

# Faseroptische Temperaturmessungen in Untergrundspeichern

S.Großwig, E.Hurtig, K.Kühn, GESO GmbH, Löbstedter Straße 47 b, 07749 Jena  
F.Rudolph, Ruhrgas AG, Huttropstraße 60, 45138 Essen

Die Temperaturverteilung in einem unterirdischen Gasspeicher und deren zeitliche Änderungen sind Schlüsselparameter, um die Betriebsbedingungen zu erfassen und zu überwachen. So hängt die Speicherkapazität (Gasvolumen und Einspeise-Ausspeiseraten) ganz wesentlich von der Temperatur ab. Dasselbe gilt für den Taupunkt, den Dampfdruck und chemische Reaktionen. Die Optimierung der Betriebsbedingungen wie z.B. auch des Methanol-Inhibitionsregimes erfordern genaue Kenntnisse über die Temperaturverteilung in Abhängigkeit von Tiefe und Zeit in Gasspeichersonden und im Innern von Kavernen. Bei bekanntem Kopfdruck kann über die gemessene Temperatur-Tiefenverteilung das Druckprofil berechnet werden.

Der Joule-Thomson-Effekt bildet die physikalische Grundlage für die Kontrolle und Überwachung des Rohrstranges und technischer Einbauten. Er definiert die Beziehungen zwischen Druckänderungen und Temperaturänderungen. Unregelmäßigkeiten im Druckverlauf und insbesondere ein leakagebedingter lokaler Druckabfall führen zu Temperaturänderungen und lassen sich durch Temperaturmessungen einfach detektieren und lokalisieren. Aus Temperaturmessungen, die zeitgleich über die gesamte Strecke einer Bohrung unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen im Steigrohr oder im Ringraum durchgeführt werden, lassen sich detaillierte Aussagen über die Lage und Größe einer Leckage im Rohrstrang (z.B. an Korrosionsstellen, Verschraubungen, Dichtungseinheiten oder Schiebestücken) oder in der Verrohrung ableiten. Auch Hinterrohreffekte (z.B. Gasfluss hinter der Verrohrung) beeinflussen das Temperaturfeld in dem Rohrstrang. An einem Flüssigkeitsspiegel treten Temperaturänderungen auf, die durch eine kurzzeitige Druckentlastung verstärkt werden können, so dass die Lage eines Flüssigkeitsspiegel in Bohrungen oder in einer Kaverne bestimmt und überwacht werden kann.

Die Erfassung und Überwachung der Temperaturverteilung geben daher dem Betreiber eines unterirdischen Speichers wichtige Informationen. Allerdings ist es erforderlich, dass die Messungen zeitgleich über die gesamte Messstrecke bei hoher Temperatur- und Ortsauflösung und einem dichten Zeitraster (z.B. 1 min) erfolgen können, um schnell ablaufende Prozesse zu erfassen und zu lokalisieren. Die konventionellen Bohrlochtemperaturmessungen können diese Anforderungen nicht erfüllen. Das Verfahren der faseroptischen Temperaturmessung eröffnet hier ganz neue Möglichkeiten, da es die zeitgleiche Temperaturmessung über lange Strecken mit der geforderten Orts- und Temperaturauflösung auch in kurzer Messabfolge ermöglicht. Dieses Verfahren bietet sich daher für Untersuchungen in unterirdischen Gasspeichern (Kavernen und Produktionssonden von Aquiferspeichern) an. Seit fast 10 Jahren liegen Erfahrungen mit faseroptischen Messungen in Kavernen und Aquiferspeichern vor. Erste Messungen erfolgten 1992 in der Bohrung Mwd 5 des Kavernenfeldes Mittenwalde [Hurtig u.a.,1993] und 1993 in der Bohrung B41 des Aquiferspeichers Buchholz [Brumlich und Hurtig, 1995; Hurtig u.a., 1994; Großwig, u.a., 1998].

## MESSMETHODIK

Das verteilte faseroptische Laserradar-Temperaturmessverfahren (DTS: Distributed Fibre Optic Temperature Sensing) nutzt die Temperaturabhängigkeit bestimmter optischer Eigenschaften von Lichtwellenleitern zur Messung der Temperatur entlang eines Lichtwellenleiters [Großwig u.a.,2001]. Dazu werden kurze Laserlichtimpulse in den Lichtwellenleiter eines Sensorkabels eingekoppelt. Bei der Ausbreitung des Laserlichtimpulses wird das Licht an den Molekülen des Lichtwellenleiters gestreut. Die Intensität des Ramanrückstreulichtes zeigt eine

deutliche Temperaturabhängigkeit. Das Messprinzip der faseroptischen Temperaturmessung besteht darin, die beiden Komponenten des Ramanrückstreulichtes, die Stokes- und die Anti-Stokes-Linie, aus dem Rückstreupektrum auszufiltern. Durch Bildung des Quotienten der jeweiligen Intensitäten ( $I_a/I_s \sim T$ ) kann in eindeutiger Weise die Temperatur des Lichtwellenleiterabschnitts, in dem das Licht zurückgestreut wurde, berechnet werden. Der Lichtwellenleiter wird dadurch selbst zum sensitiven Element. Da die Lichtgeschwindigkeit in der optischen Faser bekannt ist, kann aus der Laufzeit des rückgestreuten Ramanlichtes die zugehörige Ortskoordinate ermittelt werden. Damit wird es möglich, Temperatur und Ortszuordnung entlang einer optischen Faser zeitgleich zu messen. Mit der DTS-Technik kann die Temperatur über Strecken von mehreren Kilometern Länge mit einer genauen Ortszuordnung der Messwerte über lange Zeiträume bestimmt werden. Entlang des Messkabels gibt es keine elektrischen Bauelemente oder Baugruppen. Das System ist völlig unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Feldern und kann auch bei extremen Anforderungen an den Explosionsschutz eingesetzt werden.

Für die Messungen wird ein faseroptisches Temperatursensorkabel entweder permanent im Ringraum oder für temporäre Messungen im Rohrstrang installiert. Temperaturveränderungen im Ringraum oder im Hinterrohrbereich (z.B. auch im Bereich der Zementation) beeinflussen auch die Temperatur innerhalb des Steigrohrstranges und können dort detektiert und lokalisiert werden. Einspeisung oder Ausspeisung von Gas sowie eine Ringraumlastung können genutzt werden, um das Temperaturfeld zu verändern und Temperatureffekte durch Druckänderungen im Steigrohrstrang oder im Ringraum zu stimulieren. Für die Messungen in Innern von Sonden muss das faseroptische Temperatursensorkabel sehr hohen mechanischen Anforderungen entsprechen. In das Messkabel kann ein CCL-Tool zur genauen Teufenmarkierung integriert werden. Abb. 1 zeigt eine typische Situation für den Einbau eines faseroptischen Sensorkabels in einer Kaverne bzw. in einem Aquiferspeicher.

## ERGEBNISSE

### *Dichtigkeitskontrolle der Bohrlochkomplettierung*

Die physikalische Grundlage für eine Dichtigkeitskontrolle durch Temperaturmessungen ist der Joule-Thomson Effekt, der den Zusammenhang zwischen Druckentlastung und Temperaturabnahme angibt. Für Methan ist der Temperatureffekt ca. 0,5 K pro bar Druckentlastung, für Erdgas der H-Gasfamilie ca. 0,4 K pro bar. Eine lokale Druckentlastung und damit eine Temperaturabnahme kann an Defekten der Bohrlochkomplettierung auftreten. Schematisch sind die Bedingungen in Abb. 2 dargestellt. Zur Detektion und Lokalisierung von Undichtigkeiten wird ein faseroptisches Temperatursensorkabel im Innern des Steigrohres installiert. Bei einem Leck im Förderrohr strömt Gas in den Ringraum und erhöht den Ringraumdruck. Bei einem Leck in der Verrohrung (Casing) kann Gas auch in die Zementation bzw. in das umgebende Gebirge überströmen. Ein Druckaufbau im Ringraum ist daher ein typisches Anzeichen für eine Leckage in dem Steigrohr oder im Bereich von technischen Einbauten. Wenn der Ringraum entlastet wird, beginnt das Gas aus dem Steigrohr in den Ringraum überzutreten. Dabei erfolgt eine lokale Druckentlastung, so dass die Temperatur im Bereich der Leckage absinkt. Abb. 3 zeigt die Ergebnisse von faseroptischen Temperaturmessungen in der Fördersonde einer Gaskaverne in Norddeutschland. Zur Verdeutlichung der Effekte ist die Temperaturdifferenz zwischen dem mittleren geothermischen Gradienten und den Messwerten dargestellt. Deutlich ist die Temperaturabsenkung um über 6 K an der Leckagestelle zu erkennen. Abb. 4 zeigt die Temperaturkurven für einen kurzen Abschnitt der Kaverne S10 des Ruhrgas-Untertagespeichers Epe. Die Details der Bohrlochkomplettierung sind auf der linken Seite dargestellt. Die Temperaturkurve bei  $t = t_0$  zeigt den Ausgangszustand und spiegelt in diesem Abschnitt den geothermischen Gradienten wider. Die Ringraumlastung begann bei  $t = t_0$ . Die Temperatur

nimmt im Bereich der Undichtigkeit in Abhängigkeit von der Ringraumlastung mit der Zeit ab. Die maximale Temperaturabsenkung beträgt ca. 3,5 K (von 42,5 bis 39,0 °C). Das Temperaturminimum ist deutlich ausgeprägt und kann exakt einem Punkt der Bohrlochkomplettierung zugeordnet werden.

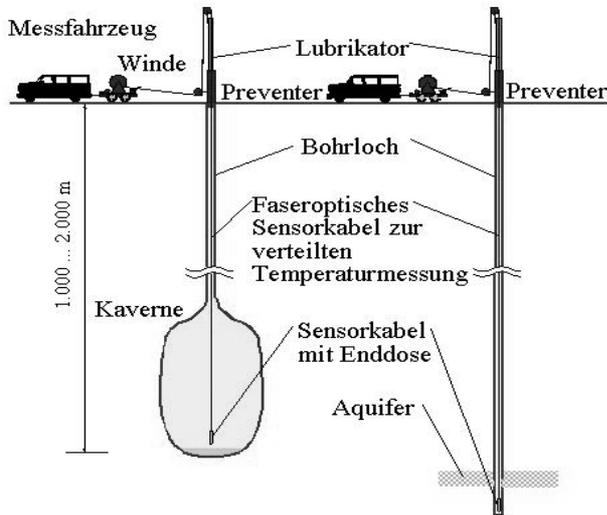


Abb. 1: Installation eines faseroptischen Temperatursensorkabels in einem Bohrloch eines untertägigen Gasspeichers (links: Kavernenspeicher; rechts: Aquiferspeicher)

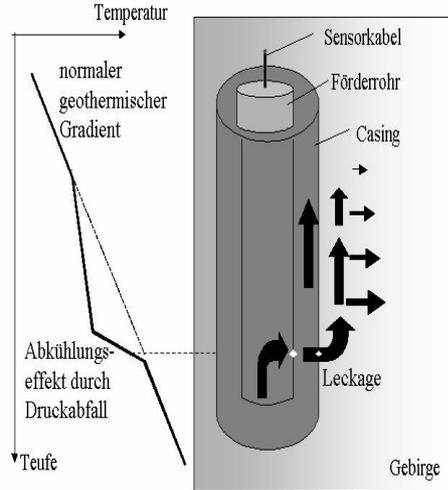


Abb. 2: Temperatureffekt auf Grund einer Leckage im Förderrohr oder in der Verrohrung

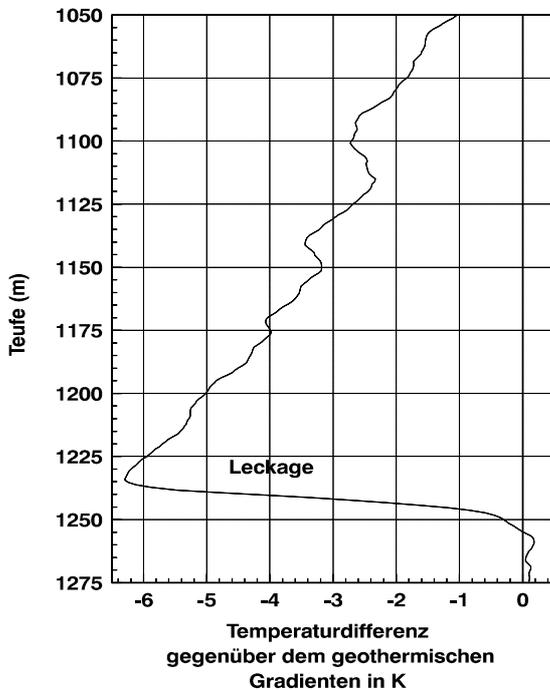


Abb. 3: Leckage-Detektion durch faseroptische Temperaturmessungen

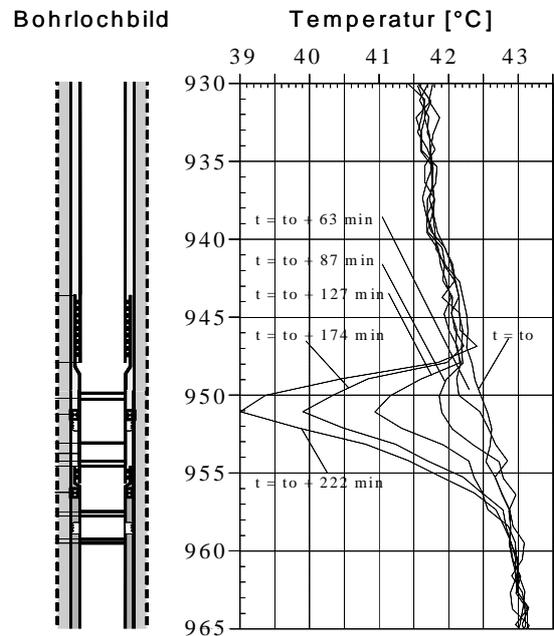


Abb.4: Bohrlochkomplettierung und Temperaturverteilung in der Kavernenbohrung Epe S10

Abb. 5a und b zeigen die Temperaturänderungen in Abhängigkeit von Zeit und Teufe während der Ein- und Ausspeisung von Erdgas in der Kaverne Epe S 10. Die Ein- und die Aus-

speisung von Gas begonnen jeweils bei  $t = t_0$ . Entsprechend der Temperatur des Einspeisegases fällt bei der Gaseinspeisung die Temperatur im Steigrohr schnell ab (Abb. 5a). Ein quasi-stationärer Zustand wird erst nach über 4 Stunden erreicht. Ganz deutlich markiert sich die Oberkante der Kaverne, in der nur sehr geringfügige Temperaturänderungen auftreten.

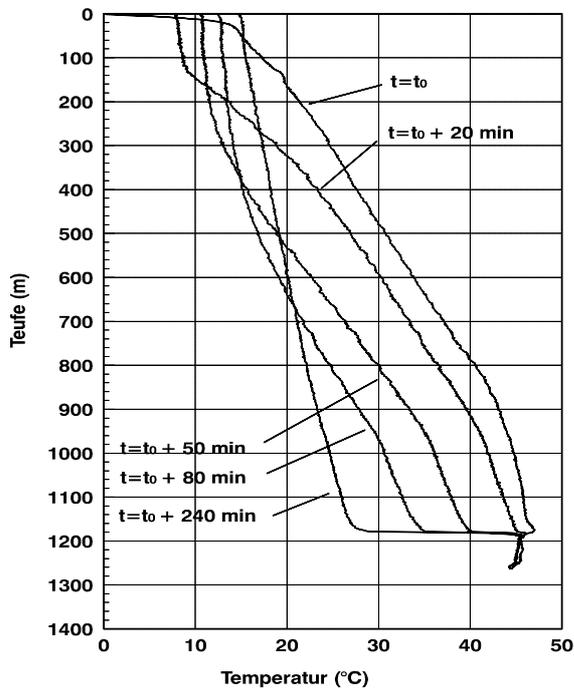


Abb. 5a: Veränderung der Temperatur in Abhängigkeit von Zeit und Teufe während der Injektion von Gas

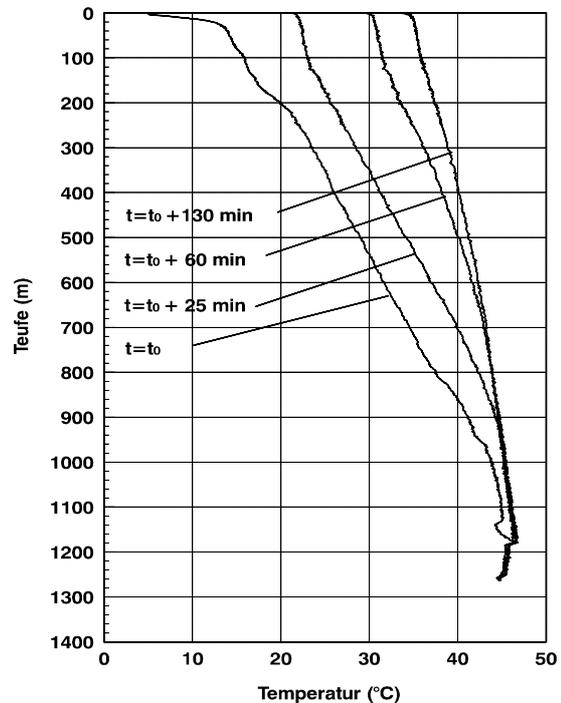


Abb. 5b: Veränderung der Temperatur in Abhängigkeit von Zeit und Teufe während der Gasausspeisung

Bei der Gasausspeisung (Abb. 5b) steigt die Temperatur deutlich an, die Oberkante der Kaverne bildet sich nur schwach ab.

### **Bestimmung der Gebirgstemperatur**

Der Betrieb eines Aquiferspeichers beeinflusst langfristig die Gebirgstemperatur sowohl im Bereich der Speicherhorizonte als auch des Deckgebirges. Die aktuelle Gebirgstemperatur im Umfeld einer Bohrung kann mit Hilfe des HORNER-Verfahrens bestimmt werden. Hierfür ist es notwendig, dass Gas über eine bestimmte bekannte Zeit ausgespeist und damit die Temperatur im Umfeld der Bohrung deutlich gestört wird. Nach Beendigung der Ausspeisung müssen die Temperaturmessungen sofort beginnen und sich dann in größeren zeitlichen Abständen über einen längeren Zeitraum fortsetzen bis die Gleichgewichtstemperatur extrapoliert werden kann. Auf dieser Grundlage kann dann die aktuelle Gebirgstemperatur ermittelt werden. Abb. 6 verdeutlicht die Veränderung der Gebirgstemperatur im Umfeld der Bohrung B 41 des Erdgasspeichers Buchholz im Laufe von 17 Jahren.

### **Reservoirdynamische Prozesse**

Temperaturmessungen können wichtige Informationen über die Raum-Zeit-Verteilung des Gases und über die ablaufenden dynamischen Prozesse in Aquiferspeichern geben. Hierzu gehören z.B. Aussagen über die Hauptzuflussbereiche innerhalb eines Speicherhorizontes und über Zustrombereiche in Sonden, die schichtparallel verlaufen (Schräg- oder Horizontalbohrungen). Wenn Filterbereiche durch Salzausfällung verstopft sind, können konventionelle Flowmetermessungen zu

falschen Ergebnissen führen. Auch in diesen Fällen kann mit Hilfe der faseroptischen Temperaturmessungen eine Klärung erfolgen. Temperaturmessungen in einer oder in mehreren Bohrungen um eine Einspeisesonde ermöglichen die Bestimmung der räumlichen Verteilung der Temperatur im Speicherhorizont und damit die Bestimmung dynamischer Vorgänge im Speicher. Abb. 7 zeigt die Ergebnisse in einer Bohrung des Untergrundspeichers Ketzin während der Gaseinspeisung in eine Nachbarsonde in einer Entfernung von ca. 500 m. Die drei Kurven stellen die Temperatur in unterschiedlichen Tiefen des Speicherhorizontes dar. Bereits 2 Stunden nach Beginn der Gaseinspeisung gibt es einen nachweisbaren Temperaturanstieg. In Abhängigkeit von der Messteufe im Speicherhorizont erreicht der Temperaturanstieg nach 6 Stunden Werte bis 1 K.

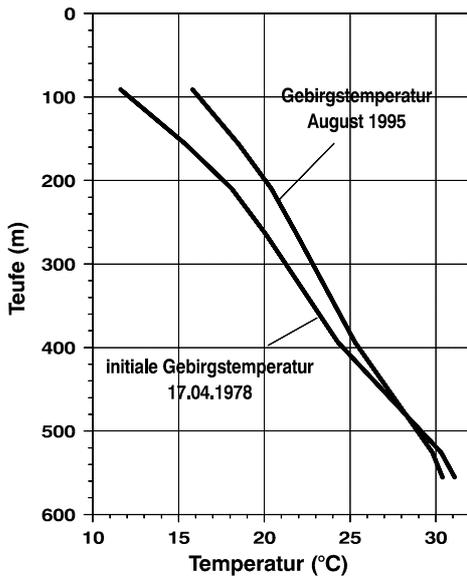


Abb.6: Veränderung der Gebirgstemperatur im Zeitraum von 17 Jahren, Bohrung B 41 Speicher Buchholz

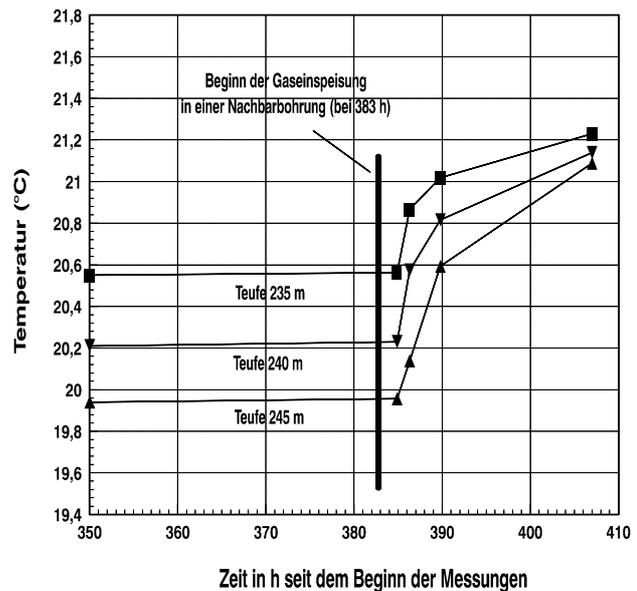


Abb. 7: Änderung der Temperatur in unterschiedlichen Tiefen des Speicherhorizontes bei Gaseinspeisung in einer Nachbarbohrung

### **Bestimmung des Flüssigkeitsspiegels**

In Aquiferspeichern ändert sich die Lage des Flüssigkeitsspiegels in Abhängigkeit von der Gaseinspeisung oder Gasausspeisung. Am deutlichsten ist dieser Effekt in Sonden im Bereich des Strukturrandes. Mit Hilfe von faseroptischen Temperaturmessungen ist eine eindeutige Erfassung des Flüssigkeitsspiegels möglich ist. Der Effekt lässt sich stimulieren, wenn eine Druckentlastung der Gassäule erfolgt. In gleicher Weise kann bei einer Ringraumentlastung der Spiegel der Ringraumflüssigkeit bestimmt werden. Abb. 8 zeigt die Ergebnisse von Messungen in der Sonde Epe S 10.

### **Überwachung von Injektionsmaßnahmen zur Stimulation von Gas- bzw. Ölzufüssen**

Die Injektion von Flüssigkeiten oder Dampf im Rahmen von Stimulationsmaßnahmen verursacht Temperaturänderungen. Temperaturveränderungen in Beobachtungssonden, die um eine Injektionssonde angeordnet sind, können erfasst; der Injektionsprozess kann daher überwacht werden (s. auch Abb. 7). Damit ist es möglich, auch den Durchbruch einer thermischen Front oder hydraulische Verbindungen zwischen der Injektionssonde und Beobachtungssonden zu detektieren und teufenmäßig exakt zu lokalisieren.

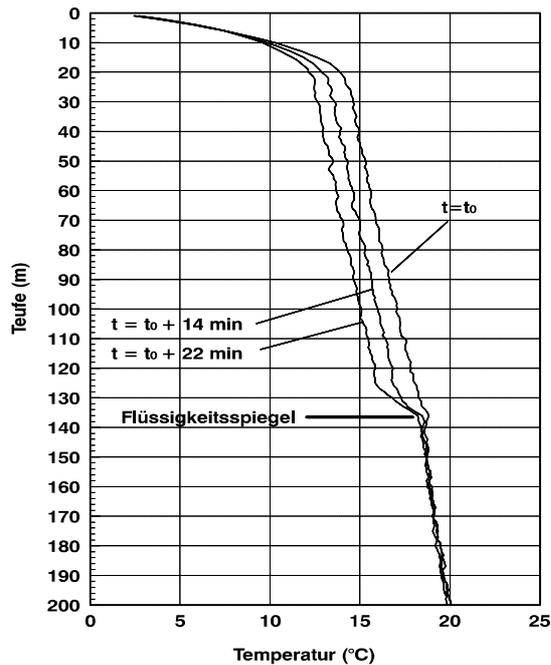


Abb. 8: Bestimmung des Spiegels der Ringraumschutzflüssigkeit, Bohrung Epe S 10

## ZUSAMMENFASSUNG

Faseroptische Temperaturmessungen ermöglichen eine zeitgleiche Bestimmung der Temperatur mit hoher Orts- und Temporauflösung für das Gesamtprofil einer Bohrung oder einer Kaverne und eröffnen damit neue Möglichkeiten für die Betriebsführung und die Betriebsüberwachung von Untertagespeichern. Undichtigkeiten in der Bohrlochkomplettierung und Hinterrohrströmungen können detektiert und teufenmäßig exakt lokalisiert werden. Prozessabläufe und Hauptgaswegsamkeiten in einem Porenspeicher lassen sich erfassen und überwachen. In Kavernen kann das faseroptische Temperatursensorkabel bis in den Sumpf am Boden der Kaverne eingehängt werden, so dass eine zeitlich variable Temperaturschichtung in der Kaverne und Prozesse bei der Ein- oder Ausspeisung erfasst werden können. Die Langzeitänderung der Gebirgstemperatur im Deckgebirge von Untertagespeichern wird unter Nutzung des HORNER-

Verfahrens bestimmt. Auch der Nachweis einer Wasserzirkulation im Deckgebirge, die letztlich zu einer Schädigung der Zementation führen kann, ist möglich. Es wurde weiterhin der Nachweis geführt, dass die Lage des Flüssigkeitsspiegel in Sonden und der Schutzflüssigkeit im Ringraum eindeutig bestimmt werden kann. Die Erfahrungen zeigen, dass faseroptische Temperaturmessungen ohne Umbauten oder technische Veränderungen am Bohrkopf bzw. im Steigrohrstrang und ohne lange Unterbrechungen des Speicherbetriebes möglich sind. Mit dem in einer Bohrung eingebauten Messkabel lassen sich ohne besonderen Aufwand Langzeitmessungen durchführen, ohne dass der Ein- und Ausspeisebetrieb nachhaltig eingengt wird. Das faseroptische Temperaturmessverfahren ist damit ein kostengünstiges Diagnoseverfahren und für den Betrieb und die Überwachung von Untertagespeichern von großem Wert.

## LITERATUR

- Hurtig, E.; Schrötter, J.; Großwig, S.; Kühn, K.; Harjes, B.; Wieferig, W.; Orrell, R.P.: Borehole temperature measurements using distributed fibre optic sensing; *Scientific Drilling* 3, 1993, S. 283-286.
- Brumlich, H.; Hurtig, E.: Faseroptische Temperaturmessungen - High Tech im VNG-Untertagespeicher Buchholz; *Das GAS-Medium, Verbundnetz Gas AG, Heft 4, 1995, S. 18-19.*
- Hurtig, E.; Brumlich, H.; Großwig, S.; Kühn, K.: Faseroptische Temperaturmessungen zur Überwachung der Prozesse in einer geothermischen Lagerstätte, dargestellt am Beispiel eines Aquiferuntertagespeichers, 3. Geothermische Fachtagung, Schwerin 1994, S. 292-299.
- Großwig, S.; Hurtig, E.; Kasch, M.; Kühn, K.: Die ortsaufgelöste Temperaturmesstechnik- Leistungsfähigkeit und Anwendungsmöglichkeiten im Umwelt- und Geobereich anhand ausgewählter Beispiele, „Temperatur '98“, Verein Deutscher Ingenieure - VDI - Berichte Nr. 1379, VDI Verlag Düsseldorf 1998, S. 87-92.

Großwig, S.; Hurtig, E.; Kühn, K. und Rudlph, F.: Faseroptische Temperaturmessungen in unterirdischen Gasspeichern; Erdöl, Erdgas, Kohle 117, 2001, S. 522-527.