

## Schwingungsschäden in einem Offshore-Windpark

An Windkraftanlagen in einem Offshore-Windpark in Skandinavien traten bereits kurz nach der Inbetriebnahme Schäden an den Transformatoren auf. Vom Wartungspersonal wurden abgerissene Befestigungsschrauben sowie subjektiv hohe Schwingungen während des Betriebes beobachtet. Da der Zugang zu den Transformatoren während des Betriebes nicht gestattet war und darüber hinaus nach den Beobachtungen des Wartungspersonals die Höhe der Schwingungen stark von der jeweiligen Windrichtung und -stärke abhängig ist, wurde nach Rücksprache mit dem Betreiber des Windpark beschlossen, eine zeitlich befristete Dauermessung zu installieren.

Vom Betreiber wurde vermutet, dass die Schwingungen am Transformator insbesondere dann auftreten, wenn der Wind aus der Richtung der anderen Windkraftanlagen kommt. Bei dieser Konstellation können an den Masten periodische Wirbelablösungen

**In Abhängigkeit von der Windstärke und Windrichtung können Schwingungen von bis zu 190 mm/s auftreten.**

auftreten und die Anströmung der betroffenen Anlage stark beeinflussen. Sollten dann auch noch mechanische Eigenfrequenzen einzelner Bauteile am Turm und Wirbelab-



Die Transformatoren waren im Turm der Windkraftanlagen auf einer Bühne in ca. 5 m Höhe installiert. Zur Erfassung der Schwingungssituation wurden sowohl am Transformator als auch am Turm und an der Bühne, auf die der Transformator montiert war, Schwingungssensoren installiert. Die Position der Sensoren wurde dabei so gewählt, dass die Bewegungsform des Transformators und die maximalen Schwingungen ermittelt werden konnten. Die Signale der Schwingungssensoren wurden von einem Messwerterfassungssystem mit einer Frequenz von 500 Hz abgetastet und für weitere Analysen abgespeichert.

lösefrequenz zusammentreffen, könnten starke Schwingungen angefacht werden. Der Zeitraum für die Dauerüberwachung musste daher so gewählt werden, dass die entsprechende Windrichtung und auch die Windgeschwindigkeiten in dem Messzeitraum enthalten waren. Darüber hinaus musste gewährleistet sein, dass die Messketten ordnungsgemäß funktionieren, denn es wäre nicht akzeptabel gewesen am Ende des Messzeitraumes festzustellen, dass die Messung bereits kurz nach dem Start unbeabsichtigt unterbrochen worden wäre. Es wurde daher eine Möglichkeit geschaffen,

Fortsetzung Seite 2 ►

## Durch Globalisierung und internationalem Handel...

*sind Normen und Richtlinien als Grundlage von Geschäftsbeziehungen immer wichtiger geworden.*

*Normen reduzieren Hemmnisse und erleichtern den weltweiten Handel. In Europa ist die Normung eine entscheidende Grundlage für das Funktionieren des Binnenmarktes. Mit Hilfe eines harmonisierten europäischen Normenwerkes wird der freie Warenverkehr im Binnenmarkt gewährleistet und die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen in der Europäischen Union gestärkt.*



*Einfach ausgedrückt sorgen internationale und europäische Normen also für eine gemeinsame technische Sprache. Dadurch verhelfen sie zu einer schnelleren und klaren Einschätzung des Potenzials oder der Kompatibilität eines Geschäftspartners. Normen sind die Sprache des Welthandels!*

*Bei unserer Arbeit dürfen sie als Grundlage nicht fehlen und verhelfen uns tatsächlich in vielen Bereichen zu eindeutigen Entscheidungen und eindeutiger Ausdrucksweise, die gerade für unsere Tätigkeiten und unsere Auftraggeber unabdingbar sind.*

Herzlichst Ihr Erwin W. Kötter

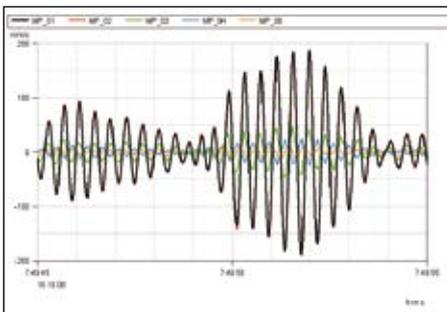
### ► ► ► INHALT ► ► ►

- Schwingungsschäden in einem Offshore-Windpark
- Parallelbetrieb von Turbo- und Kolbenverdichteranlagen – geht das?
- Ursachenanalyse zu Fundamentalschwingungen an einem Hyperverdichter
- Ausgezeichnet!

Fortsetzung von Seite 1 ▶

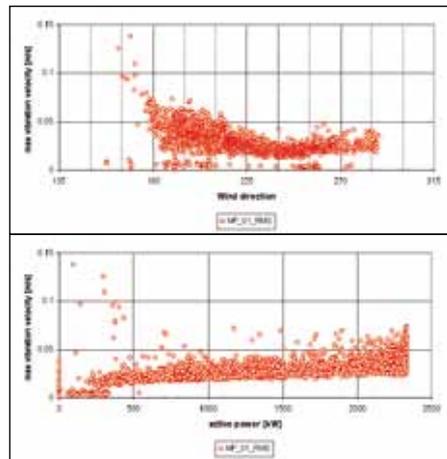
die Messkette mit Hilfe einer Mobilfunkverbindung zu überprüfen, indem die aktuellen Messwerte von unserer Ingenieurzentrale in Rheine aus eingesehen und die verdichteten Messwerte abgerufen werden konnten. Zusammen mit den Betriebsdaten der Anlage wie Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Leistung konnten somit die bereits aufgezeichneten Daten klassiert und bewertet werden.

Bei der Auswertung der aufgezeichneten Messdaten zeigte sich, dass in Abhängigkeit von der Windstärke und -richtung Schwingungsgeschwindigkeiten am Transformator von bis zu 190 mm/s auftreten. Der Transformator schwingt zum einen zusammen mit der Bühne auf die er installiert ist. Darüber hinaus gibt es aber auch noch eine Relativbewegung des Transformators auf der Bühne.



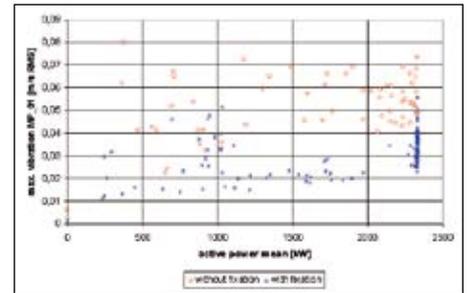
▲ Abb. 2: Zeitfunktionen der gemessenen Schwingungsgeschwindigkeiten, MP\_01 und MP\_02: Oberkante Transformator, MP\_03, MP\_04 und MP\_06: auf der Bühne bzw. am Turm.

Auch die vermutete Abhängigkeit der Schwingungen von der Windrichtung ließ sich auf der Grundlage der Messdaten nachweisen. Die höchsten Schwingungen wurden gemessen, wenn der Wind aus Richtung der Nachbaranlagen (170°) wehte. Auffällig war darüber hinaus, dass die höchsten Schwingungsgeschwindigkeiten nicht bei der größten Leistung gemessen wurden (siehe Abb. 3).



▲ Abb. 3: 10-Minuten-Maximalwerte der Schwingungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung und der elektrischen Leistung der Windkraftanlage.

Mit Hilfe der aufgezeichneten Messdaten konnte die Bewegung des Transformators sowie die „weiche Stelle“ in der Aufstellung gefunden werden. Es wurden kurz-



▲ Abb. 4: 10-Minuten-Maximalwerte der Schwingungsgeschwindigkeit an der Oberkante vom Trafo (MP\_01) in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung der Windkraftanlage, Windrichtung 175° bis 184°, rote Kreise = Ausgangssituation, blaue Kreuze = mit Modifikation.

fristig Modifikationen ausgearbeitet und umgesetzt, ohne das grundlegende Konzept oder die Tragkonstruktion wesentlich zu verändern. Im Anschluss daran wurde erneut die Dauermessung durchgeführt mit deren Hilfe die Wirksamkeit der Maßnahmen nachgewiesen werden konnte.

Wie aus der Abbildung 4 zu erkennen ist, wurden die maximalen Schwingungsgeschwindigkeiten durch die Modifikation der Aufstellung deutlich verringert. Die daraufhin an allen Anlagen umgesetzten Modifikationen sind inzwischen seit mehr als 2 Jahren in Betrieb. Weitere Schäden an den Transformatoren sind in dieser Zeit nicht wieder aufgetreten.

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

## Parallelbetrieb von Turbo- und Kolbenverdichtern – geht das?

Aufgrund von ständig steigender Flexibilität hat der Betreiber eines Erdgasspeichers einen neuen mehrstufigen Turboverdichter mit drehzahlvariablem Antrieb über E-Motor und Getriebe errichtet. Dieser soll sowohl im Einzel- als auch Parallelbetrieb mit den bereits bestehenden Kolbenverdichtern zur Einlagerung von Erdgas genutzt werden.

Um zu vermeiden, dass das neue Anlagensystem durch Gaspulsationen bzw. induzierte Rohrleitungsschwingungen beeinträchtigt wird, wurde bei KÖTTER Consulting Engineers KG (KCE) eine kombinierte messtechnische / theoretische Studie in Auftrag gegeben.

In einem ersten Schritt wurde hierzu im Vorfeld die bestehende Kolbenverdichteranlage messtechnisch bezüglich des vorhandenen Pulsations- und Schwingungsniveaus kontrolliert, so dass gegebenenfalls bestehende Auffälligkeiten aufgedeckt werden konnten. Anschließend wurde das theoretische Modell der Kolbenverdichteranlage aufgestellt und auf die Messergebnisse abgestimmt.

In einem zweiten Schritt wurde die neue Turboverdichteranlage in das akustische Modell implementiert. Im theoretischen Teil der Studie wurde überprüft, ob durch Übereinstimmung von Wirbelablösefrequenzen und akustischen Resonanzen in nicht durchströmten Rohrleitungsabzweigen oder auch

**Das komplette Rohrleitungssystem wurde für den mechanischen Studienteil digitalisiert und berechnet.**

durch die parallel arbeitenden Kolbenverdichter überhöhte Druckpulsationen auftreten. So kann z. B. eine störende Beeinflussung auf den Betrieb des Turbokompressors und Schluckgrenze erkannt werden. Im mechanischen Studienteil wurde das komplette Rohrleitungssystem mit allen Befestigungen als FEM-Strukturmodell abgebildet und die Anregung von möglichen Eigenfrequenzen / Eigenformen geprüft bzw. die zu erwartenden Betriebsschwingungen berechnet.



▲ Beispielbild einer Erdgas-Verdichteranlage

Das Ergebnis der Gesamtstudie durch KCE war im Wesentlichen die Überarbeitung des Befestigungskonzeptes der Rohrleitung. Bei der abschließenden messtechnischen Kontrolle der neuen Anlage wurden sowohl beim Einzelbetrieb des Turboverdichters als auch beim Parallelbetrieb mit den Kolbenverdichtern keine Auffälligkeiten in Bezug auf Druckpulsationen und Rohrleitungsschwingungen festgestellt.

Dipl.-Ing. Martin Westermann  
westermann@koetter-consulting.com

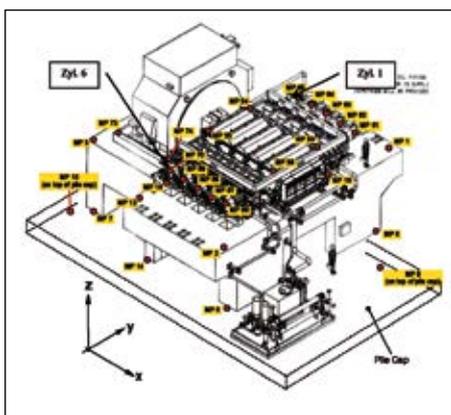


▲ LDPE-Anlage in Asien

## Ursachenanalyse zu Fundamentalschwingungen an einem Hyper-Verdichter

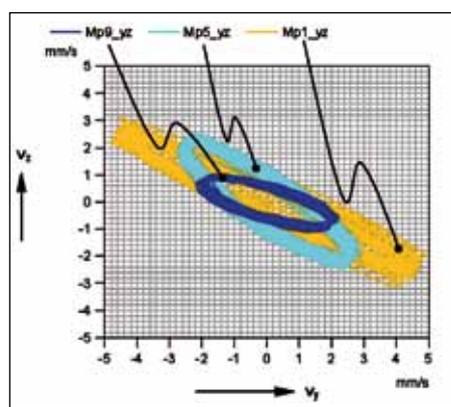
Beim ersten mechanischen Probelauf eines Hyper-Verdichters in einer neuen LDPE-Anlage in Asien wurden überhöhte Schwingungen am Maschinenfundament festgestellt. Der Kolbenkompressor mit einer Leistung von ca. 20 MW soll Ethylen von 250 bar auf einen Enddruck von 2800 bar in zwei Stufen verdichten. Zur Ursachenanalyse wurde durch KÖTTER Consulting Engineers KG (KCE) eine umfangreiche messtechnische Untersuchung vor Ort durchgeführt. Das Ziel war zunächst eine detaillierte Vermessung der Bewegungen des Kompressorfundamentes während eines weiteren mechanischen Probelaufs des Kompressors.

Die Fundamentalschwingungen, d. h. die Schwinggeschwindigkeiten, wurden an zahlreichen ausgewählten Positionen am Fundament zeitgleich mit einem Mehrkanalmesssystem erfasst. Einen Auszug der Messpositionen zeigt die Abbildung 1.1. An allen Messpositionen am Fundament wurde in drei Raumrichtungen x, y und z gemessen. Um Schwachstellen der gesamten Fundamentierung, die aus einer Pfahlgründung, der Pfahlkopfplatte, Betontisch und der Verbindung Betontisch-Fundament besteht, aufdecken zu können, wurden auch zwei Messpunkte auf der Pfahlkopfplatte (Pile Cap) ca. 2 m unter Flur vorbereitet, MP9 und MP10, s. Abbildung 1.1. Darüber hinaus wurden die Maschinenschwingungen von Kompressor und elektrischem Antrieb an unterschiedlichen Positionen gemessen.



▲ Abb. 1.1: Schwingungsmesspunkte an Fundament, Hyperverdichter und E-Motor.

Die höchsten Schwinggeschwindigkeiten auf dem Fundament wurden in horizontaler y-Richtung an MP1 mit 4,6 mm/s bei 3,3 Hz festgestellt. Die Frequenz entspricht der Drehzahl des Verdichters von 200 1/min. Die Messergebnisse zeigten, dass das gesamte Fundament mit der Pfahlkopfplatte sich wie ein Starrkörper verhielt und eine Kippbewegung vollführte (Abb. 1.3). Das bedeutete, dass die Gründung des Kompressorfundamentes keinen ausreichenden Widerstand gegen die freien Kräfte und Momente des Kompressorkurbeltriebs leisten konnte.



▲ Abb. 1.2: Bewegung in der y-z-Ebene (Orbitdarstellung), gemessene Schwinggeschwindigkeiten an den Messpunkten MP9, MP5 und MP1.

Für die Erarbeitung von Lösungen zur Erüchtigung des Fundamentes wurde unter anderem durch KCE eine Berechnungsstudie durchgeführt. Hierbei wurde die gesamte Aufstellung inklusive der Pfahlgründung in einem 3D-FEM-Modell abgebildet.

**Das gesamte Fundament mit der Pfahlkopfplatte verhielt sich wie ein Starrkörper und vollführte Kippbewegungen.**

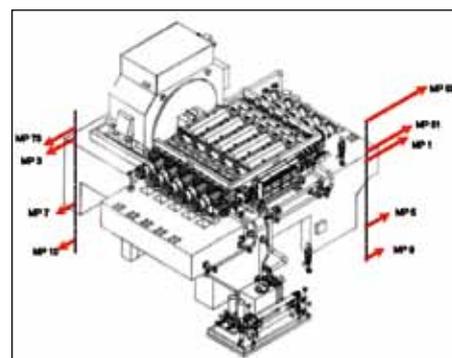
Die Ergebnisse zeigten, dass das zulässige Schwingungsniveau am Fundament nur mit aufwändigen Tiefbaumaßnahmen erreicht werden konnte. Tatsächlich wurde jedoch eine Bodenverbesserung durch eine sogenannte Low-Pressure Bodeninjektion

(Einpressen von Betonflüssigkeit in den Untergrund) vorgenommen, die nach einem erneuten Probelauf zwar eine Verringerung der Fundamentalschwingungen zeigte, jedoch erwartungsgemäß nicht das angestrebte Niveau erreichte.

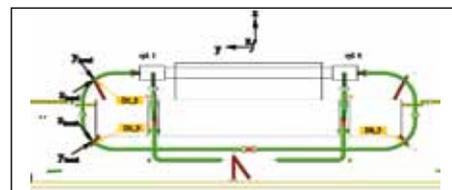
Daraufhin wurde unter anderem vereinbart, dass der Schwingungszustand des Hyper-Verdichters kontinuierlich überwacht wird.

**Der Schwingungszustand der Hyper-Verdichteranlage wird zur Kontrolle kontinuierlich überwacht.**

Zusätzlich wurden während der weiteren Inbetriebnahmephase der Anlage durch KCE detaillierte Schwingungsmessungen vorgenommen, die nicht nur zur Kontrolle und Überwachung der Fundament- und Maschinenschwingungen sondern auch der Rohrleitungsschwingungen des saug- und druckseitigen Leitungssystems des zweistufigen Hyper-Verdichters dienten (Abb. 1.4).



▲ Abb. 1.3: Relative Auslenkungen (Betrag) in y-Richtung über der Höhe aufgetragen, alle Bewegungen sind gleichphasig, Pfeilursprung entspricht nicht der physikalischen Messposition.

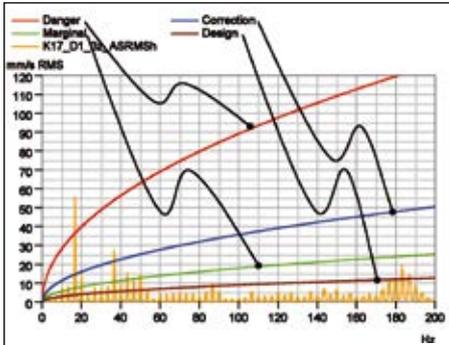


▲ Abb. 1.4: Messpositionen am verdichternahen Rohrleitungssystem des Hyperverdichters, Schnittzeichnung durch Maschine und Fundament in der y-z-Ebene (vgl. a. Abb. 1.1), Leitungen der 1. Stufe Zylinder 1 und 6.

Wie befürchtet traten am Rohrleitungssystem lokal Überschreitungen der frequenzabhängigen Orientierungswerte für zulässige Schwinggeschwindigkeiten nach VDI 3842 auf. Dies betraf vor allem die druckseitigen Rohrleitungen der ersten Stufe, s. Beispiel in Abbildung 1.5. Hier wurden

Fortsetzung von Seite 3 ▶

zum Teil Sofortmaßnahmen getroffen wie z. B. das Einsetzen von provisorischen Abstützungen, Holzkeilen etc., die später durch entsprechende Stahlkonstruktionen ersetzt wurden, s. Abbildung 1.6.



▲ Abb. 1.5: Peak-Hold-Spektrum der in z-Richtung gemessenen Schwinggeschwindigkeit an Messposition D1\_3 während des Ethylen-Startup der Anlage, frequenzabhängige Orientierungswerte nach VDI Richtlinie 3842.



▲ Abb. 1.6: Messpunkt D1\_3 mit Modifikation der Abstützung.

Für den Dauerbetrieb der Anlage wurde aufgrund des nicht bekannten Langzeitverhaltens der Bodeninjektion unter anderem empfohlen, die Fundament-, Maschinen- und Rohrleitungsschwingungen an ausgewählten Stellen kontinuierlich zu überwachen. Nach ca. einem Jahr nach der Inbetriebnahme wurden zur Kontrolle noch-

mals detaillierte Schwingungsmessungen in der Anlage durchgeführt. Die Fundamentalschwingungen zeigten ein unverändertes Niveau.

Insgesamt läuft die Anlage nun seit ca. drei Jahren zuverlässig. Der Fall zeigt, dass mit einem entsprechenden Konzept und Know-How in Einzelfällen Schwingungen z. B. wie hier am Fundament, die ein bestimmtes Richtwertniveau in gewissen Grenzen überschreiten, für den Dauerbetrieb toleriert werden können.

Dr.-Ing. Jan Steinhausen  
steinhausen@koetter-consulting.com

## Ausgezeichnet!

Ob Schüler- oder Studentenpraktika, Praxissemester oder Bachelor/Diplomarbeiten, KÖTTER Consulting Engineers bietet allen „Nachwuchs-Ingenieuren“ schon seit Jahren interessante Möglichkeiten, die Aufgaben beratender Ingenieure näher kennen zu lernen.

Dabei gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, unter anderem auch die des dualen Studiums. Dieses Studium wurde jetzt begleitend zum Job in Zusammenarbeit mit der Berufsakademie Emsland in Lingen von Herrn Patrick Tetenborg erfolgreich absolviert. Schwerpunkte seiner Ausbildung zum Wirtschaftsingenieur in unserem Unternehmen waren die verschiedenen Vorgehensweisen bei Schall- und Schwingungsanalysen, die Begleitung von Messeinsätzen sowie die betriebswirtschaftliche Betrachtung von Investitionen bzw. Projekten. Im Rahmen seiner „sehr guten“ Bachelorarbeit hat er die Verfahren der FFT- und Ordnungsanalyse auf Basis von Messungen detailliert untersucht und verglichen. Darüber hinaus konnte er an einer internatio-

nal besuchten Exkursion unter anderem zu einem LNG-Terminal auf der Isle of Grain in England teilnehmen. Als Abschluss des von 25 Studenten besuchten EFRC-Workshops war im Rahmen eines „Students Competition“ ein Report zum Vergleich von Turbo- und Kolbenverdichter zu erstellen. Dabei konnte unser Patrick Tetenborg seine erlangten Erfahrungen bestens umsetzen und erreichte in diesem Wettbewerb sogar den 2. Platz! Ein Geldpreis sowie eine Einladung zur EFRC-Konferenz in Florenz waren die Belohnung.

Das freut uns besonders und wir unterstützen unseren ursprünglichen „Praktikanten“ gerne in seinem weiteren Werdegang. Motiviert durch sein starkes technisches Interesse absolviert Herr Tetenborg nun ein Master-Maschinenbaustudium an der TU Dortmund.

Mittlerweile ist die Ausbildung qualifizierter Mitarbeiter durch ein duales Studium ein fester Bestandteil im Hause KÖTTER und steht interessierten „Ingenieuren in spe“ offen.

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

## Seminar Technische Akustik

am 18. Oktober 2011 in Rheine

Infos unter: [www.kce-akademie.de](http://www.kce-akademie.de)

Themen: Schallschutztechnik / Akustik und Lärmbekämpfung / Bewertung und Beeinflussung von Schallquellen / Regelwerke / primärer und sekundärer Schallschutz / Erläuterungen zur Arbeitslärmmrichtlinie und TA Lärm

Die Veranstaltung kann auch zusammen mit dem Workshop Kolbenverdichter am 19./20. Oktober 2011 gebucht werden!

## 15. Workshop Kolbenverdichter 2011

am 19./20. Oktober in Rheine

Jetzt den Termin vormerken!

Beteiligen Sie sich am „Call for Papers“, gestalten Sie das Programm mit!

Infos bei M. Brockmann  
Tel. +49 (0) 5971-9710.65  
martina.brockmann@koetter-consulting.com

[www.koetter-consulting.com](http://www.koetter-consulting.com)  
[www.kce-akademie.de](http://www.kce-akademie.de)

## KÖTTER Consulting Engineers KG

Bonifatiusstraße 400  
D-48432 Rheine  
Tel. +49 (0) 5971-9710.0  
Fax +49 (0) 5971-9710.43  
info@koetter-consulting.com

Handelsregister Steinfurt HRA 4948  
USt-IDNr.: DE 814 561 321  
Komplementäre Erwin W. Kötter und  
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 (0) 30-52 6788.0  
Fax +49 (0) 30-54 360.16  
info@kbi-berlin.de

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

