

Preussag AG, Berkhöpen

Postfach 16 28
3150 Peine

Richtungskontrolle, Havarie
und Casingverschleiß in übertiefen
und heißen Bohrlöchern

Dr.-Ing. T. Kerk
Dipl.-Ing. H. Kinzel
Dipl.-Ing. B. Prevedel

unter Mitarbeit von Prof. Dr.-Ing. R. D. Stoll,
Dipl.-Ing. H. Halm & Dipl.-Ing. F. Tengemann



Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung.....	579
2. Einsatzbereiche von Bohrlochmeßgeräten.....	579
2.1 Bohrlochvermessung.....	580
2.2 Bohrlochnavigation.....	581
2.3 Festpunktbestimmung und Casingverschleiß- messung.....	582
2.4 Sprengstoffe.....	583
2.5 Kabel.....	584
3. Richtbohrtechnik und Casingverschleiß.....	585
3.1 Vermeidung des Casingverschleißes durch Meißeldirektantriebe.....	585
3.2 Minimierung des Casingsverschleißes durch das Abteufen einer vertikalen Bohrung....	586
3.3 Sonstige Möglichkeiten zur Reduzierung des Casingsverschleißes.....	588
4. Erweiterung der Einsatzbereiche.....	590
4.1 Bohrtechnik für vertikale Bohrungen.....	590
4.1.1 Steuerbare Untertageantriebe.....	590
4.1.2 Steuerbarer Stabilisator.....	591
4.1.3 Zielbohrstange.....	591
4.1.4 Quadratische Schwerstangen.....	592
4.2 Erhöhung der Druckfestigkeit.....	592
4.3 Erhöhung der Temperaturfestigkeit.....	593
4.3.1 Reduzierung der Wärmeeinwirkung.....	594
4.3.1.1 Passive Kühlung durch Hitzeschilder und Wärmespeicher.....	594
4.3.1.2 Aktive Kühlung.....	595
4.3.2 Steigerung der Temperaturfestigkeit im Bereich der Elektronik.....	596
4.3.2.1 Selektion elektronischer Bauteile.....	596
4.3.2.2 Schaltungsauslegung.....	597
4.3.2.3 Hybridisierung.....	597
4.3.2.4 Verzicht auf elektronische Systeme.....	598
4.3.3 Steigerung der Temperaturfestigkeit im Bereich der Mechanik.....	598
5. Literatur.....	600

1 EINLEITUNG

Beim Abteufen einer Bohrung von 14.000 m Teufe treten eine Reihe von Problemen auf, die für das erfolgreiche Niederbringen einer solchen Bohrung zu lösen sind. Hierzu sind insbesondere die Beherrschung der mit der Teufe stark zunehmenden Drücke und Temperaturen zu rechnen. Dadurch werden Neu- bzw. Weiterentwicklungen der bisher eingesetzten Geräte zur Bohrlochvermessung und -navigation erforderlich.

Bei langen Bohrphasen mit hohen Hakenlasten aus verrohrten Bohrlochsektionen kommt der Minimierung des Casingverschleißes eine besondere Bedeutung zu. Potentielle Lösungen für dieses Problem können das Abteufen eines möglichst vertikalen Loches oder der Einsatz von Meißeldirektantrieben zur Verschleißminimierung sein.

2 EINSATZBEREICHE VON BOHRLOCHMESSGERÄTEN

Durch die mit der Teufe zunehmenden Parameter Druck und Temperatur werden die Einsatzbereiche der in Bohrlöchern verwendeten Geräte begrenzt. Zunehmender Druck kann, insbesondere bei Casingverschleißmeßgeräten, die mit mechanischen Fühlern arbeiten, zum Eindringen von Spülung in das Gerät und dadurch zum Totalausfall führen. Eine andere potentielle Schadensursache, die durch zu hohen Druck verursacht wird, ist das kollabieren des Gehäuses.

Hohe Temperaturen verändern die

- Werkstoffeigenschaften
- Maßhaltigkeit feinmechanischer Systeme
- chemischen Eigenschaften

und üben einen großen Einfluß auf

- elektronische Bauteile
- Dichtungen

aus.

Der Temperatureinfluß auf die mechanischen Eigenschaften von Stählen ist zwar gering, sollte jedoch bei der Werkstoffauswahl berücksichtigt werden. Sowohl die Streckgrenze als auch die Zeitstandfestigkeit nehmen mit steigender Temperatur ab.

Bohrlochmeßgeräte haben meist einen komplexen feinmechanischen Aufbau aus einer Vielzahl von Teilen verschiedener Materialien. Die unterschiedlichen Materialien können bei hohen Temperaturdifferenzen große Probleme aufwerfen, da die Längen- und Raumausdehnungskoeffizienten unterschiedlich sind. Für feinmechanische Meßgeräte bedeuten unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten u.a. Vergrößerung bzw. Verkleinerung von Lagerspiel, wodurch die Meßgenauigkeit reduziert wird und im ungünstigsten Fall das Gerät ausfällt.

Hohe Temperaturen beschleunigen chemische Prozesse. Eine Reihe von chemischen Vorgängen läuft nur in einem relativ schmalen Temperaturbereich kontrollierbar ab. Hierzu zählen z.B. photochemische Reaktionen. Bei höheren Temperaturen wird das im Filmmaterial, das in photographisch aufzeichnenden Bohrlochmeßgeräten zum Einsatz kommt, enthaltene Silberbromid auch ohne Lichteinwirkung zu Silber reduziert. Der Film wird dadurch unbrauchbar.

Die wesentliche physikalische temperaturabhängige Eigenschaft von Stoffen ist der Aggregatzustand. Die meisten in Bohrlochmeßgeräten verwendeten Materialien sind nicht von ungewollten Aggregatzustandsänderungen bedroht. Das Verdampfen von Flüssigkeiten, wie z. B. Dielektrika in Batterien und Elektrolytkondensatoren, kann jedoch fatale Folgen für das Meßgerät haben.

Die komplexen Meßverfahren machen den Einsatz elektronischer Baugruppen in Bohrlochmeßgeräten erforderlich. Höhere Temperaturen beeinflussen die elektrischen Eigenschaften elektronischer Bauteile sehr stark und können zu deren Zerstörung führen. Um die Einsatzfähigkeit elektronischer Baugruppen bei erhöhten Temperaturen sicherzustellen, werden meist Bauteile verwendet, deren Temperaturfestigkeit über den Werten der US-amerikanischen MIL-Spezifikationen liegt. In diesem Normenwerk sind Anforderungsprofile für Bauteile und Geräte festgelegt, die im militärischen Bereich zum Einsatz kommen.

2.1 Bohrlochvermessung

Die Meßverfahren zur Bestimmung des Bohrlochverlaufes nehmen innerhalb der Bohr- und besonders in der Richtbohrtechnik eine wichtige Stellung ein. Für viele geologische und lagerstättentechnische Entscheidungen ist die Kenntnis des exakten Bohrlochverlaufes von großer Bedeutung. Im direkten Bohrbetrieb ist das Wissen um den genauen Bohrlochverlauf für die Minimierung des Casingverschleißes durch kleine Doglegs oder auch die Bekämpfung eines Blow-outs durch eine Entlastungsbohrung von Wichtigkeit.

Der Verlauf einer Bohrung wird durch die Messung der Neigung und der Richtung (Azimut) des Bohrloches in verschiedenen Teufen kontrolliert. Je mehr Daten aufgenommen werden können, desto genauer läßt sich der Bohrlochverlauf bestimmen.

Als Meßinstrumente stehen sowohl mechanisch als auch elektronisch arbeitende Geräte zur Verfügung.

Die heute verfügbaren Meßsysteme sind hinsichtlich ihrer Temperatur- und Druckfestigkeiten auf den Einsatz bis zu ca. 125°C und 1500 bar begrenzt. Die Einsatzfähigkeit dieser Systeme kann durch die Verwendung von Hitzeschildern und Druckgehäusen gesteigert werden. Konstruktionsbedingt können Hitzeschilder die Wärme nur für eine begrenzte Zeit vom Meßsystem fernhalten. Der aktuelle Stand der Technik repräsentiert Hitzeschilder, die für einen Zeitraum von fünf Stunden Temperaturen von 270°C vom Meßsystem fernhalten. Der Durchmesser dieser Hitzeschilder liegt bei ca. 2 1/8". Bei Hitzeschilddurchmessern von 3" können die Meßsysteme bis zu 6 Stunden bei Außentemperaturen von ca. 315°C eingesetzt werden. Allerdings ist die Druckfestigkeit von Hitzeschildern mit einem Durchmesser von 3" kleiner als die der 2 1/8" Hitzeschilder. Druckgehäuse sind für Drücke bis zu 2000 bar lieferbar, auch in Verbindung mit Hitzeschildern mit 2 1/8" Durchmesser.

2.2 Bohrlochnavigation

Die Bohrlochnavigation dient nicht der nachträglichen Vermessung einer Bohrung, sondern der laufenden Kontrolle der Bohrung hinsichtlich Neigung und Richtung während des Bohrens. Die möglichst nahe am Meißel erfaßten Daten werden on-line nach Übertage übertragen, sofort ausgewertet und angezeigt. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, umgehend die Stellung des Neigungsüberganges zu korrigieren und dadurch Richtbohrungen plangerecht abzuteufen. Prinzipiell lassen sich zwei unterschiedliche Systeme zur Bohrlochnavigation anhand der Art der Datenübertragung unterscheiden. Zum einen werden die Daten über ein Kabel nach Übertage übertragen, zum anderen wird die Spülungssäule zur Datenübertragung herangezogen.

Systeme, die die Informationsübertragung durch Kabel vornehmen, können nur beim Bohren mit Vorortantrieben unter Verwendung eines Hilfsspülkopfes, durch den das Kabel geführt wird, eingesetzt werden.

Vorteile kabelgebundener Systeme (Steering-Tools) sind die hohe Datenübertragungsrate, die Realisierung eines Kommunikationssystemes und die Spannungsversorgung des untertägigen Systems per Wireline. Dadurch sind die Systeme vergleichsweise einfach im Aufbau, kostengünstig und zuverlässig. Der Hauptnachteil dieser Systeme ist im relativ großen Zeitbedarf für das Ziehen und Einfahren des Tools vor Roundtrips zu sehen sowie beim Nachsetzen, sofern kein Side-Entry-Sub verwendet wird.

Da Bohrlochnavigationssysteme während des Bohrens eingesetzt werden, werden sie ständig durch den Spülstrom gekühlt. Hochtemperaturlösungen mit Hitzeschild sind daher kaum verfügbar. In der Regel sind MWD-Systeme und Steering-Tools für Umgebungstemperaturen bis zu 140°C ausgelegt. Einige Steering-Tools sind jedoch auch bei höheren Temperaturen bis zu 200°C einsetzbar.

2.3 Festpunktbestimmung und Casingverschleißmessung

Beim Abteufen von Bohrungen kann es unter bestimmten Bedingungen dazu kommen, daß der Bohrstrang im Bohrloch fest wird. Es wurden eine Reihe von Verfahren entwickelt, einen festgewordenen Bohrstrang wieder zu lösen.

Bei vielen dieser Verfahren ist die Kenntnis des Festpunktes, des Punktes oberhalb dessen der Bohrstrang im Bohrloch frei beweglich ist, von großer Wichtigkeit.

Zur Festpunktbestimmung werden Meßgeräte eingesetzt, die auf den Strang wirkende Zug- und Torsionsbelastungen erfassen, die von Über-tage eingeleitet werden. Ein mehrfacher Zugversuch, bei dem die Dehnung des Stranges am Drehtisch gemessen wird, ist für eine genaue Festpunktbestimmung nicht ausreichend. Die Freipunktsonden werden am Kabel in den Bohrstrang eingefahren und nehmen die Meßwerte in einer bestimmten Teufe auf. Die Meßwertübertragung erfolgt über das Kabel, so daß die Auswertung umgehend erfolgen kann. Prinzipiell lassen sich zwei Meß-Systeme zur Freipunktbestimmung unterscheiden. Mechanisch arbeitende Geräte erfordern eine feste Verbindung zwischen Bohrstrang und Meßgerät, auf magnetischer Basis arbeitende Geräte messen berührungslos.

Die derzeit angebotenen mechanisch arbeitenden Geräte zur Freipunktbestimmung sind nicht für den Einsatz unter extremen Umgebungsbedingungen ausgelegt. Die Spezifikationen der Geräte liegen bei 175°C hinsichtlich der Temperatur und bei max. 1370 bar hinsichtlich des Druckes.

Substantielle Weiterentwicklungen werfen Probleme im Zusammenspiel der mechanischen Teile und bei den Dichtungselementen auf.

Zur Zeit ist lediglich ein magnetisch messendes Gerät zur Freipunktbestimmung am Markt verfügbar. Erfahrungen mit diesem Gerät werden in den USA gesammelt. Einsätze in Europa sind nicht bekannt. Spezifikationen des Gerätes hinsichtlich Druck- und Temperaturfestigkeit sind nicht verfügbar.

Durch Defekte an Futterrohren können sehr kostenintensive Schäden entstehen. Schlimmstensfalls kann ein Casingdefekt zur Aufgabe der Bohrung führen. Der Messung des Casingverschleißes kommt daher, insbesondere bei langen Bohrzeiten während des Erbohrens größerer Teufen, eine große Bedeutung zu.

Der Verschleiß des Casings wird durch Casing-Caliper-Geräte gemessen. Die Futterrohrtour wird durch mechanische Fühlerarme abgetastet. In den Geräten werden 15 bis 80 Fühlerarme verwendet. Je größer die Anzahl der Fühler ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, auch kleinere Casinganomalien zu erfassen.

Die zur Zeit verfügbaren Casing Caliper Geräte werden in verschiedenen Versionen zur Messung von Durchmessern von 2 3/8" bis 20" angeboten. Sowohl die mechanisch als auch die elektronischen Eigenschaften begrenzen die Einsatzmöglichkeiten der Geräte auf 175°C und 1200 bar.

2.4 Sprengstoffe

In der Tiefbohrtechnik werden Sprengstoffe u.a. zur Beseitigung von Havarien verwendet. Der hierfür zum Einsatz kommende Sprengstoff wird in Form von Sprengschnüren geliefert. Die Zündung des Sprengstoffes erfolgt elektrisch über einen Sprengzünder.

Die Zuverlässigkeit des Komplexes Sprengzünder/Sprengschnur hängt neben der Dichtigkeit des Sprengzündergehäuses und der Verbindung zur Sprengschnur von der Streustromsicherheit und der Temperaturstabilität ab.

Ursachen für das Versagen von Sprengstoffen sind das Erreichen der Verpuffungstemperatur und das Erreichen der Schmelztemperatur. Bei der Verpuffungstemperatur zündet der Sprengstoff selbständig und verpufft ohne zu detonieren. Beim Erreichen der Schmelztemperatur geht der Sprengstoff in den flüssigen Aggregatzustand über, wodurch er für die Verwendung in Sprengschnüren ungeeignet wird.

Die Temperaturfestigkeit der Sprengstoffe ist zeitabhängig. In der Tiefbohrtechnik eingesetzte Sprengstoffe können für zwei Stunden Temperaturen von max. 275°C bzw. für zehn Stunden Temperaturen von max 250°C widerstehen. Die Druckfestigkeit liegt bei ca. 1400 bar. Die in den USA für den Einsatz in Geothermalbohrungen entwickelten Spezialsprengstoffe können bei Temperaturen bis zu 290°C eingesetzt werden.

2.5 Kabel

Bohrlochmeßkabel haben folgende Aufgaben:

- Tragen des Meßgerätes
- Datenübertragung nach Übertage
- Spannungsversorgung des Meßgerätes

Um diese Aufgaben erfüllen zu können, muß das Kabel eine Reihe von Anforderungen erfüllen.

Um das Eigengewicht und das Gewicht des Meßgerätes sicher tragen zu können, muß die Reißfestigkeit sehr hoch sein. Durch das Ein- und Ausfahren des Meßgerätes ist das Kabel insbesondere bei stark geneigten Bohrlochsabschnitten stark verschleißgefährdet.

Die Anforderungen hinsichtlich Reißfestigkeit und Verschleißfestigkeit können durch eine geeignete Stahlarmierung erfüllt werden.

Die Forderungen nach einer hohen Druck- und Temperaturfestigkeit sind vor allem für die Isolationsmaterialien relevant. Kabel mit einer Isolierung aus Polypropylen sind lediglich bis zu Temperaturen von 150°C einsatzfähig. Temperaturbeständiger sind Kabel, die fluorhaltige Kunststoffe als Isolationsmaterial verwenden. Die elektrischen Eigenschaften dieser Kunststoffe und ihre Beständigkeit gegen Chemikalien sind sehr gut. So lassen sich z.B. Kabel mit einer Isolierung auf der Basis von Fluorethylenpropylen bei Temperaturen bis zu 260°C einsetzen.

Die elektrischen Anforderungen hinsichtlich eines geringen Widerstandes und einer hohen Durchschlagspannung sind durch genügend große Leiterquerschnitte und die Auswahl des Isolationsmaterials und dessen Stärke zu beherrschen. Allerdings ist der Kabeldurchmesser herkömmlicher Bohrlochmeßkabel durch die Forderung nach engen Biegeradien begrenzt. Er liegt zur Zeit bei 15/32" (12 mm).

Prinzipiell ist die Länge von Kabeln herstellungstechnisch nicht begrenzt. In der Praxis werden Bohrlochmeßkabel jedoch nur bis zu Längen von 10.000 m gefertigt. Zum einen bestand bislang keine Nachfrage für Kabel größerer Länge, zum anderen kann das hohe Gewicht, 10.000 m 15/32" Mehraderkabel können 5.100 kg wiegen, eine Einschränkung des Einsatzbereiches des Wireline-Fahrzeuges bedeuten.

Die Reißlängen von Bohrlochmeßkabeln liegen zwischen 18.000 m und 20.000 m bei einer Dichte der Spülung von 1g/cm³. Werkzeuggewichte von 300 kg entsprechen Kabellängenäquivalenten zwischen 800 m und 4000 m, so daß für extrem tiefe Bohrungen der Kabelauswahl besondere Beachtung geschenkt werden muß.

3 RICHTBOHRTECHNIK UND CASINGVERSCHLEISS

Der Casing wird je nach Aufgabenstellung gegen Außendruck, Innendruck und Abstreifen ausgelegt. Die Wandstärkendimensionierung und die Auswahl der Stahlqualität erfolgt in der Bundesrepublik Deutschland entsprechend der Richtlinien zur Rohrauslegung des WEG. In diesen Richtlinien sind seit 1983 ergänzende Empfehlungen zur Berücksichtigung des Casingverschleißes enthalten. Bei Futterrohren besteht im Gegensatz zum Bohrgestänge nicht die Möglichkeit des Ausbaus und der über-tägigen Kontrolle.

Verschleiß an Futterrohren wird durch die Reibung des Bohrgestänges am Casing verursacht. Reibung zwischen den Verschleißpartnern tritt sowohl bei der Rotation als auch beim Ein- und Ausbau des Gestänges auf. Untersuchungen haben ergeben, daß der Futterrohrverschleiß überwiegend durch Rotation des Bohrstranges verursacht wird. Der Ge-stängeein- bzw. -ausbau bewirkt einen um den Faktor 100 geringeren Verschleiß. Der Verschleiß, der durch den Einbau bzw. das Ziehen von Werkzeugen am Bohrlochmeßkabel verursacht wird, ist unerheblich und daher zu vernachlässigen.

Ein entscheidender Faktor für den Futterrohrverschleiß ist die Bohr-lochgeometrie. Doglegs sind bevorzugte Anlagepunkte zwischen Bohrge-stänge und Futterrohr. Durch die Vermeidung von Doglegs durch geeig-nete richtbohrtechnische Maßnahmen und den Einsatz von Meißeldirektan-trieben kann der Casingverschleiß gering gehalten werden.

3.1 Vermeidung des Casingverschleißes durch Meißeldirektantriebe

Da der Casingverschleiß hauptsächlich durch die Rotation des Bohr-stranges verursacht wird, liegt es nahe, das zum Bohren erforderliche Drehmoment nicht Übertage am Drehtisch, sondern Untertage direkt oberhalb des Meißels durch einen Meißeldirektantrieb einzuleiten. In der Erdölindustrie haben sich Bohrturbinen und Moineaumotoren als wirtschaftlich sinnvoll einsetzbare Meißeldirektantriebe durchge-setzt.

Moineaumotoren arbeiten nach dem Verdrängerprinzip und halten bei konstantem Volumenstrom eine nahezu feste Drehzahl ein. Leistung und Drehmoment werden durch den technisch möglichen Druckabbau be-stimmt. Da der Druckabbau dem abgeforderten Drehmoment proportional ist, muß die Energiezufuhr durch die Spülungsflüssigkeit dem tat-sächlichen Bedarf angepaßt werden. Die günstige Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik und die Unempfindlichkeit gegenüber Verschmutzungen sind die wesentlichen Gründe für den häufigen Einsatz von Moineau-motoren in der Richtbohrtechnik. Die Ausführung des Stators aus Elastomeren ist zur Abdichtung gegen den Rotor nötig. Die Begrenzung der Temperaturfestigkeit der Elastomere auf ca. 140°C ist als Haupt-nachteil von Moineaumotoren anzusehen.

Bohrturbinen sind hydrodynamische Antriebe. Die Bewegungsenergie der strömenden Flüssigkeit wird in mechanische Arbeit umgesetzt. Bei konstantem Volumenstrom stellt sich die Drehzahl abhängig vom geforderten Drehmoment ein. Druck und die damit zugeführte Leistung sind unabhängig von der tatsächlich benötigten Leistung und nahezu konstant. Die Konstruktion der Turbinen aus fast ausschließlich metallischen Werkstoffen ermöglicht den Einsatz auch unter hohen Temperaturen. Positive Erfahrungen hinsichtlich der Temperaturfestigkeit konnten beim Abteufen von Geothermalbohrungen in den USA gesammelt werden. Von entscheidendem Einfluß auf die Lebensdauer einer Turbine ist die Temperaturbeständigkeit der Lager und Dichtungen. Bohrturbinen erreichen in der Regel Drehzahlen, für die konventionelle 3-Rollen-Meißel nicht ausgelegt sind. Zur Drehzahlreduzierung kommen Planetengetriebe zum Einsatz, die in den Turbinenkörper integriert sind.

3.2 Minimierung des Casingverschleißes durch das Abteufen einer vertikalen Bohrung

Verschiedene Modellrechnungen haben gezeigt, daß bei den auftretenden sehr hohen Hakenlasten beim Abteufen einer Bohrung von 14.000 m der Doglegminimierung zur Vorsorge gegen extremen Casingverschleiß eine Schlüsselrolle zukommt. Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß auch durch das Auftreten vieler sehr kleiner Doglegs die Hakenlast beim Ziehen des Bohrstranges stark zunimmt. Das Bohrloch sollte daher, insbesondere im oberen Bereich, möglichst vertikal abgeteuft werden.

Das Abteufen eines exakt vertikalen Bohrloches stellt richtbohrtechnisch eine der schwierigsten Aufgaben dar. Für die Neigungskontrolle von Richtbohrungen werden vorwiegend unterschiedliche Anordnungen von Stabilisatoren eingesetzt. Die Stabilisatoren sind Werkzeuge, die dem Bohrstrang nahe am Meißel eine Führung geben und es ermöglichen, den Verlauf der Bohrlochachse während des Bohrvorganges zu beeinflussen. Die Positionierung der Stabilisatoren ist neben Bohrparametern wie

- Bohrlochdurchmesser
- Schwerstangendurchmesser
- Meißelbelastung
- Bohrlochneigung
- Stabilisatordurchmesser
- Spülgewicht

auch von den gesteinspezifischen Größen

- Schichteinfallen
- Härte der Formation

abhängig.

Soll mit einer Stabilisatorgarnitur eine konstante Bohrlochneigung beibehalten oder ein Neigungswinkel kontrolliert auf- bzw. abgebaut werden, müssen die wichtigsten Parameter, die einen Einfluß auf die Neigungskontrolle haben, bekannt sein. Durch das richtige Ausnutzen des Pendelverhaltens der Garnitur und der Kräfteverhältnisse am Meißel kann der Neigungsauf- bzw. -abbau kontrolliert verändert werden.

Die Bohrstranggarnitur hat oberhalb des Pendelpunktes, das ist der Punkt, an dem die Schwerstangen Kontakt mit der Bohrlochwand haben, praktisch keinen Einfluß mehr auf die Neigungskontrolle. Zur Beurteilung einer bestimmten Stabilisatoranordnung ist daher lediglich der Bohrstrangabschnitt vom Meißel bis zum Pendelpunkt zu betrachten.

In Richtung der Bohrlochachse wirkt die Meißellast, senkrecht dazu eine Seitenkraft, die das Gebirge auf den Meißel ausübt und die den Meißel zu einem Abweichen von der Bohrlochachse zwingt. Diese Seitenkraft bzw. der resultierende Kraftwinkel, der sich zwischen der Resultierenden der Kräfte und der Bohrlochachse einstellt, läßt sich durch Variation der Stabilisatorabstände und des Pendelpunktes beeinflussen. Eine positive Seitenkraft führt zu einem Neigungsaufbau, eine negative zu einem Abbau des Neigungswinkel. Zum Halten eines konstanten Neigungswinkels muß der resultierende Kraftwinkel möglichst klein sein, d.h. die Seitenkraft muß im Verhältnis zur Meißelbelastung klein werden.

Zum Neigungsabbau kommen in der Richtbohrtechnik Garnituren zum Einsatz, die den Meißel mit Seitenkräften in vertikaler Richtung beaufschlagen. In der Regel entfällt bei diesen Garnituren der Meißelstabilisator und es kommen lediglich ein bis zwei Strangstabilisatoren zum Einsatz. Problematisch wird der Einsatz von Pendelgarnituren bei geringen Neigungswinkeln des Bohrloches. Da der resultierende Kraftwinkel und mit ihm die wirksame Seitenkraft mit abnehmender Neigung kleiner wird und schließlich gegen Null geht, ist das Erreichen einer Neigung von 0° mit einer Pendelgarnitur theoretisch nicht möglich.

Ein Nachteil, den Pendelgarnituren aufweisen, ist das Fehlen des Bitstabilisators. Das Fehlen dieses Stabilisators bewirkt, daß die Meißelachse nicht mit der Bohrlochachse übereinstimmt. Der auftretende Winkel, der Kippwinkel, läßt den Meißel auf der Bohrlochsohle taumeln. Dadurch werden die Bohrgeschwindigkeit und die Meißellebensdauer reduziert sowie ein übermäßiges Loch gebohrt. Besonders beim Bohren mit Diamantwerkzeugen hat der Kippwinkel einen großen Einfluß auf die Lebensdauer des Meißels. Bei großem Kippwinkel ist eine gleichmäßige Spülungsverteilung auf die Schneidflächen nicht mehr gewährleistet, der größte Teil der Flüssigkeit geht auf der angehobenen Meißelseite ungenutzt verloren. Als Folge der mangelnden Kühlung treten an den Diamanten Verbrennungen auf, die die Standzeit des Meißels verringern.

Die hohen Anforderungen an die Vertikalität von Schachtvorbohrungen führten zu der Entwicklung eines Stabilisators, der während des Bohrens formschlüssig an der Bohrlochwand anliegt. Herkömmliche Stabilisatoren haben einen geringfügig kleineren Durchmesser als der Bohrmeißel, um einerseits hang-ups der Stabilisatoren zu vermeiden und andererseits das Festwerden der Stabilisatoren zu verhindern, wenn die Bohrstrecke aufgrund von Kaliberabnahme des Meißels einen etwas geringeren Durchmesser aufweist. Dieser im Vergleich zum Meißel kleinere Durchmesser des Stabilisators wirkt sich negativ auf die Stabilisation aus, da der Strang nicht exakt in der Bohrlochachse zentriert werden kann.

Diesen Nachteil weist der speziell für exakt vertikale Schachtvorbohrungen entwickelte Spring-Loaded Stabilisator nicht auf. Sechs durch Federkraft ausfahrbare Rippen stützen den Stabilisator radial an der Bohrlochwand ab und zentrieren die Strangachse in der Bohrlochachse. Zur Reibungsminderung ist das Gerät konstruktiv als nichtrotierender Stabilisator ausgeführt. Die das Drehmoment übertragende Hohlwelle ist durch ölgeschmierte Wälzlager gelagert.

Diese Stabilisatoren wurden bei Schachtvorbohrungen im Goldbergbau über Strecken bis zu 2000 m erfolgreich eingesetzt. Verschleiß an den Stabilisatorrippen konnte praktisch nicht festgestellt werden.

3.3 Sonstige Möglichkeiten zur Reduzierung des Casingverschleißes

Neben den o.g. Möglichkeiten zur Vermeidung bzw. Minimierung des Casingverschleißes kommen als weitere verfahrenstechnische Maßnahmen zur Verschleißminderung in Betracht:

- Verbesserung der "Schmierfähigkeit" der Spülung durch spezielle Zuschlagstoffe
- Verwendung von ölbasischen Spülungen
- Einsatz von Protektoren
- Spezielle Panzerung der Gestängeverbinder
- Einsatz von Aluminiumbohrgestänge

Der Zusatz von reibungsmindernden Additiven zur Spülung verringert nachweislich den Casingverschleiß. Bei nicht allzu hohen Spüldichten bis etwa 1,4 kg/l hat Schwerspat eine gute verschleißmindernde Wirkung. Da Baryt ohnehin als Beschwerungsmittel verwendet und in großen Mengen bezogen wird, stellt es eine relativ preiswerte Möglichkeit zur Verminderung des Futterrohrverschleißes dar.

Ölbasische Spülungen bewirken zwar gegenüber wasserbasischen Spülungen einen deutlich geringeren Futterrohrverschleiß, ihr Einsatz empfiehlt sich in der Regel jedoch nicht. Die Ursachen sind in den hohen Kosten, dem problematischen Handling und in Umweltschutzgründen zu sehen.

Der Einsatz von Protektoren ist ein wirksames und oft angewendetes Verfahren zur Reduzierung des Verschleißes von Futterrohren und Gestänge. Die Protektoren sind leicht zu kontrollieren und im Falle eines Defektes leicht auszuwechseln. Die optimale Platzierung von Protektoren ist ein viel diskutiertes Problem. Für die Bestimmung der Befestigungspunkte bieten die Protektorhersteller die Benutzung von Rechenprogrammen als Service an. Ein Hauptgesichtspunkt bei der Platzierung von Protektoren auf dem Bohrstrang ist die Bohrlochneigung. Werden je Stange zwei Protektoren gefahren, liegt das Bohrgestänge theoretisch auch bei Doglegs von $1,2^\circ/10\text{ m}$ nicht an den Futterrohren an. Die ständige Kontrolle und der unverzügliche Austausch verschlissener Protektoren sind eine unabdingbare Voraussetzung für diese Art des Verschleißschutzes.

Der Einfluß der Panzerung der Gestängeverbinder auf den Verschleiß der Futterrohre ist erheblich. Für die Verbinderpanzerung kommt eine Reihe von Metallegierungen in Betracht. In der Regel handelt es sich dabei um Hartmetalle. Die Mehrzahl der Legierungen gehört zur Gruppe der für ihre Härte und Verschleißfestigkeit bekannten Wolframkarbide. Es werden Wolframkarbide unterschieden, die unterschiedliche Verschleißbeträge an Futterrohren hervorrufen.

Gesintertes und anschließend zerkleinertes Wolframkarbid bewirkt extrem hohen Verschleiß an Futterrohren. Es ist daher nicht als Material für die Verbinderpanzerung geeignet. Bessere Eigenschaften bezüglich des Verschleißes zeigt gegossenes und anschließend zerkleinertes Wolframkarbid. Gesintertes und anschließend pelletiertes Wolframkarbid ist besonders als Hartmetall für Zweischichtpanzerungen geeignet.

Neben dem Herstellungsverfahren haben auch die Korngröße des Hartmetalls und die nachträgliche Oberflächenbehandlung der Gestängeverbinder einen großen Einfluß auf den Casingverschleiß. Feinkörnige Materialien rufen deutlich geringeren Verschleiß hervor als grobkörnige. Abgedrehte Verbinderpanzerungen verursachen weniger Verschleiß.

Der Einfluß des Spülungstyps auf den Casingverschleiß ist ebenfalls erheblich. Bei wasserbasischen Spülungen liegt der Reibbeiwert deutlich über dem, der bei ölbasischen Spülungen zu beobachten ist. Allerdings beeinflussen der Feststoffgehalt und die Art der Feststoffe in der Spülung sowie der Bohrkleinanteil das Verschleißverhalten. Schwerspat bildet einen Schutzfilm zwischen den Verschleißpartnern und bewirkt eine gute Reibungsminderung. Eisenoxid zeigt hingegen keine reibungsmindernde Wirkung.

Der Einfluß des Bohrkleins auf den Futterrohrverschleiß ist unterschiedlich und hängt von der durchteuften Formation ab. Im allgemeinen wird das Bohrklein jedoch eher eine Erhöhung des Verschleißes hervorrufen.

Aluminiumbohrgestänge ist sehr viel leichter als konventionelles Bohrgestänge aus Stahl. Beim Einsatz von Aluminiumbohrgestänge sind daher die Andruckkräfte zwischen Casing und Gestänge kleiner. Dieses macht sich insbesondere in stark geneigten Bohrungen durch einen geringeren Casingverschleiß bemerkbar. Bei hohem pH-Wert der Spülung ist das Aluminiumgestänge starker Korrosion ausgesetzt. Ein hoher pH-Wert ist jedoch besonders bei Sauerogasbohrungen aus sicherheitstechnischen Gründen notwendig.

4. ERWEITERUNG DER EINSATZBEREICHE

Die derzeit verfügbaren Systeme zur Erstellung richtungsstabiler Bohrungen, zur Richtungskontrolle, zur Beseitigung von Havarien und zur Bestimmung des Casingverschleißes sind zumeist hinsichtlich ihrer Druck- und Temperaturfestigkeit derart begrenzt, daß ein Einsatz bei Drücken über 1750 bar und Temperaturen über 300°C für einen längeren Zeitraum ausgeschlossen werden muß. Für das Abteufen von übertiefen und heißen Bohrungen sind die Einsatzbereiche zu erweitern, so daß auch extreme Bohrlochbedingungen sicher beherrscht werden können.

Neben der Erhöhung der kritischen Parameter Druck und Temperatur muß ein Augenmerk auf die Erhöhung der Richtungsstabilität für das zielgenaue Teufen gelegt werden.

4.1. Bohrtechnik für vertikale Bohrungen

Der Aufwand für das Erreichen eines festgelegten Zielpunktes einer Bohrung ist sehr hoch. Häufige Roundtrips zur Umstellung der Garnitur sind, insbesondere in tiefen Bohrungen, zeit- und kostenintensiv. Der Minimierung der Roundtripzeiten durch den Einsatz spezieller Richtbohrwerkzeuge kommt daher eine große Bedeutung zu.

4.1.1. Steuerbare Untertageantriebe

Konventionelle Bohrgarnituren zwingen den Meißel in der Regel nicht zum Bohren in die gewünschte Richtung. Richtungsänderungen durch die Hinzunahme eines Meißeldirektantriebes mit Bent-Sub, der einorientiert werden muß, erfordern zusätzliche Roundtrips. Möglichkeiten, diese Roundtrips einzusparen, sind im Einsatz steuerbarer Untertageantriebe zu sehen.

Steuerbare Untertageantriebe ähneln zwar prinzipiell den Garnituren mit Meißeldirektantrieb und Bent-Sub, eignen sich jedoch auch zum Bohren gradliniger Bohrlochsabschnitte. Für diese Abschnitte wird zusätzlich der Bohrstrang gedreht, für die gekrümmten Sektionen wird ausschließlich der Meißeldirektantrieb eingesetzt.

Die für die Richtungsänderung erforderliche Auslenkung der Meißelachse aus der Bohrlochachse kann durch folgende zwei Verfahren, die auf dem gleichen Grundprinzip beruhen, erreicht werden:

- Exzentrische Stabilisation im Bereich des Meißels
- Herstellen eines Knickwinkels zwischen Meißel und Meißeldirektantrieb

4.1.2 Steuerbarer Stabilisator

Basierend auf dem Spring-Loaded Stabilisator wird im Hause Preussag im Rahmen eines F + E Projektes ein von Übertage steuerbarer Stabilisator entwickelt.

Dieser Stabilisator wird durch seine Form bzw. durch die variablen Querschnitte die richtbohrtechnische Charakteristik von Bohrgarnituren ändern können. Dadurch wird es möglich sein, Bohrungen mit lediglich einer einzigen Garnitur mit exakt dem gewünschten Bohrlochverlauf abzuteufen.

Der Querschnitt des Stabilisators wird durch die Stellung der Stabilisatorrippen beeinflusst. Sie werden hydraulisch bzw. elektro-hydraulisch um das erforderliche Maß aus- oder eingefahren. Die erforderliche Energie wird durch den Spülstrom erzeugt. Zur Datenübertragung zwischen steuerbarem Stabilisator und den Übertagekomponenten kommt ein Zweiwegekommunikationssystem zum Einsatz, das elektromagnetische Wellen als Übertragungsmedium nutzt.

4.1.3 Zielbohrstange

Die Zielbohrstange ist ein selbsttätig steuerndes Zielbohrwerkzeug, das für den Einsatz im Bergbau konzipiert wurde. Dieses von der Bergbauforschung GmbH und der Schwing Hydraulik Elektronik GmbH+ Co. entwickelte System besteht im wesentlichen aus einer inneren Welle, die mit dem Bohrgestänge und dem Meißel verbunden wird, um einem äußeren im Idealfall nicht rotierenden Teil mit vier beweglichen Steuerleisten. Im äußeren Teil befinden sich die Elektronik und die Hydraulik zur Bewegung der Steuerleisten. Die erforderliche Energie wird durch einen Generator, der Bestandteil der Zielbohrstange ist, erzeugt.

Neigungsmesser überwachen kontinuierlich die Stellung der Zielbohrstange bezüglich der Lotrechten. Treten Abweichungen auf, wird die Stellung der Steuerleisten umgehend korrigiert. Die Überwachung des Systems erfolgt durch ein Spülungsdruckpulssystem von Übertage.

Die Zielbohrstange wird ausschließlich im Bergbau zum Erstellen von Zielbohrungen mit 8 1/2" Durchmesser eingesetzt. Ein Einsatz für Tiefbohrungen bedingt Verbesserungen im Bereich der Wellendichtungen, um auch feststoffreicher Spülung unter hohem Druck widerstehen zu können und die Überprüfung der Temperaturstabilität. Die Anwendung der Zielbohrstange in heißen Bohrungen macht die Auslagerung des Elektronikteils in ein durch Hitzeschutzmaßnahmen versehenes Gehäuse erforderlich.

4.1.4 Quadratische Schwerstangen

Der Einsatz von quadratischen Schwerstangen führt zu sehr biegesteifen Garnituren, die als Haltegarnituren verwendet werden können.

Quadratische Schwerstangen haben in ihrer Diagonalen nur ein geringes Untermaß gegenüber dem Meißel. Sie wirken deshalb wie ein langer Stabilisator. Durch ihren Einsatz werden Doglegs minimiert. Dem hohen Verschleiß an den Kanten wird durch Hartmetallbesatz entgegen gewirkt. Von Nachteil ist die Gefahr des Festwerdens im Bereich quadratischer Schwerstangen.

4.2 Erhöhung der Druckfestigkeit

Die Auslegung der Druckgehäuse für Messungen im offenen Bohrloch für die vorkommenden Drücke bis ca. 2 kbar stellt keine allzu hohen Anforderungen an die Konstruktion. Da der gesamte Bohrlochdurchmesser für das Druckgehäuse zur Verfügung steht, kann durch Anpassung der Wandstärke an die Druckgegebenheiten eine entsprechende Festigkeit erreicht werden.

Probleme ergeben sich bei Geräten, welche innerhalb des Stranges Messungen vornehmen. Da hier der zur Verfügung stehende maximale Gerätedurchmesser eine Wandstärkeerweiterung zu einer Verringerung des Platzangebotes innerhalb des Gerätes führt, ist eine zusätzliche Versteifung durch Rippen oder innen aufgebraute Ringe erforderlich. In einem solchen Fall ist die Verwendung von hochfesten Stählen unerläßlich. Bei magnetisch wirkenden Meß-Systemen ist darauf zu achten, daß die verwendeten Stähle aus austenitischem Material bestehen.

Probleme durch die Differenz Innendruck zu Außendruck können durch verschiedene Methoden minimiert werden:

- Aufladung des Innengehäuses, der Innenraum wird durch ein Gas (z.B. Stickstoff) auf den Außendruck gebracht bzw. so weit aufgepumpt, daß der Differenzdruck den Gegebenheiten angepaßt wird.
- Füllung des Gehäuses mit Öl, das gesamte Innengehäuse wird vollständig mit einem gering kompressiblen Medium (z.B. Öl) gefüllt. Dadurch wird die Verformung des Gehäuses durch den Außendruck minimiert.
- Druckausgleich, durch eine Druckkompressionskammer wird der Innendruck dem Außendruck angepaßt.

Diese Möglichkeiten verhindern auch ein Eindringen von Spülung in das Meß-System an Stellen wie dem Kabelkopfübergang oder dem Austritt von Meßfühlern beim Casing-Caliper-Meß-System.

Neben der Verwendung von metallischen Dichtflächen ermöglicht die Konstruktion von Labyrinthdichtungen ein Absenken des Druckes an der Dichtfläche selbst.

4.3 Erhöhung der Temperaturfestigkeit

Aus den Grundgesetzen der Physik geht hervor, daß zwischen zwei sich berührenden Stoffen unterschiedlicher Temperatur ein Wärmeaustausch stattfindet. Dieser Energieaustausch ist auf Dauer nicht zu verhindern. Er sorgt dafür, daß zwischen beiden Stoffen ein Temperatúrausgleich erfolgt.

Der Vorgang des Wärmetransportes kann durch geeignete Maßnahmen nur verlangsamt, jedoch nicht verhindert werden.

Für Geräte, welche in der Bohrtechnik eingesetzt werden, ergibt sich daraus die Forderung, daß auch für abgeschirmte Bauteile innerhalb eines Gerätes eine möglichst hohe Temperaturfestigkeit erforderlich ist, sofern die Geräte über längere Zeit in einer heißen Umgebung arbeiten sollen.

4.3.1 Reduzierung der Wärmeeinwirkung

Das Wärmepotential des Gesteinskörpers kann mit technisch vertretbarem Aufwand nicht wesentlich abgebaut werden. Ein Schutz empfindlicher Meßgeräte kann durch die gezielte Speicherung eindringender Wärme und die Wärmeabfuhr von gefährdeten Baugruppen in unkritische Bereiche erfolgen.

4.3.1.1 Passive Kühlung durch Hitzeschilde und Wärmespeicher

Die z.Zt. für hohe Temperaturen ausgelegten Meß-Systeme sind in der Regel mit einer Abschirmung gegen hohe Temperaturen versehen, die eine Kombination aus Hitzeschild und Wärmespeicher darstellt.

Ziel des Hitzeschildes ist es, durch eine geringe Wärmeleitfähigkeit für einen möglichst geringen Wärmeaustausch zwischen der Außenhaut eines Meßsystemes und dem Innenraum zu sorgen. Das Hitzeschild besteht aus einem evakuierten Ringraum, der die zu schützenden Bauteile umgibt. Es dient dazu, Wärmekonvektion zwischen Außengehäuse und Innenraum zu minimieren. Damit die Wärmeenergie nicht in Form von Wärmestrahlung in den Innenteil gelangt, ist der Ringraum mit einer Vielzahl von reflektierend beschichteten Folien aus Tefla versehen.

Zur Aufnahme der Wärme, sowohl der von außen zugeführten als auch durch den Betrieb des Meßgerätes entstehenden, wird ein Wärmespeicher verwendet. Der Wärmespeicher ist ein mit einem Stoff hoher spezifischer Schmelzwärme gefülltes Reservoir, dessen Schmelzpunkt unter der maximal zulässigen Betriebstemperatur der verwendeten Meß-Systeme liegt. Die von außen eindringende Wärmeenergie wird zu diesem Wärmespeicher geleitet und löst bei Erreichen der Schmelztemperatur dort den Schmelzvorgang aus. Ebenso kann Wärme, welche durch den Betrieb elektronischer Bauteile entsteht, zum Wärmespeicher hin abgeleitet werden.

Üblicherweise wird für diesen Wärmespeicher eine Metallegierung verwendet, welche unter dem Namen "Woodsches Metall", bestehend aus 50 % Wismut, 25 % Blei, 12,5 % Zinn, 12,5 % Kadmium und einem Schmelzpunkt von 71,7 °C, bekannt ist. Durch Variieren der prozentualen Zusammensetzung der Legierung können die physikalischen Eigenschaften den Erfordernissen angepaßt werden.

Das Woodsche Metall besitzt eine relativ hohe Dichte von 9,7 kg/l. Dadurch steigen die mechanischen Belastungen des Außengehäuses des Meßinstrumentes, besonders bei hohen Beschleunigungen, wie sie z.B. beim Bohrbetrieb auftreten. Es werden daher Anstrengungen unternommen, Ersatzmaterialien hierfür zu finden, welche die gleichen oder ähnliche Schmelzeigenschaften besitzen. Hierfür bieten sich spezielle Kohlenwasserstoffverbindungen an.

4.3.1.2 Aktive Kühlung

Die passive Kühlung mittels Hitzeschild und Wärmespeicher erweist sich bei längerer Verweilzeit im Bohrloch als nicht ausreichend. Sobald sich die Phasenumwandlung von fest in flüssig im Wärmespeicher vollzogen hat, steigt die Temperatur trotz Hitzeschild innerhalb des Gerätes auf die Außentemperatur an. Besonders für elektronische Bauteile ist eine weitere, aktive Kühlung notwendig.

Folgende aktive Kühlverfahren sind bekannt:

- thermodynamische Kreisprozesse
- thermoelektrische Kühlverfahren
- magnetokalorische Kühlverfahren
- chemische Kühlverfahren

Anwendbar im Bohrloch sind aus prinzipiellen Erwägungen die Kühlung durch Kreisprozesse sowie die thermoelektrische Kühlung. Energiebetrachtungen zeigen, daß eine Kühlung des gesamten Meßinstrumentengehäuses nur durch die Anwendung von Kreisprozessen zu erreichen ist. Der Einsatz von Peletierelementen zur Kühlung von Meßgeräten oder auch nur einzelner Bauelemente ist kaum möglich. Peletierelemente haben einen sehr geringen Wirkungsgrad von lediglich ca. 5 %. Das bedeutet, daß 95 % der dem Peletierelement zugeführten Energie in Wärme umgesetzt wird und 5 % der zugeführten Energie zur Kühlung zur Verfügung stehen. Da auch die Peletierelemente in das einzusetzende Hitzeschild eingebaut werden müssen, wird die Temperatur im Inneren des Hitzeschildes durch die Verwendung von Peletierelementen aufgrund des schlechten Wirkungsgrades ansteigen und nicht gesenkt. Die Verwendung von Peletierelementen ohne ein Hitzeschild verbietet sich von selbst, da sie nur bis zu Temperaturen von 250°C einsetzbar sind.

Bei der Betrachtung der zur Verfügung stehenden Energie wird unterschieden zwischen Geräten am Kabel und solchen, welche Energie Untertage durch einen Generator erzeugen.

Bei den kabelgebundenen fällt der Ohmsche Widerstand des Kabels ins Gewicht. Durch eine Erhöhung der Eingangsspannung läßt sich die Untertage zur Verfügung stehende elektrische Leistung zwar erhöhen, jedoch ist die Spannung durch die Durchschlagfestigkeit des Kabels begrenzt.

Für Meß-Systeme, welche mittels eines Spülstromgenerators die elektrische oder auch mechanische Leistung zum Betrieb von Kältemaschinen zur Verfügung stellen, besteht der Nachteil, daß sie gerade dann nicht funktionieren, wenn der kühlende Spülstrom wegfällt und die Umgebungswärme des Gebirges in besonderem Maße auf das Meß-System einwirkt. Für kurze Zeit kann hier eine Überbrückung der Energieversorgung durch Batterie- oder Akkumulatorpufferung erfolgen, jedoch reicht die dabei zur Verfügung stehende Energie zur längeren Kühlung nicht aus.

Hier gilt es, besonders beim Einsatz elektronischer Meßverfahren, Möglichkeiten der Hybridkühlung (Kombination von Kühlsystemen) zu entwickeln, welche verhindern, daß auch bei längerem Spülstromausfall ein Überschreiten der maximal zulässigen Betriebstemperatur möglich ist.

Bei allen anwendbaren Kühlprozessen wird wegen der geringen Temperaturdifferenz einer Kühlstufe eine Kaskadierung notwendig. Dieses gilt besonders beim Einsatz von Peltier-Elementen.

4.3.2 Steigerung der Temperaturfestigkeit im Bereich der Elektronik

Beim Einsatz elektronischer Meß-Systeme Untertage ist eine hohe Umgebungstemperatur ein Faktor, der besonderer Berücksichtigung bedarf. Elektronische Bauelemente, vor allem Halbleiter, sind sehr empfindlich gegenüber hohen Temperaturen. Zu berücksichtigen ist die Verlustwärme, die die Bauteile selbst abgeben.

4.3.2.1. Selektion elektronischer Bauteile

Aktive elektronische Bauelemente wie Halbleiter und auch passive Bauelemente wie Widerstände, Kondensatoren etc. unterliegen Fertigungstoleranzen, welche auch die Überlebenswahrscheinlichkeit beim Überschreiten von Temperaturgrenzen beeinflußt.

Bei Halbleiterbauelementen ist die Überschreitung der sog. "Junction-Temperatur" von Bedeutung. Bei Erreichen dieser Temperatur wird das Halbleiterkristall zum Nichtleiter. Dieser Vorgang ist nicht reversibel. Er führt zur Zerstörung des Bauteiles.

Die Vermessung von übertiefen Bohrlöchern stellt eine besonders hohe Anforderung an die Höhe der Junction-Temperatur einzelner Bauelemente. Allgemein gültige Norm für die Belastbarkeit elektronischer Bauteile ist die MIL-Spezifikation, welche den Einsatzbereich abdeckt, der gewöhnlich in der Militärelektronik erreicht wird. Diese Spezifikation gibt als Temperaturgrenze eine maximale Betriebstemperatur von 125 Grad Celsius an. Für Anwendungen in der Tiefbohrtechnik reicht diese Temperaturgrenze nicht aus. Um den Aufwand an passiver und aktiver Kühlung gering zu halten, muß die Zerstörungsgrenze möglichst nahe an der Umgebungstemperatur im Bohrloch liegen.

Die Fertigung von Halbleitern läßt derzeit keine Beeinflussung der Fertigungstoleranzen in Richtung einer höheren Temperatur zu. Eine Selektion von Bauteilen für eine höhere Temperatur als 125 °C läßt sich nur durch Ausnutzung der Streubreite der Toleranzen erreichen. Die Auswahl erfolgt durch ein K.O.-Verfahren. Die Bauteile werden auf die gewünschte Temperatur, z.B. 175 °C, aufgeheizt und einige Stunden im Ofen belassen. Bauteile, die dieser Temperatur standhalten, werden zur Herstellung von Bohrlochmeßsystemen verwendet. Von eintausend Bauteilen der höchsten MIL-Gütestufe, die dieser Prozedur unterzogen werden, überleben etwa fünfzig. Die Erfahrung zeigt, daß diese Teile dann im praktischen Betrieb eine solche Temperatur auch über einen längeren Zeitraum hinweg ohne Schaden überstehen.

Dieses Verfahren ist bei teureren Bausteinen wie Mikroprozessoren sicherlich eine kostenintensive Lösung. Da jedoch zur Erforschung der Grundlagen der Erhöhung der Temperaturfestigkeit umfangreiche Untersuchungen erforderlich sind, ist dieses Verfahren derzeit das kostengünstigste.

4.3.2.2 Schaltungsauslegung

Die Eigenschaften aller in der Elektronik verwendeten Bauteile sind temperaturabhängig. Bei der Konzeption einer Schaltung für die Erfassung von Parametern Untertage ist diese Temperaturcharakteristik zu berücksichtigen.

Meßsensoren können in Brückenschaltung betrieben werden. Der Einfluß des Temperaturverlaufes, der sich dem Nutzsignal überlagert, wird durch die Brückenschaltung kompensiert. Bei der Auswahl passiver Bauelemente kann durch die Verwendung von Bauteilen mit gegenläufiger Temperaturkennlinie ein Ausgleich erzielt werden.

Bei allen Geräten der analogen Meßwertaufzeichnung und -verarbeitung erfolgt ein Einfluß der Temperatur auf die Kalibrierung des Meßgerätes. Um diese Drift zu minimieren, ist eine frühzeitige Digitalisierung der Meßwerte anzustreben. Dabei ist dann nur noch die Drift der Meßwertnehmer und der Meßverstärker bis zum Analog-Digitalwandler zu beachten. Alle digitalen Signale unterliegen zwar noch in ihrer Amplitude einem Temperatureinfluß, jedoch nicht in der zahlenmäßigen Kodierung. Durch Begrenzung der Amplitude im Meßwertempfänger kann eine Auswirkung von Amplitudenschwankungen verhindert werden.

4.3.2.3 Hybridisierung

Die Entwicklung der Elektronik in den letzten Jahren ist gekennzeichnet von der Zusammenfassung elektronischer Funktionen in einzelne integrierte Schaltkreise .

Die Integrationsdichte der Bauteile ist immer weiter erhöht worden. Der Vorteil der damit verbundenen Miniaturisierung wird durch die Anzahl der verwendeten Lötverbindungen und damit potentieller Störstellen sowie der schlechten Wärmeableitmöglichkeit wieder zunichte gemacht. Durch die Vielzahl der externen Bauteile bei der Verwendung von IC' s auf einer Leiterplatte treten innerhalb einer Schaltung Temperaturgradienten auf, die Einfluß auf die Funktionstüchtigkeit der Schaltung nehmen.

Abhilfe läßt sich durch die Zusammenfassung einer kompletten Schaltung in Hybridtechnik erreichen. Die passiven Bauteile (Widerstände) werden auf ein Substrat (Keramik) aufgedampft oder im Siebdruckverfahren gedruckt. Kondensatoren und Induktivitäten werden ohne Gehäuse auf die vorgedruckten Leiterbahnen aufgelötet. Gleiches gilt für die Halbleiterbauelemente.

Durch den Verzicht auf das Gehäuse bei diesen Bauteilen wird der Miniaturisierungsgrad der Hybridschaltung gegenüber herkömmlichen IC's weiter erhöht. Der besondere Vorteil liegt in der gleichmäßigen Ableitung der entstehenden Verlustwärme über die Keramikleiterplatte. Zum Schutz gegen sonstige Umgebungseinflüsse werden Hybridschaltungen in ein Gehäuse eingebettet. Dieses Gehäuse schirmt die Schaltung hermetisch gegenüber der Umgebung ab.

4.3.2.4 Verzicht auf elektronische Systeme

Bei der Entwicklung von Meß-Systemen für heiße und übertiefe Bohrungen müssen u.U. neue Wege beschritten werden, um die Meßparameter aufzuzeichnen. Gerade im Bereich besonders hoher Temperaturen kann ein völliger Verzicht auf die elektronische Meßwertaufnahme notwendig werden. Überlegungen in diese Richtung führen zu Meßgeräten mit mechanischen Meßwertaufnehmern, wie sie in der Anfangszeit der Bohrtechnik üblich waren. Die Verwendung von Filmaufzeichnungen ist bei derart hohen Temperaturen ebenfalls nicht mehr möglich, so daß auch die Aufzeichnung der Meßwerte Untertage mechanisch oder durch andere Mittel vorgenommen werden muß.

Der Neigungsindikator von TOTCO, der die Neigung des Bohrloches durch einen Nadelstich durch ein Papierplättchen markiert, könnte ebenso wieder in Überlegungen einbezogen werden wie die Glasflasche mit Säure, welche aus der Anfangszeit der Richtbohrtechnik stammt.

4.3.3 Steigerung der Temperaturfestigkeit im Bereich der Mechanik

Das Erreichen der Schmelztemperaturen ist bei Umgebungstemperaturen von 350 bis 450 °C bei der Verwendung von Stählen nicht zu erwarten. Daher ist eine geringe Abnahme der Zugfestigkeit bei der Auslegung von Druckgehäusen zwar zu berücksichtigen, wird aber nicht zum Problem.

Im Bereich der mechanischen Meß-Systeme können sich allerdings Probleme bei der Verwendung von unterschiedlichen Materialien ergeben. So treten bei gelagerten Meßinstrumenten Probleme durch unterschiedliche Längenausdehnung auf. Insbesondere bei mechanischen Kreiseln zur Bohrlochvermessung ist ein solches Verhalten kritisch. Da ein Kreisel auf die Einwirkung von äußeren Kräften mit einem Auswandern aus seiner Richtung reagiert, müssen temperaturbedingte Lagerreibungskräfte unbedingt so klein wie möglich gehalten werden. Hier gäbe es die Möglichkeit des Einsatzes von Kardanaufhängungen, welche aus Keramik hergestellt werden.

Die Längenausdehnung verschiedener Materialien spielt auch bei der Verwendung von elektro-mechanischen Sensoren eine Rolle. Accelerometer sind ein Beispiel für einen solchen Sensor. Eine dünne Glasplatte wirkt als Pendel. Auf der Platte ist eine Spule aufgebracht, mit welcher die Auslenkung des Plättchens aus seiner Ruhelage abgegriffen wird. Durch Temperatureinfluß kommt es zur Ausdehnung des Plättchens und damit zu einer Verstimmung der Kalibrierung. Ähnlich wie bei der Drift der elektronischen Bauteile kann hier Abhilfe durch eine Temperaturkalibrierung oder Kompensationsschaltung geschaffen werden. Bei Verwendung von herkömmlichen Isolationsmaterialien, insbesondere bei Kabeln zur Übertragung von Meßdaten, treten Temperaturprobleme auf. Das normalerweise verwendete Teflon ist nur bis 320 °C einsetzbar. Japanische Entwickler haben ein Mehrleiterkabel entwickelt, dessen Isolationsschicht aus Magnesium-Oxyd-Puder besteht.

In Frankreich wurde ein neuartiges Isoliermaterial für elektrische Kabel entwickelt, das besonders temperaturstabil ist. Ohne Änderung der elektrischen Eigenschaften kann der Verbundwerkstoff auf der Grundlage von Glimmer, Magnesium, einem Polymerisat sowie Aluminiumsilikaten für ca. 4 Std. einer Temperatur von 1050 °C ausgesetzt werden. Dieser patentierte Werkstoff weist weiterhin eine hohe mechanische Abriebfestigkeit und eine große chemische Beständigkeit auf.

5 LITERATURVERZEICHNIS

- ALFORD, S.E. (1976): New Technique evaluates drilling mud lubricants - World Oil (7/86)
- BAKKE, S. (1986): Directional Drilling: The State Of The Art - Petroleum Review (3/86)
- BENCZ, G.; DERES, J. (1983): Heat Resistant Explosives Produced In Hungary With Possible Space Applications - Budapest (Ungarn)
- BENNETT, G.A. (1985): Upgrades in Thermal Protection for Downhole Instruments - Kailua-Kona (Hawaii/USA)
- BENNETT, G.A.; SCHERMAN, G.R. (1983): Analysis and Thermal-Design Improvements of Downhole Tools for Use in Hot-Dry Wells - Los Alamos (New Mexiko/USA)
- BEST, B. (1983): Casing Wear Caused by Tooljoint Hardfacing - San Francisco (Californien/USA)
- BOYER, B. (1983): Downhole motors help control casing wear - Petrol.-Eng. (4/83)
- BRADLEY, W.B.; FONTENOT, J.W. (1975): The Prediction and Control of Casing Wear - J. of Petrol. Technol (2/75)
- BRADLEY, W.B. (1975): Drill-Pipe Rubbers Reduce Rotating Wear at High-Contact Loads - Oil & Gas J. (20.01.1975)
- BRITTENHAM, T.L. et al (1982): Directional Drilling Equipment and Techniques for Deep, Hot Granite Wells - J. of Petrol. Technol. (7/82)
- BURGER, E.; WINKLER, K. (1980): Richtbohren - Methoden und Anwendung - Erdöl-Erdgas-Z. (4/80)
- COBURN, M.D. et al (1980): Development of AFX-511 and AFX-521 Two New Thermally Stable Explosives - Los Alamos (New Mexico/USA)
- EICKELBERG, D. et al (1982): Meßgeräte und Bohrwerkzeuge für die Richtbohrtechnik - Stand der Technik - Celle (Deutschland)
- GAYNOR, T.M. (1986): Downhole Control of Deviation with Steerable Straight Hole Turbodrills - Dallas (Texas/USA)
- GOOCH, A.E. (1977): New Tool-Joint Hard-Facing Minimizes Casing Wear - Oil & Gas J. (21.03.1977)
- HELMICK, C. et al (1982): Planning and Drilling Geothermal Extraction Hole EE-2-a Precisely Orientated and Deviated Hole in Hot Granite Rock - Los Alamos (New Mexico/USA)

HERBERT, P. (1982): Turbodrilling in the Hot-Hole Environment - J. of Petrol. Technol. (10/82)

Koczan, S.P. et al (1982): Drill-Pipe Severing Tool with High-Temperature Explosive - Los Alamos (New Mexico/USA)

KOZLOVSKY, Y.A. (1984): The World's Deepest Well - Sci. Amer. (6/84)

LUBINSKI, A. (1961): Maximum Permissible Dog-Legs in Rotary Boreholes - J. of Petrol. Technol. (2/61)

LUBINSKI, A.; WILLIAMSON, J.S. (1984): Usefulness of Steel or Rubber Drillpipe Protectors - J. of Petrol. Technol. (4/84)

MAKOHL, F. (1986): Evaluation and Differences of Directional and High-Performance Downhole Motors - Dallas (Texas/USA)

MARSHALL, G.D. (1975): Surveying and Steering while Drilling with a Mud Motor - Petrol. Eng. (7/75)

MAURER, W.C. et al (1977): New Turbodrill for Geothermal Drilling - Washington D.C. (Maryland/USA)

MAURER, W.C. (1981): Geothermal turbodrill ready for oilfield-use - Oil & Gas (09.05.1981)

MAYER, P.A. (1979): Two Additives Combine to Reduce Torque and Drag - Drill Bit (7/79)

MILLHEIM, K. (1986): Advances in Drilling Technology (1981-1986) and Where Drilling Technology is Heading - Beijing (China)

MILLHEIM, K. (1979): Behaviour of multiple-stabilizer bottom-hole-assemblies - Oil & Gas J. (01.01.1979)

MILLHEIM, K. (1979): Controlling hole direction in very soft formations - Oil & Gas J. (15.01.1979)

MILLHEIM, K. (1979): Control techniques for medium - soft and medium formations - Oil & Gas J. (29.01.1979)

MILLHEIM, K. (1979): Hard-formation directional drilling calls for special care - Oil & Gas J. (12.02.1979)

MERTENS, V.; WALLUSSEK, H. (1984): Selbsttätig steuerndes Zielbohrsystem - Glückauf (13/84)

MERTENS, V.; WALLUSSEK, H. (1984): Aktiv gesteuertes Zielbohren, Entwicklungsrichtlinien und erste Erfahrungen Untertage - Nobel Hefte (2/84)

NEUDECKER, J.W.; ROWLEY, J.C. (1982): High-Temperature Directional Drilling Turbodrill - Los Alamos (New Mexico / USA)

PATTERSON, W.W. et al (1979): Capacitive Discharge Firing System for Providing Acoustic Sources in the Hot Dry Rock Geothermal Development Project - Los Alamos (New Mexico / USA)

RISCHMÜLLER, H.; NATSCHACK, R. (1984): Stand der Entwicklung moderner Perforationstechnik - Clausthal (Deutschland)

RISCHMÜLLER, W.; WINKLER, K. (1978): Erfahrungen mit neuen Geräten für die Bohrlochverlaufsüberwachung in gerichteten und nichtgerichteten Bohrungen - Erdöl-Erdgas-Z. (9/78)

SCHOENMAKERS, J.M. (1986): Prediction of Casing Wear Due to Drillstring Rotations: Field Validation of Laboratory Simulations - Dallas (Texas/USA)

TRUE, M.E.; WEINER, P.D. (1975): Optimum Means of Protecting Casing and Drillpipe Tool Joints Against Wear - J. of Petrol. Technol. (2/75)

WILLIAMSON, J.S. (1981): Casing Wear: The Effect of Contact Pressure - J. of Petrol. Technol. (12/81)

WILLIAMSON, J.S.; BOLTON, J.B. (1983): A User's Guide to Drillstring Hardfacing - Petrol. Eng. International (9/83)