

DISS. ETH NO. 17358

**A Hyper Elastic Conductor
for Bulk Energy Transfer in the Wall of
Spoolable Tubes for Electric Deep Drilling**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Technical Sciences

presented by

STEPHAN MICHAEL NEUHOLD

Dipl. El. Ing ETH, Swiss Federal Institute of Technology Zurich

born December 7, 1965

citizen of Flühli, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Klaus Fröhlich, examiner
Prof. Dr. Mehdi Farshad, co-examiner

2007

Abstract

Deep drilling technologies are used to exploit oil, gas, water and geothermal energy. Sixty percent of the world's energy demand is guaranteed by means of these technologies. Even small improvements in the efficiency of the exploitation therefore lead to a high economical impact.

The conventional rotary drilling technology was invented in the beginning of the 20th century. Although many improvements were made during the last 100 years, the drilling process is still slow, expensive and shows low precision. Each change of the drill bit requires the assembling and disassembling of the entire drill string. For the driving of the drill bit, the entire drill string with a length of up to several kilometres is rotated, resulting in a power consumption of several MW. Furthermore, hardly any information can be retrieved from the wellhead during drilling.

The so-called „steel coiled tubing technology“ features a significantly reduced trip-time including a reduced work load and energy demand. The technology based on spoolable steel tubes with a length of up to 6 km is applied for cleaning, stimulation and „fishing“ of broken drill strings in existing wells. Drilling with hydraulic drilling motors is, however, limited to a length of approx. 900 m.

In order to make a significant step in the development of deep drilling technologies, a new technology was researched and developed on the basis of the coiling principle of the steel coiled tubing technology within the 5th framework of the European research program.

The Power and Data Transmitting-COILed drilling technology (PDT-COIL) aims for drilling of workholes of up to 5 km depth with significant improvements in speed, cost and precision through the use of an electric downhole drilling motor, high strength composite material and high speed data transfer. The electric conductors for the supply of the downhole motor as well as the optical fibres for the data transfer and the measurement of temperatures and strain with longitudinal resolution are embedded in the tube wall of the spoolable drilling tube. The drilling tube shows a diameter of 6 to 9 cm, is transported in segments of 1 km and is assembled to the required length at the drilling station.

The work of the high voltage laboratory group at the ETH Zurich focused on solutions and system aspects of the electric energy transmission from the surface to the drill head.

Within this work, two aspects were investigated:

- The evaluation and optimisation of solutions for the electric energy transfer in the tube walls of spoolable tubes
- The estimation of the electric power transfer capability of the PDT-COIL drilling technology under service conditions

First spooling experiments with tube wall embedded copper conductors showed a complete mechanical destruction of the conductors already after 40 bending cycles. The reason was the low elasticity of approx. 0.08 % of the applied conductor material and the problem of buckling under compression load. No conductor material was available that fulfilled the requirement of 1000 load cycles at a resulting strain and compression amplitude of ± 1.5 %. Therefore, it was necessary to find a new conductor system ful-

filling the fatigue life requirements and providing a power transfer capability of at least 20 kW to a well depth of 5 km.

The optimal solution evaluated consists in an elastic core with helically wound electric conductors; hereafter called: “elastic conductor”. The elasticity of the elastic conductor can be optimised by the pitch angle of the helical conductor.

The scientific challenge was in the optimisation of the electric conductivity of the elastic conductor at a given fatigue life.

Based on the calculation of the maximal axial and total strain in the helical conductor and the fatigue life data of the applied material, a method was developed for the estimation of the elastic range, the fatigue life and the optimisation of the electric conductivity depending on the design parameters of the elastic conductor. The experimental investigations showed an elastic range of 43 %, which are in good correlation with the elastic range of 40 % obtained through theoretical calculations based on the method described above.

The simulation and the experiment showed a highly non-linear dependency of the elastic range and the pitch angle of the helical conductor. An industrially produced shielded cable based on the elastic principle was tested for fatigue life with 1100 bending cycles at 1.5 % strain and 5500 bending cycles at 1.0 % strain. A permanent resistance change or visible damage could not be detected.

A theoretical reduction of the applied ± 1.5 % axial strain to the cable to 0.052 % axial strain in the conductor was obtained. The experimental investigation showed a reduction to 0.016 % since tolerances further reduce axial strain. Fatigue life estimations showed a fatigue life of more than 130'000 cycles, until cracks in the surface of the conductor wire would occur.

At an axial strain amplitude of ± 1.5 % and a fatigue life requirement of > 2000 cycles, a conductivity of 21.5 % compared to a straight solid copper conductor of equal dimensions was obtained for the electrically optimised design.

For the second subject, the scientific challenge consisted in the complexity of the thermal situation. The maximal electrical current in the embedded conductor is dependent on the thermal rating of the electrical insulation, the ambient temperature and the heat dissipation of the electric losses. One part of the drilling tube is spooled on a reel on the surface; the other part is in the well. In the annulus of the drilling tube, cool drilling fluid is flowing towards the drilling head. This drilling fluid is heated up by the electric losses in the conductor, by the heat emission of the ground and the drilling fluid returning from the well head on the outside of the drilling tube. The conductor losses respectively the electric resistance are temperature-depending, as well as different parameters of the drilling fluid like density, specific heat conductivity, Prandl number and dynamic viscosity. Due to the high number of parameters, a closed model is not realistic. Based on empirical values, two model geometries were calculated, one for the realised drilling tube and one for a drilling tube with a larger diameter made of PEEK; a high-temperature thermoplastic material.

For the model, the drilling tube including the drilling fluid and the ground were discretized in radial and axial direction. With the help of material and energy balance equations, the power transfer capability of the particular model geometry as well as the tem-

perature of the conductor, the drilling fluid and the surrounding ground was calculated depending on the well depth.

For the first model geometry a maximal drilling depth of 3700 m with a transferable electric power of 25 kW was calculated. At reduced depths 80 kW at 1000 m and 50 kW at 2000 m can be transferred at a service voltage of 2 kV DC.

The maximal drilling depth for the second model geometry is practically unlimited due to the high temperature rating of the material. It is possible to transfer 500 kW to 500 m, 300 kW to 1500 m and 100 kW to 5500 m drilling depth at a service voltage of 3 kV DC. The second model geometry was designed for a fatigue life of 2000 bending cycles at a bending radius of 2 m and a service temperature of 250 °C including a safety factor of 2.5. All calculations are based on conservative assumptions, for example the application of direct current (DC) power transmission, which requires a conductor for the return current. Compared to alternating current, direct current shows no reactive power losses and features advantages in explosive environment (no induced currents). By applying a symmetrical three phase alternating current transmission the available conductors would double since no conductors for the return current are needed. This would lead to a significantly increased power transfer capability. Further measures for increasing the power transfer capability can be the increase of the service voltage or the increase of the drilling fluid mass flow.

It was shown that the electrical energy transfer of the drilling tube with the presented elastic conductor is a solution that works. The elastic conductor features a wide range of applications; much wider than required. Due to its high elasticity range, the elastic conductor would also be suitable for the embedment in drilling tubes with a smaller bending radius or drilling tubes with a significantly larger diameter.

The possibility of embedment in solid structures opens a wide field of applications like for instance the energy supply of actuators in highly loaded composite structures of the aircraft industry. A miniaturised version of the elastic conductor could also be used as an elastic and fatigue resistant solution for biomedical applications like intramuscular electrodes, cardiac performance monitoring or artificial nerves which stretch along with muscles. A power transfer capability of 100 kW to a drilling depth of 5500 m was calculated for a temperature-optimised drilling tube. This high electric power available at the well head allows the supply of novel electric rock destruction processes based on plasma and discharges.

Kurzfassung

Tiefbohrtechnologien werden vorwiegend für die Förderung von Gas und Öl und geothermischer Energie eingesetzt, Da sechzig Prozent des Welt-Energiebedarfs mit diesen Quellen abgedeckt werden, bewirken schon kleine Verbesserungen in der Effizienz der Bohrtechnologie enorme ökonomische Vorteile.

Die konventionelle Bohrtechnologie mit drehendem Bohrgestänge ist in der Öl- und Gas-Industrie zwar gut etabliert, jedoch ist diese Technik vergleichsweise uneffizient und neue Lösungen wären wünschenswert. Jeder Wechsel des Bohrkopfes erfordert die Demontage und anschließende Montage des Bohrgestänges. Ein Verfahren welches extrem zeit- und arbeitsintensiv, und damit kostenaufwendig ist. Für den Antrieb der Bohrkronen wird das bis zu einige Kilometer lange Bohrgestänge gedreht, wodurch die erforderliche hohe Antriebsleistung im Bereich von einigen MW liegt. Ein Nachteil ist auch, dass während des Bohrprozesses kaum Informationen über die Verhältnisse am Bohrkopf übermittelbar sind.

Eine wesentlich kürzere Ein- und Ausfahrzeit aus dem Bohrloch damit deutlich geringerer Arbeitsaufwand sowie einen signifikant niedrigeren Energie-Aufwand weist das sogenannte „steel coiled tubing“-Verfahren auf. Die auf einem aufrollbaren Stahlrohr mit Längen bis zu 6 km basierende Technologie wird für das Reinigen, Stimulieren und das „Fischen“ von abgebrochenem Bohrgestänge in bestehenden Bohrlöchern verwendet. Bohrungen mit hydraulischen Bohrmotoren beschränken sich jedoch auf eine Länge von ca. 900m.

Um der Tiefbohrtechnik einen neuen Impuls zu geben, wurde im Rahmen des 5. europäischen Forschungsprogramms ein neues Bohrverfahren erforscht und entwickelt, das auf dem Aufroll-Prinzip des „steel coiled tubing“-Verfahrens basiert. Die Bohrtechnologie des sog. „Power and Data Transmitting-COILED tubing“ (PDT-COIL) hat zum Ziel, Tiefenbohrungen bis zu einer Tiefe von 5 km mit deutlichen Verbesserungen in Bezug auf Geschwindigkeit, Kosten und Genauigkeit zu realisieren. Dies mit Hilfe eines elektrischen Bohrmotors am Bohrkopf, einer Hochgeschwindigkeits-Datenverbindung zum Bohrkopf und der Verwendung von hochfesten Verbundwerkstoffen. In der Schlauchwand des aufrollbaren Bohrschlauchs sind elektrische Leiter für die Energieversorgung des Bohrmotors sowie optische Fasern für die Datenübertragung und die längenaufgelöste Messung von Dehnungen und Temperatur eingebettet. Der Bohrschlauch weist einen Durchmesser von 6 – 9 cm auf, wird in Segmenten von 1 km transportiert und am Bohrloch auf die erforderliche Länge zusammengesteckt. Die Arbeit an der Fachgruppe für Hochspannungstechnologie der ETH Zürich konzentrierte sich auf Lösungen und System-Aspekte der Übertragung von elektrischer Energie von der Oberfläche zum Bohrkopf.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurden zwei Themen untersucht:

- Die Evaluation und Optimierung von Lösungen für die Übertragung von elektrischer Energie in den Schlauchwänden von aufrollbaren Rohren
- Die Abschätzung der elektrischen Energieübertragungskapazität der PDT-COIL Technologie unter Betriebsbedingungen

Erste Versuche mit in der Schlauchwand eingebetteten Kupferleitern führten bereits nach 40 Biegezyklen zur vollständigen mechanischen Zerstörung der Leiter. Die Ursache war die geringe Elastizität von ca. 0.08 % des verwendeten Leitermaterials sowie das Problem des Ausknickens unter Stauchungsbelastung. Es fand sich kein Leitermaterial, welches die geforderte Wechselbiegefestigkeit von 1000 Biegezyklen bei einer resultierenden Dehnung und Stauchung von $\pm 1.5\%$ erfüllt. Aus diesem Grund war es unerlässlich ein komplett neues Leitersystem zu finden, welches die geforderte Ermüdungsfestigkeit aufweist und eine Energieübertragungskapazität von mindestens 20 kW auf eine Bohrtiefe von 5 km aufweist.

Als optimale Lösung zeigte sich ein Leitersystem, bestehend aus einem elastischen, zylindrischen Kern auf dem ein Rundleiter helisch aufgewickelt wird; im folgenden „elastischer Leiter genannt“. Die Elastizität des elastischen Leiters lässt sich über den Steigungswinkel des helischen Leiters optimieren.

Die besondere wissenschaftliche Herausforderung lag in der Optimierung der elektrischen Leitfähigkeit des elastischen Leiters unter Vorgabe der Wechselbiegefestigkeit. Basierend auf der Berechnung der maximalen axialen und totalen Dehnung im helischen Leiter und der Materialdaten aus Ermüdungstests wurde eine Methode zur Abschätzung des elastischen Bereichs, der Ermüdungsfestigkeit und zur Optimierung der elektrischen Leitfähigkeit entwickelt. Experimentelle Untersuchungen zeigten einen erzielbaren elastischen Bereich von 43 %; entsprechende Berechnungen ergaben 40%, was als gute Übereinstimmung betrachtet werden darf.

Sowohl die Simulation als auch das Experiment zeigten eine deutlich nicht-lineare Abhängigkeit des elastischen Bereichs vom Steigungswinkel des helischen Leiters. Ein industriell hergestelltes, geschirmtes Kabel basierend auf dem Prinzip des elastischen Leiters wurde bei $\pm 1.5\%$ Dehnung mit 1100 Biegezyklen und bei 1 % Dehnung mit 5500 Biegezyklen beaufschlagt. Sichtbare Schäden oder eine dauerhafte elektrische Widerstandsänderungen konnte nicht festgestellt werden. Die auf den elastischen Leiter wirkende Dehnung von $\pm 1.5\%$ wird durch die Konstruktion auf $\pm 0.052\%$ axiale Dehnung im helischen Leiter reduziert. Der experimentelle Wert ($\pm 0.0016\%$) liegt noch tiefer, da mechanische Toleranzen die Belastung noch weiter reduzieren. Die rechnerische Extrapolation ergab eine Lebensdauer von über 130'000 Zyklen bis Risse auf der Leiteroberfläche zu erwarten sind. Für eine elektrisch optimierte Konstruktion wurde bei einer Dehnungsamplitude von $\pm 1.5\%$ und 2000 Wechselbiegezyklen eine elektrische Leitfähigkeit von 21.5 % erreicht, verglichen mit einem geraden massiven Kupferleiter mit gleichen Aussendimensionen.

Beim zweiten Thema bestand die wissenschaftliche Herausforderung in der hohen Komplexität der thermischen Situation. Der maximale elektrische Strom im eingebetteten Leiter hängt von der Temperaturfestigkeit der elektrischen Isolation, der Umgebungstemperatur und der Wärmeabfuhr der elektrischen Verlustleistung ab. Ein Teil des Bohrschlauches ist an der Oberfläche aufgerollt, der zweite Teil ist im Bohrloch. Im Schlauchinnern fließt kühle Spülflüssigkeit zum Bohrkopf. Diese wird durch die elektrischen Verluste im Leiter, durch die Wärmeabgabe des Erdbodens und die ausserhalb des Schlauches nach oben fließende Bohrflüssigkeit erwärmt. Die Leiterverluste bzw.

der elektrische Widerstand sind temperaturabhängig; ebenso verschiedene Parameter der Spülflüssigkeit wie Dichte, spezifische Wärmekapazität, Prandl Zahl und die dynamische Viskosität. Aufgrund der Parameterflut machte ein geschlossenes Modell keinen Sinn. Es wurden aufgrund von Erfahrungswerten 2 Modellgeometrien für den Bohrschlauch und das Bohrloch gerechnet; eines für den realisierten Bohrschlauch und eines für einen Bohrschlauch gefertigt aus dem Hochtemperaturthermoplasten PEEK mit grösserem Durchmesser. Im Modell wurde der Bohrschlauch inklusive Bohrflüssigkeit und Erdreich in radialer und axialer Richtung diskretisiert. Mit Hilfe von Material und Energiebilanzgleichungen wurde die Energieübertragungskapazität des jeweiligen Bohrschlauches sowie die Temperatur des Leiters, der Bohrflüssigkeit und des umgebenden Gesteins in Abhängigkeit der Bohrtiefe ermittelt.

Für die erste Modellgeometrie wurde eine maximale Bohrtiefe von 3700 m mit einer übertragbaren elektrischen Leistung von 25 kW berechnet. Bei reduzierten Tiefen können bei einer Betriebsspannung von 2 kV DC 80 kW auf 1000 m und 50 kW auf 2000 m übertragen werden. Die maximale Bohrlochtiefe für die zweite Modellgeometrie ist wegen der hohen zulässigen Betriebstemperatur des verwendeten Materials praktisch unbeschränkt. Es können 500 kW auf 500 m, 300 kW auf 1500 m und 100 kW auf 5500 m Bohrtiefe übertragen werden bei einer Betriebsspannung von 3 kV DC. Die zweite Modellgeometrie wurde auf eine Wechselbiegefestigkeit von 2000 Biegezyklen bei 2 m Biegeradius und 250 °C mit einem Sicherheitsfaktor von 2.5 ausgelegt. Alle Berechnungen basieren auf konservativen Annahmen, wie zum Beispiel die Verwendung einer Gleichspannungs-Übertragung, die einen Rückleiter benötigt. Gleichspannung bietet gegenüber Wechselspannung u.a. Vorteile bezüglich Sicherheit in explosionsgefährdeter Umgebung (induzierte Ströme) und den Wegfall von Blindleistungsverlusten. Bei der Verwendung eines symmetrischen 3 Phasen Wechselspannungs-Systems würden durch den Wegfall des Rückleiters doppelt so viele Leiter zur Verfügung stehen was zu einer deutlichen Erhöhung der Übertragungskapazität führen würde. Weitere Steigerungsmöglichkeiten für die Energieübertragungskapazität sind die Erhöhung der Betriebsspannung oder die Erhöhung des Massenflusses der Spülflüssigkeit.

Es zeigt sich, dass die elektrische Energieübertragung des Bohrschlauches mit dem beschriebenen elastischen Leiter durchaus funktioniert. Der elastische Leiter hat einen weiten Einsatzbereich; deutlich weiter als gefordert. Aufgrund seines hohen Elastizitätsbereiches würde er sich auch für den Einbau in Bohrschläuche mit kleinerem Biegeradius oder in Bohrschläuche mit deutlich grösserem Durchmesser eignen. Die Möglichkeit der Einbettung in feste Strukturen eröffnet viele weitere Anwendungsbereiche wie z.B. die Energieversorgung von Aktuatoren in hochbelasteten Faserverbundteilen der Flugzeugindustrie. Eine miniaturisierte Version des elastischen Leiters könnte in biomedizinischen Anwendungen Eingang finden. Zum Beispiel als elastische und ermüdungsresistente Lösung für intramuskuläre Elektroden, für die Überwachung der Herzeffizienz oder als künstliche Nerven welche sich mit dem Muskel dehnen. Für den temperaturoptimierten Bohrschlauch wurde eine Übertragungskapazität von 100 kW auf 5500 m berechnet. Diese hohe elektrische Leistung am Bohrkopf kann die Energieversorgung von neuartigen Bohrverfahren basierend auf Plasmalichtbogen oder Stossentladungen ermöglichen.