



Mit unbemannten Luftfahrzeugen lassen sich Thermalbilder erstellen, die zum Erkennen von Leckagen an Fernwärmernetzen dienen

## Thermographie für Fern- und Nahwärmernetze mit unbemannten Luftfahrzeugen

Das im Folgenden beschriebene Projekt hat das Ziel, Leckagen in Fern- und Nahwärmernetzen aus Thermalbildern zu erkennen, die mit unbemannten Luftfahrzeugen (UAV) erstellt wurden. Die Auswertung liefert geometrisch genaue Daten und ist hinsichtlich möglicher Fehlalarme optimiert. Ein standardisiertes Monitoringkonzept der UAV-basierten Thermographie für Fernwärmernetze wird zur Praxiseinführung angeboten.

In dem Vorgängerprojekt „Drohnen-gestützte Thermographie als Basis der Asset- und Instandhaltungsstrategie von Fern- und Nahwärmernetzen“ (IGF-Vorhaben-Nr. 19768 N) wurde ein drohnengestütztes Messsystem zur automatischen Thermalkartierung von Wärmeversorgungsgebieten entwickelt und erfolgreich eingesetzt [1;2]. Darauf aufbauend haben die beiden beteiligten Forschungseinrichtungen, das Institut für Photogrammetrie

und Geoinformation der Leibniz Universität Hannover (IPI) und das Fernwärme-Forschungsinstitut (FFI), in dem weiterführenden Projekt (IGF-Vorhaben-Nr. 22118 N) die Auswertungsmethoden verbessert, um geometrisch hochgenaue Thermalorthophotos abzuleiten und die Hotspots in den Orthophotos zuverlässig zu erkennen. Die mit unbemannten Luftfahrzeugen (Unmanned Aerial Vehicle; UAV) durchgeführten Thermalbefliegungen

dienen dazu, die Auswertungsmethode zu validieren. Anschließend wurde ein standardisiertes Monitoringkonzept für die UAV-basierte Thermalbefliegung entwickelt.

### Geometrisch hochgenaue Ableitung von Thermalorthophotos

Die UAV-gestützte Thermografie ermöglicht eine schnelle Reaktion bei der Erkennung und Lokalisierung

lung thermischer Anomalien. Allerdings sind Auflösung und Lagegenauigkeit der Bilder aufgrund der verwendeten relativ kostengünstigen Plattform und Sensorik begrenzt. Zur Steigerung der Lagegenauigkeit der abgeleiteten Orthophotos untereinander und relativ zu Daten eines geografischen Informationssystems (GIS) ist eine gemeinsame Auswertung der optischen und der Thermaldaten notwendig [3]. Dafür wurde zunächst die Systemkalibrierung einschließlich zeitlicher Synchronisation der Aufnahmesensoren durchgeführt. Im Vergleich zur Kalibrierung einer optischen Kamera ist die Herstellung einer Zieltafel für eine Infrarotkamera mit hohem Wärmekontrast erforderlich. Um thermische Infrarotbilder (TIR-Bilder) mit hohem thermischem Kontrast zu er-

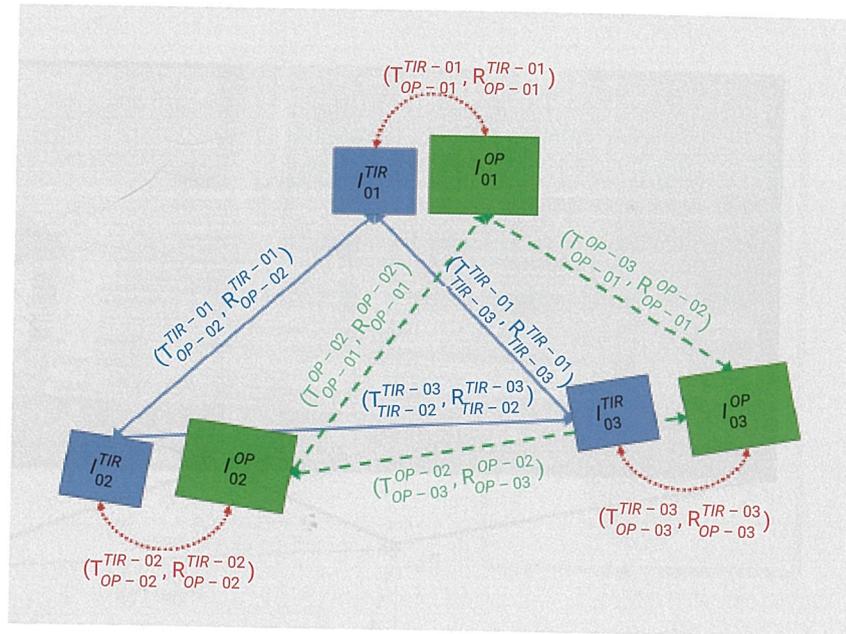


Bild 1. Festlegung von Verknüpfungspunkten: blaue Blöcke stellen TIR-Bilder dar; grüne Blöcke optische Bilder; rote Linien sind multimodale Beziehungen; grüne und blaue Linien sind Beziehungen zwischen einzelnen Modalitäten; die Beziehungen bestehen aus relativer Rotation (R) und Translation (T) (unterer Index: Quelle, oberer Index: Ziel)

Anzeige

**FLEXSTAR**  
BE FLEXIBLE. BE A STAR.

## PRAKTISCH UND UNKOMPLIZIERT

Das neuartige FLEXSTAR Niedertemperatursystem von BRUGG Pipes ist ein vorgedämmtes Rohrsystem mit höchster Flexibilität und Stabilität für Wärmepumpen (mit patentiertem Produktionsverfahren).



Jetzt konfigurieren!

[bruggpipes.com](http://bruggpipes.com)

**BRUGG**  
Pipes

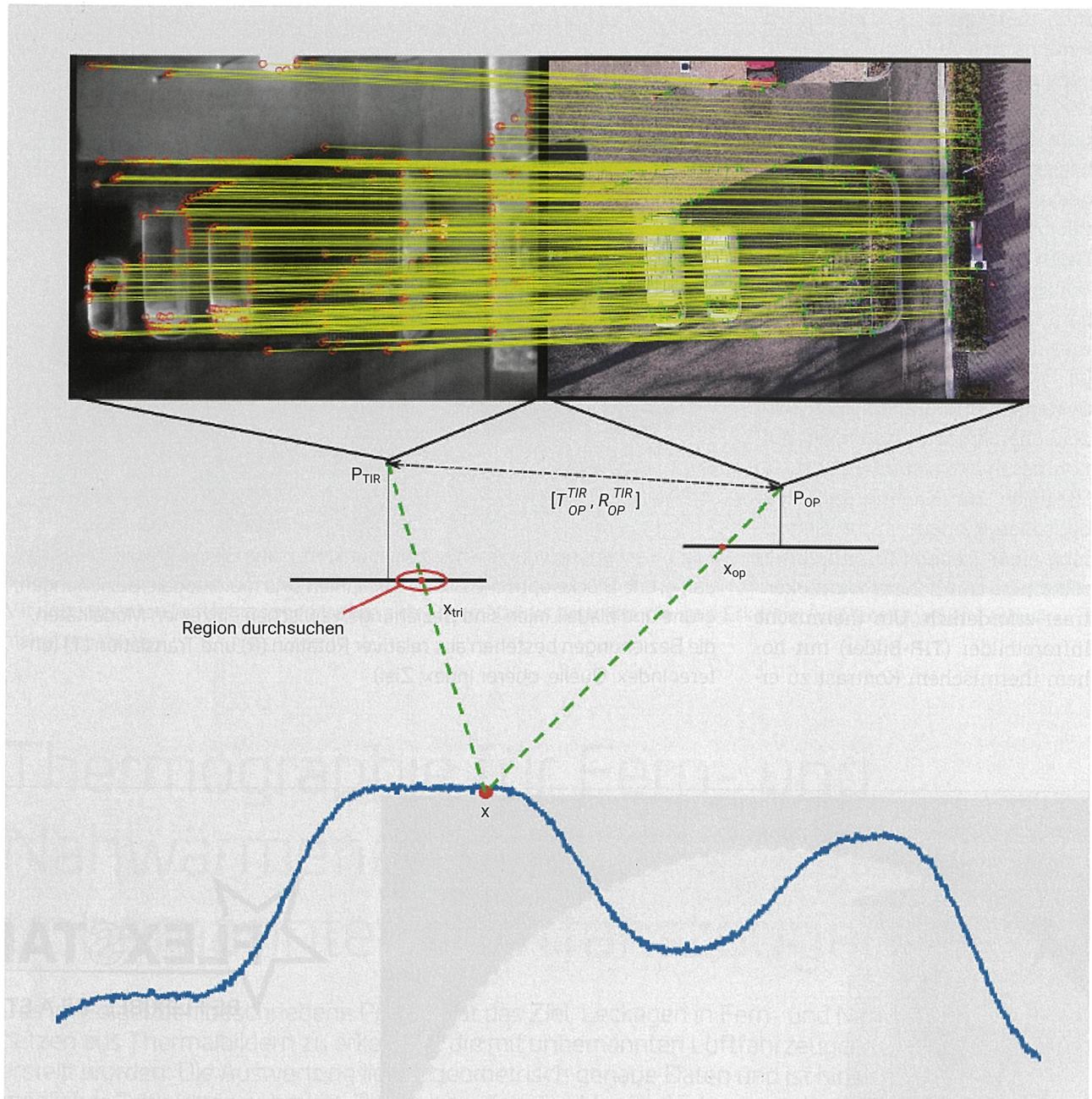


Bild 2. Multimodale Bildzuordnung: linkes Bild – TIR, rechtes Bild – optisch; P – Projektionszentrum; x – Verknüpfungspunkt im Bildraum; X – 3D-Punkt im Objektraum; blaue Linie: 3D-Szene;  $[T_{OP}^{TIR}, R_{OP}^{TIR}]$ : aus Stereokalibrierung abgeleitete Translation und Rotation

zeugen, wurde eine Aluminiumplatte mit schwarzen Quadraten hergestellt. Die Platte blieb während des gesamten Kalibrierungsverfahrens unbewegt und nach oben gedreht, damit das kalte Abbild des Himmels auf dem Metallteil der Platte aufgezeichnet werden konnte.

Nach Kalibrierung und Bildflug wurde die simultane photogrammetrische Ausgleichung mit multi-

modaler Bildzuordnung durchgeführt. Eine Voraussetzung dazu sind Verknüpfungspunkte (tie points), d. h. Korrespondenzen von Positionen innerhalb der Überlappungsbereiche benachbarter Bilder. Ziel des multimodalen Tie-Point-Matching ist die Berechnung von Punktkorrespondenzen zwischen einem optischen und einem TIR-Bild (Bild 1). Mit der Phasenkon-

gruenz (PK) wird der multimodale Abgleich im Frequenzbereich durchgeführt. Damit ist es möglich, die äußere Orientierung von optischen und TIR-Bildern im selben Datum mit der gemeinsamen Bündelausgleichung (Joint Bundle Adjustment; JBA) zu schätzen [4]. Dadurch wurden die TIR- und optischen Bilder in einem einzigen Block zusammengeführt, der eine

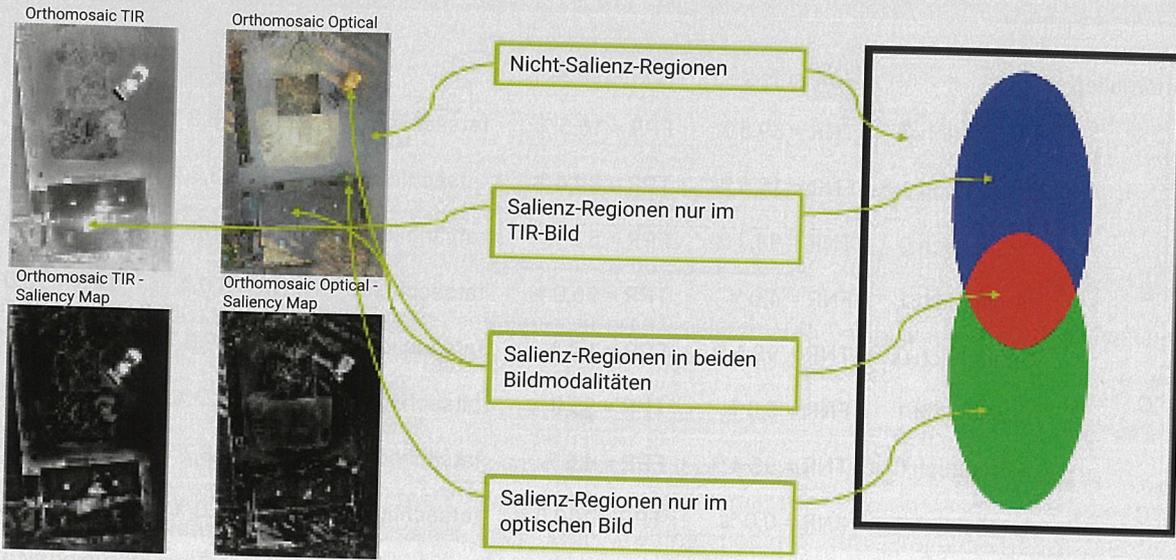


Bild 3. Illustration der Arbeitshypothese zur Detektion thermaler Anomalien

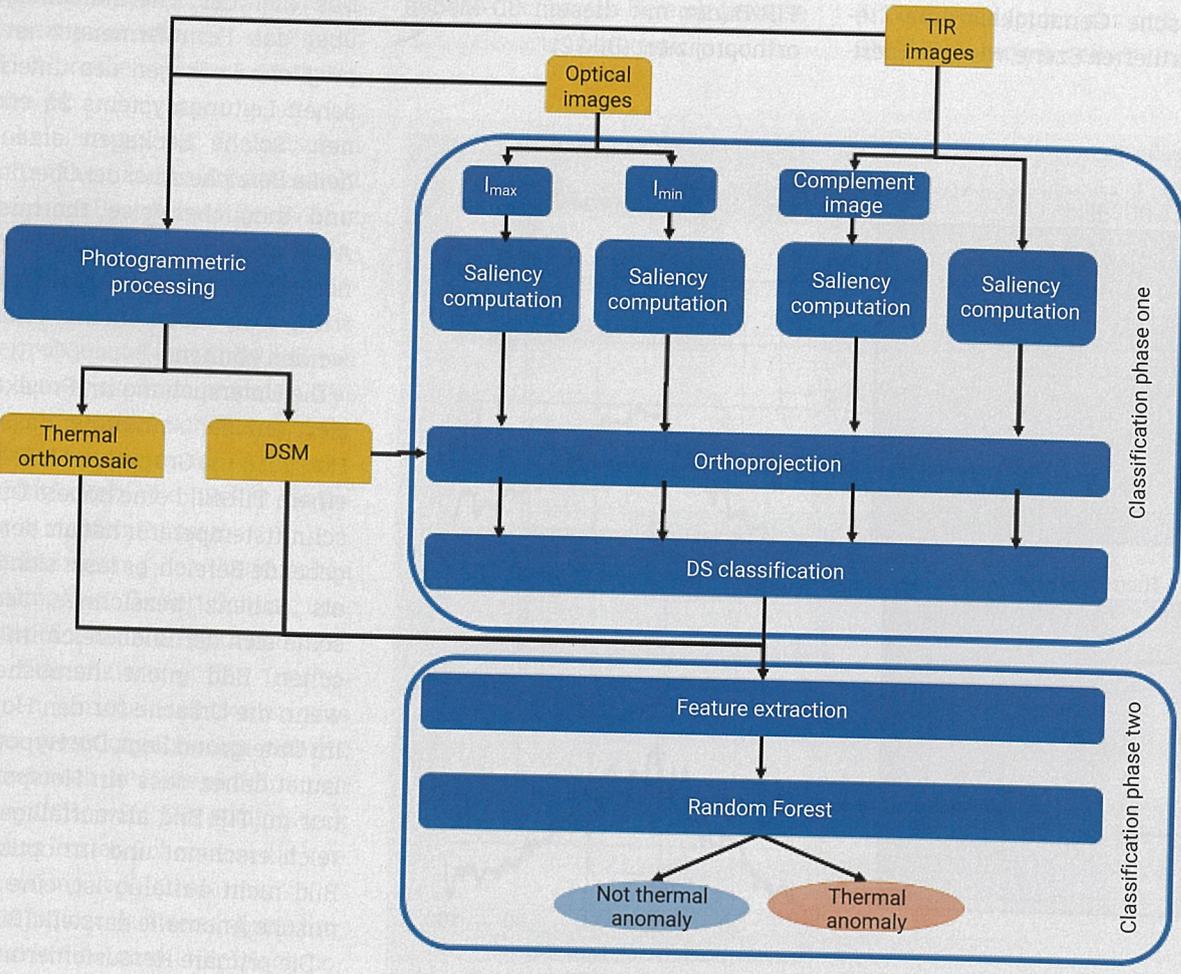


Bild 4. Methodenübersicht zur Detektion thermaler Anomalien

Schwellwert für Anomalien	Experiment #1			Experiment #2		
		Vorhersage 0	Vorhersage 1		Vorhersage 0	Vorhersage 1
$t_{\text{diff-min}} > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$	tatsächlich 0	TNR = 89,5 %	FPR = 10,5 %	tatsächlich 0	TNR = 88,3 %	FPR = 11,7 %
	tatsächlich 1	FNR = 15,6 %	TPR = 84,4 %	tatsächlich 1	FNR = 13,3 %	TPR = 86,7 %
$t_{\text{diff-min}} > 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	tatsächlich 0	TNR = 94,7 %	FPR = 5,3 %	tatsächlich 0	TNR = 96,5 %	FPR = 3,5 %
	tatsächlich 1	FNR = 4,0 %	TPR = 96,0 %	tatsächlich 1	FNR = 8,0 %	TPR = 92,0 %
$t_{\text{diff-min}} > 1,0 \text{ } ^\circ\text{C}$	tatsächlich 0	TNR = 98,6 %	FPR = 1,4 %	tatsächlich 0	TNR = 99,0 %	FPR = 1,0 %
	tatsächlich 1	FNR = 5,0 %	TPR = 95,0 %	tatsächlich 1	FNR = 5,0 %	TPR = 95,0 %
$t_{\text{diff-min}} > 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	tatsächlich 0	TNR = 95,4 %	FPR = 4,6 %	tatsächlich 0	TNR = 98,7 %	FPR = 1,3 %
	tatsächlich 1	FNR = 0,0 %	TPR = 100,0 %	tatsächlich 1	FNR = 0,0 %	TPR = 100,0 %

Tafel 1. Klassifikation thermischer Anomalien, Ergebnisse nach fünffacher Kreuzvalidierung in Prozent

umfassende Analyse der beobachteten Szene ermöglicht. Dieses Verfahren verbessert auch die geometrische Genauigkeit einer rekonstruierten Szene, wie im experi-

mentellen Teil gezeigt wird [5]. Im Anschluss an JBA wird ein 3D-Modell erstellt, danach werden die TIR-Bilder mit diesem 3D-Modell orthoprojiziert (Bild 2).

### Zuverlässige Detektion von Hotspots

Das Ziel der Thermalbefliegung über das Fernwärmenetz ist es, mögliche Leckagen des unterirdischen Leitungssystems zu erkennen. Solche Leckagen erzeugen heiße Bereiche unter der Oberfläche und möglicherweise thermische Anomalien an der Oberfläche, die normalerweise im sichtbaren Spektrum von oben nicht erkannt werden können.

Die Untersuchung im Projekt basiert auf der Annahme, dass ein Hotspot (eine Gruppe von Pixeln) in einem TIR-Bild eine höhere Durchschnittstemperatur hat als der umgebende Bereich; es lässt sich auch als „Salienz“ bezeichnen. Jedoch sollte sich der Bildbereich im optischen Bild nicht herausheben, wenn die Ursache für den Hotspot im Untergrund liegt. Die Hypothese lautet daher, dass ein Hotspot, der nur im TIR-Bild als auffälliger Bereich erscheint und im optischen Bild nicht auffällig ist, eine thermische Anomalie darstellt (Bild 3).

Die primäre Herausforderung besteht darin, die Anzahl der Fehlalarme bei der Erkennung von thermi-

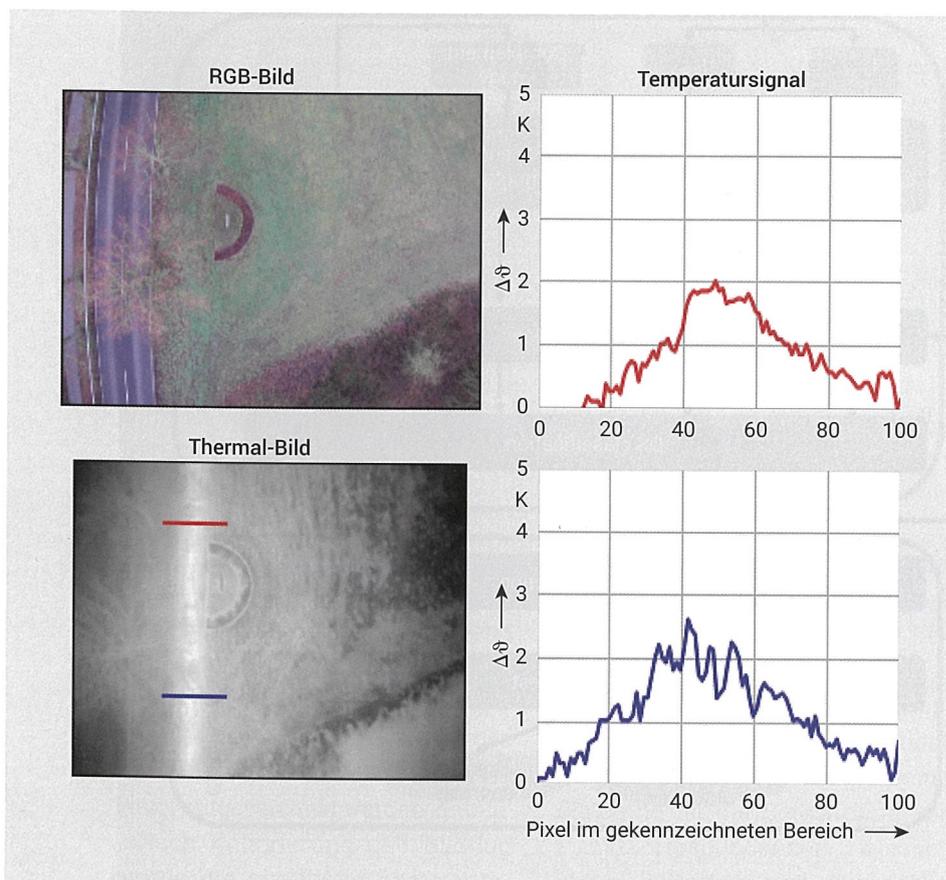


Bild 5. Gemessene Temperatursignaturen vom Trassenausschnitt

Befliegungen	Rohrsystem, Dimension/ Verlegtiefe [m]	Vorlauf-/Rücklauf-temperatur [°C]	Umgebungs-temperatur [°C]	Temperatur-differenz zur Umgebung [K]
Gifhornerstraße, 1. Mal	AZ, DN 200 / 0,8~1	95/55	8,6 ~ 9,3	1,8 ~ 2,5
Gifhornerstraße, 2. Mal	AZ, DN 200 / 0,8~1	95/55	6,0 ~ 6,2	1,2 ~ 2,9
Hafenstraße, rechts	KMR, DN 200/ 0,8~1	95/55	-0,5 ~ 0,0	0,8 ~ 2,1
Hafenstraße, links	KMR, DN 200/ 0,8~1	95/55	-0,4 ~ -0,3	0,8 ~ 1,6

Tafel 2. Zusammenfassung der gemessenen Temperaturdifferenzen durch Thermalbefliegungen (AZ Asbestzement als Ummantelung; KMR Kunststoffmantelrohr)

chen Anomalien zu reduzieren. Das Vorhandensein einer Vielzahl von warmen Objekten in unmittelbarer Nähe einer Fernwärmetrasse, z.B. Schächte, Straßenlaternen und Autos, ist die Hauptursache für die hohe Anzahl von Fehlalarmen.

Nach der photogrammetrischen Erarbeitung der aufgenommenen IR-Bilder wurde eine zweistufige Auswertungsmethode entwickelt (Bild 4), um die Fehlalarme zu reduzieren [5]:

**Lokalisierung der thermischen Anomalien:** Dieser Schritt besteht aus einer Berechnung der Salienz (Auffälligkeit) und einer pixelbasierten Klassifizierung. Die Salienzkarten werden aus den Bildern abgeleitet und anschließend in den Objektraum projiziert. Das Ergebnis dieses Schritts sind Regionen mit thermischen Unregelmäßigkeiten, die weiter untersucht werden müssen.

**Klassifizierung der thermischen Anomalien:** Dieser Schritt umfasst eine binäre, regionenbasierte Klassifizierung der thermischen Unregelmäßigkeiten aus dem vorangegangenen Schritt, wobei auch die Höheninformation verwendet wird. Der Hauptzweck dieses letzten Schritts ist die Verringerung von Fehlalarmen.

Durch diese Auswertungsmethode wurde die Anzahl der falsch-positiven Erkennungen der TIR-Bilder reduziert; sie hat sich als notwendig

und effizient erwiesen. Die Ergebnisse der Untersuchungen (Tafel 1) zeigen, dass eine Gesamtgenauigkeit von 98,7 % und eine Wiedererkennungsrate für thermische Anomalien von bis zu 100 % erreicht werden kann, wenn die maximale Temperaturdifferenz der verdächtigen thermischen Anomalie zu einem benachbarten Bereich gewisse Schwellwerte übersteigt.

### Thermalbefliegung

Im Projektzeitraum wurden insgesamt vier Thermalbefliegungen über zwei ausgewählte Fernwärmetrassenabschnitte durchgeführt. Die Bilddaten wurden mit einem DJI M200 UAV erfasst, einem senkrecht startenden und landenden (VTOL) Quadcopter, der mit einem GNSS-Empfänger, einer Inertial-

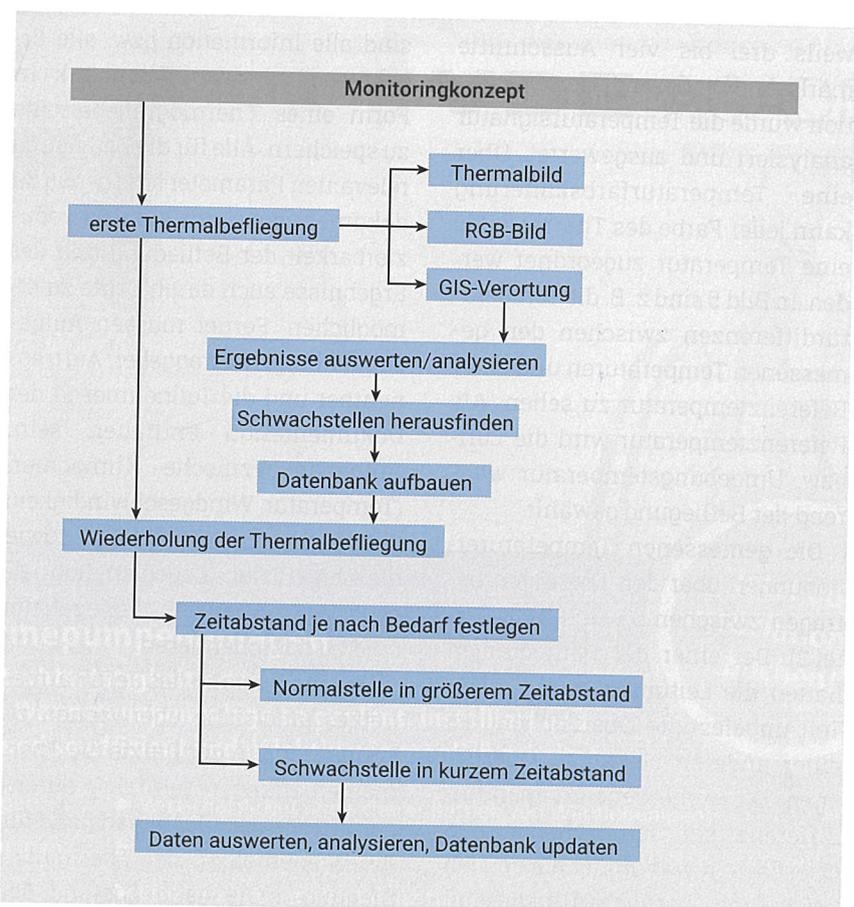


Bild 6. Monitoringkonzept der UAV-gestützten Thermalbefliegung

messeinheit (IMU) und einem Barometer ausgestattet ist. Als Kamerasystem kam das XT2 DJI Zenmuse zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein kardanisch stabilisiertes Kamerasystem, das eine Dual-Sensor-Konstruktion aus einer Thermalkamera von Flir und einer optischen CMOS-Kamera fest miteinander verbindet. Die Thermalbefliegung wurde in der DJI-Pilot-App vorab mit Einstellung verschiedener Parameter geplant und automatisiert durchgeführt. Bei der Programmierung sind vor allem Akkulaufzeit, Sichtweite, Flughöhe, Fluggeschwindigkeit, Fluglinie und Überdeckungsgrad zu beachten.

Die Auswertung findet simultan mit den optischen Bildern (RGB-Bilder) und den Thermalinfrarotbildern statt, die bei der Befliegung gleichzeitig aufgenommen wurden. Die einzelnen Bilder wurden mit der Software photogrammetrisch zu einem Orthomosaik konvertiert. Auf dem Thermalbild wurden jeweils drei bis vier Ausschnitte markiert. Von der markierten Position wurde die Temperatursignatur analysiert und ausgewertet. Über eine Temperaturfarbskalierung kann jeder Farbe des Thermalbilds eine Temperatur zugeordnet werden. In Bild 5 sind z. B. die Temperaturdifferenzen zwischen den gemessenen Temperaturen und einer Referenztemperatur zu sehen. Als Referenztemperatur wird die Luft- bzw. Umgebungstemperatur während der Befliegung gewählt.

Die gemessenen Temperaturerhöhungen über den Leitungen betragen zwischen 0,8 und 2,9 K (Tafel 2). Bei einer der Befliegungen hatten die Leitungen zum großen Teil unbefestigte Oberflächen, bei einer anderen befestigte Oberflächen. Die gemessene Temperaturdifferenz bei den unbefestigten Oberflächen war größer als bei den befestigten Oberflächen. Insgesamt folgt daraus, dass im Rahmen der

Befliegungen keine Thermalanomalien festgestellt wurden, die auf Beschädigungen oder Schwachstellen in den Trassenabschnitten hinweisen.

### Praxiseinführung/Monitoringkonzept

Für die Praxiseinführung wurde am FFI in diesem Projekt die drohnengestützte Thermalbefliegung als ein eigenständiges Geschäftsmodell optimiert und erweitert. Der Geschäftsablauf besteht aus drei Schritten:

- Vorbereitung und Planung der drohnengestützten Thermalbefliegung,
- Durchführung der drohnengestützten Thermalbefliegung,
- Bearbeitung und Bewertung der drohnengestützten Thermalbefliegung.

Die detaillierten Beschreibungen der Abläufe sind in [6] zu finden. Nach der ersten Thermalbefliegung sind alle Information bzw. alle Ergebnisse in einer Datenbank in Form eines Thermografieberichts zu speichern. Alle für die Befliegung relevanten Parameter sind genau zu dokumentieren, um eine Reproduzierbarkeit der Befliegung und der Ergebnisse auch durch Dritte zu ermöglichen. Ferner müssen Aufgabenstellung, Auftraggeber, Auftragnehmer und die Teilnehmer in der Dokumentation enthalten sein. Aufgabenspezifische Klimadaten (Temperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte, Luftdruck usw.) sowie die Objektdaten (Lageplan, Rohrleitungstyp, Dimension, Verlegetiefe) sind zu dokumentieren.

Um den Zustand des Fernwärmenetzes langfristig überwachen zu können, soll in der Praxis die Thermalbefliegung regelmäßig durchgeführt werden. Der Zeitabstand für die Wiederholung der Thermalbefliegung ist je nach Zustand der Rohrleitung zu wählen. Über die

gesamte Strecke kann die Thermalbefliegung z. B. in einem großen Zeitabstand von fünf Jahren wiederholt werden. Für gefundene Schwachstellen wird empfohlen, die Thermalbefliegung jedes Jahr unter möglichst gleichen Bedingungen durchzuführen, um mögliche Leckagen frühzeitig zu entdecken.

Besonders ist zu beachten, dass die Wiederholung der Thermalbefliegung möglichst bei gleichen Witterungsbedingungen durchzuführen ist, damit die Messergebnisse besser vergleichbar sind. Der Ablauf des gesamten Monitoringkonzepts der Thermalbefliegung ist in Bild 6 dargestellt.

### Fazit und Ausblick

Durch die vorgeschlagenen Bearbeitungsmethoden können geometrisch hochgenaue Thermalorthophotos abgeleitet werden. Hotspots bzw. relevante thermische Anomalien werden aus der Vielzahl der Verdachtsfälle mit deutlich verbesserter Genauigkeit und Zuverlässigkeit ermittelt. Die Ergebnisse der bisher durchgeführten Thermalbefliegungen dienen als Basis zur ersten Einschätzung der weiteren Vorgehensweise für Sanierung und Umbauten des vorhandenen Fern- und Nahwärmenetzes. Als Ausblick soll der im Geschäftsmodell beschriebene Ablauf sowie das Monitoringkonzept der Thermalbefliegung für Fernwärmenetze weiter durch Praxiserfahrung präzisiert werden, damit sich die erfolgreiche wirtschaftliche Integration der Thermalbefliegung darin widerspiegelt.

### Dank

Das Projekt „UAV-basierte Thermographie für die automatische Überwachung von Nah- und Fernwärmenetzen“ (IGF-Vorhaben: 22118 N)

wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Autoren bedanken sich herzlich für die finanzielle Unterstützung.

## Literatur

- [1] Heipke C.; Tödter J.: Drohnengestützte Thermographie als Basis der Asset- und Instandhaltungsstrategie von Fern- und Nahwärmenetzen. AiF-Projekt (Vorhaben-Nr. 19768 N), Abschlussbericht, 2020.
- [2] Sledz A.; Unger J.; Heipke C.: Thermal IR imaging: image quality and orthophoto generation. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., pp. XLII-1. 2018.
- [3] Sledz A.; Unger J.; Heipke C.: UAV-based thermal anomaly detection for distributed heating networks. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., pp. XLIII-B1-2020, 2020.
- [4] Kovasi P.: Image Features from Phase Congruency. Videre: Journal of Computer Vision Research 1(3), pp 1-26, 1999.
- [5] Sledz A.; Heipke C.: Joint bundle adjustment of thermal infra-red and optical images based on multimodal matching. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-B1-2022, 157-165, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2022-157-2022>
- [6] Yang F.; Heipke C.: UAV-basierte Thermographie für die automatische Überwachung von Nah- und Fernwärmenetzen. AiF-Projekt (Vorhaben-Nr. 22118 N), Abschlussbericht, 2023.

**Dr.-Ing. Fang Yang**  
Projektleiterin, Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e. V. (FFI), Hemmingen  
[yang@fernwaerme.de](mailto:yang@fernwaerme.de)



**Dipl.-Ing. Thomas Grage**  
Institutsleiter, Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e. V. (FFI), Hemmingen  
[grage@fernwaerme.de](mailto:grage@fernwaerme.de)  
[www.fernwaerme.de](http://www.fernwaerme.de)



**Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Heipke**  
Institut für Photogrammetrie und Geoinformation (IPI), Leibniz Universität Hannover, Hannover  
[heipke@ipi.uni-hannover.de](mailto:heipke@ipi.uni-hannover.de)  
[www.ipi.uni-hannover.de](http://www.ipi.uni-hannover.de)



Anzeige

**VDE ACADEMY**

Werba-Nr. 2310003

Jetzt auf  
[essociation.de](http://essociation.de)  
buchen!

Präsenz-Seminar

## Effizienter Betrieb von Wärmepumpenanlagen

Anhand von Beispielen aus seiner Gutachter Tätigkeit erläutert der Referent was sie unbedingt beachten sollten, damit die Wärmepumpenanlage so geplant, installiert und betrieben wird, dass sie störungsfrei und so effizient und effektiv wie möglich arbeitet.

Auswahlkriterien für Wärmepumpenanlagen

▶ Wirtschaftlicher und sicherer Betrieb von Wärmepumpen

Schwerpunkte der Planung von Wärmepumpen

▶ Normen und Richtlinien

▶ Effizienz anhand von Kennziffern

[www.essociation.de/event/S018741](http://www.essociation.de/event/S018741)

