

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 94 (2003)
Heft: 15

Artikel: Bohrgestänge von der Rolle
Autor: Neuhold, Stefan / Fröhlich, Klaus / Inaudi, Daniele
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857575>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 29.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Bohrgestänge von der Rolle

Integration der elektrischen Leiter in die Schlauchwandung

Die konventionelle Bohrtechnik arbeitet mit Bohrgestängen, die aus mehrere Meter langen Segmenten zusammengesetzt werden. Das ist teuer und zeitaufwändig. Ein europäisches Forschungsprojekt hat deshalb das Ziel, die bisherigen Stahlstangen in der Erdölbohrtechnik durch einen hochfesten, temperatur- und korrosionsbeständigen «Schlauch» aus Karbon-Verbundwerkstoff zu ersetzen, der im fertig montierten Zustand von grossen Trommeln abgewickelt werden kann. Durch die Integration der elektrischen Leiter in die Schlauchwandung kann ein elektrischer Bohrmotor am Ende des Bohrstranges mit Energie versorgt werden. Es können aber auch Mess- und Regeldaten vom und zum Bohrkopf übertragen werden. In die Schlauchwand integrierte Glasfasern messen über die gesamte Länge des Bohrstranges – geplant sind Längen bis 7 km – sowohl die Temperatur als auch Dehnungen.

Heute wie früher sind die Suche nach Erdöl- oder Erdgasvorkommen sowie die Gewinnung dieser Rohstoffe durch entsprechende Bohrungen mit hohem Aufwand verbunden. Die konventionelle Tiefbohrtechnik arbeitet mit einem Bohrgestänge, an dessen unterem Ende der

*Stefan Neuhold, Klaus Fröhlich,
Daniele Inaudi*

Bohrmeissel und an dessen oberem Ende der Antrieb sitzt. Das Bohrgestänge besteht aus Stahlrohren von rund 9 m Länge und einem Durchmesser von rund 15 cm. Mittels eines geeigneten Bohrturmes wird Rohr auf Rohr aneinander geschraubt und so schrittweise Tiefe gewonnen. Je nach geologischer Beschaffenheit des Untergrundes (Fels, Sediment usw.) wird ein speziell dafür geeigneter Bohrmeissel verwendet. Im Inneren des Bohrgestänges wird eine dem Bohrklein¹⁾ und dem Lagerstättendruck angepasste Bohrspülung mit hohem Druck in die

Tiefe gepumpt. Diese dient unter anderem der Kühlung des Bohrkopfes, dem Austragen des Bohrkleins und dem Transport hydraulischer Energie zur Bohrlochsohle. Die Bohrrichtung muss nicht zwangsläufig senkrecht verlaufen. Je nach Erfordernis kann die Richtung gewechselt werden, bis hin zu horizontal verlaufenden Bohrungen. Jeder Wechsel des Bohrmeissels auf Grund der Abnutzung oder bei einer Anpassung an neue geologische Formationen hat das Rückziehen und Wiedereinführen des gesamten Bohrgestänges zur Folge. Das stückweise Kuppeln von Rohrsegmenten ist extrem zeitaufwändig; je nach zu erreichender Tiefe wird mit ungefähr einem Monat pro 1000 m Tiefe gerechnet. Die Bohrkosten für eine 5 km tiefe Bohrung betragen an Land etwa 6 Mio. US-Dollar, auf See mehr als das Doppelte und steigen mit zunehmender Tiefe exponentiell an [1].

Im Gegensatz zur konventionellen Bohrtechnik sitzt beim «Coiled Tubing» der Bohrantrieb direkt hinter dem Bohr-

meissel; der Bohrstrang wird also nicht mehr gedreht. Um bei einem Wechsel des Bohrmeissels ein rasches Ein- und Ausfahren zu ermöglichen, wird in der Methode «Steel Coiled Tubing» ein bis zu 6 km langes Stahlrohr mit einem Innendurchmesser von 2,5 bis 9 cm verwendet (Bild 1). Dieser Stahlschlauch ist auf einer Trommel mit einem Durchmesser von 4,5 m aufwickelbar. Der Radius der Trommel ist wegen des Transports auf der Strasse zwangsweise auf 4,5 m beschränkt. Mit Hilfe eines «Injector Head» wird das Rohr über angepresste Raupen auf- und abgespult. Um kontinuierlich und unabhängig vom Lagerstättendruck arbeiten zu können, wird der Bohrschlauch durch eine druckfeste Bohrlochabsperung eingeführt. All diese Massnahmen führen gegenüber der Verwendung eines konventionellen Bohrgestänges zu einer deutlichen Zeitersparnis.

Wenn nur kleinere Leistungen erforderlich sind, treibt ein Elektromotor den Bohrkopf an der Spitze. Die Versorgung des Motors erfolgt über ein hitze- und druckfestes Kabel im Inneren des Rohres. Die gebräuchlichere Methode ist aber, den Bohrkopf mittels einer direkt angekoppelten hydraulischen Turbine zu betreiben. Antriebsmedium ist in diesem Fall die von oben mit hohem Druck nach unten gepumpte Bohrflüssigkeit. Die derzeitigen Hauptanwendungen des «Steel Coiled Tubing» sind Aufbohren von Verstopfungen bereits bestehender Bohrlöcher, messtechnische Untersuchungen in

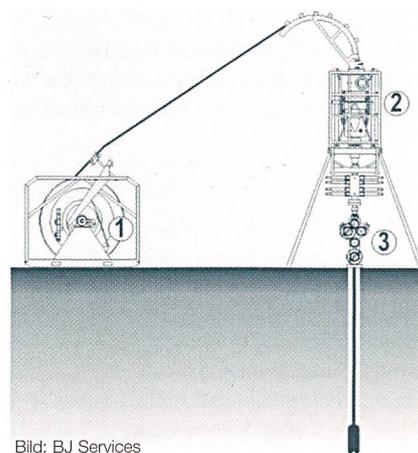


Bild: BJ Services

Bild 1 Schematische Darstellung des Steel Coiled Tubing

1: Trommel; 2: Injector Head; 3: Bohrlochabsperung

Die Forschung der Schweizer Partner (ETH Zürich, Fachgruppe Hochspannungstechnologie, und Smartec SA in Lugano) wird vom Bundesamt für Bildung und Wissenschaft (BBW) finanziell unterstützt. Die weiteren Partner innerhalb der EU sind: Airborne Development (Projektleiter, Spezialist für Verbundwerkstoffe, Holland), Universität Leuven (Materialwissenschaften, Belgien), BJ Services (Bohrspezialist, Holland), Shell Global Solutions (Holland).

verschiedenen Tiefen, Bohrlochspülungen mit diversen Chemikalien, um den Ölfluss wieder zu aktivieren, oder auch das «Herausfischen» eines abgebrochenen Bohrgestänges.

«Coiled Tube» in der Erdölförderung

Um das wesentlich umweltfreundlichere und auch kostengünstigere Verfahren auch für die Bohrung von Ölförderlöchern einsetzen zu können, wurde im Jahre 2000 ein EU-Projekt gestartet. Einem völlig neuen Ansatz folgend, arbeiten insgesamt sechs Partner im In- und Ausland an einer Machbarkeitsstudie (siehe Kasten). Das zentrale Element dieses Ansatzes ist ein mit Graphitfaser verstärktes Thermoplastrohr (Bild 2), in dessen Wandung die elektrische Energieversorgung für einen am Ende des Bohrstranges befindlichen Elektromotor von mehreren zehn Kilowatt Leistung eingebettet ist. Gegenüber der bisherigen Technik mit einem im Rohrrinneren eingelegten Energiekabel bieten die in der Schlauchwandung eingebetteten Leiter eine wesentliche Verringerung der hydraulischen Verluste der Bohrspülung und ein Wegfallen des umständlichen Einführens des Kabels. Zusätzlich verlaufen in der Rohrwand Glasfasern, die mit einer Auflösung von 1 m über die gesamte Länge des Bohrstranges – geplant sind Längen bis 7 km – sowohl Temperatur als auch Dehnungen messen können. Diese sehr detaillierten Messungen bedeuten einen grossen Fortschritt in der Zustandsdiagnose des Bohrschlauches vor und während des Bohrvorganges.

Die Hauptziele des Forschungs- und Entwicklungsprogramms sind Kostensenkung, höhere Produktivität, geringere Umweltemissionen und höhere Sicherheit gegenüber den konventionellen Bohrverfahren.

Eine Bohrausrüstung mit «PDT Coil Tubing» (PDT steht dabei für Power and Data Transmitting) und elektrischem Antrieb wird weniger Platz beanspruchen als konventionelle Bohrtürme. Der Flächenbedarf wird um 45%, die Höhe um 60% reduziert. Die Bohrzeit wird durch schnellere Ein- und Ausfahrzeit und die Möglichkeit von kleineren Bohrdurchmessern deutlich reduziert. Der gesamte Bohrvorgang verbraucht 85% weniger Energie und produziert 60% weniger Lärm. Im Weiteren wird mit um 70% reduziertem Gesteinsabtrag und 100%iger Recyclingfähigkeit der verwendeten Materialien gerechnet.

Einsatzbedingungen

Während eines Bohrprozesses werden sehr hohe Anforderungen an Materialien und Bohrwerkzeuge gestellt. Ein Bruch des Bohrgestänges kann eine neue Bohrung mit all ihren finanziellen Konsequenzen erfordern. Bedingt durch die hohe Explosionsgefahr auf Bohrplattformen wird der explosionsssicheren Auslegung aller Anlagenteile, insbesondere der elektrischen Anlagen, grösste Sorgfalt geschenkt. Deswegen ist die elektrische Sicherheit bezüglich Personenschutz und Funkenüberschlag ein Hauptaspekt bei der Untersuchung des elektrischen Systems des zukünftigen PDT-Coil. Die Temperaturzunahme pro Kilometer Tiefe beträgt etwa 30 °C, wobei je nach geologischer Formation grosse Abweichungen möglich sind. Bei geothermischen Bohrungen beträgt die Temperatur in 5 km Tiefe oft schon um die 200 °C.

Für gewisse Spülvorgänge werden sehr aggressive Bohrflüssigkeiten wie z.B. konzentrierte Salzsäure oder konzentrierte Salzlösungen (NaCl, NaBr u.a.) verwendet. Der Umgebungsdruck im Bohrkopfbereich beträgt in 5 km Tiefe rund 500 bar (senkrechte Bohrung). Der Bohrantrieb erzeugt ein hohes Drehmoment, welches durch den angeflanschten Bohrschlauch kompensiert werden muss; er verdreht sich deswegen schraubenförmig im Bohrloch. Durch den Bohrprozess werden starke Vibrationen erzeugt; beim kurzzeitigen Blockieren und wieder Drehen des Bohrmeissels werden zudem hohe Beschleunigungskräfte erreicht.

Diese Einsatzbedingungen bedeuten eine starke Einschränkung der in Frage kommenden Werkstoffe und Konstruktionsmöglichkeiten.

Es ist eine optimale Balance zu finden zwischen der mechanischen Belastbarkeit, einem möglichst grossen Querschnitt für den Durchsatz der Bohrflüssigkeit, dem Eigengewicht und ausrei-

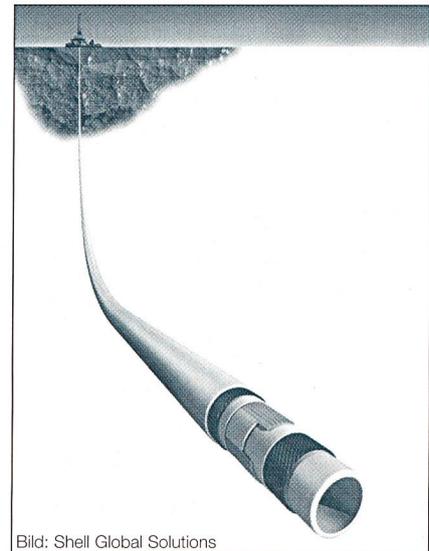


Bild: Shell Global Solutions

Bild 2 Schematische Darstellung des Power and Data Transmitting Composite Coiled Tubing

chendem Platz für die elektrischen Leiter. Die Aufwickelbarkeit auf einer Trommel mit einem Durchmesser von 4,5 m stellt zusätzliche hohe mechanische Anforderungen.

Die Aufgabe der schweizerischen Partner an diesem europäischen Forschungsprojekt ist es, die elektrischen Anforderungen zu lösen und ein Sensorsystem zu integrieren, das die auftretenden mechanischen Spannungen längs des bis zu 7 km langen Bohrschlauches ermitteln soll. Völlig neue Fragestellungen treten dabei auf, wie sie in konventionellen Kabelverbindungen nicht zu finden sind. Einige Beispiele sollen das veranschaulichen:

- das Wechselspiel zwischen Frequenzumrichter und Motor, welche über eine 6 km lange Leitung von sehr niedrigem Wellenwiderstand (rund 5 Ω) verbunden sind;
- das Platzangebot für die Isolation ist sehr klein und die Umgebung äusserst aggressiv bei Druckwerten von mehreren 100 bar und Temperaturen bis zu 200 °C;
- die Leitung wird hohen Zug- und Torsionskräften sowie Vibrationen und Schlägen ausgesetzt;
- es müssen mehrere steckbare Kuppelstellen zwischen verschiedenen Bohrschlauchabschnitten eingebaut werden;
- es wird ein Diagnosesystem benötigt, das Information über den Zustand jedes Spulensegments liefert.

Nachfolgend werden die technischen Ansätze und Lösungen vorgestellt. Sie zeigen, dass die Elektrotechnik, aber auch die Informationstechnik einen we-

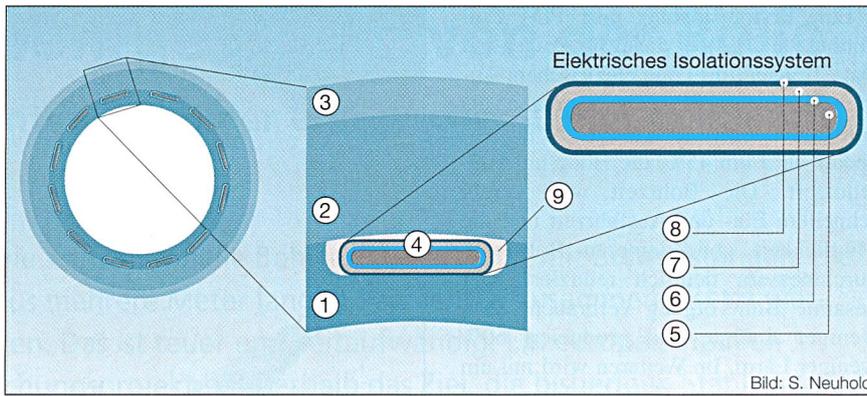


Bild 3 Querschnitt des künftigen Bohrschlauches mit den eingelegten elektrischen Leitern

1: Wickelrohr; 2: Karbonfaserschicht; 3: äussere Beschichtung des Bohrschlauches; 4: elektrisches Isolations-system; 5: elektrischer Leiter; 6: elektrische Isolation; 7: elektrischer Schirm; 8: Schutzschicht gegen Flüssigkeiten; 9: Füllstoff zur Fixierung des Leiters

sentlichen Beitrag zur ökologischen und ökonomischen Gewinnung von fossiler Energie zu leisten vermag. Nicht zu vergessen ist, dass die gewonnenen und noch zu gewinnenden Erkenntnisse einen unmittelbaren Nutzen für die noch in den Kinderschuhen steckende geothermische Energiegewinnung in der Schweiz haben können.

Der Lösungsansatz

Der PDT-Coil-Bohrschlauch stellt das Verbindungsstück zwischen einem sich hinter dem Bohrmeissel befindenden Elektromotor und dem Frequenzumrichter an der Erdoberfläche dar. Um sich möglichst flexibel an die jeweiligen Erfordernisse anzupassen, wird der Bohrschlauch aus Teilstücken zu jeweils 1 km gefertigt, die je nach benötigter Länge gekuppelt werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit eines robusten Verbindungssystems für die mechanische, elektrische und fiberoptische Verbindung zweier Bohrschlauchstücke. Bild 3 zeigt einen Querschnitt des Bohrschlauches mit den eingelegten elektrischen Leitern.

Um die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Bohrschlauches möglichst unabhängig zu optimieren, wurde das elektrische Isoliersystem vom mechanisch tragenden Karbonfaserteil weitgehend separiert.

Das Wickelrohr (Position 1 in Bild 3) besteht aus einem Hochtemperatur-Thermoplast. Es dient einerseits als mechanisches Grundgerüst, um die Karbonfaserschicht aufzuwickeln, andererseits stellt die Innenfläche für die eventuell mit Schwefelbestoffen versetzte Bohrspülung eine flüssigkeitsdichte, chemikalienbeständige und glatte Oberfläche dar.

Die Karbonfaserschicht (2) wird, um die mechanische Stabilität zu optimieren, in verschiedenen Winkeln aufgewickelt. Das Matrixmaterial ist ebenfalls ein Hochtemperatur-Thermoplast, der sich gut mit dem Wickelrohr verschweissen lässt. Durch die Verwendung von Karbonfasern ergibt sich gegenüber Stahl eine Gewichtsreduktion um den Faktor 2 bis 2,5. Der Verbundwerkstoff hat eine höhere Zugfestigkeit als Stahl und kann zudem durch seine anisotropen Eigenschaften an spezifische Lastfälle angepasst werden.

Eine äussere Beschichtung (3) des Bohrschlauches minimiert die Oberflächenrauigkeit und schützt die darunter liegenden Schichten vor mechanischen Beschädigungen.

Das in der Schlauchwandung eingebettete elektrische Isolationsystem (4) stellt in der Form ein Novum dar. Die Konstruktion wurde im April 2002 zum Patent angemeldet [2]. Der Leiter (5) ist auf eine Stromtragfähigkeit von 15 A Dauerstrom ausgelegt. Bei einer maximalen Systemlänge von 7 km werden rund 50% der eingespeisten Wirkleistung in Wärme umgewandelt. Dies ist neben der grossen Distanz zum Bohrkopf auch durch die extrem knappen Platzverhältnisse in der Rohrwandung bedingt, die keinen grösseren Leiterquerschnitt zulassen. Trotz der hohen Leiterverluste ist durch den kontinuierlichen Durchfluss der Bohrspülung während des Bohrvorganges im Bereich von 200 l pro Minute eine ausreichende Kühlung gewährleistet. Da das Gewicht pro Meter des Rohrsystems einen Einfluss auf die maximal erreichbare Länge des Systems hat, wurde auch die Verwendung von Aluminium als Leitermaterial untersucht. Auf Grund der höheren Bruchzähigkeit wurde aber Kupfer der

Vorzug gegeben. Die Zug- und Stauchungsbeanspruchungen beim Auftrommeln sowie im Betrieb bei Bohrtiefen im Kilometerbereich stellen hohe Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften des Leiters. Durch die Verwendung von mehreren einzelnen Flachleitern pro Motorphase mit vollständigem Isolationsystem wird einerseits eine gute Platzausnutzung erreicht und andererseits eine Redundanz geschaffen, die es ermöglichen soll, den Ausfall eines einzelnen Leiters zu kompensieren.

Die elektrische Isolation (6) muss auf eine Temperatur von etwa 160°C und auf Dehnung und Stauchung von rund 1,5% ausgelegt werden. Die zulässigen materialabhängigen Feldstärken müssen auf Grund der beschränkten Platzverhältnisse stärker ausgenutzt werden als bei herkömmlichen Konstruktionen in der Energietechnik. Dies ist möglich, weil gleichzeitig die geforderte Lebensdauer zehnmal niedriger ist.

Um im Betriebs- oder im Kurzschlussfall die Bildung von Funken durch elektrische Entladungen zwischen der Ausenfläche des Bohrschlauches und geerdeten Teilen auf der Bohrplattform zu verhindern, sind die eingelegten elektrischen Leiter mit einer genügend stromtragfähigen Schirmung (7) versehen. Die Kohlefasern der mechanisch tragenden Struktur haben gegenüber Kupfer eine rund hundertfach geringere elektrische Leitfähigkeit und würden im Kurzschlussfall einen zu hohen Spannungsabfall aufweisen.

Die äussere Schutzschicht (8) gegen Flüssigkeitspenetration und chemisch aggressive Medien hat die Aufgabe, die elektrische Isolation selbst bei umgebenden Flüssigkeiten wie konzentrierter Salzsäure bei 150°C, 500 bar Druck sowie hohen Zugspannungen trocken zu halten. Diese Vorsichtsmaßnahme ist erforderlich, weil die Bohrspülung durch langsame Penetration in den Verbundwerkstoff oder durch feine Risse im Wickelrohr an die äussere Schicht des Isola-

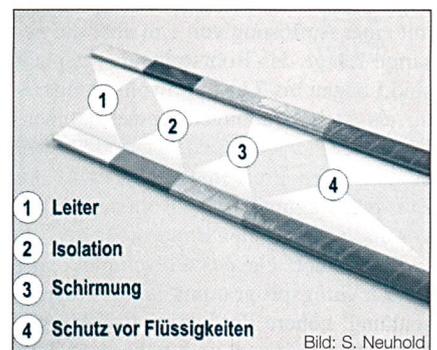


Bild 4 Erste Prototypen des elektrischen Isolations-systems

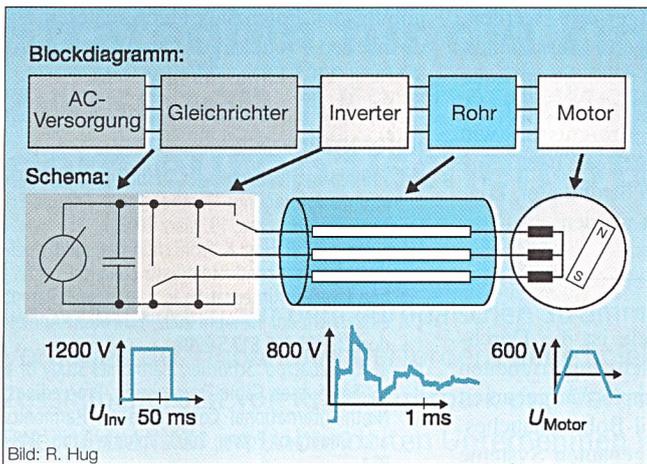


Bild 5 Schematische Darstellung des elektrischen Systems der Bohrausrüstung mit PDT-Coil

tionssystems gelangen könnte. Bild 4 zeigt Prototypen des hier geschilderten Isolationssystems.

Um das Isolationssystem unter Bohrloch-Umgebungsbedingungen testen zu können, wurde an der ETHZ ein Autoklav (Dampfdruckapparat) aufgebaut, der den Prüfling bis zu 1000 bar bei 200 °C aussetzen kann und in dem sich gleichzeitig das Verhalten unter variablen Zugkräften untersuchen lässt.

Beim Einbau in die Bohrschlauchwandung muss eine optimale Haftung der Komponenten Füllwerkstoff (9), Leiter und Wickelrohr sichergestellt werden. Ein Gleiten relativ zum mechanisch tragenden Kohlefaser-Verbundwerkstoff würde bei hohen Zugkräften zum Bruch des elektrischen Leiters führen.

Nach der Produktion, vor seiner Inbetriebnahme am Bohrloch und während des Bohrprozesses wird der Bohrschlauch auf seine Integrität geprüft werden. Da je nach verwendetem elektrischem Isolationsmaterial und der Geometrie des Isolationssystems ein unterschiedliches frequenzabhängiges Dämpfungsverhalten zu erwarten ist, werden nebst den konventionellen Mitteln der dielektrischen Prüfung wie Teilentladungsmessung, Verlustfaktormessung ($\tan \delta$ -Messung) auch weitere Prüfmethoden untersucht. Dies ist sinnvoll, weil die erreichbare Datentransferrate ebenfalls weitgehend vom Dämpfungsverhalten abhängig ist.

Die Glasfasern des faseroptischen Messsystems werden in spezielle Kohlen-Wickelbänder integriert und beim Bewickeln der Kohlenfaserschicht mitgewickelt. Dadurch ist eine sehr solide Bindung an die mechanisch tragende Struktur gegeben und somit eine optimale Kraftübertragung auf die messenden Glasfasern.

tigkeit, Feldtauglichkeit, minimierter Aussendurchmesser zur einfachen Durchführung durch den Injector Head und die Bohrlochabspernung berücksichtigt werden. Wie schon in der Bohrschlauchwandung steht für die elektrischen und optischen Verbindungen nur sehr beschränkt Platz zur Verfügung. Das Verbindungssystem wird in Stahl ausgeführt werden.

Das elektrische System

Bild 5 zeigt eine schematische Darstellung des elektrischen Systems. Durch einen auf der Bohrplattform vorhandenen Generator wird ein Frequenzumrichter gespeist. Über diesen wird mittels der gewählten Frequenz die Drehzahl des Bohrmotors eingestellt. Durch die steilen Schaltflanken des Frequenzumrichters können auf der Verbindungsstrecke (dem Bohrschlauch) transiente Überspannungen und Resonanzen auftreten. Ebenso kann der Bohrmotor durch unregelmäßige Drehbewegungen während des Bohrbetriebes sowie durch Torsionsschwingungen des Rotors in der Längsachse Transienten erzeugen. (Der Bohrmotor kann mehrere Meter lang werden.)

Zur Spezifikation der transienten elektrischen Beanspruchung wurde an der ETH Zürich ein Simulationstool entwickelt. Die Berechnungen zeigen das Auftreten von isolationstechnisch gefährlichen Resonanzen. Das Problem, umrichter gespeiste Motoren an langen Kabeln zu betreiben, ist in der Literatur bekannt [3]. Zur Berechnung der transien-

Das Verbindungssystem zwischen zwei Bohrschläuchen muss in mehrfacher Hinsicht optimiert werden. Zum einen muss es die auftretenden mechanischen Kräfte übertragen können, zum anderen sollen auch Aspekte wie sichere Verbindung der elektrischen und fiberoptischen Stecksysteme, minimale hydraulische Verluste im Rohrrinnen, Dich-

ten dielektrischen Belastung des Isolationssystems muss das Gesamtsystem Umrichter-PDT-Coil-Bohrmotor simuliert werden.

Da bereits Unterschiede in der Frequenzsynthese des Umrichters einen Einfluss auf die Entstehung von Resonanzen haben, ist eine sehr detaillierte Kenntnis des Umrichters sowie des Bohrmotors notwendig, um beim Hochfahren des Motors gefährliche Überspannungen zu vermeiden. Ebenso muss ein mögliches Ausgangsfilter für den Umrichter an das Gesamtsystem genau angepasst werden. Die je nach Bohrloch unterschiedlichen Gesamtlängen des Bohrschlauches erschweren die Aufgabe zusätzlich.

Strukturüberwachung mit Glasfasersensoren

Wegen der schwierigen Einsatzbedingungen und der Kosten eines eventuellen Bruchs des PDT-Coil im Bohrloch soll ein Überwachungssystem im Bohrschlauch integriert werden. Dieses System soll wichtige mechanische und thermische Größen während aller Betriebsphasen erfassen, und zwar während der Produktion, des Transportes, der Auf- und Abwicklung, der Bohrung und vor der nächsten Wiederverwendung.

Für diese Zielsetzung haben sich faseroptische Sensoren als ideal erwiesen. Ihre kleine Dimension, ihre Kompatibilität mit Kohlen- und Glas-Verbundwerkstoffen, die Zuverlässigkeit in aggressiver Umgebung und die elektrische Passivität sind wichtige Vorteile für diese Anwendung. Um die ganze Länge des PDT-Coil mit einer genügenden räumlichen Auflösung messen zu können, sind Tausende von Sensoren nötig; aus diesem Grunde wurde entschieden, ein verteiltes faseroptisches Messsystem anzuwenden. Ein von der Firma Omnisens in Lausanne entwickeltes System (DiTeSt-System²⁾) ermöglicht die Messung von Dehnungen und Temperaturen entlang eines einzigen Glasfasersensorenkabels, und zwar mit einer Reichweite von 25 km und einer Auflösung von 1 m (bei durchgehendem Faseroptik-Strang) [4]. Dieses System wird schon heute bei der Überwachung

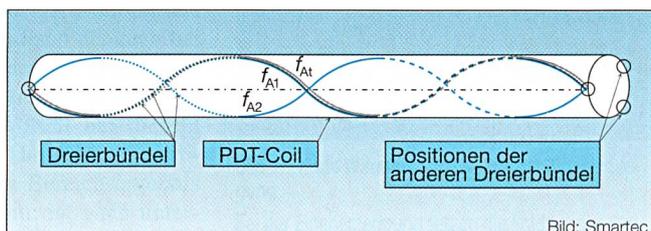


Bild 6 Anordnungen der Glasfasern des verteilten optischen Messsystems

von Leckagen in Rohrleitungen und Wärmepunkten in Hochspannungskabeln erfolgreich angewendet.

Zwei optische Fasern werden im PDT-Coil eingesetzt (Bild 6): Eine ist mit dem Rohr verbunden und spiralförmig installiert (Faser f_{A1}), während die zweite frei in einem eingebetteten Stahlrohr liegt (Faser f_{A2}). Die erste Faser wird die mechanischen Dehnungen des Bohrschlauches messen, während die zweite die Temperatur des Bohrloches misst. Mit der Installation der dritten Faser (Faser f_{A3}) wird es zusätzlich möglich sein, Torsion, Krümmung und indirekt auch Scherkräfte zu messen. Durch spezifische Berechnungen werden aus den lokalen Dehnungsmessungen globale Dehnungen, Biegungen und Torsionen gewonnen. Die verteilten Temperaturmessungen erlauben eine feine Überwachung des Bohrloches; beispielsweise können Öl-

produktionstiefen festgestellt werden. Mit einer unabhängigen Messtechnik wird es zudem möglich sein, die optische Faser als Schallwellendetektor zu verwenden. Akustische Ereignisse, wie Bruch im Verbundwerkstoff oder eine starke Teilentladung im Stromleiter, können so ebenfalls erfasst werden.

Ausblick

Eines der Projektziele ist die Durchführung einer elektrisch angetriebenen Bohrung mit einem komplett aufgebauten Teilstück des PDT-Coil-Bohrschlauches. Dabei werden alle eingebauten Systeme (elektrische Energieversorgung, Diagnose, Datenübertragung) einer Funktionsprüfung in realer Umgebung unterzogen. Die gewonnenen Resultate erlauben die Überprüfung der Simulationen und bilden eine gute Basis für die Beur-

teilung des Potenzials einer späteren industriellen Produktion. Das Projekt wird Anfang 2005 abgeschlossen sein.

Referenzen

- [1] E. Bintakies: Prinzipien der Tiefbohrtechnik. ETG-Informationstagung: Geothermische Energie-Erzeugung, FH Aarau, 19. März 2003.
- [2] S. Neuhold, R. Hug, K. Fröhlich: A flat, solid, shielded electrical conductor (with chemical protection layer) for integration in a tube wall. Patent eingereicht am 19. April 2002, EU-Patent-Anmeldung Nr. 02 008 817.5-2208.
- [3] M. Grötzbach, J. Schörner: Harmonics Study of a CSI-Fed Subsea Cable Transmission. Proceedings: Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000, Volume 3, pp. 948-954.
- [4] L. Thévenaz, M. Facchini, A. Fellay, Ph. Robert, D. Inaudi, B. Dardel: Monitoring of large structure using distributed Brillouin fiber sensing. SPIE, OFS-13, 13th International Conference on Optical Fiber Sensors, Kyongju, Korea (1999), Vol. 3746, pp. 345-348.

Angaben zu den Autoren

Stefan Neuhold, Dipl. Ing. ETH, ist seit 2001 Assistent am Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik. Er betreut in dieser Funktion den elektrischen Teil des EU-Forschungsprojektes «PDT-COIL». ETH Zürich, Physikstrasse 3, 8092 Zürich, neuhold@eeh.ee.ethz.ch

Prof. Dr. **Klaus Fröhlich** ist seit 1997 Professor für Hochspannungstechnologie an der ETH Zürich. Zuvor war er 7 Jahre Inhaber eines ähnlichen Lehrstuhles an der TU Wien. Dem voraus gingen elf Jahre Entwicklungstätigkeit bei BBC/ABB Schweiz auf dem Gebiete der Hochspannungsapparate. Klaus Fröhlich ist Vorstandsmitglied von Electrosuisse, Chairman des Cigré Studienkomitees A3 (High Voltage Equipment) und Fellow Member des IEEE.

Daniele Inaudi, Dipl. Phys., ist Gründer der Firma Smartec SA (Grancia, Schweiz), welche seit 1996 im Bereich der Strukturüberwachung und faseroptische Sensoren tätig ist. Er ist Chairman der jährlichen «SPIE International Symposium and Smart Structures and Materials» und Mitglied des Organisationskomitees der «International Conference on Optical Fiber Sensors».

¹ Bohrklein: Während des Bohrens durch den Bohrmeissel in kleine Bruchstücke zertrümmertes Gestein (engl. Cuttings).

² DiTeSt: Distributed Temperature and Strain Monitoring System.

Des tiges de sondage à dérouler

Intégration des conducteurs électriques dans la paroi des tuyaux

La technique de forage conventionnelle a recours à des tiges de forage assemblées à partir de segments longs de plusieurs mètres. Cette méthode est coûteuse et prend beaucoup de temps. Un projet européen de recherche a pour but de remplacer les tiges d'acier actuellement employées dans la technique de forage pétrolier par un «tuyau» à base de carbone à haute résistance mécanique, à la température et à la corrosion, pouvant, à l'état monté, être déroulé depuis de grands tambours. Grâce à l'intégration des conducteurs électriques dans la paroi du tuyau, il est possible d'alimenter un moteur électrique de forage aussi bien que de transmettre des données de mesure et de réglage vers la tête de forage ou depuis celle-ci. Les fibres de verre intégrées à la paroi du tuyau mesurent la température et les dilatations sur toute la longueur du forage, dont les longueurs prévues atteignent 7 km.