

Die ortsaufgelöste faseroptische Temperaturmeßtechnik - Leistungsfähigkeit und Anwendungsmöglichkeiten im Umwelt- und Geobereich anhand ausgewählter Beispiele

Stephan Großwig (Jena), Eckart Hurtig (Teltow), Michael Kasch (Teltow), Katrin Kühn (Jena)

Die ortsaufgelöste faseroptische Temperaturmeßtechnik stellt ein neues Verfahren zur Temperaturmessung dar. Durch die zeitaufgelöste Messung des Raman Rückstreupektrums ist man in der Lage, Temperaturverteilungen entlang eines Weges, in einer Fläche oder in einem Volumen mit hoher Orts- und Temperaturauflösung meßtechnisch zu erfassen. Die Leistungsfähigkeit und die Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens werden anhand ausgewählter Beispiele dargestellt.

The Distributed Fibre Optic Temperature Sensing represents a new physical approach for temperature measurements. Due to the time domain reflected measurement of the Raman backscattering effect temperature sensing with a high spatial resolution and a high accuracy in one, two and three dimensional spaces becomes possible. Efficiency and applicability are represented by the means of example data.

1 Meßprinzip

Die ortsaufgelöste faseroptische Temperaturmeßtechnik, ein faseroptisches Laserradar-Temperaturmeßverfahren, nutzt die Temperaturabhängigkeit bestimmter optischer Eigenschaften von Lichtwellenleitern zur Messung der Temperatur entlang eines Lichtwellenleiters. Dazu werden kurze Laserlichtimpulse in die Lichtwellenleiter des Sensorkabels eingekoppelt. Ein geringer Teil des Laserlichtes wird zurückgestreut. Neben der eingestrahlten Wellenlänge enthält das Rückstreupektrum je ein sogenanntes Stokes- und Anti-Stokes-Band (Raman-Effekt), die in ihrer Wellenlänge jeweils zu geringeren bzw. größeren Wellenlängen hin verschoben sind. Während die Intensität des Stokes-Bandes I_s annähernd temperaturunabhängig ist, zeigt das Anti-Stokes-Band I_a eine deutliche Temperaturabhängigkeit.

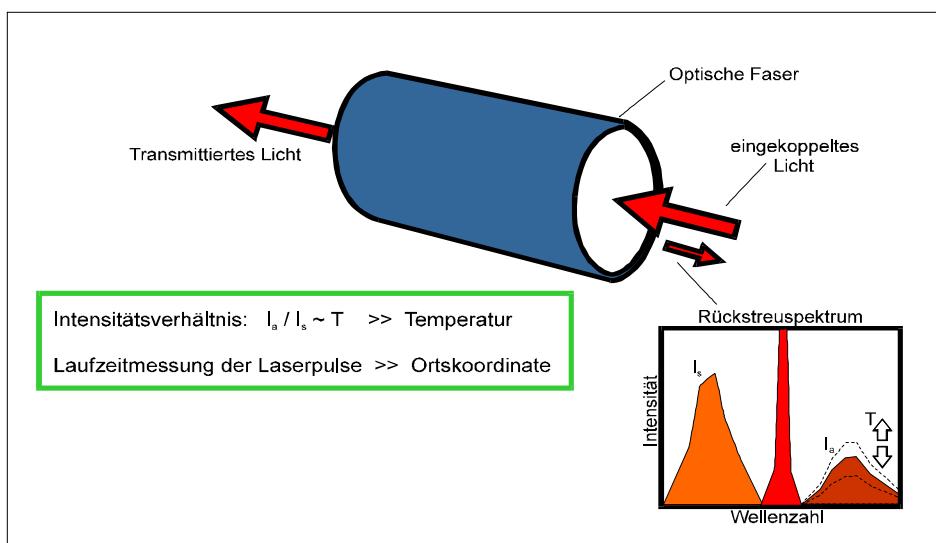


Abb.1 Physikalisches Prinzip der faseroptischen Laserradar-Temperaturmeßtechnik

Durch Bildung des Quotienten der beiden Intensitäten kann in eindeutiger Weise die Temperatur des Lichtwellenleiterabschnitts, in dem das Licht zurückgestreut wurde, berechnet werden. Hierfür gilt die folgende Beziehung:

$$I_a / I_s = \{(v_0 + v_k)^4 / (v_0 - v_k)^4\} \exp(-hcv_k / kT)$$

mit: I_a - Intensität der Anti-Stokes-Linie

T - Temperatur

I_s - Intensität der Stokes-Linie

h - Plancksches Wirkungsquantum

v_0 - Wellenzahl des einfallenden Lichtes

k - Boltzmann-Konstante

v_k - Verschiebungsbetrag der Wellenzahl

c - Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes
im Lichtwellenleiter

Dabei handelt es sich um die mittlere Temperatur desjenigen Längenabschnitts, aus dem das rückgestreute Licht innerhalb eines bestimmten Zeitfensters stammt. Das Auswertegerät verknüpft die Intensitätsmessung mit einer Laufzeitmessung des Lichts im Lichtwellenleiter und liefert auf diese Weise die Temperaturwerte sämtlicher Längenabschnitte.

2 Physikalisch-technische Parameter des Meßsystems

Das faseroptische Laserradar-Temperaturmeßverfahren nutzt die Temperaturabhängigkeit der Raman-Rückstreuung als sensorischen Effekt. Da Streuprozesse statistische Prozesse sind, ist das Meßergebnis mit einem statistischen Rauschen überlagert.

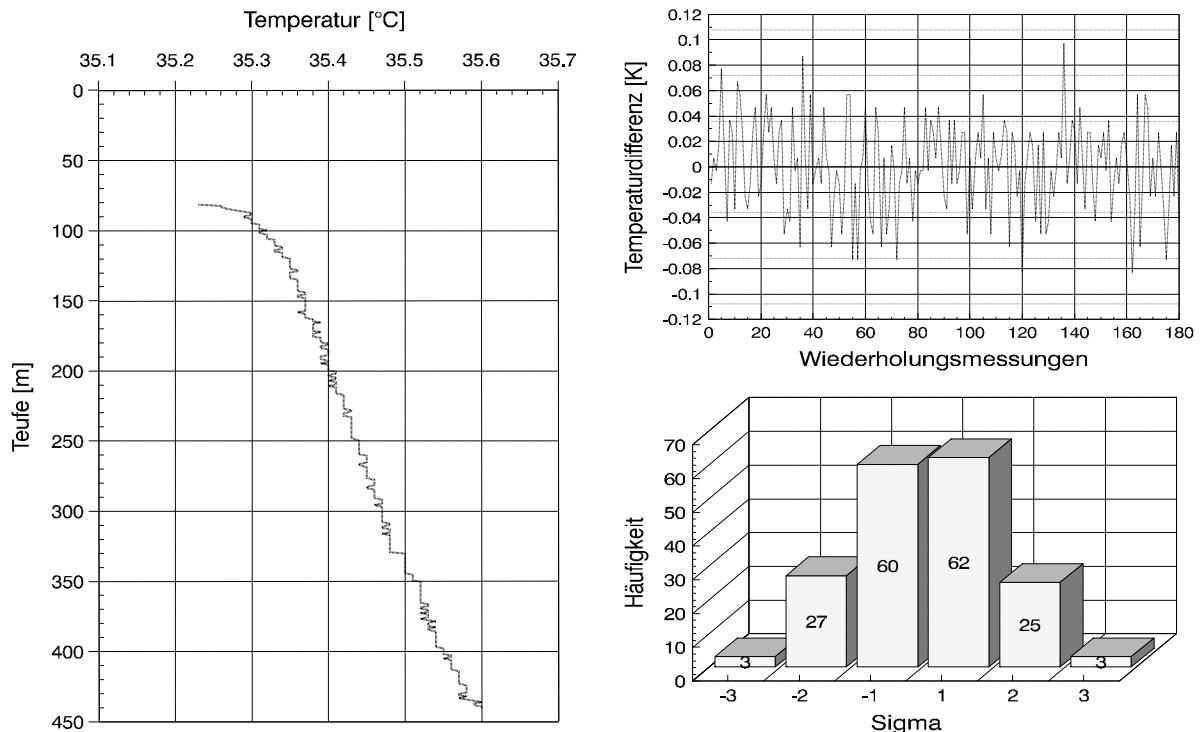


Abb. 2 Messungen in einem Tiefbrunnen zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit

linke Abb.: Temperatur-Teufen-Verteilung im Grubenwasser (Mittelwert aus 180 Einzelmessungen, Meßzeit einer Einzelmessung: 1 min)

rechte obere Abb.: Abweichung der 180 Einzelmessungen vom Mittelwert in 150m Teufe
 $1\sigma = 0,033$ K (Standardabweichung des Einzelmeßwertes)

rechte untere Abb.: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen

Zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse wurde die Temperatur-Teufen-Verteilung in einem Tiefbrunnen insgesamt 180 mal mit einer Meßzeit von je 1 min bestimmt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Temperatur in verschiedenen Teufenbereichen zeigt, daß die Temperatur während der Zeitdauer der Messungen im Mittel konstant ist und nur statistischen Schwankungen unterworfen ist. Dadurch ist es möglich, aus allen Messungen eine mittlere Temperatur-Teufen-Verteilung zu bilden (siehe Abb. 2 links). Abbildung 2 oben rechts zeigt exemplarisch für die Teufe von 150 m die Abweichung jedes Einzelmeßwertes zum Mittelwert über alle 180 Einzelmessungen. Die Berechnung der 1σ -Streuung (Standardabweichung der Einzelmeßwerte) ergibt einen Wert von 0,033 K. Die Häufigkeitsverteilung der Abweichungen stellt annähernd eine Gauß-Verteilung dar (siehe Abb. 2 rechts unten). Damit kann man davon ausgehen, daß die Reproduzierbarkeit einer Einzelmessung mit einer Meßzeit von 1 min besser 0,1 K (entspricht einem Wert von 3σ) ist. Durch eine Anzahl N von Wiederholungsmessungen läßt sich der statistische Meßfehler um \sqrt{N} verringern.

In der Praxis haben sich je nach Aufgabenstellung Meßzeiten von ca. 1 min (für die in-situ-Erfassung schnell ablaufender Prozesse z.B. beim Fluid Logging) bis ca. 40 min (für die Untersuchung quasistationärer Prozesse) als ausreichend erwiesen.

Definiert man das Temperaturauflösungsvermögen, als die Temperaturdifferenz zwischen zwei benachbarten Meßwerten, die unter allen Umständen meßtechnisch sicher erfaßt werden kann, so kann das Auflösungsvermögen höchstens das Doppelte der Reproduzierbarkeit betragen.

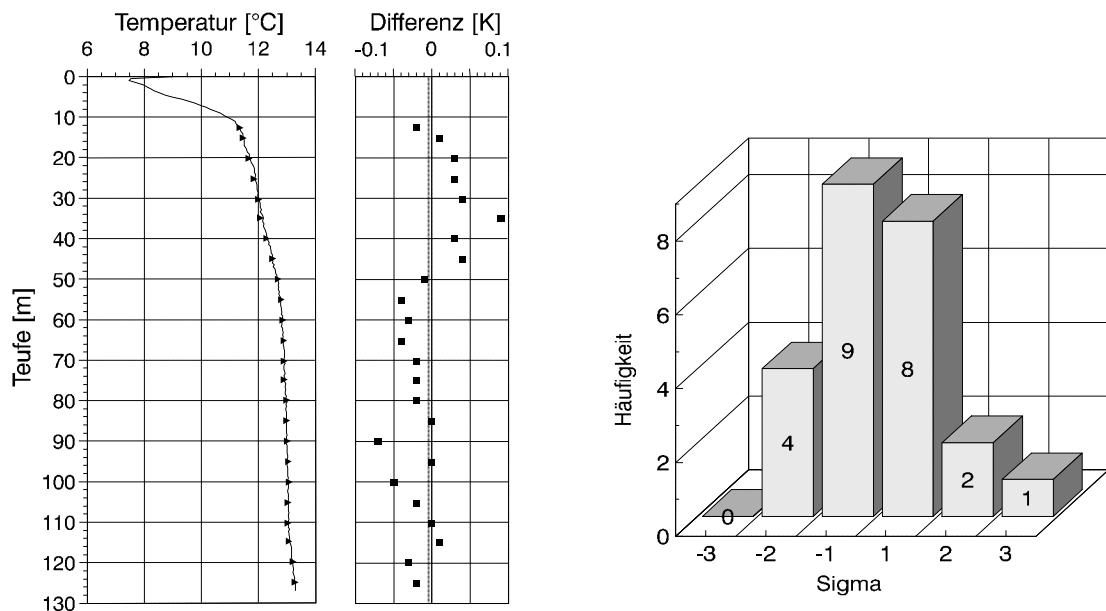


Abb. 3 Vergleich der mit unterschiedlichen Verfahren in einer Bohrung gemessenen Temperatur-Teufen-Verteilung

- linke Abb.: Messung mit Multisonde (unabhängige Fremdfirma) - Dreiecke
Faseroptische Messung (Meßzeit: 1 min., GESO) - durchgehende Kurve
- mittlere Abb.: Differenz zwischen beiden Messungen - Rechtecke
Mittlere Abweichung der beiden Messungen - durchgehende Kurve
- rechte Abb.: 1σ -Streuung der faseroptisch gemessenen Temperaturwerte bezogen auf die mittlere Abweichung
 $1\sigma = 0,035$ K (Standardabweichung des Einzelmeßwertes)

In die Gleichung zur Bestimmung der Temperatur aus dem gemessenen Intensitätsverhältnis gehen neben der Wellenzahl des einfallenden Lichtes (eine konstante Größe, die durch die verwendete Laserlichtquelle festgelegt ist) und den Naturkonstanten k , h und c der Verschiebungsbetrag der Wellenzahl durch die Ramanstreuung ein. Dieser Verschiebungsbetrag hängt von der konkreten Beschaffenheit des verwendeten Lichtwellenleiters ab. Diese Größe muß für jeden eingesetzten Lichtwellenleiter durch Kalibrierung neu bestimmt werden, da bei der Fertigung der Lichtwellenleiter immer Fertigungstoleranzen auftreten, so daß kein Lichtwellenleiter exakt dem anderen gleicht. Die Anbindung des gemessenen Intensitätsverhältnisses des rückgestreuten Lichtes an die absolute Temperaturskala erfolgt über eine geräteinterne Kalibrierung. Die Anbindung an die absolute Temperaturskala erfolgt im Normalfall mit einer Genauigkeit von $\pm 0,3$ K. Mit erhöhtem Aufwand bei der Kalibrierung lässt sich die Genauigkeit der Anbindung noch verbessern, wie der Vergleich der in einer Bohrung mit verschiedenen Verfahren gemessenen Temperatur-Teufen-Verteilungen zeigt (siehe Abb. 3). Die beiden Messungen und die Kalibrierung der beiden Meßsonden erfolgten völlig unabhängig voneinander.

Mit der faseroptischen Laserradar-Temperaturmeßtechnik steht ein Meßverfahren zur Verfügung, daß die Erfassung der Temperatur mit hoher Orts- und Zeitauflösung auch unter komplizierten Bedingungen gestattet. Das faseroptische Temperatursensorkabel ist ein elektrisch völlig passiver Temperatursensor. Elektronische Bauelemente sind entlang des Kabels nicht vorhanden. Korrosionseffekte treten auf Grund der widerstandsfähigen Ummantelung des Kabels nicht auf. Aus den Erfahrungen bei Erdkabeln lässt sich für spezielle Kabelkonstruktionen eine Lebensdauer für faseroptische Sensorkabel von wenigstens 2 - 3 Jahrzehnten ableiten.

Zusammengefaßt sind die wesentlichen Vorteile dieser faseroptischen Temperaturmeßtechnik:

- (1) Simultane Messung von Temperatur und Ort entlang einer Meßstrecke bis 20 km *) mit:
 - Ortsauflösung $\geq 0,25$ m *)
 - Temperaturauflösung bis zu 0,02 K *)
 - Absolutgenauigkeit der Temperaturmessung besser $\pm 0,3$ K
 - Temperaturbereich -50°C bis $+80^{\circ}\text{C}$
 Die mit *) gekennzeichneten Werte hängen voneinander ab.
- (2) Keine Beeinflussung des Temperaturfeldes durch den Meßvorgang
- (3) Nutzung von Spezialkabelkonstruktionen zum Einsatz unter rauen Umgebungsbedingungen:
 - $\text{pH} \geq 2$
 - Druckfestigkeit des Temperatursensorkabels bis zu 75 MPa
 - Erweiterter Temperaturbereich -140°C bis $+460^{\circ}\text{C}$
- (4) Stationärer Einbau des Meßkabels an später nicht mehr zugänglichen Stellen möglich
- (5) Langzeitmonitoring möglich

Durch eine entsprechende Anordnung des Lichtwellenleiters kann die Temperaturverteilung entlang eines Weges, in einer Fläche oder in einem Volumen kontinuierlich mit hoher Ortsauflösung ermittelt werden.

3 Einsatzgebiete / Anwendungsmöglichkeiten des Meßsystems

Im Geo- und Umweltbereich ist die Raum-Zeit-Verteilung der Temperatur ein wichtiger Parameter, um natürliche und anthropogen bzw. technogen beeinflußte Prozeßabläufe zu erfassen, zu untersuchen und langfristig zu überwachen. Die Temperatur ist ein natürlicher, absolut umweltverträglicher Tracer. An Hand des folgenden Beispiels sollen die Vorteile und die Leistungsfähigkeit der ortsaufgelösten faseroptischen Temperaturmeßtechnik demonstriert werden.

Aquifer- und Kavernenspeicher werden für die unterirdische Speicherung von Erdgas genutzt. Für die Bewertung des Betriebszustandes und eine Überwachung ist die Temperaturverteilung und deren zeitliche Entwicklung eine wichtige Meßgröße. Die Langzeittemperaturrentwicklung in einem untertägigen Gasspeicher liefert thermodynamische Informationen, die in Verbindung mit den geologischen Gegebenheiten des Untergrundes ein detailliertes Bild der Vorgänge im Speicher entstehen lassen. Insbesondere Fragen der Speicherkapazität hängen von der Temperatur ab. Die ortsaufgelöste faseroptische Temperaturmeßtechnik bietet erstmals die Möglichkeit, zeitgleich und über lange Zeiten das vollständige Temperatur-Teufen-Profil in Bohrungen und Kavernen mit hoher Orts- und Temperaturauflösung zu messen. Es werden mechanisch wie chemisch robuste Sensorkabel mit einer Lebensdauer von mehr als drei Jahrzehnten verwendet. Die Sensorkabel werden durch den Sondenkopf eingeführt und druckdicht eingebaut. Sie lassen sich sowohl in der Bohrung als auch im Ringraum installieren. Nach der Installation der Sensorkabel wird der Speicherbetrieb nicht gestört.

Durch die Speicherung von Erdgas in einem Aquiferspeicher wird das Temperaturfeld deutlich beeinflußt. Abbildung 4a zeigt derartige Untersuchungsergebnisse. Unter Verwendung des Horner-Verfahrens wurde mit Hilfe eines faseroptischen Sensorkabels, das im Ringraum einer Förderbohrung permanent installiert war, die aktuelle Gebirgstemperatur bestimmt. Die Gebirgstemperatur hat sich infolge des Speicherbetriebes nach einem Betriebszeitraum von ca. 20 Jahren deutlich gegenüber dem Ausgangszustand vor Beginn des Speicherbetriebs verändert. Es ist eine Abkühlung im Bereich des Speichers durch die Injektion kühlen Gases sowie eine Erwärmung des Hangenden im Bereich der Bohrung eingetreten.

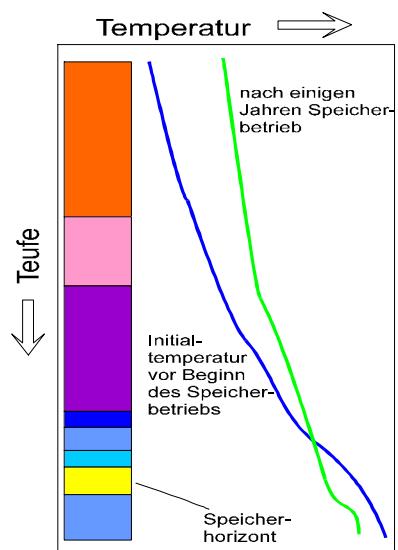


Abb.4a Langzeitige Entwicklung des Temperatur-Teufen-Profs

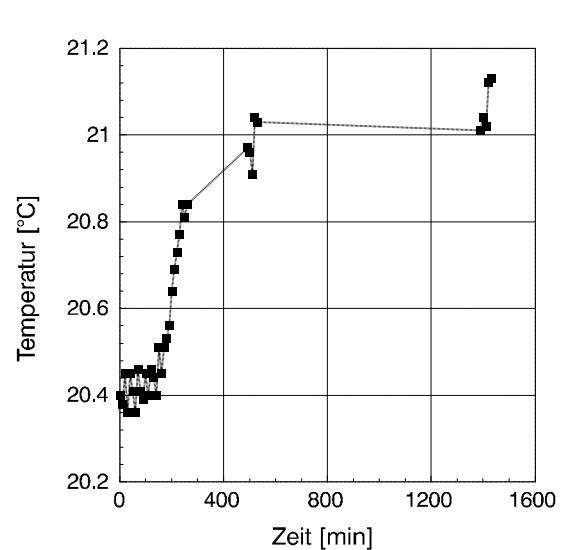


Abb.4b Zeitliche Temperaturrentwicklung im aktiven Speicherhorizont bei Einspeisung in einer Nachbarbohrung
(Beginn der Einspeisung bei $t = 0$ min)

Der Betrieb eines Aquiferspeichers erfordert detaillierte Kenntnisse über die räumlichen und zeitlichen Ausbreitungsvorgänge des Gases im Speicher. Bei der Einspeisung von kühlem Gas breitet es sich von einer Einspeisesonde im Speicherhorizont aus und führt zu einer Änderung des Temperaturfeldes im Speicherhorizont. Ein räumliches Bild dieser Vorgänge entsteht, wenn zeitgleich die Temperatur-Teufen-Profile in mehreren Sonden an verschiedenen Standorten über den Zeitraum des Ausbreitungsprozesses meßtechnisch erfaßt werden können, was mit der ortsaufgelösten faseroptischen Temperaturmeßtechnik problemlos möglich ist. Damit lassen sich dann zu den jeweiligen Druckverhältnissen an den beteiligten Sonden die entsprechenden Ausbreitungsvorgänge im Speicher räumlich und zeitlich verfolgen. Abbildung 4b zeigt als Beispiel, daß der Einspeisevorgang in einer Sonde bereits nach kurzer Zeit in einer Nachbarbohrung über die Änderung der Temperatur erfaßt werden kann.

Die hohe Temperatur- und Ortsauflösung der faseroptischen Temperatursensorik ermöglicht es, Aussagen über die Lage undichter Muffen oder von Lecks in dem Tubingstrang und über Hinterrohreffekte zu machen. Dazu wird die Temperatur-Teufen-Verteilung vor und nach der Entspannung des Ringraumes der Bohrung gemessen. In der Differenzkurve der Temperaturprofile zeigen negative Temperaturanomalien undichte Muffen, positive Temperaturdifferenzen den Zustrom wärmeren Gases im Hinterrohrbereich aufgrund schadhafter Zementation an. Solche Messungen sind selbst dann möglich, wenn das Sensorkabel im Förderrohr installiert wird. Temperaturänderungen im Ringraum oder der Zementation wirken über Wärmeleitungsvorgänge in das Förderrohr zurück und lassen sich mit der empfindlichen faseroptischen Temperatursensorik meßtechnisch erfassen und genau lokalisieren.

Weitere wesentliche derzeitige Einsatzgebiete dieser Temperaturmeßtechnik sind:

- Überwachung von Grundwasser- und Thermalbohrungen; Geomonitoring in Tagebaukippen zur Überwachung der Prozeßabläufe in Bergauffolgelandschaften; Begleitendes Monitoring bei der Flutung unterirdischer Grubengebäude; Hydrogeologische Untersuchungen
- Messungen im Tunnel-, Erd- und Bergbau; Dichtigkeitsüberwachung von Schlitzwänden; Fluid Logging zur Detektion von Störungszonen und Klüftigkeiten; Untersuchungen zur Entwässerung von Böschungen; Kontrolle von Zementationen von Bohrungen
- Monitoring in unterirdischen Erdgasspeichern
- Überwachung von Gefrierbohrungen und Gefrierschächten
- Überwachung von unterirdischen nicht befahrbaren Endlagern
- Monitoring von Erdwärmesonden und - sondenfeldern
- Leckageortung und Langzeitmonitoring von Talsperren, Damm- und Deichbauten
- Überwachung von Deponiebasisabdichtungen und von Altdeponien; Ortung und Überwachung von Aufheizzonen und Glimmbrandherden; Langzeitüberwachung von Transport und Stoffumsetzungen von Schadstoffen aus anaeroben Deponien
- Leckageortung und Langzeitmonitoring von Erdöl- und Hochdruckgaspipeline, sowie von Heiztrassen
- Facility-Management in Gebäuden und technischen Anlagen

Adresse der Autoren

Dr.rer.nat. Stephan Großwig, Dipl.-Math. Katrin Kühn, GESO Gesellschaft für Sensorik, geotechnischen Umweltschutz und mathematische Modellierung mbH Jena, Löbstedter Str.47b, 07749Jena, email: info@geso-online.de, Internet: www.geso-online.de

Prof. Dr. Eckardt Hurtig, GESO Gesellschaft für Sensorik, geotechnischen Umweltschutz und mathematische Modellierung &Co. PROJEKT KG., Potsdamer Str. 18a, 14513 Teltow, e-mail: hurtig.geso_jena@t-online.de