

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19768 N

Thema

Drohnen-gestützte Thermografie als Basis der Asset- und Instandhaltungsstrategie von Fern- und Nahwärmenetzen

Berichtszeitraum

01.01.2018 - 30.06.2020

Forschungsvereinigung

Fernwärme

Forschungseinrichtung(en)

FE 1: Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e.V. - FFI

FE 2: Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation - IPI

Hemmingen, 31.07.2020

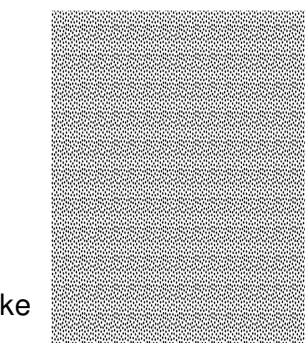
Dipl.-Ing. Jens Tödter

Hannover, 31.07.2020

Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)



1. Zusammenfassung	6
2. Wissenschaft-technische und wirtschaftliche Problemstellung	7
3. Wissenschaftlich-technischer Ansatz	9
3.1 Stand der Forschung und Entwicklung	9
3.2 Arbeitshypothese	12
4. Lösungsweg	13
4.1 Bearbeitungsschritte	13
4.2 Spezifikation eines drohnengestützten Erfassungssystems und Flugeinsatzplanung	14
4.3 Entwicklung einer automationsgestützten Auswertemethodik	14
4.4 Entwicklung einer thermalbildgestützten Instandhaltungsstrategie	15
4.5 Umsetzung und Anwendung des Messsystems und der Methodik unter realen Bedingungen	16
4.6 Entwicklung eines allgemeinen Leitfadens	16
5. Theoretische Grundlagen	17
5.1 Begriff Fernwärme und Nahwärme	17
5.2 Betriebsweisen	17
5.3 Wärmenetze	18
5.3.1 Verlegesysteme	19
5.3.1.1 Freileitung	19
5.3.1.2 Kanalverlegte Systeme	19
5.3.1.3 Kanalfreie Systeme	21
5.3.2 Systemkomponenten	26
5.3.2.1 Verbindungssysteme	26
5.3.2.2 Formstücke	27
5.3.2.3 Armaturen	31
5.3.2.4 Schachtbauwerke	32

5.3.2.5 Lager und Stützen	32
5.3.2.6 Dehnpolster	34
5.4 Berechnung von Wärmeverlusten	36
5.4.1 Theoretische Grundlagen	36
5.4.1.1 Wärmeverlustberechnung von Rohrpaaren als Freileitung	37
5.4.1.2 Wärmeverlustberechnung kanalverlegter Rohrpaare	42
5.4.1.3 Wärmeverlustberechnung von direkt erdverlegten Rohrpaaren	47
5.4.1.4 Wärmeverlustberechnung für direkt erdverlegte Doppelrohrsysteme	50
5.4.2 Theoretische Untersuchung der Einflussparameter auf den Wärmeverlust erdverlegter Rohrsysteme	52
5.4.2.1 Äußere Einflussparameter	54
5.4.2.2 Systembezogene Einflussparameter	56
5.4.2.3 Bewertung der Einflussparameter	59
5.5 Physikalische Grundlagen der Thermografie	60
6. Praktische Umsetzung und Durchführung der Bearbeitungsschritte	63
6.1 Technische Spezifikation des Messsystems	63
6.2 Identifizierung von Fluggebieten	65
6.3 Randbedingungen und Parameter	67
6.4 Visuelle Zustandserfassung der Trassenabschnitte in den Fluggebieten	68
6.5 Temperaturprofile erdverlegter Fernwärmetrassen	91
7. Entwicklung einer Auswertesoftware	103
7.1 Bildqualität und Signal-Rausch-Verhältnis der Thermalbilder	103
7.1.1 Messung der Bildqualität	104
7.1.2 Versuche und Ergebnisse	107
7.1.3 Fazit	112
7.2 Erkennung und Lokalisierung thermischer Anomalien in den Thermalbildern	112

7.2.1	Photogrammetrische Verarbeitung von Thermalbildern	113
7.2.2	Erkennung von Anomalien	115
7.2.3	Ergebnisse und Diskussion	119
7.2.4	Fazit	123
7.3	Multi-temporale Flüge	124
8.	Drohnengestützte Thermografie als Basis der Asset- und Instandsetzungsstrategie	127
8.1	Einsatz der drohnengestützten Thermografie unter Berücksichtigung der zukünftigen Entwicklung des Wärmebedarfs	132
8.2	Einfluss der Betriebsweise auf die Anwendung der drohnengestützten Thermografie	140
8.2.1	Netzgeneration und Auslegungstemperaturen	140
8.2.2	Temperaturfahrweisen	141
8.2.3	Simulation zur Abschätzung des Einflusses der Betriebsweise	141
9.	Leitfaden für den Einsatz der drohnengestützten Thermografie als Bestandteil der Instandhaltungsstrategie	149
9.1	Anwendungsbereich	149
9.2	Begriffe	150
9.3	Normative Verweise und Richtlinien	151
9.4	Messprinzip und Technologie	151
9.5	Anforderungen an das Messsystem	152
9.6	Thermografische Untersuchung	153
9.6.1	Allgemeines	153
9.6.2	Besonderheiten	153
9.6.3	Vorbereitung und Planung	154
9.6.4	Durchführung	156
9.6.5	Bearbeitung und Bewertung	159
9.6.6	Das Untersuchungsprotokoll	161

10. Veröffentlichungen zum Projekt	162
11. Literaturverzeichnis	163

1. Zusammenfassung

Für die Zustandserfassung von Wärmenetzen ist auf Basis eines Anforderungskataloges und dem Stand der Technik ein drohnengestütztes Messsystem mit Thermalsensor spezifiziert, erworben und eingesetzt worden. Das Messsystem verfügt über einen optischen und einen Infrarotsensor, zusammengefasst in einem Gehäuse mit einem 3-Achskreisel. Die optischen Bilder (RGB-Bilder) und die Infrarotbilder werden gemeinsam erfasst und mit Positionsinformationen aus dem integrierten GPS-Empfänger versehen. Dies vereinfacht die gemeinsame Auswertung, da beide Kameras zueinander konstant orientiert sind. Die Akkus sind redundant und beheizbar, was Befliegungen bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt erleichtert.

Mit dem drohnengestützten Messsystem sind verschiedene Gebiete mit unterschiedlichen Verlegesystemen, unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit über den Trassenabschnitten sowie Nahwärme- Fernwärmetrassenabschnitte befliegen worden. Die Netz- und Flugparameter sind in einem Flugprotokoll dokumentiert. Für die Auswertung werden aus den zentralperspektivischen Thermalbildern mit Hilfe photogrammetrischer Methoden automatisch Orthophotos erstellt und anschließend mit den GIS-Daten des Netzplans verknüpft. Das orthogonale Thermalbild stellt den thermischen Ist-Zustand des Trassenabschnitts dar. Durch Vergleich des Thermalbildes mit dem RGB-Bild sowie durch den dargestellten Leitungsverlauf können Thermalanomalien ohne Bezug zum Leitungsabschnitt als nicht relevant erkannt und eliminiert werden. Bei der Befliegung von erdverlegten Trassenabschnitten eines Nahwärmenetzes werden aufgrund der geringen Mediumtemperatur von unter 90 °C und den kleinen Durchmesser der Rohrsysteme keine Temperaturerhöhungen an der Erdoberfläche erfasst. Zu starker Bewuchs über erdverlegten Trassen verhindert die Erfassung von Temperaturerhöhung an der Erdoberfläche. Leckagen werden in keinem der befliegenen Trassenabschnitte festgestellt.

Zur Auswertung der Ergebnisse der durchgeführten drohnengestützten Thermalbefliegungen ist eine Bildanalysesoftware entwickelt worden, die eine Eliminierung von thermischen Anomalien, die keinen Bezug zum befliegenen Trassenabschnitt des Wärmenetzes aufweisen, automatisiert ermöglicht. Diese Software liefert gute Ergebnisse. Verbesserungsmöglichkeiten bestehen in der weiteren Reduktion von Fehlalarmen, sowohl durch verbesserte geometrische Verarbeitung, als auch durch eine weiter verfeinerte Bildanalyse.

Insgesamt hat sich ergeben, dass die drohnengestützte Thermografie als Inspektionsverfahren für die ereignisorientierte und zustandsorientierte Instandhaltung für Freileitungen und erdverlegte Trassenabschnitte einsetzbar ist. Es wird eine erhöhte Automation in Teilprozessen erreicht. Es ist allerdings notwendig, dass ein Experte die Ergebnisse abschließend visuell beurteilt. Entsprechend ist für die Anwendung der drohnengestützten Thermografie für die thermische Zustandserfassung von Wärmenetzen ein Leitfaden erstellt worden.

Der Bericht ist in vier Hauptteile untergliedert. Die Kapitel 2 – 4 beschreiben die zu lösende Aufgabe aus wirtschaftlicher und wissenschaftlich-technischer Sicht. Kapitel 5 ist als Hintergrund zu verstehen, in dem die Grundlagen der Thermographie und die Zusammenhänge zu verschiedenen Nah- und Fernwärmeleitungen zusammengetragen wurden. Die Kapitel 6 - 9 beschreiben die im Projekt geleisteten Arbeiten im Detail. Die restlichen Kapitel 10 – 15 geben Auskunft u.a. über die Verwendung der Zuwendung, den Nutzen der Entwicklungen und die Veröffentlichungen. Abgeschlossen wird der Bericht mit einem ausführlichen Literaturverzeichnis.

2. Wissenschaft-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Der Betrieb und die Erhaltung von Wärmenetzen erfordern eine ständige Kontrolle des Leitungszustandes. Wärmenetze bestehen größtenteils aus erdverlegten Rohrsystemen und entziehen sich einer regelmäßigen visuellen Kontrolle. Aus diesem Grund sind bisher nur punktuelle, systembezogene und ggf. nicht repräsentative Aussagen zum Zustand der Rohrleitungssysteme möglich, z.B. im Rahmen von Baumaßnahmen. Für den sicheren und effizienten Betrieb von Wärmenetzen sind Wärmeverluste und das Risiko schwerer Havarien durch unentdeckte Feuchtigkeitseinträge in die Wärmedämmung des Rohrsystems zu minimieren. Letzteres ist insbesondere für Gebiete mit geringer Anschlussdichte wie suburbane oder ländliche Wärmeversorgungsgebiete gültig. Zudem weisen diese Gebiete für die Zukunft ein großes Ausbaupotenzial für Wärmenetze aus [1], [2]. Besonders KMUs oder Privatpersonen werden zukünftig in diesen Bereichen als Energieversorger agieren und ein erhebliches wirtschaftliches Risiko tragen.

Technologien zur flächendeckenden, kostengünstigen, flexiblen, wiederkehrenden und gezielten Zustandserfassung und -bewertung von Wärmenetzen sind ein vertrauensbildendes und äußerst wichtiges Instrument für den Erhalt und die Versorgungssicherheit leitungsgebundener Wärmeversorgungssysteme. Eine Lösung bietet die Befliegung mit einer Wärmebildkamera. Das System aus Fluggerät und Wärmebildkamera wird als luftgestützte Thermal-Infrarot-Technologie (TIR) bezeichnet. Diese Technologie ermöglicht es relevante Strahlungsdichte- und Temperaturunterschiede (Anomalien) zu identifizieren. Dabei sind neben einem hohen Maß an Erfahrung und z.T. netzspezifischen Expertenwissen, statische Daten zum untersuchten Wärmenetz (Nenn Durchmesser, Art der Rohrsysteme, Verlegetiefen, systemspezifische Besonderheiten, etc.), die Ausdehnung sowie das relative Temperaturniveau der Anomalie (Übertemperatur gegenüber dem unbeeinflussten Erdreich) zu berücksichtigen und für eine Bewertung von identifizierten Anomalien heranzuziehen. Vor diesem Hintergrund ergibt sich die wissenschaftlich-technische Problemstellung aus der konzeptionellen Entwicklung eines flexiblen Verfahrens, welches unabhängig von spezifischen Besonderheiten in der unterschiedlichen Ausführung der Wärmenetze, wie z. B. der

- Wärmenetztypen (Nah- und Fernwärme),
- Verlegetiefen,
- Rohrsysteme (z.B. Stahl-, Kunststoffmantel-, Doppel-, Flexrohr, etc.),
- Betriebsparameter und -art (z.B. Betriebstemperaturen, gleitender Betrieb),
- Bodenbeschaffenheiten (Leitfähigkeit, Durchfeuchtung, etc.) und
- Oberflächenbeschaffenheit (Asphalt, Beton, Grünflächen, etc.),

eine zuverlässige Aussage zu deren wärmetechnischen Zustand zulässt. Die Kombination aus Drohne und Wärmebildkamera als unbemanntes Flugsystem UAS (Unmanned Aircraft System), ermöglicht durch wiederkehrende „Thermalbefliegungen“ die Erfassung zeitlicher Zustandsveränderungen und eine Bewertung des Alterungsverhaltens unterschiedlicher Netztypen und -teile.

Trotz des Planungsaufwands liegt die wissenschaftlich-technische Herausforderung in der (teil-) automatisierten Auswertung erfasster Daten unter Berücksichtigung zusätzlicher verfügbarer Informationen, speziell des Expertenwissens. Zusätzlich zur technischen Problemstellung, ist

der rechtliche Rahmen für die Durchführung von Thermalbefliegungen zu berücksichtigen. Die rechtlichen Anforderungen für unbemannte Luftfahrtgeräte sog. UAV (Unmanned Aerial Vehicle) und deren Piloten, die abhängig vom Gewicht des Fluggerätes sind, werden in der Luftverkehrsordnung beschrieben. Gewerbliche Flüge für unbemannte Flugsysteme sind in Deutschland auf 25 kg Abfluggewicht beschränkt. Die Genehmigungen werden durch die zuständigen Landesbehörden erteilt. Die Wahl einer optimalen Kombination aus unbemannten Flugsystem und Auswertesoftware zur Thermalbefliegung in Kombination mit bestehenden Informationen zu den Wärmenetzen und kritischen Wärmenetzbestandteilen liefert einen maßgeblichen Beitrag zur Bewertung des Zustands in Bezug auf den Wärmeverlust.

Die wirtschaftliche Relevanz der Entwicklung eines drohnengestützten Messsystems zur Thermalbefliegung von Wärmenetzen ergibt sich dabei aus der Rückkopplung geringer Wärmeverteilverluste und der wirtschaftlichen Darstellbarkeit von Wärmenetzen. Weiterhin werden durch die Vermeidung von Havarien, z.B. durch eine zielgerichtete Ertüchtigung und Instandsetzung kritischer Bestandteile und -komponenten des Wärmenetzes auf Basis thermographischer Daten erhebliche Kosteneinsparungen gegenüber einer ereignisorientierten Schadensbehebung möglich. Leckagen im Mediumrohr führen zu erheblichen Wasserverlusten und verursachen zusätzliche Kosten für die Nachspeisung aufbereiteten Fernheizwassers. Austretendes Wasser führt zudem zu einer Schädigung der Wärmedämmung. Bleiben zunächst lokal begrenzte Schäden mit einhergehender Degradation des Rohrsystems unentdeckt, ergibt sich ein erhöhtes Risiko für eine Ausweitung des Schadens. Die Kosten für die Behebung des Schadens und für die Instandsetzung steigen, die technische und wirtschaftliche Nutzungsdauer sinkt. Thermalbefliegungen, insbesondere Mehrfachbefliegungen, im Rahmen einer drohnengestützten Instandhaltungsstrategie adressieren zusammenfassend die dargestellte Problemstellung und die folgenden wirtschaftlich relevanten Aspekte:

- Flexibler Einsatz mit minimiertem Planungsaufwand.
- Geringere Störeinflüsse auf die Messungen aufgrund geringerer Flughöhe gegenüber der Thermalbefliegung mit Flugzeugen, was den Aufwand zur Generierung von Thermalkarten im Untersuchungsgebiet verringert.
- Die automatisierte Identifikation irrelevanter thermischer Anomalien wird vereinfacht.
- Erweiterter effektiver Einsatz drohnengestützter Systeme in urbanen und ländlichen Gebieten.
- Erfassung von Zustandsveränderungen der Wärmenetze durch Vergleich aufeinander folgender Messungen.
- Rechtzeitige Instandsetzung/ Reinvestition im Nah- und Fernwärmebereich.
- Die Erfassung und Verringerung von Wärmeverlusten.
- Wahrung der Versorgungssicherheit,
- Verringerung des Risikos von Havarien und
- Erhöhung des wirtschaftlichen Nutzens von Wärmenetzen.

Neben Herstellern drohnengestützter Systeme, Dienstleistern für Thermalkartierungsflüge und deren Auswertung sowie Energieversorgungsunternehmen (EVU) erstreckt sich der Nutzen der Technologie auch auf die Endkunden der Wärmenetze. Voraussetzung ist, dass monetäre Minderbelastungen durch verbesserte Instandhaltungsstrategien an den Endkunden weitergegeben werden. Zudem wird der Ausbau der Wärmenetztechnologie als zentrale Säule der Energiewende unterstützt.

3. Wissenschaftlich-technischer Ansatz

3.1 Stand der Forschung und Entwicklung

Erdverlegte Wärmenetze entziehen sich einer visuellen Kontrolle. Daher werden kostspielige und punktuelle, lokal begrenzte Aufgrabungen zur Zustandsbewertung vorgenommen um Leitungsabschnitte für Untersuchungen zu entnehmen. Die flächendeckende Zustandsaufnahme erdverlegter Fernwärmenetze gelingt unterdessen mit luftgestützten Aufnahmen der Thermal-Infrarot-Technologie (TIR) in Flugzeugen. Der Zeitraum, in dem Befliegungen mit dem Flugzeug durchgeführt werden können, ist aufgrund von Witterungsbedingungen begrenzt. Methoden zur großräumigen Überwachung durch bemannte Flugthermographie wurden z.B. von Ljungberg u.a. [3] und Axelsson [4] untersucht.

Das Forschungsvorhaben "Generische Zustandsanalyse von Fernwärmenetzen" [5], [6] hat gezeigt, dass eine Bewertung der Zustandsänderung bzgl. einer zeitlichen Veränderung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung eines Fernwärmenetzes durch Thermografie vom Flugzeug aus nicht möglich ist. Zeitliche Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung werden von Störgrößen an der Erdoberfläche sowie atmosphärischen Einflüssen überlagert. Nur durch exakte Bewertung klimatischer und atmosphärischer Einflüsse (Störgrößen) auf die Thermalbilder ist ein zuverlässiges Verfahren zur Zustandsbewertung realisierbar. Durch den Einsatz von Drohnen können aufgrund der deutlich geringeren Entfernung zum Boden bei der Thermalbefliegung die Störgrößen reduziert werden. Bei der Flugvorbereitung ist eine ständige Wetterbeobachtung des Fluggebietes notwendig, um den Flug unter optimalen Bedingungen für die Bildaufnahmen wie Lufttemperatur, Windverhältnisse, Wolken und Tageszeit durchführen zu können. Aufgrund dieser Bedingungen ist der Einsatz der luftgestützten Thermografie nur begrenzt möglich und erfordert einen hohen Planungsaufwand. Zudem sind Thermikflüge mit dem Flugzeug, insbesondere für kleine Untersuchungsgebiete, wirtschaftlich nur sehr schwer durchführbar. In diesem Zusammenhang ist der Einsatz eines unbemannten Luftfahrzeugs (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) zur Aufnahme von Wärmebildern eine vielversprechende Lösung.

Einer der Faktoren, der die Qualität der TIR-Bilder beeinflusst, ist das Vorhandensein von Rauschen. Rauschen ist in digitalen Bildern während der Bilderfassungs-, Kodierungs-, Übertragungs- und Verarbeitungsschritte immer vorhanden. Bei TIR-Bildern sind generell das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und der Kontrast gering, was die Verarbeitung erschwert. Abhängig von der Technologie des Infrarot (IR)-Sensors kann das Problem mit der photoelektrischen Umwandlung (in Photodetektoren), dem Temperaturschwankungsrauschen (in thermischen Detektoren) sowie mit dem Einfluss des Herstellungsprozesses zusammenhängen [7]. Die oben genannten Probleme verursachen eine unterschiedliche Empfindlichkeit der TIR-Detektoren, die sich durch eine unterschiedliche Reaktion der Pixel zeigt. Diese Uneinheitlichkeit kann, wenn sie nicht richtig korrigiert wird, die Hauptfehlerquelle in TIR-Bildern sein. Auch die Umgebungsbedingungen während der Messung sollten berücksichtigt werden. Ein wichtiger Aspekt ist die thermische Stabilisierung der TIR-Kamera, wie von Budzan und Wyżgolik [8] angegeben. Abhängig vom Kamerahersteller variiert der Zeitaufwand für die Stabilisierung der thermischen Eigenschaften einer TIR-Kamera. In den meisten Fällen wird die unterschiedliche Empfindlichkeit des Focal Plane Array (FPA) bereits in der Kamera-Software reduziert. Trotzdem kann das Ausgabebild durch Rauschen beeinträchtigt sein, insbesondere wenn die Objekt- und Umgebungstemperatur ähnlich sind. Um dieses Problem zu beheben, wird ein mechanischer Ver-

schluss für eine Flat Field Correction (FFC) verwendet. FFC ist ein Verfahren, bei dem pro Pixel Offset-Koeffizienten angesetzt und aktualisiert werden, um die Bildqualität zu verbessern. Dies wird erreicht, indem jedem Detektorelement eine einheitliche Temperaturebene (ein flaches Feld) präsentiert wird. Gleichzeitig mit der Erfassung dieses flachen Feldes aktualisiert die Kamera die Korrektorkoeffizienten, was zu einem einheitlicheren Ergebnis führt.

Die gemessene Strahldichte hängt von der tatsächlichen Temperatur der untersuchten Struktur, dem Emissionskoeffizienten, dem Reflexionsgrad der Oberfläche und von umliegenden Objekten ab. Die Umgebungstemperatur ist in der Nacht niedriger als am Tag; daher sollten dieselben thermischen Anomalien in der Nacht besser sichtbar sein. Ein weiterer Faktor ist der Einfluss des Sonnenlichts und seine lang anhaltenden Auswirkungen. Direktes Sonnenlicht und Schatten können das thermische Muster auf einer Oberfläche viele Stunden nach Ende der Sonneneinstrahlung beeinflussen. Madura und Kolodziejczyk [9] zeigen, dass Sonnenstrahlung, selbst im fernen Infrarotbereich, bei der Verwendung von TIR-Kameras erhebliche Fehler bei der Temperaturmessung verursachen kann.

Pech u.a. [10] analysieren das Problem der Verwendung einer TIR-Kamera an einem UAV zur Aufnahme von multi-temporalen Wärmebildern und zur Erzeugung von Wärmeorthophotos. Die Datenerfassung umfasst drei Bildflüge zu unterschiedlichen Tageszeiten: 7, 14 und 21 Uhr. Darüber hinaus werden die Strahlungstemperaturen aus den Wärmebildern mit Bodenmessungen verglichen, um die Kameramessungen auf Fehler zu überprüfen. Es zeigt sich, dass die Aufnahmen zur Mittagszeit eine signifikantere Abweichung der gemessenen Temperatur im Vergleich zu den Bodenmessungen aufweist als die Aufnahmen vom Morgen und vom Abend.

Die exakte Lokalisierung von Schäden vom Flugzeug aus ist immer noch mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet. Durch Zustandsaufnahmen vor Ort mit drohnengestützten Systemen sind Beschädigungen exakter lokalisierbar und Fehlinterpretationen eher vermeidbar. Der Einsatz drohnengestützter TIR-Systeme ist flexibler und aufgrund geringerer Kosten für die Planung und Durchführung auch für Nahwärmenetze geeignet. Für eine effiziente Nutzung dieser Technologie ist es erforderlich, die Einsatzmöglichkeit und –grenzen unter Berücksichtigung der rechtlichen Rahmenbedingungen zu definieren. Der Fokus richtet sich dabei auf eine automationsgestützte Zustandsermittlung von Wärmenetzen.

Nach bisherigem Kenntnisstand ist die Anzahl von Fehlinterpretationen thermischer Anomalien relativ hoch. Aus den bei der Thermalbefliegung gewonnenen Daten wird eine Thermalkarte erstellt. Auffälligkeiten werden durch deutliche Unterschiede der Strahlungsdichte visualisiert. Störgrößen führen zu einer Vielzahl von identifizierten, aber nicht relevanten thermischen Anomalien. Durch Analyseverfahren können die nicht relevanten thermischen Anomalien identifiziert werden. Dadurch werden Fehlinterpretationen bei der Datenauswertung reduziert und die Nutzbarkeit der Messungen erhöht. Durch eine Software gestützte Auswertung lässt sich der Zustand von Wärmenetzen verlässlicher bewerten. Die Versorgungssicherheit wird erhöht, Wärmeverteilungsverluste verringert und thermisch kritische Netzteile identifiziert.

Friman u.a. [11] beschreiben eine Methode zur automatischen Analyse von TIR-Bildern zur Lokalisierung von Leckagen in Rohren eines DHS. Die TIR-Bilder wurden von bemannten Flugzeugen in 800 m Höhe aufgenommen, was zu einer Bodenpixelgröße (ground sampling distance, GSD) von 24 cm führt. Leckagen werden durch Auswahl des oberen Perzentils aus der Verteilung der Wärmestrahlung für ein Rohr lokalisiert, während die Rohrlokalisierung durch Projektion von Daten des Geographischen Informationssystems (GIS) des DHS in die erfassten

Bilder erfolgt. Um die Fehlerrate im Zusammenhang mit anormalen Temperaturen in der Umgebung von Gebäuden, z.B. von warmen Schornsteinen, Lüftungsöffnungen und Eingängen, zu reduzieren, werden die Gebäude im Orthophoto ausmaskiert. Dies geschieht mit Hilfe einer auf das Orthophoto angewendeten Wasserscheiden-Transformation, gefolgt von einer Klassifizierung der resultierenden Segmente.

Berg u.a. [12] befassen sich ebenfalls mit der Reduzierung von Fehlalarmen bei automatisch erkannten potenziellen Leckagen in Fernwärmenetzen. Die Leckagen werden in Bildern erkannt, die von einer luftgestützten TIR-Kamera aufgenommen werden. Die Auswahl der Merkmale erfolgte durch Berechnung der Mahalanobis-Distanz zwischen den Klassenmittelwerten für jedes Merkmal. Der endgültige Merkmalssatz besteht aus acht Merkmalen. Das Klassifizierungsproblem ist als binäre Klassifikation formuliert, um festzustellen, ob es sich bei der Detektion um eine Leckage handelt oder nicht. Während bei der Testreihe verschiedene Arten von linearen und nichtlinearen Klassifikatoren eingesetzt sind, erzielt der Random-Forest-Klassifikator die besten Ergebnisse.

Zhong u.a. [13] verwenden eine Salienzanalyse-Methode zur Erkennung von DHS-Rohrleitungsleckagen unter Verwendung von thermalen Infrarot- und optischen Bildern, die von bemannten Flügen und UAVs aus mit einer min. GSD von ca. 20 cm erfasst wurden. Eine Salienzkarte ist ein Bild, das das Objekt in Bezug auf seine Umgebung hervorhebt. Die Infrarot-Salienzkarte ist eine Indexkarte, bei der ein Pixel mit einem hohen Index eine hohe Wahrscheinlichkeit hat, Teil eines Anomaliegebietes mit hoher Temperatur zu sein. Itti u.a. [14] stellen eines der ersten Modelle zur Berechnung der Salienz auf. Pipeline-Leckagen zeigen sich hier in Infrarotbildern hervorstechend. Zhong u.a. [13] entwickeln eine Methode zur Erkennung von DHS-Leckagen, die sich durch eine lokale und globale Salienz-Analyse (LGSA) auszeichnet. Die lokale Salienzkarte zeigt Bildregionen, die sich in Bezug auf ihre Umgebung unterscheiden, wobei Intensitäts- und Orientierungsmerkmale in die Analyse übernommen werden. Andererseits stellt die globale Salienzkarte die Auffälligkeiten einer Bildregion durch Berechnung der Seltenheit von Merkmalen über die gesamte Szenerie dar. Die globale Salienz in diesen Inhalten verstärkt homogene Regionen innerhalb der DHS-Leckagen, die durch die lokale Salienz erkannt werden. Im letzten Schritt wird die Infrarot-Salienzkarte durch Verschmelzen der lokalen und der globalen Salienzkarte erstellt. Die Autoren gehen davon aus, dass ihnen GIS-Daten für den Standort des DHS zur Verfügung stehen. Anstatt Schwellenwert-Techniken zum Aufspüren potenzieller Leckagen zu verwenden, wird schließlich eine maximale Entropie-Segmentierung auf der endgültigen Salienzkarte durchgeführt. Die Validierung der vorgeschlagenen Methode wurde an Daten durchgeführt, die in mittlerer und großer Höhe in Gävle in Schweden und Datong in China erfasst wurden. Die Feldexperimente zeigten, dass die vorgeschlagene Methode die Leckagen der unterirdischen DHS-Pipelines mit hoher Erkennungsgenauigkeit detektieren konnte und bestehende Methoden bei der Reduzierung von Fehlalarmen übertraf.

Potentielle Anwender von TIR-Systemen haben generell Schwierigkeiten, von durchgeführten Messungen zu profitieren. Grund sind praktische Mängel bei der Anwendung dieser Systeme. Daher wird die Praxistauglichkeit von mobilen, tragbaren und flugfähigen TIR-Systemen bei der Vermessung und Bewertung von Gebäuden und Wärmenetzen verglichen.

Arbeiten hinsichtlich einer automatisierten Auswertung generierter Thermalkarten mit nachfolgender netzabhängigen Bewertung und Interpretation dieser Daten mit dem Ziel, thermisch relevante Anomalien zu lokalisieren, um eine Einbettung in eine optimierte Instandhaltungsstrategie

gie als Bestandteil einer Asset-Managementstrategie zu generieren, liegen bisher nicht vor. Untersuchungen zur drohnengestützten Thermalbefliegung für eine Instandhaltungsstrategie von Wärmenetzen im urbanen, suburbanen und im ländlichen Raum sind bisher ebenfalls nicht vorgenommen worden.

3.2 Arbeitshypothese

Die Arbeitshypothese wird wie folgt definiert: Durch die Spezifikation eines drohnengestützten Messsystems zur Thermalkartierung von urbanen, suburbanen und ländlichen Wärmeversorgungsgebieten mit nachgeschalteter, automationsgestützter Methodik können zuverlässig Aussagen über den Zustand von Wärmenetzkomponenten getroffen werden. Geringe Investitions- und Einsatzkosten für diese drohnengestützten Messsysteme ermöglichen Mehrfachbefliegungen. So ist eine Bewertung der Zustandsveränderung relevanter Wärmenetzbestandteile möglich. Ertüchtigungen, Instandsetzungen und Reinvestitionen können gezielt und vor dem Auftreten größerer Schadensereignisse durchgeführt werden, während eine hohe primärenergetische Effizienz durch einen optimierten Netzbetrieb sichergestellt wird. Eine Methodik zur Ableitung von Empfehlungen und Indikatoren, sowie ein zu erarbeitender Leitfaden für das Asset-Management von Wärmenetzen, erleichtern die Festlegung eines wirtschaftlich sinnvollen Reinvestitionszeitpunktes und eine individuelle Entwicklung von Instandhaltungskonzepten.

4. Lösungsweg

4.1 Bearbeitungsschritte

Zwecks Entwicklung einer drohnengestützten Instandsetzungsstrategie als Bestandteil eines Asset-Managementsystems werden UAS zur Thermalkartierung von Wärmenetzen eingesetzt. Durch Thermalbefliegungen von Wärmenetzen mit unterschiedlichen Systemen werden Daten generiert. Informationen zur Planungs- und Betriebshistorie der Wärmenetze und einzelner Netzbestandteile werden vom EVU bereitgestellt und durch Daten aus Thermalbefliegungen mit Flugzeugen ergänzt. Diese Thermalbefliegungen mit Flugzeugen finden selten oder nur sporadisch statt und erlauben so keine gesicherte Aussage zur Zustandsveränderung. Zudem ist eine abschließende Einschätzung einzelner thermischer Auffälligkeiten nur schwer möglich, da Störeinflüsse auf Thermalbefliegungen mit Flugzeugen nicht auszuschließen sind. Die wiederholte UAS-gestützte Überwachung einzelner thermischer Auffälligkeiten, die ggf. auf Defekte im Wärmenetz hindeuten, leistet hier Abhilfe. Der wärmetechnische Zustand von Nahwärmenetzen ist zumeist nicht bekannt. UAS leisten hier Abhilfe und können den Zustand von Nahwärmenetzen erfassen. Notwendige Wiederholungsmessungen sind für die Erfassung der Zustandsveränderung ebenfalls möglich. Die Zusammenführung seitens vom EVU bereitgestellter Betriebs- und Planungsdaten eines untersuchten Wärmenetzes sowie der erhobenen Thermaldaten bereitet die automatisierte Auswertung der Thermaldaten vor und ist die Grundlage für einen Leitfaden zur Instandsetzung als Bestandteil einer Asset-Managementstrategie von Wärmenetzen. So erhalten die EVUs Informationen zum thermischen Zustand der Wärmenetze. Die im Rahmen des Projekts vorgeschlagene Entwicklung lässt sich durch zwei wesentliche Schritte charakterisieren:

1. Technische Spezifizierung eines drohnengestützten Messsystems zur automatisierten Thermalkartierung von Wärmeversorgungsgebieten und
2. Eingliederung des entwickelten Messsystems in eine für Wärmenetze sinnvolle Strategie zum Asset-Management auch für Nahwärmenetze.

Wichtige Arbeitsschritte bei der Spezifikation des drohnengestützten Messsystems sind die Klärung technischer, wirtschaftlicher und rechtlicher Rahmenbedingungen für eine Drohnenbefliegung mit Thermalkamera. Hinsichtlich technischer Rahmenbedingungen sind Messparameter und deren Toleranzen zu definieren. Daneben gilt es, eine Auswertemethodik zu entwickeln, die eine hohe Zuverlässigkeit aufweist, einen hohen Automationsgrad ermöglicht und gleichzeitig Fehlinterpretationen von Messdaten soweit wie technisch möglich vermeidet. Diese Zustandserfassung ist anschließend in ein Gesamtkonzept für die Erarbeitung von Empfehlungen am konkreten Wärmenetz einzubinden. Hierfür müssen nach Möglichkeit die Netzparameter

- Rohrsystem,
- Dimension,
- Mediumtemperatur und
- Verlegetiefe

bekannt sein sowie eine Verlinkung zwischen Netzplan, Thermaldaten und anderen Informationsebenen (z.B. Begehungsprotokolle) hergestellt werden. Die zu erarbeitenden Abläufe werden für Wärmenetze mit unterschiedlichen Verlege- und Rohrsystemen durchgeführt. So wird für den erarbeiteten theoretischen Ansatz die praktische Relevanz der Arbeiten demonstriert

und bereits während der Projektlaufzeit Verbesserungspotenzial für das entwickelte System erkannt und berücksichtigt.

4.2 Spezifikation eines drohnengestützten Erfassungssystems und Flugeinsatzplanung

Zwecks automatisierter Thermalkartierung von Wärmeversorgungsgebieten wird ein drohnengestütztes Messsystem spezifiziert. Hierbei werden die Anforderungen an das Messsystem erarbeitet. Zunächst werden die zu erfassenden physikalischen Größen bei Überfliegungen definiert. Der Fokus liegt auf die Erfassung der Oberflächentemperatur. Anforderungen an den Thermalsensor bezüglich der Bildaufnahmefrequenz, Bodenauflösung sowie der Pixelzahl, sind bereits durch Erfahrungen aus der praktischen Anwendung bekannt. Grundsätzlich ist eine Positionsbestimmung des UAS sowie ein Kreiselssystem für die Aufhängung der Kamera zur Bildstabilisierung erforderlich.

Hinsichtlich der Flugeinsatzplanung wird analysiert, wie weit die für die Datenerfassung aus Flugzeugen geltenden stringenten Rahmenbedingungen (z.B. Außentemperatur, Wind, Niederschlag) durch die geringere Flughöhe flexibler gestaltet werden können, um so z.B. mehr Flugtage zu erhalten. Auch wird untersucht, welche maximale Flugzeit bei gegebenem Gesamtgewicht und Außentemperatur ohne Batteriewechsel zuverlässig erreichbar ist und in welchem rechtlichen Rahmen sich die Thermalbefliegungen bewegen müssen, da dies maßgeblich die Flexibilität des UAS Einsatzes beeinflusst. Aus den Anforderungen der Datenerfassung ist schließlich ein Konzept für die messtechnische Datenerfassung mit dem UAS abzuleiten.

4.3 Entwicklung einer automationsgestützten Auswertemethodik

Die Entwicklung der automationsgestützten Auswertemethodik erfolgt in zwei Stufen:

1. Orientierung und Mosaikierung der Bilder und
2. Beschreibung des Zustands des Wärmeversorgungsnetzes inkl. möglicher Veränderungen mit Hilfe von Methoden der Bildanalyse.

Die Orientierung und Mosaikierung erfolgt mit Standardmethoden der Photogrammetrie, für die bereits eine geeignete Software verfügbar ist (z.B. Agisoft PhotoScan). Neben den Positionsdaten gehen automatisch generierte Verknüpfungspunkte sowie ein digitales Geländemodell in die Auswertung ein. Vorhandene 3D Gebäudemodelle können berücksichtigt werden, um die Qualität der mosaikierten Bilder weiter zu erhöhen. Die automatische Bildanalyse ist die wesentliche wissenschaftliche Herausforderung des Projekts. Dabei ist ein Verfahren zu entwickeln, dass möglichst alle thermischen Anomalien des Wärmenetzes identifiziert, dabei aber möglichst wenig Fehlinterpretationen verursacht und z.B. irrelevante Anomalien erkennt. Dies soll u.a. erreicht werden, indem nur die für die Aufgabe relevanten Bildbereiche bearbeitet werden. Dazu werden zunächst die Gebäude auf der Grundlage vorhandener Daten ausmaskiert. Die EVUs stellen zu diesem Zweck Daten zur Netzinfrastruktur zur Verfügung, um die Eliminierung irrelevanter Bildbereiche vorzubereiten. Es ist zu untersuchen, ob die parallel erfassten optischen Daten für die Detektion im Datenbestand fehlender Gebäude oder Bäume, z.B. durch stereoskopische Auswertung genutzt werden können. Dabei ist entscheidend, ob zum Zeitpunkt

der Thermalaufnahme genug Licht vorhanden ist, um mit optischen Sensoren ein geeignetes Bild aufnehmen zu können. Danach werden Puffer um die dem Bildmosaik überlagerten Fern- bzw. Nahwärmeleitungen gelegt. Die weitere Datenverarbeitung und Dateninterpretation geschieht innerhalb dieser Puffer. Soweit verfügbar, werden diese Puffer mit Informationen über Typ, Alter, Position von Straßenlaternen usw. attribuiert. Die Erkennung der Anomalien erfolgt mit Hilfe einer überwachten Klassifikation der Bilddaten. Dies erfolgt gemeinsam für Bilddaten die zu verschiedenen Zeitpunkten generiert werden (z.B. Flüge mit einem zeitlichen Abstand von wenigen Wochen), um bewegliche Objekte (z.B. kurz vor der Datenerfassung abgestellte PKW) besser eliminieren zu können. Für die Klassifikation sind sogenannte Merkmale aus den Bilddaten zu extrahieren. Die Klassifikation selber erfolgt dann mit Hilfe von Algorithmen des maschinellen Lernens (z.B. Zufallsfelder, Random Forests, SVM, CNN). Attribute verschiedener Pufferbereiche werden in der Definition der Merkmale berücksichtigt. Zu untersuchen ist, inwieweit die für die Klassifikation notwendigen Trainingsdaten für spätere Flüge wiederverwendet werden können, um z.B. mit der Zeit typische Fehlstellen zuverlässiger erkennen zu können. Das damit verbundene inkrementelle Lernen der verschiedenen Klassen birgt ein hohes Potenzial für die Verbesserung der Ergebnisse, insbesondere hinsichtlich der Verringerung der Anzahl an Fehlinterpretationen.

4.4 Entwicklung einer thermalbildgestützten Instandhaltungsstrategie

Es ist zu prüfen, für welche Instandhaltungsstrategien das UAS eingesetzt werden kann. Insbesondere sind die Vorteile einer regelmäßigen UAS-Überfliegung zu berücksichtigen. Wesentliche Schritte dieses Arbeitspakets sind:

1. Verlinkung von Netzplan und Thermaldaten zwecks Identifikation potentiell relevanter und irrelevanter thermischer Anomalien unter Berücksichtigung zusätzlicher Informationsquellen (Betriebsprotokolle, Begehungsprotokolle, etc.) für eine Interpretation von Thermaldaten und
2. Untersuchungen der Wechselwirkung thermalbildgestützter Instandsetzung mit unterschiedlichen
 - Wärmenetzen und Netzparametern (z.B. Nahwärme, Fernwärme, Dimension, Verlegetiefe usw.),
 - Betriebsweisen sowie
 - heutigen und zukünftig verringerten Wärmebedarfen des Netzes (z.B. durch energetische Sanierung des Gebäudebestands).

Unter Berücksichtigung dieser Einflussparameter wird eine allgemeine Instandsetzungsstrategie auf der Grundlage der durchgeführten drohnengestützten Befliegungen entwickelt. Dabei werden die notwendigen Rahmenbedingungen und Arbeitsschritte bei der Planung und Durchführung von drohnengestützten Thermalbefliegungen sowie die Anforderungen und Vorgehensweise bei der Auswertung der Thermalbilder/-daten beschrieben. Zudem werden Anforderungen bzw. Rahmenbedingungen formuliert, die eine drohnengestützte Befliegung ermöglichen und die Einsatzgrenzen dieser Technik aufzeigen.

4.5 Umsetzung und Anwendung des Messsystems und der Methodik unter realen Bedingungen

Zur Erprobung des Messsystems und der automationsgestützten Auswertesoftware werden unterschiedliche Gebiete identifiziert, die sich in den folgenden Punkten unterscheiden:

- Unterschiedliche Verlegesysteme,
- unterschiedliche Rohrsysteme,
- Bodenbeschaffenheit über der Leitung und
- Nahwärme- Fernwärmeleitungsabschnitte.

Die Gebiete werden überflogen und Thermaldaten erfasst. Entsprechend der erarbeiteten Methodik werden die erfassten Thermaldaten ausgewertet und interpretiert.

4.6 Entwicklung eines allgemeinen Leitfadens

Auf Basis der durchgeführten Thermalbefliegungen sowie den Kenntnissen aus der Instandhaltungsstrategie wird ein allgemeiner Leitfaden erarbeitet. Die Rahmenbedingungen werden hinsichtlich der Witterungsverhältnisse sowie der örtlichen Gegebenheiten, die den Einsatz der drohnengestützten Thermalbefliegungen ermöglichen, dargestellt. Das Messprinzip, die Einsatzmöglichkeiten der Technologie sowie Ansätze zur Bewertung von thermischen Anomalien werden beschrieben.

In dem Leitfaden wird der Inhalt zum Erstellen eines Untersuchungsprotokolls in Bezug auf die beschriebenen Rahmenbedingungen sowie die Darstellung der Thermalbilder definiert.

Der Leitfaden gibt eine Orientierung unter welchen Voraussetzungen der Einsatz der Technologie möglich ist.

5. Theoretische Grundlagen

5.1 Begriff Fernwärme und Nahwärme

Der Transport von Wärmeenergie in Form von heißem Wasser durch isolierte Rohrleitungen vom Wärmeerzeuger bis zum Verbraucher wird als Fernwärme bezeichnet. Der Bundesgerichtshof definiert den Rechtsbegriff Fernwärme wie folgt [7]:

„Wird aus einer nicht im Eigentum des Gebäudeeigentümers stehenden Heizungsanlage von einem Dritten nach unternehmenswirtschaftlichen Gesichtspunkten eigenständig Wärme produziert und an andere geliefert, so handelt es sich um Fernwärme. Auf die Nähe der Anlage zu dem versorgten Gebäude oder das Vorhandensein eines größeren Leitungsnetzes kommt es nicht an.“

Gemäß dem definierten Rechtsbegriff werden Fernwärme und Nahwärme nicht unterschieden. Das Grundprinzip von Nah- und Fernwärme ist identisch, lediglich die erzeugten und transportierten Wärmeenergiemengen sowie die Größe der Versorgungsgebiete unterscheiden sich. Bei Fernwärme wird die Wärmeenergie in der Regel von Stadtwerken bzw. Energieversorgungsunternehmen durch relativ große, dezentrale Erzeugungsanlagen bereitgestellt. Die Versorgungsgebiete umfassen meistens ganze Stadtteile innerhalb von Großstädten [7]. Die Wärmeenergie wird von mehreren Erzeugungsanlagen in das Fernwärmenetz eingespeist.

Im Gegensatz zu Fernwärme werden durch Nahwärme kleinere Gebiete, wie z.B. Dörfer und Neubaugebiete in Städten, mit Wärmeenergie versorgt. Die Wärmeerzeugung erfolgt dezentral in einer Erzeugungsanlage [7]. Als Erzeugungsanlagen werden meistens Blockheizkraftwerke (BHKW) eingesetzt. Blockheizkraftwerke erzeugen gleichzeitig Heizwärme und Strom. Die erzeugte Energiemenge ist geringer als bei der Fernwärmeerzeugung. Aus diesem Grund werden Nahwärmenetze häufig mit geringeren Temperaturen belastet. Daher können sich die verwendeten wärmegeprägten Rohrleitungen in der Nahwärmeversorgung von den in der Fernwärmeversorgung verwendeten wärmegeprägten Rohrleitungen in der Dimension und konstruktiven Ausführung unterscheiden.

5.2 Betriebsweisen

Wärme wird zum Heizen von Gebäuden sowie zur Trinkwassererwärmung genutzt. Industrieanlagen werden über Wärmenetze mit Prozesswärme versorgt. Als Wärmeträgermedium wird in der Regel Wasser eingesetzt. Bei der Bereitstellung von Prozesswärme wird auch Wasserdampf verwendet. Unterschiedliche Betriebszustände von Kundenanlagen aufgrund unterschiedlicher technischer Ausführung, führen zu variierenden Leistungsanforderungen an Wärmenetze. Durch die Netzregelung wird die transportierte Wärmeleistung dem Wärmebedarf der Kundenanlagen angepasst.

Die Höhe der transportierten Wärmeleistung ergibt sich aus dem Produkt des transportierten Volumenstroms und der Temperatur des Wärmeträgermediums in der Vorlauf- und Rücklaufleitung. Dem Wärmeversorgungsunternehmen stehen die drei folgenden Betriebsweisen zur Verfügung [16]:

1. Konstante Regelung: Die Vorlauftemperatur wird unabhängig von der Außentemperatur auf einen konstanten Wert eingestellt.
2. Gleitende Betriebsweise: Die Vorlauftemperatur wird ausschließlich entsprechend dem erforderlichen Raumwärmebedarf in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur eingestellt. Bei sinkender Außentemperatur steigt die Vorlauftemperatur gleitend auf einen Maximalwert. Die höchste Vorlauftemperatur wird bei der Norm-Außentemperatur erreicht (z.B. -12 °C). Bei ansteigender Außentemperatur sinkt die Vorlauftemperatur gleitend. Die Basis für die Regelung der Vorlauftemperatur ist dabei nicht die aktuelle Außentemperatur sondern ein über einen längeren Zeitraum gemittelter Wert.
3. Gleitend-konstante Betriebsweise: Die Vorlauftemperatur wird innerhalb festgelegter Grenzwerte in Abhängigkeit der Außentemperatur geregelt, ohne jedoch einen Mindestwert zu unterschreiten. Diese Betriebsweise ermöglicht den Betrieb von Anlagen zur Raumwärmeversorgung und von Anlagen zur Trinkwassererwärmung. Aus hygienischen Gründen muss für eine Trinkwassererwärmung eine Vorlauftemperatur von etwa 70 °C beim Kunden eingehalten werden. Eine Hausstation ermöglicht eine vom Wärmenetz unabhängige, auf die Bedürfnisse des Verbrauchers abgestimmte Nachregelung der Vorlauftemperatur.

5.3 Wärmenetze

Über Wärmenetze erfolgt der Transport leitungsgebundener thermischer Energie durch ein Wärmeträgermedium. Der Transport des Wärmeträgermediums erfolgt durch wärmegeämmte Rohrleitungen. Die thermische Energie wird zum Heizen von Gebäuden sowie zur Trinkwassererwärmung genutzt. Industrieanlagen werden über Wärmenetze mit Prozesswärme versorgt. Als Wärmeträgermedium wird in der Regel Wasser eingesetzt. Bei der Bereitstellung von Prozesswärme wird auch Wasserdampf verwendet.

Heutige Wärmeverteilnetze sind überwiegend als Zweileiternetze ausgeführt. In der Vorlaufleitung wird das Wärmeträgermedium vom Erzeuger zum Verbraucher transportiert und in der Rücklaufleitung gelangt das Wärmeträgermedium vom Verbraucher zurück zum Erzeuger. Vor- und Rückleitung können als separate wärmegeämmte Rohrleitungen oder als Doppelrohrsystem mit beiden Rohrleitungen in einer gemeinsamen Wärmedämmung parallel zueinander verlegt sein. In Abhängigkeit der örtlichen Anforderungen und Gegebenheiten kann die Anzahl der parallel verlegten isolierten Rohrleitung jedoch variieren. In der Praxis sind daher auch die folgenden Wärmenetausführungen vorzufinden [17]:

- 1-Leiter-Netz: Das Wärmeträgermedium wird durch eine Vorlaufleitung zum Abnehmer transportiert. Nach der Abkühlung wird das Wärmeträgermedium je nach örtlichen Gegebenheiten an die Umwelt abgegeben z.B. Flüsse/Bäche oder in die Kanalisation geleitet.
- 3-Leiter-Netz: Das 3-Leiter-Netz besteht aus zwei Vorlaufleitungen und einer gemeinsamen Rücklaufleitung. Die beiden Vorlaufleitungen können mit unterschiedlichen Tem-

peraturen des Wärmeträgermediums betrieben werden, wie z.B. zur getrennten Versorgung von Anlagen für die Trink- und Brauchwasserbereitung und zur Bereitstellung von Raumwärme.

- 4-Leiter-Netz: 4-Leiter-Netze bestehen aus zwei Vorlauf- und zwei Rücklaufleitungen. Dieses System wird bei der getrennten Versorgung von Prozess- und Heizwärme mit unterschiedlichen Temperaturen und Drücken sowie in Gebieten mit vielen dezentralen Wärmequellen eingesetzt.

Die Rohrleitungen zum Wärmetransport werden in Abhängigkeit von der Lage und Funktion im Wärmenetz in Transportleitung, Verteilleitung und Hausanschluss unterteilt. Gemäß DIN EN 17248:2018 gelten die folgenden Definitionen [18]:

- Transportleitung: „Rohrleitung, die vom Ort der Erzeugung zu den Verteilleitungen führt.“
- Verteilleitung: „Rohrleitung, die von einer Transportleitung oder Regelstation zum Hausanschluss oder direkt zu einer Hausanschlussstation führt.“
- Hausanschluss: „Rohrleitung, die von der Verteilleitung zur Hausübergabestation führt.“

5.3.1 Verlegesysteme

Die Verlegung von wärmegeprägten Rohrleitungen für Wärmenetze erfolgt in den folgenden Varianten:

- Freileitung,
- Kanalverlegte Systeme,
- Kanalfreie Systeme.

5.3.1.1 Freileitung

Freileitungen werden gegenwärtig nur selten verlegt. Die Kosten der Verlegung sind gegenüber den anderen Varianten gering. Sie sind jedoch aus städte- und landschaftsplanerischer Sicht nicht akzeptabel und selten genehmigungsfähig [7]. Freileitungen befinden sich häufig auf Kraftwerks-, Industrie- und Gewerbeflächen. Für Freileitungen werden Rohrsysteme mit einem wärmegeprägten Mediumrohr aus Stahl und einer äußeren Ummantelung aus Metall oder Kunststoff eingesetzt. Freileitungen werden auf Betonsockeln, Stahlkonsolen, Beton- und Stahlstützen verlegt [19].

5.3.1.2 Kanalverlegte Systeme

Kanalverlegung wird heute nur noch verwendet, wo direkt erdverlegte Systeme aufgrund der örtlichen Gegebenheiten nicht eingesetzt werden können. Die Kanäle bestehen aus Beton oder können aus gemauerten Ziegelsteinen bestehen. In den Kanälen sind die Rohrleitungen verlegt. Die Kanalsysteme lassen sich in begehbare bzw. bekriechbare Kanäle und in nicht begehbare Kanäle unterteilen. Bei begehbaren Kanälen sind die Rohrleitungen aus Platzgründen übereinander angeordnet. In dieser Ausführungsform können auch Leitungen anderer Versorgungsträger z.B. Strom integriert werden. Kanäle können sich in ihrer Bauform unterscheiden.

Folgende Kanalformen existieren [7]:

- Haubenkanal /**Bild 1**/,
- U-Kanal,
- Doppel-Winkel-Kanal /**Bild 2**/,
- Doppel-U-Kanal und
- Trogkanal.

Betonkanäle sind aus Kanalsegmenten zusammengesetzt. Die Verbindungsstellen der Segmente sind in der Regel mit Mörtel verfügt. An der Außenseite sind die Kanalsegmente mit einem Schutzanstrich versehen.



Bild 1 Links: Haubenkanal mit drei Rohrleitungen, rechts: Haubenkanalsegmente.



Bild 2 Winkelplattenkanal aus Beton.

5.3.1.3 Kanalfreie Systeme

Kanalfreie Systeme lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- - Schüttsysteme
- - Gießsysteme
- - Mantelrohrsysteme

Schüttsysteme

Bei diesem System wird die Rohrleitung in dem Rohrgraben auf der Rohrgrabensohle verlegt. Nach der Montage erfolgt der Einbau der Isolierung. Bei Schüttsystemen werden pulverförmige Stoffe unterschiedlicher Korngröße verwendet. Durch Zusätze werden sie wasserabweisend gemacht. Die Isolierstoffe werden im trockenen Zustand um die Leitung geschüttet. Dabei wird die Rohrgrabenwand als seitliche Schalung genutzt. Ist dies nicht möglich, wird mit verllorener Schalung gearbeitet. Hierfür eignen sich Formschalen, Platten aus Blech, Holz sowie Asbestzement. /**Bild 3**/ zeigt die Ausführungsformen der verschiedenen Schüttsysteme [20].

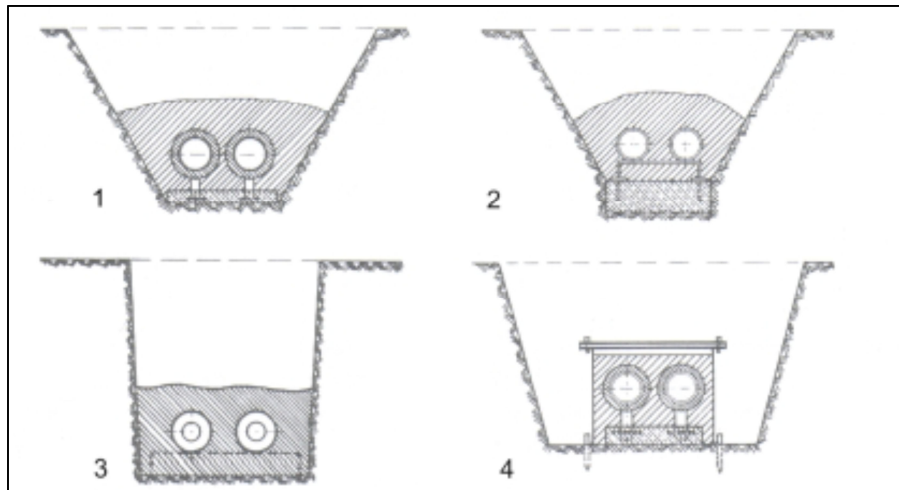


Bild 3 Querschnitte für Fernheizleitungen mit Schüttisolierung (1 = Schüttisolierung mit Vorisolierung, 2 = Schüttisolierung ohne Vorisolierung, 3 = Festblockisolierung mit Vorisolierung, 4 = Festblockisolierung mit verlorener Schalung).

Gießverfahren

Gießverfahren werden für Unterverteilungssysteme und kleinere Heiznetze verwendet. Sie werden unterschieden in

- Bituminöse – Blockisolierung und
- Zementgebundene – Blockisolierung.

Beide Verfahren sind in **Bild 4** dargestellt. Das zementgebundene Verfahren arbeitet mit Vorisolierung, während bei dem bituminösen Verfahren keine Vorisolierung durchgeführt wird. Es werden verlorene Wanderschalen eingesetzt. Die Isolierung wird im dickflüssigen Zustand verfüllt. Die Vorisolierung des zementgebundenen Verfahrens kann mit Kork, Kunststoffschäum in Schalen oder Bahnen sowie Glas- oder Steinwolle erfolgen.

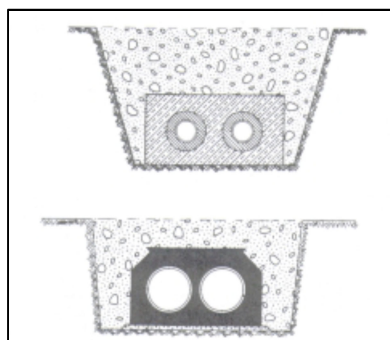


Bild 4 Querschnitte von Fernheizleitungen mit Festblockverfahren [20].

Mantelrohrsysteme

Für den Transport von Wärme werden unterschiedliche Mantelrohrsysteme verwendet. Mantelrohrsysteme existieren in unterschiedlichen Ausführungsformen und bestehen aus drei Komponenten:

- Mediumrohr,
- Wärmedämmung und
- Ummantelung zum Schutz der Wärmedämmung.

Mantelrohrsysteme unterscheiden sich im Wesentlichen in der Ausführungsform **/Bild 5/** und lassen sich in die folgenden Kategorien einteilen:

- Gleitsysteme,
- starre Verbundrohrsysteme und
- flexible Rohrsysteme.

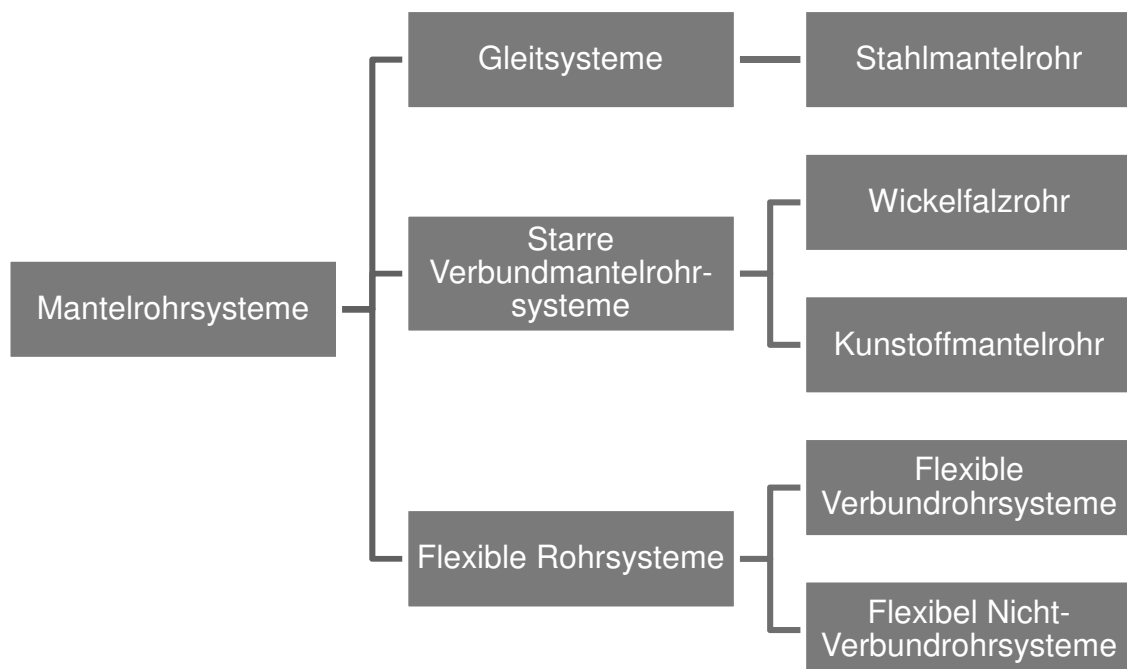


Bild 5 Einteilung der Mantelrohrsysteme nach ihrer Ausführungsform.

In Abhängigkeit der Ausführungsform und Anforderungen während der Betriebszeit werden für die Bestandteile der Rohrsysteme unterschiedliche Werkstoffe verwendet **/Bild 6/**. Die maximal zur Verfügung stehenden Dimensionen und zulässigen Belastungen während der Betriebszeit unterscheiden sich nach Ausführungsform und den Materialien aus denen die Rohrsysteme bestehen. In **/Tabelle 1/** sind für starre und flexible Mantelrohrsysteme die verwendeten Materialien, die maximal verfügbaren Durchmesser und die zulässigen Dauerbetriebstemperaturen angegeben.

Tabelle 1 Systemspezifische Parameter für unterschiedliche Mantelrohrsysteme.

System	Kunststoff-mantelrohr	Flexible Verbund-systeme mit einem Mediumrohr aus Metall	Flexible Verbund-systeme mit einem Mediumrohr aus Kunststoff	Flexible <u>nicht</u> Ver-bundsysteme mit einem Mediumrohr aus Kunststoff
Werkstoff				
Mediumrohr	Stahl	Kupfer, Weichstahl, gewellter nichtrostender Stahl	PE-X, PB	PE-X, PB
Mantelrohr	PE-HD	PE-HD	PE-HD, PE-LD, PE-LLD	PE-HD
Wärmedämmung	PUR-Hartschaum	PUR-Hartschaum, Polyisocyanurat-Schaumstoff	PUR-Hartschaum	Vernetzter PE-Schaum, Polyolefin-Dämmung
Maximal verfügbarer Außendurchmesser für das Mediumrohr				
Einzelrohrsystem	DN 1200	28,0 mm (glatt) 63,0 mm (gewellt)	110,0 mm	110,0 mm
Doppelrohrsystem	DN 200	35,0 mm	63,0 mm	63,0 mm
Zulässige Betriebsparameter				
Dauerbetriebs-temperatur	120 °C	120 °C	80 °C	80 °C



Bild 6 Unterschiedliche Mantelrohrsysteme.

Stahlmantelrohr

Stahlmantelrohrsysteme gehören zu den Gleitsystemen und bestehen aus einem Mediumrohr sowie einem Mantelrohr aus Stahl. Das Mantelrohr wird an der Außenseite gegen Korrosion geschützt. Das Mediumrohr wird durch Lagerkonstruktionen im Inneren des Mantelrohres gestützt und geführt und ist mit einer Wärmedämmung umhüllt. Der Ringraum zwischen dem Mantelrohr und dem wärmegeprägten Mediumrohr ist evakuiert.

Wickelfalzrohr

Wickelfalzrohre bestehen aus einem Mediumrohr aus Stahl, einer Wärmedämmung aus Polyurethan-Hartschaum und einem Mantelrohr aus Blech. Die Wärmedämmung bildet einen kraftschlüssigen Verbund zum Mediumrohr und zum Mantelrohr.

Kunststoffmantelrohr (KMR)

Kunststoffmantelrohre bestehen aus einem Mediumrohr aus Stahl, einer Wärmedämmung aus Polyurethan-Hartschaum und einer Ummantelung aus Polyethylen hoher Dichte (Polyethylen High Density = PE-HD). Die Wärmedämmung bildet einen kraftschlüssigen Verbund zum Mediumrohr und zum Mantelrohr.

Verbundmanteldoppelrohre

Bei Verbundmanteldoppelrohren umfasst die Ummantelung aus PE-HD zwei Mediumrohre aus Stahl. Die Wärmedämmung aus Polyurethan-Hartschaum bildet einen kraftschlüssigen Verbund zu den beiden Mediumrohren und dem Mantelrohr.

Flexible Verbundrohrsysteme

Die Mediumrohre und Mantelrohre flexibler Verbundrohrsysteme können aus unterschiedlichen Metallen oder Kunststoffen bestehen. Für die Mediumrohre werden folgende Materialien verwendet: Weichstahl, Edelstahl-Wellrohr, Kupfer, Polybuten (PB) sowie vernetztes Polyethylen (PE-X). Für die Ummantelung werden Polyethylen hoher Dichte (Polyethylen High Density = PE-HD), Polyethylen mit geringer Dichte (Polyethylen Low Density = PE-LD), lineares Polyethylen mit geringer Dichte (PE-LLD) sowie Edelstahl verwendet. Zudem kann die Ummantelung aus mehreren Schichten unterschiedlicher Materialien bestehen wie z.B. aus einem gewellten CrNi-Stahlmantelrohr, aus einer Korrosionsschutzschicht (z.B. Bitumen-Kautschuk-Masse) und einem Schutzmantel aus PE-LD. Die Ummantelung kann glatt oder gewellt sein. Für die Wärmedämmung werden Polyurethan-Hartschaum oder Polyisocyanurat-Schaumstoff verwendet. Die Wärmedämmung bildet einen kraftschlüssigen oder formschlüssigen Verbund zum Mediumrohr und zur Ummantelung. Flexible Verbundrohrsysteme als Einzel- und Doppelrohrsysteme verfügbar.

Flexible Nicht-Verbundrohrsysteme

Bei flexiblen Nicht-Verbundsystemen können die Mediumrohre aus PE-X oder aus PB bestehen. Das Mantelrohr besteht aus PE-HD. Zwischen dem Mediumrohr und dem Mantelrohr ist eine Wärmedämmung ohne Verbundeigenschaft. Die Wärmedämmung besteht aus vernetztem PE-Schaum oder Polyolefin. Flexible Nicht-Verbundrohrsysteme sind als Einzel- und Doppelrohrsysteme verfügbar.

5.3.2 Systemkomponenten

Wärmenetze weisen aufgrund der unterschiedlichen Verlege- und Rohrsysteme gemeinsame und systemspezifische Komponenten auf. Die systemunabhängigen und systemspezifischen Komponenten für unterschiedliche Verlege- und Rohrsysteme sind in **Tabelle 2** dargestellt.

Tabelle 2 Systemunabhängige und systemspezifische Komponenten für unterschiedliche Verlege- und Rohrsysteme.

Netz Bestandteile		Freileitung	Erdverlegte Systeme			
			Kanalsysteme	Direkt erdverlegt Systeme		
				Starre Rohr-systeme	Flexible Rohr-systeme	
Systemunabhängige Komponenten		Verbindungssysteme / Rohrverbindungen				
		Armaturen				
		Formteile				
Systemspezifische Komponenten	Kompensatoren	+	+	+		
	Dehnpolster			+		
	Lagerkonstruktionen	+	+			
	Schachtbauwerke		(+)	+		

5.3.2.1 Verbindungssysteme

Die Länge der verwendeten isolierten Rohre ist begrenzt. Welche Länge die isolierten Rohrsysteme aufweisen, ist vom verwendeten System abhängig. Werkmäßig gedämmte Kunststoffmantelrohre werden in Längen von 6 m und 12 m produziert und auf der Baustelle angeliefert. Flexible isolierte Rohrleitung werden aufgewickelt und können Längen bis 100 m aufweisen. Über längere Strecken müssen die isolierten Rohrleitungen miteinander verbunden werden.

Die Verbindung der isolierten Rohrleitung erfolgt sowohl zwischen den Mediumrohren als auch zwischen den Mantelrohren. An den Verbindungsstellen ist keine Wärmedämmung vorhanden. Daher muss dieser Bereich nachträglich gedämmt werden. Das Herstellen dieser Verbindungen erfordert ein hohes Maß an Sorgfalt, da während der gesamten Betriebszeit kein Wasser durch die Verbindungsstellen in das System gelangen darf. In Abhängigkeit vom wärme gedämmten Rohrsystem unterscheiden sich die Verbindungssysteme.

Die Verbindung der Mediumrohren kann in Abhängigkeit vom Rohrsystem bzw. Material durch Verschweißen, mit Flanschverbindungen, oder Pressverbindungen erfolgen. Die beiden Mantelrohren werden über eine Verbindungsmuffe wasserdicht miteinander verbunden.

Die Nachdämmung dieser Bereiche kann vor dem Installieren der Verbindungsmuffe z.B. durch vorgefertigte Dämmschalen erfolgen oder nach dem Installieren der Verbindungsmuffe. Erfolgt die Nachdämmung nach dem Installieren der Verbindungsmuffe, so werden zwei Öffnungen in die Verbindungsmuffe gebohrt. Zum Herstellen der Nachdämmung werden nach dem Installieren der Verbindungsmuffe die zunächst flüssigen Komponenten Polyol und Isocyanat in einem vom Hersteller angegebenen Mischungsverhältnis miteinander vermengt. Durch eine der Öffnungen wird das flüssige Gemisch in den nicht isolierten Bereich gefüllt. Durch eine chemische Reaktion expandiert das Gemisch und härtet aus. Durch die Öffnungen können entstehende Gase entweichen und überschüssiger Schaum herausquellen. Die Öffnungen werden nach erfolgter Dämmung mit Stopfen wasserdicht verschlossen.

5.3.2.2 Formstücke

Formstücke werden für Richtungsänderungen der Trassenführung in horizontaler und in vertikaler Richtung sowie für die Verbindung von Rohrleitungen mit unterschiedlichem Durchmesser verwendet. Durch Richtungsänderungen kann der Trassenverlauf der örtlichen Straßenführung und den Geländebedingungen angepasst werden. Formstücke können in ihrer Geometrie flexibel gestaltet werden und in den für das Rohrsystem erforderlichen Werkstoffen gefertigt und eingebaut werden. Zu den Formstücken zählen:

- Abzweige,
- Reduzierstücke,
- Bögen und
- Kompensatoren.

Abzweige

Abzweige gibt es in der Ausführung als T-Abzweig und als Parallelabzweig. Sie bestehen aus einem Durchgangrohr, das mit einem Abzweigrohr verbunden ist. Durchgangrohr und Abzweigrohr können unterschiedliche Durchmesser aufweisen. Abzweige werden für den Anschluss von Verbrauchern an die Verteilleitung eingesetzt sowie für Verbindungen von Trassenabschnitten mit unterschiedlichen Durchmessern. Zudem können durch den Einsatz von Abzweigen Höhendifferenzen überwunden werden. Das folgende **Bild 7** zeigt einen Parallel-Abzweig des Rohrsystems Kunststoffmantelrohr. Die Ummantelung und das Mediumrohr des KMR Parallel-Abzweigs bestehen aus mehreren miteinander verbundenen Teilen.

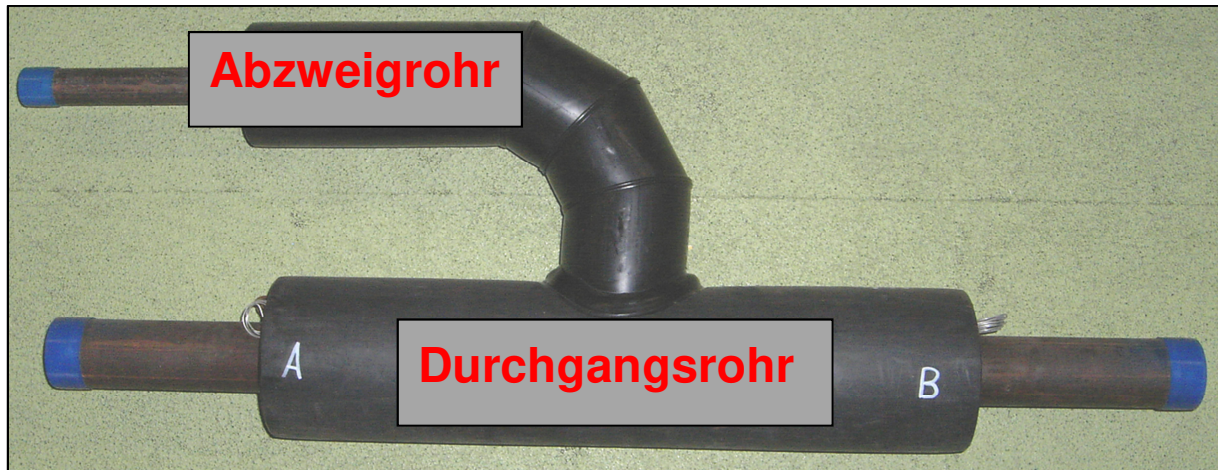


Bild 7 Parallel-Abzweig des KMR-Systems.

Reduzierstücke

Reduzierstücke werden zur Verbindung von Rohrleitungen mit unterschiedlichen Durchmessern verwendet. Sie können eine konzentrische oder exzentrische Form aufweisen /**Bild 8**/.



Bild 8 Exzentrisches Reduzierstück. Konzentrisches Reduzierstück.

Bögen

Bögen können unterschiedliche Biegewinkel aufweisen. Dadurch kann die Trassenführung dem Straßenverlauf oder dem Gelände in vertikaler und horizontaler Richtung angepasst werden /**Bild 9**/.



Bild 9 KMR Bogenkonstruktion zur Richtungs- und Höhenänderung.

Bögen werden bei starren Rohrsystemen auch als „Dehnungsbögen“ zur Kompensation von axialen Spannungen infolge thermischer Lastwechsel (Temperaturänderungen) verbaut. Dehnungsbögen werden in der Praxis als L-Bogen, U-Bogen oder Z-Bogen ausgeführt **/Bild 10/** und **/Bild 11/**.

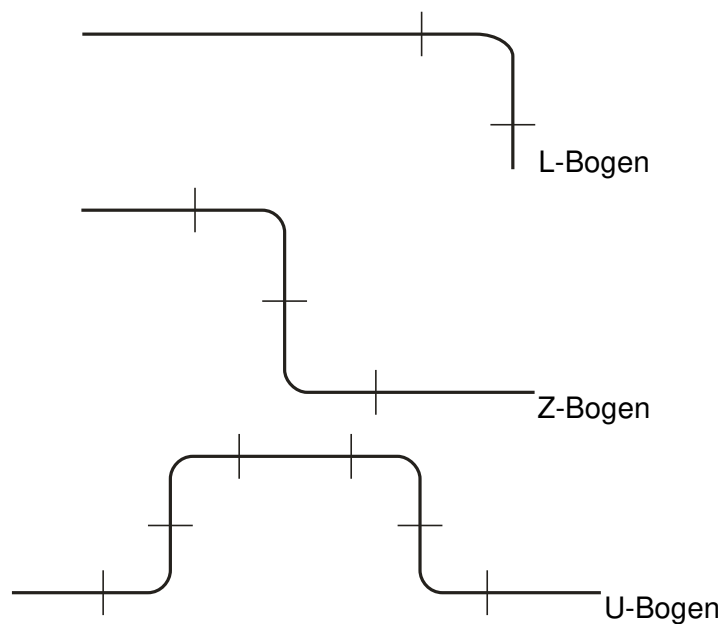


Bild 10 Unterschiedliche Ausführungen von Dehnungsbögen.



Bild 11 Freileitung mit Dehnungsbogen [21].

Kompensatoren

Alternativ zu Dehnungsbögen können für Leitungen mit starren Rohrsystemen Kompensatoren eingesetzt werden. Kompensatoren können in Abhängigkeit ihrer Bauweise angulare, laterale und axiale Belastungen aufnehmen /**Bild 12**/. Die Verbindungen der beiden Kompensatorenden mit den Rohrstrecken erfolgt zumeist durch Verschweißen oder in Sonderfällen durch Anflanschen/Verschrauben dieser Bauteile. Kompensatoren sind Mediumrohrbauteile. Nach der Installation erfolgt die Verbindung und Abdichtung mit den angrenzenden Mantelrohren sowie die Nachdämmung analog zu den Mantelrohrverbindungen.

In Abhängigkeit der auftretenden Belastung und Anforderungen werden einwandige Bälge oder mehrwandige Bälge mit unterschiedlichen Wellenformen verwendet /**Tabelle 3**/.

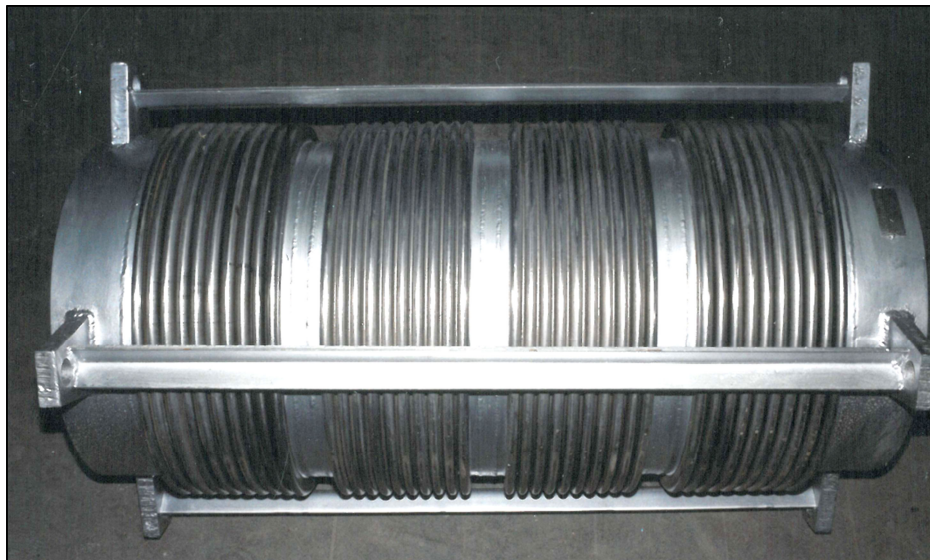


Bild 12 Axialkompensator.

Tabelle 3 Eigenschaften verschiedener Wellenformen von Kompensatoren [22].

	Torus	Lyra	Membran
Schema			
Beweglichkeit	Gering	Hoch	sehr hoch
Druckfestigkeit	sehr hoch	Hoch	gering

5.3.2.3 Armaturen

Armaturen werden zum Absperren von Trassenabschnitten benötigt sowie zum Entleeren und Entlüften von Leitungen verwendet. Bei Reparaturmaßnahmen oder bei Baumaßnahmen zur Netzerweiterung kann der Betrieb einzelner Trassenabschnitte unterbrochen werden. Armaturen werden durch Einschweißen oder mit Flanschverbindungen in die Trassen eingebaut. Erdverlegte Armaturen werden in der Straßenoberfläche mit Schachtdeckeln oder mit Straßenkapfen abgedeckt, damit eine Betätigung möglich ist [23]. Bei kanalverlegten Systemen befinden sich Armaturen in Schachtbauwerken.

5.3.2.4 Schachtbauwerke

Schachtbauwerke werden überwiegend unterirdisch errichtet und können begebar oder nicht begebar ausgeführt sein. In Schächten befinden sich für den Betrieb und für die Überwachung notwendige Bestandteile wie z.B. Streckenabsperungen, Leitungsabzweige, Dehnungsausgleiche sowie Armaturen /**Bild 13**/. Schächte können betoniert, gemauert oder aus Fertigteilen montiert sein. Gegen anstehendes Grundwasser wird in die Schachtsohle ein Pumpensumpf eingelassen. Der Abstand zwischen Kanalsohle und der Rohreinführung sollte mindestens 20 cm betragen [19]. Die Schachtdecke wird häufig abnehmbar und aus Gewichtsründen auch geteilt in Form von Betonfertigplatten ausgeführt.



Bild 13 Geöffnetes Schachtbauwerk mit Armaturen und Bögen mit vertikaler Richtungsänderung.

5.3.2.5 Lager und Stützen

In der Wärmeversorgung unterliegen Rohrleitungen aufgrund von Temperaturschwankungen durch den Wechsel von Sommer- auf Winterbetrieb thermisch bedingten Lastwechseln. Thermische Lastwechsel führen zu Längenänderungen und damit zu dehnungsinduzierten Bewegungen der Rohrleitungen. Bei Freileitungen und kanalverlegten Rohrleitungen wird durch Gleitlager ein behinderungsfreies Dehnen der Rohrleitungen gewährleistet und die entstehenden Belastungen zudem durch Festpunkte begrenzt.

Freileitungen

Bei Freileitungen sind zur Aufnahme von Gleitlagern und Festpunkten Stützkonstruktionen aus Stahl oder Stahlbeton erforderlich. Der Abstand zwischen den Stützkonstruktionen ist abhängig vom Gewicht des Rohrsystems und dem Gewicht des zu transportierenden Mediums. Zudem müssen Schnee- und Windlasten berücksichtigt werden.

Gleitlager und Festpunkte bestehen aus Profilstahl- oder Edelstahlkonstruktionen. Die Gleitlagerkonstruktionen können entweder an dem Mediumrohr angeschweißt sein, so dass das Mediumrohr mit dem Gleitlager auf der Oberfläche der Stützkonstruktion gleitet oder das Gleitlager ist fest mit der Stützkonstruktion verbunden und das Mediumrohr gleitet entlang der Gleitlageroberfläche. Zudem kann die Führung des Mediumrohres durch Rohrschellen, die mit dem Gleitlager verbunden sind, gesichert werden. Als Gleitlager werden auch Rollenlager- sowie Kugellagerkonstruktionen verwendet. Für Festpunkte werden Stahlkonstruktionen verwendet, die fest mit der Stützkonstruktion und dem Mediumrohr des Rohrsystems verbunden sind. **Bild 14** zeigt eine Lager- sowie eine Stützkonstruktion einer Freileitung.



Bild 14 Links: Lagerkonstruktion, Freileitung, rechts: Stützkonstruktion Freileitung [21].

Kanalverlegte Leitungen

Gleitlager und Festpunktstrukturen in Kanälen sind in den meisten Fällen Gewerke aus Stahl, die aus miteinander verschweißten Normprofilen bestehen. Die Stahlteile sind mit einem Korrosionsschutz versehen.

Bei kanalverlegten Rohrsystemen können die Gleitlager entweder fest mit dem Mediumrohr verbunden sein und auf der Kanalsohle gleiten oder sie sind fest in die Kanalsohle integriert und das Mediumrohr gleitet, gesichert durch Rohrschellen, entlang der Gleitlageroberfläche. Die Rohrschellen verhindern ein unzulässiges Knicken des Mediumrohres.

Festpunktkonstruktionen sind fest mit dem Mediumrohr und dem Kanal verbunden. Die konstruktive Ausführung der Festpunkte ist u.a. von der Dimension der Rohrleitung und den auftretenden Belastungen abhängig.

5.3.2.6 Dehnpolster

Änderungen der Mediumtemperatur führen bei direkt erdverlegten starren Rohrsystemen zu dehnungsinduzierten Bewegungen in Bereichen der Dehnungsbögen und Abzweigen. Um eine möglichst widerstandsfreie Bewegung der Rohrleitung zu ermöglichen, werden in diesen Bereichen Dehnpolster verwendet **/Bild 15/**. Dehnpolster bestehen aus elastischen Schaumstoffmatten. Die Schaumstoffmatten können unterschiedliche Dicken und Profile aufweisen **/Bild 16/** und werden direkt an die Ummantelung des Rohrsystems angebracht. Die Dehnpolster können die Ummantelung des Rohrsystems vollständig umhüllen oder an den Seiten angebracht werden **/Bild 17/**. Bei Bewegung des Rohres werden die Dehnpolster elastisch verformt.



Bild 15 Dehnpolsterinstallation am Dehnungsbogen.

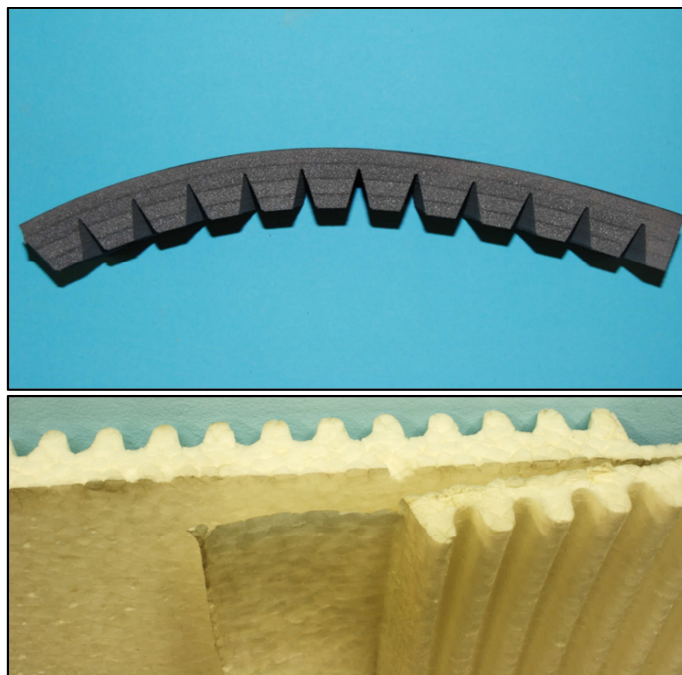


Bild 16 Dehnpolsterausführungen mit unterschiedlichen Profilen (oben: Trapezform, unten: Wellenform).

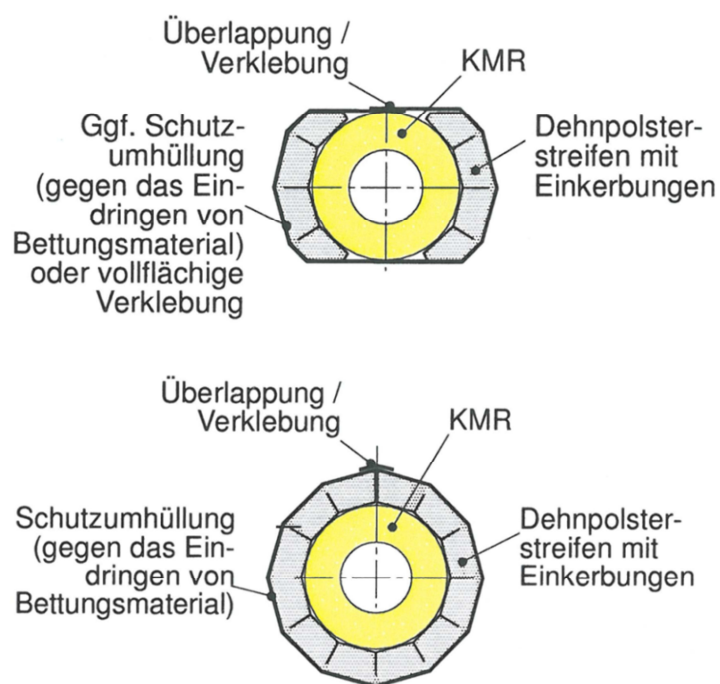


Bild 17 Installation von Dehnpolstern; oben: Dehnpolster seitlich angebracht; unten: Dehnpolster umhüllt das Rohr vollständig [24].

5.4 Berechnung von Wärmeverlusten

5.4.1 Theoretische Grundlagen

Für den Transport von Wärme vom Erzeuger zum Verbraucher wird in der Regel Wasser verwendet. Während des Transports wird ein Teil der Wärme an die Umgebung abgegeben. Dieser Wärmeverlust entsteht gemäß dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik durch die Temperaturdifferenz zwischen dem Wärmeträger und der kälteren Umgebung.

Die Wärmeübertragung erfolgt durch folgende physikalische Vorgänge:

1. Wärmeübergang vom Medium auf die Rohrrinnenwand durch Konvektion,
2. Wärmeübergang vom Mediumrohr in die Isolierung und in die Ummantelung durch Wärmeleitung und
3. Wärmeübergang von der Oberfläche der Ummantelung an die Umgebung durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung sowie durch Konvektion.

Der Wärmeverlust von Systemen zum Wärmetransport wird von folgenden Parametern beeinflusst:

1. Verlegesystem:
 - Freileitung
 - Kanalverlegung
 - direkte Erdverlegung
 - Verlegetiefe
 - Abstand zwischen Vorlauf- und Rücklaufleitung
2. Thermische Größen:
 - Mediumtemperatur
 - Temperatur der Umgebung
3. Geometrie des Rohrsystems:
 - Länge
 - Durchmesser
 - Wanddicke
 - Dämmdicke

Materialeigenschaft in Bezug auf die Wärmeleitfähigkeit:

1. Bezogen auf das Rohrsystem:
 - Mediumrohr
 - Wärmedämmung
 - Ummantelung
2. Bezogen auf die Verlegesysteme:
 - Kanalwände
 - Erdreich

Der Wärmeverlust von Fernwärmeleitungen wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$Q = k \cdot (t_i - t_u)$$

K = Wärmedurchgangskoeffizient

t_i = Mediumtemperatur

t_u = Umgebungstemperatur

Der spezifische Wärmeverlust q [W/m] wird wie folgt berechnet:

$$\dot{q} = k \cdot (t_i - t_u) \quad (5-1)$$

Die gedämmten Rohrleitungen sind zylindrische Körper, die aus mehreren Schichten mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten λ bestehen. Der Wärmedurchgangskoeffizient für mehrschichtige Hohlzylinder wird folgendermaßen berechnet:

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_i + d_i} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln\left(\frac{d_1}{d_i}\right) + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \dots + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_a}} \quad (5-2)$$

Aus dem Wärmedurchgangskoeffizienten wird der Wärmedurchlasswiderstand berechnet:

$$\frac{1}{k} = R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_a \quad (5-3)$$

Die durch den Wärmeübergang vom Wärmeträger auf die Rohrrinnenwand hervorgerufenen Wärmeverluste werden bei Modellen zur Berechnung von Wärmeverlusten von Wärmetransportsystemen vernachlässigt.

5.4.1.1 Wärmeverlustberechnung von Rohrpaaren als Freileitung

Die Berechnung des Wärmeverlustes von Freileitungen erfolgt gemäß dem Berechnungsmodell und -gleichungen nach J. Mosler [25]. In **Tabelle 4** sind die Formelzeichen und Einheiten dokumentiert.

Der Wärmeverlust wird für die Vorlaufleitung (VL) und die Rücklaufleitung (RL) berechnet. Die Wärmeübertragung von der Außenoberfläche der Rohrleitung an die Umgebung erfolgt durch Konvektion.

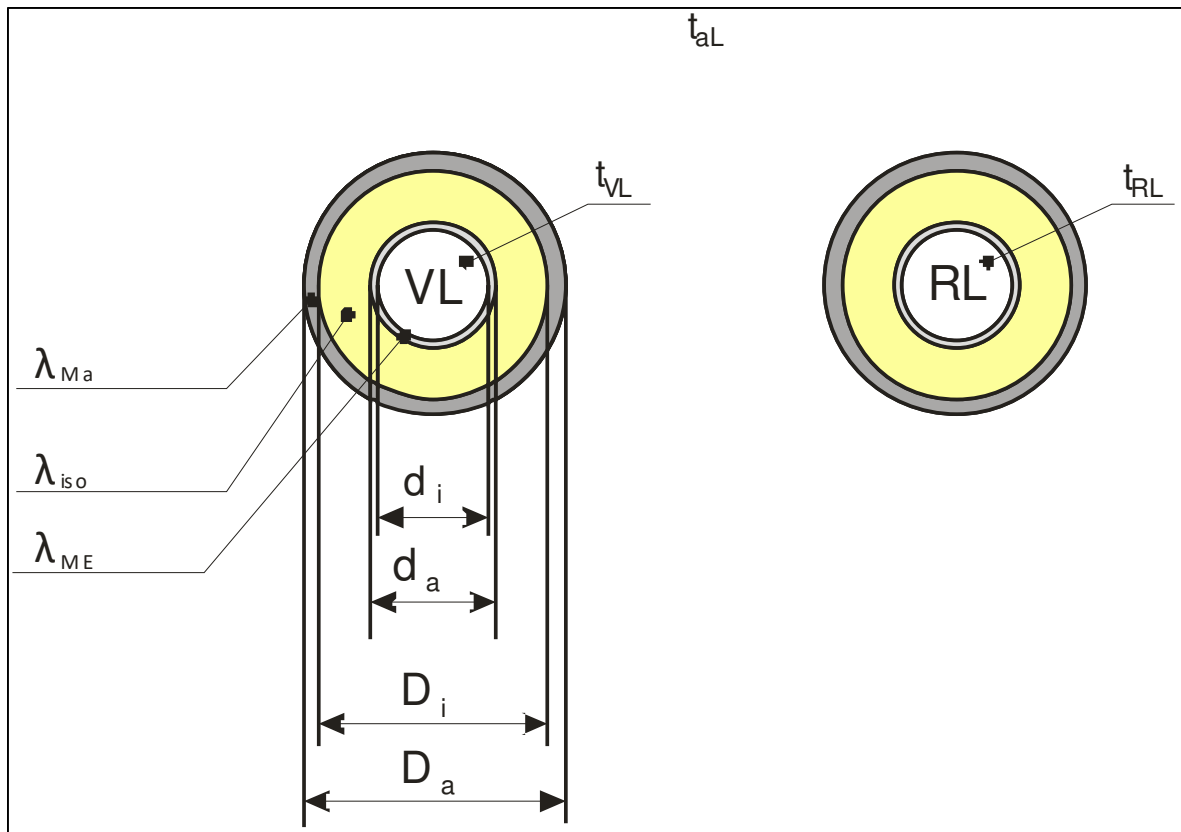


Bild 18 Rohrpaare als Freileitung.

Tabelle 4 Formelzeichen, Bezeichnungen und Einheiten zur Berechnung des Wärmeverlustes von Freileitungen.

Formelzeichen	Größe	Einheit []
d_{aiso}	Außendurchmesser der Wärmedämmung	m
D_a	Außendurchmesser des Mantelrohres bzw. Ummantelung	m
d_a	Außendurchmesser des Mediumrohres	m
d_i	Innendurchmesser des Mediumrohres	m
l_{1L}	Länge der Rohrleitung	m
NW	Nennweite	
q_{Luft}	Wärmeverlust für den Vorlauf und Rücklauf	W
$q_{\text{Luft};R}$	Spezifischer Wärmeverlust Rücklauf	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$
$Q_{\text{Luft};R;\text{Länge}}$	Wärmeverlust über die Länge der Rücklaufleitung	W
$q_{\text{Luft};V}$	Spezifischer Wärmeverlust Vorlauf	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$
$Q_{\text{Luft};V;\text{Länge}}$	Wärmeverlust über Länge der Vorlaufleitung	W
R_{iso}	Wärmeleitwiderstand der Wärmedämmung	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
$R_{\text{Gesamt};R}$	Gesamter Wärmeleitwiderstand Rücklauf	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
$R_{\text{Gesamt};V}$	Gesamter Wärmeleitwiderstand Vorlauf	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
$R_{\text{Luft};R}$	Wärmeleitwiderstand der Luft am Rücklauf	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
$R_{\text{Luft};V}$	Wärmeleitwiderstand der Luft am Vorlauf	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
R_{Mantel}	Wärmeleitwiderstand der Ummantelung bzw. Mantelrohr	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
R_{Medium}	Wärmeleitwiderstand des Mediumrohres	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
s_{iso}	Stärke der Wärmedämmung	m
s_{Ma}	Wanddicke des Mantelrohres bzw. Ummantelung	m
s_{ME}	Wanddicke des Mediumrohres	m
t_{aL}	Temperatur der Außenluft	°C
t_{RL}	Mediumtemperatur Rücklaufleitung	°C
t_{VL}	Mediumtemperatur Vorlaufleitung	°C
$\alpha_{aL;R}$	Wärmeübergangszahl Rücklauf	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$\alpha_{aL;V}$	Wärmeübergangszahl Vorlauf	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$\delta_{T;L;R}$	Temperaturdifferenz zwischen Innentemperatur Rücklauf und Temperatur der Außenluft	K
$\delta_{T;L;V}$	Temperaturdifferenz zwischen Innentemperatur Vorlauf und Temperatur Außenluft	K
$\delta_{T;L;V}$	Temperaturdifferenz zwischen Innentemperatur Vorlauf und Temperatur Außenluft	K
λ_{iso}	Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
λ_L	Wärmeleitfähigkeit der Außenluft	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
λ_{Ma}	Wärmeleitfähigkeit des Mantelrohres bzw. Ummantelung	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
λ_{Me}	Wärmeleitfähigkeit des Mediumrohres	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Berechnung des Mediumrohr-Innendurchmessers:

$$d_i = d_a - 2 \cdot s_{Me} \quad (5-4)$$

Berechnung des Außendurchmessers der Wärmedämmung:

$$d_{aiso} = d_a + 2 \cdot s_{iso} \quad (5-5)$$

Berechnung des Außendurchmessers der Ummantelung:

$$D_a = d_{ais} + 2 \cdot s_{Ma} \quad (5-6)$$

Berechnung der Temperaturdifferenzen:

$$\delta_{T;L;V} = t_{VL} - t_{aL} \quad (5-7)$$

$$\delta_{T;L;R} = t_{RL} - t_{aL} \quad (5-8)$$

Die Berechnung des Wärmeübergangs in ruhender Umgebungsluft für die Vorlauf- und Rücklaufleitung:

$$\alpha_{aL;V} = 8 + 0,04 \cdot \delta_{T;L;V} \quad (5-9)$$

$$\alpha_{aL;R} = 8 + 0,04 \cdot \delta_{T;L;R} \quad (5-10)$$

Berechnung der Wärmeleitwiderstände:

$$R_{Medium} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Me}} \cdot \ln \frac{d_a}{d_i} \quad (5-11)$$

$$R_{iso} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{iso}} \cdot \ln \frac{d_{aiso}}{d_a} \quad (5-12)$$

$$R_{Mantel} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Ma}} \cdot \ln \frac{D_a}{d_{aiso}} \quad (5-13)$$

$$R_{Luft;V} = \frac{1}{\alpha_{aL;V}} \cdot d_a \quad (5-14)$$

$$R_{\text{Luft;R}} = \frac{1}{\alpha_{\text{aL;R}}} \cdot d_{\text{a}} \quad (5-15)$$

$$R_{\text{Gesamt;V}} = R_{\text{Medium}} + R_{\text{iso}} + R_{\text{Mantel}} + R_{\text{Luft;V}} \quad (5-16)$$

$$R_{\text{Gesamt;R}} = R_{\text{Medium}} + R_{\text{iso}} + R_{\text{Mantel}} + R_{\text{Luft;R}} \quad (5-17)$$

Spezifischer Wärmeverlust Vorlauf:

$$q_{\text{Luft;V}} = \frac{1}{R_{\text{Gesamt;V}}} \cdot \delta_{\text{T;L;V}} \quad (5-18)$$

Wärmeverlust über Länge der Vorlaufleitung:

$$Q_{\text{Luft;V;Läng}} = \frac{\frac{1}{R_{\text{Gesamt;V}}} \cdot \delta_{\text{T;L;V}} \cdot l_{1\text{L}}}{1000} \quad (5-19)$$

Spezifischer Wärmeverlust Rücklauf:

$$q_{\text{Luft;R}} = \frac{1}{R_{\text{Gesamt;R}}} \cdot \delta_{\text{T;L;R}} \quad (5-20)$$

Wärmeverlust über die Länge der Rücklaufleitung:

$$Q_{\text{Luft;R;Länge}} = \frac{\frac{1}{R_{\text{Gesamt;V}}} \cdot \delta_{\text{T;L;R}} \cdot l_{1\text{L}}}{1000} \quad (5-21)$$

Gesamtwärmeverlust aus Vorlauf und Rücklauf:

$$q_{\text{Luft}} = q_{\text{Luft;V}} + q_{\text{Luft;R}} \quad (5-22)$$

$$Q_{\text{Luft;Länge}} = Q_{\text{Luft;V;Länge}} + Q_{\text{Luft;R;Länge}} \quad (5-23)$$

Tabelle 5 Formelzeichen, Bezeichnungen und Einheiten zur Berechnung des Wärmeverlustes von kanalverlegten Rohrpaaren.

Formelzeichen	Größe	Einheit []
b_{Ka}	Mittlere Kanalbreite	m
C	Verlegeabstand zwischen den Rohrachsen	m
D_a	Außendurchmesser des Mantelrohres bzw. Ummantelung	m
D_i	Innendurchmesser des Mantelrohres bzw. Ummantelung	
d_{aiso}	Außendurchmesser der Wärmedämmung	m
d_a	Außendurchmesser des Mediumrohres	m
d_f	Mittlerer Vergleichsdurchmesser des Kanals	m
d_i	Innendurchmesser des Mediumrohres	m
d_k	Mittlere Kanalwanddicke	m
H	Mittlere Verlegetiefe von Kanälen	m
h_K	Erdreichtiefe mit gleichbleibender Temperatur t_k	m
h_{Ka}	Mittlere Kanalhöhe	m
k_1	Wärmeübertragungskoeffizient der Rohrleitungen	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
k_2	Wärmeübertragungskoeffizient Kanalluft/Erdoberfläche	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
l_{1L}	Länge der Rohrleitung	m
NW	Nennweite	
Q_{Kanal}	Wärmeverlust über die Länge des Kanals	kW·
q_{Kanal}	Spezifischer Wärmeverlust Kanal	$W \cdot m^{-1}$
$q_{1;K}$	Spezifischer Wärmeverlust Rohrleitungen/Kanalluft	$W \cdot m^{-1}$
$q_{2;K}$	Spezifischer Wärmeverlust Kanalluft/Erdoberfläche	$W \cdot m^{-1}$
R_A	Wärmeleitwiderstand zwischen Kanalluft und Kanalwand	$m \cdot K \cdot W^{-1}$
$R_{erd;K}$	Wärmeleitwiderstand des Erdreichs	$m \cdot K \cdot W^{-1}$
R_{iso}	Wärmeleitwiderstand der Wärmedämmung	$m \cdot K \cdot W^{-1}$
R_K	Wärmeleitwiderstand Kanalwände	$m \cdot K \cdot W^{-1}$
R_{Mantel}	Wärmeleitwiderstand der Ummantelung bzw. Mantelrohr	$m \cdot K \cdot W^{-1}$
R_{Medium}	Wärmeleitwiderstand des Mediumrohres	$m \cdot K \cdot W^{-1}$
s_{iso}	Stärke der Wärmedämmung	m
s_{Ma}	Wanddicke des Mantelrohres bzw. Ummantelung	m
s_{ME}	Wanddicke des Mediumrohres	m
t_a	Mittlere Lufttemperatur an der Erdoberfläche	°C
$t_{aE;K}$	Erdreichtemperatur in Rohrachsentiefe	°C
t_k	Konstante Temperatur im Erdreich bei der Tiefe h_k	°C
t_{Ka}	Kanallufttemperatur	°C
t_{RL}	Mediumtemperatur Rücklaufleitung	°C
t_{VL}	Mediumtemperatur Vorlaufleitung	°C
α_g	Wärmeübergangszahl mit Strahlungseinfluss	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
λ_E	Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

λ_{iso}	Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_{KaWa}	Wärmeleitfähigkeit des Kanalwandmaterials (Beton)	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_{Ma}	Wärmeleitfähigkeit des Mantelrohres bzw. Ummantelung	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_{Me}	Wärmeleitfähigkeit des Mediumrohres	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Berechnung des Mediumrohr-Innendurchmessers:

$$d_i = d_a - 2 \cdot s_{ME} \quad (5-24)$$

Berechnung des Außendurchmessers der Wärmedämmung:

$$d_{a_{iso}} = d_a + 2 \cdot s_{iso} \quad (5-25)$$

$$D_a = d_{a_{iso}} + 2 \cdot s_{Ma} \quad (5-26)$$

Berechnung der Wärmeleitwiderstände der Rohrleitung:

$$R_{Medium} = \frac{1}{2\pi\lambda_{Me}} \ln \frac{d_a}{d_i} \quad (5-27)$$

$$R_{iso} = \frac{1}{2\pi\lambda_{iso}} \ln \frac{d_{a_{iso}}}{d_a} \quad (5-28)$$

$$R_{Mantel} = \frac{1}{2\pi\lambda_{Ma}} \ln \frac{D_a}{d_{a_{iso}}} \quad (5-29)$$

Wärmeübertragungskoeffizient der Rohrleitungen:

$$k_1 = \frac{1}{R_{Medium} + R_{iso} + R_{Mantel}} \quad (5-30)$$

Mittlere Kanalhöhe:

$$h_{ka} = 2 \cdot D_a \quad (5-31)$$

Mittlere Kanalbreite:

$$b_{ka} = 2 \cdot D_a + C \quad (5-32)$$

Verlegeabstand C in Abhängigkeit des Außendurchmessers der Ummantelung:

$$C = D_a + 150 \text{ für } D_a < 225 \text{ mm} \quad (5-33)$$

$$C = D_a + 200 \text{ für } D_a \geq 225 \text{ mm} \quad (5-34)$$

Erdreichtemperatur in Tiefe der Rohrachse:

$$t_{aE;K} = (t_k - t_a) \cdot \frac{h}{h_K} + t_a \quad (5-35)$$

Wärmeleitwiderstand zwischen dem Kanal und dem Erdreich:

$$R_{erd;K} = \frac{1}{2\pi\lambda_E} \ln \left[\frac{2h}{d_f} + \sqrt{\left(\frac{2h}{d_f}\right)^2 - 1} \right] \quad (5-36)$$

Äquivalenter Vergleichsdurchmesser Kanal:

$$d_f = \sqrt{\frac{4 \cdot h_{Ka} \cdot b_{Ka}}{\pi}} \quad (5-37)$$

Wärmeleitwiderstand zwischen Kanalluft und Kanalwand:

$$R_A = \frac{1}{\alpha_g \cdot 2 (b_{Ka} + h_{Ka})} \quad (5-38)$$

Berechnung der Wärmeübergangszahl mit Strahlungseinfluss:

$$\alpha_g = 9,4 + 0,052 \cdot \left[\frac{\frac{t_{VL}}{2} + \frac{t_{RL}}{2} + t_a}{2} \right] \quad (5-39)$$

Wärmeleitwiderstand der Kanalwände:

$$R_K = \frac{d_K}{\lambda_{KaWa} \cdot 2 \cdot (b_{Ka} + h_{Ka})} \quad (5-40)$$

Wärmeübertragungskoeffizient Kanalluft/Erdoberfläche:

$$k_2 = \frac{1}{R_A + R_K + R_{erd;K}} \quad (5-41)$$

Berechnung der Temperatur der Kanalluft:

$$t_{Ka} = \frac{k_1 \cdot (t_{VL} + t_{RL}) + k_2 \cdot t_{aE;K}}{2 \cdot k_1 + k_2} \quad (5-42)$$

Spezifischer Wärmeverlust Rohrleitungen/Kanalluft:

$$q_{1;K} = k_1 \cdot (t_{VL} + t_{RL} - 2 \cdot t_{Ka}) \quad (5-43)$$

Spezifischer Wärmeverlust Kanalluft/Erdoberfläche:

$$q_{2;K} = k_2 \cdot (t_{Ka} - t_{aE;K}) \quad (5-44)$$

Spezifischer Wärmeverlust des Kanals:

$$q_{Kanal} = q_{2;K} \quad (5-45)$$

Wärmeverlust über die Länge des Kanals:

$$Q_{Kanal;Läng} = Q_{2;K} \cdot \frac{l_{1K}}{1000} \quad (5-46)$$

5.4.1.3 Wärmeverlustberechnung von direkt erdverlegten Rohrpaaren

Die Berechnung des Wärmeverlustes für direkt erdverlegte Rohrpaare erfolgt gemäß dem Berechnungsmodell und -gleichungen nach J. Mosler [25]. In **Tabelle 6** sind die Formelzeichen und Einheiten dokumentiert. Der Wärmeverlust wird als Summe des Wärmeverlustes aus der Vorlaufleitung (VL) und der Rücklaufleitung (RL) berechnet. Die Wärmeübertragung von der Außenoberfläche der Rohrleitungen an das umgebende Erdreich erfolgt durch Wärmeleitung.

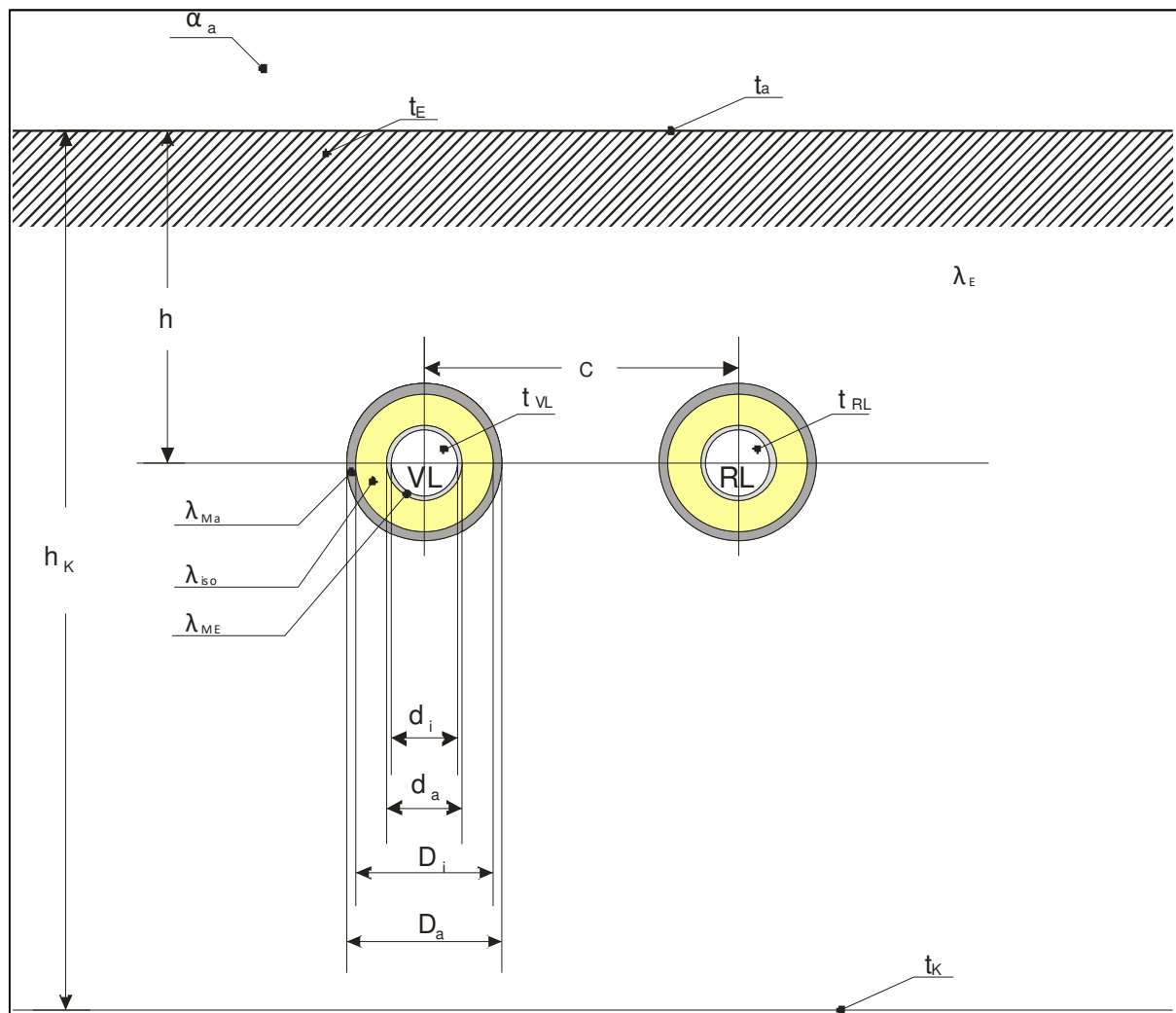


Bild 20 Direkt erdverlegtes Rohrpaar.

Tabelle 6 Formelzeichen, Bezeichnungen und Einheiten zur Berechnung des Wärmeverlustes von direkt erdverlegten Rohrpaaren.

Formelzeichen	Größe	Einheit []
C	Verlegeabstand zwischen den Rohrachsen	m
D _a	Außendurchmesser des Mantelrohres bzw. Ummantelung	m
d _a	Außendurchmesser des Mediumrohres	m
D _i	Außendurchmesser des Mantelrohres bzw. Ummantelung	m
d _i	Innendurchmesser des Mediumrohres	m
H	Verlegetiefe bezogen auf die Rohrachse	m
h _k	Erdreichtiefe mit gleichbleibender Temperatur t _k	m
K	Wärmedurchgangskoeffizient	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
L	Länge der Rohrleitung	m
Q _{VL+RL}	Wärmeverlust als Summe von Vorlauf und Rücklauf	W
q _{VL+RL}	Spezifischer Wärmeverlust als Summe von Vorlauf und Rücklauf	W·m ⁻¹
R _{duo}	Wärmeleitwiderstand zwischen Vor- und Rücklaufleitung	m·K·W ⁻¹
R _{erd}	Wärmeleitwiderstand des Erdreichs	m·K·W ⁻¹
R _{iso}	Wärmeleitwiderstand der Wärmedämmung	m·K·W ⁻¹
R _{Mantel}	Wärmeleitwiderstand der Ummantelung bzw. Mantelrohr	m·K·W ⁻¹
R _{Medium}	Wärmeleitwiderstand des Mediumrohres	m·K·W ⁻¹
s _{ME}	Wanddicke des Mediumrohres	m
s _{iso}	Stärke der Wärmedämmung	m
s _{Ma}	Wanddicke des Mantelrohres bzw. Ummantelung	m
t _a	Mittlere Lufttemperatur an der Erdoberfläche	°C
t _E	Erdreichtemperatur in Rohrachsentiefe	°C
t _k	Konstante Temperatur im Erdreich bei der Tiefe h _k	°C
t _{RL}	Mediumtemperatur Rücklaufleitung	°C
t _{VL}	Mediumtemperatur Vorlaufleitung	°C
λ _{Me}	Wärmeleitfähigkeit des Mediumrohres	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
λ _{iso}	Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
λ _{Ma}	Wärmeleitfähigkeit des Mantelrohres bzw. Ummantelung	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
λ _E	Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹

Berechnung der Wärmeleitwiderstände:

$$R_{\text{Medium}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{Me}}} \ln \frac{d_a}{d_i} \quad (5-47)$$

$$R_{\text{iso}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{iso}}} \ln \frac{D_i}{d_a} \quad (5-48)$$

$$R_{\text{Mantel}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{Ma}}} \ln \frac{D_a}{D_i} \quad (5-49)$$

$$R_{\text{erd}} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_E} \ln \left[\frac{4 \cdot (h + 0,0685 \cdot \lambda_E)}{D_a} \right] \quad (5-50)$$

$$R_{\text{duo}} = \frac{1}{4\pi\lambda_E} \ln \left\{ 1 + \frac{[2 \cdot (h + 0,0685 \cdot \lambda_E)]^2}{C^2} \right\} \quad (5-51)$$

Verlegeabstand zwischen den Rohrachsen:

$$C = D_a + 150 \text{ für } D_a < 225 \text{ mm} \quad (5-52)$$

$$C = D_a + 200 \text{ für } D_a \geq 225 \text{ mm} \quad (5-53)$$

Wärmedurchgangskoeffizient:

$$k = \frac{1}{R_{\text{Medium}} + R_{\text{iso}} + R_{\text{Mantel}} + R_{\text{erd}} + R_{\text{duo}}} \quad (5-54)$$

Erdreichtemperatur in Rohrachsentiefe:

$$t_E = (t_K - t_a) \cdot \frac{h}{h_K} + t_a \quad (5-55)$$

Gesamtwärmeverlust der Vorlauf- und Rücklaufleitung:

$$q_{\text{VL+RI}} = k \cdot (t_{\text{VL}} + t_{\text{RL}} - 2 \cdot t_E) \quad (5-56)$$

$$Q_{\text{VL+RL}} = q_{\text{VL+RL}} \cdot L \quad (5-57)$$

5.4.1.4 Wärmeverlustberechnung für direkt erdverlegte Doppelrohrsysteme

Die Berechnung des Wärmeverlustes für direkt erdverlegte Doppelrohrsysteme erfolgt nach den Gleichungen gemäß der Veröffentlichung von Petter Wellentén [26]. Die Herleitung der Gleichungen basieren auf der Anwendung der Multipolmethode. Über eine dimensionslose Wärmeleitfähigkeit und einen dimensionslosen Wärmedurchgangskoeffizienten erfolgt die Berechnung des Wärmeverluststroms.

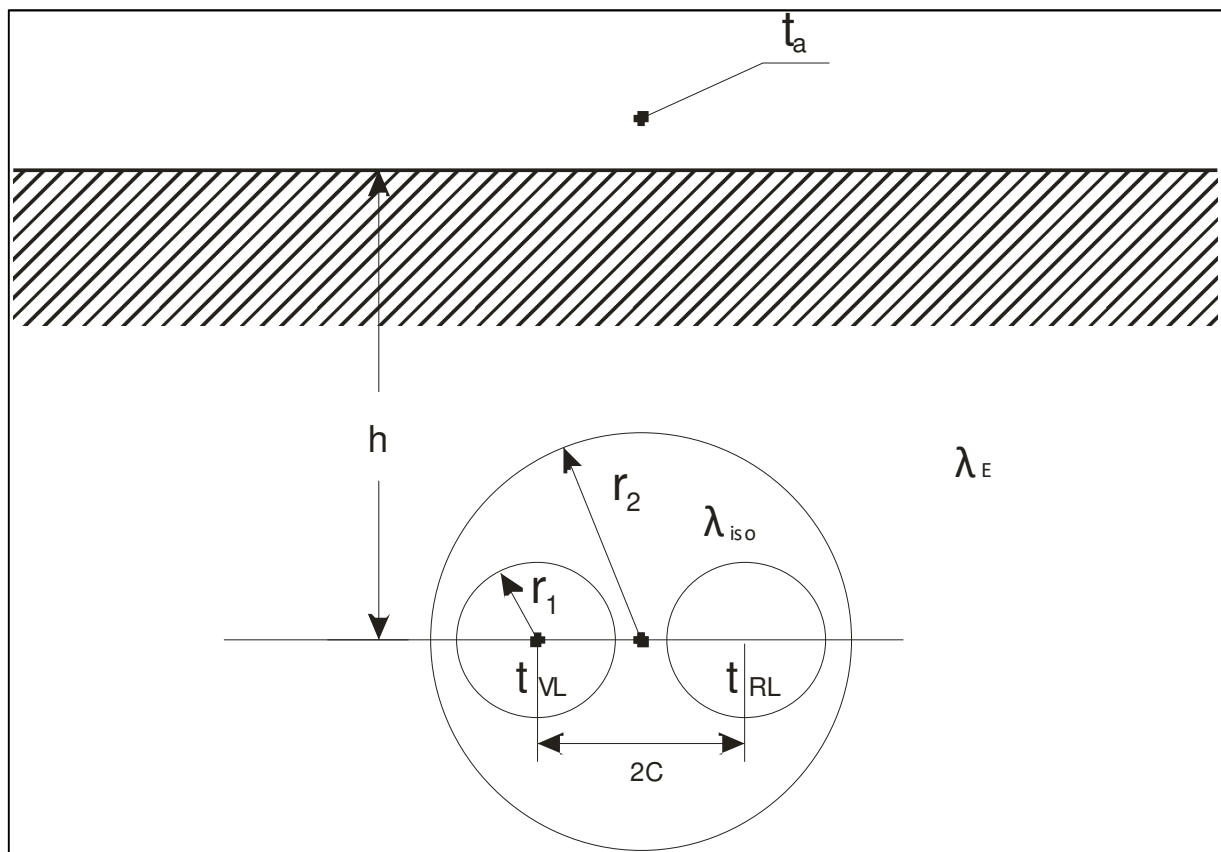


Bild 21 Direkt erdverlegtes Doppelrohrsystem.

Tabelle 7 Formelzeichen, Bezeichnungen und Einheiten zur Berechnung des Wärmeverlustes von erdverlegten Doppelrohrsystemen.

Formelzeichen	Größe	Einheit []
2C	Verlegeabstand zwischen den Rohrachsen	m
H	Verlegetiefe bis zur Rohrachse	m
h_a^{-1}	Asymmetrischer Wärmedurchlasskoeffizient	-
h_s^{-1}	Symmetrischer Wärmedurchlasskoeffizient	-
q_a	Asymmetrischer Wärmeverlust	$W \cdot m^{-1}$
q_{RL}	Wärmeverlust Rücklauf	$W \cdot m^{-1}$
q_s	Symmetrischer Wärmeverlust	$W \cdot m^{-1}$
q_{total}	Gesamter Wärmeverlust	$W \cdot m^{-1}$
q_{VL}	Wärmeverlust Vorlauf	$W \cdot m^{-1}$
r_1	Außenradius Mediumrohr	m
r_2	Innenradius Mantelrohr	m
t_a	Lufttemperatur an der Erdoberfläche	°C
t_{VL}	Mediumtemperatur Vorlaufleitung	°C
t_{RL}	Mediumtemperatur Rücklaufleitung	°C
γ	Dimensionsloser Wärmedurchgangskoeffizient	-
λ_{iso}	Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_E	Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
σ	Dimensionslose Wärmeleitfähigkeit	-

$$\sigma = \frac{\lambda_{iso} - \lambda_E}{\lambda_{iso} + \lambda_E} \quad (5-58)$$

$$\gamma = \frac{2 \cdot (1 - \sigma^2)}{1 - \sigma \left(\frac{r_2}{2h} \right)^2} \quad (5-59)$$

$$h_s^{-1} = 2 \frac{\lambda_{iso}}{\lambda_E} \ln \left(\frac{2h}{r_2} \right) + \ln \left(\frac{r_2^2}{2Cr_1} \right) + \sigma \ln \left(\frac{r_2^4}{r_2^4 - C^4} \right) - \frac{\left(\frac{r_1}{2C} - \frac{\sigma 2r_1 C^3}{r_2^4 - C^4} \right)^2}{1 + \left(\frac{r_1}{2C} \right)^2 + \sigma \left(\frac{2r_1 \cdot r_2^2 C}{r_2^4 - C^4} \right)^2} \quad (5-60)$$

$$h_a^{-1} = \ln \left(\frac{2C}{r_1} \right) + \sigma \ln \left(\frac{r_2^2 + C^2}{r_2^2 - C^2} \right) - \frac{\left(\frac{r_1}{2C} - \gamma \frac{Cr_1}{4h^2} + \frac{2\sigma r_1 r_2^2 C}{r_2^4 - C^4} \right)^2}{1 - \left(\frac{r_1}{2C} \right)^2 - \gamma \frac{r_1}{2h} + 2\sigma r_1^2 r_2^2 \cdot \frac{r_2^4 + C^4}{(r_2^4 - C^4)^2}} - \gamma \left(\frac{C}{2h} \right)^2 \quad (5-61)$$

$$q_s = \left(\frac{t_{VL} + t_{RL}}{2} - t_a \right) \cdot 2\pi \lambda_{iso} h_s \quad (5-62)$$

$$q_a = \left(\frac{t_{VL} - t_{RL}}{2} \right) \cdot 2\pi\lambda_{iso}h_a \quad (5-63)$$

$$q_{VL} = \dot{q}_s + \dot{q}_a \quad (5-64)$$

$$q_{RL} = \dot{q}_s - \dot{q}_a \quad (5-65)$$

$$q_{total} = \dot{q}_{VL} + \dot{q}_{RL} \quad (5-66)$$

5.4.2 Theoretische Untersuchung der Einflussparameter auf den Wärmeverlust erdverlegter Rohrsysteme

Der Wärmeverlust führt bei Freileitungen zu einer Erwärmung der Rohroberfläche und bei erdverlegten Wärmenetzen zu einer Erwärmung der Erdoberfläche über den wärmegeprägten Rohrleitungen. In der Praxis wird der Wärmeverlust von wärmegeprägten Rohrleitungen von mehreren Parametern beeinflusst. Diese Einflussparameter lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

In die äußeren Einflussparameter und in die systembezogenen Einflussparameter.

Die äußeren Einflussparameter beschreiben und definieren den Zustand der Umgebung in der sich eine wärmegeprägte Rohrleitung befindet. Sie sind orts- und zeitabhängig. Die systembezogenen Einflussparameter beschreiben den Einfluss der Materialeigenschaften und der Geometrie des wärmegeprägten Rohrsystems sowie den Betriebszustand in Bezug auf die Temperatur des Wärmeträgermediums auf den Wärmeverlust.

In den Berechnungsmodellen werden die äußeren und systembezogenen Einflussparameter berücksichtigt. Allerdings wird von einem stationären Zustand des Systems ausgegangen, so dass zeitliche Veränderungen der Einflussparameter nicht berücksichtigt werden.

Auf Basis des Berechnungsmodells für den Wärmeverlust eines direkt erdverlegten Rohrpaars des Systems Kunststoffmantelrohr der Dimension DN 200/315 wird der Einfluss der äußeren und systembezogenen Parameter auf den Wärmeverlust durch Variation untersucht.

Die Berechnungen des Wärmeverlustes werden mit den in **/Tabelle 8/** angegebenen Ausgangswerten durchgeführt. Zur Bestimmung des Einflusses auf den Wärmeverlust werden die Parameter, wie in **/Tabelle 9/** dargestellt, variiert.

Tabelle 8 Werte der Parameter zur Berechnung des Wärmeverlustes.

Parameter	Ausgangswerte
Mittlere Lufttemperatur an der Erdoberfläche t_a	10 °C
Erdreichtiefe mit gleichbleibender Temperatur h_k	7 m
Konstante Temperatur im Erdreich t_k	11 °C
Vorlauftemperatur t_{VL}	120 °C
Rücklauftemperatur t_{RL}	80 °C
Verlegetiefe bezogen auf die Rohrachse h	0,8 m
Mediumrohr aus Stahl λ_{Me}	50 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Wärmeleitfähigkeit des Mantelrohres bzw. Ummantelung aus Polyethylen λ_{Ma}	0,4 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung aus PUR-Hartschaum λ_{iso}	0,03 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs λ_E	1,2 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹

Tabelle 9 Variierte Parameter mit Angabe des Variationsbereichs.

Variable äußere Einflussparameter	Variationsbereich
Mittlere Lufttemperatur an der Erdoberfläche t_a	-6°C bis 8°C
Verlegetiefe bezogen auf die Rohrachse h	0,6 m bis 2 m
Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs λ_E	(0,8 bis 2,2) W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Variable systembezogene Einflussparameter	Variationsbereich
Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung λ_{iso}	(0,025 bis 0,06) W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Mediumtemperatur Vorlaufleitung/Rücklaufleitung t_{VL}/t_{RL}	(70/60 bis 140/95) °C
Dimension	DN 20/90 bis DN 600/800

5.4.2.1 Äußere Einflussparameter

Die Höhe des Wärmeverlustes von wärmedämmten Rohrleitungen wird von den folgenden äußeren Umgebungsbedingungen beeinflusst:

- Umgebungstemperatur,
- Verlegetiefe der wärmedämmten Rohrleitungen und
- Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs.

In den folgenden Bildern ist der spezifische Wärmeverlust als Funktion der variierten äußeren Einflussparameter dargestellt.

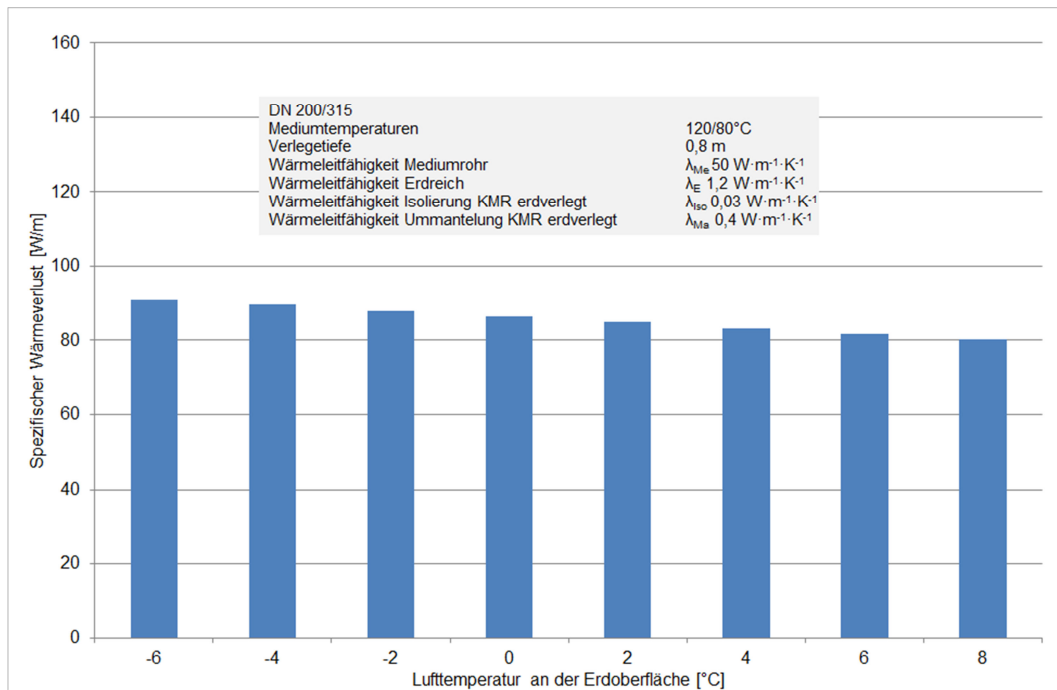


Bild 22 Einfluss der Lufttemperatur an der Erdoberfläche auf den Wärmeverlust.

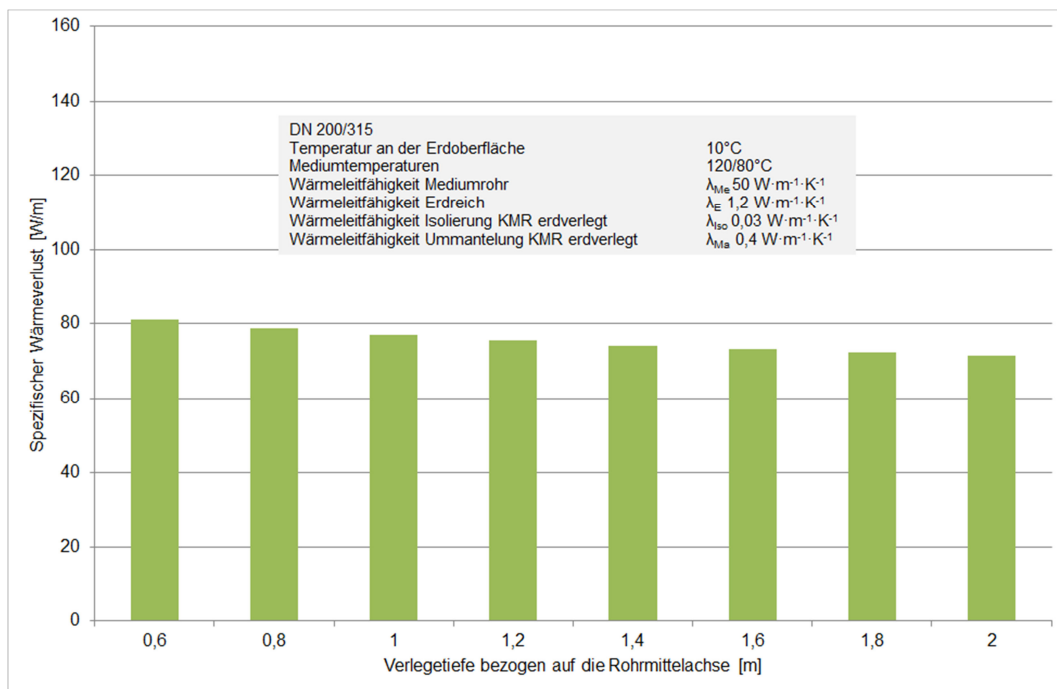


Bild 23 Einfluss der Verlegetiefe auf den Wärmeverlust.

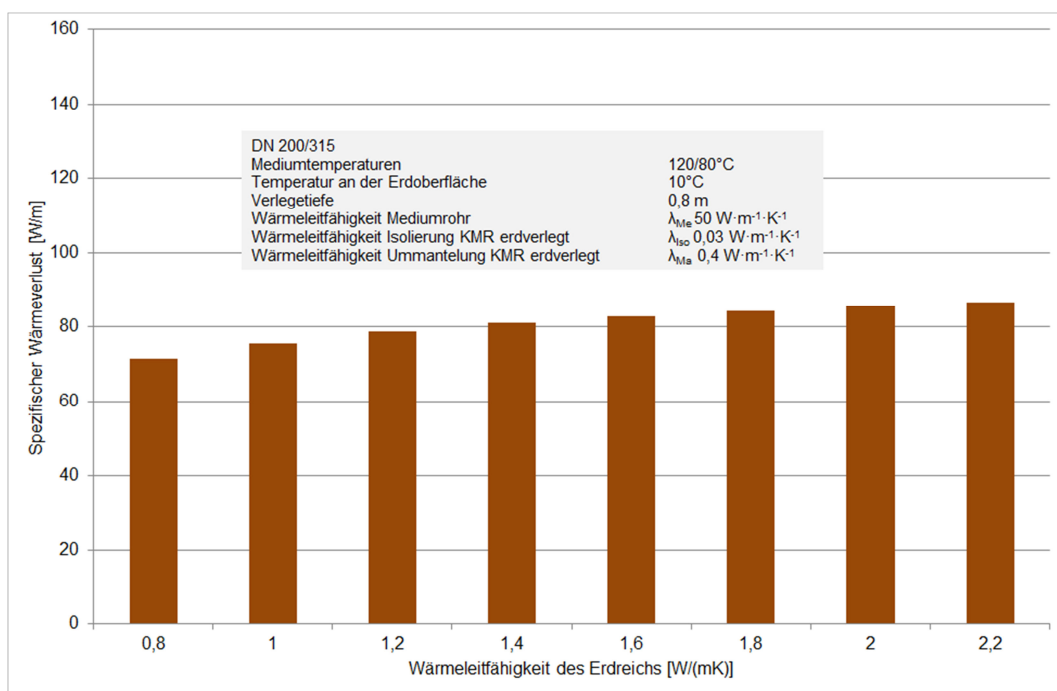


Bild 24 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs auf den Wärmeverlust.

Hohe Lufttemperaturen an der Erdoberfläche oder die Erwärmung der Erdoberfläche z.B. durch Sonneneinstrahlung führen zu einer Verringerung des Wärmeverluststroms. Ist die Erwärmung der Erdoberfläche witterungsbedingt zu groß, so wird der Wärmeverluststrom in Richtung der Erdoberfläche zu gering, um eine Temperatursignatur zu erzeugen.

Mit zunehmender Verlegetiefe wird der Wärmeverluststrom, der die Erdoberfläche erreicht, geringer. Bei größerer Verlegetiefe kann der Wärmeverluststrom zu gering sein, um eine messbare Temperatursignatur an der Erdoberfläche zu erzeugen. Dabei ist auch die Dimension der wärmegeprägten Rohrleitung sowie die Temperatur des Wärmeträgermediums entscheidend, ob sich auch bei größeren Verlegetiefen eine Temperatursignatur an der Erdoberfläche abbildet.

Der Wärmeverlust steigt mit Zunahme der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs. Die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs ist von der Zusammensetzung und von der Feuchtigkeit des Bodenmaterials abhängig. Feuchtigkeit gelangt witterungsbedingt oder durch defekte Rohrleitungen in das Erdreich. Die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs steigt mit zunehmender Feuchtigkeit und führt zu einer Erhöhung des Wärmeverlustes.

5.4.2.2 Systembezogene Einflussparameter

In der Praxis werden unterschiedliche wärmegeprägten Rohrsysteme eingesetzt. Die Systeme unterscheiden sich durch die Materialien aus denen sie gefertigt sind. Die Materialien weisen unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten auf und beeinflussen den Wärmeverlust. Zudem haben die Betriebstemperatur sowie die Dimension der wärmegeprägten Rohrleitungen einen Einfluss auf den Wärmeverlust.

In den folgenden Bildern ist der spezifische Wärmeverlust als Funktion der variierten systembezogenen Einflussparameter dargestellt.

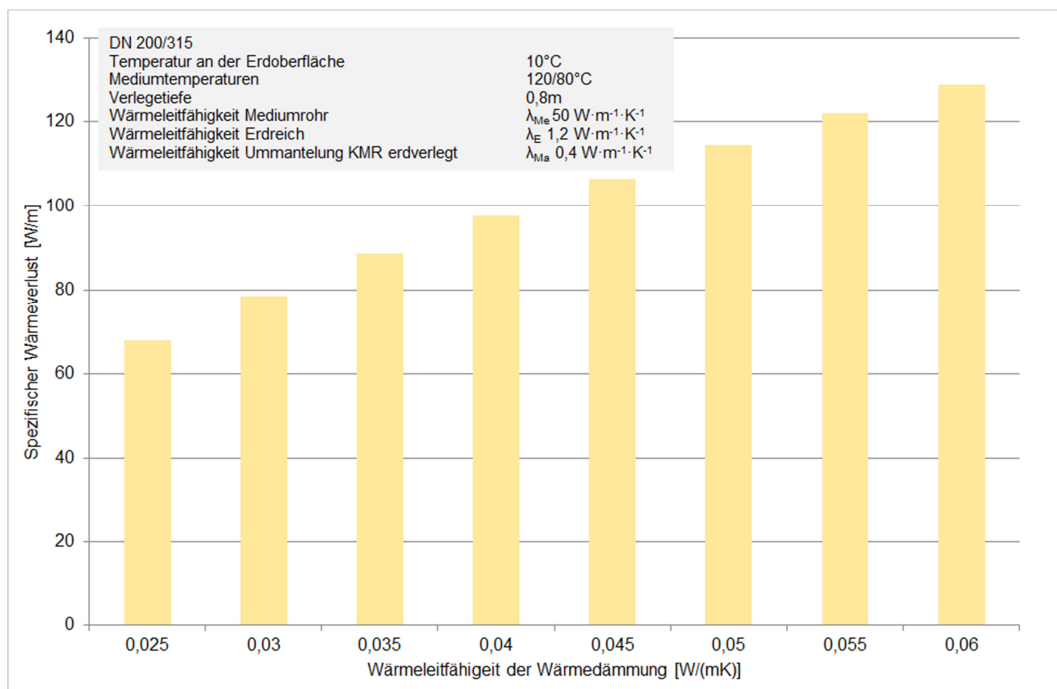


Bild 25 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung auf den Wärmeverlust des erdverlegten KMR-Paares.

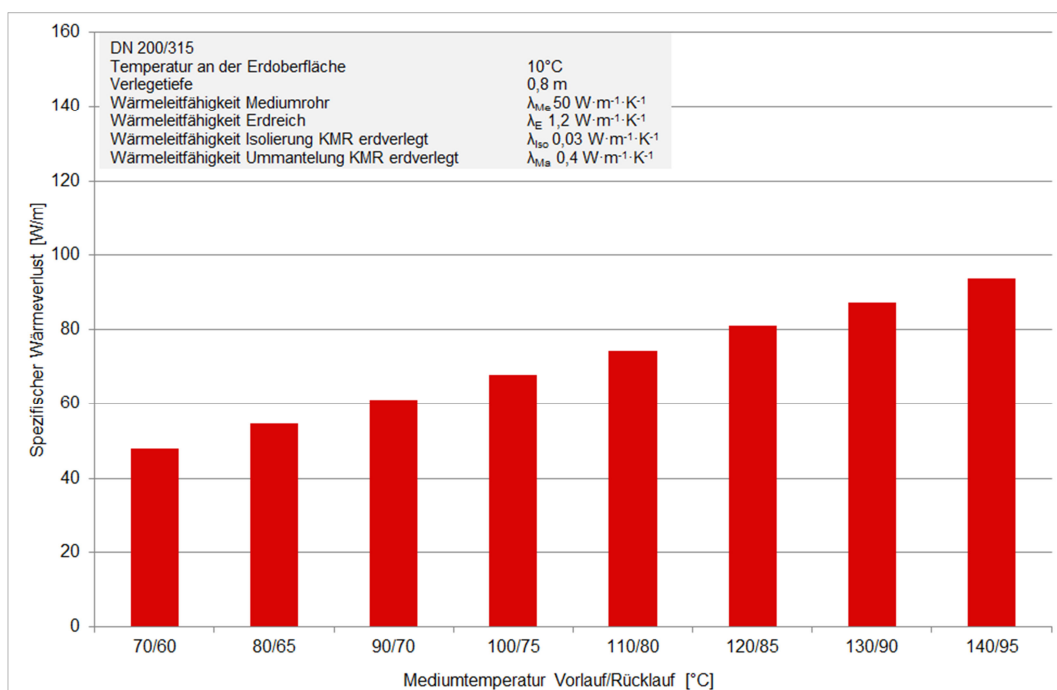


Bild 26 Einfluss der Mediumtemperaturen auf den Wärmeverlust des erdverlegten KMR-Paares.

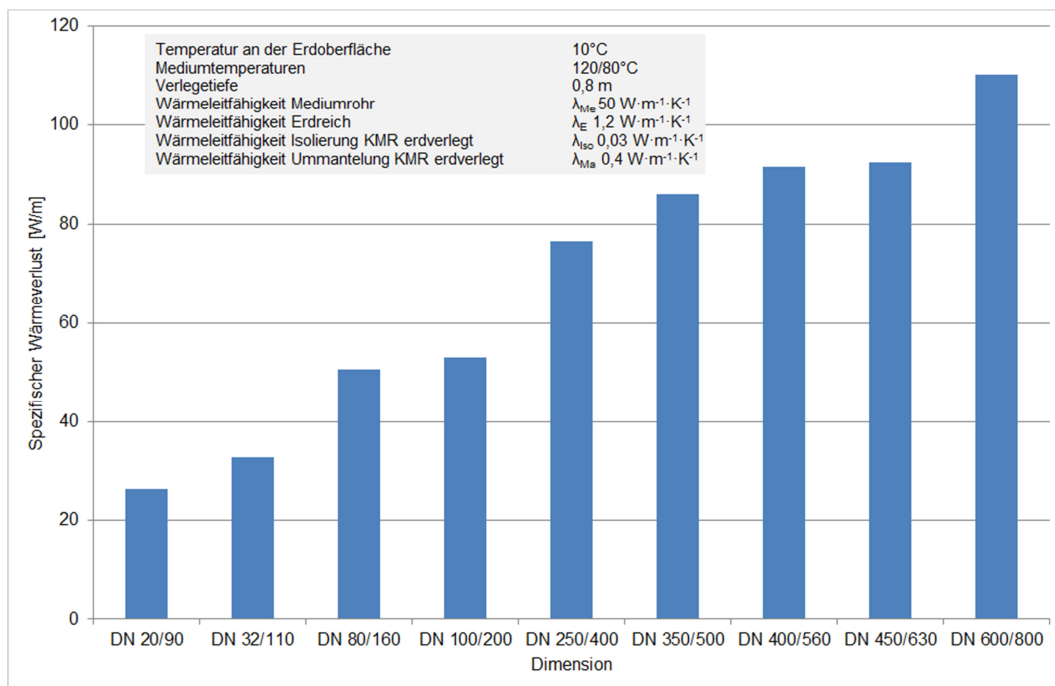


Bild 27 Einfluss der Dimension auf den Wärmeverlust des erdverlegten KMR-Paares.

Ein Ansteigen der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung führt zu einem Anstieg des Wärmeverlustes. Die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung kann sich durch Eindringen von Feuchtigkeit und durch Alterungseffekte während der Betriebszeit verändern. In Kanälen kann durch undichte Fugen Wasser eindringen und so die Wärmedämmung durchfeuchten. Leckagen im Mediumrohr führen bei allen Rohrsystemen zu einer Durchfeuchtung der Wärmedämmung.

Mit zunehmender Temperatur des Wärmeträgermediums steigt der Wärmeverlust. Die physikalische Ursache für den Wärmeverlust ist die Temperaturdifferenz zwischen dem Wärmeträgermedium und der Umgebung. Aufgrund der witterungsgeführten Betriebsweise der Wärmenetze wird die maximale Temperaturdifferenz in den Wintermonaten erreicht, da die Temperatur des Wärmeträgermediums in diesem Zeitfenster ein Maximum erreicht.

Wärme gedämmte Rohrsysteme weisen mit zunehmender Dimension einen größeren Wärmeverlust auf, da die Fläche für die Wärmeübertragung an die Umgebung größer wird.

5.4.2.3 Bewertung der Einflussparameter

Die Änderung der äußeren und systembezogenen Parameter beeinflussen den Wärmeverlust.

Der Wärmeverlust steigt:

- Mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit der Isolierung des Rohrsystems,
- mit Ansteigen der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs und
- mit zunehmender Mediumtemperatur.

Der Wärmeverlust sinkt:

- Mit zunehmender Verlegetiefe und
- mit ansteigender Temperatur an der Erdoberfläche.

Die Berechnung des Wärmeverlustes zeigt jedoch nicht, wie empfindlich der Wärmeverlust auf die Änderung der einzelnen Einflussparameter reagiert. Durch die Darstellung der prozentualen Änderung des Wärmeverlustes als Funktion der prozentualen Änderung der Einflussparameter wird eine Bewertung der Einflussparameter ermöglicht.

Die prozentuale Änderung der Einflussparameter erfolgt nach folgender Gleichung:

$$\Delta y = \left(\frac{x_n}{x_0} - 1 \right) 100\% \quad (5-67)$$

Δy Prozentuale Änderung des Parameters

x_0 Anfangswert

x_n Variierter Wert

Die Anfangs- und Endwerte für die durchgeführten Berechnungen sind in **/Tabelle 10/** dargestellt.

Tabelle 10 Variationsbereich der Einflussparameter.

Einflussparameter	Anfangswert	Endwert
Dimension	DN 20/90	DN 600/800
Mittlere Mediumtemperatur	65,0 °C	117,5 °C
Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung	0,025 Wm ⁻¹ K ⁻¹	0,060 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs	0,8 Wm ⁻¹ K ⁻¹	2,2 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Verlegetiefe	0,6 m	2,0 m
Umgebungstemperatur	-6 °C	+8 °C

Im folgenden **Bild 28** ist die prozentuale Änderung des Wärmeverlustes in Abhängigkeit der prozentualen Änderung der Einflussparameter dargestellt.

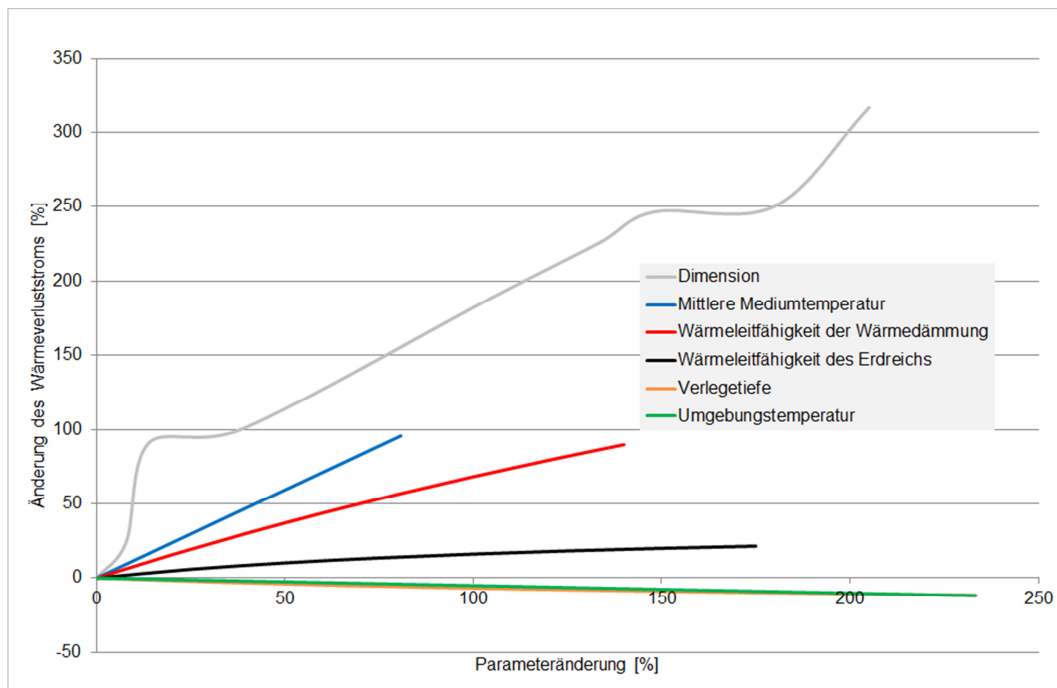


Bild 28 Einfluss der äußeren und systembezogenen Parameter auf den Wärmeverlust.

Die systembezogenen Parameter weisen den größten Einfluss auf den Wärmeverluststrom auf. Wärmedämmte Rohre größerer Dimension weisen deutlich höhere Wärmeverluste auf als wärmedämmte Rohre kleinerer Dimensionen. Zudem hat die Temperatur des Wärmeträgermediums einen großen Einfluss auf den Wärmeverlust. Die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung ändert sich in der Praxis nur geringfügig. Innerhalb einer Betriebszeit von 50 Jahren um etwa 30%, wenn keine Feuchtigkeit in die Wärmedämmung eingedrungen ist. Größere Verlegetiefen und höhere Umgebungstemperaturen führen zu einer Verringerung des Wärmeverluststroms.

5.5 Physikalische Grundlagen der Thermografie

Jeder Körper, der eine Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes von -273 °C aufweist, emittiert Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung. Die Strahlung, die außer von dem Material des strahlenden Körpers nur von der Temperatur abhängt, wird als Temperatur- oder Wärmestrahlung bezeichnet. Die Wärmestrahlung nimmt mit steigender Temperatur des Körpers zu. Die Energie der emittierten Wärmestrahlung entfällt auf einen Wellenlängenbereich von $0,35\text{ }\mu\text{m}$ bis $10\text{ }\mu\text{m}$ des elektromagnetischen Spektrums.

Die Temperatur und die Oberflächenbeschaffenheit und Material von Körpern haben einen Einfluss auf das Abstrahlverhalten. Körper, die elektromagnetische Strahlung aller Wellenlängen vollständig absorbieren, werden als ideale oder schwarze Strahler bezeichnet. Strahlungsverluste durch Reflexion und Transmission treten nicht auf. In der Praxis weisen Materialien aufgrund ihrer unterschiedlichen Beschaffenheit Strahlungsverluste auf. Der Emissionsgrad beschreibt das Verhältnis der Strahlungsleistung eines beliebigen Strahles zu der eines schwarzen Strahlers mit gleicher Fläche für den gleichen Wellenlängenbereich im gleichen Raumwinkel. Der Emissionsgrad gibt an, wie gut ein realer Strahler im Verhältnis zu einem schwarzen Strahler abstrahlen kann. Er ist abhängig vom Material, der Oberflächenbeschaffenheit, von der Temperatur und von der Wellenlänge. Viele nicht metallische Materialien weisen im langwelligen Spektralbereich unabhängig von der Oberflächenbeschaffenheit einen hohen und relativ konstanten Emissionsgrad auf /**Bild 29**/.

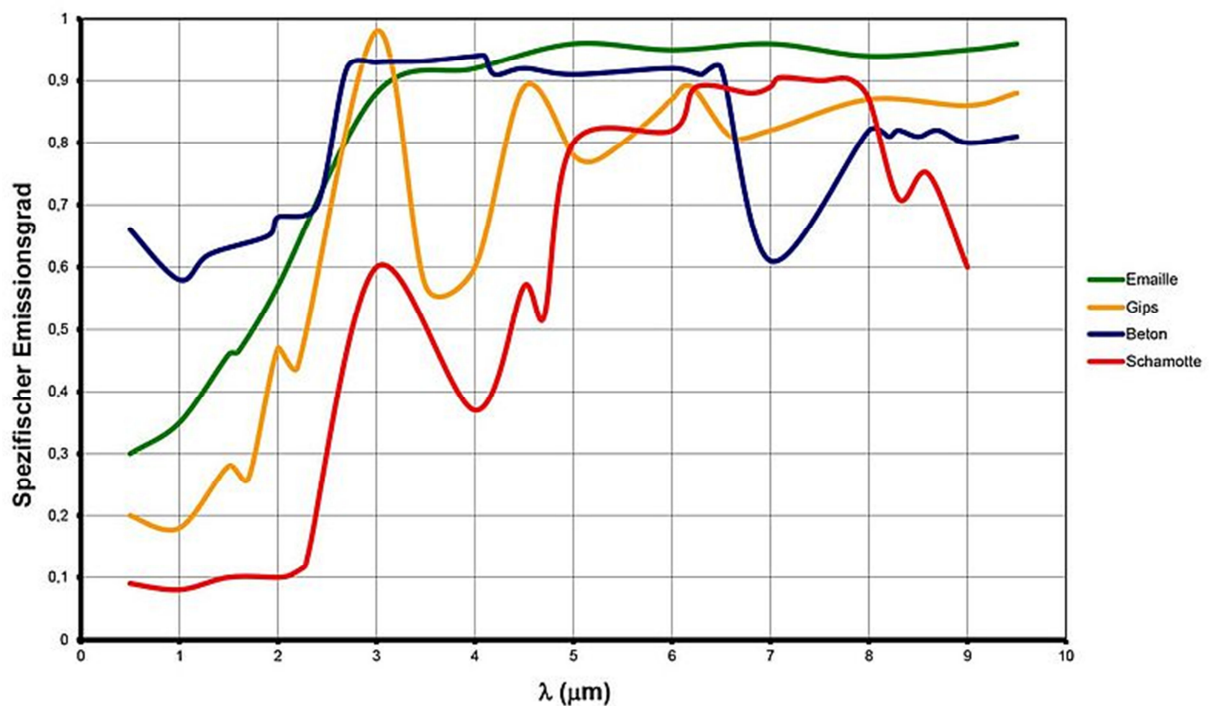


Bild 29 Emissionsgrade unterschiedlicher Materialien [27].

Durch die Atmosphäre kann die Wärmestrahlung abgeschwächt werden oder durch Eigenstrahlung das Ergebnis beeinflussen. Auf dem Weg durch die Atmosphäre werden Infrarotstrahlen absorbiert und gestreut. Das Maß der Dämpfung ist wellenlängenabhängig. Die wellenlängenabhängige Dämpfung der Strahlung wird durch den Transmissionsgrad definiert. Für bestimmte Wellenlängenbereiche weist die Atmosphäre einen hohen Transmissionsgrad, für andere Wellenlängenbereiche einen geringeren Transmissionsgrad auf /**Bild 30**/.

Im langwelligen Bereich zwischen 8 μm bis 14 μm ist die Dämpfung der Atmosphäre gering und relativ konstant. In diesem „atmosphärischen Fenster“ ist der Einfluss auf das Messergebnis gering.

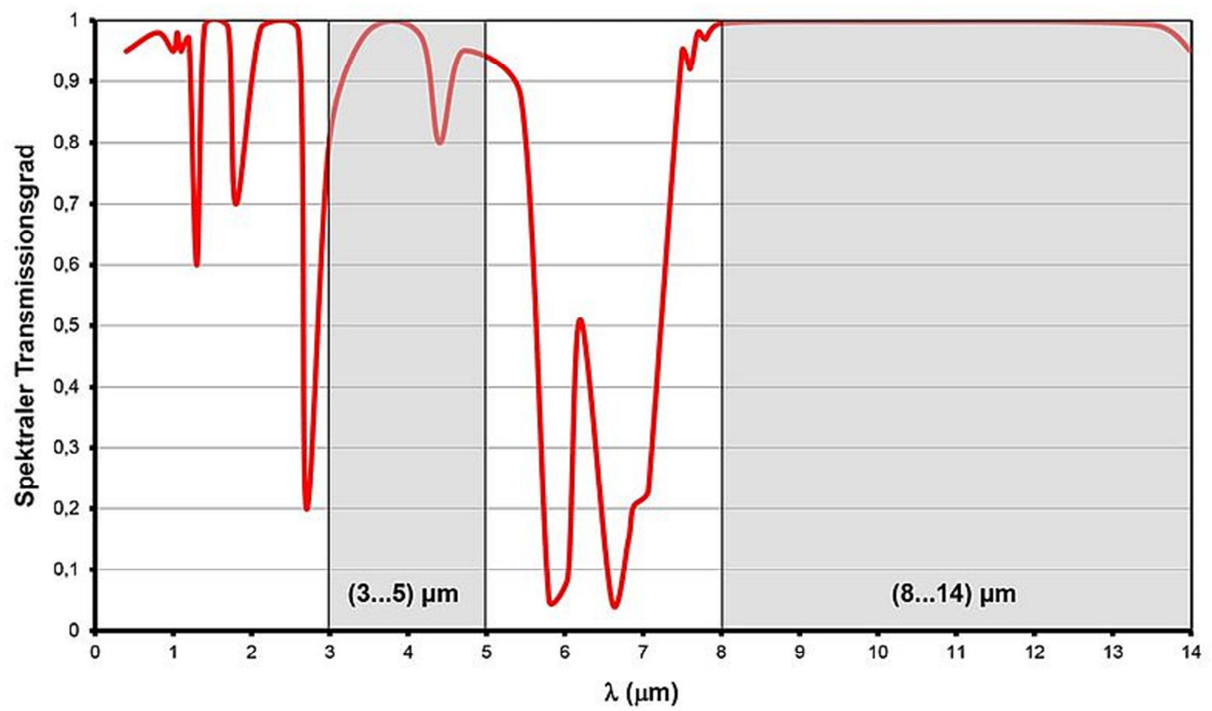


Bild 30 Spektraler Transmissionsgrad der Atmosphäre [27].

6. Praktische Umsetzung und Durchführung der Bearbeitungsschritte

6.1 Technische Spezifikation des Messsystems

Auf Basis eines Anforderungskatalogs und dem Stand der Technik hinsichtlich nötiger Sensoreigenschaften wie z.B. Bodenauflösung, Temperaturempfindlichkeit etc. und damit einhergehender Parameter für die Flugeinsatzplanung (Fluggeschwindigkeit, Bildaufnahmefrequenz etc.) ist ein drohnengestütztes Messsystem spezifiziert worden. Das Messsystem verfügt sowohl über einen optischen Sensor als auch über einen Infrarotsensor zusammengefasst in einem Kameragehäuse mit einem einzigen 3-Achskreisels zur Stabilisierung. Die optischen Bilder und die infraroten Bilder werden synchron erfasst und mit Zeitstempeln sowie Positionsinformationen (Global Navigation Satellite System, GNSS) versehen. Beide Kameras sind konstant zueinander orientiert. Die Akkus sind redundant und beheizbar, was Befliegungen bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt erleichtert. Die Drohne verfügt über Sensoren an Unterseite, Front und Heck zur Hinderniserfassung. Die technische Spezifikation der Kamera ist in **/Tabelle 11/** und die technische Spezifikation der Drohne in **/Tabelle 12/** dokumentiert.

Tabelle 11 Technische Spezifikation der Kamera.

Optische Kamera	DJI Zenmuse XT2 640 9Hz Radiometric
Wärmebildkamera	Ungekühltes VOx Mikrobolometer
FPA / Digitale Videoanzeige Formate	640 x 512
	336 x 256
Pixelabstand	17 µm
Spektralband	(7,5 - 13,5) µm
Bildwiederholrate	9 Hz
Empfindlichkeit (NEdt)	50 mK bei f/1.0
Aufnahmebandbreite (Hohe Verstärkung)	640 x 512: -25 °C bis 135 °C
Aufnahmebandbreite (Geringe Verstärkung)	-40 °C bis 550 °C
Speichermedium	Micro SD
Bildformat	TIFF (14 Bit), JPEG, R-JPEG (und Sequenzen in 8 und 14 Bit)

Tabelle 12 Technische Spezifikation der Drohne.

Typ	DJI Matrice 200 Quadrocopter
Schwebegenauigkeit (P-Modus mit GPS)	Vertikal: $\pm 0,5$ m oder $\pm 0,1$ m (abwärts gerichtetes Sichtsystem aktiv) Horizontal: $\pm 1,5$ m oder $\pm 0,3$ m (abwärts gerichtetes Sichtsystem aktiv)
Maximale Steiggeschwindigkeit	$5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Maximale Sinkgeschwindigkeit	$3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Maximale Flughöhe über den Meeresspiegel	3000 m
Maximaler Windwiderstand	$12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Betriebstemperatur	-20 °C bis 45 °C
Kompatibler Kreisel	Zenmuse XT2
Positionsbestimmung	GPS/GLONASS
Inertial measurement unit, (IMU) zur Stabilisierung des Fluggeräts	
Hinderniserkennung	

Die Drohne wird über ein Internetportal für ein Management-System registriert. In dem Portal werden Informationen zu allen Flugaktivitäten der Drohne gespeichert. Die gespeicherten Informationen beinhalten folgende Angaben:

A. Informationen über die Befliegung und über das drohnengestützte Messsystem:

- GPS-Daten,
- Datum, Ort und Zeit der Befliegung,
- Darstellung der Flugroute,
- Flugzeiten,
- Fluggeschwindigkeiten,
- Flughöhen,
- zurückgelegte Flugstrecken und
- Kontrolle der Akkus.

B. Informationen über das Wetter während der Befliegung:

- Lufttemperatur,
- Luftfeuchtigkeit,
- Windgeschwindigkeit,
- Windrichtung,
- Bewölkungsgrad und
- Sichtweite.

6.2 Identifizierung von Fluggebieten

Die Oberfläche über den Trassenabschnitten darf nicht durch starken Bewuchs, parkende Fahrzeuge, Bauwerke, etc. verdeckt sein. Aus diesem Grund werden Befliegungen nicht im innerstädtischen Bereich durchgeführt. Die identifizierten Gebiete unterscheiden sich durch die Verlegesysteme, Leitungsdurchmesser, der Bodenbeschaffenheit über den Trassenabschnitten sowie der Wärmeversorgungsstruktur **0**. Hinsichtlich des jeweiligen Trassenabschnittes werden nach Möglichkeit die folgenden Informationen bereitgestellt und dokumentiert:

- Leitungstyp und Dimension,
- Verlegetiefe,
- Vorlauf- und Rücklauftemperatur,
- GIS-Lagedaten (Verlegeplan) und
- Lageplan für Schachtbauwerke.

Tabelle 13 Identifizierte Fluggebiete mit Angaben zu den Verlegesystemen.

Ort	Datum/ Uhrzeit	Nahwärme/ Fernwärme	System
Hannover, Georgengarten	31.01.19 09:11 Uhr	Fernwärmenetz	Haubenkanal DN 500
Hannover, HCC Kleefelder Str.	15.02.19 08:17 Uhr	Fernwärmenetz	Haubenkanal DN 250 Haubenkanal DN 400
Hannover, Kugelfangtrift – Hägewiesen	15.02.19 07:10 Uhr	Fernwärmenetz	Kunststoffmantelrohr DN 250
Hannover, zwischen Stam- mestraße und Ritter-Brüning- Str.	19.03.19 06:30 Uhr	Fernwärmenetz	Winkelplattenkanal DN 200
Hannover, Karl-Wichert-Allee	20.03.19 06:21 Uhr	Fernwärmenetz	Kunststoffmantelrohr DN 300
Hannover, Am Annateich	20.03.19 07:12 Uhr	Fernwärmenetz	Kunststoffmantelrohr DN 25 Kunststoffmantelrohr DN 300
Hannover, Georgengarten	17.12.19 15:28 Uhr	Fernwärmenetz	Haubenkanal DN 500
Hannover, Lister Blick	19.12.19 07:53 Uhr	Nahwärmenetz	Kunststoffmantelrohr DN 100 Flexible Rohrleitung mit einem Mediumrohr aus Edelstahl DN 25
Hannover, Tischbeinstraße / Leistikowweg	05.02.20 07:30 Uhr	Fernwärmenetz	Winkelplattenkanal DN 50 Haubenkanal DN 80
Hannover, Tischbeinstraße / Lenbachstraße	05.02.20 07:52 Uhr	Fernwärmenetz	Winkelplattenkanal DN 65 Winkelplattenkanal DN 80 Winkelplattenkanal DN 100
Hannover, Gelände Kraftwerk Herren- hausen	01.04.19 07:58 Uhr	Fernwärmenetz	Freileitung als Stahlmantelrohr DN 500

6.3 Randbedingungen und Parameter

Die Flüge werden über die GPS-Programmierung und Steuerung vorab geplant und automatisiert durchgeführt.

Die Durchführung der Flüge erfolgt bei folgenden Witterungsbedingungen:

- Trockene Oberfläche über dem Leitungsabschnitt,
- die Außentemperatur beträgt weniger als 10 °C,
- die Windgeschwindigkeit sollte maximal 2 m/s betragen und
- es darf weder Regen noch Schnee präsent sein.

Die Flüge werden i.d.R. eine halbe Stunde vor Sonnenaufgang durchgeführt. In Wohngebieten werden die Bewohner mindestens drei Tage vor Durchführung der Flüge in einem Anschreiben informiert. Während der Befliegungen herrscht permanenter Sichtkontakt zu der Drohne.

Luftbilder liegen in Zentralprojektion vor. Dies bedingt Unterschiede im Vergleich zu Karten, die durch Höhenunterschiede des Geländes sowie die Aufnahmerichtung hervorgerufen werden. Orthobilder sind die verzerrungsfreie und maßstabsgetreue Darstellung von Luftbildern. Die Erstellung von Orthobildern aus den Luftbildern beruht auf der Bildorientierung und der Beschreibung der Geländeoberfläche in Form eines Digitalen Geländemodells (DGM), die Erstellung wird mit Hilfe einer Software realisiert.

Die Auflösung bzw. die Qualität der Orthobilder wird durch die Boden Pixel Auflösung (Ground Sampling Distance = GSD) beeinflusst.

$$GSD = \frac{\text{Flughöhe [m]}}{\text{Brennweite [mm]}} \times \text{Kantenlänge eines Pixels [mm]} \quad (6-1)$$

Die Befliegungen erfolgen in einer Flughöhe von 40 m mit einer Fluggeschwindigkeit von 3,5 m/s. Der Emissionsfaktor der Wärmebildkamera beträgt 0,95.

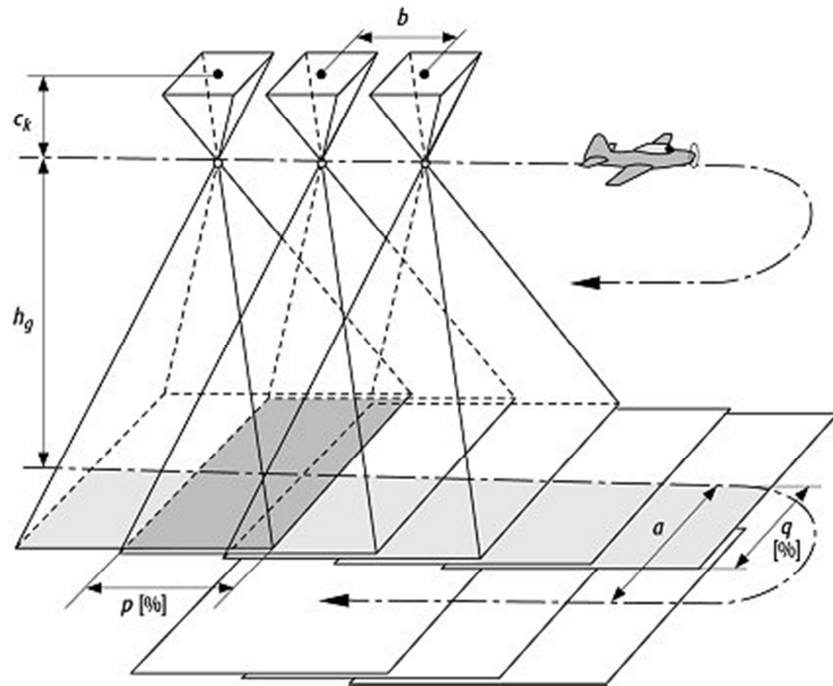


Bild 31 Bildüberdeckung: Längsüberdeckung in Flugrichtung p ; Überdeckung benachbarter Bilder (Querüberdeckung) q ; a = Abstand der Flugtrasse; b = Aufnahmebasis [28].

6.4 Visuelle Zustandserfassung der Trassenabschnitte in den Fluggebieten

Die Zustandserfassung erfolgt durch optische Bilder (RGB-Bilder) und durch Infrarot- bzw. Thermalbilder. Beide Bilder stellen denselben Bildausschnitt dar. Die Thermalbilder werden mit einer Software photogrammetrisch zu einem thermographischen Orthomosaik konvertiert. Aufgrund der geringen Genauigkeit des verwendeten globalen Navigationssatellitensystems (GNSS) und der Tatsache, dass keine Passpunkte verwendet wurden, bestehen Differenzen zu den GIS-Daten, die die Position der Fernwärmeleitungen angeben. Diese Differenzen werden manuell korrigiert. Anschließend erfolgt die Darstellung der Trassenabschnitte einschließlich möglicher Veränderungen.

In den folgenden Abschnitten sind für die durchgeführten Flüge die RGB-Bilder und die orthogonalen Thermalbilder ohne und mit dem Trassenverlauf dargestellt. Die Trassenparameter, Witterungsbedingungen und Angaben zu den Einstellungen des Messsystems sind in den nachfolgenden Tabellen dokumentiert.

Hannover, Georgengarten (31-01-2019)

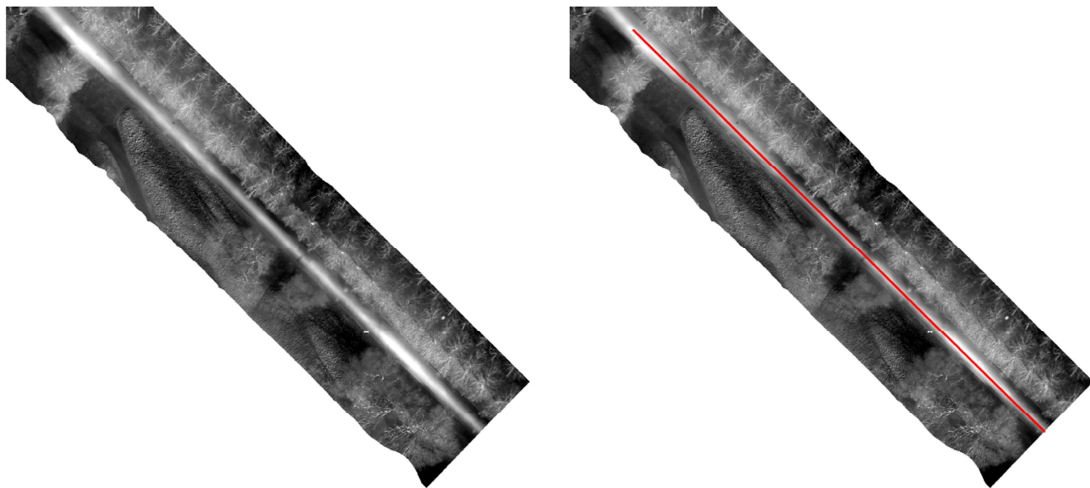


Bild 32 Orthogonale Thermalbilder: Hannover, Georgengarten; rechts mit Darstellung des Trassenverlaufs.

Tabelle 14 Dokumentation der Trassenparameter, Witterungsbedingungen und Angaben zu den Einstellungen des Messsystems.

Ort, Straße	Hannover, Georgengarten
Datum der Befliegung	31.01.2019
Uhrzeit der Befliegung	09:11 Uhr
Emissionsfaktor [%]	0,95
Einstellung Bildüberlappung [%]	85/85
Flughöhe [m]	40
GSD Wärmebildkamera [cm]	5,2
GSD Optische Kamera [cm]	0,96
Fluggeschwindigkeit [m/s]	6,4
Lufttemperatur [°C]	0
Luftfeuchtigkeit [%]	72
Luftdruck [hPa]	1004
Windgeschwindigkeit [m/s]	3
Länge der Flugstrecke [m]	850
Verlegesystem und Rohrdimension	Haubenkanal DN 500
Mediumtemperatur Vorlauf/Rücklauf [°C]	95/58
Verlegetiefe [m]	1,6

HCC Hannover, Kleefelder Straße



Bild 33 RGB-Bild HCC-Hannover.



Bild 34 Orthogonale Thermalbilder: HCC Hannover, Kleefelder Str.; rechts mit Darstellung des Trassenverlaufs.

Tabelle 15 Dokumentation der Trassenparameter, Witterungsbedingungen und Angaben zu den Einstellungen des Messsystems.

Ort, Straße	Hannover HCC, Kleefelder Straße
Datum der Befliegung	15.02.2019
Uhrzeit der Befliegung	08:17 Uhr
Emissionsfaktor [%]	0,95
Einstellung Bildüberdeckung [%]	85/85
Flughöhe [m]	40
GSD Wärmebildkamera [cm]	5,2
GSD Optische Kamera [cm]	0,96
Fluggeschwindigkeit [m/s]	10,7
Lufttemperatur [°C]	-2,3
Luftfeuchtigkeit [%]	98
Luftdruck [hPa]	1034
Windgeschwindigkeit [m/s]	0,2
Länge der Flugstrecke [m]	1386
Verlegesystem und Rohrdimension	Haubenkanal DN 250 Haubenkanal DN 400
Mediumtemperatur Vorlauf/Rücklauf [°C]	95/58
Verlegetiefe [m]	0,8 bis 1,0

Hannover, Kugelfangtrifft/Hägewiesen



Bild 35 RGB-Bild Hannover, Kugelfangtrifft/Hägewiesen.



Bild 36 Orthogonale Thermalbilder: Hannover, Kugelfangtrifft/Hägewiesen.; rechts mit Darstellung des Trassenverlaufs.

Tabelle 16 Dokumentation der Trassenparameter, Witterungsbedingungen und Angaben zu den Einstellungen des Messsystems.

Ort, Straße	Hannover, Kugelfangtrifft/Hägewiesen
Datum der Befliegung	15.02.2019
Uhrzeit der Befliegung	07:10 Uhr
Emissionsfaktor [%]	0,95
Einstellung Bildüberlappung [%]	85/85
Flughöhe [m]	40
GSD Wärmebildkamera [cm]	5,2
GSD Optische Kamera [cm]	0,96
Fluggeschwindigkeit [m/s]	9,1
Lufttemperatur [°C]	-2,1
Luftfeuchtigkeit [%]	95
Luftdruck [hPa]	1034
Windgeschwindigkeit [m/s]	0,1
Länge der Flugstrecke [m]	1076
Verlegesystem und Rohrdimension	Kunststoffmantelrohr DN 250
Mediumtemperatur Vorlauf/Rücklauf [°C]	98/59
Verlegetiefe [m]	0,6 bis 1,0

Hannover zwischen Stammestraße und Ritter-Brüning-Str.

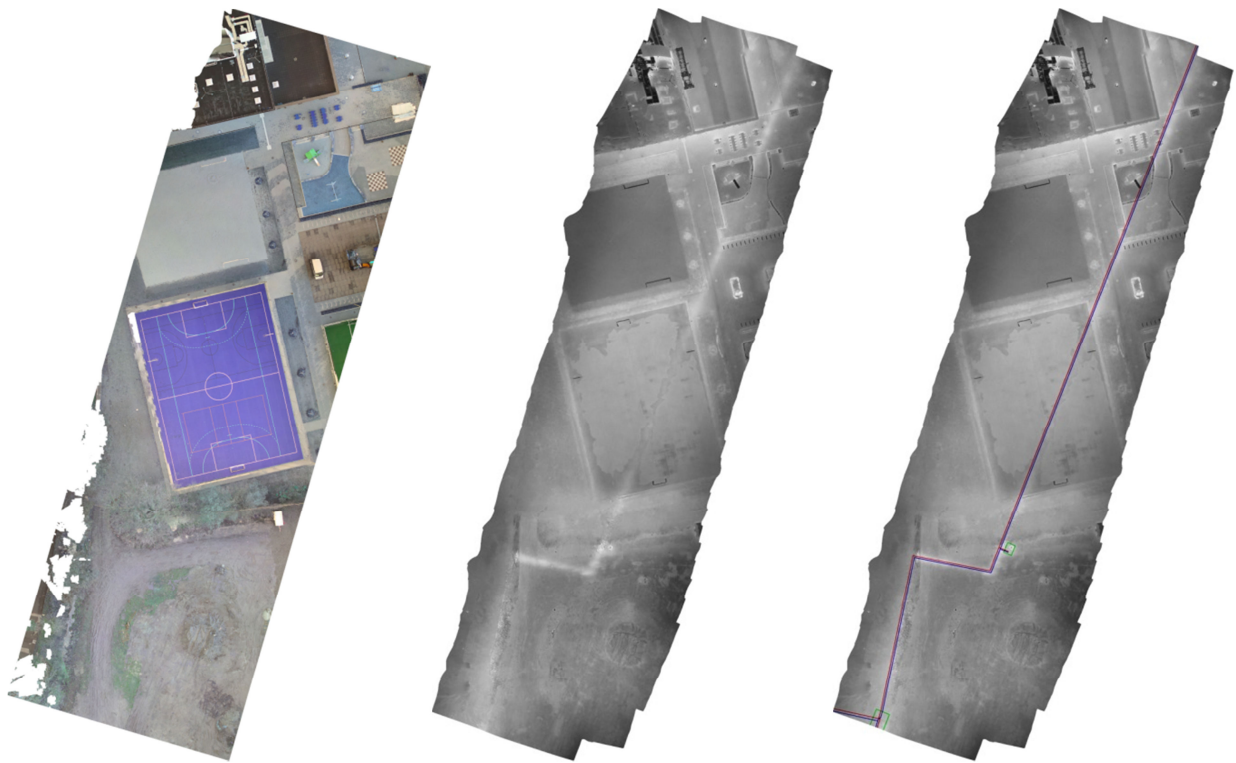


Bild 37 Links: RGB-Bild; Mitte: Orthogonales Thermalbild; Rechts: Orthogonales Thermalbild mit Trassenverlauf.

Dokumentation der Trassenparameter, Witterungsbedingungen und Angaben zu den Einstellungen des Messsystems.

Ort, Straße	Hannover zwischen Stammestraße und Ritter-Brüning-Str.
Datum der Befliegung	19.03.2019
Uhrzeit der Befliegung	06:30 Uhr
Emissionsfaktor [%]	0,95
Einstellung Bildüberlappung [%]	85/85
Flughöhe [m]	40
GSD Wärmebildkamera [cm]	5,2
GSD Optische Kamera [cm]	0,96
Fluggeschwindigkeit [m/s]	6,7
Lufttemperatur [°C]	2,1
Luftfeuchtigkeit [%]	87
Luftdruck [hPa]	1025
Windgeschwindigkeit [m/s]	3,0
Länge der Flugstrecke [m]	435
Verlegesystem und Rohrdimension	Winkelplattenkanal DN 200
Mediumtemperatur Vorlauf/Rücklauf [°C]	100/65
Verlegetiefe [m]	0,5

Hannover, Karl-Wichert-Allee

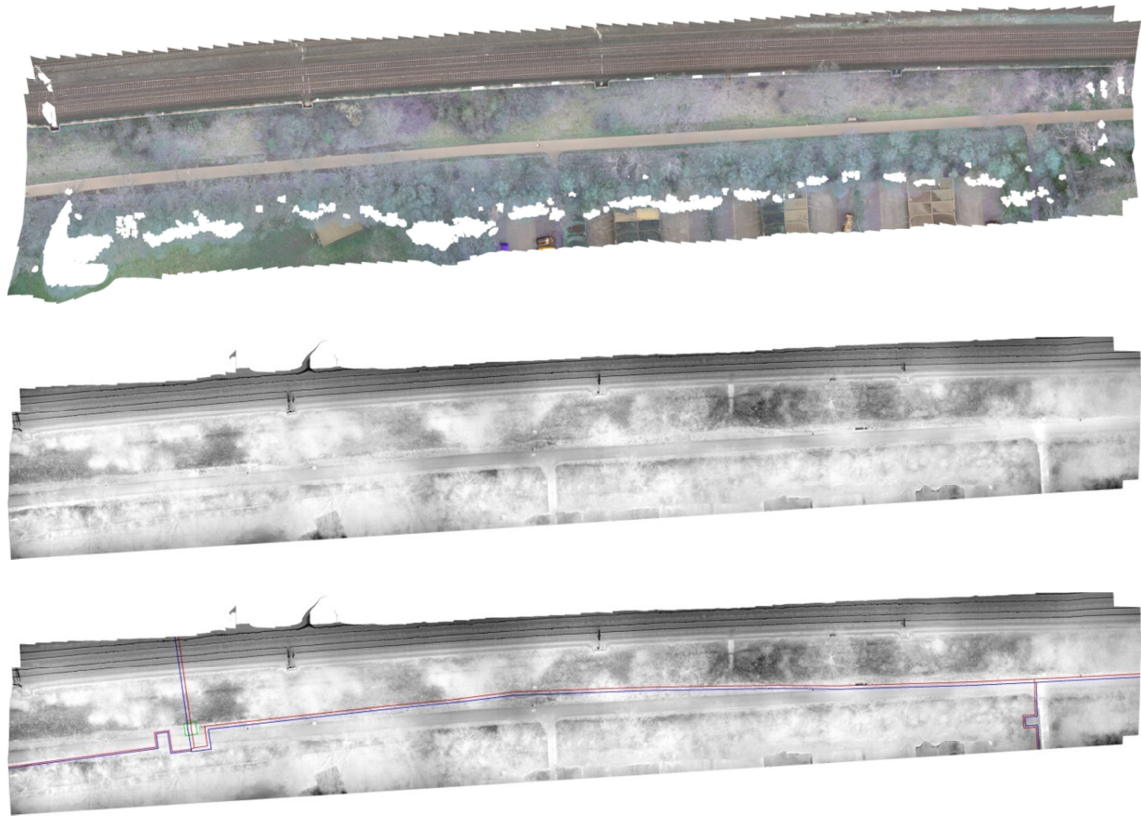


Bild 38 Oben: RGB-Bild; Mitte: Orthogonales Thermalbild; Unten: Orthogonales Thermalbild mit Trassenverlauf.

Tabelle 17 Dokumentation der Trassenparameter, Witterungsbedingungen und Angaben zu den Einstellungen des Messsystems.

Ort, Straße	Hannover, Karl-Wichert-Allee
Datum der Befliegung	20.03.2019
Uhrzeit der Befliegung	06:21 Uhr
Emissionsfaktor [%]	0,95
Einstellung Bildüberlappung [%]	85/85
Flughöhe [m]	40
GSD Wärmebildkamera [cm]	5,2
GSD Optische Kamera [cm]	0,96
Fluggeschwindigkeit [m/s]	10,0
Lufttemperatur [°C]	1,5
Luftfeuchtigkeit [%]	79
Luftdruck [hPa]	1032
Windgeschwindigkeit [m/s]	0,6
Verlegesystem und Rohrdimension	Kunststoffmantelrohr DN 300
Mediumtemperatur Vorlauf/Rücklauf [°C]	90/60
Verlegetiefe [m]	0,8 bis 1,0

Hannover, Am Annateich



Bild 39 RGB-Bild Hannover, Am Annateich.

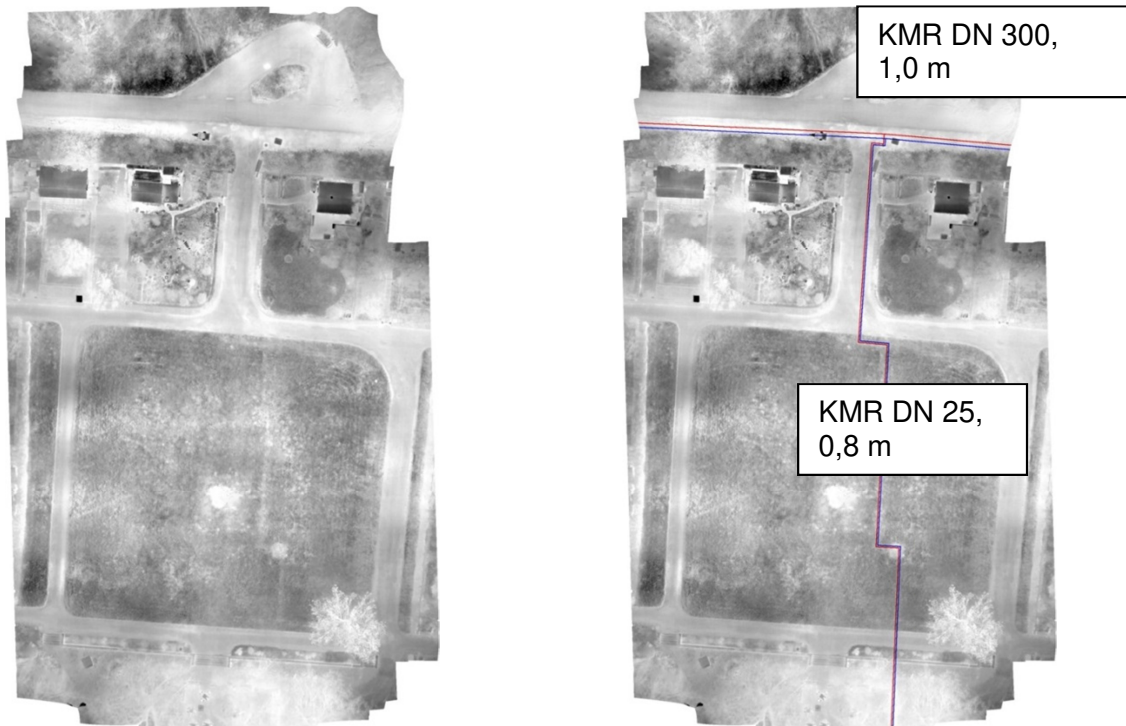


Bild 40 Orthogonale Thermalbilder: Hannover, Am Annateich; rechts mit Darstellung des Trassenverlaufs.

Tabelle 18 Dokumentation der Trassenparameter, Witterungsbedingungen und Angaben zu den Einstellungen des Messsystems.

Ort, Straße	Hannover, Am Annateich
Datum der Befliegung	20.03.2019
Uhrzeit der Befliegung	07:12 Uhr
Emissionsfaktor [%]	0,95
Einstellung Bildüberlappung [%]	85/85
Flughöhe [m]	40
GSD Wärmebildkamera [cm]	5,2
GSD Optische Kamera [cm]	0,96
Fluggeschwindigkeit [m/s]	9,3
Lufttemperatur [°C]	1,3
Luftfeuchtigkeit [%]	81
Luftdruck [hPa]	1033
Windgeschwindigkeit [m/s]	0,6
Länge der Flugstrecke [m]	1043
Verlegesystem und Rohrdimension	Kunststoffmantelrohr DN 25 Kunststoffmantelrohr DN 300
Mediumtemperatur Vorlauf/Rücklauf [°C]	90/60
Verlegetiefe [m]	0,8 bis 1

Hannover, Georgengarten (17-12-2019)

Der Trassenabschnitt wird tagsüber bei einer Umgebungstemperatur von 11,7 °C befliegen, um zu untersuchen ob eine Temperatursignatur messbar ist.



Bild 41 RGB-Bild: Hannover, Georgengarten.

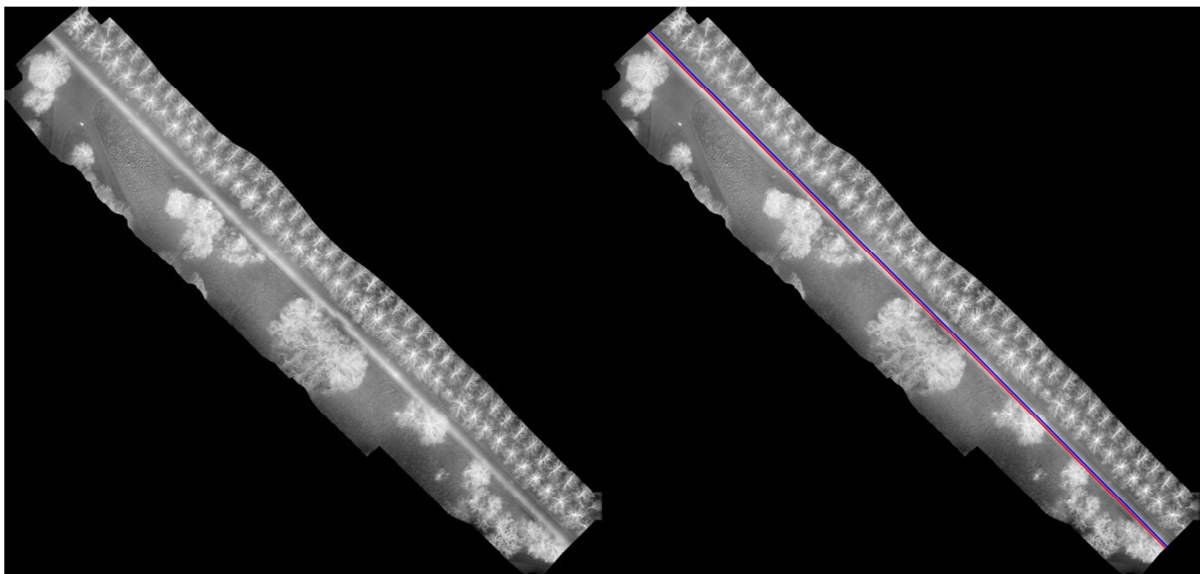


Bild 42 Orthogonale Thermalbilder: Hannover, Georgengarten; rechts mit Darstellung des Trassenverlaufs.

Tabelle 19 Dokumentation der Trassenparameter, Witterungsbedingungen und Angaben zu den Einstellungen des Messsystems.

Ort, Straße	Hannover, Georgengarten
Datum der Befliegung	17.12.2019
Uhrzeit der Befliegung	15:28 Uhr
Emissionsfaktor [%]	0,95
Einstellung Bildüberlappung [%]	85/85
Flughöhe [m]	40
GSD Wärmebildkamera [cm]	5,2
GSD Optische Kamera [cm]	0,96
Fluggeschwindigkeit [m/s]	6,4
Lufttemperatur [°C]	11,7
Luftfeuchtigkeit [%]	72
Luftdruck [hPa]	1004
Windgeschwindigkeit [m/s]	4,1
Länge der Flugstrecke [m]	1066
Verlegesystem und Rohrdimension	Haubenkanal DN 500
Mediumtemperatur Vorlauf/Rücklauf [°C]	95/58
Verlegetiefe [m]	1,6

Hannover, „Nahwärme Lister Blick“

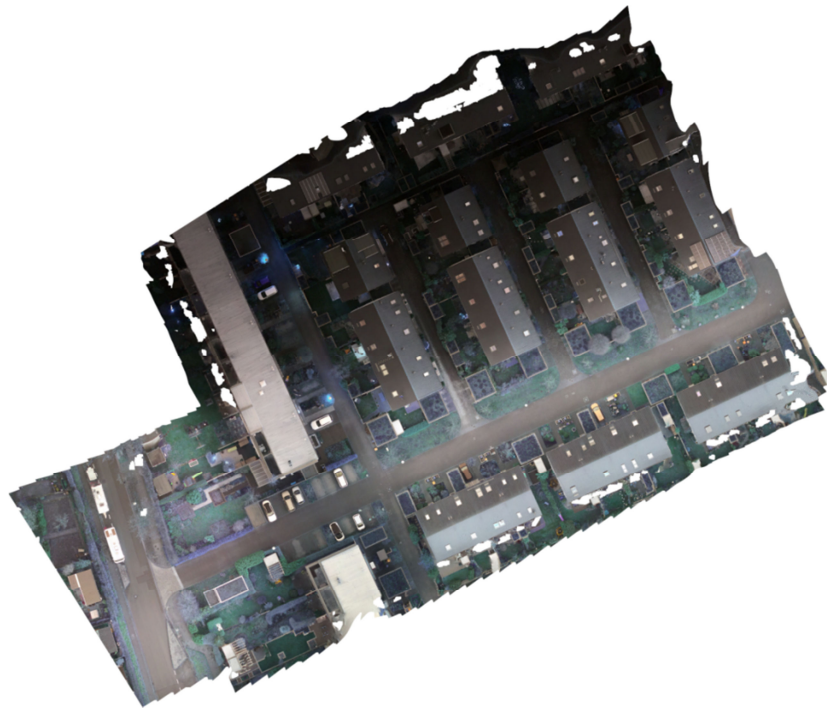


Bild 43 GRB-Bild: Hannover, Nahwärme Lister Blick.

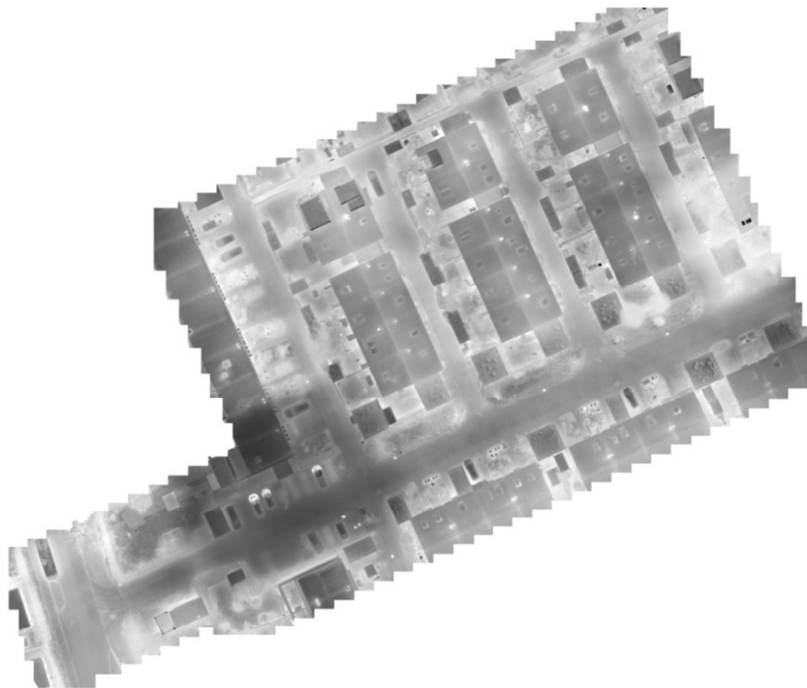


Bild 44 Orthogonales Thermalbild: Hannover, Nahwärme Lister Blick.

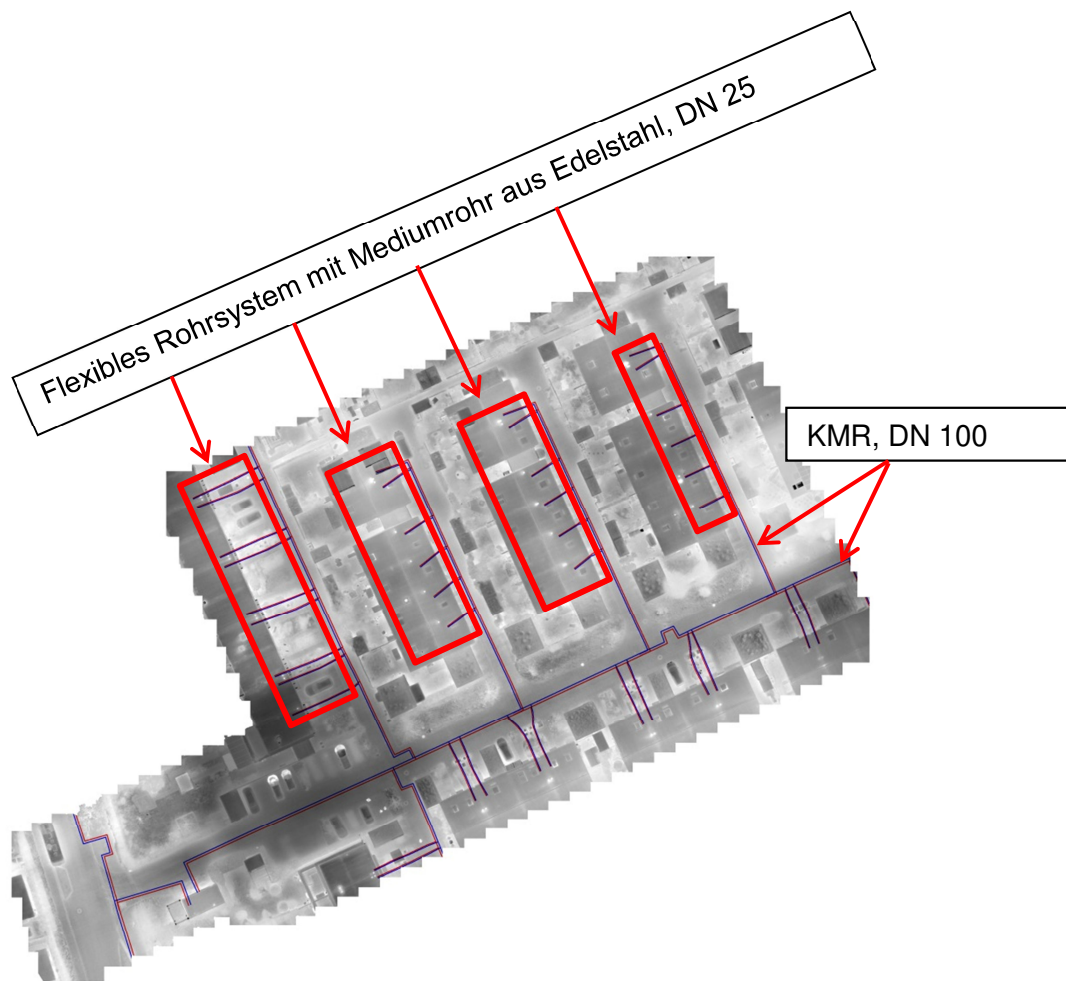


Bild 45 Orthogonales Thermalbild mit Trassenverlauf: Hannover, Nahwärme Lister Blick.

Tabelle 20 Dokumentation der Trassenparameter, Witterungsbedingungen und Angaben zu den Einstellungen des Messsystems.

Ort, Straße	Hannover, „Nahwärme Lister Blick“
Datum der Befliegung	19.12.2019
Uhrzeit der Befliegung	07:53 Uhr
Emissionsfaktor [%]	0,95
Einstellung Bildüberlappung [%]	85/85
Flughöhe [m]	40
GSD Wärmebildkamera [cm]	5,2
GSD Optische Kamera [cm]	0,96
Fluggeschwindigkeit [m/s]	10,9
Lufttemperatur [°C]	6,6
Luftfeuchtigkeit [%]	96
Luftdruck [hPa]	1015
Windgeschwindigkeit [m/s]	3,7
Länge der Flugstrecke [m]	1205
Verlegesystem und Rohrdimension	KMR DN 100 Flexibles Rohrsystem mit Mediumrohr aus Edelstahl DN 25
Mediumtemperatur Vorlauf/Rücklauf [°C]	~80/~60
Verlegetiefe [m]	1,0

Hannover, Tischbeinstraße/Leistikowweg

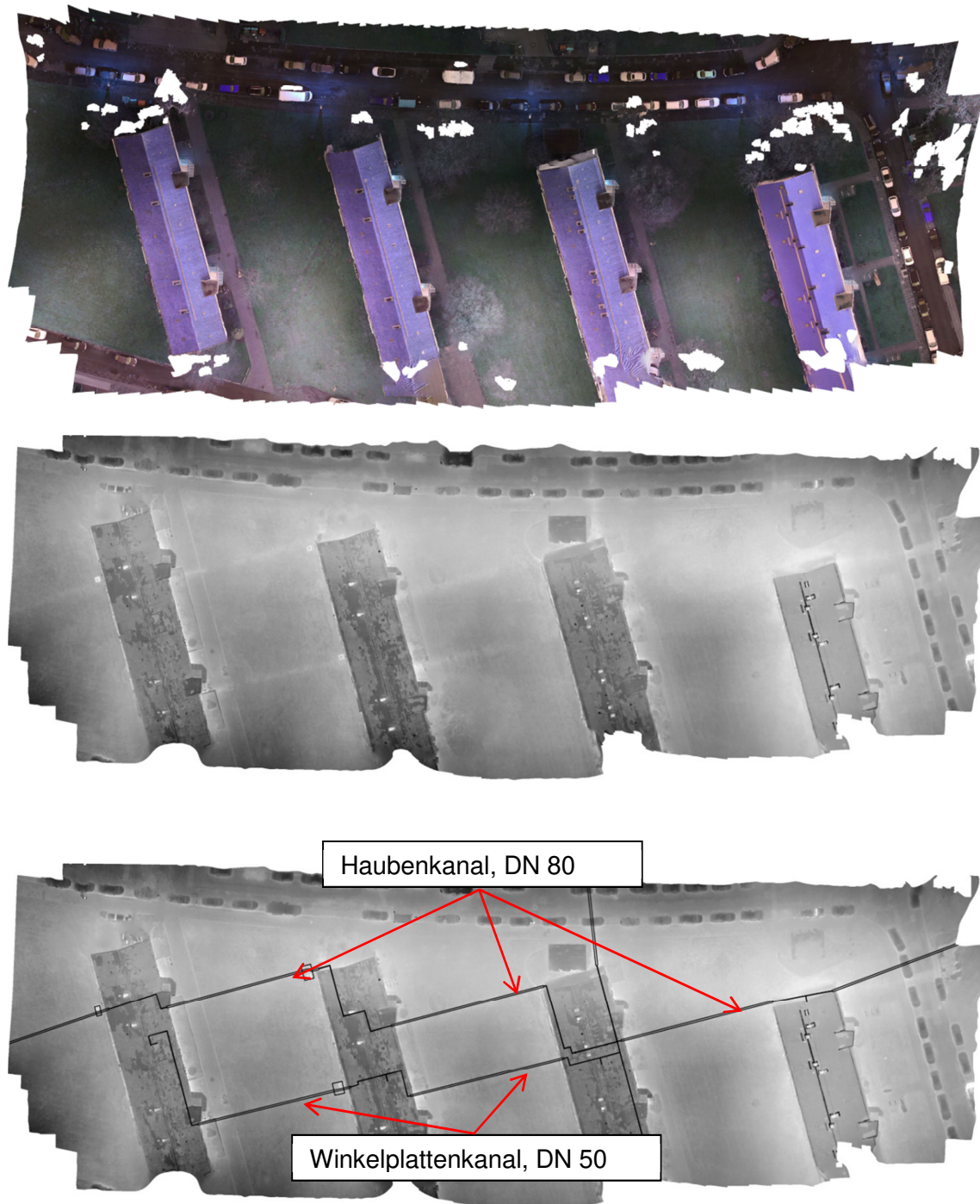


Bild 46 Oben: RGB-Bild. Mitte: Orthogonales Thermalbild. Unten: Orthogonales Thermalbild mit Trassenverlauf.

Tabelle 21 Dokumentation der Trassenparameter, Witterungsbedingungen und Angaben zu den Einstellungen des Messsystems.

Ort, Straße	Hannover, Tischbeinstraße / Leistikowweg
Datum der Befliegung	05.02.2020
Uhrzeit der Befliegung	07:30 Uhr
Emissionsfaktor [%]	0,95
Einstellung Bildüberlappung [%]	85/85
Flughöhe [m]	40
GSD Wärmebildkamera [cm]	5,2
GSD Optische Kamera [cm]	0,96
Fluggeschwindigkeit [m/s]	4,7
Lufttemperatur [°C]	-0,5
Luftfeuchtigkeit [%]	87
Luftdruck [hPa]	1032
Windgeschwindigkeit [m/s]	2,7
Länge der Flugstrecke [m]	1204
Verlegesystem und Dimension	Haubenkanal DN 50 Winkelplattenkanal DN 80
Mediumtemperatur Vorlauf/Rücklauf [°C]	100/58
Verlegetiefe [m]	0,6

Hannover, Tischbeinstraße/Lenbachstraße

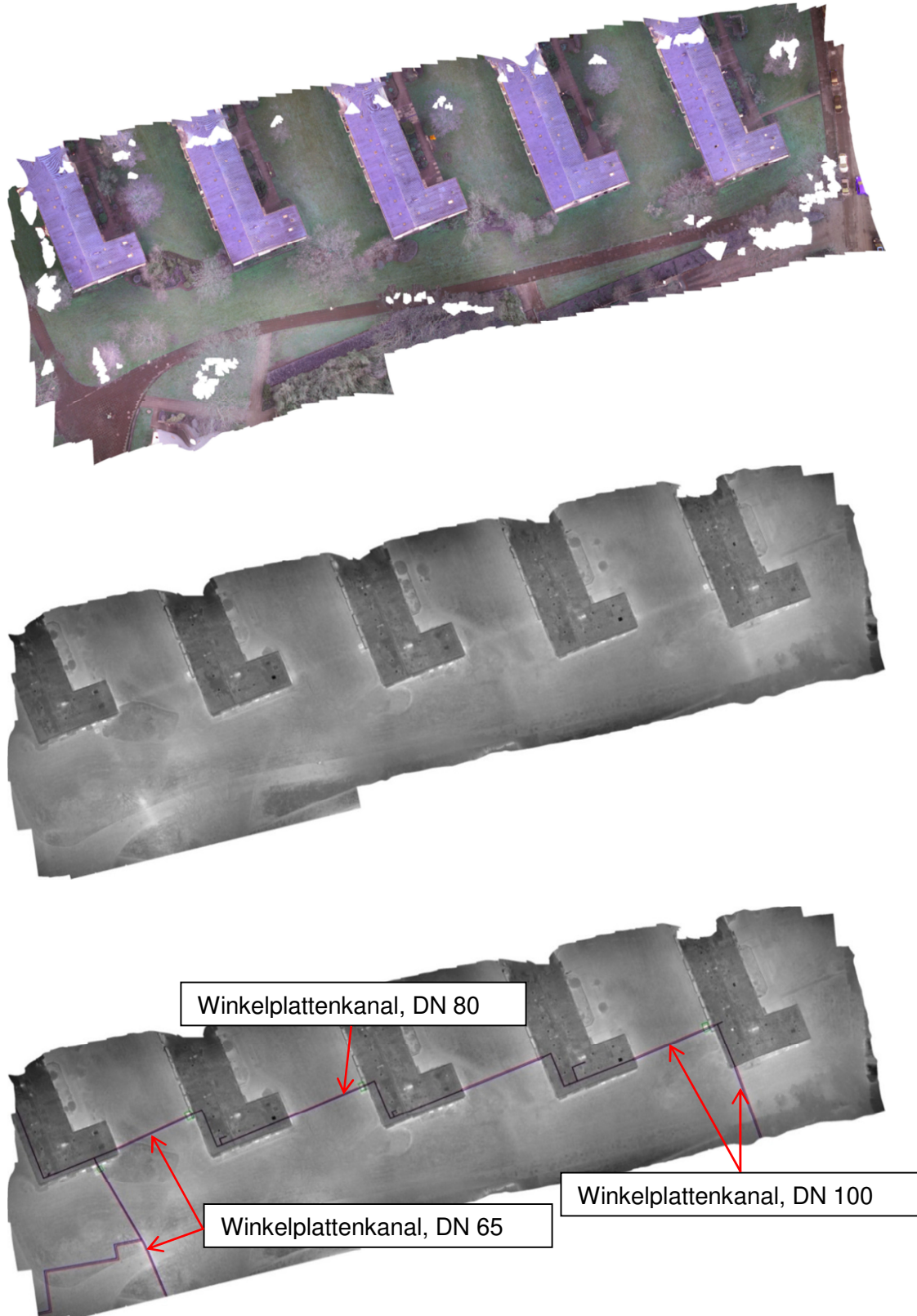


Bild 47 Oben: RGB-Bild. Mitte: Orthogonales Thermalbild. Unten: Orthogonales Thermalbild mit Trassenverlauf.

Tabelle 22 Dokumentation der Trassenparameter, Witterungsbedingungen und Angaben zu den Einstellungen des Messsystems.

Ort, Straße	Hannover, Tischbeinstraße/Lenbachstraße
Datum der Befliegung	05.02.2020
Uhrzeit der Befliegung	07:52 Uhr
Emissionsfaktor [%]	0,95
Einstellung Bildüberlappung [%]	85/85
Flughöhe [m]	40
GSD Wärmebildkamera [cm]	5,2
GSD Optische Kamera [cm]	0,96
Fluggeschwindigkeit [m/s]	6,9
Lufttemperatur [°C]	-0,5
Luftfeuchtigkeit [%]	87
Luftdruck [hPa]	1032
Windgeschwindigkeit [m/s]	2,7
Länge der Flugstrecke [m]	1098
Verlegesystem und Rohrdimension	Winkelplattenkanal DN 65 Winkelplattenkanal DN 80 Winkelplattenkanal DN 100
Mediumtemperatur Vorlauf/Rücklauf [°C]	100/58
Verlegetiefe [m]	0,6

Hannover, Kraftwerk Herrenhausen

Die Befliegung der Freileitung erfolgt nach Sonnenaufgang.

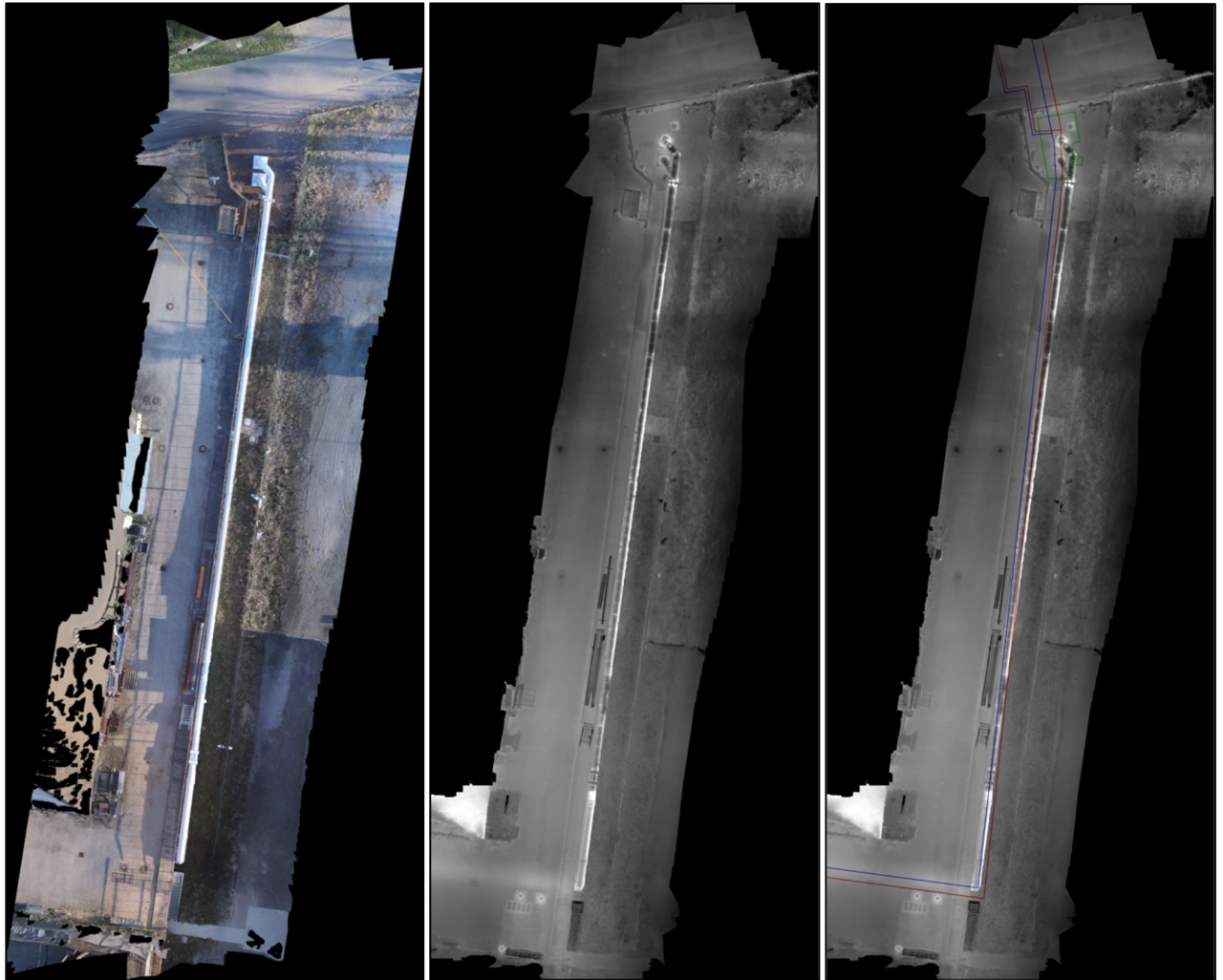


Bild 48 Links: RGB-Bild. Mitte: Orthogonales Thermalbild. Rechts: Orthogonales Thermalbild mit Trassenverlauf.

Tabelle 23 Dokumentation der Trassenparameter, Witterungsbedingungen und Angaben zu den Einstellungen des Messsystems.

Ort, Straße	Hannover, Kraftwerk Herrenhausen
Datum der Befliegung	01.04.2019
Uhrzeit der Befliegung	07:58 Uhr
Emissionsfaktor [%]	0,95
Einstellung Bildüberlappung [%]	85/85
Flughöhe [m]	40
GSD Wärmebildkamera [cm]	5,2
GSD Optische Kamera [cm]	0,96
Fluggeschwindigkeit [m/s]	5,9
Lufttemperatur [°C]	-0,5
Luftfeuchtigkeit [%]	76
Luftdruck [hPa]	1027
Windgeschwindigkeit [m/s]	2,1
Länge der Flugstrecke [m]	624
Verlegesystem und Dimension	Stahlmantelrohr DN 500
Mediumtemperatur Vorlauf/Rücklauf [°C]	95/60
Verlegetiefe [m]	Freileitung

Das für das Forschungsvorhaben spezifizierte Messsystem ist als Inspektionsverfahren für Trassenabschnitte von Freileitungen und erdverlegter Systeme für die Nah- und Fernwärmeversorgung geeignet. Die Drohne ist über ein Internetportal für ein Management-System registriert. In dem Portal werden Informationen zu allen Flugaktivitäten der Drohne gespeichert. Die GPS-Programmierung der Flugroute erfolgt vor der Befliegung. Für die Bewertung werden aus den Thermalbildern orthogonale Thermalbilder erstellt und mit den GIS-Daten des Netzplans verknüpft. Das orthogonale Thermalbild mit den eingefügten Trassen des Wärmenetzes stellt den Ist-Zustand des Wärmenetzes dar.

Von dem Betreiber des Wärmenetzes werden für den ausgewählten Trassenabschnitt der GIS-Lageplan sowie Informationen hinsichtlich des Verlegesystems, der Dimension der Rohrleitungen (Vorlauf und Rücklauf), der Mediumtemperaturen und der Verlegetiefe bereitgestellt.

Die Verlegetiefe des Trassenabschnitts sollte 1 m nicht überschreiten. Die Temperatur der Vorlaufleitung sollte der maximalen zulässigen Dauerbetriebstemperatur des Rohrsystems entsprechen und über einen längeren Zeitraum vor der Befliegung einen konstanten Wert aufweisen, damit sich ein möglichst konstanter Wärmeverluststrom einstellt. Durch die zeitgleiche Aufnahme von Wärmebildern und RGB-Bildern lassen sich Störgrößen wie Beleuchtungen, Personen, Fahrzeuge usw. identifizieren. Zudem sind aufgrund der hohen optischen Auflösung der RGB-Bilder detaillierte Oberflächenstrukturen über den Leitungen der Trasse sichtbar.

Bei Mediumtemperaturen $< 90\text{ °C}$ und bei kleinen Durchmessern von erdverlegten, wärmege-dämmten Rohrsystemen lassen sich im ungünstigsten Fall lediglich Leckagen feststellen. Fern-wärmetrassen, die in größeren Dimensionen ausgeführt sind, können bei geringer Sonnenein-strahlung auch tagsüber bei Umgebungstemperaturen $> 10\text{ °C}$ befliegen werden. Durch starken Bewuchs über erdverlegten Trassen werden Temperatursignaturen verdeckt.

Freileitungen mit einer metallischen Oberfläche sind grundsätzlich vor Sonnenaufgang zu be-fliegen. Reflektionen der Sonneneinstrahlung auf der Oberfläche der Rohrleitung führen zu nicht bewertbaren Ergebnissen.

Die größte zurückgelegte Flugstrecke beträgt 1386 m. Erfahrungsgemäß lassen sich bei opti-maler Planung, relativ geraden Trassenverlauf und durch eine entsprechende Anzahl von Re-serve Akkus Flugstrecken bis ca. 20 km für eine drohnengestützte Thermalbefliegung realisie-ren.

Im Rahmen der Befliegungen werden keine Thermalanomalien festgestellt, die auf Beschädi-gungen oder Schwachstellen in den Trassenabschnitten hinweisen. Daher werden keine erneu-ten Befliegungen der Trassenabschnitte durchgeführt.

Alterungsbedingte Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung führen zu einer Erhöhung des Wärmeverlustes. Eine deutliche Erhöhung des Wärmeverlustes der Wärme-dämmung durch Alterungsprozesse erfolgt bei Betriebszeiten von mehr als 20 Jahren [29]. Aus diesem Grund ist die Erfassung alterungsbedingter Thermalanomalien im Untersuchungszeit-raum nicht darstellbar.

Einschränkungen zum Einsatz dieses Messsystems ergeben sich aus den gesetzlichen Rah-menbedingungen. Aufgrund der Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen ist der Einsatz-zeitraum dieser Technologie auf wenige Monate im Jahr begrenzt. Der Aufwand für die Planung und Durchführung von Befliegungen sowie die Bewertung der Thermalbilder ist gering.

6.5 Temperaturprofile erdverlegter Fernwärmetrassen

Die orthogonalen Thermalbilder bestehen aus Pixel. Jedem Pixel ist eine Temperatur zugeord-net, so kann für jeden Bereich des Trassenabschnittes ein Temperaturprofil erstellt werden. Für die Darstellung eines Temperaturprofils werden für einen willkürlich ausgewählten Bereich die Temperaturdifferenzen zwischen den gemessenen Temperaturen in den Pixeln und einer Refe-renztemperatur gebildet. Als Referenztemperatur wird die Luft- bzw. Umgebungstemperatur während der Befliegung gewählt. In Verbindung mit den Informationen über den Trassenab-schnitt lassen sich Aussagen über den Zustand generieren.

Über den erdverlegten Fernwärmetrassen sind die Temperaturprofile an der Erdoberfläche er-stellt worden. Die Bilder /Bild 49/ bis /Bild 68/ zeigen vergrößerte Ausschnitte aus den in Kapi-tel 0 dargestellten Thermalbildern. Entlang der dargestellten Linie sind die Temperaturprofile erstellt worden.



Bild 49 Bildausschnitt HCC Hannover, Kleefelder Straße.

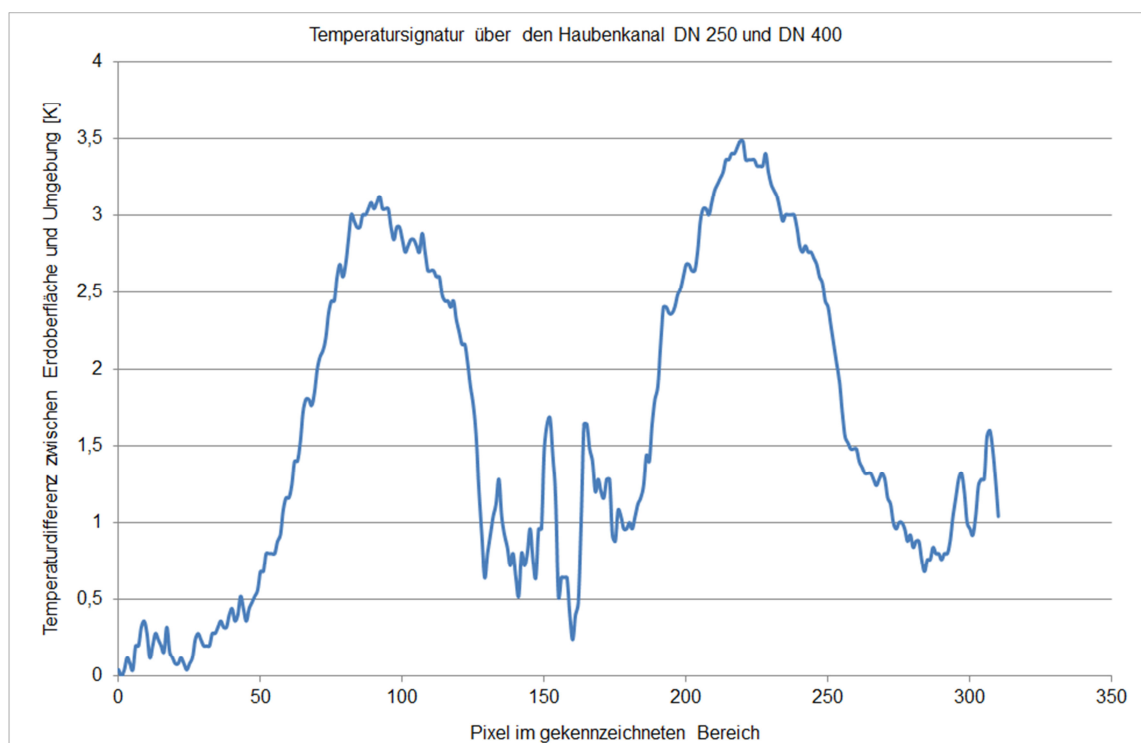


Bild 50 HCC Hannover, Kleefelder Str.: Temperaturprofil im gekennzeichneten Bereich.

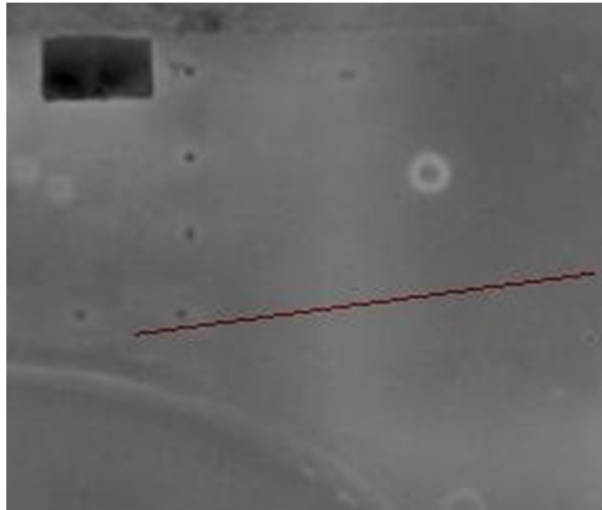


Bild 51 Bildausschnitt Hannover, Kugelfangtrift / Hägewiesen.

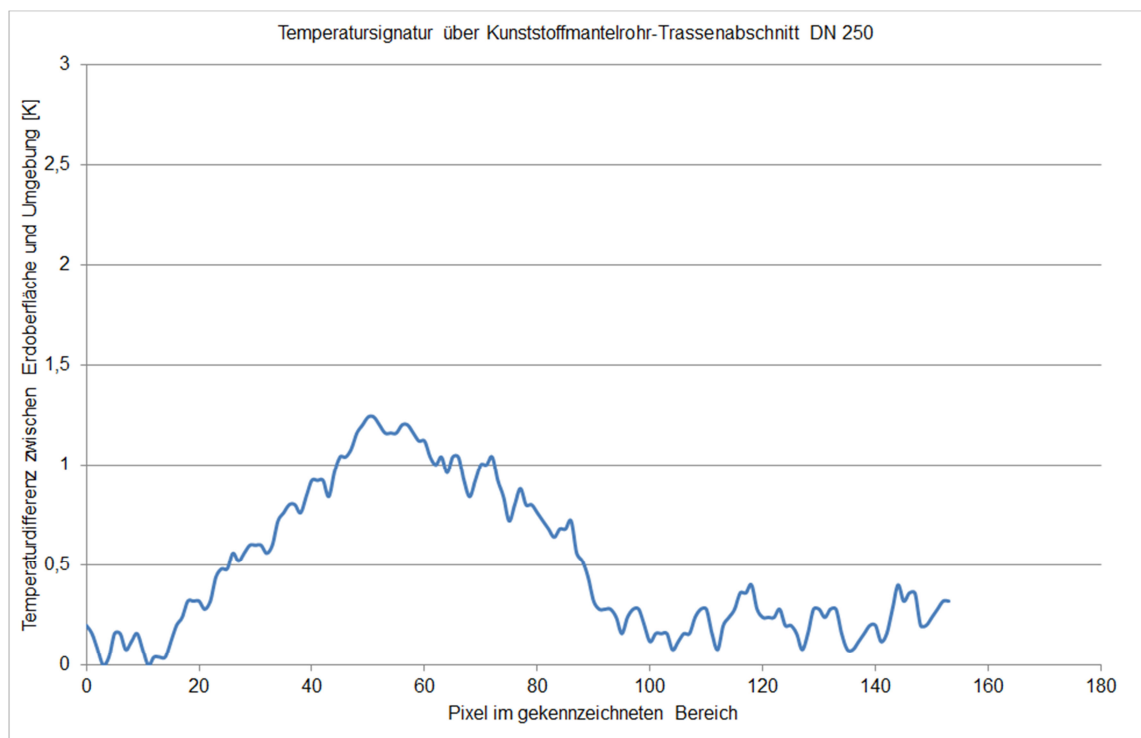


Bild 52 Hannover, Kugelfangtrift / Hägewiesen: Temperaturprofil im gekennzeichneten Bereich.

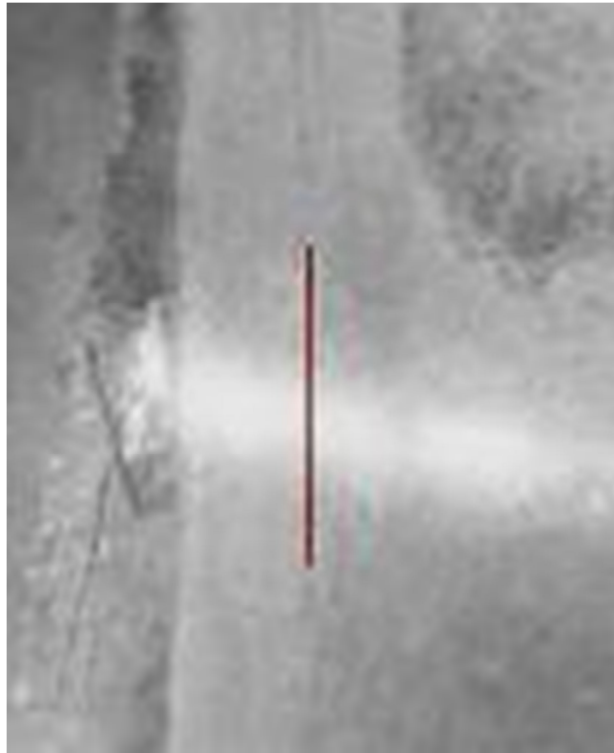


Bild 53 Bildausschnitt Hannover, zwischen Stammestraße und Ritter-Brüning-Straße.

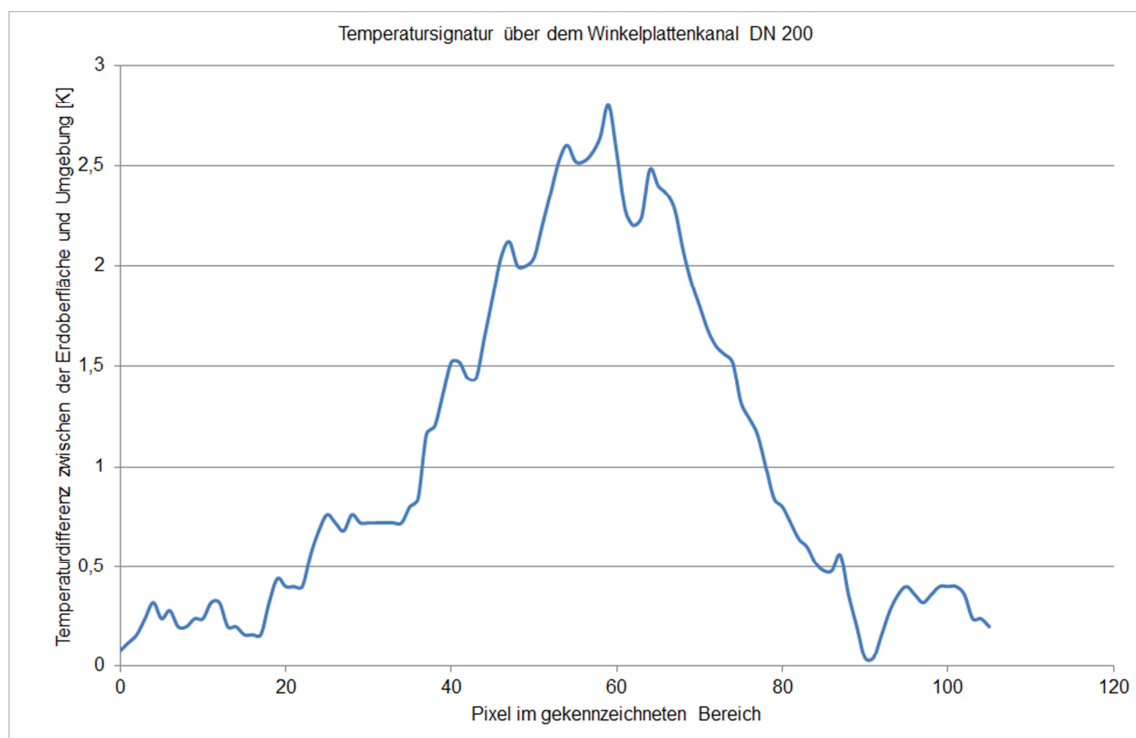


Bild 54 Hannover, zwischen Stammestraße und Ritter-Brüning-Straße: Temperaturprofil im gekennzeichneten Bereich.



Bild 55 Bildausschnitt Hannover, Am Annateich.

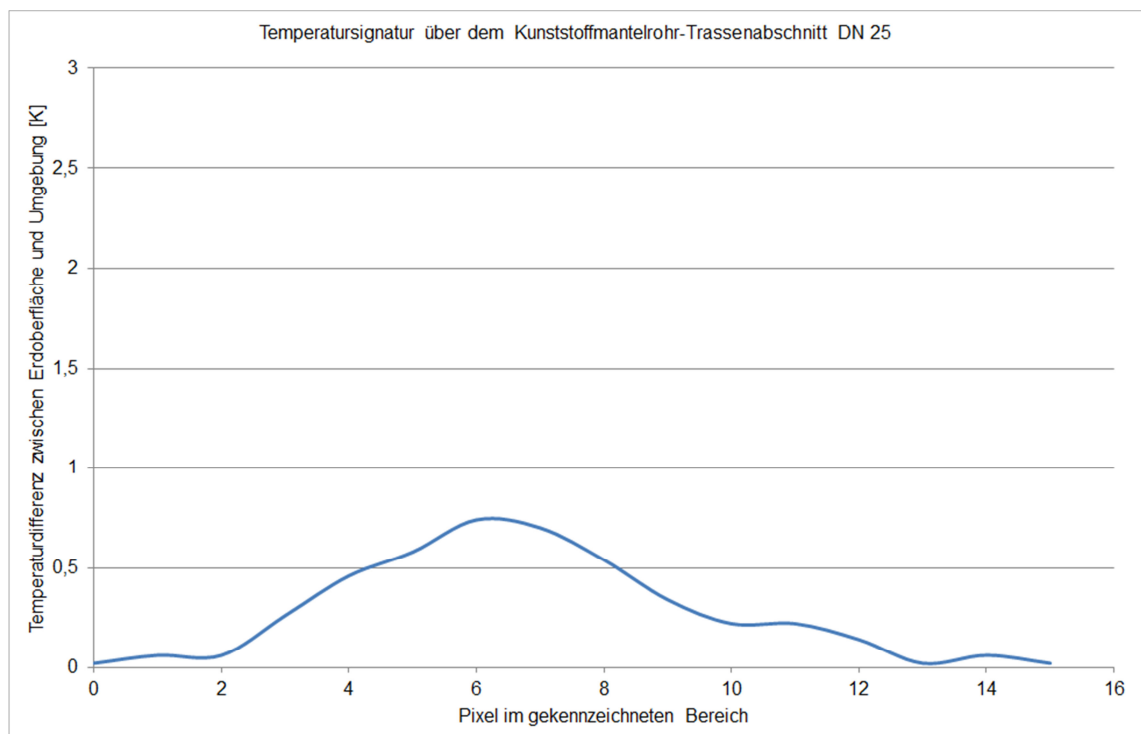


Bild 56 Hannover, Am Annateich: Temperaturprofil im gekennzeichneten Bereich.



Bild 57 Bildausschnitt Hannover, Georgengarten.

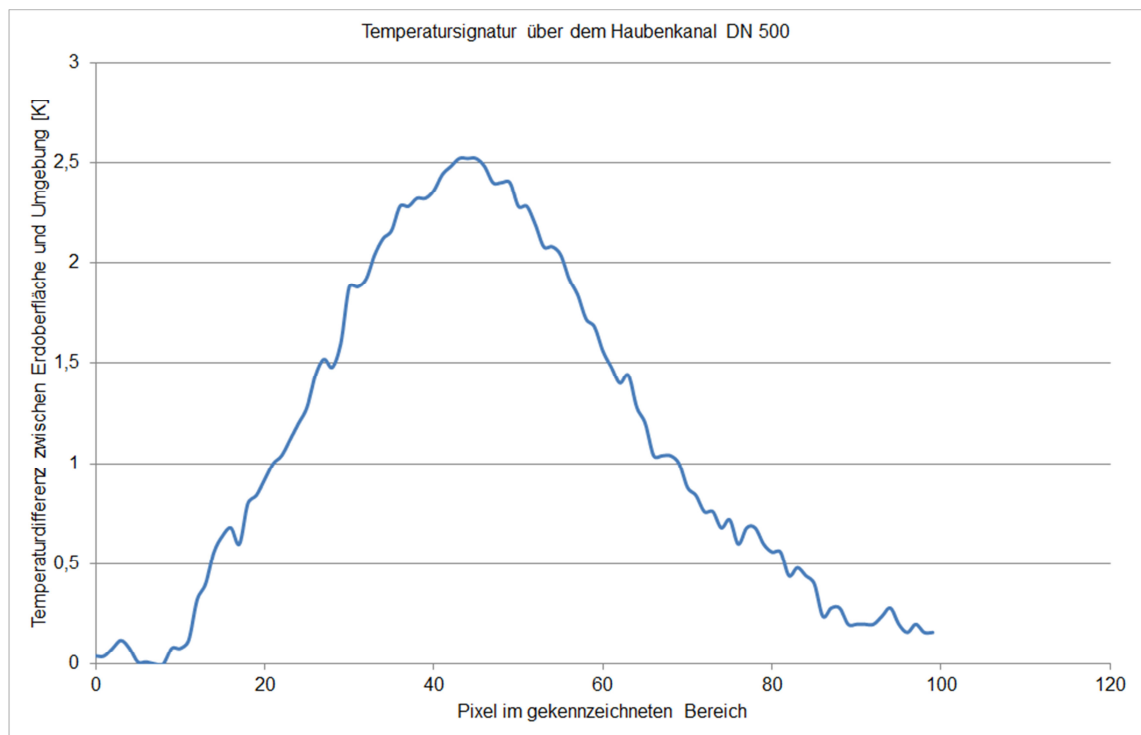


Bild 58 Hannover, Georgengarten: Temperaturprofil im gekennzeichneten Bereich.

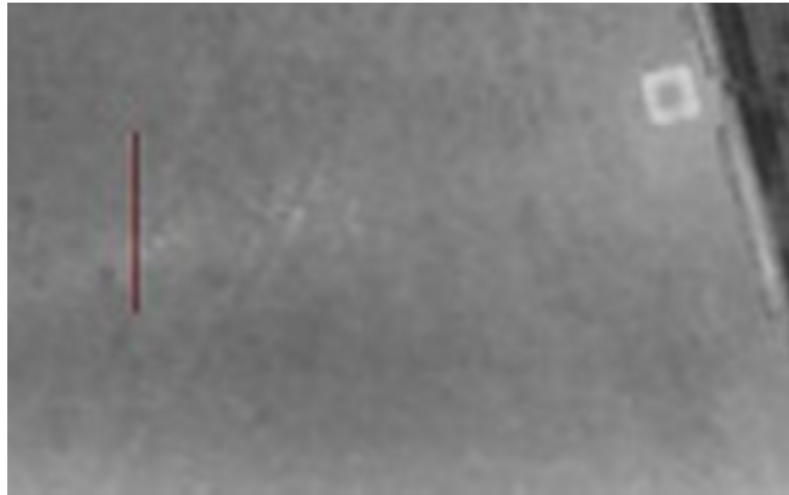


Bild 59 Bildausschnitt Hannover, Tischbeinstraße / Leistikowweg; Winkelplattenkanal DN 50.

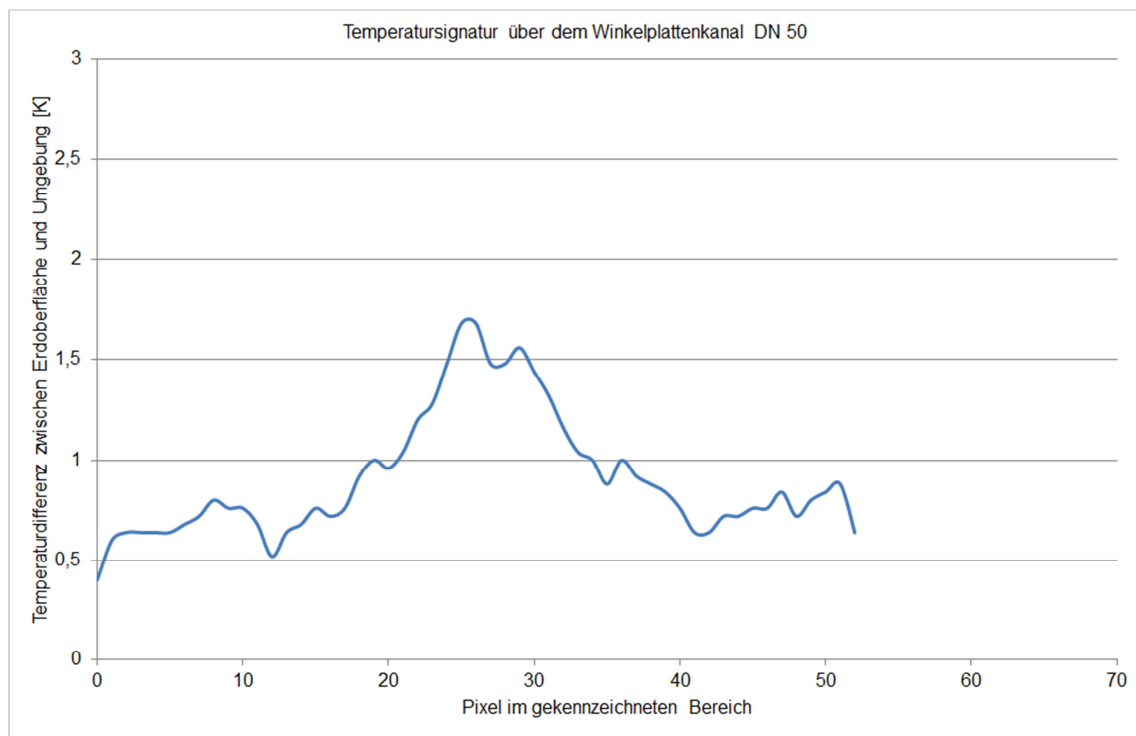


Bild 60 Hannover, Tischbeinstraße / Leistikowweg: Temperaturprofil über Winkelplattenkanal DN 50 im gekennzeichneten Bereich.

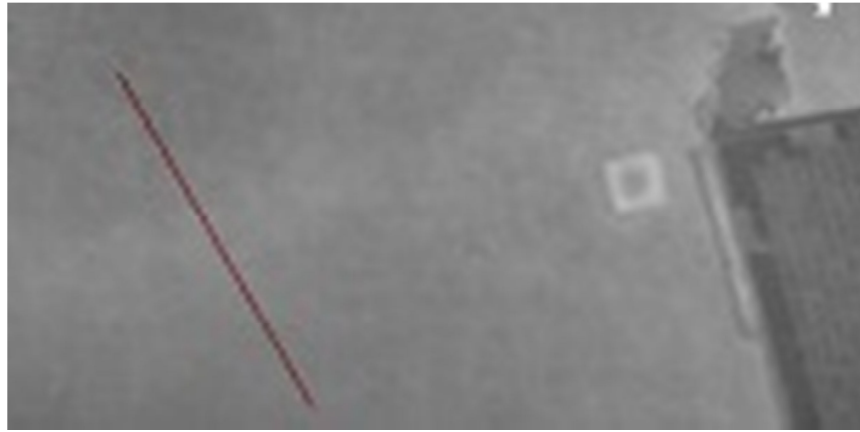


Bild 61 Bildausschnitt Hannover, Tischbeinstraße/Leistikowweg; Haubenkanal DN 80.

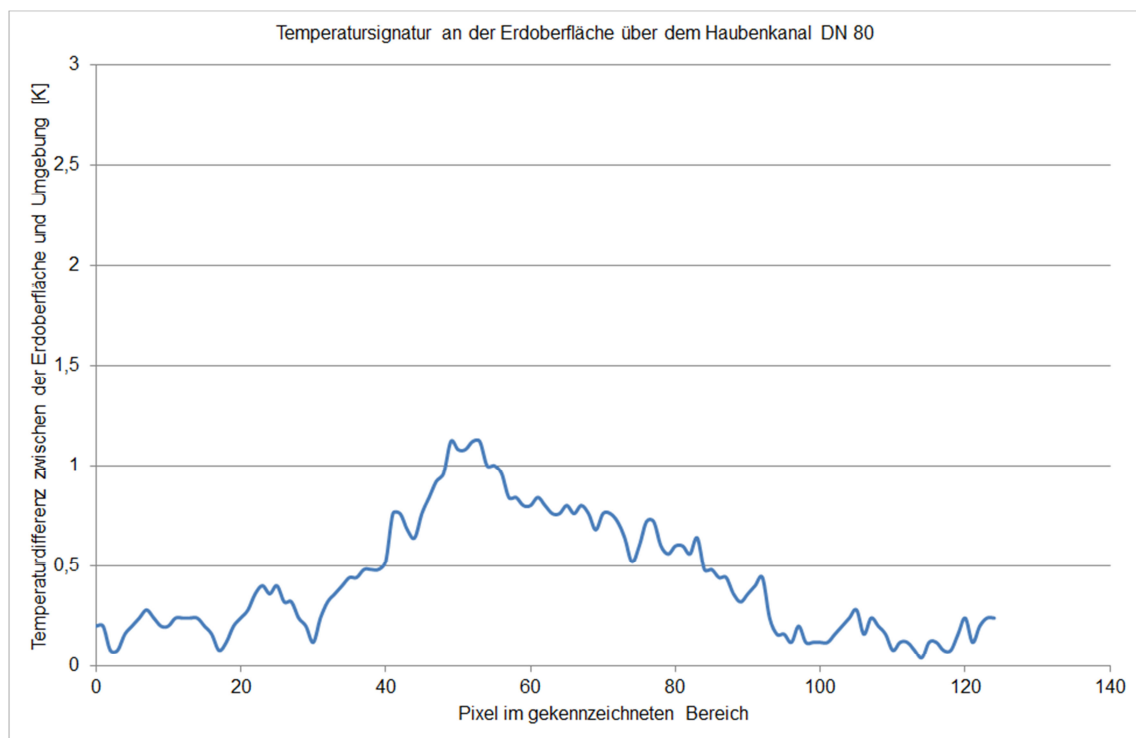


Bild 62 Hannover, Tischbeinstraße / Leistikowweg: Temperaturprofil über Haubenkanal DN 80 im gekennzeichneten Bereich.

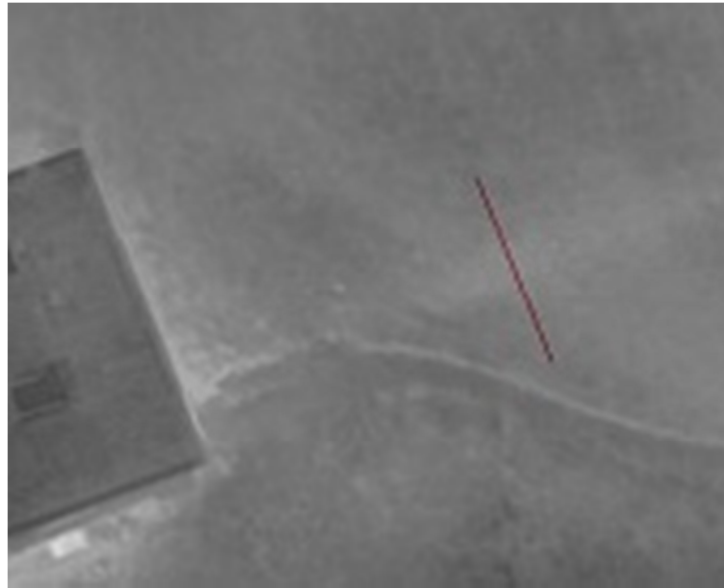


Bild 63 Bildausschnitt Hannover, Tischbeinstraße/Lenbachstraße; Winkelplatte DN 65.

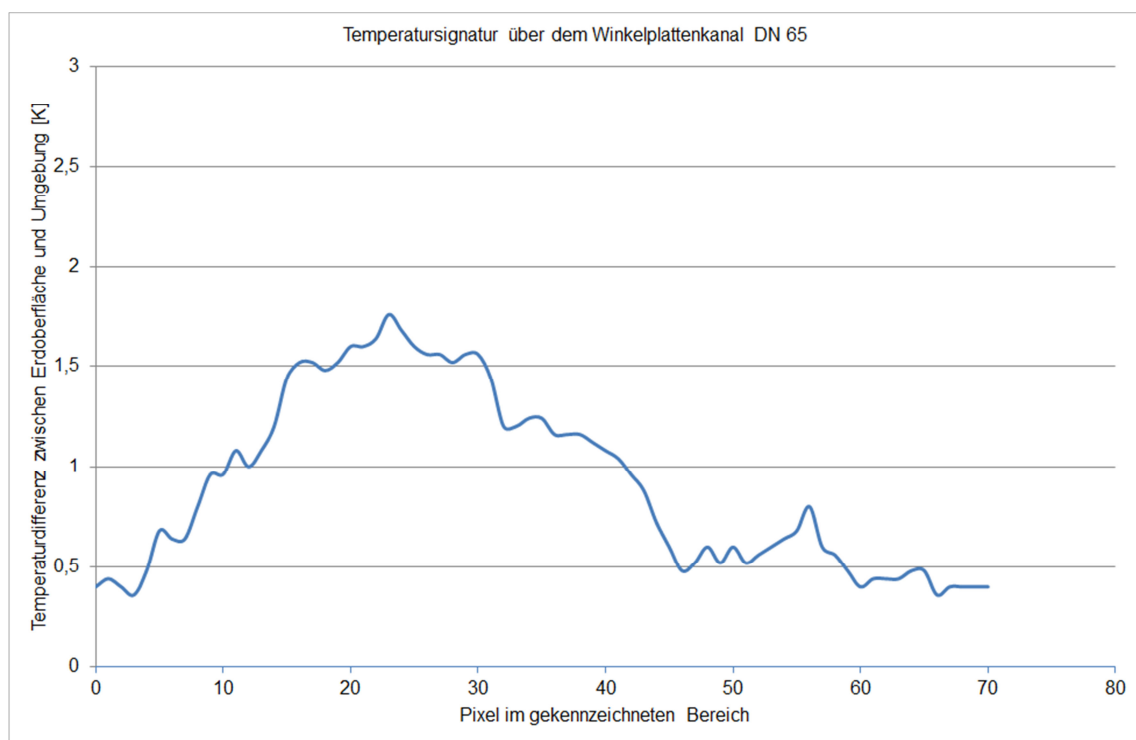


Bild 64 Hannover, Tischbeinstraße/Lenbachstraße: Temperaturprofil über Winkelplattenkanal DN 65 im gekennzeichneten Bereich.

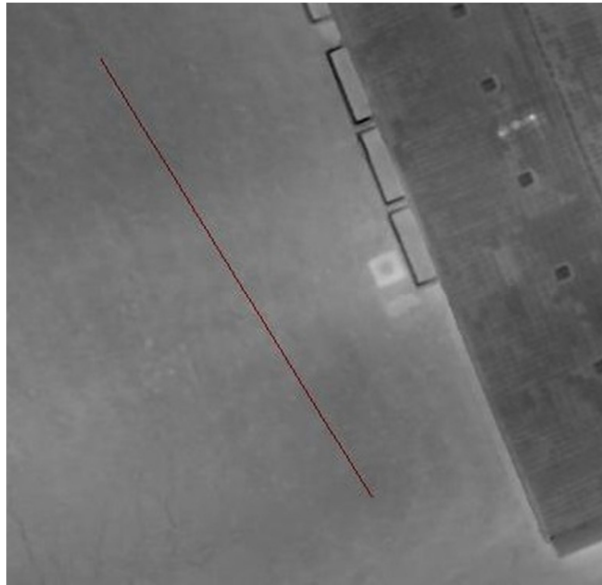


Bild 65 Bildausschnitt Hannover, Tischbeinstraße/Lenbachstraße; Winkelplatte DN80.

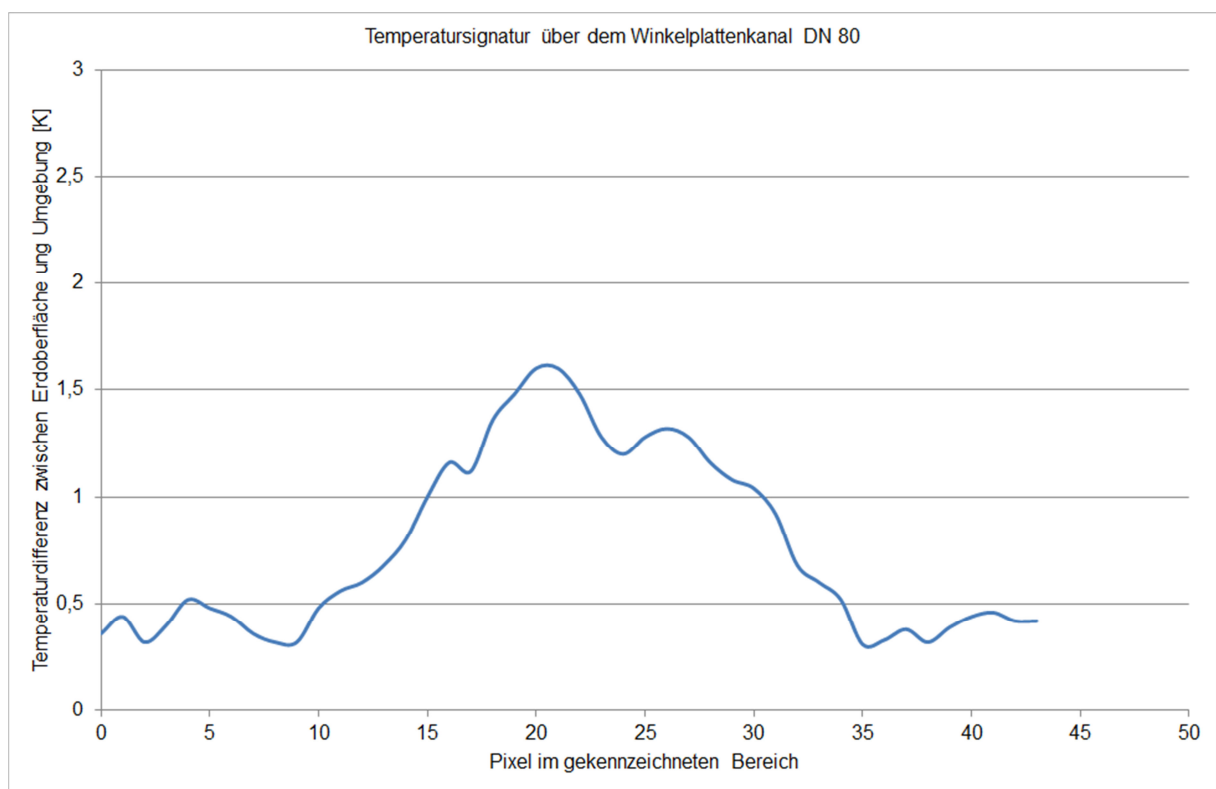


Bild 66 Hannover, Tischbeinstraße/Lenbachstraße: Temperaturprofil über Winkelplattenkanal DN 80 im gekennzeichneten Bereich.

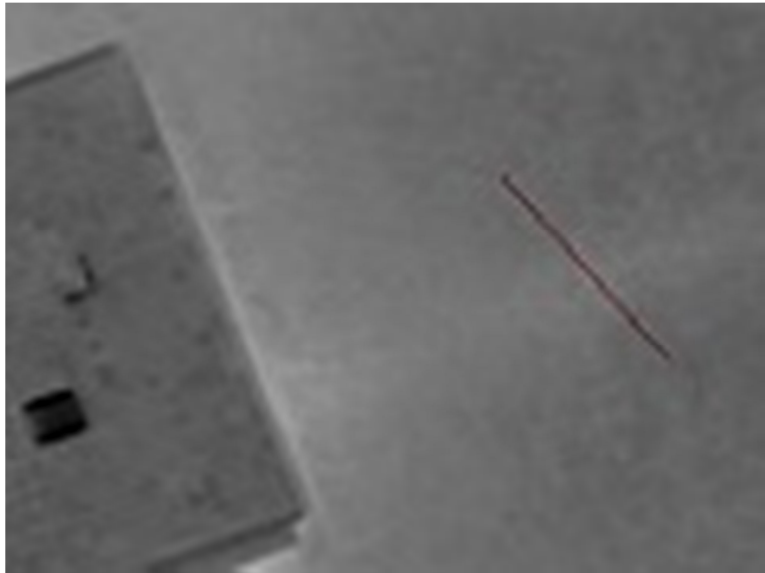


Bild 67 Bildausschnitt Hannover, Tischbeinstraße/Lenbachstraße; Winkelplatte DN 100.

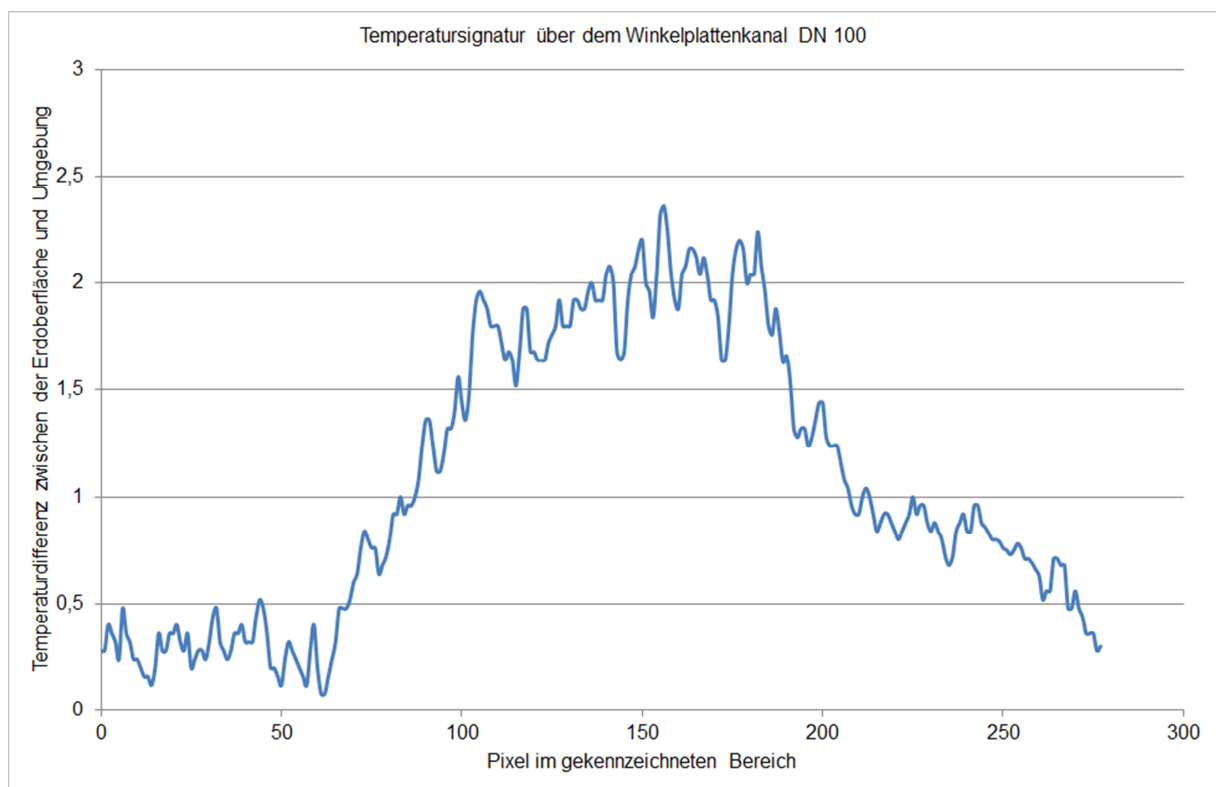


Bild 68 Hannover, Tischbeinstraße / Lenbachstraße: Temperaturprofil über Winkelplattenkanal DN 100 im gekennzeichneten Bereich.

Tabelle 24 Dokumentierte Umgebungstemperaturen, Vor- und Rücklauftemperaturen mit Angaben der ermittelten maximalen Temperaturdifferenz an der Erdoberfläche über dem Trassenverlauf.

System und Rohrdimension	Umgebungstemperatur [°C]	Vorlauf-/ Rücklauf-temperatur [°C]	Maximale Temperaturdifferenz zur Umgebung [K]
Haubenkanal DN 250	-2,3	95/58	3,1
Haubenkanal DN 400	-2,3	95/58	3,5
Kunststoffmantelrohr DN 250	-2,1	98/59	1,2
Winkelplattenkanal DN 200	+2,1	100/65	2,7
Kunststoffmantelrohr DN 25	+1,3	90/60	0,7
Haubenkanal DN 500	+11,7	95/58	2,5
Winkelplattenkanal DN 50	-0,5	100/58	1,7
Haubenkanal DN 80	-0,5	100/58	1,1
Winkelplattenkanal DN 65	-0,5	100/58	1,8
Winkelplattenkanal DN 80	-0,5	100/58	1,6
Winkelplattenkanal DN 100	-0,5	100/58	2,4

Die Temperatur über den Leitungen der Trasse steigt deutlich an, so dass sich über der Trasse eine maximale Temperaturdifferenz zur Umgebung ausbildet. Die gemessenen Temperaturerhöhungen über den Leitungen der Trassen betragen zwischen 0,7 K bis maximal 3,5 K. Die Höhe der sich einstellenden Temperaturdifferenz wird im Wesentlichen durch die Dimension der Leitungen und von der Umgebungstemperatur beeinflusst.

7. Entwicklung einer Auswertesoftware

7.1 Bildqualität und Signal-Rausch-Verhältnis der Thermalbilder

In diesen ersten Experimenten wird ein DJI Matrice 100 UAV (statt des DJI M200 UAV) benutzt sowie ein VTOL-Quadcopter (vertical take-off and landing), der mit GNSS-Empfänger, Inertialer Messeinheit (IMU) und Barometer ausgestattet ist. Er hat eine maximale Nutzlast von 1 kg. Zwei verschiedene Kameras sind im Einsatz (siehe detaillierte Parameter in **Tabelle 25**). Die DJI Zenmuse X3 besteht aus einem 3-Achsen-Kreisel und einer 4K-RGB-Kameraeinheit und die FLIR TAU2 640 Langwellen-Infrarotkamera (LWIR) ist auf einem weiteren 3-Achsen-Kreisel montiert. Darüber hinaus ist die TIR-Kamera mit einem TEAX ThermalCapture 2.0 640 Aufzeichnungsgerät ausgestattet, das 14-Bit-Rohbilder mit GNSS-Daten speichert, die von einem zusätzlichen GNSS-Empfänger empfangen werden.

Die ersten Testflüge zur Überprüfung der Bildqualität sind über einem historischen Gebäude in der Nähe der Herrenhäuser Gärten in Hannover durchgeführt worden. Die aufgenommene Fläche beträgt etwa 35x90 Meter. Im Zwei-Kamera-Aufbau ist die TIR-Kamera als Referenzsensor für die Flugplanung gewählt worden, da die Bodenauflösung aufgrund der geringeren geometrischen Auflösung und der zugehörigen Brennweite geringer ist (siehe **Tabelle 25**). Basierend auf einer Pixelgröße von 17 μm wird die Flughöhe auf 30 Meter über dem Boden eingestellt, was zu einer Bodenauflösung von 3,9 cm und am höchsten Punkt der Szene zu einer Auflösung von etwa 2,6 cm pro Pixel der TIR-Bilder führt. Die Flugstreifen und die Geschwindigkeit sind so eingestellt, dass sich die TIR-Bilder in beiden Richtungen zu mindestens 75% überlappen. Die RGB-Bilder haben in diesem Aufbau eine Bodenauflösung von 1,3 cm pro Pixel.

Tabelle 25 Sensorparameter.

Parameter	DJI Zenmuse X3 Kamera	FLIR TAU2 640
Größe des Sensors	4000x3000	640x512
Pixelgröße	1,56 μm	17 μm
Wellenlänge	Sichtbarer Bereich	7,5-13,5 μm
Brennweite	3,6 mm	13 mm
Blendenöffnung	$f/2,8$	$f/1,25$
Öffnungswinkel	94°	45°(H)x37°(V)
Rohdatenspeicherung	Nein	14 bit

7.1.1 Messung der Bildqualität

Es wird angenommen, dass TIR-Daten, die ohne Sonnenlichtinterferenz erfasst werden, bessere Bilder hinsichtlich Rauschen und Kontrast ergeben. Zunächst muss eine Qualitätsmessung für TIR-Bilder definiert werden. In RGB- und insbesondere in TIR-Bildern gibt es verschiedene Arten von Rauschen. Es wird das Signal-Rausch-Verhältnis (signal-to-noise-ratio, SNR) als weit verbreiteter Indikator für die Bildqualität gewählt. Das Rauschen wird durch seine Standardabweichung charakterisiert (Young u.a. [30]). Die Charakterisierung des Signals kann unterschiedlich sein, daher gibt es verschiedene Definitionen des SNR. Wenn das Signal bekannt ist und zwischen zwei Grenzen min. und max. liegt, dann ist das SNR von Bild I durch Gleichung (7-1) definiert.

$$SNR = 20 \cdot \log_{10} \frac{\max(I) - \min(I)}{\sigma(I)} \quad (7-1)$$

Wenn das Signal nicht begrenzt ist, sondern eine statistische Verteilung besitzt, dann trifft die folgende Gleichung zu:

$$SNR = 20 \cdot \log_{10} \frac{\mu(I)}{\sigma(I)} \quad (7-2)$$

mit μ , σ als Mittelwert und Standardabweichung der Pixelwerte.

Aufgrund der Tatsache, dass die Bilder verrauscht sind, wird Gleichung (7-1) erweitert. Anstelle von Minimum und Maximum werden die Durchschnittswerte (siehe Gleichung (7-3)) als Signalgrenzen verwendet.

$$SNR = 20 \cdot \log_{10} \frac{pr(I, v_1) - pr(I, v_2)}{\sigma(I)} \quad (7-3)$$

wobei $pr(I, v_1)$ das Perzentil des Bildes I mit Perzentilwert v_1 (bzw. v_2) bedeutet.

Ein Perzentil ist ein in der Statistik verwendetes Maß, das den Wert angibt, unter den ein bestimmter Prozentsatz der Beobachtungen in einer Gruppe von Beobachtungen fällt. Dieser Ansatz schließt verrauschte Pixel aus, die stark von der Pixelverteilung des Histogramms der Pixelwerte abweichen. /Bild 69/ zeigt ein Beispielhistogramm eines 14-Bit-TIR-Bildes und verschiedene Perzentile. Die rote Linie stellt die Position der Perzentile für verschiedene Werte dar. Es sei erwähnt, dass, wenn v_1 und v_2 auf 100 bzw. 0 gesetzt sind, die Gleichungen (7-1) und (7-3) gleich sind. Es ist gut zu erkennen, dass die Minimum- und Maximum-Werte, Perzentile 100 bzw. 0, weit von der tatsächlichen Pixelverteilung entfernt liegen. In diesem speziellen Beispiel stellen die Perzentile 99,5 bzw. 0,5 die Verteilung in einer realistischeren Weise dar als die Minimal- und Maximalwerte.

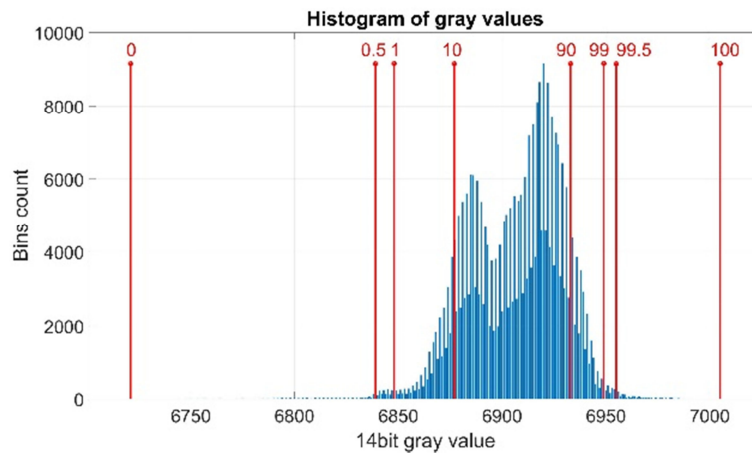


Bild 69 Bildhistogramm und Beispiel der Durchschnittswerte.

Gemäß Budzan und Wyżgolik [8] liegt die Hauptfehlerquelle bei TIR-Bildern darin, dass Bildebene (Focal Plane Array, FPA) und die Auslesevorrichtungen der TIR-Kameras nicht einheitlich sind. Diese genannten Probleme verursachen eine Inkonsistenz der TIR-Detektoren, was sich in einer unterschiedlichen Reaktion der Pixel zeigt. Diese Inkonsistenz kann, wenn sie nicht richtig korrigiert wird, die Hauptursache für das Rauschen in TIR-Bildern sein.

Bei dieser Untersuchung liegt der Fokus bei der SNR-Berechnung nur auf gleichförmigen Bereichen eines Bildes, da Rauschen dort besser zu erkennen ist. Um einheitliche Bereiche zu finden, wird der folgende Ansatz verwendet, das Verfahren ist in **Bild 70** dargestellt:

1. Kantenerkennung, die eine logische Maske liefert, wobei die Kantenpixel auf "1" gesetzt werden.
2. Morphologische Erosion bei inverser Kantenmaske.
3. Blob-Erkennung, gefolgt vom Setzen von Pixeln von Blobs, die aus weniger als 500 Pixeln bestehen, auf „0“. Das Ergebnis dieses Schrittes ist im rechten Bild in **Bild 70** dargestellt.

Es werden zwei Methoden zur Berechnung des SNR von homogenen Regionen pro Bild angewendet. Die erste ist die Berechnung eines gewichteten Mittelwertes der SNRs der Regionen, wie in Gleichung (7-4) beschrieben. Die Gewichtungen werden berechnet, indem die Anzahl der Pixel in einer Region durch die Gesamtzahl der Pixel in allen Regionen geteilt wird.

$$SNR_{region} = \frac{1}{\sum_{n=1}^{N_{regions}} M_n^{pixel}} \sum_{n=1}^{N_{regions}} M_n^{pixel} \cdot SNR_n^{region} \quad (7-4)$$

wobei M_n^{pixel} die Anzahl der Pixel in der n-ten homogenen Region angibt.

Der zweite Ansatz besteht darin, das Bild in Makroblöcke (MCU) der Größe 8*8 Pixel zu unterteilen und das SNR gemäß Gleichung (7-3) für jeden Block zu berechnen, wobei das Ergebnis der morphologischen Erosion verwendet wird (siehe Schritt 2 oben). Die Makroblöcke, bei denen nicht alle Pixel auf "1" gesetzt sind, sind bei dieser Berechnung ausgeschlossen, siehe Gleichung (7-6). Schließlich wird mit Gleichung (7-5) das mittlere SNR für das gesamte Bild berechnet.

$$SNR_{MCU} = \frac{1}{\sum_{n=1}^{N_{mcu}} \alpha_n} \sum_{n=1}^{N_{mcu}} \alpha_n \cdot SNR_n^{MCU} \quad (7-5)$$

wobei SNR_n^{MCU} der SNR-Wert des n-ten Makroblocks ist und α_n ein binärer Parameter, berechnet durch Gleichung (7-6):

$$\alpha_n = \begin{cases} 1, & \sum_{j=1}^{64} p_j = 64, \forall p_j \in MCU_n \\ 0, & \sum_{j=1}^{64} p_j < 64, \forall p_j \in MCU_n \end{cases} \quad (7-6)$$

Zusätzlich zum SNR wird der Bildkontrast berechnet, um die Bedingungen bei der Bildaufnahme vergleichbar zu machen. Der Bildkontrast wird definiert als die Spanne der Grauwerte und es werden wiederum Perzentile genutzt, um Pixel zu eliminieren, die weit von der Hauptpixelverteilung abweichen, siehe Gleichung (7-7).

$$C = pr(I, v_1) - pr(I, v_2) \quad (7-7)$$

Für die Kontrastberechnung werden wie auch beim SNR zwei Methoden angewendet: Kontrastberechnung über das gesamte Bild und Durchschnittswert des über MCUs berechneten Kontrasts.

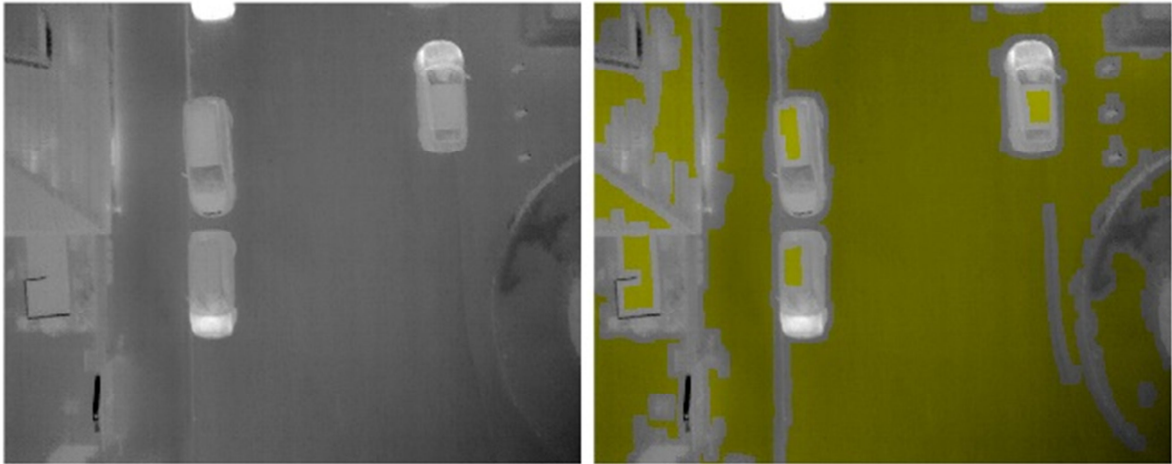


Bild 70 Erkennung gleichförmiger Bereiche: Links ist das TIR-Rohbild, rechts das TIR-Bild mit erkannten gleichförmigen Bereichen (gelb dargestellt).

7.1.2 Versuche und Ergebnisse

Untersuchung der Flat Field Correction (FFC): Zunächst wird der Einfluss des FFC-Verfahrens auf die TIR-Bildqualität untersucht. Alle Testflüge werden mit automatischer FFC durchgeführt. Um den Einfluss des FFC-Verfahrens auf die Bildqualität zu untersuchen, werden zusätzliche Daten erfasst: Die TIR-Kamera wird im Freien aufgestellt und eine statische Szene aufgenommen. Für die SNR-Berechnung nach Gleichung (7-1) werden zwei gleichförmige Bereiche manuell ausgewählt, wie in **Bild 71** durch die roten und blauen Kästchen dargestellt. Zu Beginn der Sequenz befindet sich der FPA bei Raumtemperatur (oberes Diagramm in **Bild 72**). Während des Tests sinkt seine Temperatur jedoch aufgrund der niedrigen Umgebungstemperatur im Freien. Infolge des Temperaturabfalls des FPA verschlechterte sich die Bildqualität. Dies lässt sich am abnehmenden Wert des SNR ablesen. Nach jedem FFC-Ereignis (dargestellt als rosa vertikale Linien in der unteren Grafik von **Bild 72**) kehrt das SNR jedoch wieder auf seinen ursprünglichen Wert zurück. Es zeigt sich, dass das SNR fast auf dem gleichen Niveau bleibt, sofern sich die FPA-Temperatur nicht dramatisch verändert (Sekunden 200-400). Dieser Test liefert ein besseres Verständnis des internen Prozesses, der in der FLIR-Kamera abläuft, und ist grundlegend für die folgenden Abschnitte.

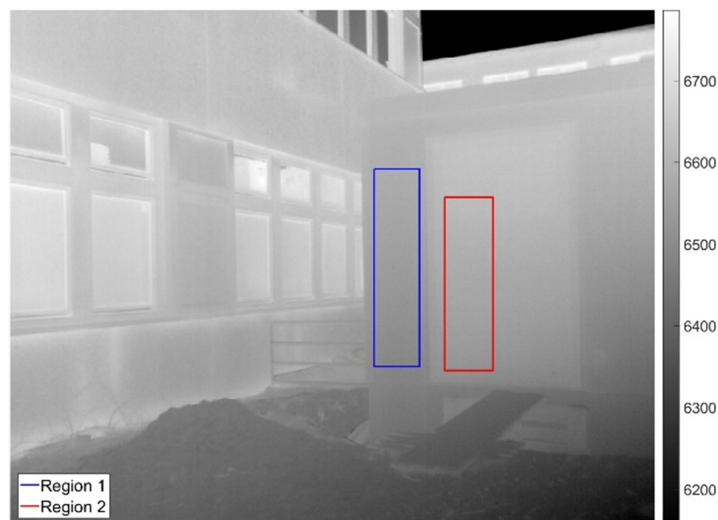


Bild 71 Auswahl der Region für den FFC-Test.

Tag/Nacht-Vergleich: Es wird untersucht, ob die TIR-Bildqualität bei Nachtflügen, d.h. ohne Sonnenlicht, besser ist. Aufgrund der niedrigeren Umgebungstemperatur und ohne Störungen durch Sonnenlicht sind höhere SNR- und Kontrastwerte während der Nacht zu erwarten. Für die Untersuchungen sind zwei Flüge durchgeführt worden. **0** fasst die Umweltbedingungen während der Flüge zusammen. Wegen der Flugvorschriften (eine zusätzliche Genehmigung und andere Lichtsignale sind erforderlich, um ein UAV in der Nacht zu fliegen) wird der Flug am frühen Morgen durchgeführt als es bereits hell genug war, die Sonne aber noch nicht aufgegangen war.

Tabelle 26 Umweltbedingungen während der Flüge.

	FLUG 1	FLUG 2
DATUM	Januar 2018	Februar 2018
TAGESZEIT	10:00	7:20
TEMPERATUR	≈5°C	≈-4°C
WIND	≈3 m/s	≈2,5 m/s
ANDERE ÄUßERE EINFLÜSSE	Teils sonnig mit Wolken	wolkenlos
GENUTZTE KAMERA	RGB + TIR	TIR

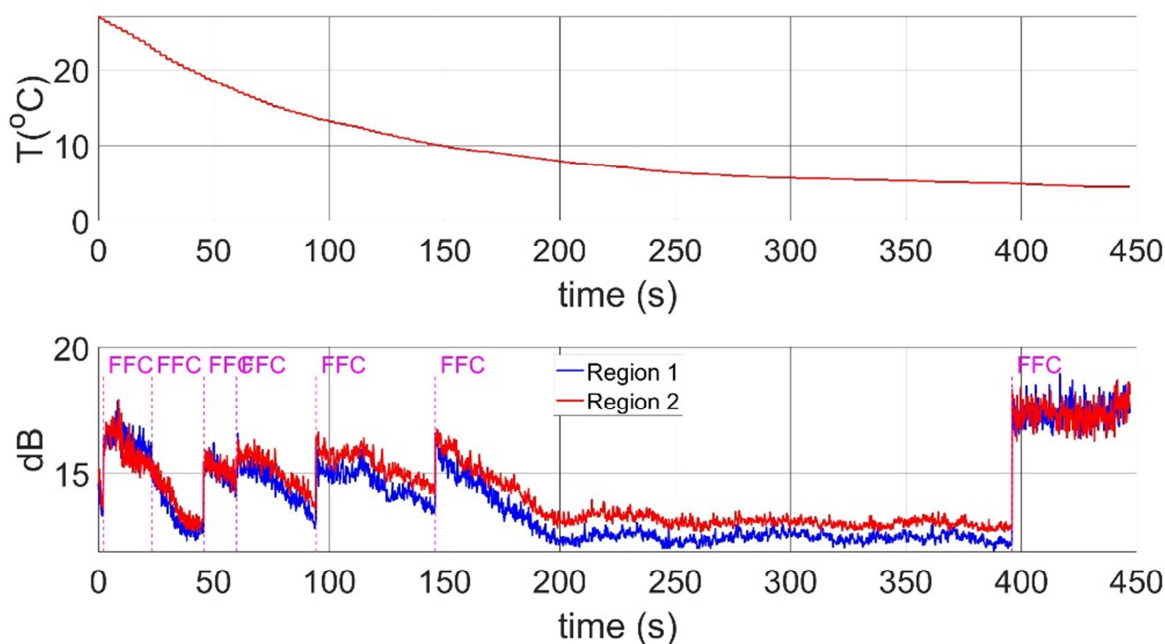


Bild 72 Ergebnisse des FFC-Verfahrens: Das obere Bild zeigt die FPA-Temperatur über die Zeit, das untere Bild zeigt die SNR-Werte der in **/Bild 71/** dargestellten Regionen und die FFC-Vorkommen.

Die Bildauswahl aus beiden Flügen erfolgt entsprechend der GNSS-Positionsaufzeichnungen. Um sicherzustellen, dass nur ähnliche Szenen verglichen werden, werden für den SNR-Vergleich nur Bilder gewählt, die hinsichtlich der Projektionszentren und der Blickrichtung nahe beieinanderliegen. **/Bild 73/** zeigt die Ergebnisse der SNR-Berechnung auf der Grundlage des durch Gleichung (7-5) definierten Makroblock-Ansatzes. **/Bild 74/** zeigt das anhand von Gleichung (7-4) berechnete SNR auf homogenen Bildregionen. In beiden Beispielen wird deutlich, dass mit niedrigeren Perzentilen das SNR abnimmt, da der Nenner in Gleichung (7-3) abnimmt.

Aufgrund fehlender Sonneneinstrahlung und einer niedrigeren Umgebungstemperatur wird erwartet, dass Bilder, die während des Nachtflugs aufgenommen werden, einen höheren SNR-Wert aufweisen würden. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass es bei den aktuellen Daten keinen Unterschied zwischen den Tag- und Nachtflügen in Bezug auf das SNR gibt. Dieses Ergebnis ist teilweise darauf zurückzuführen, dass die verwendete Kamera, eine FLIR TAU2 640, über das interne FFC-Verfahren verfügt, wodurch auch mögliche Unterschiede zwischen Tag- und Nachtflugbildern eliminiert werden.

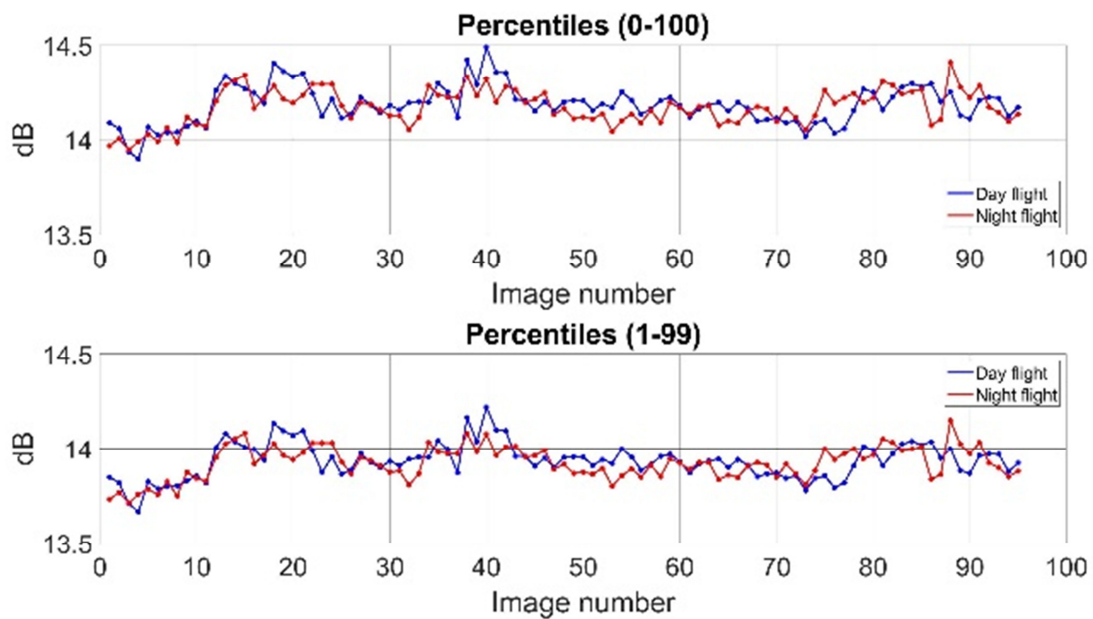


Bild 73 SNR_{mcu} der Flüge.

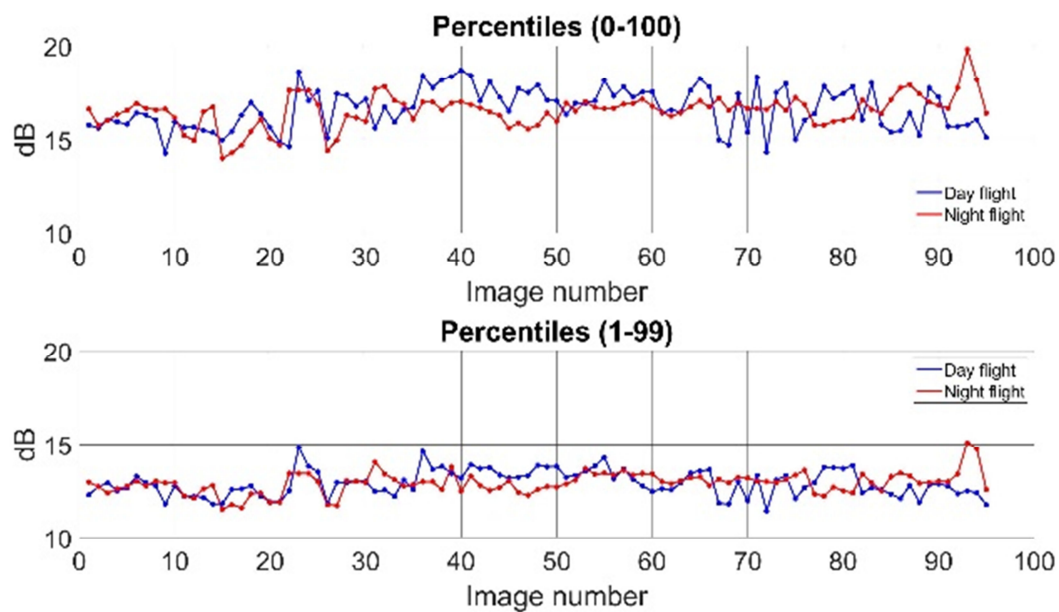


Bild 74 SNR_{region} der Flüge.

Die Kontrastberechnung erfolgt über die Orthophotos nach Gleichung (7-7) aus den Rohdaten der 14-Bit-TIR-Bildern. Die Ergebnisse beider Flüge sind in **Bild 76** dargestellt. Der Gesamtunterschied in den Grauwerten zwischen zwei Flügen ergibt sich aus der Tatsache, dass die beobachteten Objekte unterschiedliche Temperaturen haben. Die Georeferenzierung ermöglicht es, den Kontrast in beiden Orthophotos über genau dieselbe Fläche zu berechnen. Für den Nachtflug ergibt sich ein größerer Kontrast, unabhängig davon, ob der Kontrast über das ganze Bild oder nur über kleine Bildausschnitte berechnet wird (siehe **Bild 75**). Weiterhin zeigt sich, dass der Nachtflug unabhängig von den Durchschnittswerten einen besseren Kontrast liefert. Es gibt einen großen Kontrastabfall zwischen den Durchschnittswerten 0%-100% und 0,5%-99,5%, während der Kontrast über das gesamte Bild berechnet wird. Der Grund für einen solchen Abfall liegt darin, dass der Effekt der langen Schweife aus der Pixelverteilung (siehe **Bild 69**) eliminiert wird. Dieser Effekt existiert nicht oder ist zumindest nicht sehr dominant, wenn der Kontrast über MCUs berechnet wird.

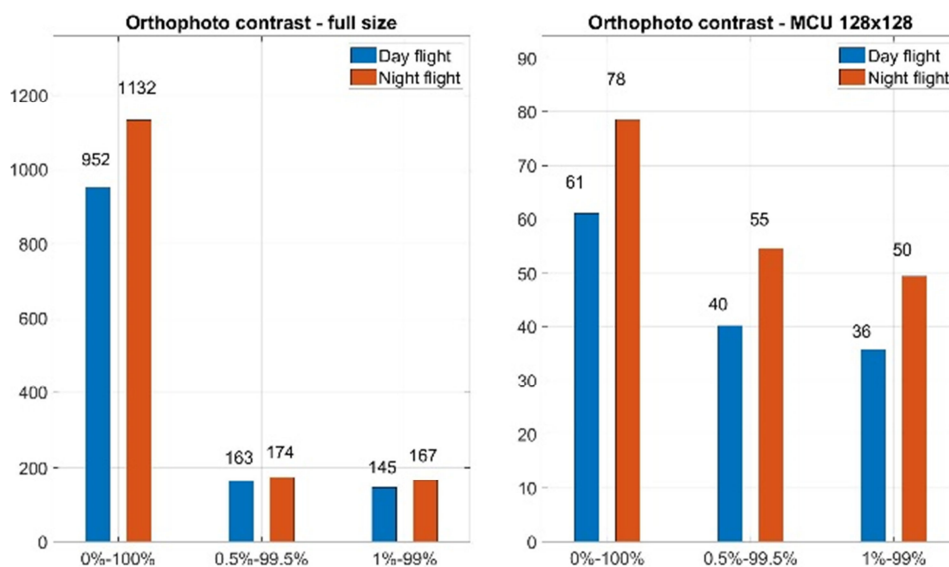


Bild 75 Kontrastvergleich der Orthophotos bei Tag- und Nachtflügen.

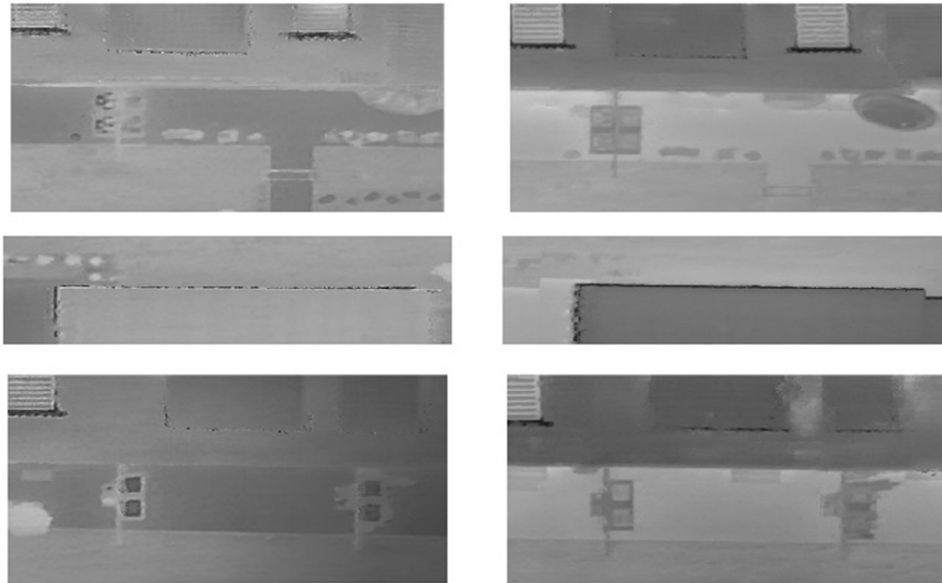


Bild 76 Orthophoto-Vergleich bei zwei Flügen: Die linke Spalte zeigt einen Tagesflug, die rechte Spalte einen Nachtflug.

7.1.3 Fazit

Es ist erwartet worden, dass die nachts aufgenommenen TIR-Bilder ein höheres SNR aufweisen würden. Das Testergebnis zeigt jedoch keinen signifikanten Unterschied zwischen Tag- und Nachtflügen, wahrscheinlich aufgrund der Tatsache, dass das in der verwendeten Wärmebildkamera implementierte FFC-Verfahren die meisten Ungleichmäßigkeiten beseitigt. Allerdings bietet der Nachtflug, wie angenommen, einen besseren thermischen Kontrast. Als Schlussfolgerung aus den oben beschriebenen Experimenten ergibt sich, dass es auch aus Sicht der Sensorik vorteilhaft ist, thermische Daten nachts oder in den frühen Morgenstunden zu erfassen. Die Aufnahme von Bildern in den frühen Morgenstunden bietet zusätzlich die Möglichkeit, optische Bilder zu erfassen, die weitere Informationen in Form eines genauen 3D-Modells liefern und den Objektraum einer beobachteten Szene für Klassifizierungsfunktionen besser definieren könnten.

7.2 Erkennung und Lokalisierung thermischer Anomalien in den Thermalbildern

Dieser Abschnitt beschreibt die automatische Erkennung und Lokalisierung thermischer Anomalien auf der Grundlage von TIR-Bildern, die von einem UAV aufgenommen wurden. Der Einsatz von UAVs als flexible und kostengünstige Plattform, die mit einer TIR-Kamera ausgestattet sind, ist eine vielversprechende Alternative zu einer Thermografie im bemannten Flug. Durch den Einsatz eines UAVs ist es möglich, eine Region innerhalb einer vergleichsweise kurzen Zeit und zu vertretbaren Kosten zu überfliegen, um den Zustand des Fernwärmesystems (district heating system, DHS) zu dokumentieren.

Die vorgeschlagene Methode besteht aus drei Schritten, wie in **Bild 77** beschrieben:

1. - Photogrammetrische Verarbeitung der TIR-Bilder,
2. - Erkennung und Lokalisierung von Anomalien und
3. - Klassifizierung von Anomalien.

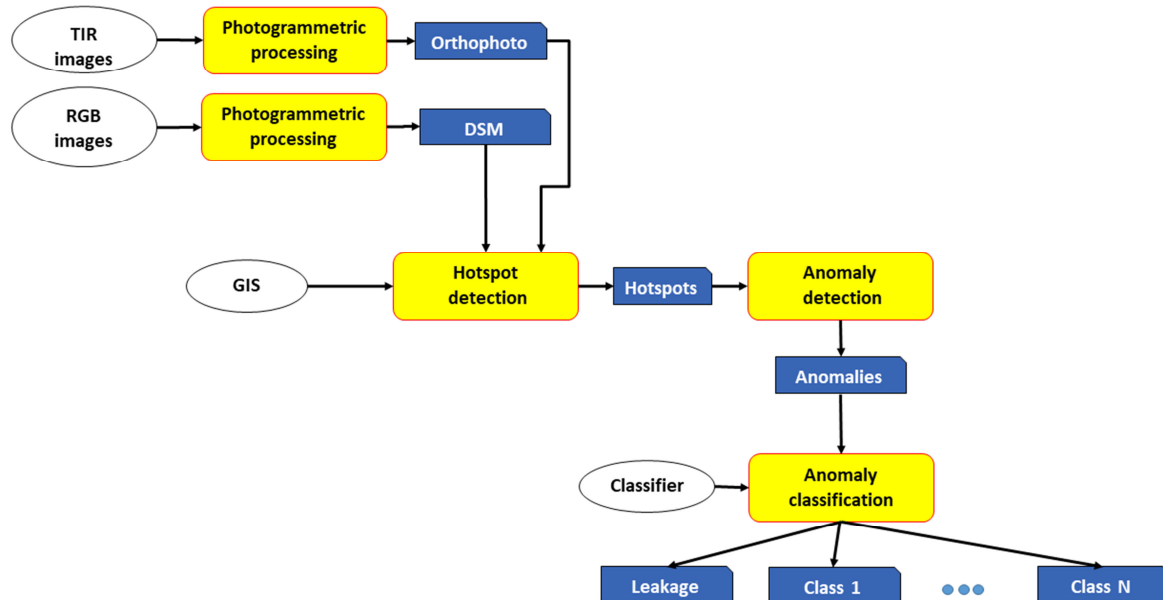


Bild 77 Flussdiagramm zur Erkennung von Anomalien.

7.2.1 Photogrammetrische Verarbeitung von Thermalbildern

Die präzise photogrammetrische Verarbeitung der Bilder wird mit der Software Agisoft Metashape durchgeführt. Agisoft Metashape ist ein eigenständiges Softwareprodukt, das die digitalen Bilder photogrammetrisch verarbeitet und räumliche 3D-Daten generiert. Die Software ermöglicht es, georeferenzierte dichte Punktwolken, texturierte Polygonmodelle, digitale Oberflächenmodelle (digital surface model, DSM) und Orthomosaik aus einer Reihe von sich überlappenden Bildern mit entsprechender Passinformationen zu erzeugen.

Die photogrammetrische Verarbeitung besteht aus den folgenden Schritten (siehe /**Bild 78**/):

1. Schätzung der Parameter der inneren Orientierung basierend auf einer geometrischen Kalibrierung. Beide Kameras, die optische und die TIR-Kamera, werden vor den Flügen kalibriert.
2. Schätzung der äußeren Orientierung (exterior orientation) der Bilder (Position und Winkel) durch Bündelausgleichung und Erzeugung einer dünn besetzten 3D-Punktwolke (dieser Schritt wird im Agisoft Metashape "Kameraausrichtung" genannt).
3. Erzeugung einer dichten 3D-Punktwolke durch dichte Bildzuordnung (Dense Image Matching, DIM). Beim DIM wird für jedes Pixel eines Bildes ein Tiefenwert berechnet.
4. Erzeugung eines digitalen Oberflächenmodells (DSM).
5. Erzeugung von Orthomosaiken.

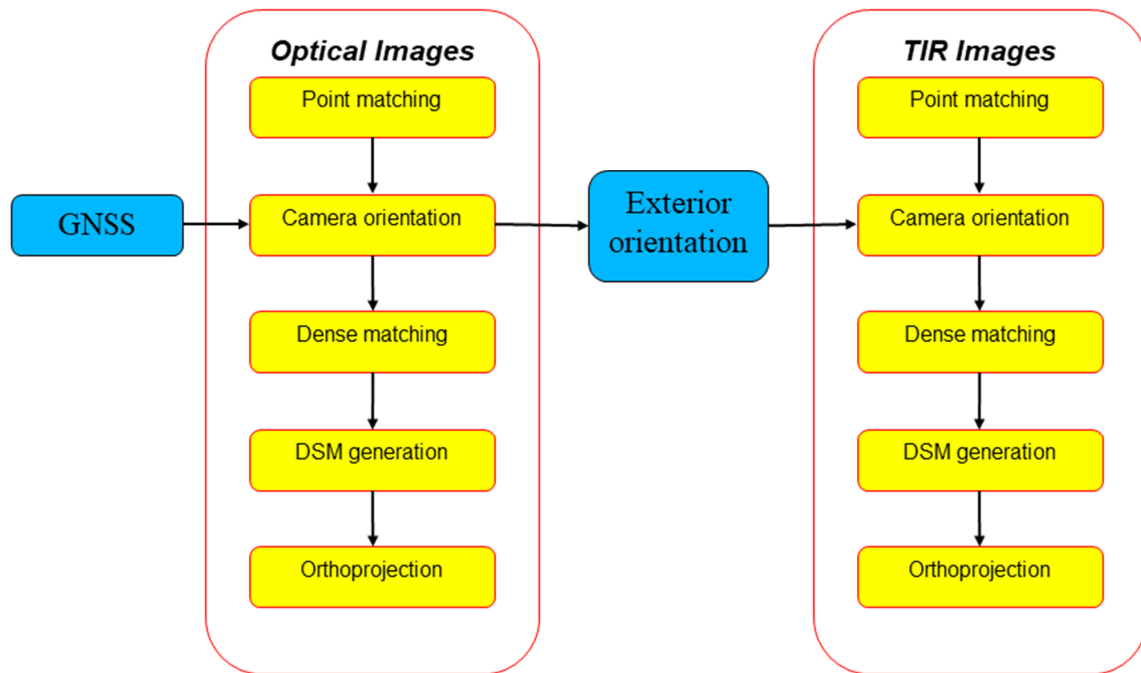


Bild 78 Photogrammetrische Arbeitsschritte.

Zusätzlich werden GNSS-Messungen der Projektionszentren als Beobachtungen in die Ausgleichung eingeführt. /**Tabelle 27**/ zeigt die durchschnittliche Anzahl an Bildern, Punkten etc. für alle durchgeführten Flüge. Aufgrund der feineren Bodenauflösung (ground sampling distance, GSD) und der besseren Bildqualität werden für den optischen Block mehr Verknüpfungspunkte (dünn besetzte Punktwolke) und auch mehr Punkte für das DSM (dichte Punktwolke) erzeugt. Zudem hat die optische Kamera ein größeres Sichtfeld und deckt damit einen etwas größeren Bereich ab.

Die Bildzuordnung der Verknüpfungspunkte wird nur innerhalb einer Gruppe von Bildern (thermisch oder optisch) durchgeführt. Die Beobachtungen für die Kameraposition wird für den optischen und den thermischen Block unterschiedlich behandelt. Für den optischen Block werden die GNSS-Positionen als Beobachtungen für die Projektionszentren verwendet und eine Bündelausgleichung berechnet. Aufgrund der Tatsache, dass beide Kameras starr in einem Karданrahmen befestigt sind, wird anschließend die gesamte geschätzte äußere Orientierung der optischen Kamera als Beobachtungen in einer zweiten Bündelausgleichung verwendet, um die äußere Orientierung der Thermalkamera zu berechnen.

Das Endprodukt ist ein thermografisches Orthomosaik des betrachteten Bereichs. Aufgrund der geringen Genauigkeit des verwendeten kostengünstigen GNSS bestehen gewisse geometrische Diskrepanzen zwischen dem Bildblock und den GIS-Daten des Wärmenetzes. Diese Diskrepanzen werden manuell korrigiert.

Tabelle 27 Statistik zu den 11 photogrammetrischen 11 Flügen.

	Optical	TIR
ANZAHL DER BILDER	290	290
ANZAHL VERKNÜPFUNGSPUNKTE PRO BILD	3074	771
RMS, RÜCKPROJEKTIONSFEHLER [PIX]	1,03	0,57
RMS, RÜCKPROJEKTIONSFEHLER [μM]	1,9	9,8
DÜNN BESETZTE PUNKTWOLKE [10³ *ANZAHL DER PUNKTE]	152,6	63,7
DICHTE PUNKTWOLKE [10⁶ *ANZAHL DER PUNKTE]	48,5	2,9
FLÄCHENABDECKUNG [M²]	12092	9335

7.2.2 Erkennung von Anomalien

Basierend auf einem Orthomosaik, welches durch die beschriebene photogrammetrische Verarbeitung erzeugt wird, besteht das Ziel der Anomalie-Erkennungsmethode darin, Bereiche mit anormalen Temperaturen am Boden zu bestimmen, die potentiell durch die Leckage eines DHS entstehen. Dies geschieht durch die Erkennung sogenannter Hot Spots im thermischen Orthomosaik. Hot Spots sind in den Wärmebildern als lokale kompakte helle, sogenannte Blobs erkennbar. Ein Hot Spot wird als Anomalie bezeichnet, wenn der Temperaturunterschied zur Umgebung höher als ein vordefinierter Schwellenwert ist.

Als vorbereitender Schritt wird der Suchraum im Orthomosaik auf einen Puffer um die Rohrleitungen begrenzt, der auf GIS-Informationen basiert (die GIS-Daten sind im Allgemeinen vom DHS-Betreiber erhältlich). Die Pufferbreite muss im Hinblick auf die geometrische Genauigkeit der GIS-Daten und den Prozess der Orthoprojektion gewählt werden.

Der nächste Schritt ist die Erkennung von Hotspots in den Orthomosaiken. Für diese Aufgabe wird der Laplacian of Gaussian (LoG) Blob-Detektor im Skalenraum (Lindeberg [30]) angewandt. Jeder Blob wird durch seine Mittelpunktswinkelkoordinaten (x_c, y_c) und den entsprechenden Maßstab (σ) repräsentiert (siehe Bilder oben links in **/Bild 80/** und **/Bild 81/**), der mit dem Maßstab des Laplace-Operators übereinstimmt. Es ist beobachtet worden, dass eine elliptische Blob-Darstellung zu einer besseren Lokalisierung der Anomalien führt. Daher werden anschließend die große und die kleine Hauptachse einer an den Blob-Bereich angepassten Ellipse bestimmt. Die Achsen werden aus den Eigenwerten und Eigenvektoren der Fläche berechnet, die aus der gewichteten Hesse-Matrix (H) des geglätteten Bildes (I_g) abgeleitet werden. Die Berechnung wird in Gleichung (7-8) beschrieben. Falls eine der Achsen der Ellipse zu klein ist (als Schwellenwert werden einige Pixel definiert), wird anstelle der aus H berechneten Achse der Maßstab des Blobs (σ) als die Länge der Achse verwendet.

$$H = \sum_{x,y}^{N_x N_y} g(x,y) \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x \partial x} I_g(x,y) & \frac{\partial}{\partial x \partial y} I_g(x,y) \\ \frac{\partial}{\partial x \partial y} I_g(x,y) & \frac{\partial}{\partial y \partial y} I_g(x,y) \end{bmatrix} \quad (7-8)$$

wobei $g(x,y)$ die Gaußfunktion und I_g ein mit der Gaußfunktion geglättetes Bild darstellt. Der Maßstab des Blobs ist σ . N_x und N_y beschreiben die Größe des Gaußfilters (wir nutzen ein Intervall von $[-3\sigma, 3\sigma]$).

Im nächsten Schritt werden anhand der gefundenen Hot Spots Anomalien festgestellt, indem die Blob-Bereiche in Segmente mit höheren und niedrigeren Temperaturen unterteilt werden. Diejenigen mit höheren Temperaturen werden dann unter gewissen Voraussetzungen als Anomalien betrachtet. Nach Bestimmung der beiden Hauptachsen der Ellipse wird diese um den Faktor 1,5 vergrößert. Dieser Faktor ist so gewählt, dass genügend Pixel aus der Umgebung für die folgende Clusterung zur Verfügung stehen. Die Temperaturwerte der Pixel in der vergrößerten Ellipse werden mit Hilfe des k-Means Algorithmus ($k = 3$) segmentiert. Es werden drei Cluster verwendet, um eine bessere Trennung von höheren Temperaturen zu gewährleisten. Das Ergebnis sind drei Segmente, die jeweils durch ihre mittlere Temperatur $[t_{low}, t_{mid}, t_{high}]$ gekennzeichnet sind. Die Bilder oben rechts in **/Bild 80/** und **/Bild 81/** zeigen zwei grüne Ellipsen. Die innere ist die berechnete Ellipse, während die äußere den Bereich darstellt, in dem die Temperaturwerte geclustert sind. In den Bildern unten links in **/Bild 80/** und **/Bild 81/** sind die Ergebnisse des Clustering dargestellt, wobei die Farben blau, gelb und rot die Cluster mit niedriger, mittlerer und hoher Temperatur repräsentieren. Ein Nachteil der Verwendung von drei Clustern anstelle von zwei Clustern besteht darin, dass sich Pixel, die tatsächlich zu der Anomalie gehören, im mittleren Cluster wiederfinden. Um dieses Problem zu beheben, wird ggf. eine Fusion zwischen t_{mid} und t_{high} durchgeführt und zwar auf folgende Weise:

Es wird geprüft, ob t_{mid} nahe (kleiner als der Schwellenwert th_{mh}) an t_{high} und weit genug (größer als ein anderer Schwellenwert th_{ml}) von t_{low} entfernt ist. Falls diese Bedingungen erfüllt sind, werden die Cluster von t_{mid} und t_{high} zusammengeführt (siehe Bild rechts unten in **/Bild 80/**). **/Bild 81/** zeigt die Beispiele, bei denen eine solche Bedingung nicht erfüllt ist; als Ergebnis hat der untersuchte Bereich weiterhin drei verschiedene Segmente. Die endgültige Entscheidung (ist der untersuchte Hot Spot eine Anomalie oder nicht?) wird getroffen, indem geprüft wird, ob die Temperaturdifferenz zwischen der Region mit der höchsten Temperatur (t_{high}) und ihrer Umgebung (t_{low} oder t_{mid}) höher ist als ein vordefinierter Wert ($th_{anomaly}$). Alle Schritte zur Entscheidung, ob ein Hotspot eine Anomalie ist, sind im Entscheidungsbaum in **/Bild 79/** dargestellt.

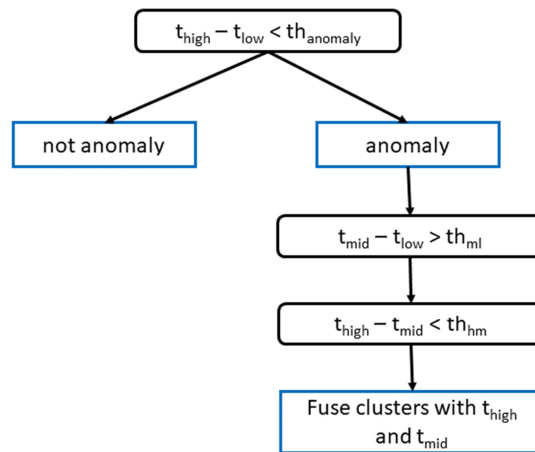


Bild 79 Anomalie-Entscheidungsbaum.

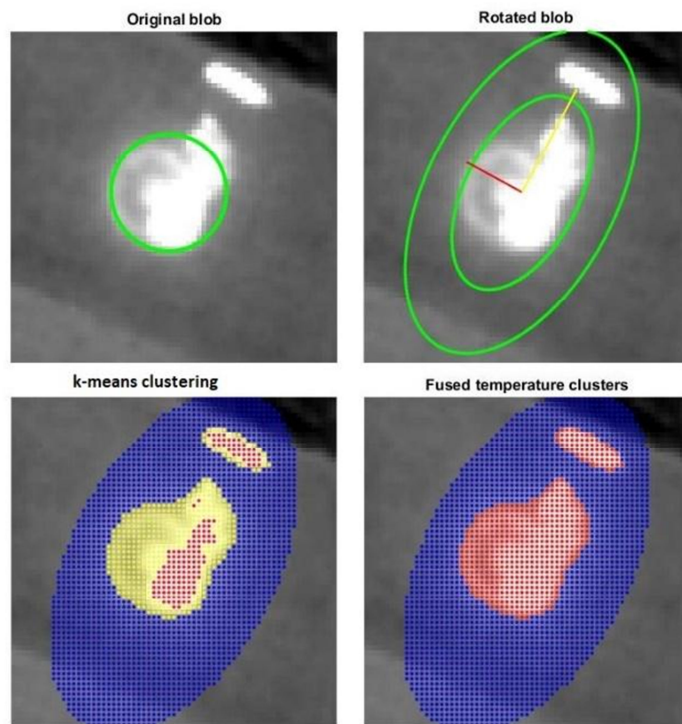


Bild 80 Anomalie-Erkennung mit Cluster-Zusammenführung.

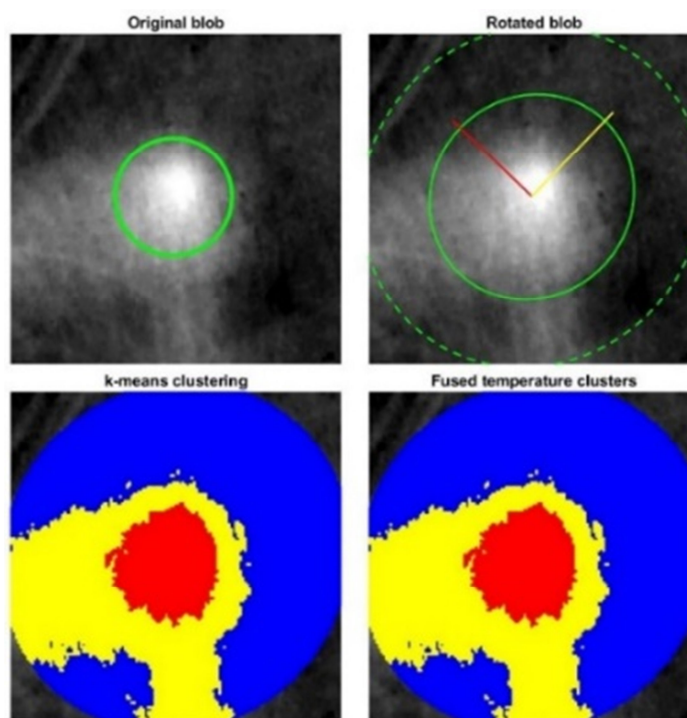


Bild 81 Anomalie-Erkennung ohne Cluster-Zusammenführung.

7.2.3 Ergebnisse und Diskussion

Viele Gründe, u.a. Schwankungen der Wassertemperatur des DHS, Rohrtiefe, Rohrtyp (Breite, Dämmungstyp usw.) und das Material zwischen Rohr und Oberfläche, bewirken, dass nicht alle Rohre genügend Wärmesignatur erzeugen, um vom TIR-Sensor erfasst werden zu können. Auf der Grundlage von Literaturrecherchen wird zunächst angenommen, dass eine Leckage eine Temperaturdifferenz von 5 °C und mehr gegenüber der Umgebung erzeugen sollte. Aufgrund der Tatsache, dass in den erfassten Daten keine tatsächliche Leckage vorhanden ist, wird $th_{anomaly}$ auf 2 °C gesetzt. Weiter hat sich während der Experimente ergeben, dass $th_{mh} = 1$ °C und $th_{ml} = 2$ °C gute Ergebnisse bei der Cluster-Fusion liefern. Daraufhin werden etwa 200 solcher Anomalien in den Bildern sichtbar. Im nächsten Schritt werden den erkannten Anomalien manuell Klassenlabel zugeordnet: Anomalien in Bezug auf das DHS (s. Beispiele in **/Bild 82/**), Schächte (s. Beispiele in **/Bild 83/**), Wärmebereiche in Bezug auf Gebäude (s. Beispiele in **/Bild 84/**), Wärmebereiche bezüglich anderer künstlicher Objekte (s. Beispiele in **/Bild 86/**), Straßenlampen, geparkte Autos, Personen und unbekannte Objekte (s. Beispiele in **/Bild 85/**). **/Tabelle 28/** fasst die Anzahl der erkannten Anomalien für jede Klasse zusammen. Aus diesen Zahlen wird deutlich, dass die Anzahl der Anomalien, die für die Erkennung einer Leckage interessant sind, in der Tat recht gering ist. Es liegt also eine große Menge an Fehlalarmen vor.

Bei den übrigen Ergebnissen werden zwei Arten von Anomalien beobachtet. Der erste Typ bezieht sich auf Anomalien, die durch ein lokales Gebiet mit hoher Temperatur verursacht werden. Diese sind im Rahmen dieser Untersuchung relevant. Der zweite Typ Anomalien befindet sich in unmittelbarer Nähe sehr kalter Objekte (s. **/Bild 86/** als Beispiel). In diesem Fall übersteigt der Temperaturunterschied zwischen dem Gebiet und seiner Umgebung nicht $th_{anomaly}$, jedoch war die Nähe zu einem kalten Objekt ursächlich für die Erkennung der Anomalie. Das Gleiche gilt zumeist für Anomalien im Zusammenhang mit Gebäuden. Wie von Friman u.a. [11] festgestellt und in den Untersuchungsergebnissen beobachtet, scheinen Gebäudedächer tatsächlich kälter zu sein, insbesondere in den frühen Morgenstunden. Hier könnten die absoluten Temperaturen untersucht werden, um diese Fälle von den gesuchten Anomalien im Zusammenhang mit dem DHS zu unterscheiden.

Um Fehlalarme automatisch zu identifizieren und so die Ergebnisse auf diejenigen zu reduzieren, die für die Erkennung von Leckage aussagekräftig sind, ist eine automatische Klassifizierung der verbleibenden Anomalien notwendig, die aber in dem Projekt aufgrund der Tatsache, dass keine tatsächlichen Leckagen und damit keine Trainingsdaten für die Klassifikation vorlagen, nicht durchgeführt werden konnte.

Tabelle 28 Anomalie-Label.

Art	Anzahl
ANOMALIEN IM ZUSAMMENHANG MIT DEM DHS	13
SCHÄCHTE	22
GEBÄUDEWÄRME	38
STRABENBELEUCHTUNG	6
KFZ	7
ANDERE KÜNSTLICHE OBJEKTE	56
MENSCHEN	7
UNBEKANNTE OBJEKTE	49
SUMME	198

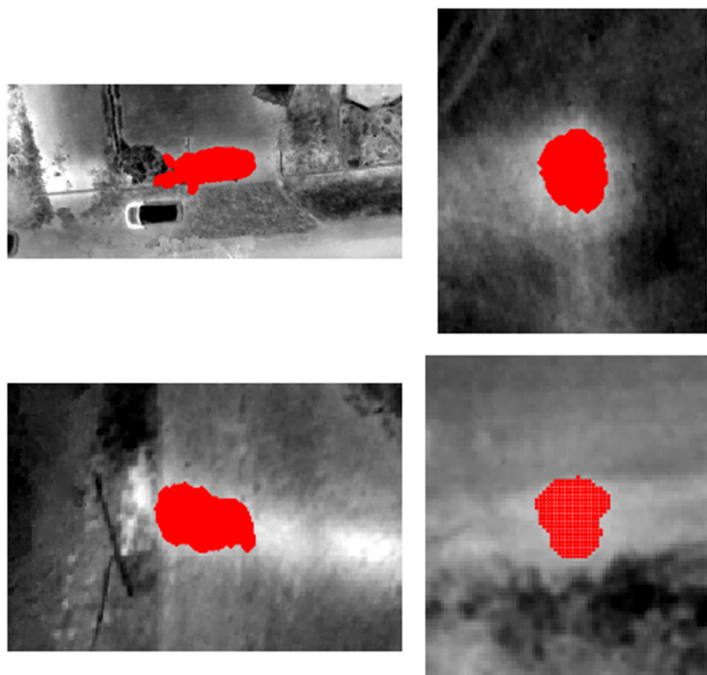


Bild 82 Beispiele von Anomalien - anormale Rohrtemperaturen.

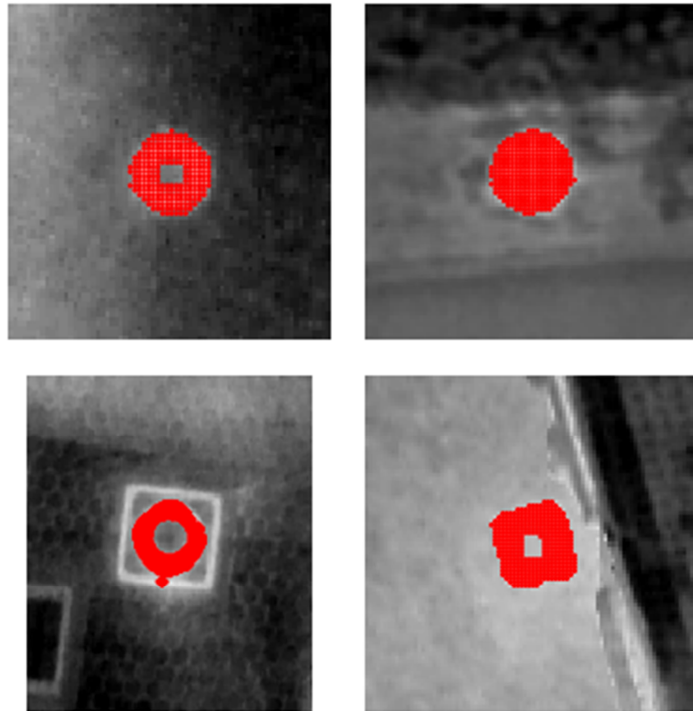


Bild 83 Beispiele von Anomalien – Schächte.

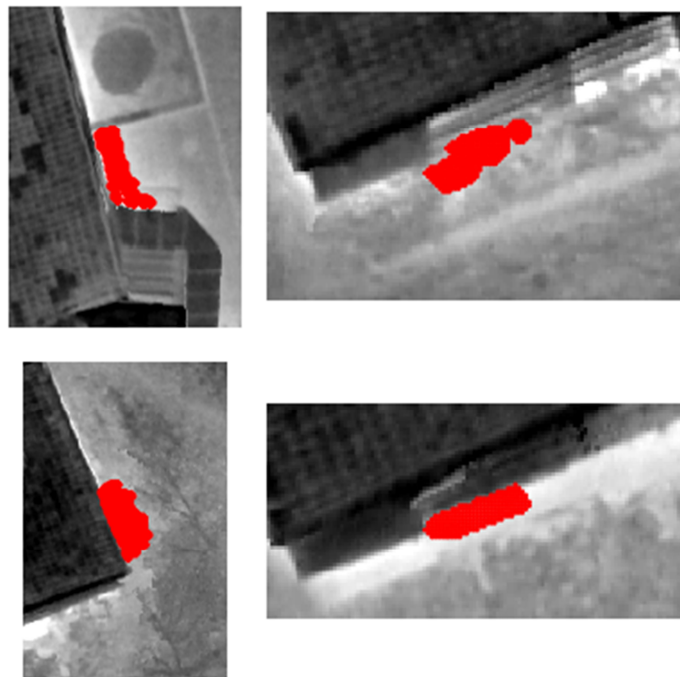


Bild 84 Beispiele von Anomalien – bedingt durch Gebäude.

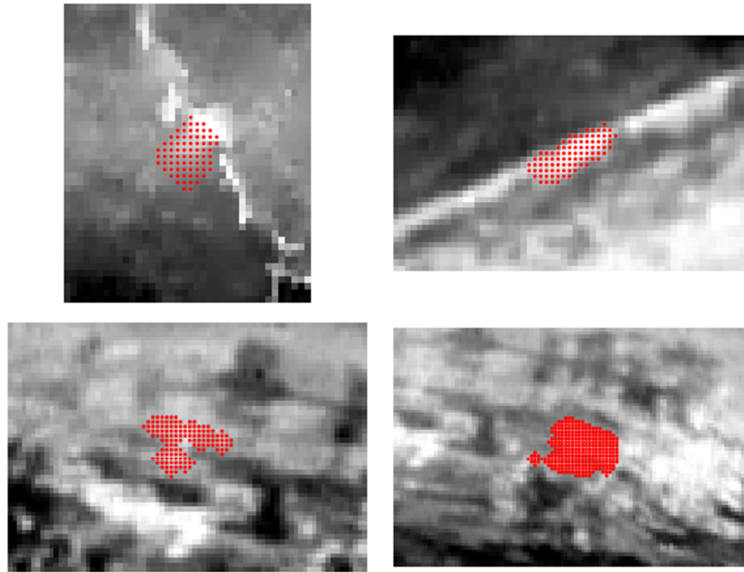


Bild 85 Beispiele von Anomalien – unbekannte Objekte.

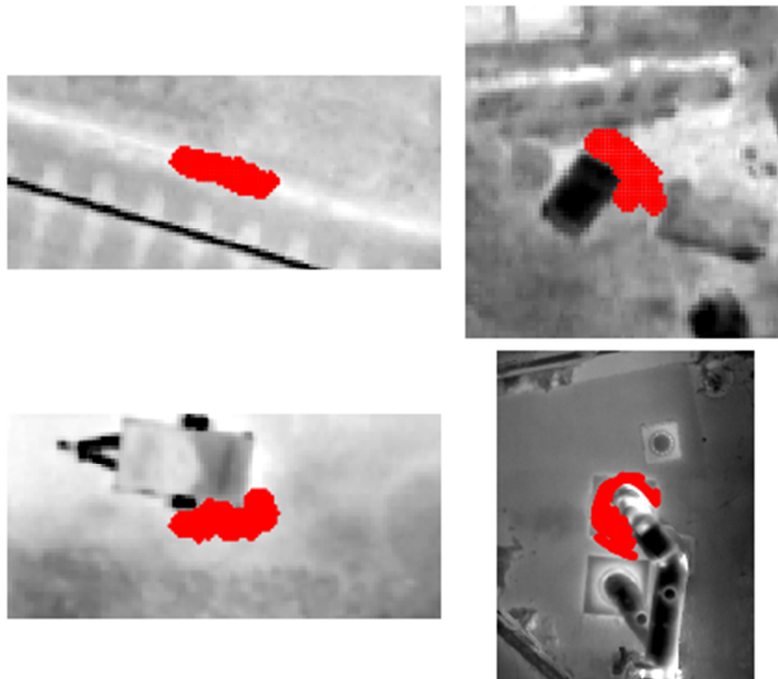


Bild 86 Beispiele von Anomalien – andere künstliche Objekte.

7.2.4 Fazit

Im vorigen Abschnitt ist die automatisierte Methode zur Detektion und Lokalisierung thermischer Anomalien im Zusammenhang mit der DHS-Erkennung vorgestellt. Die UAV-Bildaufnahme sowie die photogrammetrische Verarbeitung von Wärmebildern ermöglicht die Überlagerung von entzerrten Wärmebildern mit GIS-Daten (digitalen Kartendaten), die den Standort des DHS angeben. Hierbei werden Fehlalarme reduziert, indem die Suchgebiete auf Bereiche in der Nähe der Netze beschränkt werden. Die Genauigkeit der Bilder ist jedoch aufgrund der Nutzlast des UAV und der dort eingesetzten relativ kostengünstigen Sensortechnik begrenzt. In zukünftigen Arbeiten sollte untersucht werden, wie die thermischen und optischen Bilder besser integriert werden können, um die genannten Probleme zu beheben. Aus photogrammetrischer Sicht wäre es denkbar, eine gemeinsame Blockausgleichung der optischen mit den Thermalbildern durchzuführen. Wie aus **Tabelle 27** hervorgeht, erreicht der optische Block eine höhere Genauigkeit als der thermische, eine Integration der beiden Bildsätze führt somit zu einer höheren Genauigkeit des thermischen Orthomosaiks. Die thermische und optische Blockregistrierung könnte auf optischen und thermischen Ground Control Points (GCP) basieren. Auf diese Weise werden beide Blöcke, der thermische und der optische Block, auf dasselbe Datum georeferenziert. Ein solcher Schritt erfordert jedoch eine komplexere Flugplanung bezüglich der GCP-Platzierung und der Messung. Auf der anderen Seite ist auch die nachträgliche Registrierung der thermischen und der optischen Punktwolke möglich. Wie von Maset u.a. [32] vorgeschlagen, ist der Iterative Closest Point (ICP)-Algorithmus dafür eine geeignete Lösung. Noch enger wird die Integration mittels einer gemeinsamen Bündelausgleichung zwischen thermischen und optischen Bildern, die eine multimodale Bildzuordnung erfordert (z.B. Mehlretter und Heipke, [33]). Das Ergebnis ist ein konsistenterer Datensatz, ein detaillierteres DSM und ein geometrisch genaueres thermisches Orthomosaik.

Insbesondere in Bezug auf die Erkennung von Anomalien führt die oben beschriebene Methode zu recht belastbaren Ergebnissen. Zwar existieren in den untersuchten Daten keine tatsächlichen Leckagen, aber die Erkennungsrate ist manuell verifiziert worden. Andererseits hat die Methode, die auf lokalen Temperaturgradienten basiert (Blob-Detektor), den Nachteil, Fehlalarmen aufgrund der Nähe zu kalten Objekten nicht zu erkennen. In Anbetracht dessen ist die Verwendung optischer Daten von einer zweiten Kamera im Hinblick auf die Objekterkennung von Vorteil. Unter der Annahme, dass sich in einem betrachteten Bereich ein Objekt befindet, sollte ein solches Objekt sowohl im optischen als auch im thermischen Datenrahmen betrachtet werden.

Es überrascht nicht, dass im Hinblick auf Anomalien im Zusammenhang mit dem DHS eine relativ große Anzahl von Fehlalarmen festzustellen ist. Dennoch sind viele davon relativ leicht zu erkennen und zu beseitigen. Insbesondere können Anomalien im Zusammenhang mit 3D-Objekten wie Gebäuden mit Hilfe der GIS-Gebäudeebene und durch die Inspektion eines normalisierten DSM (nDSM), das aus dem für die Orthoprojektion verwendeten DSM abgeleitet werden kann, identifiziert werden, z.B. mit einer der von Sithole und Vosselman [34] untersuchten Methoden. Durch die Analyse des nDSM können Objekte, die sich auf bzw. über dem Erdboden befinden (Gebäude, Straßenlampen, Autos usw.), automatisch von der weiteren Verarbeitung ausgeschlossen werden, da thermische Anomalien im Zusammenhang mit DHS nur unter dem Bodenniveau auftreten können. Eine solche Annahme gilt natürlich nicht, wenn sich im untersuchten Bereich Rohre über dem Bodenniveau befinden, wie in **Bild 11** dargestellt.

Zusätzlich sollte der Datensatz erweitert werden. Der aktuelle Datensatz verfügt nach unseren Erfahrungen trotz vieler Flüge noch nicht über eine ausreichende Anzahl thermischer Anomalien, um diese automatisch eindeutig klassifizieren zu können. Ggf. könnten die Klassifikationsergebnisse auf Objektebene auch eine differenzierte Aussage hinsichtlich des Zustands des DHS liefern.

7.3 Multi-temporale Flüge

Ein Ziel dieses Projekts besteht darin, die Anwendbarkeit eines mit einer TIR-Kamera ausgerüsteten UAV für die Zustandsbeschreibung eines DHS über die Zeit zu testen. Die multi-temporale (Zeitreihen-) Analyse liefert quantifizierbare Messungen über die Zeit. Auf diese Weise können Hinweise auf sich langsam entwickelnde Veränderungen, die unter normalen Bedingungen statisch zu sein scheinen, erkannt werden. Wie in Kapitel 7.2 erwähnt, gibt es in den erfassten Daten daneben eine große Anzahl von Fehlalarmen, die durch Objekte mit hoher Temperatur verursacht werden, die nicht zum DHS gehören. Multi-temporale Daten könne auch hilfreich zur Reduzierung dieser Fehlalarme sein, indem bewegliche Objekte, z.B. Personen oder Autos, durch eine multi-temporale Analyse aus den Ergebnissen eliminiert werden.

Im Abstand von zehn Monaten sind zwei Flüge über demselben Ort (Georgengarten, Hannover) durchgeführt worden. **/Tabelle 29/** fasst die Umweltbedingungen während beider Flüge zusammen. Die Flugrouten sind nicht völlig identisch, jedoch gibt es einen Überlappungsbereich zwischen den beiden Flügen. **/Bild 87/** zeigt die produzierten Orthomosaik. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Rohre vom Typ DN 500 eine starke Wärmesignatur erzeugen, wie auch in **/Bild 57/** und **/Bild 58/** zu sehen ist. Infolge der starken Wärmesignatur wird der größte Teil des Rohres als anomal erkannt (s. **/Bild 88/**): Der Temperaturunterschied zwischen den Hot Spots und der Umgebung ist grösser als 2 °C.

Tabelle 29 Informationen zu Flügen im Georgengarten.

Datum	Zeit	Flughöhe	Temperatur	Wind	Bewölkung	Sonnenaufgang
31/01/2019	09:11	40 m	0 °C	3,0 m/s	vereinzelte Wolken	08:04
17/12/2019	15:28	40 m	11,7 °C	3,8 m/s	wolkenlos	08:25

Da die beiden Flüge im Abstand von nur ca. einem Jahr durchgeführt worden sind (ein größerer Zeitraum war im Rahmen des Projekts nicht realisierbar), kann aufgrund dieser Daten leider keine klare Aussage über etwaige Zustandsänderungen der Rohrleitungen gemacht werden, denn die beiden Bilder in **/Bild 87/** unterscheiden sich hinsichtlich der relevanten Parameter nicht signifikant.

Zur Berücksichtigung möglicher Fehlalarme werden zunächst Hot-Spots, die unmittelbar mit dem Rohr in Verbindung stehen, berücksichtigt. Wegen des starken Signals werden die lokal erkannten Hot Spots (s. /Bild 88/) in einem Abstand von ca. 1,5 m vom Rohr zu einer linearen Kombination verbunden, die für die Eliminierung von Fehlalarmen nicht weiter berücksichtigt werden müssen. Als Ergebnis ist in dem Bild vom 31.01.2019 eine Gruppe von Personen (s. /Bild 89/) in der Nähe des Rohrs. Während des Fluges am 17.12.2019 ist diese Region dagegen frei von thermischen Anomalien. Durch diesen Vergleich ist der Fehlalarm vom 31.01.2019 erkannt und eliminiert worden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die multitemporale Analyse ein sinnvolles Instrument für die DHS-Überwachung darstellt. Allerdings liegen derzeit für eine abschließende Bewertung noch zu wenige Daten vor. Die Reduzierung von Fehlalarmen ist grundsätzlich nachgewiesen worden, sie besitzt einen Einfluss auf die Erkennung und Klassifizierung von thermischen Anomalien.

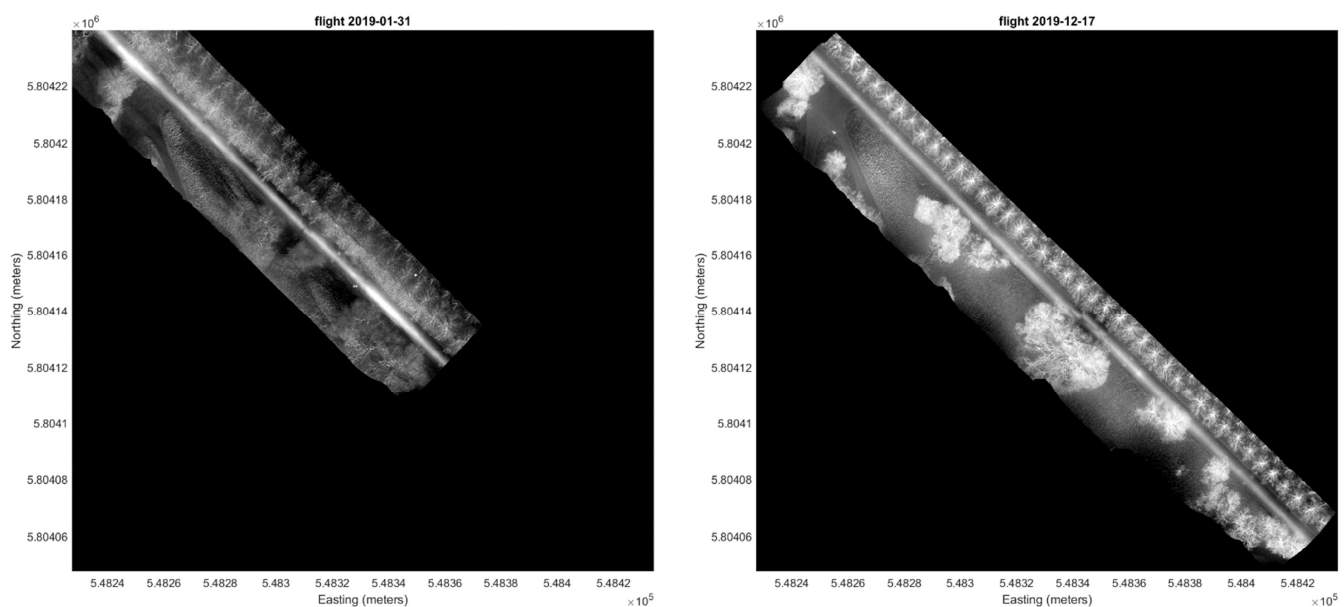


Bild 87 Orthomosaik der Flüge im Georgengarten, links Flug vom 31.01.2019, rechts Flug vom 17.12.2019.

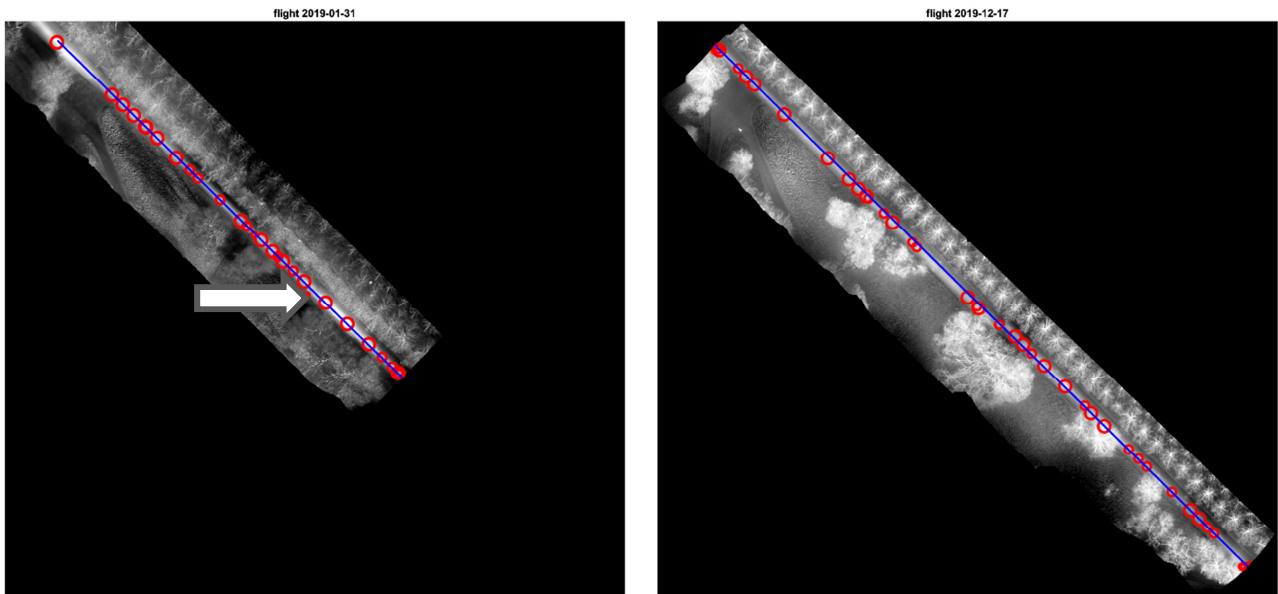


Bild 88 Ergebnisse der Anomalie-Erkennung der Georgengarten-Flüge, der Pfeil links deutet auf den Fehlalarm (rechts ist an dieser Stelle kein Hot Spot zu erkennen).

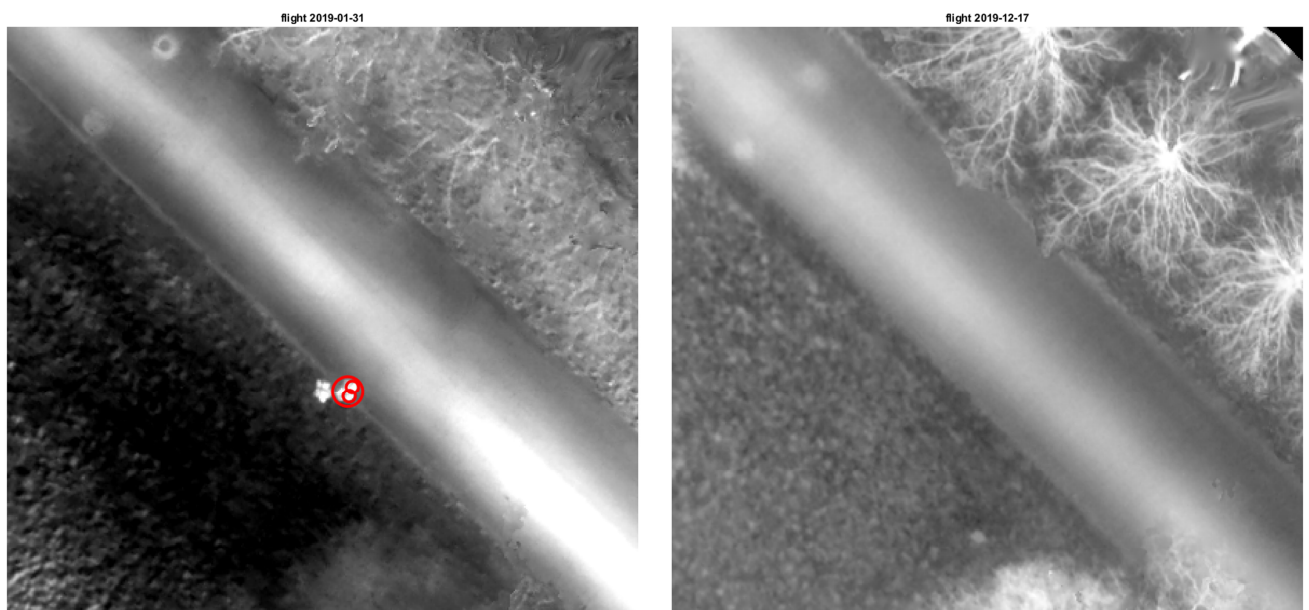


Bild 89 Vergrößerung des nur in einem Flug beobachteten Objekts.

8. Drohnengestützte Thermografie als Basis der Asset- und Instandsetzungsstrategie

Die Instandhaltung ist ein Bestandteil des Asset-Managements. Ein Asset-Management beinhaltet die Investition und Kostenplanung für:

- Planung und Neubau,
- Umbau,
- Rückbau und
- Instandhaltung.

Wärmenetze in Städten sind i.A. historisch gewachsen und können aus unterschiedlichen Verlege- und Rohrsystemen bestehen sowie unterschiedliche systemspezifische Komponenten aufweisen. Aufgrund von durchgeführten Netzsanierungen und Netzerweiterungen weisen Trassenabschnitte zudem unterschiedliche Betriebszeiten auf. Im folgenden **/Bild 90/** ist eine Übersicht der Struktur von Fern- und Nahwärmenetzen dargestellt.

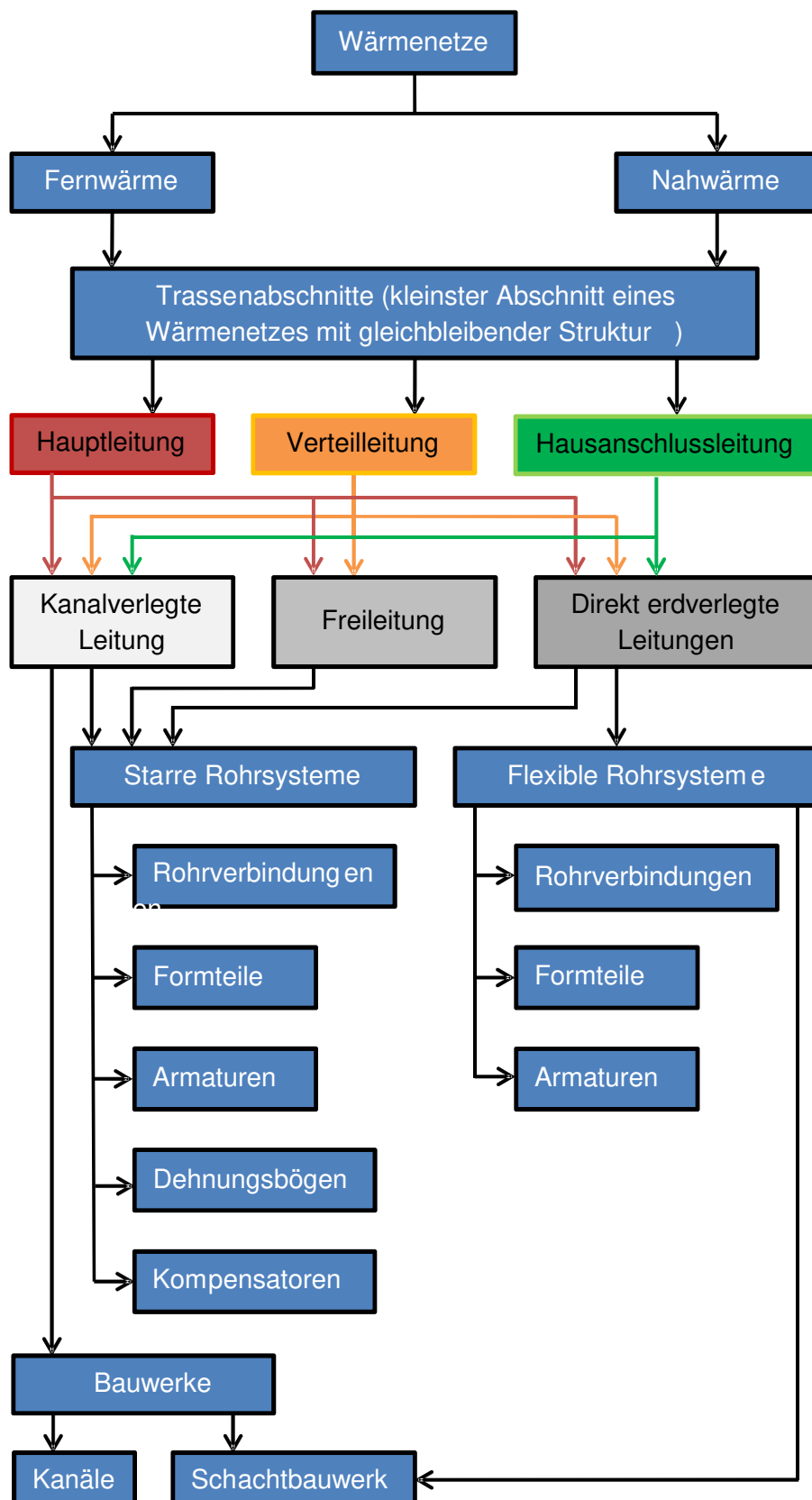


Bild 90 Struktur von Wärmenetzen.

Aufgrund der unterschiedlichen Wärmenetzstrukturen und lokalen Gegebenheiten werden verschiedene Strategien der Instandhaltung verfolgt. Die Instandhaltung beinhaltet Maßnahmen für die Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung von Trassenabschnitten /**Bild 91**/.

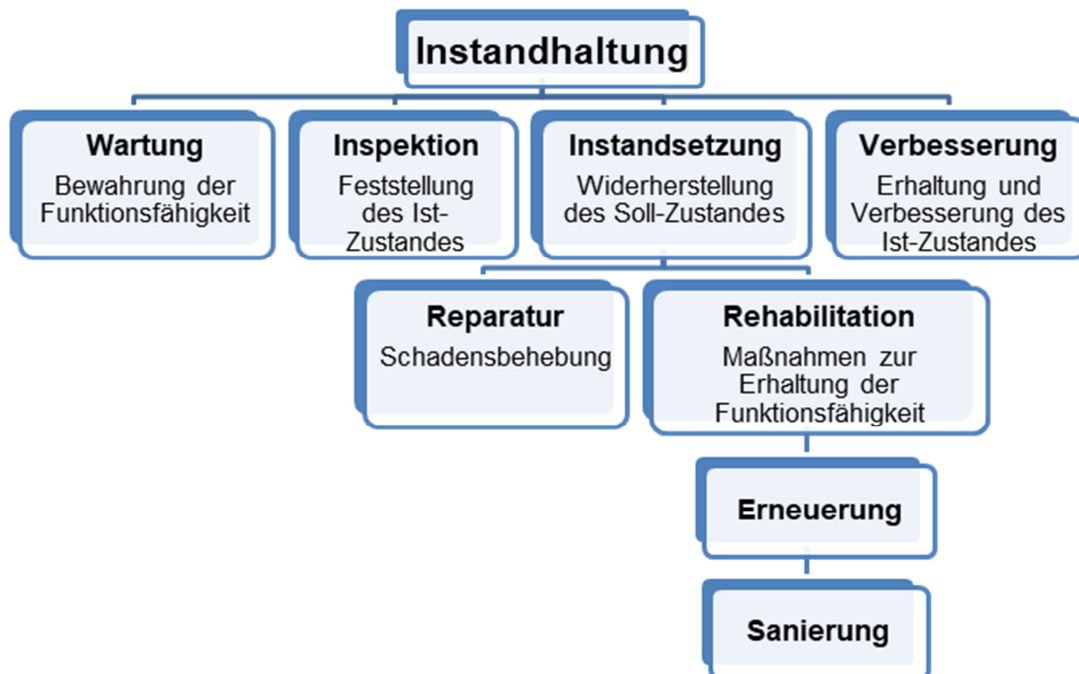


Bild 91 Maßnahmen zur Instandhaltung [35].

Ziel der Instandhaltung ist es, die Betriebssicherheit zu gewährleisten, das Auftreten von Schäden zu reduzieren bzw. zu verhindern und eine wirtschaftliche Planungssicherheit für zukünftige Instandhaltungsmaßnahmen zu gewährleisten. Die Grundstrategien der Instandhaltung sind in /**Bild 92**/ dargestellt.

Die ereignisorientierte Instandhaltungsstrategie dient der Schadensbehebung und wird bei unzugänglichen Stellen sowie an Stellen bei denen eine Inspektion nicht möglich oder mit extrem hohem Aufwand verbunden ist praktiziert. Erst bei Eintritt eines Schadens erfolgt die Reparatur.

Die zeitorientierte und zustandsorientierte Instandhaltung sind Maßnahmen zur Schadensvermeidung. Bei zeitorientierter Instandhaltung erfolgen Instandhaltungsmaßnahmen zu festgelegten Terminintervallen, unabhängig vom Zustand. Werden Umfang und Terminintervalle dem aktuellen Zustand des Wärmenetzes angepasst, so wird dies als zustandsorientierte Instandhaltung bezeichnet.

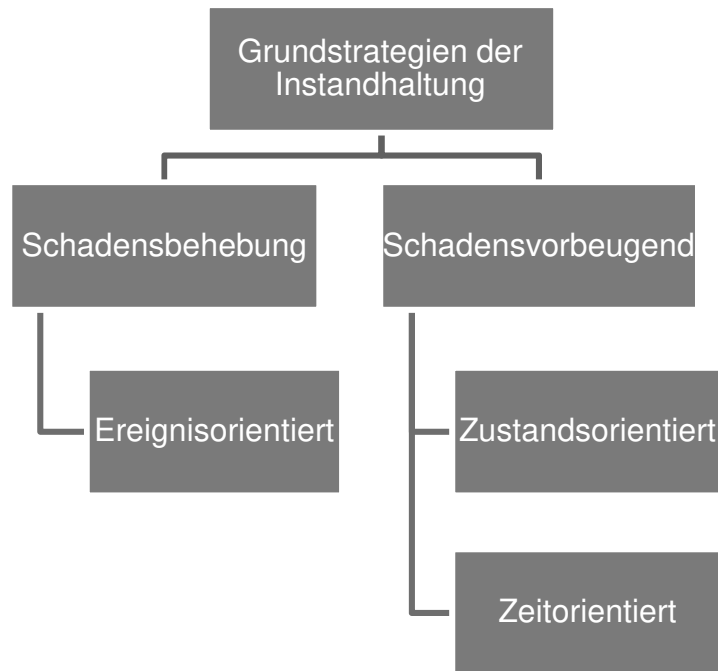


Bild 92 Grundstrategien der Instandhaltung [35].

Als weitere Strategie wird die risikoorientierte Instandhaltung angewendet. Sie nutzt die Vorteile der dargestellten Grundstrategien.

Für eine Instandhaltungsstrategie ist es erforderlich, den Zustand der Trassenabschnitte zu kennen bzw. zu erfassen. Der Zustand eines Wärmenetzes ergibt sich aus der Summe der Qualität beim Bau des Wärmenetzes und der Belastungen während der Betriebsphase. Beim Bau von Wärmenetzen wird die Qualität durch die

- Produktqualität der Komponenten,
- Materialien der verwendeten Komponenten,
- Montage- / Ausführungsqualität,
- Bettungsmaterialien in der Leitungszone und der
- Verlegetiefe

beeinflusst.

Während des Betriebes wird der Zustand des Wärmenetzes durch folgende Parameter beeinflusst:

- Qualität des Mediums (Wasser),
- Betriebstemperaturen,
- Betriebsdrücke,
- Anzahl und Höhe der Temperaturlastwechsel und
- Betriebszeit.

Kenntnisse über das Verlegesystem, Betriebszeit, den Belastungen während der Betriebszeit, Wasser- und Druckverluste sowie die Häufigkeit von Schadensereignissen geben Hinweise auf den Zustand eines Trassenabschnittes.

Die drohnengestützte Thermografie ist ein visuelles Inspektionsverfahren zur Zustandsaufnahme in Bezug auf die Wärmeverluste von Wärmenetzen. Durch den Einsatz dieser Technologie können Leckagen in Abhängigkeit des Rohrsystems erkannt und geortet werden. Der flexible Einsatz der drohnengestützten Thermografie ermöglicht es, Trassenabschnitte in definierten Zeitabständen zu überfliegen, um Veränderungen zu identifizieren. Das Verfahren ist für die Zustandserfassung der ereignisorientierten und zustandsorientierten Instandhaltung für folgende Systeme einsetzbar [36]:

- Bitumengießverfahren,
- Faser- Zement-Mantelrohre,
- flexible Mantelrohre mit metallischen Mediumrohren,
- flexible Mantelrohre mit Mediumrohren aus Kunststoff,
- Freileitungen,
- Kanalleitungen,
- Kunststoffmantelrohre,
- Schutzrohr,
- Schütt- und Gießverfahren und
- Stahlmantelrohr.

Voraussetzung für den Einsatz der drohnengestützten Thermografie zur Zustandserfassung ist eine ungestörte, freie Sicht auf die Oberfläche über dem Trassenabschnitt. Grundsätzlich ist zu prüfen, ob die gesetzlichen Regelungen eine Drohnenbefliegung aufgrund der örtlichen Gegebenheiten zulassen. Die Verlegetiefe sollte entlang des Trassenverlaufs konstant sein und 1 m nicht überschreiten. Die Mediumtemperatur in der Vorlaufleitung sollte der maximalen zulässigen Dauerbetriebstemperatur des Rohrsystems entsprechen und mindesten 1 bis 2 Wochen vor der Befliegung einen konstanten Wert aufweisen, damit sich ein möglichst konstanter Wärmeverluststrom einstellt.

Die Witterungsverhältnisse sind für die Qualität und Aussagekraft der Thermalbilder entscheidend. Der Einsatz von drohnengestützten Thermografie-Systemen ist auf die Monate zwischen Oktober bis April begrenzt.

Der Wärmeverluststrom von wärmegeprägten Rohrleitungen zum Transport von Wärme wird durch die Temperaturdifferenz zwischen dem transportierten Medium und der Umgebung verursacht. Ist der Wärmeverluststrom groß genug, wird über den Trassen von Wärmenetzen eine Temperatursignatur an der Oberfläche abgebildet. Die abgebildete Temperatursignatur an der Erdoberfläche wird insbesondere von den Witterungsbedingungen beeinflusst. Die folgenden witterungsbedingten, äußeren Störgrößen beeinflussen die Temperatursignatur an der Erdoberfläche und können zu Fehlinterpretationen bei der Auswertung der Thermalbilder führen:

- Sonneneinstrahlung,
- Bewölkung.
- Wind,
- Niederschläge und
- Nebel.

Am Tag werden Flächen und Gebäude durch die Sonneneinstrahlung erwärmt. Am Abend wird die gespeicherte Wärme abgegeben. Um den Einfluss der durch die Sonneneinstrahlung verursachten Erwärmung zu eliminieren, ist die drohnengestützte Thermografie einige Stunden nach Sonnenuntergang oder vor Sonnenaufgang durchzuführen.

Anhaltender Regen und Wind führen zu einer Abkühlung der Erdoberfläche. Aus diesem Grund ist die drohnengestützte Thermografie bei geringer Windstärke und trockenem Wetter durchzuführen. Eine geschlossene Schneedecke isoliert die Erdoberfläche, und Thermalanomalien sind nicht mehr identifizierbar. Bei Nebel wird die Wärmestrahlung durch die Wasser-Tröpfchen gedämpft.

Von dem Energieversorgungsunternehmen sind für die Durchführung einer drohnengestützten Zustandsaufnahme ein GIS-Lageplan und Netzplan für den betreffenden Trassenabschnitt bereitzustellen.

Zudem sind Informationen/Angaben über den Trassenabschnitt hinsichtlich des Verlegesystems, der Dimension der Rohrleitungen (Vorlauf und Rücklauf), der Mediumtemperaturen sowie der Verlegetiefe und Betriebszeit / Alter zu dokumentieren.

8.1 Einsatz der drohnengestützten Thermografie unter Berücksichtigung der zukünftigen Entwicklung des Wärmebedarfs

Wärme wird in Gebäuden zum Heizen der Räume als Raumwärme und zur Warmwassererzeugung genutzt. Die Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs für Gebäude erfolgt gemäß DIN 4701 auf folgender stationären Energiebilanzgleichung:

$$Q_h = Q_T + Q_V - \eta \cdot (Q_S + Q_i) \quad (8-1)$$

Q_h = Jahres-Heizwärmebedarf

Q_T = Wärmeverlust durch Transmission (Wärmeleitung in Bauteilen und Wärmeübergang an den Bauteiloberflächen)

Q_V = Wärmeverlust durch Lüftung infolge Luftaustausch warmer Raumluft durch kalte Außenluft

η = Ausnutzungsfaktor der Wärmegewinnung, mit dem für Heizzwecke nutzbare, solare und interne Wärmegewinne sowie die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes Berücksichtigung finden

Q_S = solare Wärmegewinnung infolge direkter Strahlungstransmission durch transparente Bauteile bzw. durch Strahlungsabsorption an den Oberflächen nicht transparenter Bauteile

Q_i = innere Wärmegewinnung infolge Betrieb elektrischer Geräte, künstlicher Beleuchtung und Körperwärme von Menschen

Der Wärmebedarf eines Gebäudes ist u.a. von der Fläche und dem Material der Gebäudehülle abhängig und wird durch den Wärmeverlust durch Transmission berücksichtigt. Durch verbesserte Wärmedämmung von Gebäuden wird der Wärmeverlust durch Transmission verringert. Dadurch verringert sich der Jahresheizwärmebedarf. Die Entwicklung des spezifischen Wärmebedarfs für Deutschland ist in **/Bild 93/** dargestellt.

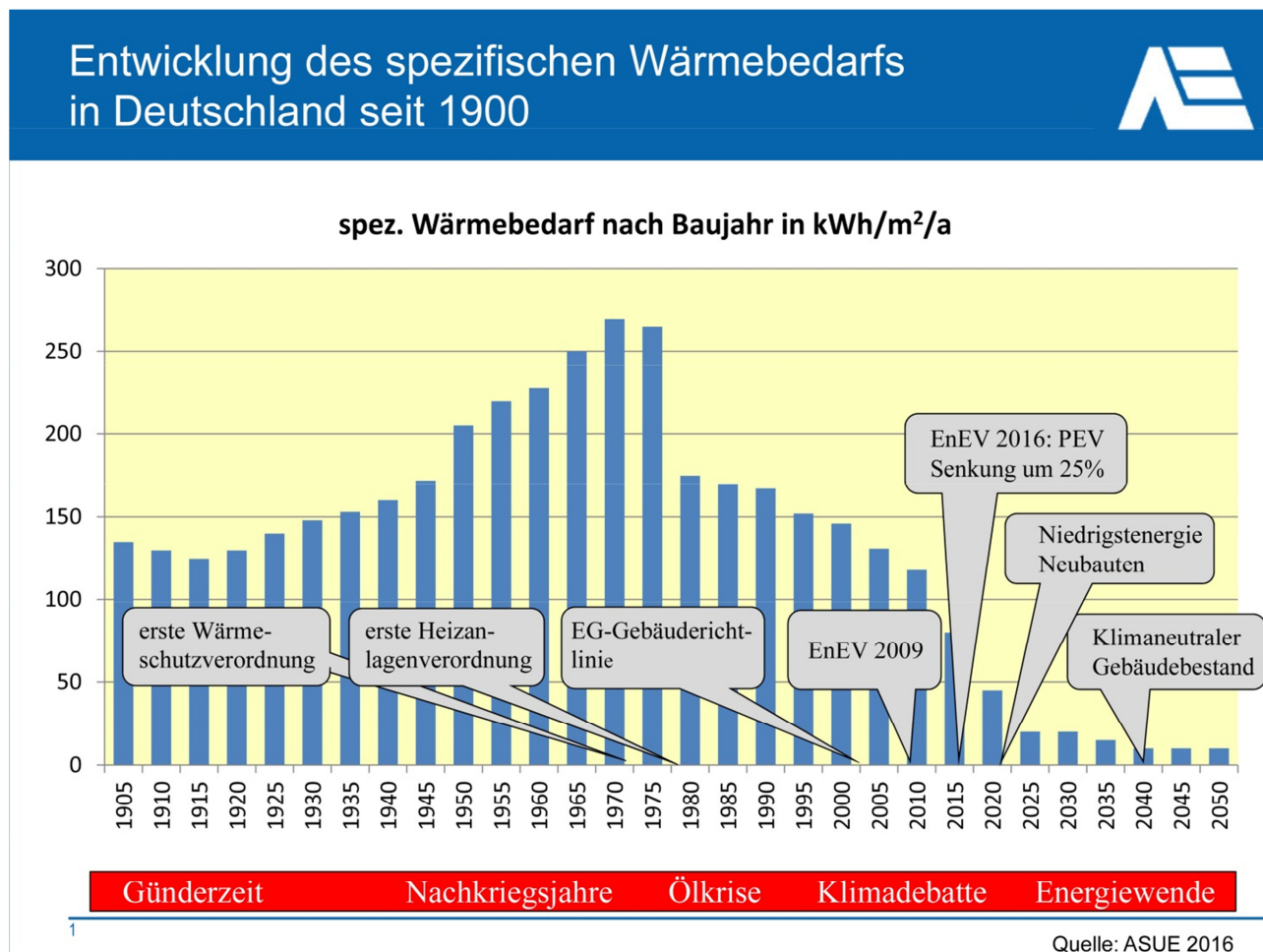


Bild 93 Entwicklung des spezifischen Wärmebedarfs in Deutschland [37].

Zukünftig wird die benötigte Wärmemenge zur Versorgung von Gebäuden geringer. Dies hat Auswirkungen auf die Dimensionierung und Struktur zukünftiger Wärmenetze. Die Wärmemenge kann durch Absenken der Vorlauftemperatur und durch verbauen von Rohrleitungen in kleineren Dimensionen reduziert werden. In Abhängigkeit der Vorlauftemperatur und der Dimension der Rohrleitung können unterschiedliche Rohrsysteme eingesetzt werden. Die Rohrsysteme unterscheiden sich durch die Materialien aus denen sie gefertigt werden. Diese Veränderung in der Netzstruktur hat Auswirkungen auf den Wärmeverlust der Wärmenetze. Ein Vergleich von zwei unterschiedlichen Rohrsystemen eines Herstellers in Bezug auf den spezifischen Wärmeverlust veranschaulicht diesen Einfluss. Für das System Kunststoffmantelrohr (KMR) und für ein flexibles Verbundrohrsystem mit einem Mediumrohr aus Kunststoff werden die spezifischen

Wärmeverluste in Abhängigkeit des Mediumrohrdurchmessers berechnet. Die Berechnung und die Parameter erfolgen gemäß den Angaben in den Produktunterlagen des Herstellers.

Gemäß den Produktunterlagen des Herstellers erfolgt die Berechnung des spezifischen Wärmeverlustes auf Basis der folgenden Gleichungen:

$$q = U (t_B - t_E) \quad (8-2)$$

$$U = \frac{1}{R_{iso} + R_{Me} + R_{Ma} + R_{erd} + R_{duo}} \quad (8-3)$$

$$R_{dou} = \frac{1}{4\pi\lambda_E} \ln \left\{ 1 + \frac{[2 \cdot (h + 0,0685 \cdot \lambda_E)]^2}{C^2} \right\} \quad (8-4)$$

$$R_{erd} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_E} \ln \left[\frac{4 \cdot (h + 0,0685 \cdot \lambda_E)}{D_a} \right] \quad (8-5)$$

$$R_{iso} = \frac{1}{2\pi\lambda_{iso}} \ln \frac{D_i}{d_a} \quad (8-6)$$

$$R_{Ma} = \frac{1}{2\pi\lambda_{Ma}} \ln \frac{D_a}{D_i} \quad (8-7)$$

$$R_{Me} = \frac{1}{2\pi\lambda_{Me}} \ln \frac{d_a}{d_i} \quad (8-8)$$

Tabelle 30 Formelzeichen, Bezeichnungen und Einheiten zur Berechnung des Wärmeverlustes nach Herstellerangaben.

Formelzeichen	Größe	Einheit []
C	Verlege-Abstand zwischen den Rohrachsen	m
D _a	Außendurchmesser des Mantelrohres bzw. Ummantelung	m
d _a	Außendurchmesser des Mediumrohres	m
D _i	Außendurchmesser des Mantelrohres bzw. Ummantelung	m
d _i	Innendurchmesser des Mediumrohres	m
h	Verlegetiefe bezogen auf die Rohrachse	m
q	Spezifischer Wärmeverlust als Summe von Vorlauf und Rücklauf	W·m ⁻¹
R _{duo}	Wärmeleitwiderstand zwischen Vor- und Rücklaufleitung	m·K·W ⁻¹
R _{erd}	Wärmeleitwiderstand des Erdreichs	m·K·W ⁻¹
R _{iso}	Wärmeleitwiderstand der Wärmedämmung	m·K·W ⁻¹
R _{Mantel}	Wärmeleitwiderstand der Ummantelung bzw. Mantelrohr	m·K·W ⁻¹
R _{Medium}	Wärmeleitwiderstand des Mediumrohres	m·K·W ⁻¹
U	Wärmedurchgangskoeffizient	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
t _B	Mittlere Betriebstemperatur	°C
t _E	Mittlere Erdreichtemperatur	°C
λ _{Me}	Wärmeleitfähigkeit des Mediumrohres	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
λ _{iso}	Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
λ _{Ma}	Wärmeleitfähigkeit des Mantelrohres bzw. Ummantelung	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
λ _E	Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹

Die Geometriedaten und Stoffwerte zur Berechnung des Wärmeverlustes sowie die Angabe der zulässigen Dauerbetriebstemperatur des KMR und des flexiblen Verbundrohrsystems mit einem Mediumrohr aus Kunststoff sind in den folgenden Tabellen dokumentiert.

Tabelle 31 Geometriedaten gemäß dem Hersteller für Kunststoffmantelrohre (KMR).

Stahlrohr			Mantelrohr	
Nenndurchmesser DN	Außendurchmesser [mm]	Wanddicke [mm]	Nenn-Außendurchmesser [mm]	Wanddicke [mm]
20	26,9	2,0	90	3,0
25	33,7	2,3	90	3,0
32	42,4	2,6	110	3,0
40	48,3	2,6	110	3,0
50	60,3	2,9	125	3,0
65	76,1	2,9	140	3,0
80	88,9	3,2	160	3,0
100	114,3	3,6	200	3,2
125	139,7	3,6	225	3,4
150	168,3	4,0	250	3,6

Tabelle 32 Geometriedaten gemäß dem Hersteller für das System „Verbundrohr mit einem Mediumrohr aus Kunststoff“.

Mediumrohr aus Kunststoff		Mantelrohr	
Durchmesser [mm]	Wanddicke [mm]	Außendurchmesser [mm]	Wanddicke [mm]
25	2,3	78	1,9
32	2,9	78	1,9
40	3,7	93	2,1
50	4,6	113	2,3
63	5,8	128	2,7
75	6,8	143	2,9
90	8,2	163	3,2
110	10,0	183	3,3
125	11,4	183	3,3
140	12,7	202	3,3
160	14,6	250	3,9

Tabelle 33 Stoffwerte und Verlege-Parameter zur Berechnung des spezifischen Wärmeverlustes gemäß den Produktunterlagen eines Herstellers.

Angaben zu Verlege- und Betriebsbedingungen	
Mittlere Temperatur zwischen Vorlauf und Rücklauf	80 °C
Mittlere Erdreichtemperatur	10 °C
Überdeckungshöhe h	0,8 m
Verlege-Abstand	0,2 m
Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs	$1,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Stoffparameter Kunststoffmantelrohr	
Wärmeleitfähigkeit Polyurethan (Wärmedämmung)	$0,0260 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit Polyethylen (Ummantelung)	$0,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Stoffparameter flexibles Verbundrohr mit Mediumrohr aus Kunststoff	
Wärmeleitfähigkeit Polyurethan (Wärmedämmung)	$0,0199 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit Mediumrohr aus Kunststoff	$0,38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit der Ummantelung	$0,33 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

In **Bild 94/** ist der berechnete Wärmeverlust als Funktion des Mediumrohrdurchmessers für das Kunststoffmantelrohr und für ein flexibles Verbundrohrsystem mit einem Mediumrohr aus Kunststoff dargestellt. Das flexible Verbundrohrsystem weist bei einem Innendurchmesser des Mediumrohres von 100 mm, aufgrund der Materialien aus denen es gefertigt ist, einen geringeren Wärmeverlust auf.

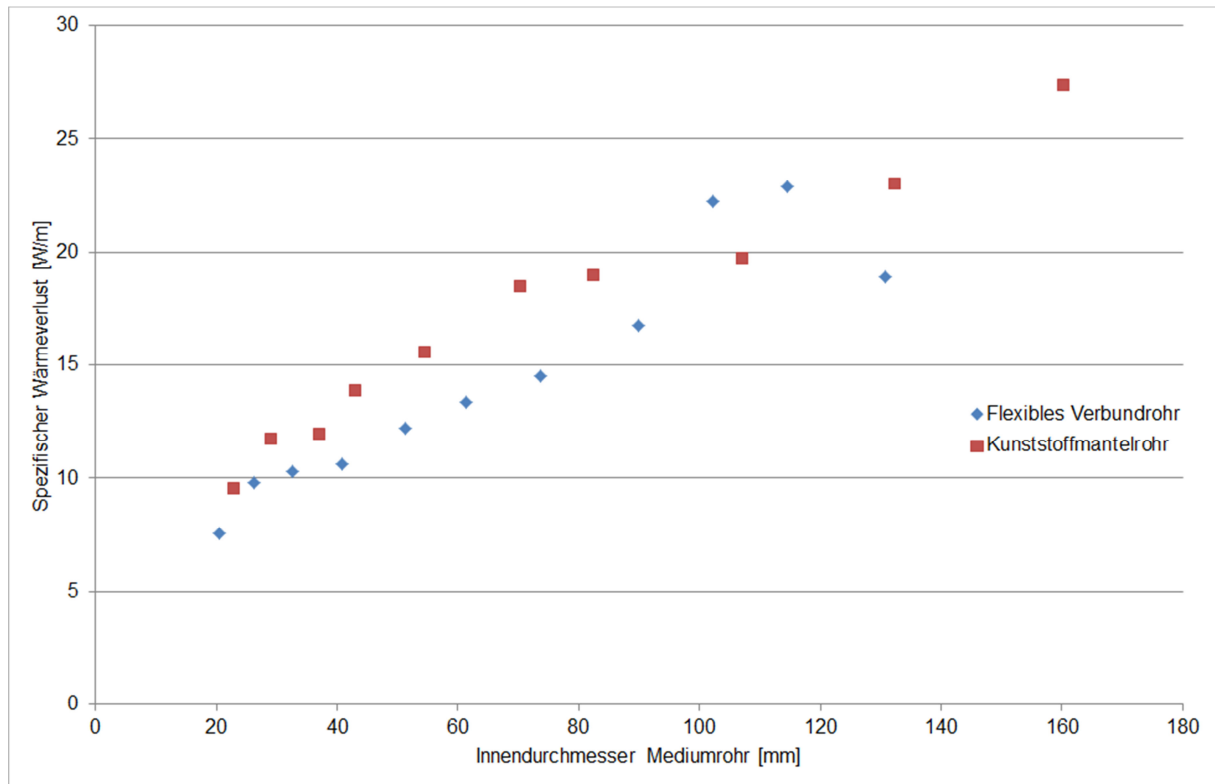


Bild 94 Spezifischer Wärmeverlust in Abhängigkeit der Dimension für das System KMR und für ein flexibles Verbundrohrsystem mit einem Mediumrohr aus Kunststoff.

Wärmenetze mit Mediumtemperaturen von $\leq 80\text{ °C}$ können in flexiblen Rohrsystemen ausgeführt sein. Die geringe Mediumtemperatur in Verbindung mit einem Rohrsystem, das aufgrund seiner Materialien und kleineren Dimension einen geringen spezifischen Wärmeverlust aufweist, führt zu einem geringen Wärmeverluststrom. Ist der Wärmeverluststrom zu gering, so ist eine Erwärmung an der Erdoberfläche über einem intakten Wärmenetz nicht mehr messbar. Leckagen, bei denen das Medium austritt, lassen sich jedoch auch bei Wärmenetzen feststellen bei denen der Wärmeverlust gering ist.

Zukünftig sollen durch Einbindung regenerativer Energiequellen zur Wärmeerzeugung die Wärmenetze flexibilisiert und die Effizienz durch niedrigere Netztemperaturen gesteigert werden. Die historische Entwicklung der Wärmenetze und der Energiequellen ist in **/Bild 95/** dargestellt.

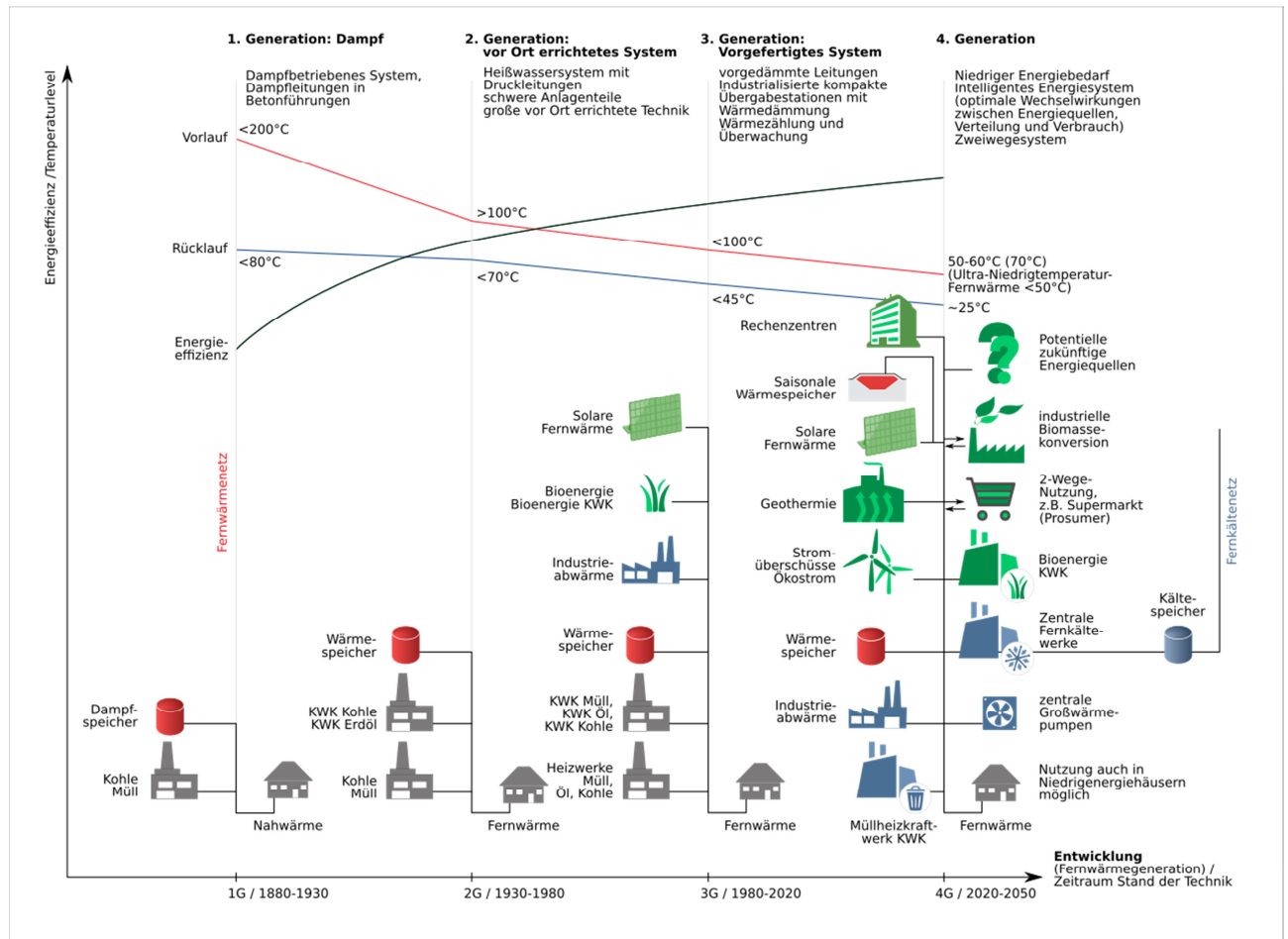


Bild 95 Zeitliche Entwicklung der Fernwärmesysteme und Energiequellen [38].

Aktuell werden Fernwärmenetze mit Vorlauftemperaturen von > 100 °C betrieben. Wärmenetze der 4. Generation sollen zukünftig mit Vorlauftemperaturen < 50 °C betrieben werden. Bei Netztemperaturen von < 50 °C ist zu erwarten, dass mit der drohnengestützten Thermografie nach dem derzeitigen Stand der Technik lediglich Leckagen festgestellt werden können.

8.2 Einfluss der Betriebsweise auf die Anwendung der drohnengestützten Thermografie

Fernwärmeversorger haben die Aufgabe ihre Kunden entsprechend der geltenden „Technischen Anschlussrichtlinie“ mit Wärme für die Gebäudeheizung, Warmwasser, Klima- und Lüftungsanlagen und auch mit Wärme für technische Anlagen zu versorgen. Damit dies gelingen kann wird in der Richtlinie einerseits die Produktqualität bezüglich des Transportmediums wie beispielsweise die Wasserqualität, die zur Verfügung gestellte Wassermenge und die Vorlauftemperatur beschrieben und andererseits Anforderungen an die technischen Verbrauchseinrichtungen hinsichtlich der Sicherheit, der erforderlichen Materialien und der zulässigen Rücklauftemperatur aufgestellt.

Mit Hilfe der Technischen Anschlussrichtlinie kann ein Fachplaner aus der Heizlast die erforderliche Größe der Verbrauchseinrichtungen und die erforderliche primäre Wassermenge bestimmen, die unter Berücksichtigung der jeweils bereitgestellten Vorlauftemperatur und der zulässigen Rücklauftemperatur jederzeit eine ausreichende Beheizung sicherstellt.

Die Richtlinie mit ihren Rahmenbedingungen sorgt für ein planbares Zusammenwirken von Erzeugern, Verteilung und Verbrauchseinrichtungen und damit letztendlich für eine sichere Versorgung. Auch die Betriebsführung der Erzeuger und Netze ist an diese Richtlinie gebunden. Sie kann also nur in den festgelegten Grenzen den Betriebsablauf zum Beispiel durch Variation der Vorlauftemperatur, der Umwälzmengen oder der Netzdrücke Einfluss optimieren und muss jederzeit die vereinbarte Versorgung sicherstellen.

Trotzdem stellt sich die Frage, inwieweit die Betriebsweise Einfluss auf das Ergebnis einer Thermografie nimmt und ob die Betriebsführung durch zeitlich begrenzte Maßnahmen die Temperatursignatur der Netze deutlich verbessern und so die Auswertung einer Thermografie erleichtern oder sogar erst ermöglichen kann.

8.2.1 Netzgeneration und Auslegungstemperaturen

In **/Bild 95/** sind vier Generationen von Netzen dargestellt, die sich im Wesentlichen durch die zugehörigen Vor- und Rücklauftemperaturen unterscheiden. Aktuelle Daten der Fernwärmebranche basieren überwiegend auf Netzen der zweiten und dritten Generation. Die Trassen sind fast ausschließlich mit metallischen Mediumrohren ausgeführt und werden mit maximalen Vorlauftemperaturen von 85 bis 140 °C betrieben. Die Rücklauftemperaturen betragen in der Regel zwischen 40 und 70 °C.

In den vorherigen Kapiteln sind die physikalischen Zusammenhänge des Wärmeverlustes der Rohrleitungen dargestellt. Das treibende Temperaturgefälle zwischen der Mediumrohr-Temperatur und der Umgebungstemperatur bestimmt bei ansonsten konstanten Randbedingungen die Wärmeverluste und damit auch die Temperatursignatur an der Erdoberfläche, die mittels der Thermografie erfasst werden kann. Insofern wachsen mit steigender Energieeffizienz durch verringerte Mediumtemperaturen oder höhere Dämmstandards der neueren Generationen die Herausforderungen bei einer Thermografie.

8.2.2 Temperaturfahrweisen

Die Temperaturfahrweise in Abhängigkeit von der Last wird in den Technischen Anschlussrichtlinien festgelegt. Im Grundsatz unterscheidet man Fahrweisen mit konstanter Vorlauftemperatur, gleitender Vorlauftemperatur und Mischformen wie der konstant-gleitenden Fahrweise. In vielen Netzgebieten werden sogenannte Unternetze zur Versorgung von kleineren Versorgungsgebieten mit verringerten Temperaturen und Drücken an die Hauptnetze angeschlossen. Hier sind die veränderten Temperaturen bei thermografischen Aufnahmen zu berücksichtigen.

Allen gemeinsam ist, dass der Betreiber die Anforderungen der Abnehmer und die hydraulischen und thermischen Grenzen berücksichtigt. Häufig wird die konstant-gleitende Fahrweise genutzt, bei der im Sommer und Teilen der Übergangszeit eine konstante Vorlauftemperatur bereitgestellt wird, die den regelgerechten Betrieb von Speicherwassererwärmern erlaubt. Mit Erreichen der hydraulischen Volllast werden dann die Vorlauftemperaturen in Abhängigkeit von der erwartenden Wärmeabnahme angehoben, um die Volumenströme nicht über die hydraulische Volllast ansteigen zu lassen. Die Wärmeabnahme wird dabei im Wesentlichen von der Außentemperatur, der Witterung, dem Wochentag und der Tageszeit bestimmt.

Im realen Betrieb größerer Netze findet eine tägliche Optimierung statt, um günstige Erzeuger vorrangig nutzen zu können, hydraulische Spitzen während morgendlichen Anheizphasen zu begrenzen und für die Lebensdauer der Netze schädliche Temperaturwechsel zu vermeiden. Im Ergebnis liegen die bereitgestellten Vorlauftemperaturen daher zeitweise über den in den technischen Richtlinien genannten Sollwerten und verteilen sich entsprechend der Laufzeiten bis zu den Kunden durch das Netzgebiet. Auch die Abnahme bei Kunden kann die Vorlauftemperatur beeinflussen. Dies wird gelegentlich in Sommermonaten deutlich, wenn nur noch vereinzelt Wärme zur Warmwasserbereitung genutzt wird und dadurch Endstränge zum Teil erheblich auskühlen.

Im Ergebnis sind die Vorlauftemperaturen im Netz nicht überall gleich, sondern sie nehmen mit der Entfernung und der Laufzeit durch Wärmeverluste ab und werden durch zentrale Optimierungsmaßnahmen zeitweise verändert.

Insofern wird speziell bei großflächigen Thermografieaufnahmen gelegentlich geraten, vor und während der Aufnahmen die Vorlauftemperaturen möglichst hoch und konstant zu fahren. Im Folgenden wird gezeigt, dass dieser Rat zwar prinzipiell richtig ist, aber aufgrund der hohen Wärmekapazität im Boden und der schnellen und an der Erdoberfläche stark wirksamen Wetterbeeinflussung nur bedingt wirksam wird.

8.2.3 Simulation zur Abschätzung des Einflusses der Betriebsweise

Im Rahmen des DBU Forschungsprojektes 33759/01 „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“ – Fernwärme & Vegetation im Auftrag der AGFW Projekt GmbH ist vom Institut für Technische Thermodynamik, Julia Eike, eine Simulation von Erdoberflächentemperaturen im Bereich von Fernwärmeleitungen durchgeführt worden.

Die Rahmenbedingungen sind wie folgt festgelegt:

- Vorlauftemperatur: 110 °C
- Rücklauftemperatur: 80 °C
- Erdreichtemperatur: 9,8 °C (in 10 m Tiefe)
- Umgebungstemperatur: 0 °C oder 20 °C
- An Oberfläche: Wärmeübertragung durch Strahlung ($\epsilon_{\text{trocken}} = 0,92$ und $\epsilon_{\text{feucht}} = 0,95$) und freie Konvektion, jeweils an Umgebung

Es sind vier auch für die Thermografie wesentliche Szenarien untersucht worden:

- Stationäre Zustände mit Umgebungstemperaturen von 0°C und 20 °C bei trockenem und feuchtem Erdreich und Bettung
- Sprung der Umgebungstemperatur von 0 °C auf 20 °C bei feuchtem Erdreich und Bettung
- Sprung der Vorlauftemperatur von 110 °C auf 130 °C bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C und feuchtem Erdreich und Bettung
- Einfluss der Sonneneinstrahlung im Tagesverlauf bei feuchtem Erdreich und Bettung

In den grafischen Darstellungen /**Bild 96**/ wird

- a) der Temperaturverlauf an der Oberfläche im Bereich von 0 m (links) bis 10 m (rechts) und
- b) der Temperaturverlauf im Erdreich auf der Symmetrieachse zwischen den Rohren von 0 m (unten, nahezu ungestört) bis 10 m (Oberfläche) dargestellt.

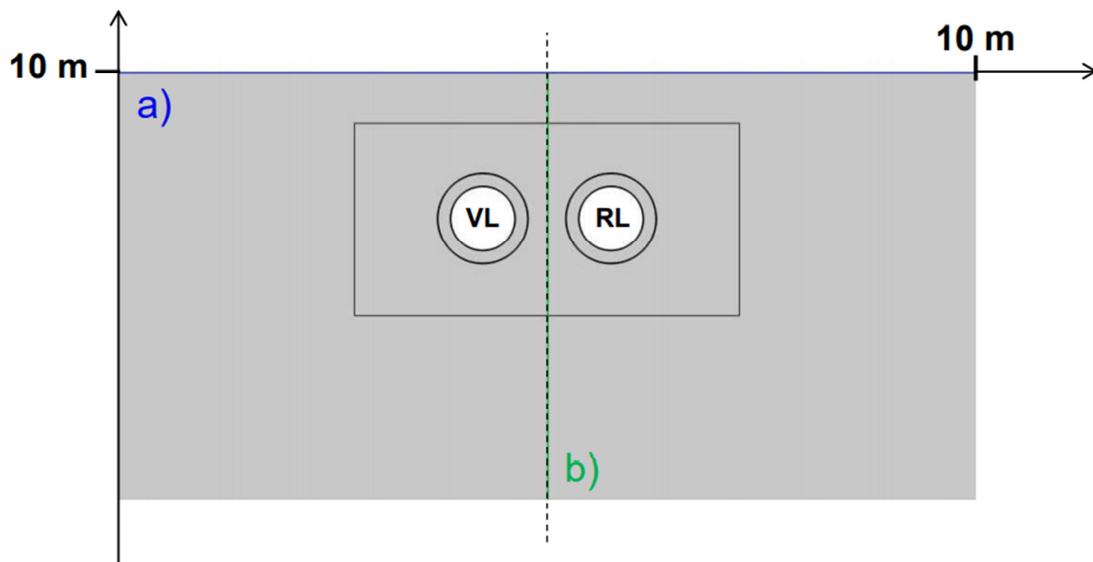


Bild 96 Skizze zur räumlichen Zuordnung der Temperaturverläufe [39].

Die **/Bilder 97 bis 100/** zeigen die Simulationsergebnisse für den stationären Zustand im trockenen und feuchten Zustand bei Umgebungstemperaturen von 0 °C und 20 °C an der Oberfläche quer zum Verlauf der Rohrleitungen. Das Temperaturmaximum ist aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen im Vor- und Rücklauf etwas außermittig zum Vorlauf hin verschoben. Die für die Thermografie relevanten Temperaturunterschiede liegen zwischen 1,5 und 2,2 K. Sie sind damit bei ideal konstanten Verhältnissen in allen Fällen mit thermografischen Verfahren mess- und darstellbar.

Die in der Simulation verwendeten Grenzfälle trocken und feucht mit den dazugehörigen extremen Wärmedurchlasskoeffizienten von 0,3 bzw. $2,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ bei Sand sind für eine Abschätzung des Einflusses geeignet. Die realen Werte liegen zwischen diesen Werten und variieren nicht nur längs der Rohrleitungstrassen, sondern auch über der Höhe von Erdreich und Bettung sowie in Bezug auf die Lage zu den Rohrleitungen. Grundsätzlich lässt sich aus den Ergebnissen schließen, dass die für die Thermografie wichtigen Temperaturunterschiede und damit die Temperatursignatur der Rohrleitungen mit abnehmender Umgebungstemperatur und zunehmender Feuchtigkeit im Boden günstiger werden.

Die dargestellten Temperatur-Tiefenverläufe sind von allgemeinem Interesse. So ist beispielsweise gut zu erkennen, dass die Temperaturmaxima zwischen den Rohren auftreten. Eine wesentliche Bedeutung für den Einfluss der Betriebsweise auf die Anwendung der drohnen-gestützten Thermografie ist nicht zu erkennen.

/Bild 101/ zeigt die Oberflächentemperaturen bei einem Temperatursprung der Umgebung von 0 auf 20 °C nach jeweils 12 Stunden. Deutlich erkennbar ist in der Simulation, dass bei konstanten Randbedingungen der Temperaturverlauf bei nahezu gleicher Form parallel um knapp 10 K nach oben verschoben wird. Die maximalen Temperaturunterschiede in den Verläufen liegen zwischen 2,2 und 2,5 K. Die höchsten Werte treten nach 12 Stunden auf. Unter den gemachten Randbedingungen ist in der Simulation eine Thermografie auch bei spontanen Temperaturänderungen möglich.

/Bild 102/ ist in einer höheren Auflösung dargestellt. Es zeigt die Temperaturänderungen an der Oberfläche im Verlauf von 24 Stunden nach einer Vorlauftemperaturerhöhung um 20 °C. Aufgrund der Wärmekapazität des Bodens haben auch 24 Stunden mit einer nennenswerten Temperaturänderung im Medium keine praktisch messbaren Änderungen an der Oberfläche zur Folge. Dies ist ein bedeutsamer Hinweis darauf, dass kurzzeitige Temperaturänderungen, wie sie im täglichen Betrieb häufig auftreten, keinen messbaren Einfluss auf die Temperatursignatur der Rohre an der Oberfläche haben werden.

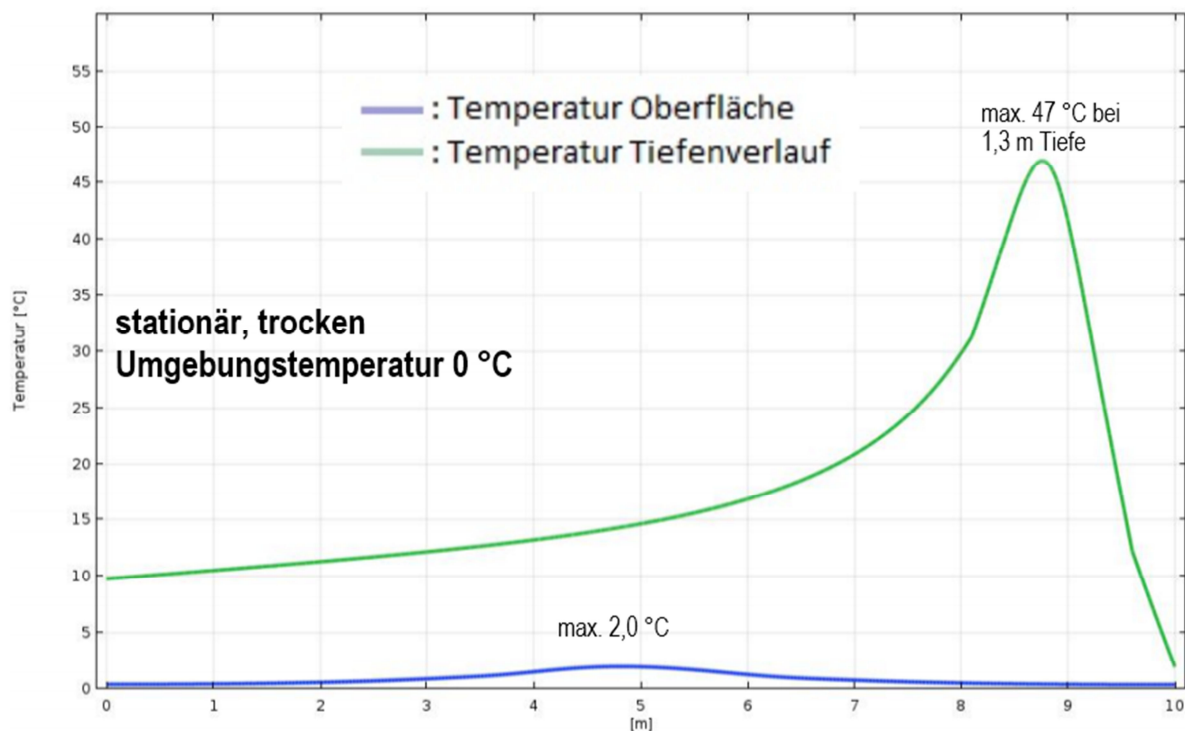


Bild 97 Stationärer trockener Zustand, Umgebungstemperatur 0 °C. Die Temperaturunterschiede an der Oberfläche betragen 1,9 K [39].

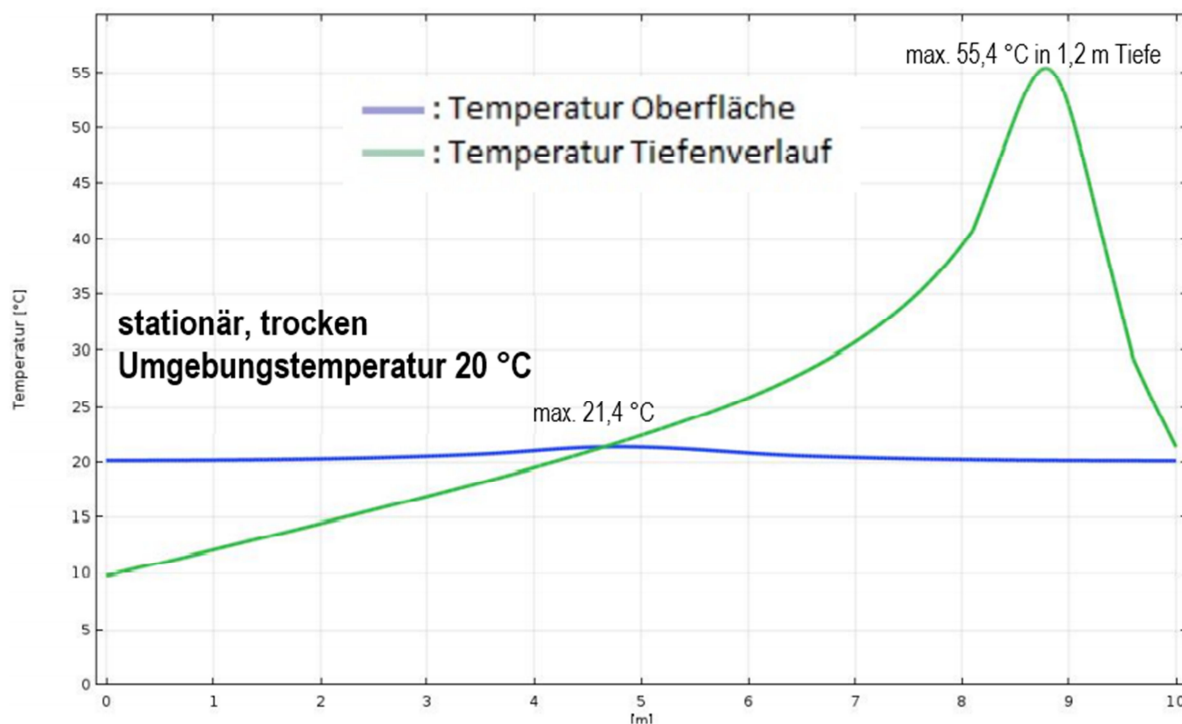


Bild 98 Stationärer trockener Zustand, Umgebungstemperatur 20 °C. Die Temperaturunterschiede an der Oberfläche betragen 1,5 K [39].

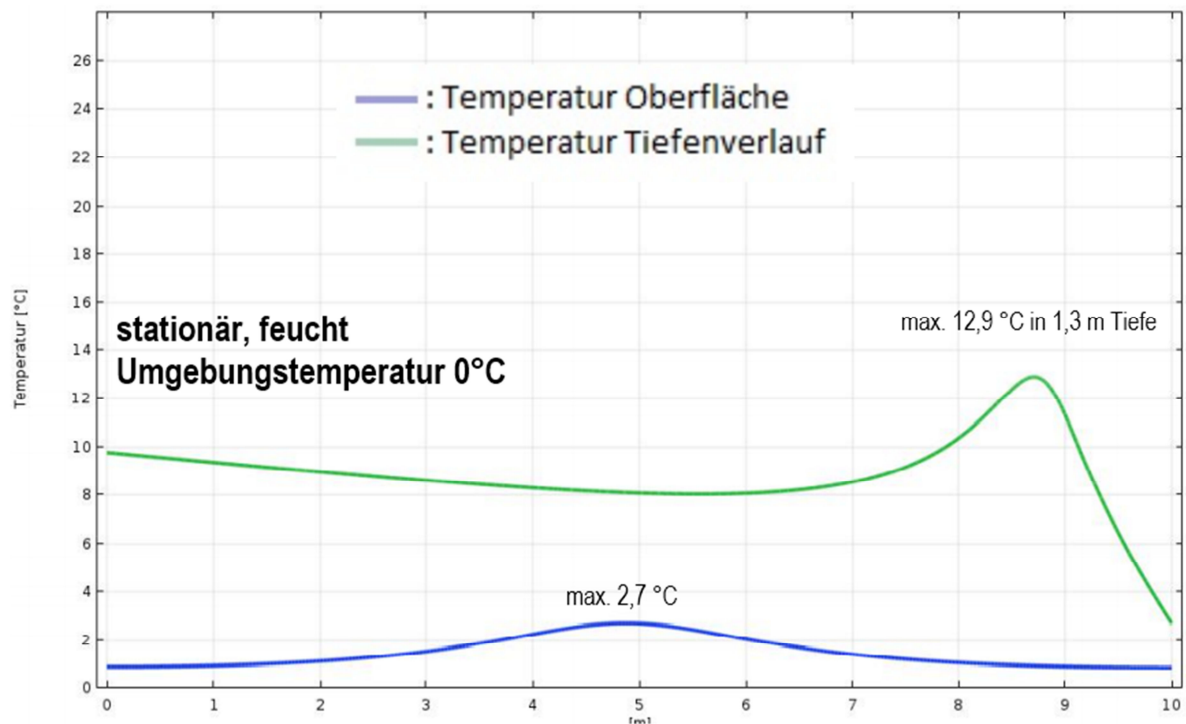


Bild 99 Stationärer feuchter Zustand, Umgebungstemperatur 0 °C. Die Temperaturunterschiede an der Oberfläche betragen 2,2 K.

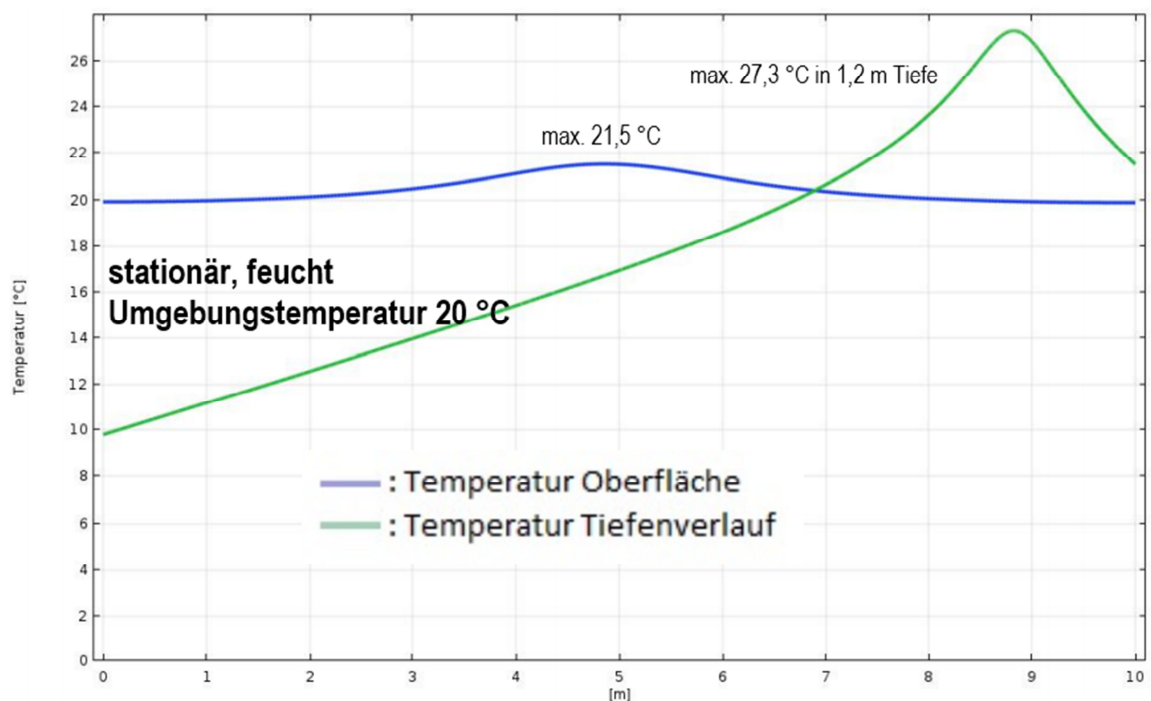


Bild 100 Stationärer feuchter Zustand, Umgebungstemperatur 20 °C. Die Temperaturunterschiede an der Oberfläche betragen 2,0 K [39].

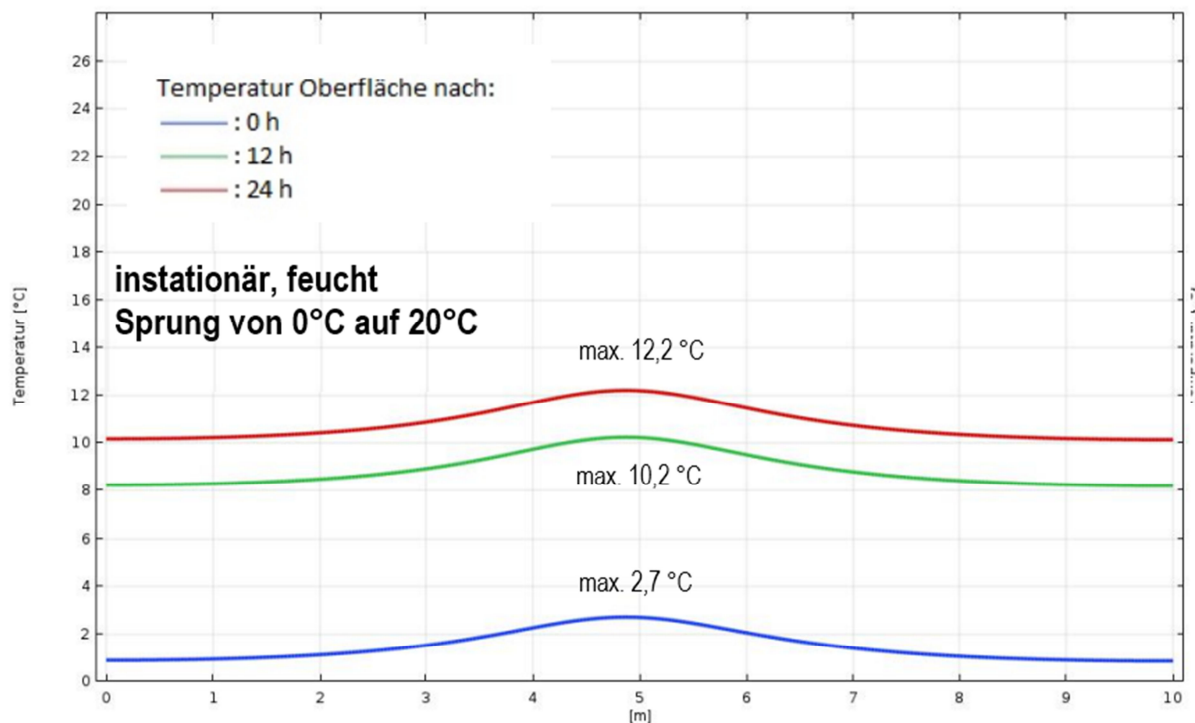


Bild 101 Instationärer feuchter Zustand, Sprung der Umgebungstemperatur von 0 °C auf 20 °C. Die Temperaturunterschiede an der Oberfläche vergrößern sich im Laufe von 12 h von 2,2 auf 2,5 K [39].

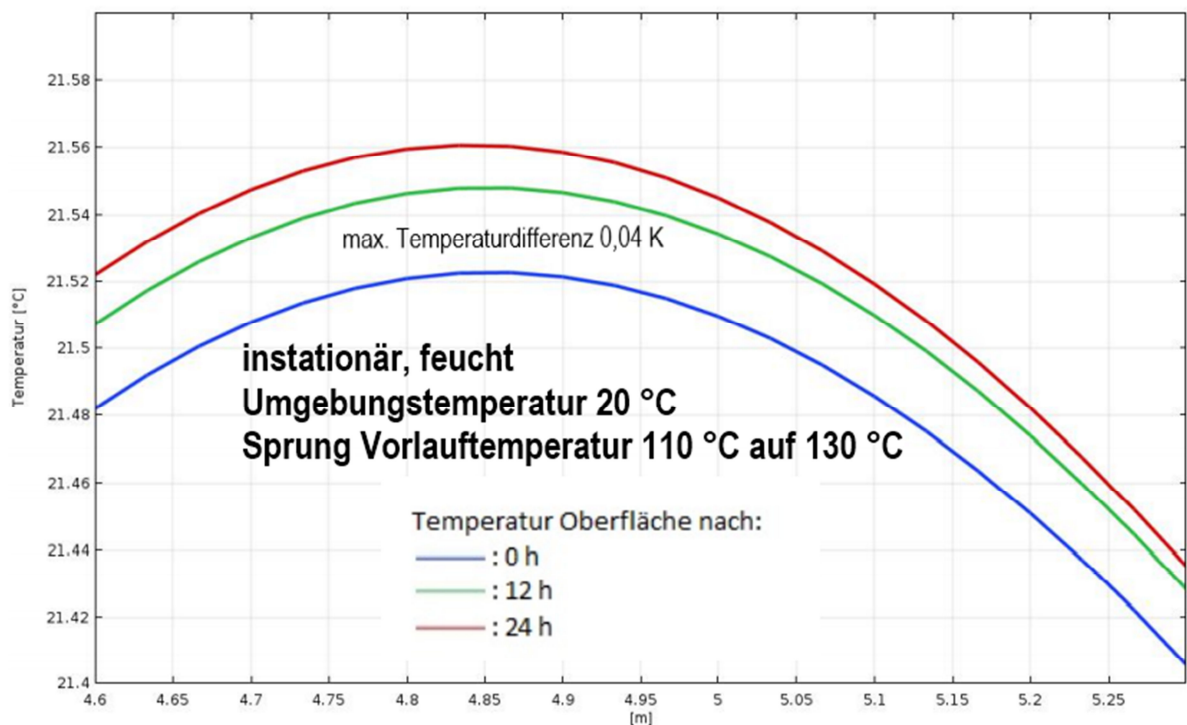


Bild 102 Instationärer feuchter Zustand, Sprung der Vorlauftemperatur von 110 °C auf 143 °C. Die maximale Temperatur an der Oberfläche verändert sich im Laufe von 12 h um 0,04 K [39].

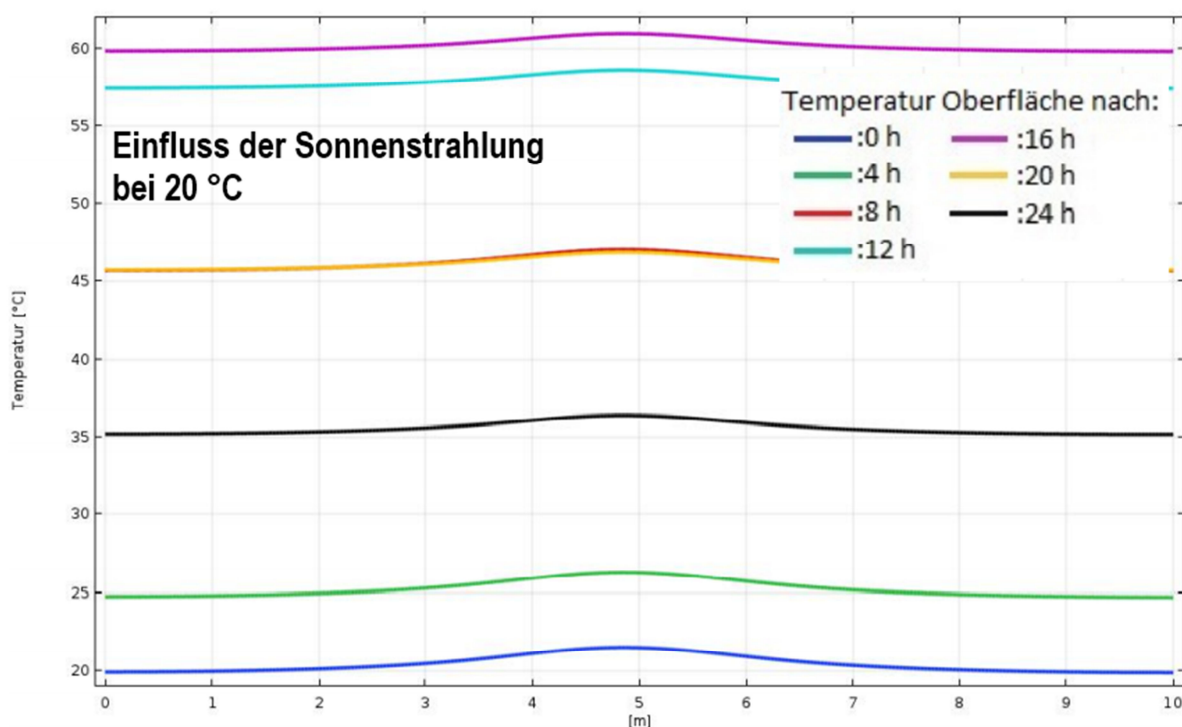


Bild 103 Instationärer feuchter Zustand, Einfluss der Sonnenstrahlung im Juni bei klarem Himmel im Laufe eines Tages [39].

/Bild 103/ zeigt den Einfluss der Sonneneinstrahlung an einem klaren Tag im Juni auf die Oberfläche oberhalb der Trasse im Verlauf eines Tages. Auch bei dieser Simulation ist der charakteristische Temperaturverlauf quer zur Trasse zu jeder Zeit erkennbar. Die Temperaturen steigen in der Simulation an der Oberfläche im Laufe des Tages bis auf über 60 °C und sinken während der Nachtstunden wieder auf 35 °C ab. Trotz der idealisierten Annahmen zu Witterungsverlauf wird deutlich, wie groß insbesondere der Einfluss der Sonneneinstrahlung im Vergleich zu Änderungen der Mediumtemperatur ist. Andere Wetterereignisse wie Niederschläge oder Wind werden vergleichbare Auswirkungen haben.

Der Einfluss der Betriebsweise auf die Anwendung der drohnengestützten Thermografie ist, wenn man von der Systementscheidung für ein Verlegesystem und den in den technischen Richtlinien festgeschriebenen Temperaturfahrweisen absieht, im Vergleich zu den Witterungsbedingungen gering. Die gezeigten Ergebnisse der Simulationsrechnungen betätigen die praktischen Erfahrungen bei der drohnengestützten Thermografie, dass nur bei günstigen Witterungsverhältnissen und wenig anderen Variationen z.B. bei Fremdeinstrahlung, Oberflächen, Verlegetiefe, Durchmesser und System einfache und klare Signaturen wärmegeämmter Trassen erkennbar sind.

Eine gute Dokumentation der Systeme einschließlich der Höhenlage, möglichst gleichmäßiger Dauerbetrieb im Winterhalbjahr und witterungsbedingt hohe Vorlauftemperaturen über einen längeren Zeitraum verbessern die Erfolgsaussichten die Trassen eindeutig zu identifizieren und Abweichungen zu detektieren.

Der Einfluss der täglichen Betriebsweise mit Anpassung der Temperaturen an die Witterung und Optimierung des Netzbetriebes ist, im Vergleich zu den nicht beeinflussbaren Randbedingungen, gering. Es sollte daher in erster Linie versucht werden geeignete Witterungsbedingungen für die drohnengestützte Thermografie zu nutzen.

9. Leitfaden für den Einsatz der drohnengestützten Thermografie als Bestandteil der Instandhaltungsstrategie

9.1 Anwendungsbereich

Dieser Leitfaden gilt für die Durchführung von drohnengestützten infrarotthermografischen Messungen im Bereich von Rohrleitungssystemen für den Wärmetransport, die in der Erde oder als Freileitungen verlegt sind.

Das Messsystem ist für die Feststellung und Ortung von Leckagen sowie zur Überprüfung der Wärmedämmung geeignet und kann für die zustands- und ereignisorientierte Instandhaltung als visuelles Verfahren eingesetzt werden.

Aus den Thermalbildern können Rückschlüsse auf den Wärmeverlust der Rohrleitungssysteme für den Wärmetransport gezogen werden und wichtige Erkenntnisse zum Zustand der Rohrleitungssysteme gewonnen werden. Vor allem lokal begrenzte Unregelmäßigkeiten können mit diesem Messverfahren analysiert und zur weiteren Betrachtung visuell verständlich dargestellt werden.

Das Messverfahren sowie die daraus erhaltenen Messergebnisse sind ausschließlich von Personen anzuwenden, auszuwerten und zu beurteilen, welche speziell für dieses Messverfahren ausgebildet oder qualifiziert sind. Kenntnisse in den Bereichen Messtechnik, Thermodynamik sowie der konstruktiven Ausführung von Wärmenetzen sind aufgrund der Komplexität des Messverfahrens unerlässlich.

In der Praxis wird in der Regel nicht unter stationären Bedingungen, höchstens unter quasistationären Bedingungen gearbeitet. Aus diesem Grund sind alle der Messaufgabe entsprechend die variierenden Parameter zu berücksichtigen und zu dokumentieren, um eine Reproduzierbarkeit der Messung sowie der Ergebnisse zu ermöglichen und Fehlinterpretationen zu vermeiden. Zudem sollte das Messergebnis bzw. der thermografische Ergebnisbericht so ausgearbeitet werden, dass er sowohl von Fachleuten als auch von Laien gleichermaßen zu verstehen ist. Jede thermografische Auswertung sollte wie erforderlich strukturiert und qualifiziert ausgearbeitet werden.

9.2 Begriffe

Dauerbetriebstemperatur:

Temperatur, bei der das Rohrsystem für Dauerbetrieb ausgelegt ist.

Emissionsfaktor:

Quotient aus abgestrahlter Leistung einer realen Oberfläche zur Leistung, die ein schwarzer Strahler der gleichen Fläche und Temperatur abstrahlen würde.

Geoinformationssystem (GIS):

Informationssysteme zur Erfassung, Bearbeitung, Organisation, Analyse und Präsentation räumlicher Daten. Geoinformationssysteme umfassen die dazu benötigte Hardware, Software, Daten und Anwendungen.

Global Positioning System (GPS):

Globales Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung.

Leckage:

Austritt des Transportmediums infolge einer Undichtheit des Mediumrohres.

Trassenabschnitt:

Teil eines Wärmenetzes bestehend aus Vorlauf- und Rücklaufleitung mit gleichen Betriebsparametern.

Orthobild:

Verzerrungsfreie und maßstabsgetreue Abbildung der Erboberfläche.

Thermalanomalie:

Temperaturabweichung von einer definierten Referenztemperatur oder einem Temperaturmittelwert.

Signifikante Thermalanomalie:

Temperaturabweichung innerhalb eines Systems bei konstanten Parametern.

Thermalbild:

Visualisierung von Oberflächentemperaturen für einen definierten Bereich oder ein Gebiet.

Trassenplan:

Dokumentation mit Angaben zum Trassenverlauf, Rohrsystem, Dimension und Verlegetiefe.

Wärmestrahlung:

Wärmeübertragung durch elektromagnetische Wellen.

Wärmeverlust:

Abgabe von Wärme, ausgehend von einer Wärmequelle an die Umgebung infolge einer Temperaturdifferenz zwischen der Wärmequelle und der Umgebung.

9.3 Normative Verweise und Richtlinien

AGFW-Merkblatt FW 435 Teil 1: Verfahren zur Zustandsermittlung von Fernwärmeleitungen und zur Feststellung/Einmessung von Abweichungen (Leckortung) - Strategische Hinweise, Anwendung der Verfahren: AGFW, Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., April 2010.

AGFW-Merkblatt FW 435 Teil 4: Verfahren zur Zustandsermittlung von Fernwärmeleitungen und zur Feststellung/Einmessung von Abweichungen (Leckortung) - Thermografie: AGFW, Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., April 2010.

DIN 4108-3:2014-11: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.

DIN EN ISO 6781:2016-05: Wärme- und feuchteschutztechnisches Verhalten von Gebäuden - Feststellung von wärme-, luft- und feuchtebezogenen Unregelmäßigkeiten in Gebäuden durch Infrarotverfahren – Teil 3: Qualifikation der Ausrüstungsbetreiber, Datenanalytiker und Berichtsaufsteller.

ISO 10878: Zerstörungsfreie Prüfung – Infrarotthermografie – Terminologie.

ISO 10880: Zerstörungsfreie Prüfung – Infrarotthermografische Prüfung – Allgemeine Grundlagen.

ISO 18251, Teil 1: Zerstörungsfreie Prüfung – System und Prüfausrüstung - Teil 1 – Beschreibung der technischen Eigenschaften.

VATh-Richtlinie: Bauthermografie zur Planung, Durchführung und Dokumentation infrarotthermografischer Messungen an Bauwerken oder Bauteilen von Gebäuden. Bundesverband für angewandte Thermografie e.V., Juni 2016.

9.4 Messprinzip und Technologie

Thermografie ist ein berührungsloses Temperaturmessverfahren und bildet die Oberflächentemperatur eines Gegenstandes visuell ab. Jeder Körper, dessen Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts bei -273 °C bzw. 0 K liegt, strahlt Energie in Form elektromagnetischer Wellen ab. Die Wärmestrahlung eines Körpers ist nicht nur von der Temperatur abhängig, sondern auch vom Material, aus dem er besteht. Der größte Teil der durch Temperaturstrahlung ausgesandten Energie entfällt auf den Wellenlängenbereich $(0,35 - 10)\text{ }\mu\text{m}$. Mit höherer Temperatur eines Körpers verschiebt sich das Maximum der Strahlungsenergie zu niedrigeren Wellenlängen. In Thermografie-Geräten bzw. Wärmebildkameras wird die Strahlung eines Objekts im Infrarotbereich visuell zugänglich gemacht. Dabei wird das Infrarotsignal durch verschiedene Graustufen oder Farben auf einem Bildschirm dargestellt, wodurch die Temperaturgradienten sichtbar werden. Das Gesamtbild wird aus vielen einzelnen Bildpunkten zusammengesetzt. Beim Einsatz dieser Technik in Verbindung mit Fernwärme kann aufgrund des von den Rohrleitungen ausgehenden Wärmeverlustes auf den Zustand der Leitungen geschlossen werden.

Für die Zustandsanalyse von Trassenabschnitten für Wärmeversorgungs-systeme wird ein TIR-Sensor mit einem Spektralbereich von (7,5 - 13,5) μm eingesetzt. Die Vorteile der lokal begrenzten Untersuchung lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Keine bzw. geringe atmosphärische Störschicht zwischen Sensor und Untersuchungs-objekt.
- Ein hohes Maß an Flexibilität.
- Eine hohe räumliche Pixelauflösung und daher eine sehr gute Interpretierbarkeit der Da-ten.
- Eine exakte Differenzierung der Strahlungsquellen und der Mängel an den Leitungen.
- Exakte Zuordnung und Dokumentation von Störgrößen ohne Bezug zum untersuchten Leitungsabschnitt des Wärmenetzes.

9.5 Anforderungen an das Messsystem

Das Messsystem muss für die Messaufgabe geeignet sein und sollte dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Hieraus ergeben sich Anforderungen für das Messsystem der Drohne mit Wärmebildkamera /**Tabelle 34**/.

Tabelle 34 Allgemeine Anforderungen an das Messsystem.

Startgewicht	< 5 kg
Wärmebildkamera	
Bildauflösung	$\geq 640 \times 480$
IR Spektral Band	(8 – 14) μm
Empfindlichkeit (NEdt)	$\leq 100 \text{ mK bei } f/1.0$
Bildwiederholfrequenz	$\geq 9 \text{ Hz}$
Ausstattung Drohne	
Positionsinformationen (Global Navigation Satellite System, GNSS)	
Akkus beheizbar; Befliegungen bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt sind dann we-niger problematisch	
Drohne mit Sensoren zur Hinderniserkennung an Unterseite, Front und Heck.	

9.6 Thermografische Untersuchung

9.6.1 Allgemeines

Alle Rohr- und Verlegesysteme für den Wärmetransport weisen aufgrund des Temperaturgradienten zwischen dem wärmetransportierenden Medium und der Umgebung einen Wärmeverlust auf. Der Wärmeverlust führt zur Erwärmung der Umgebung der Rohrleitung. Bei erdverlegten Systemen führt der Wärmeverlust zu einer Erwärmung der Erdoberfläche über der Rohrleitung und damit zu einer Temperaturdifferenz an der Erdoberfläche über der Rohrleitung und dem nicht von der Rohrleitung beeinflussten Bereich. Die Höhe der Temperaturdifferenz wird von den folgenden Parametern beeinflusst:

- Verlegesystem,
- Rohrsystem,
- Dimension der Rohrleitung(en),
- Verlegetiefe der Rohrleitung(en),
- Mediumtemperatur und der
- Umgebungstemperatur.

Bei Freileitungen führt der Wärmeverlust zu einer Temperaturdifferenz zwischen der Außenummantelung des Rohrsystems und der Umgebungstemperatur. Für die thermografische Untersuchung muss die Oberfläche über dem Trassenabschnitt frei von Störgrößen sein, die das Messergebnis beeinflussen oder eine Messung nicht ermöglichen.

9.6.2 Besonderheiten

In Abhängigkeit der Rohr- und Verlegesysteme unterscheiden sich die Komponenten, die in den Wärmenetzen verbaut sind. Zu den baulichen Besonderheiten gehören Schachtbauwerke in denen sich Dehnungskonstruktionen und Armaturen befinden. Bauwerkskonstruktionen sind bei der Planung und Bewertung zu berücksichtigen. In der folgenden **/Tabelle 35/** ist eine Übersicht über die Bestandteile von Freileitungen und erdverlegten Systemen dargestellt.

Tabelle 35 Komponenten von Wärmenetzen.

Netz Bestandteile		Freileitung	Erdverlegte Systeme			
			Kanal-systeme	Direkt erdverlegt		
				Starre Rohrsysteme	Flexible Rohrsysteme	
Systemunabhängig		Rohrverbindungen				
		Armaturen				
		Formteile				
Systemspezifisch	Kompensatoren	+	+	+		
	Dehnpolster			+		
	Lagerkonstruktionen	+	+			
	Schachtbauwerke		(+)	+		

9.6.3 Vorbereitung und Planung

Es wird empfohlen, das Drohnensystem mit einem online Management-System zu verknüpfen. Hier erfolgt eine automatisierte Dokumentation der Witterungsbedingungen, der GPS-Daten der Flugtrasse, der Flughöhe sowie der Fluggeschwindigkeit.

Vom Auftraggeber sind nach Möglichkeit folgende Informationen zur Verfügung zu stellen:

- GIS-Daten des zu untersuchenden Trassenabschnittes,
- Art und Ausführung des Leitungssystems,
- Dimension der Rohrleitung,
- Mediumtemperaturen und
- Verlegetiefen.

Vor der Befliegung ist die Trassierung festzulegen und die GPS-Programmierung durchzuführen. Für die Befliegung gelten folgende Witterungsbedingungen:

- Durchführung der Befliegung nach Sonnenuntergang bzw. vor Sonnenaufgang,
- Windgeschwindigkeit,
- Lufttemperatur: Max.5 °C,
- Sichtweite und
- kein Niederschlag.

In Wohngebieten sind die Anwohner vor der Befliegung zu informieren. Die Länge der Flugtrasse, die Fluggeschwindigkeit und die Flugzeit müssen der zur Verfügung stehenden AKKU-Leistung angepasst werden. Um die Befliegung längerer Trassenabschnitte zu realisieren ist es sinnvoll, eine entsprechende Anzahl von Reserve Akkus vorzuhalten.

Die Vorgehensweise für die Planung einer drohnengestützten Thermalbefliegung ist im Ablaufplan in **/Bild 104/** dargestellt.

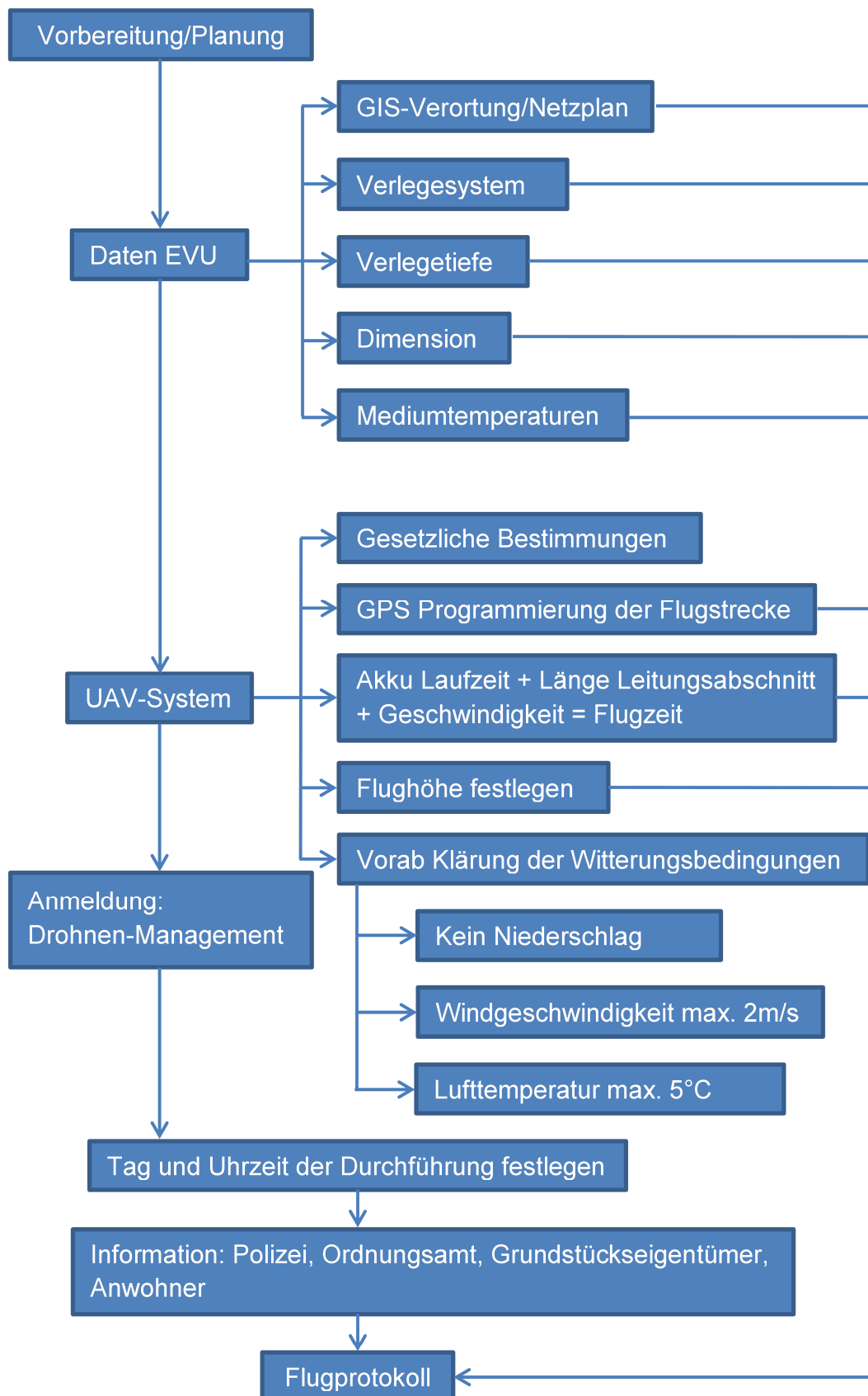


Bild 104 Ablaufplan zur Planung und Vorbereitung der drohnengestützten Thermalbefliegung.

9.6.4 Durchführung

Während der Befliegung darf die Erdoberfläche über dem Trassenabschnitt nicht durch Störgrößen beeinflusst oder durch Objekte verdeckt sein. Die Messung ist nach Sonnenuntergang oder vor Sonnenaufgang durchzuführen. Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht sollten möglichst gering sein. Beeinträchtigungen durch Nebel, Regen, Schnee oder zu starkem Wind sind nicht zulässig. Die Vorlauftemperatur im Trassenabschnitt sollte der zulässigen maximalen Dauerbetriebstemperatur für das zu untersuchende Rohrsystem entsprechen. Während der Befliegung muss permanenter Sichtkontakt mit der Drohne sichergestellt sein.

Für jede Befliegung ist ein Flugprotokoll zu erstellen. Das Flugprotokoll sollte folgende Angaben enthalten:

- Datum, Ort und Uhrzeit der Befliegung,
- verwendetes Messsystem,
- Flughöhe, Fluggeschwindigkeit,
- eingestellte prozentuale Bildüberdeckung,
- Boden Pixel Auflösung (Ground Sampling Distance = GSD),
- Emissionsfaktor,
- Wetterverhältnisse während der Befliegung sowie
- Informationen zum Trassenabschnitt (System, Dimension, Verlegetiefe und Netztemperatur).

Ist die Drohne bei einem online Management-System registriert, so können die dort gespeicherten Daten der Befliegung für das Flugprotokoll verwendet werden. Der Ablaufplan zur Datengenerierung während der drohnengestützten Thermalbefliegung ist in **/Bild 105/** dargelegt.

Eine Vorlage für ein Flugprotokoll ist in **/Bild 106/** dargestellt.

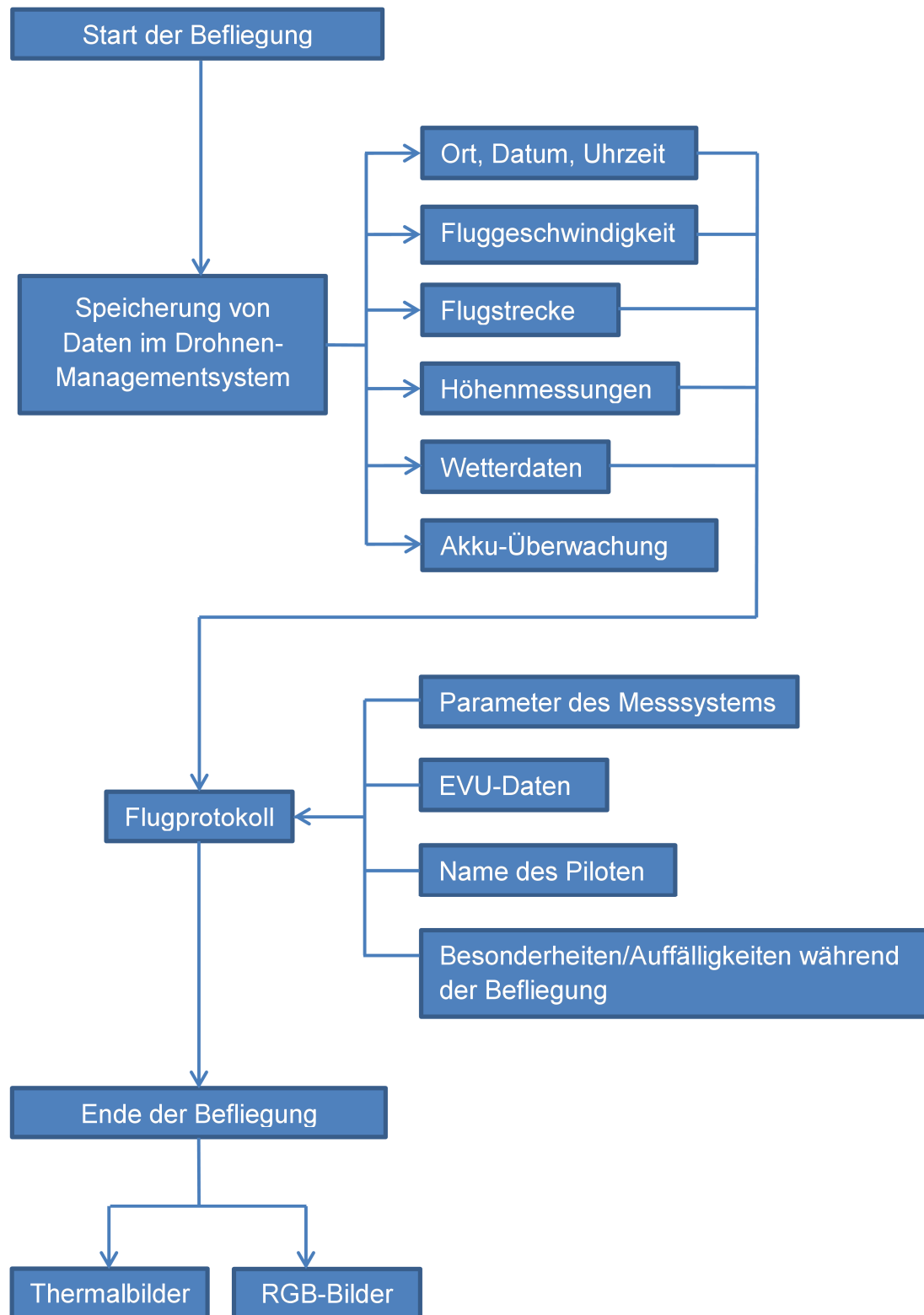


Bild 105 Ablaufplan zur Datengenerierung bei der Durchführung der drohnengestützten Thermalbefliegung.

Flugdaten		UAV Daten	
Datum :		<u>Name des Piloten (Copilot):</u>	
Uhrzeit Start:	Uhrzeit Landung:	<u>UAV System:</u>	
Ort, Straße		<u>UAV Nutzlast:</u>	
		Startgewicht [kg]:	
		<input type="checkbox"/> Manuell gesteuerte Befliegung	<input type="checkbox"/> Automatisierte Befliegung
		Angaben zum Leitungsabschnitt	
Flughöhe [m]		Rohrsystem[e] Rohrdimension(en)	
Emissionsfaktor			
Bildüberlappung [%]			
Boden Pixel Auflösung (GSD) RGB/TIR [cm]			
Fluggeschwindigkeit [m/s]			
Erfassungssystem			
Dauer der Befliegung:		Jahr der Verlegung bzw. Betriebsdauer	
Wetterbedingungen			
<input type="checkbox"/> Sonnig	Temperatur der Luft [°C]: Windgeschwindigkeit [m/s]: Wolkenhöhe [m]: Bewölkungsgrad [%]:	Verlegetiefe [m]	
<input type="checkbox"/> Bewölkt		Vorlauftemperatur [°C]	
<input type="checkbox"/> Regnerisch		Rücklauftemperatur [°C]	
<input type="checkbox"/> Schneefall			
Informierte Personen/Erlaubnis erhält von			
Informierte Personen	Art des Kontaktes (Telefon/Email)	Wurde zur Kenntnis genommen bzw. bestätigt von:	
Flug Notizen:			
Vorfälle /Auffälligkeiten:			
Name und Unterschrift des Piloten:			

Bild 106 Flugprotokoll für die Durchführung drohnengestützter Thermalbefliegungen.

9.6.5 Bearbeitung und Bewertung

Das Messsystem zeichnet zeitgleich Thermalbilder und optische Bilder (RGB-Bilder) auf. Für die Bewertung sind aus den Thermalbildern verzerrungsfreie orthogonale Thermalbilder (Orthobilder) zu erstellen und mit den GIS-Daten des Netzplans zu verknüpfen. Mit Hilfe der RGB-Bilder kann ein Teil nicht relevanter Thermalanomalien identifiziert werden.

Mit Hilfe der Netzdaten, Schadensstatistiken und Schachtdatenbanken kann eine Unterteilung der netzbezogenen Thermalanomalien in relevant und nicht relevant erfolgen.

Durch Einbeziehung ergänzender Untersuchungen bzw. Inspektionsverfahren lassen sich Schäden feststellen bzw. ausschließen.

Die prinzipielle Vorgehensweise zur Identifizierung von Thermalanomalien ist in **/Bild 107/** dargestellt.

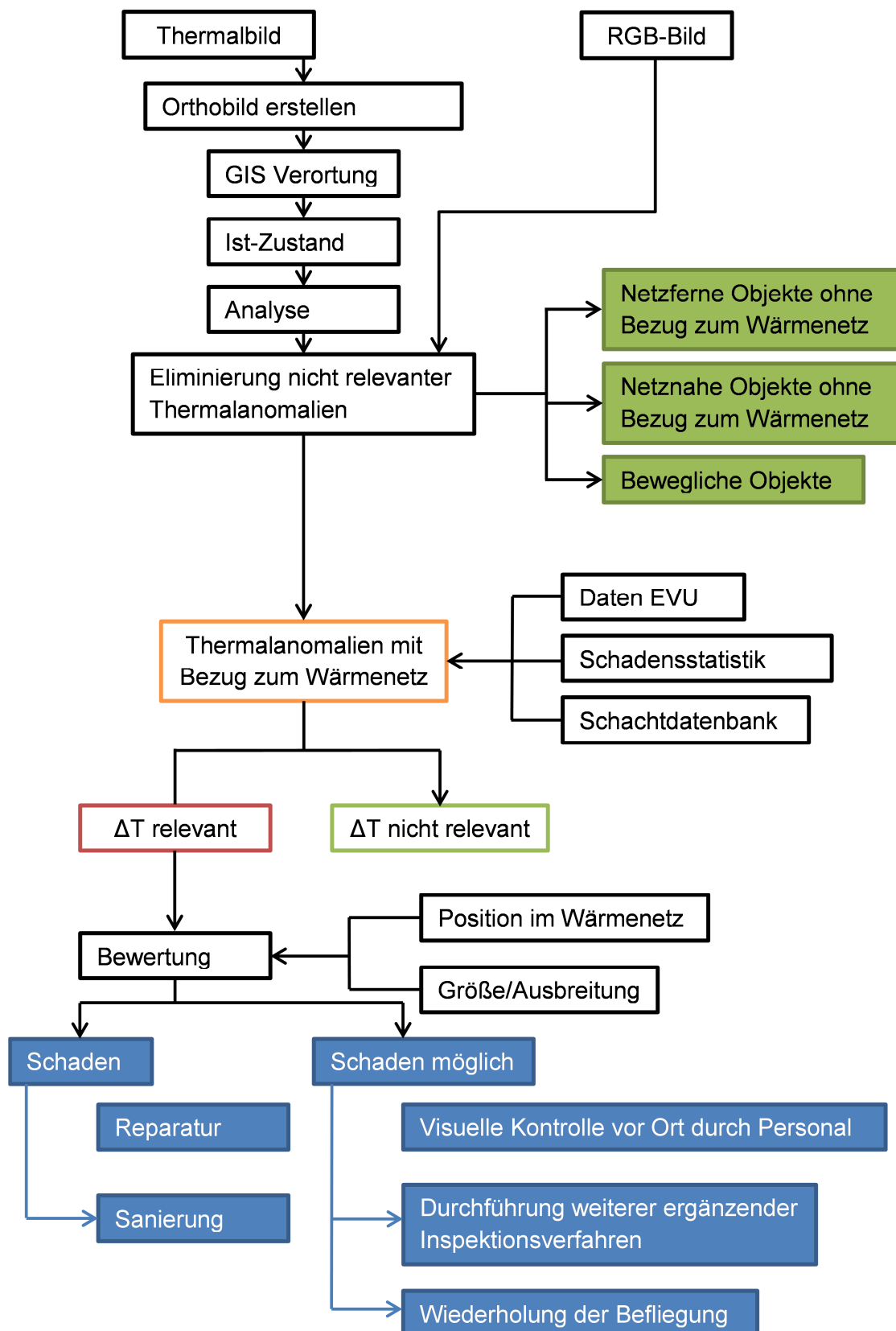


Bild 107 Vorgehensweise zur Identifizierung von relevanten Thermalanomalien.

9.6.6 Das Untersuchungsprotokoll

Das Untersuchungsprotokoll muss mindestens folgende Angaben beinhalten:

- Auftraggeber, Auftragnehmer,
- Aufgabenstellung / Ziel,
- Datum, Uhrzeit, durchführende bzw. zuständige Personen,
- Angaben zum verwendeten Kameratyp,
- Eingestellter Emissionsfaktor,
- Flughöhe,
- Fluggeschwindigkeit und
- Auffälligkeiten während der Befliegung.

Objektbeschreibung:

- Verlegeplan,
- Verlegesystem,
- Verlegetiefe und
- Mediumtemperaturen zum Zeitpunkt der Befliegung.

Witterungsbedingungen:

- Lufttemperatur,
- Luftfeuchtigkeit,
- Bewölkungsgrad und
- Sichtweite.

In dem Untersuchungsprotokoll ist das orthogonale Thermalbild mit und ohne den Trassenverlauf sowie ein Foto (RGB-Aufnahme) mit dem identischen Ausschnitt des untersuchten Trassenabschnitts darzustellen. Alle signifikanten Thermalanomalien mit Bezug zum Trassenabschnitt sind zu kennzeichnen.

Als Bewertungskriterium sind Temperaturdifferenzen anzugeben. Die Temperaturdifferenzen (Temperaturerhöhungen) können zur Eingrenzung von signifikanten Thermalanomalien in Temperaturklassen (Klassifizierungen) unterteilt werden.

10. Veröffentlichungen zum Projekt

Fernwärme-Forschungsinstitut, 2019: Zustandserfassung von Fern- und Nahwärmenetzen durch drohnengestützte Thermografie. 3R, Fachzeitschrift für sichere und effiziente Rohrleitungssysteme 01-02/2019, Vulkan Verlag.

Grage T., Herbst V., 2020: Drohnen Überwachen Leitungen per Infrarot. VDI Technik und Leben, Ausgabe 2/2020. Juni 2020.

Sledz A., Unger J., Heipke C., 2018: Thermal IR imaging: image quality and orthophoto generation. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-1, 413-420, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-413-2018>.

Sledz A., Unger J., Heipke C., 2020: UAV-based thermal anomaly detection for distributed heating networks. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-1, accepted for publication.

11. Literaturverzeichnis

- [1] EN ISO8497: Wärmeschutz – Bestimmung der Wärmetransporteigenschaften im stationären Zustand von Wärmedämmungen für Rohrleitungen (ISO 8497:1994); Deutsche Fassung EN ISO 8497:1996
- [2] EN 12667: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät – Produkte mit hohem und mittleren Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12667:2001
- [3] Ljungberg, S-A., Rosengren, M., Aerial and mobile thermography to assess damages and energy losses from buildings and district heating networks - operational advantages and limitations. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens., XXVII-B7, pp. 348–359, 1988
- [4] Axelsson, S., Thermal modelling for the estimation of energy losses from municipal heating networks using infrared thermography, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 26, no. 5, pp. 686–692, 1988
- [5] Generische Zustandsanalyse von Fernwärmenetzen, Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e.V., Bericht 0738_4583 zum AiF Vorhaben Nr. 14014 N, 2006
- [6] Generische Zustandsanalyse von Fernwärmenetzen, Entwicklung und Validierung einer Parametermatrix zur Auswertung von TIR-Bildern im Hinblick auf die Zustandsbewertung von Fernwärmeleitungen, Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e.V., Schlussbericht 1024_4837, 2011
- [7] Rogalski, A., Infrared Detectors. 2nd edn. CRC Press, 2011
- [8] Budzan, S., Wyżgolik, R., Noise Reduction in Thermal Images. In: Chmielewski L.J., Kozera R., Shin BS., Wojciechowski K. (eds) Computer Vision and Graphics. ICCVG 2014. Lecture Notes in Computer Science, Vol 8671. Springer, Cham, doi.org/10.1007/978-3-319-11331-9_15, 2014
- [9] Madura, H., Kolodziejczyk, M., Influence of sun radiation on results of non-contact temperature measurements in far infrared range. In: Opto-Electronics Review, Vol. 13(3), pp. 253-257, 2005

- [10] Pech, K., Stelling, N., Karrasch, P., Maas, H.-G., Generation of multitemporal thermal orthophotos from uav data. In: ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-1/W2, pp. 305–310, doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-305-2013, 2013
- [11] Friman. O., Follo, P., Ahlberg, J., Sjökvist, S., Methods for large-scale monitoring of district heating systems using airborne thermography, IEEE Trans. Geo-science and Remote Sensing, 52(8):5175-5182, 2014
- [12] Berg, A., Ahlberg, J., Classification of leakage detections acquired by airborne thermography of district heating networks. 10.1109/PRRS.2014.6914288, 2014
- [13] Zhong, Y., Xu, Y., Wang, X., Jia, T., Xia, G., Ma, A., Zhang, L., Pipeline leakage detection for district heating systems using multisource data in mid- and high-latitude regions. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 151. 207-222. 10.1016/j.isprsjprs.2019.02.021, 2019
- [14] Itti L., Koch C., Niebur E., A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis, in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 20, no. 11, pp. 1254-1259, 1998
- [15] Krimmling, Jörg, Energieeffiziente Nahwärmesysteme; Grundwissen, Auslegung, Technik für Energieberater, Fraunhofer IRB Verlag, 2011
- [16] Stadtwerke Iserlohn GmbH, Technische Anschlussbedingungen Fernwärme/Nahwärme, 07.2017
- [17] Kahle, Matthias, Zentrale Wärmeversorgung mit Biogasanlagen und Wärmepumpen in ländlichen niedersächsischen Kommunen, 2016
- [18] DIN EN 17248: Fernwärme- und Fernkälterohrsysteme – Begriffe; Deutsche und Englische Fassung prEN 17248:2018, Mai 2018
- [19] Arbeitsgemeinschaft Fernwärme e.V. (AGFW), Bau von Fernwärmenetzen. Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke m.b.H. – VWEW, 1993
- [20] Hakansson, K.: Handbuch der Fernwärme Praxis, 3. Auflage. Vulkan-Verlag. Essen, 1986
- [21] Kahle, Matthias, Gutachten zum Zustand von Freileitungen, Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e.V., Hemmingen, August 2006

- [22] Grage, Thomas, Schuchardt, Georg, Technische Gebrauchsdauernanalyse von Wärmenetzen unter Berücksichtigung volatiler erneuerbarer Energien; Bericht für AP 5.2-6 „Kompensatoren“, Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e.V., Hemmingen, 2017
- [23] AGFW-Arbeitsblatt FW 401 Teil 2: Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren für Fernwärmenetze – Systembeschreibung -. Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft – AGFW – e.V. beim VDEW e.V., Dezember 2007
- [24] AGFW-Arbeitsblatt FW 401 Teil 7: Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren für Fernwärmenetze – Bauteile; Kompensationselemente und sonstige Systembauteile -. Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft – AGFW – e.V. beim VDEW e.V., Dezember 2007
- [25] Mosler, Jürgen, Wärmeverlust von Fernwärmeleitungen, Dissertation Universität Dortmund, 1987
- [26] Wellentén, Petter, Steady-State Heat Loss from insulated pipes. Department of Building Physics. Report TVBH-3017. Lund Institute of Technology, Sweden, Mai 1991
- [27] Mit freundlicher Unterstützung der InfraTec GmbH (www.InfraTec.de)
- [28] www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/bildueberdeckung/1756
- [29] Schmitt, Fiedler, Hoffmann, Heinz-Werner, Göhler, Thorsten, Strategies of Manage Heat Losses; – Technique and Economy -; Deutsche Übersetzung, International Energy Agency, 2005
- [30] Lindeberg, T., Feature detection with automatic scale selection. International Journal of Computer Vision, 30(2):79-116, 1998
- [31] Young, I.T., Gerbrands, J.J., Van Vliet, L.J., Fundamentals of image processing. Delft University of Technology, Delft, pp. 1-110, 1995
- [32] Maset, E., Fusiello, A., Crosilla, F., Toldo, R., Zorzetto, D., Photogrammetric 3d Building Reconstruction From Thermal Images. In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Iv-2/w3, pp. 25-32, 2017

- [33] Mehlretter M., Heipke C., Illumination Invariant Dense Image Matching Based On Sparse Features. In: Kersten T., Gülch E., Schiewe J., Kolbe T., Stilla U. (Eds.), 2018: Vorträge der 38. Wiss.-Tech. Jahrestagung der DGPF und PFGK18 Tagung, Publikationen der DGPF Nr. 27, ISSN 0942-2870, München, pp. 584-596, 2018
- [34] Sithole G., Voselman G., Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare-Earth Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 59 (1-2), pp. 85–101, 2004
- [35] Merkblatt AGFW FW 114: Instandhaltungsstrategien und Rehabilitationsplanung. Mindestanforderungen. AGFW; Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Dezember 2013
- [36] AGFW-Merkblatt FW 435 Teil 1: Verfahren zur Zustandsermittlung von Fernwärmeleitungen und zur Feststellung/Einmessung von Abweichungen (Leckortung) – Strategische Hinweise der Verfahren -. AGFW; Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., April 2010
- [37] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), <https://asue.de/impressum>, abgerufen am 10.06.2020
- [38] <https://de.wikipedia.org/wiki/Fernwärme>, abgerufen am 10.06.2020
- [39] Eike, Julia: Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Wurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen – Fernwärme&Vegetation. Unveröffentlichter Bericht. DBU Forschungsprojekt 333759/01.