rohöl-Pipeline sind drei bauähnliche Pumpen installiert. Nach einer Revision und Anpassung der Förderhöhen der Pumpen A, B und C an veränderte Betriebsbedingungen wurden vom Betreiber erhöhte Schwingungen und Lärmemissionen beobachtet. Die bemängelte Situation trat bei Einzel- und Reihenbetrieb der Pumpe B (2 stufig; Förderhöhe 362 m; Nennleistung 1754 kW; Drehzahl 1492 min<sup>-1</sup>) auf.

Da der Ursache-Wirkungs-Mechanismus für die bemängelte Situation nicht bekannt war, wurde KÖTTER Beratende Ingenieure Berlin GmbH (KBI) mit einer umfassenden schwingungstechnischen Untersuchung beauftragt. Basierend auf den hierdurch ermittelten Ursachen sollten gezielte Maßnahmen erarbeitet werden, um schwingungsbedingte Anlagenausfälle zu verhindern. Darüber hinaus galt es, drohende Betriebseinschränkungen durch Überschreitungen der zulässigen Lärmimmissionsrichtwerte in der Nachbarschaft zu vermeiden.

Die Untersuchung wurde in Form einer mobilen Betriebsschwingungsmessung bei Einzelbetrieb der Pumpe B sowie bei Reihenbetrieb der Pumpen A+B und B+C durchgeführt. Zur Erfassung und Analyse der Situation wurden synchron mit 32 Kanälen die Schwinggeschwindigkeiten an den Aggregaten, Maschinenfundamenten und Rohrleitungen sowie saug- und förderdruckseitige Druckpulsationen (höherfrequente Druckschwankungen) in Abhängigkeit der Betriebszustände gemessen. Ergän-

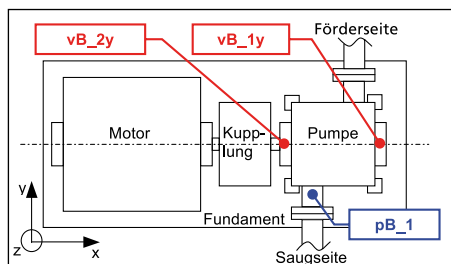
zend erfolgten Schallimmissionsmessungen auf dem Anlagengelände. In Abbildung 1 werden der Aufbau einer Pumpeneinheit und die Lage ausgewählter Messpunkte schematisch skizziert.

**Es sollten gezielte Maßnahmen erarbeitet werden, um schwingungsbedingte Anlagenausfälle zu verhindern.**

In einem ersten Untersuchungsschritt wurden die Schwingungen bewertet. Die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten der Antriebsmotoren sowie der Fundamentblöcke lagen auf einem unkritischen Niveau. Auch die gemessenen Werte an den Lagergehäusen der Pumpen A sowie C jeweils bei Reihenbetrieb mit B lagen deutlich unterhalb des Richtwertes der Zonengrenze B/C nach DIN ISO 10816 – Teil 7. Im Sinne der DIN war somit für die erfassten Betriebszustände ein uneingeschränkter Dauerbetrieb dieser beiden Pumpen zulässig.

An der Pumpe B wurden bei Einzelbetrieb und insbesondere bei Reihenbetrieb deutliche Richtwertüberschreitungen (Zone D der DIN ISO 10816 – Teil 7) festgestellt. Abbildung 2 zeigt die Messwerte der Lager-schwingungen bei Reihenbetrieb der Pumpen A+B. Bei unverändertem Weiterbetrieb waren somit Schäden an der Pumpe B zu befürchten.

Fortsetzung Seite 2 ▶



▲ **Abbildung 1:** Draufsichtsskizze der Pumpe B und Lage ausgewählter Druck- (p) und Schwingungsmesspunkte (v)

## Liebe Leserinnen und liebe Leser,

nach knapp einjähriger Bauzeit konnten wir Mitte des Jahres unseren Erweiterungsanbau mit neuen Büroräumen und modernen Kommunikationssystemen beziehen. Nach dem Verstummen des Baulärms herrscht nun wieder kreative Betriebsamkeit.

Auf unserer Internetseite finden Sie nun in regelmäßigen Zeitabständen interessante Projektbeispiele, die Ihnen Anregungen für die eigene Projektarbeit geben sollen.



Auch in dieser „good VIBRATIONS“ möchten wir Sie wie gewohnt mit Fachbeiträgen aus den Bereichen Bau- und Raumakustik, der technischen Akustik und der Maschinendynamik informieren. – Beim Lesen wünschen wir Ihnen viel Spaß.

Ihr Bernd Fleischer

Dumm ist nicht, wer nichts weiß, sondern wer glaubt, er würde bereits genug wissen.

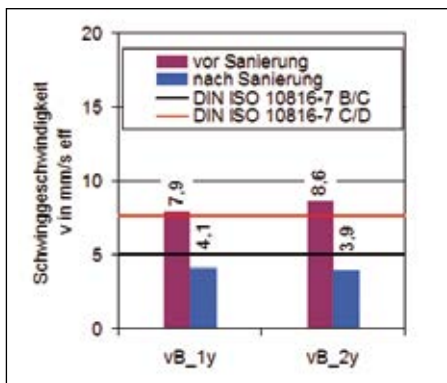
Thomas Möglinger

### ▶ ▶ ▶ INHALT ▶ ▶ ▶

- ▶ **Auffällige Schwingungen einer Pumpe in Rohöl-Pipeline wirkungsvoll reduziert**
- ▶ **Hinweis: Leuna – Dialog 2016**
- ▶ **Sechseckiger Seminarraum, bei dem die Akustik eine runde Sache ist**

Da nur innerhalb des Werkgeländes Schallmessung durchgeführt werden konnten, wurde auf Basis von zwei Ersatzmesspunkten (verdeckte Messung) eine Schallausbreitungsrechnung in Anlehnung an die DIN 9613-2 durchgeführt. Demnach wird im Nachtzeitraum am maßgeblichen Immissionsort in der Nachbarschaft der Immissionsrichtwert für Mischgebiete der TA Lärm von  $L_{r,Nacht} = 45 \text{ dB(A)}$  überschritten.

Für die Ursachenanalyse der überhöhten Pumpenschwingungen der Pumpe B wurden die Frequenzspektren der saug- und förderdruckseitigen Druckpulsationen in den maschinennahen Rohrleitungsabschnitten und die strukturmechanischen Lagerschwingungen verglichen. Es zeigten sich zwei Hauptfrequenzkomponenten mit pegelbestimmenden Amplituden bei 99,6 Hz und 149,0 Hz. Dabei traten bei Betrieb der Pumpe B im Vergleich zu den Messwerten der Pumpen A und C deutlich höhere Druckpulsationen auf. Die daraus resultierenden Wechselkräfte regten das Pumpengehäuse der Pumpe B zu überhöhten gleichfrequenten Schwingungen an. Diese Pulsationen verursachten als primäre Erregerquelle auch die auffälligen – jedoch nach VDI-Richtlinie 3842 noch zulässigen – Rohrleitungsschwingungen.



▲ **Abbildung 2:** Schwinggeschwindigkeiten (Effektivwerte) am Lagergehäuse der Pumpe B bei Reihenbetrieb mit Pumpe A vor und nach der Sanierung mit Zonengrenzen zulässiger Schwingungen nach DIN ISO 10816-7

In einem weiteren Auswerteschritt wurden die geplanten Pumpenkennlinien den gemessenen Betriebspunkten gegenübergestellt. Während die Förderhöhen der Pumpe A und C eine gute Übereinstimmung mit der vorliegenden Kennlinie der Servicefirma zeigten, ergaben die Messungen an der Pumpe B größere Förderhöhen als geplant.

Es stellte sich heraus, dass Pumpe B im Rahmen der Revision mit einem, für die

geplante Kennlinie, zu großem Laufrad ausgeliefert wurde. Der vergrößerte Laufraddurchmesser führte zur Verschiebung der Kennlinie in Richtung zu großer Förderhöhen. Aus schwingungstechnischer Sicht konnte der relativ kleine Spalt zwischen Laufrad und Gehäuse für die überhöhten Druckpulsationen im Fördermedium als Verursacher aufgezeigt werden. Damit war die primäre Ursache der auffälligen Betriebschwingungen identifiziert.

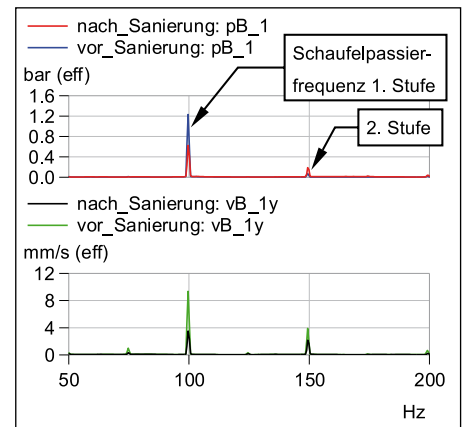
Als Maßnahmen wurden von KBI dem Betreiber daher – in Abstimmung mit der Servicefirma – die Verringerung des Laufradaußendurchmessers und somit eine Vergrößerung des Spaltmaßes zwischen Laufrad und Gehäuse vorgeschlagen.

**Die Verbesserungen der Maschinenschwingungen zeigten sich bei der Gegenüberstellung der Gesamtwerte deutlich.**

Der Betreiber ließ die Maßnahmen wie empfohlen umsetzen. Nach Wiederinbetriebnahme wurde eine schwingungstechnische Abnahmemessung durch KBI durchgeführt. Abbildung 3 stellt exemplarisch die Frequenzspektren der saugseitigen Druckpulsationen den strukturmechanischen Lagerschwingungen der Pumpe B vor und nach der Sanierung gegenüber.

Bei der Hauptfrequenzkomponente von 99,6 Hz hat sich die Amplitude der Druckpulsation durch die Modifikation des Laufrades etwa halbiert. Die gleichfrequente Amplitude der Schwinggeschwindigkeit konnte durch die gezielte Anpassung des Spaltmaßes zwischen Laufrad und Gehäuse auf ca. 1/3 reduziert werden.

Die erzielten Verbesserungen der Maschinenschwingungen zeigen sich in der Gegenüberstellung der gemessenen Gesamtwerte der Schwinggeschwindigkeiten in Abb. 2 deutlich.



▲ **Abbildung 3:** Frequenzspektren der saugseitigen Druckpulsationen und der Lagerschwingungen (Effektivwerte) von Pumpe B bei Reihenbetrieb mit Pumpe A vor und nach der Sanierung

Fazit: Es zeigte sich wieder, dass eine wirkungsvolle und dauerhafte Reduzierung kritischer Anlagenschwingungen nur bei Kenntnis der Ursachen und der Wirkmechanismen möglich ist. Dies erfordert häufig eine umfassende messtechnische Untersuchung, sichert aber einen ungestörten Dauerbetrieb der betroffenen Anlage und hilft somit, teure Anlagenausfälle oder Betriebseinschränkungen zu vermeiden. Seit der Durchführung der schwingungstechnischen Untersuchung und der darauf basierenden gezielten Sanierung wird die Anlage zur vollsten Zufriedenheit des Kunden betrieben.

Gerne entwickeln wir gezielte Lösungsansätze auch für die schwingungstechnischen Aufgabenstellungen in Ihrer Anlage. Wir begleiten Sie dabei bis ans Ziel. Rufen Sie uns gerne an.



Dipl.-Ing.  
Joachim Holstein  
joachim.holstein@  
koetter-consulting.com

**LEUNA / DIALOG**

**Besuchen Sie uns auf der Standortmesse**

**Leuna – Dialog 2016**

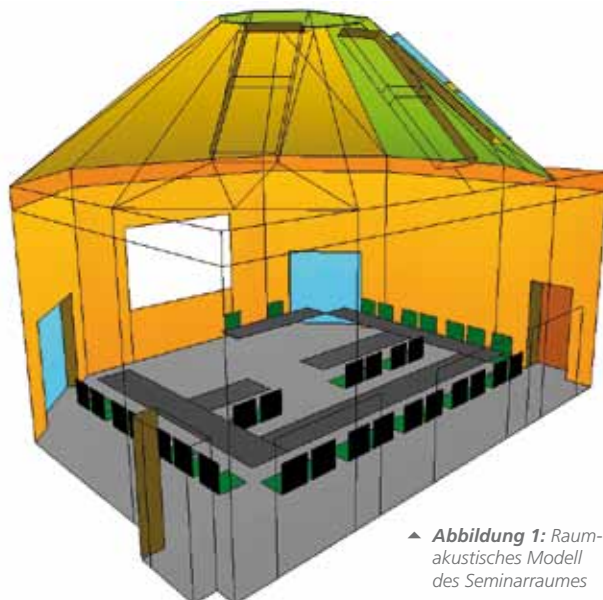
**28. April 2016 • cCe Kulturhaus Leuna**

Stand B7 im Walter-Bauer-Saal (EG)



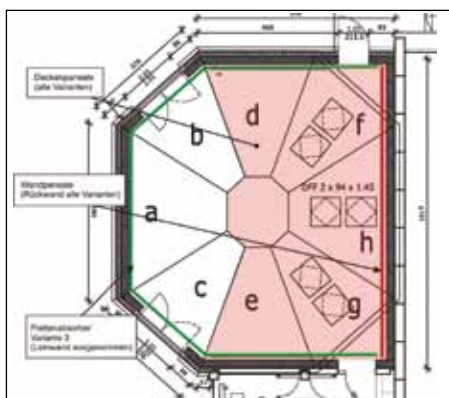
## Sechseckiger Seminarraum, bei dem die Akustik eine runde Sache ist

Der Berliner Turn- und Freizeitsport-Bund e. V. plant am Standort Voralberger Damm einen Anbau an das bestehende Turnzentrum. Die Bauform des Seminarraumes wählte Architekt Robert Lasseinius nicht zufällig. Sie entstand auf der einen Seite durch die dreieckige Form des Baugrundstücks und dessen Durchwegungen und auf der anderen Seite aufgrund von Funktionszweigen. So wurde ein sonnenfächerförmiger, um die Mittelachse symmetrischer, Grundriss für den Unterrichts- bzw. Seminarbetrieb konzipiert, kombiniert mit einem großen Luftvolumen für die natürliche Belichtung und Belüftung des Raumes mit einem oktogonalen Kuppelbau als oberem Abschluss.



▲ **Abbildung 1:** Raumakustisches Modell des Seminarraumes

Der Seminarraum verfügt über eine Grundfläche von etwa 80 m<sup>2</sup> und ein Raumvolumen von V ≈ 470 m<sup>3</sup>. Die Volumenkennzahl liegt mit den geplanten 30 Zuhörer- und 2 Vortragsplätzen bei etwa 14 bis 15 m<sup>3</sup> / Platz. Ohne geeignete raumakustische Maßnahmen führt das im Vergleich zur Grundfläche große Raumvolumen in Kombination mit vorwiegend schallharten Wandverkleidungen jedoch zu einer zu langen Nachhallzeit. Die vorgesehene Nutzung setzt eine deutliche Reduzierung der Halligkeit durch Schallabsorption voraus.



▲ **Abbildung 2:** Verteilung der Absorber an den Raumbegrenzungsflächen für die Variante 3

Der Grundriss des Raumes beschreibt ein unregelmäßiges Sechseck, das Dach wurde als „achtseitige Pyramidenkonstruktion“ geplant. Zur Vermeidung von möglichen „Flüstergalerie-Effekten“ und Schallfokussierungen in der Publikumsebene durch den kuppelartigen Aufbau des Daches sind geeignete raumakustische Maßnahmen an der Decke zu planen. Durch eine Bedämpfung der Decke können Reflexionen, die den Hörer mit einem Laufweg ≥ 17 m erreichen, abgeschwächt werden, so dass diese nicht als Echos hörbar werden. Durch eine geziel-

te strukturelle Gliederung der Decke ist eine frequenzabhängige Streuung des an der Decke reflektierten Schalls erreichbar.

### Durch den kuppelartigen Aufbau des Daches sind geeignete raumakustische Maßnahmen zu planen.

Des Weiteren können zwischen parallelen Wänden Flatterechos entstehen. Zur Abhilfe ist entweder eine Wand absorbierend auszuführen oder ihre Oberflächenstruktur aufzubrechen, so dass auftretender Schall diffus reflektiert wird.

Im Zuge der Planung erfolgte die Auslegung von raumakustischen Maßnahmen zur Realisierung der Anforderungen nach DIN 18041 hinsichtlich der Silben- und Sprachverständlichkeit.

Hierzu wurde ein raumakustisches Modell des Seminarraumes erstellt und verschiedene Varianten möglicher raumakustischer Maßnahmen geprüft. Gemäß DIN 18041

ist für einen Seminarraum mit V ≈ 470 m<sup>3</sup> eine Nachhallzeit von etwa T<sub>sol</sub> = 0,7 s mit einem Toleranzbereich von ± 20 % einzuhalten. In Abbildung 1 ist eine Ansicht des raumakustischen Modells dargestellt.

### Raumakustische Maßnahmen

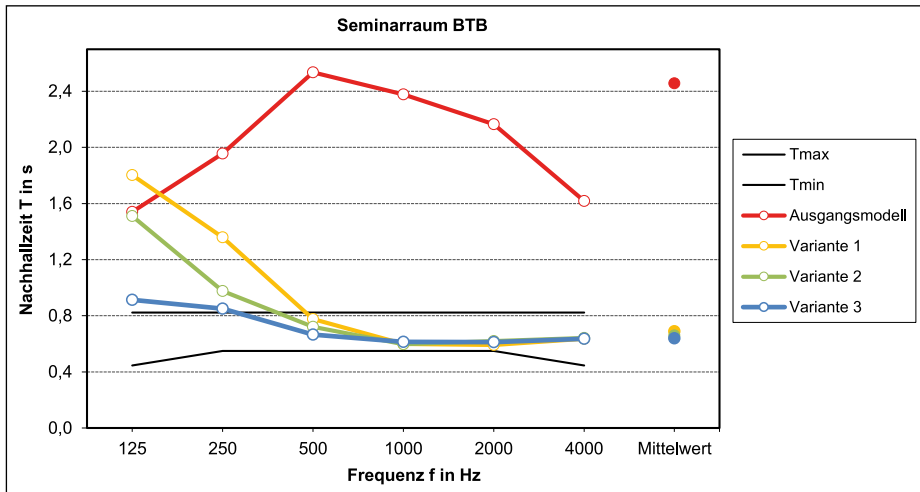
Im Rahmen der Planung wurden 3 Varianten untersucht. Der aus akustischer Sicht favorisierten dritten Variante wurden folgende Raumboflächen zu Grunde gelegt:

- ▶ Boden: PVC-Belag,
- ▶ Rückwand: Verkleidung von etwa 90 % der Rückwand mit Akustikpaneelen und Hanfwollehinterlegung,
- ▶ Restliche Wände: Sperrholz furnierplatte mit m'' ≈ 4,2 kg / m<sup>2</sup> auf 50 mm Lattung vor versteifter OSB-Platte mit 50 mm Mineralfaserplatte,
- ▶ Decke / Dach: Pfettendach, Innenraumverkleidung entsprechend dem Schema nach Abbildung 2 mit Sperrholz furnierplatten und Akustikpaneelen.

Fortsetzung Seite 4 ▶

Modell	STI			D <sub>50</sub>			C <sub>50</sub> in dB		
	Min	Max	Mw	Min	Max	Mw	Min	Max	Mw
<b>Ausgangsmodell</b>	0,40	0,48	0,44	0,23	0,36	0,29	-5,3	-2,5	-3,9
<b>Variante 1</b>	0,61	0,70	0,66	0,56	0,73	0,64	1,0	4,3	2,5
<b>Variante 2</b>	0,63	0,71	0,67	0,60	0,90	0,67	1,8	4,6	3,0
<b>Variante 3</b>	0,65	0,73	0,69	0,65	0,79	0,71	2,7	5,7	4,0
STI 0 - 0,29: unverständlich; 0,3 - 0,44: schwach; 0,45 - 0,59: angemessen; 0,6 - 0,74: gut; 0,75 - 1: ausgezeichnet				D <sub>50</sub> > 0,5 und C <sub>50</sub> > 0 dB für gute Sprachverständlichkeit					

▲ **Tabelle:** Minimale, maximale und mittlere prognostizierte Werte für die Sprachverständlichkeitsparameter STI, D<sub>50</sub> und C<sub>50</sub>



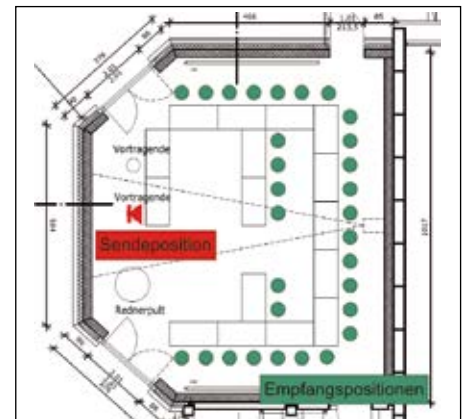
▲ **Abbildung 3:** Berechnete Nachhallzeitverläufe des Ausgangsmodells sowie der Varianten 1 bis 3, 80 %-ige Besetzung der Plätze

### Berechnungsergebnisse

Die mittlere Nachhallzeit des Ausgangsmodells im besetzten Zustand (80 % der Plätze belegt) beträgt rechnerisch 2,5 s, die der Varianten 1 bis 3 liegen zwischen 0,6 s und 0,7 s. Die Anforderungen an die mittlere Nachhallzeit werden von allen Varianten erfüllt. Der Frequenzverlauf der Varianten 1 bis 2 ist jedoch durch einen Anstieg der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen hinsichtlich der Sprachverständlichkeit ungeeignet. Der Frequenzverlauf der Variante 3 liegt nach der Berechnung unterhalb von 250 Hz weniger als 0,1 s oberhalb des Toleranzbereiches und wurde daher favorisiert.

$C_{50}$  lassen sich in einander umrechnen. Die Werte wurden für den Übertragungsweg zwischen Sprecherposition und den Plätzen entsprechend Abbildung 4 berechnet. Die höchsten Werte werden in kurzem Abstand zur Sprecherposition erreicht. Für die Beurteilung der Sprachverständlichkeit sind neben Maximal- und Mittelwerten allerdings auch die kleinsten Werte der Parameter beurteilungsrelevant, da sich diese auf weiter vom Sprecher entfernte Plätze beziehen.

Nach den prognostizierten Werten für STI,  $D_{50}$  und  $C_{50}$ , wird eine gute Sprachverständlichkeit bereits mit Variante 1 erreicht. Eine



▲ **Abbildung 4:** Sende- und Empfangspositionen für die Ermittlung der Sprachverständlichkeit

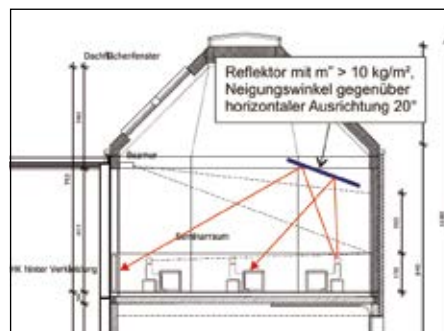
weitere Erhöhung der Sprachverständlichkeit zwischen Sprecher- und Hörerpositionen kann durch die Montage eines geeigneten schallreflektierenden Deckensegels nach Abbildung 5 über dem Vortragsbereich erreicht werden. Dieses muss eine flächenbezogene Masse von  $m'' > 10 \text{ kg} / \text{m}^2$  aufweisen, um Schall in dem für die Sprachinformation relevanten Frequenzbereich zu reflektieren. Die Montage eines Deckensegels ist auch als nachträgliche Verbesserungsmassnahme geeignet.

Es hat sich gezeigt, dass die Planung komplex gestalteter Räume hohe Ansprüche auch an die Akustik stellt. Durch geeignete abgestimmte raumakustische Maßnahmen können im vorliegenden Beispiel die Nachhallzeiten erheblich reduziert und die Sprachverständlichkeit deutlich verbessert werden.

**Durch geeignete raumakustische Maßnahmen konnten die Nachhallzeiten erheblich reduziert werden!**

### Sprachverständlichkeit

In Tabelle 1 werden die an Hand des Modells berechneten Werte der raumakustische Parameter für Sprachverständlichkeit STI (Speech Transmission Index / Sprachübertragungsindex)  $D_{50}$  (Deutlichkeitsgrad) und  $C_{50}$  (Deutlichkeitsmaß) aufgeführt.  $D_{50}$  und



▲ **Abbildung 5:** Schallreflektierendes Deckensegel zur Lenkung deutlichkeitserhöhender Schallenergie

Stefan Kaak, M. A.  
stefan.kaak@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

**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**