

Luftgestützte Thermal-Infrarot-Technologie

Generische Zustandsanalyse von Fernwärmenetzen

Mit der luftgestützten Thermal-Infrarot-Technologie (TIR) können erdverlegte Fernwärmenetze flächendeckend analysiert werden. Die Interpretation der TIR-Bilddaten erfordert jedoch ein hohes Maß an Erfahrung bei der Auswertung der Thermalkarten. In einem Forschungsvorhaben hat das Fernwärme-Forschungsinstitut und die Scandat GmbH ein Berechnungsmodell entwickelt, mit dem die Auswertung der Bilddaten unterstützt wird.

Der Betrieb von Fernwärmenetzen erfordert eine ständige Kontrolle des Leitungszustandes zur Erhaltung der Leitungsnetze. Diese bestehen meist aus erdverlegten Rohrsystemen und sind damit einer regelmäßigen optischen Kontrolle entzogen. Bisher konnten nur punktuelle und systembezogene Aussagen zum Zustand der Rohrleitungssysteme gemacht werden. Die luftgestützte Thermal-Infrarot-Technologie (TIR) ermöglicht es, Strahlungsdichteunterschiede der Oberfläche darzustellen. Die Aufnahme von TIR-Bilddaten wird jedoch von vielen Parametern beeinflusst. Diese Parameter lassen sich in 2 Kategorien einteilen:

1. Parameter der Abbildungseigenschaften der Infrarot-Sensorik sowie der atmosphärischen Aufnahmebedingungen,
2. Parameter der Einbausituation des erdverlegten Fernwärmerohrsystems.



Dipl.-Ing. (FH) **Volker Herbst** (l.), Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e.V., und Dipl.-Ing. **Hans-Jörg Krickau**, Scandat GmbH, Berlin

Dieser komplexe technisch-wissenschaftliche Zusammenhang bedingt eine gesamtheitliche Betrachtung der verschiedenen Einflussparameter zur luftgestützten Thermal-Infrarot-Technologie. Zu dieser Thematik sind noch keine wissenschaftlich abgesicherten Aussagen verfügbar. Durch die Anwendung eines einfachen Berechnungsmodells, das die Oberflächentemperatur über der Fernwärmeleitung berechnet, soll ein Vergleich mit den ther-

mografisch ermittelten Messwerten erfolgen, um dem Anwender Informationen über den Zustand des Fernwärmenetzes zu geben. Ziel ist es, die Zusammenhänge zwischen Betriebs- und Einbauparametern (z.B. Verlegeart, Überdeckung, Mediumtemperatur), Witterungsbedingungen und der sich daraus ergebenden TIR-Bilddaten mit diesem Modell zu beschreiben. Zur Klassifizierung der Einflussparameter wurden parallel zur Modellentwicklung im Technikum des Fernwärme-Forschungsinstituts in Hannover e.V. (FFI) experimentelle Untersuchungen durchgeführt.

Technik und Methoden zur Bewertung der luftgestützten TIR-Bilddaten

Die luftgestützte Analyse von Fernwärmeleitungsnetzen ist technologisch gesehen eine Anpassung von Weltraum- und Fernerkundungstechnologie auf den erdnahen Einsatzbereich, da großflächig kommunale Ballungsgebiete gesamt und die erfassten Bilddaten thematisch dokumentiert (kartiert) werden (*Bild 1*). Für die Bestandsanalyse von Fernwärmeleitungen wird ein hochauflösender TIR-Sensor im Spektralbereich von 8 bis 14 μm eingesetzt. Zur Erfassung von Hot-

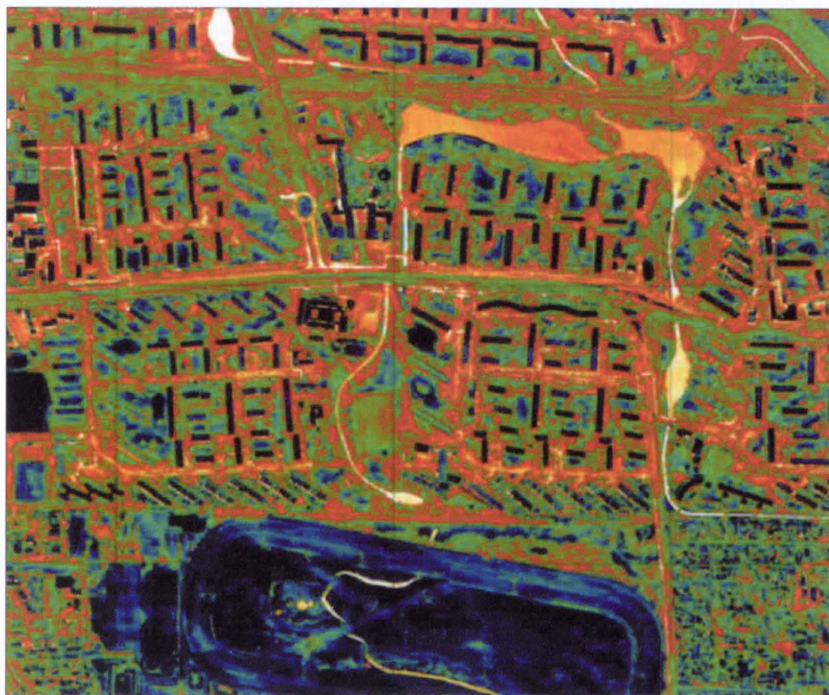


Bild 1. Luftgestützte Analyse von Fernwärmenetzen durch Thermografie: Ziel ist die Weiterentwicklung des Verfahrens von der reinen Erfassung von Leckgeschäden zu einer generischen Zustandsanalyse

Spots eignet sich auch der Bereich von 3 bis 5 μm . Zur Gewährleistung einer sehr guten Auflösung sollten Sensoren mit einer Bildpunktauflösung von mindestens 640 Pixel je Zeile eingesetzt werden.

Die IR-Bilddaten werden mit photogrammetrischen Methoden bearbeitet. Mit geeigneten Algorithmen erfolgt eine radiometrische und geometrische Korrektur der 2-dimensionalen Bilddaten. Diese werden lagekongruent als eigenständige Datenebene den topografischen Karten sowie dem Leitungsbestand angepasst.

Die Bewertung und Interpretation der Bilddokumentation erfolgt in Form einer Schadensklassifikation. Diese wird durch die Sichtung des thermodynamischen Verhaltens im Leitungsverlauf unter Berücksichtigung von Leitungsparametern nach 3 Klassen vorgenommen. Die Klassen sind durch den jeweiligen Schädigungsgrad (hoch, mittel, gering) charakterisiert. Die Bewertung dieser Signaturen erfolgt bisher subjektiv und auf Erfahrungen begründet. Eine EDV-gestützte Selektion nach einstellbaren Parametern soll künftig Auswertungen erleichtern und unterstützen.

Modellentwicklung

Durch Festlegung von Randbedingungen und unter Berücksichtigung der thermodynamischen Gesetze wurde ein vereinfachtes Berechnungsmodell entwickelt (Bild 2). Dieses Berechnungsmodell gilt zunächst nur für das zurzeit am häufigsten eingesetzte System der erdverlegten Kunststoffverbundmantelrohre (KMR). Durch Parametervariation wurde der Einfluss der Parameter auf die Erdoberflächentemperatur ermittelt und analysiert. Für die Entwicklung des Modells wurden folgende Randbedingungen festgelegt:

- Das Berechnungsmodell wurde für ein einzelnes im Erdreich verlegtes Kunststoffmantelrohr erstellt. Es wird davon ausgegangen, dass die Erdoberflächentemperatur aufgrund der höheren Mediumtemperatur im Wesentlichen durch die Vorlaufleitung bestimmt wird.
- Es wird der stationäre Zustand zugrunde gelegt, d.h. das System Rohr/Erdreich befindet sich im thermodynamischen Gleichgewicht.
- Der Wärmestrom vom Mediumrohr durch die Dämmschicht und

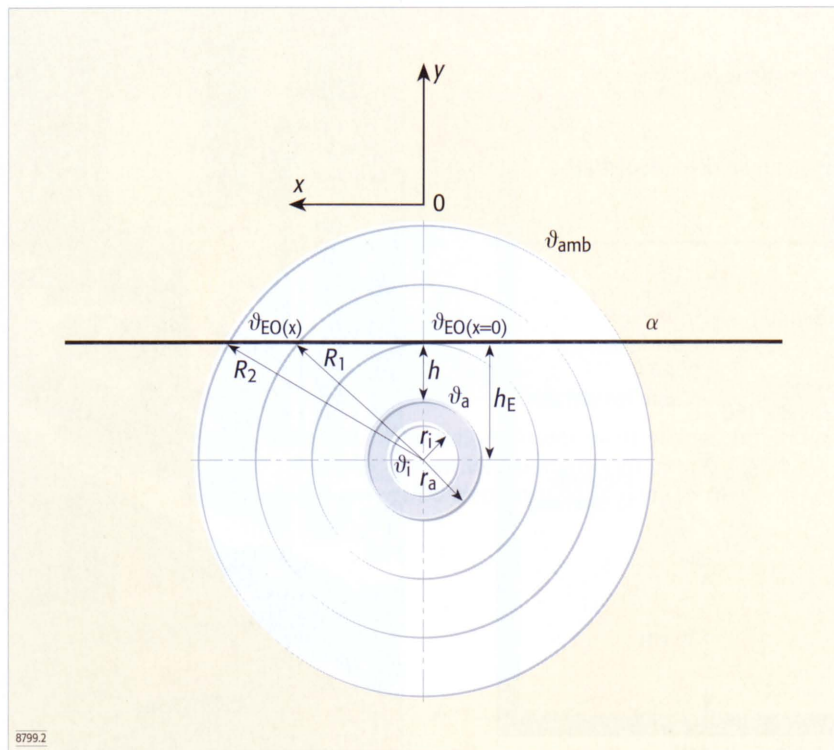


Bild 2. Gedämmtes Rohr im Erdreich mit den geometrischen und physikalischen Größen zur Berechnung der Erdoberflächentemperatur

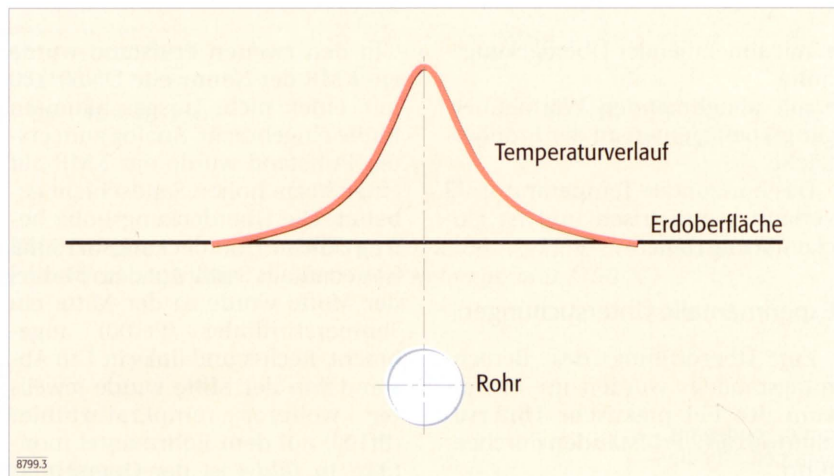


Bild 3. Quantitativer Verlauf des Temperaturprofils an der Erdoberfläche

das Erdreich bis zur Erdoberfläche ist konstant.

- Für das Berechnungsmodell werden die Gleichungen der Wärmeleitung und des Wärmedurchgangs für eine mehrschichtige Zylinderwand angesetzt und miteinander verknüpft.
- Der konvektive Wärmeübergang zwischen dem Wärmeträger Wasser und der Rohrwand wird vernachlässigt.
- Die Wärmeleitung durch das Mediumrohr sowie durch den PE-Mantel wird nicht berücksichtigt.

Für das Modell wurde eine Parametervariation durchgeführt, um den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Erdoberflächentemperatur zu ermitteln und zu analysieren.

Die Temperatur der Erdoberfläche steigt

- mit zunehmender Umgebungstemperatur,
- mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit der Dämmung,
- mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs,
- mit zunehmender Mediumtemperatur,

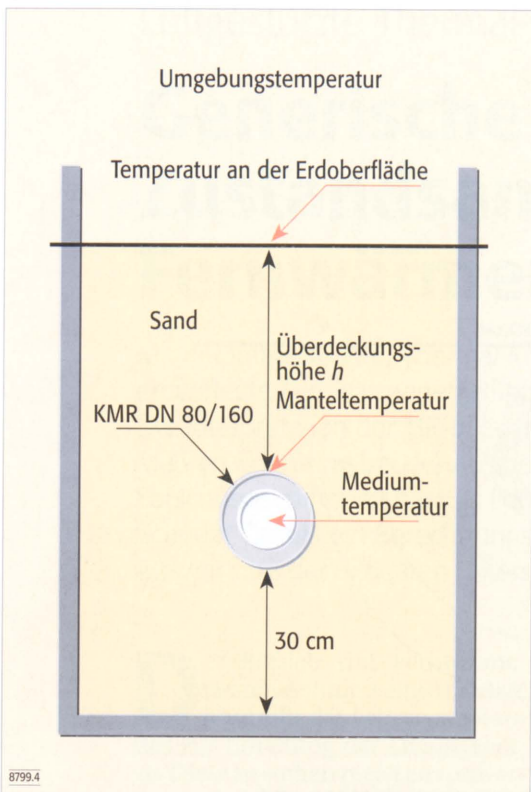


Bild 4. Querschnitt des Versuchsaufbaus im FFI

- mit abnehmender Überdeckungshöhe,
- mit abnehmenden Wärmeübergangskoeffizienten an der Erdoberfläche.

Das horizontale Temperaturprofil verläuft symmetrisch und ist glockenförmig (Bild 3).

Experimentelle Untersuchungen

Zur Überprüfung des Berechnungsmodells wurden im Technikum des FFI praktische Untersuchungen an 2 Prüfständen durchgeführt.

Im erste Prüfstand wurde ein intaktes KMR mit der Nennweite DN80/160 untersucht. Dieses war in einem 2 m breiten, 1,5 m tiefen und 5 m langen Erdkasten auf einer 30 cm hohen Sandschicht gebettet. Die Überdeckungshöhe betrug zu Versuchsbeginn 50 cm, Überdeckungsmaterial war Sand. Auf der Manteloberfläche wurden 3 Temperaturfühler (Pt100) angebracht – ein Temperaturfühler in der Mitte des Rohres, die anderen in 1 m Abstand rechts und links daneben. Die Erdoberflächentemperatur wurde mit einem Temperaturfühler (Pt100) in der Mitte des Erdkastens erfasst.



Bild 5. Wärmebildkamera auf dem Stativ

In den zweiten Prüfstand wurde ein KMR der Nennweite DN60/180 mit einer nicht ausgeschäumten Muffe eingebracht. Analog zum ersten Prüfstand wurde das KMR auf einer 30 cm hohen Sandschicht gebettet. Die Überdeckungshöhe betrug 50 cm, Überdeckungsmaterial war ebenfalls Sand. Auf dem Mantel der Muffe wurde in der Mitte ein Temperaturfühler (Pt100) angebracht. Rechts und links in 1 m Abstand von der Mitte wurde jeweils ein weiterer Temperaturfühler (Pt100) auf dem Rohrmantel montiert. In Bild 4 ist der Querschnitt des Versuchsaufbaus dargestellt.

An beiden Prüfständen wurde während der gesamten Versuchsdauer die Mediumtemperatur, die Manteltemperatur sowie die Umgebungstemperatur mit einem Messprogramm aufgezeichnet. Die Erdoberflächentemperatur wurde in bestimmten Zeitabständen thermografisch erfasst, um festzustellen, in welchem Zeitraum sich an der Erdoberfläche ein sichtbares Temperaturfeld einstellt.

Zur thermografischen Erfassung der Temperaturfelder an der Erdoberfläche wurden 2 Wärmebildkameras mit unterschiedlichen Messbereichen (Wellenlängen) einge-



Bild 6. Wärmebildkamera auf dem Kran

setzt. Eine Wärmebildkamera war auf einem »mobilen« Stativ installiert. Sie konnte seitlich an den beiden Versuchsständen hin- und hergefahren werden. Diese Kamera erfasste die absolute Oberflächen-temperatur in einem Wellenlängenbereich von 3 bis 5 μm (Bild 5). Die zweite Kamera wurde an einem rd. 5 m hohen mobilen Kran befestigt und erfasste die Temperaturfelder im Wellenlängenbereich von 8 bis 14 μm senkrecht über beiden Prüfständen (Bild 6).

Durch Variation der Mediumtemperatur, der Überdeckungshöhe, des Überdeckungsmaterials, durch das Aufbringen von Betonplatten auf die Sandüberdeckung sowie durch das Einbringen von Feuchtigkeit wurde der jeweilige Einfluss auf die Temperaturverläufe analysiert.

Folgende Start- und Randbedingungen wurden für die Versuchsdurchführung definiert:

- Überdeckungsmaterial: Sand,
- Umgebungstemperatur zu Versuchsbeginn: 12 °C (intaktes Rohr), 17 °C (nicht ausgeschäumte Muffe),
- Versuchsdurchführung in einem geschlossenen Innenraum (geringer Wärmeübergangskoeffizient, kein zusätzlicher Wärmeeintrag durch Sonneneinstrahlung).

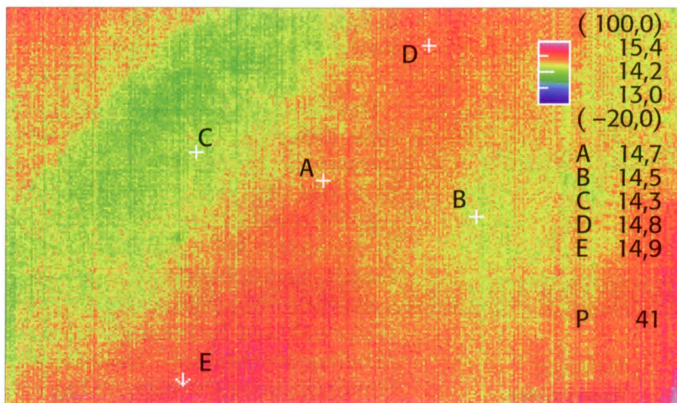


Bild 7. Temperaturfeld des intakten Kunststoffmantelrohrs bei einer Mediumtemperatur von 80 °C und einer Überdeckungshöhe von 0,5 m

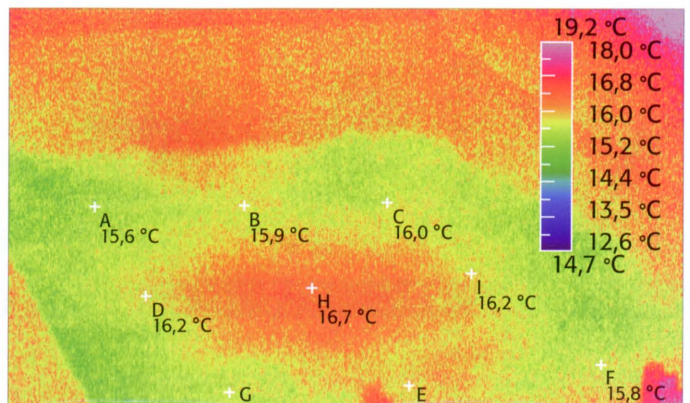


Bild 8. Temperaturfeld der nicht ausgeschäumten Muffe bei einer Mediumtemperatur von 100 °C und einer Überdeckungshöhe von 0,5 m

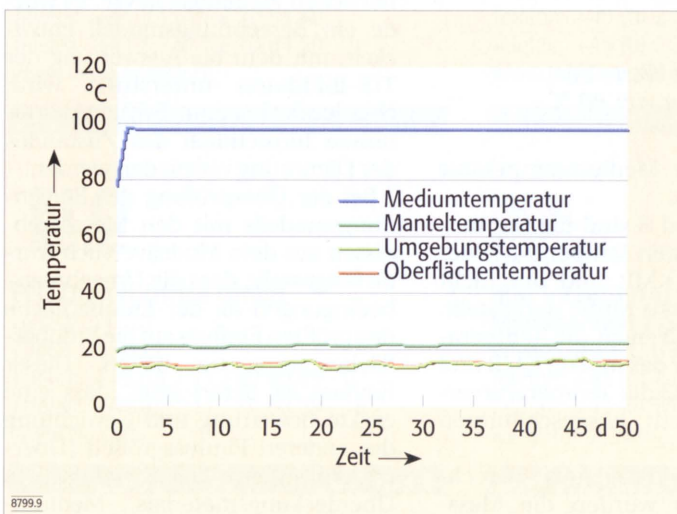


Bild 9. Temperaturverläufe des intakten KMR bei einer Mediumtemperatur von 100 °C und einer Überdeckungshöhe von 0,5 m

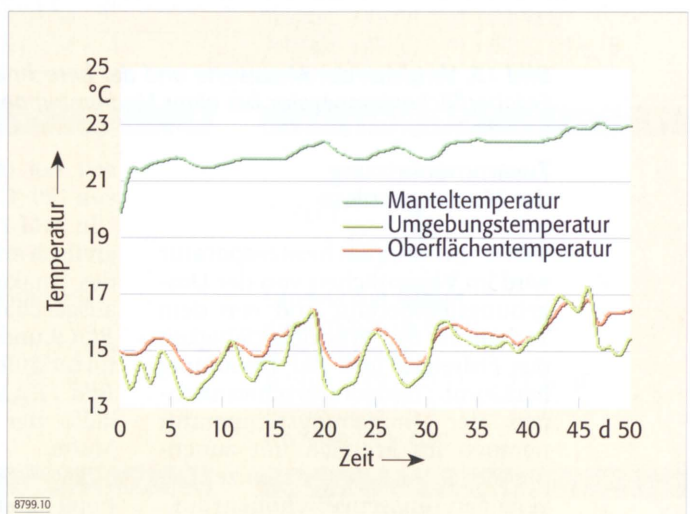


Bild 10. Temperaturverläufe des intakten KMR ohne Mediumtemperatur (100 °C)

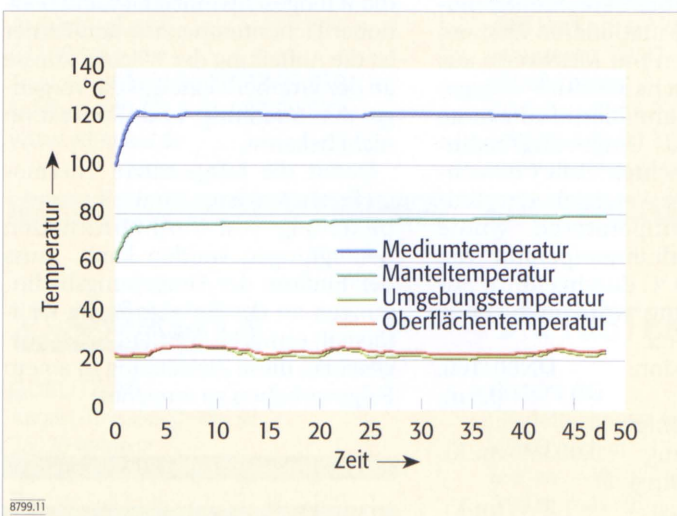


Bild 11. Temperaturverläufe der nicht ausgeschäumten Muffe bei einer Mediumtemperatur von 120 °C und einer Überdeckungshöhe von 0,65 m

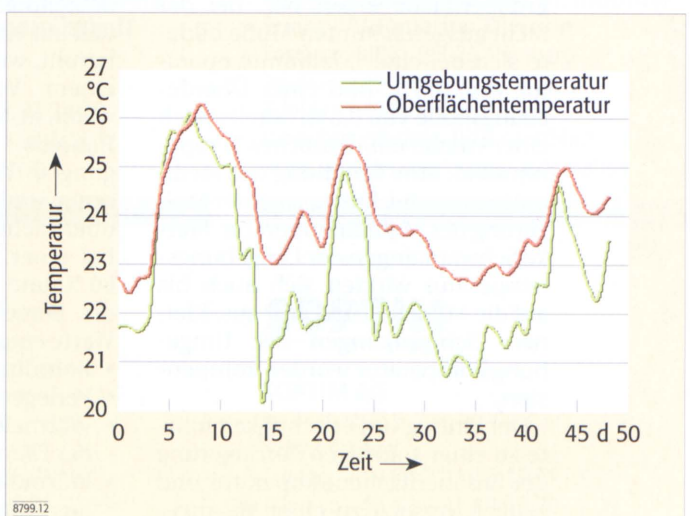


Bild 12. Temperaturverläufe der nicht ausgeschäumten Muffe bei einer Überdeckungshöhe von 0,65 m ohne Mediumtemperatur (120 °C)

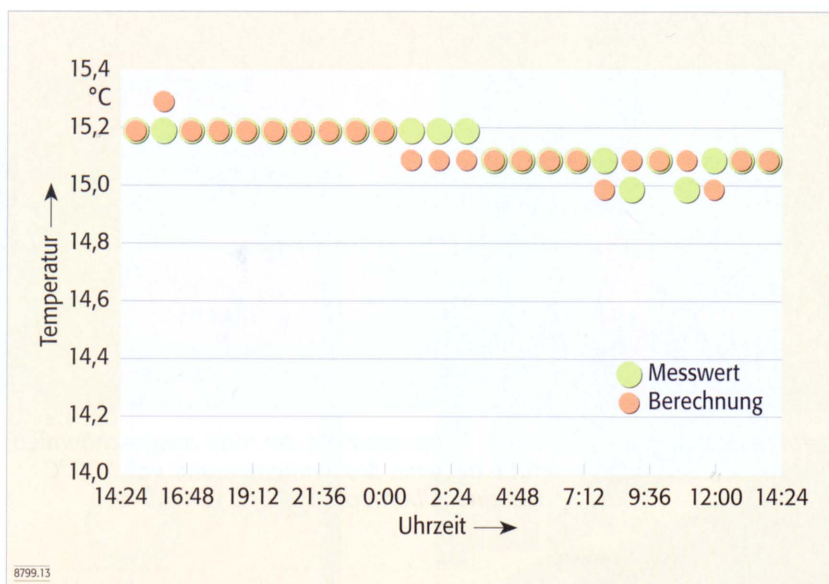


Bild 13. Vergleich der Messwerte und der berechneten Werte der Erdoberflächentemperatur bei einer Mediumtemperatur von 80 °C

Zusammenfassung der Messergebnisse

Die Erdoberflächentemperatur wird im Wesentlichen von der Umgebungstemperatur und von dem Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs und der Dämmung bestimmt. Temperaturschwankungen der Umgebungstemperatur nehmen im Erdreich mit zunehmender Tiefe ab und treten zeitlich verzögert (phasenverschoben) auf.

Bei dem intakten KMR war erst nach rd. 3 Wochen bei einer Mediumtemperatur von 80 °C und einer Überdeckungshöhe von 0,5 m ein deutliches Temperaturfeld an der Erdoberfläche erkennbar. Bei der nicht ausgeschäumten Muffe bildete sich bei einer Mediumtemperatur von 100 °C und einer Überdeckungshöhe von 0,5 m bereits nach einer Woche ein deutliches Temperaturfeld. Eine Erhöhung der Mediumtemperatur führte zu einer Steigerung der Manteltemperatur. Starke Schwankungen der Umgebungstemperatur wirkten sich auch bis auf die Manteltemperatur aus. Kleinere Schwankungen der Umgebungstemperatur wurden kompensiert.

Der Eintrag von Feuchtigkeit führte zu einer sofortigen Verringerung der Erdoberflächentemperatur und zeitlich versetzt zu einer Verringerung der Manteltemperatur. Eine permanente Differenz zwischen Erdoberflächentemperatur und Umgebungstemperatur stellte sich

erst bei einer Mediumtemperatur von 120 °C ein.

In Bild 7 und 8 sind die thermografisch erfassten Temperaturfelder des intakten KMR und der nicht ausgeschäumten Muffe dargestellt. Bild 9 und 10 zeigen die Temperaturverläufe für das intakte KMR und Bild 11 und 12 die Temperaturverläufe der nicht ausgeschäumten Muffe.

Zur Überprüfung des Berechnungsmodells wurden die Messwerte der Mediumtemperatur und der Umgebungstemperatur in das Programm eingegeben und für jeden Wert die Erdoberflächentemperatur über dem Rohrscheitel ($x = 0$) berechnet. Da das Berechnungsmodell auf einem stationären Zustand beruht, wurden nur Messwerte aus einem Versuchszeitraum ausgewählt, in dem annähernd konstante Betriebs- und Umgebungsbedingungen herrschten. Die Berechnung und der Vergleich der Erdoberflächentemperaturen wurde bei einer Mediumtemperatur von 80 °C und 100 °C durchgeführt. Für die Berechnung wurden folgende Werte eingesetzt:

- Rohrdimension: DN80/160,
- Verlegetiefe: 0,5 m,
- Wärmeleitfähigkeit der Dämmung: 0,033 W/(m·K),
- Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs: 1,2 W/(m·K),
- Wärmeübergangskoeffizient an der Erdoberfläche: 10 W/(m²·K).

In Bild 12 sind die Messwerte und die berechneten Werte dargestellt.

Zusammenfassung und weitere Vorgehensweise

Das Forschungsvorhaben »Generische Zustandanalyse von Fernwärmenetzen« wurde zwischen dem 1. Mai 2004 und dem 31. Januar 2006 vom Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e.V. und der Scandat GmbH, Berlin, bearbeitete und vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungseinrichtungen »Otto von Guericke« finanzierte (AiF-Forschungsvorhaben 14014N). Ziel war die Weiterentwicklung der luftgestützte Thermografie von der reinen Erfassung von Leckagen zu einer generischen Zustandsanalyse. Es wurde ein Berechnungsmodell entwickelt, mit dem die Auswertung der TIR-Bilddaten unterstützt wird. Hierdurch können Fehlinterpretationen hinsichtlich des Zustandes der Dämmung vermieden werden.

Bei der Überprüfung des Berechnungsmodells mit den Messergebnissen aus dem Modellversuch wurde festgestellt, dass die Umgebungsbedingungen an der Erdoberfläche den größten Einfluss auf die Erdoberflächentemperatur haben. Dieser Einfluss ist derart groß, dass eine exakte Bewertung und Gewichtung der anderen Einflussgrößen (Überdeckungshöhe, Eigenschaften des Überdeckungsmaterials, Mediumtemperatur) nicht quantitativ hinreichend belegbar sind, da zudem zwischen den Einflussparametern eine Wechselwirkung besteht. Insbesondere ist ungeklärt, welchen Einfluss die Windgeschwindigkeit auf die Erdoberflächentemperatur hat. Ferner ist die Aufteilung der Wärmeverluste an der Erdoberfläche auf die Vorgänge der Strahlung und Konvektion nicht bekannt.

Damit die luftgestützte Thermografie als Verfahren für die Zustandsbewertung von Fernwärmenetzen herangezogen werden kann, muss der Einfluss der Umgebungsbedingungen an der Erdoberfläche realitätsnah ermittelt werden. Es ist vorgesehen, diese Zielsetzung in einem Folgevorhaben zu erreichen. ■

herbst@fernwaerme.de

info@scandat.de

www.fernwaerme.de

www.scandat.de