

Drohnenbasierte dynamische quantitative Infrarotthermographie in der energetischen Analyse von Gebäuden

Philip GROESDONK¹, Benedikt KÖLSCH^{1,2}, Nirav PATEL¹,
Jacob ESTEVAM SCHMIEDT¹

¹ Institut für Solarforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Jülich

² Direction Technique Territoires et Ville, CEREMA, Lyon, Frankreich

Kontakt E-Mail: philip.groesdonk@dlr.de, jacob.estevamschmiedt@dlr.de

Kurzfassung. Der Gebäudesektor ist neben den Sektoren Energie und Verkehr für 16 % der bundesweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich. Es stellt eine Herausforderung dar, Gebäude großflächig energetisch zu vermessen, um Schwachstellen und mögliche Sanierungsoptionen aufzuzeigen.

Die in diesem Beitrag aufgezeigte drohnenbasierte berührungslose Messung der energetischen Eigenschaften von Gebäuden bietet das Potenzial einer schnellen, großflächigen und automatisierbaren Bestandsaufnahme. Diese kann für Entscheidungen im Zuge von Energieeffizienzverbesserungen und Sanierungen genutzt werden und auf diese Weise zu einer ressourceneffizienten Modernisierung des Gebäudebestands beitragen.

Unser Beitrag stellt das Prinzip der drohnenbasierten dynamischen quantitativen Infrarotthermographie sowie deren praktische Anwendung an einem exemplarischen Gebäudekomplex vor. Für die Thermographienaufnahmen werden mehrere Messflüge im Laufe einer Nacht durchgeführt. Auf Basis einer automatisierten Texturierung der entstandenen Bildserien der Gebäudeaußenhüllen auf ein zuvor erstelltes 3D-Modell des Gebäudekomplexes entsteht für jede Gebäudeoberfläche eine Zeitreihe der Oberflächentemperatur. Aus diesen Zeitreihen werden die Parameter eines dynamischen thermischen Widerstands-Kapazitäts-Modells (RC-Modells) der Gebäudehüllenteile errechnet und somit die notwendigen Daten für eine energetische Simulation dieser Bauteile generiert. Der Gebäudekomplex besteht aus vier Büro- und Laborgebäuden heterogener Alters- und Fassadenstruktur.

Anhand der Ergebnisse dieser ersten großskaligen Anwendung möchten wir den Entwicklungsstand der unseres Wissens nach neuartigen Messmethode darstellen und weiteres Entwicklungspotenzial diskutieren.

Einführung

Die durch die Klimakrise motivierten Reduktionsziele für den Treibhausgasausstoß auf Bundes- und Landesebenen erfordern von allen emissionsverursachenden Sektoren erhebliche Beiträge. Insbesondere der Gebäudesektor steht vor großen Herausforderungen und weist angesichts der politischen Ziele aktuell ein zu langsames Tempo bei der CO₂-Emissionsreduktion auf [1]. Effizienzmaßnahmen wie etwa energetische Gebäudesanierungen, aber auch Wechsel der Energieträger auf erneuerbare Quellen sind für das Gelingen der

Energie- bzw. Wärmewende erfolgskritisch. Gleichzeitig bieten sie die Chance größerer Planungssicherheit, da Preise fossiler Energieträger in Zukunft steigen und auch der Einfluss der Energieeffizienz auf Immobilienwerte zunehmen dürfte [2]. Derzeit ist die Sanierungsrate im deutschen Gebäudebestand unzureichend – aus verschiedenen Gründen, die an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden sollen, denn unabhängig davon ist es für Gebäudeeigentümer von großem Interesse, den eigenen Bestand und dessen Schwächen in Hinblick auf die Energieeffizienz gut zu kennen, um informierte Entscheidungen für die Weiterentwicklung treffen zu können.

Die Infrarotthermographie (IRT) ist ein Standardwerkzeug der Gebäudeenergieberatung und wird bereits flächendeckend eingesetzt, um einerseits Wärmebrücken und Undichtigkeiten, d. h. Stellen in der Außenhülle von Gebäuden, die zu besonders hohen Wärmeverlusten an die Umgebung führen, zu erkennen und andererseits auf einfache Weise diese Grundproblematik auch gegenüber Menschen ohne Fachkenntnis anschaulich zu visualisieren (siehe Abbildung 1). Die *qualitative* Anwendung der Technologie ist daher naheliegend und bereits erprobt. Soll die Thermographie jedoch *quantitative* Rückschlüsse auf Materialparameter der Gebäudehülle ermöglichen oder voneinander entfernte und eventuell verschieden ausgerichtete Bauteile miteinander vergleichen können, erhöhen sich die physikalische Komplexität und damit der wissenschaftliche Entwicklungsaufwand stark [3].

Dieser Beitrag behandelt die Methode der drohnenbasierten dynamischen quantitativen Infrarotthermographie, die am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Rahmen des Forschungsprojektes „Gtom-innBW“ weiterentwickelt und am Gebäudekomplex der Hahn-Schickard-Gesellschaft in Villingen-Schwenningen erprobt wurde. Nach einem Überblick über den Stand der Technik in Abschnitt 1 stellen wir die Vorgehensweise der Methodik in Abschnitt 2 vor und verknüpfen dies mit Erfahrungen und Empfehlungen aus der experimentellen Anwendung. Die ersten Ergebnisse der Messdurchführung präsentieren wir in Abschnitt 3. Nach einer Diskussion der Erkenntnisse in Abschnitt 4 erfolgen Zusammenfassung und Ausblick in Abschnitt 5.

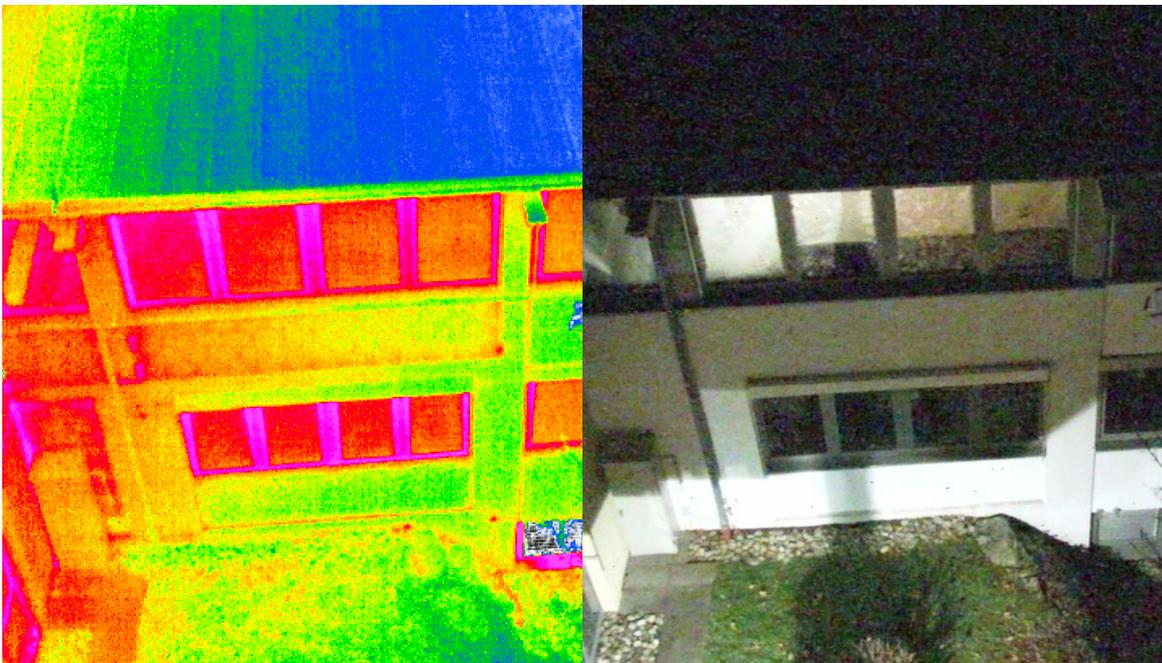


Abbildung 1. Gegenüberstellung einer Thermalaufnahme und eines optischen Bildes einer Gebäudefassade. Deutlich sichtbar sind die Unterschiede in der Wärmeabstrahlung zwischen verschiedenen optisch gleichen Fassadenbereichen.

1. Stand der Technik

Da das Hauptthema dieser Arbeit die Ermittlung von U-Werten bzw. des Wärmedurchgangs von Gebäudebauteilen ist, beginnt dieser Abschnitt zum Stand der Technik mit diesem Thema. Weiterhin geben wir eine kurze Zusammenfassung relevanter Vorarbeiten zu Möglichkeiten, gemessene Werte in Gebäudemodellen zu verarbeiten, zur Vermessung von Gebäuden mit Drohnen und zur (quantitativen) Infrarotthermographie.

1.1. Ermittlung von U-Werten im Bauwesen

Der U-Wert, in der Regel in $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ angegeben, quantifiziert den mittleren Wärmedurchgang eines Bauteils bezogen auf Bauteilfläche und Lufttemperaturdifferenz. Er ist eine der wichtigsten Eingangsgrößen für die energetische Bewertung von Gebäuden. Verfahren zu seiner Ermittlung lassen sich grob in drei Kategorien einordnen:

1. Berechnung aus Tabellenwerten der thermischen Eigenschaften der Baumaterialien, die nach Aktenlage, gemäß typischer Bauweisen für Gebäudetyp, -ort und -alter oder nach Testbohrungen dem Bauteil zugeordnet werden [4, 5]
2. Messung von Oberflächentemperaturen, Lufttemperaturen und/oder Wärmeflüssen über mehrere Tage und Auswertung der resultierenden Zeitreihen mit einer Vielzahl möglicher Methoden [6–8]
3. Quantitative Infrarotthermographie (siehe Abschnitt 1.4)

Gemein haben die meisten Verfahren, dass die Wärmeübertragung zwischen Bauteiloberfläche und Umgebung durch Konvektion und Strahlung, die unter Standardbedingungen im U-Wert enthalten sind, bei der Berechnung durch vereinfachte Modelle abgebildet werden. Die komplexen Strömungsphänomene bei der Konvektion und die in der Regel unbekannteren Wärmestrahlungsverhältnisse in der Umgebung machen diese Vorgehensweise nötig, obwohl dadurch das Mess- bzw. Berechnungsergebnis mit einer kaum quantifizierbaren Unsicherheit beeinflusst wird [6, 9].

1.2. Modellierung von Bestandsgebäuden

Building Information Modelling (BIM) ist ein mächtiges Werkzeug bei der Digitalisierung von Prozessen im Baugewerbe und der Immobilienwirtschaft. Es ist theoretisch in der Lage alle Schritte im Lebenszyklus eines Gebäudes von Planung bis Abriss zu begleiten, wird derzeit aber noch nicht durchgängig eingesetzt. International gibt es große Unterschiede bezüglich der BIM-Quote bei Bauprojekten [10]. Im Bestand kommt die Schwierigkeit hinzu, dass eine semantisch angereicherte Geometrie des Gebäudes, die Basis jedes BIM-Modells ist und ohne die kein digitaler Planungsprozess möglich ist, in der Regel nicht systematisch digitalisiert vorliegt [11]. Angesichts der gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Relevanz des Themas gibt es zahlreiche wissenschaftliche und kommerzielle Lösungsansätze in Wissenschaft und Industrie [12], die hier nicht umfassend aufgeführt werden können. Darunter sind planbasierte, photogrammetrische und Laserscan-(Scan-to-BIM-)Verfahren, mit denen – in verschiedenen Automatisierungsgraden – eine 3D-Geometrie erzeugt und dann zum Beispiel im offenen Datenstandard IFC gespeichert wird. Die Anreicherung mit Metadaten etwa über Räume und Bauteile ist eine weitere herausfordernde Aufgabe, insbesondere, wenn dies automatisiert erfolgen soll [13]. Einer dieser Metadatenpunkte ist der U-Wert von Bauteilen.

1.3. Anwendung von Drohnen in der Vermessung von Gebäuden und Bauwerken

Durch ihre Mobilität sind Drohnen in der Lage, mit Handgeräten nicht oder nur schwer erreichbare Bereiche von Gebäuden zu vermessen. Sie werden etwa für geometrische Vermessung [14], Monitoring [15] und Schadensdetektion [16] eingesetzt. Ein wichtiger Aspekt ist

dabei die Positionsgenauigkeit bei der Datenaufnahme [17], die für die korrekte Zuordnung von Messung und Messobjekt essentiell ist.

1.4. (Quantitative) Infrarotthermographie

Die quantitative Infrarotthermographie ist eine Messtechnik, bei der eine Thermalkamera Wärmestrahlung aufnimmt und wie bei Kameras üblich in eine Pixelgrafik überführt. Bei Messungen im Außenbereich sind Sensoren mit einer Empfindlichkeit im Bereich von 8–14 μm üblich [18], da in diesem Bereich erstens der atmosphärische Einfluss auf die Strahlung vergleichsweise gering ist und zweitens Temperaturen üblicher Beobachtungsobjekte gut unterschieden werden können [19] – nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz weisen Schwarzkörper im Temperaturbereich von etwa -66 – 90 °C hier ihre maximale spektrale Abstrahlung auf.

Abbildung 2 zeigt einen Überblick über in der Literatur besprochene Varianten, bei denen aus der aufgenommenen Wärmeabstrahlung von Gebäudebauteilen auf deren thermische Eigenschaften geschlossen wird. Meist wird auf U-Werte abgezielt, aber auch unbeabsichtigter Luftaustausch wird detektiert [20]. Für die Messung aus dem Innenraum existiert ein international standardisiertes Verfahren, bei der eine stationäre Kamera über mehrere Tage an derselben Stelle positioniert ist [21]. Vorteilhaft sind hier die kontrollierten Umgebungsbedingungen. Eine Messung von außen hat potenziell kürzere Aufnahmezeiträume, jedoch ist die Berücksichtigung wechselhafter Bedingungen herausfordernd. In der Literatur finden sich Verfahren mit stationären Kameras, die eine Zeitreihe aufnehmen [22], und solche mit mobilen Messeinrichtungen, bei denen nur eine Aufnahme für jedes Messobjekt genutzt wird [23–25]. Wir kombinieren diese beiden Ansätze durch Mehrfachbefliegung mit einer Drohne im Laufe einer Nacht zur hier vorgestellten drohnenbasierten dynamischen quantitativen Infrarotthermographie.

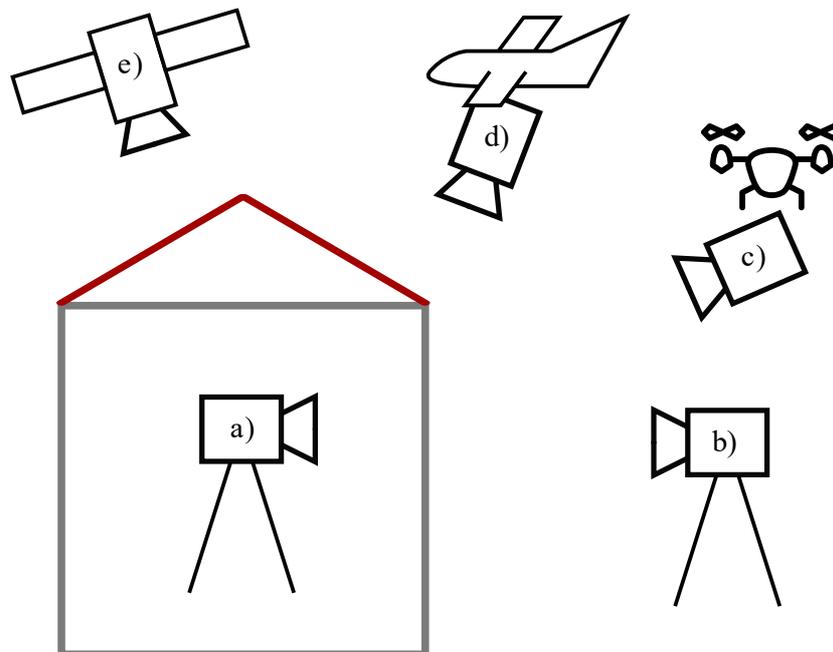


Abbildung 2. Verschiedene Optionen zur thermographischen Untersuchung von Gebäuden:
a) stationär innen, b) stationär außen, c) drohnengetragene Kamera, d) Luftbild-Thermographie,
e) satellitengestützte Thermographie

eine heterogene Struktur bei Baujahr (zwischen 1989 und 2019) und damit bei der Dämmungsqualität, aber auch bei Oberflächenmaterialien auf und ist daher gut geeignet, um die Anwendbarkeit des Verfahrens für verschiedenartige Bauteile zu testen. Gleichzeitig ist die Lage (wenig Vegetation, kaum Umgebungsbebauung) für die Flugplanung vorteilhaft. Für die Befliegung wurde ein System aus der Drohne DJI M600 Pro, dem Gimbal Gremsy S1 und der Thermalkamera Workswell Wiris Pro [28] verwendet.

Im Folgenden gehen wir praxisbezogen auf die nächtliche Befliegung selbst, die Extraktion von Bildttexturen zu den Außenflächen, die quantitative Bildauswertung sowie die U-Wert-Berechnung ein. Eine Erfassung der Messwerte im BIM ist bisher nicht erfolgt.

2.1. Nächtliche Infrarotthermographie-Befliegung und Extraktion von Bildttexturen

Die Befliegung des Gebäudekomplexes wurde nachts durchgeführt. Diese Vorgehensweise bringt wesentliche Vorteile mit sich. Am relevantesten für die Genauigkeit der Messung ist die Vermeidung von Sonneneinstrahlung. Weiterhin muss keine oder kaum Rücksicht auf den Gebäudebetrieb genommen und die Veränderung von Rahmenbedingungen durch Nutzende (Fensteröffnungen, Raumtemperaturveränderungen) kann ignoriert werden.

Bei der praktischen Durchführung traten neben den für konzentrierte Arbeit nicht förderlichen Zeiten und Außentemperaturen weitere Herausforderungen auf, die sich auch auf die Auswertbarkeit der Daten auswirkten und bis heute nur teilweise gelöst wurden. Die unter Berücksichtigung der empfohlenen Überdeckungsgrade (80–90 % [29]) vorgeplanten Flugrouten konnten nicht automatisiert geflogen werden, da Windverhältnisse, GPS-Beeinträchtigungen durch metallische Gebäudestrukturen und an einzelnen Stellen kleine Abstände zwischen Bäumen und Fassade ein zu großes Kollisionsrisiko bedeutet hätten. Manuelle Befliegung und Bildaufnahmeauslösung¹ hatten jedoch zur Folge, dass erstens deutlich weniger Gebäudefläche abgedeckt werden konnte als vorgesehen und zweitens eine zufriedenstellend genaue Korrektur der GPS-Positionsinformationen der Drohne mit den aktuell verfügbaren Softwareprodukten weder auf Basis der Thermaldaten, noch mit den parallel aufgenommenen, schlecht belichteten optischen Bildern möglich war. Immerhin lieferte die Drohne trotz der niedrigen Umgebungstemperaturen bedingt durch geringe Flugdynamik eine deutlich längere Batterielaufzeit (> 45 min) gegenüber den Herstellerangaben (20 min).

Sind Position und Ausrichtung der Kamera (äußere Orientierung) sowie die Kameraeigenschaften (innere Orientierung) ausreichend genau bekannt bzw. durch Photogrammetriesoftware nachträglich berechnet, können Objekte mit ebenfalls bekannter Position in der Welt auf einzelnen Bildern wiedergefunden werden [30]. Dies ermöglicht grundsätzlich die Texturierung von Außenflächen (vgl. Abbildung 3). Je nach Gebäudestruktur und Flugroute sollte ein Algorithmus verwendet werden, der verdeckende Objekte vermeidet [31, 32]. An einer Lösung für die Bildpositionierung und die darauf aufbauende automatische Texturextraktion wird derzeit noch gearbeitet – für die in Abschnitt 3 präsentierten Ergebnisse wurde eine manuelle Auswertung einzelner Bilder durchgeführt.

2.2. Quantitative Bildauswertung

Aufgabe der Auswertung der Infrarotbilder ist es, die Oberflächentemperatur des Messobjekts zu quantifizieren. Zu diesem Zweck müssen darüber hinaus gehende Beiträge zur vom Sensor aufgenommenen Strahlung aus dem Messwert herausgerechnet werden.

Vereinfacht ausdrücken lassen sich die Phänomene als

$$L_{\text{sensor}} = \tau_{\text{atm}} \cdot (L_{\text{obj}}(T_S) + L_r) + L_{\text{atm}} + L_{\text{cam}}. \quad (1)$$

¹ Eine Aufnahme von Serienbildern ist hier nicht geeignet, da die Drohne bei Aufnahme stillstehen sollte.

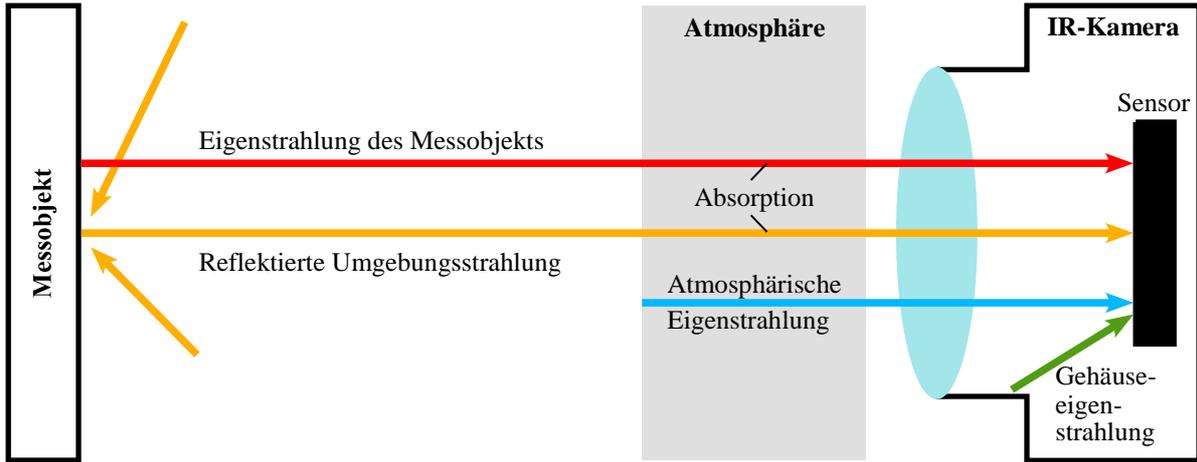


Abbildung 4. Beiträge zur vom IR-Kamera-Sensor aufgenommenen Strahlung.

Für die Strahlungswerte wird nach Schott [19] die Strahldichte L (engl. Radiance) verwendet, da sie Orts- und Richtungsabhängigkeit der Strahlung berücksichtigt. Mit Blick auf Abbildung 4 bestehen die Beiträge in der Gehäuseeigenstrahlung L_{cam} , der atmosphärischen Eigenstrahlung L_{atm} und den vom Messobjekt ausgehenden Strahlungsanteilen, die von der Atmosphäre mit deren Transmissivität τ_{atm} beeinflusst wird. Die Eigenstrahlung des Messobjekts

$$L_{obj}(T_S) = \varepsilon_{obj}(\vartheta_o, \varphi_o) \cdot L_{BB}(T_S) \quad (2)$$

ergibt sich aus der Schwarzkörperstrahlung bei der Oberflächentemperatur $L_{BB}(T_S)$ und der Emissivität ε_{obj} , die je nach Abstrahlungsrichtung (ϑ_o, φ_o) variiert. Die reflektierte Umgebungsstrahlung

$$L_r = \int_{\omega_i} f_r(\vartheta_i, \varphi_i; \vartheta_o, \varphi_o) \cdot L_u(\vartheta_i, \varphi_i) d\Omega_i \quad (3)$$

ist nach Nicodemus et al. [33] durch das über den Einstrahlungshalbraum Ω_i integrierte Produkt der von der Einstrahlungsrichtung (ϑ_i, φ_i) abhängigen Umgebungsstrahlung L_u mit der bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion f_r des Oberflächenmaterials bestimmt.

Eine vollständige Berücksichtigung aller dieser Phänomene am Messort ist nicht möglich. Hinzu kommt, dass es sich bei allen in den Gleichungen (1)–(3) genannten Größen eigentlich um spektrale Werte handelt. Der vom Sensor aufgezeichnete Wert

$$L_{rec} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} L_{sensor,\lambda} \cdot \beta(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

ergibt sich über die spektrale Empfindlichkeit des Sensors $\beta(\lambda)$ (siehe auch Abschnitt 1.4).

Um aus den Messwerten überhaupt Rückschlüsse auf die Oberflächentemperatur T_S ziehen zu können, implementieren wir einige aus der Literatur bekannte Vereinfachungen: Es werden grundsätzlich integrale Größen betrachtet, die wo möglich über die spektrale Empfindlichkeit des Sensors [18] aus spektralen Größen berechnet werden [19].

- Das Messobjekt hat bei nicht zu schräger Betrachtung gleich bleibende Emissivität [34].
- Das Messobjekt ist ein Lambertischer Reflektor, sodass die Umgebungsstrahlung durch das Anbringen geknitterter Aluminiumfolie ermittelt werden kann [35].
- Wir vernachlässigen den atmosphärischen Einfluss, der im Empfindlichkeitsbereich des Sensors hauptsächlich durch Wasser- und Kohlendioxidanteile in der Luft entsteht und bei den kurzen Beobachtungsentfernungen und niedrigen Taupunkttemperaturen bei

Werten von $\tau_{\text{atm}} > 0,999$ (berechnet über die Passman-Larmore-Tabellen bei Gaussorgues [36]) sehr klein ist.

Zur Minimierung von Ungenauigkeiten in der Kamera selbst sollte die Non-Uniformity Correction (NUC) regelmäßig durchgeführt werden. Dies vermeidet aber nicht, dass die Eigenstrahlung des Gehäuses L_{cam} die aufgenommene Strahlung beeinflusst [37, 38]. Um variierende Werte durch veränderte Gehäusestrahlung zu vermeiden, empfiehlt Workswell eine Akklimatisierungszeit von 15 min [39]. Trotzdem zeigt die Erfahrung, dass realistische Absolutwerte nur erreicht werden können, wenn eine Kalibrierung im Feld vorgenommen wird. Eine Gegenmaßnahme sind annähernd schwarze Körper, die mit einem Lack bekannter Emissionseigenschaften behandelt sind und deren Oberflächentemperatur laufend gemessen wird. Idealerweise sollten diese Körper die oberen und unteren Grenzen erwarteter Strahlungswerte der Messobjekte abbilden. [40]



Abbildung 5. Referenzkörper mit Temperaturregelung und Oberflächentemperaturmessung.

Die in Abbildung 5 gezeigten Referenzkörper werden durch Tauchsieder in der Wasserfüllung geregelt. Der Gefrierpunkt ist also die untere Grenze für die Referenztemperatur. Für die Befestigung der Oberflächentempersensoren verwenden wir zur Vermeidung von Umgebungsstrahlungseinflüssen reflektierendes Klebeband [41].

Ausgehend von Gleichung (1) gehen wir davon aus, dass Abweichungen aus einer ungenauen internen Korrektur für L_{cam} resultieren. Unter Vernachlässigung des Atmosphäreinflusses ergibt sich

$$\begin{aligned} L_{\text{cam,old}} + L_{\text{BB}}(T_{\text{S,ref,meas,IR}}) &= L_{\text{obj}}(T_{\text{S,ref,meas,NTC}}) + L_{\text{r}} + L_{\text{cam,new}} \\ &= \varepsilon_{\text{ref}} \cdot L_{\text{BB}}(T_{\text{S,ref,meas,NTC}}) + \rho_{\text{ref}} \cdot L_{\text{BB}}(T_{\text{r}}) + L_{\text{cam,new}} \end{aligned} \quad (5)$$

und daraus für den Korrekturwert

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{cam}} = L_{\text{cam,new}} - L_{\text{cam,old}} &= L_{\text{BB}}(T_{\text{S,ref,meas,IR}}) - \varepsilon_{\text{ref}} \cdot L_{\text{BB}}(T_{\text{S,ref,meas,NTC}}) \\ &\quad - (1 - \varepsilon_{\text{ref}}) \cdot L_{\text{BB}}(T_{\text{r}}) \end{aligned} \quad (6)$$

unter Berücksichtigung der ursprünglich von der Thermalkamera als Messwert für die Referenzkörpertemperatur ausgegebenen Temperatur $T_{\text{S,ref,meas,IR}}$, der am Referenzkörper gemessenen Oberflächentemperatur $T_{\text{S,ref,meas,NTC}}$, der Emissivität ε_{ref} und Reflektivität ρ_{ref} des Lacks, die als spektrale Werte vorliegen [42], und einer abgeschätzten Strahlungstemperatur der Umgebung T_{r} . Dieser Vorgehensweise liegt die Annahme zugrunde, dass der Einfluss der Gehäusetemperatur nach der Akklimatisierungszeit bei durchgehendem Betrieb (die Kamera wurde nur für wenige Sekunden während des Akkuwechsels der Drohne ausgeschaltet) und annähernd konstanten Umgebungsbedingungen ebenso annähernd konstant bleibt.

2.3. U-Wert-Berechnung

Ausgehend von denen wie in Abschnitt 2.2 beschrieben über den Verlauf der Nacht gemessenen Oberflächentemperaturen beinhaltete die ursprüngliche Idee des den hier vorgestellten Messungen zugrundeliegenden Forschungsprojekts, die U-Werte über ein dynamisches Wandmodell und Bayessche Modellierung [7] zu ermitteln. Das betrachtete Bauteil wird dabei durch ein in der energetischen Gebäudesimulation verbreitetes Widerstands-Kapazitäts-Modell (RC-Modell) [43] repräsentiert. Dies steht im Gegensatz zu etablierten Verfahren, die U-Werte nur auf Basis einzelner Messungen unter Annahme konstanter Verhältnisse in der Wand berechnen. So benutzen Dall’O et al. [44] die Gleichung

$$U = h_{\text{comb,out}} \frac{T_S - T_{\text{air,out}}}{T_{\text{air,in}} - T_{\text{air,out}}} \quad (7)$$

um den U -Wert unter Verwendung der gemessenen Oberflächentemperatur T_S , der Lufttemperaturen innen $T_{\text{air,in}}$ und außen $T_{\text{air,out}}$ sowie des kombinierten (d.h. Strahlung und Konvektion umfassenden) Wärmeübergangskoeffizienten $h_{\text{comb,out}}$ zu berechnen. Ähnliche Vorgehensweisen, mit teilweise unterschiedlichen Gleichungen, Messwerten und Annahmen für $h_{\text{comb,out}}$ finden sich etwa bei Madding [45] und Bayomi et al. [23].

Sofern wie von Fox et al. [22] und Rakha et al. [46] “time-lapse thermography”-Methoden verwendet werden, konzentriert sich die Auswertung auf Unterschiede in der Temperaturentwicklung verschiedener Bauteile oder die auf diese Weise ermöglichte Erkennung thermischer Schwachstellen.

3. Ergebnisse

Ursprünglich vorgesehen war eine vollständige mehrfache Befliegung des gesamten Gebäudekomplexes und die nachfolgende automatisierte Texturierung sowie U-Wert-Berechnung für alle Bauteiloberflächen. Aufgrund der in Abschnitt 2.1 dargestellten Schwierigkeiten lieferte erstens die Befliegung weniger Daten und war zweitens eine automatisierte Auswertung bisher nicht möglich. In diesem Abschnitt stellen wir exemplarisch Ergebnisse für ein Bauteil auf Basis manuell aus den Infrarotdaten extrahierter Informationen dar.

3.1. Referenzkörperkorrektur

Die Referenzkörper wurden gegen 19:40 Uhr, 1:52 Uhr und 4:24 Uhr jeweils mehrfach mit der Infrarotkamera abgebildet. Aus dem Vergleich von gemessenen Oberflächentemperaturen und aufgezeichneten Strahlungswerten ergab sich über Gleichung (6) der zeitliche Verlauf von ΔL_{cam} in Abbildung 6 aus den Mittelwerten der drei Messzeiten. Über die Zeit interpolierte Werte wurden für die Korrektur der Infrarotaufnahmen an den Fassaden verwendet. Die in der Abbildung gezeigte Streuung zeigt eine große Unsicherheit bei der Bestimmung von ΔL_{cam} . Die Annahme eines annähernd konstanten Einflusses der Gehäusetemperatur aus Abschnitt 2.2 muss folglich in Zweifel gezogen werden.

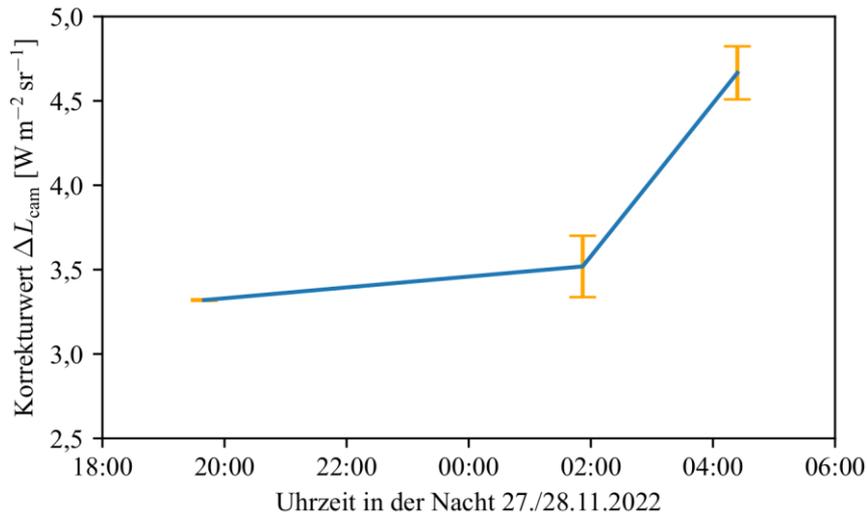


Abbildung 6. Zeitlicher Verlauf des Korrekturwertes ΔL_{cam} aus drei Messzeiten mit Standardabweichung der Wiederholungsmessungen zur selben Messzeit.

3.2. Fassaden-Oberflächentemperatur

Abbildung 7 zeigt einen Vergleich der mit einem NTC-Kontakt und der vorgestellten Thermographiemethode ermittelten Oberflächentemperatur eines Elements des in Abbildung 3 mittig gezeigten Nordfassade des Gebäudekomplexes. Die Fehlerbalken der Thermographie-Temperaturwerte verdeutlicht nur den Einfluss der ΔL_{cam} -Streuung (siehe Abbildung 6) und beinhaltet keine weiteren Unsicherheiten des Messergebnisses.

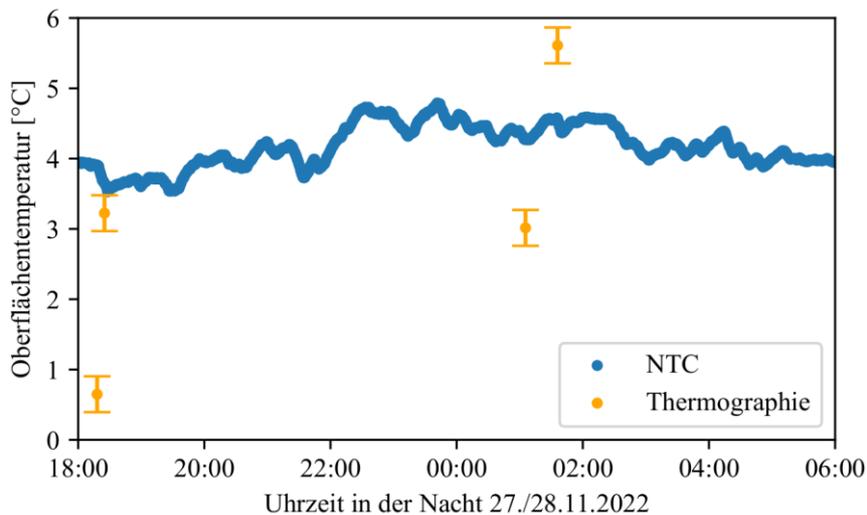


Abbildung 7. Vergleich zwischen per Thermographie und per NTC-Kontaktthermometer gemessenen Oberflächentemperaturen an einer Beispielfassade. Die Fehlerbalken beziehen sich auf die Auswirkung der übergreifenden Standardabweichung von ΔL_{cam} aus Abbildung 6.

3.3. U-Werte

Die Anwendung eines wie in Abschnitt 2.3 beschriebenen vorgesehenen dynamischen Wandmodells auf die Oberflächentemperaturen ist aufgrund der geringen Anzahl von Stützstellen und der hohen Messunsicherheit nicht sinnvoll. Für die in Tabelle 1 mit der Messung nach

Norm [41] mit Wärmeflussensoren verglichenen Werte verwenden wir stattdessen Gleichung (7) mit über die Messungen gemittelten Temperaturdifferenzen und einem Standardwert von $h_{\text{comb,out}} = 13,4 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, ermittelt analog zu Dall’O et al. [44]. Als weiteren Vergleichswert fügen wir eine Anwendung derselben Gleichung auf im Zwei-Stunden-Rhythmus aufgenommene, per Kontakt gemessene Oberflächentemperaturen an. Aus Gleichung (7) wird sofort deutlich, dass die Wahl des Wärmeübergangskoeffizienten und die gemessene Außenlufttemperatur einen großen Einfluss auf das Ergebnis haben, wie auch von Patel et al. [47] in einer umfangreichen Sensitivitätsanalyse festgestellt wird. Eine realistische Unsicherheitsangabe ist für die tabellierten Werte nicht möglich, weshalb wir darauf verzichten. Die angegebenen Werte sollen nur exemplarisch und keinesfalls zur Bewertung des vorgestellten Verfahrens verstanden werden.

Tabelle 1. Ermittelte U-Werte aus Messung und aus Modellanwendung auf Oberflächentemperatur-Messergebnisse. Die angegebenen Werte sind rein exemplarisch und sollen keinesfalls der Bewertung des vorgestellten Verfahrens dienen.

Messung nach Norm [41]	Modellanwendung auf Thermographiemessungen	Modellanwendung auf NTC-Temperaturwerte
$1,21 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} \pm 20 \%$	$1,1 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	$1,4 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

4. Diskussion

Die Vorteile des vorgestellten Systems liegen auf der Hand. Es hat das Potenzial, für mittelgroße Gebäudekomplexe, z. B. Bürogebäude, Schulen oder Verwaltungssitze, für die eine handgetragene Thermographie nicht mehr realistisch ist, in kurzer Zeit Daten über die Dämmungsqualität aufzunehmen und diese direkt mit der Gebäudegeometrie und -semantik zu verbinden.

Zum jetzigen Zeitpunkt kann es diese Vorteile gegenüber einer „normalen“ qualitativen Thermographie jedoch nicht ausspielen. Zu lösende Herausforderungen sind

- ungenaue Positionierung der Bilder und damit Einbettung in die Gebäudegeometrie
- automatisierte IFC-/BIM-Verarbeitung bezüglich zu untersuchender Flächen, da hier gegenüber CityGML [14] wesentliche Unterschiede in der Datenstruktur bestehen
- eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit der Thermographie.

Bezüglich des letzten Punktes sind sicherlich auch Schwachstellen im Design dieser Studie als Gründe zu sehen, insbesondere die Kalibrierung der Kamera mit den Referenzkörpern hat in der praktischen Anwendung nicht wie bei der Vorbereitung (unter anderen Umgebungstemperaturen und ohne gleichzeitigen Flug) funktioniert. Falls das Problem der schwankenden Genauigkeit der Kamera nicht auf Hardwareebene gelöst werden kann, sind möglicherweise Referenzwerte in (fast) jedem Bild, also zum Beispiel Kontakttemperatursensoren auf jeder untersuchten Oberfläche vonnöten. Das würde den Aufwand für die Datenakquise deutlich erhöhen und somit die Vorteile des Systems teilweise zunichtemachen. Es ergäbe sich jedoch ein Vorteil bei der Bestimmung lokaler Emissivitäten.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In den vorangegangenen Abschnitten wurde die Weiterentwicklung der Methode der drohnenbasierten dynamischen quantitativen Infrarotthermographie, die am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Rahmen des Forschungsprojektes „Gtom-innBW“ sowie deren Erprobung am Gebäudekomplex der Hahn-Schickard-Gesellschaft in Villingen-Schwenningen vorgestellt. Es wurde deutlich, dass das System durch die mobile Anwendung

insbesondere in Verknüpfung mit BIM-Modellen einen guten Überblick über die thermische Qualität der Gebäudehülle geben kann, bezüglich der quantitativen Auswertung jedoch aufgrund verschiedener Herausforderungen bei der Datenaufnahme noch Entwicklungsbedarf besteht. Dies gilt insbesondere mit Blick auf eine mögliche Anwendung außerhalb des akademischen Umfelds, da die Qualität der Thermographiedaten stark von der Anwendung im konkreten Fall abhängt und – anders als andere Messmethoden – weniger einfach zu standardisieren ist.

Neben der Arbeit an den genannten aktuellen Herausforderungen wollen wir uns in Zukunft auch der Verknüpfung mit Ergebnissen der zweiten Messmethode, die im Projekt „Gtom-innBW“ am Beispielgebäude angewendet wurde, widmen: der akustischen Luftdichtheitsmessung [48]. Wärmeleitung und unbeabsichtigter Luftaustausch sind für die energetische Analyse von Bestandsgebäuden gleichermaßen relevant und sollten auch entsprechend beide bei einer Untersuchung eines Gebäudes betrachtet werden. Die Kombination der beiden Verfahren hat das Potenzial, solche Untersuchungen zu beschleunigen.

Danksagung

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben „Pilotanwendung von Gebäudetomograph-Messmethoden an einem Institut der Innovationsallianz Baden-Württemberg (Gtom-innBW)“ wurde durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus des Landes Baden-Württemberg unter dem Aktenzeichen WM3-4332-157/64 gefördert.



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND TOURISMUS

Weiterhin bedanken wir uns bei der Hahn-Schickard-Gesellschaft für die Gastfreundschaft während der Versuchsdurchführung und die unkomplizierte Organisation sowie bei unserem ehemaligen Kollegen Dhruvkumar Patel für seine hilfreichen Ratschläge bei Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Messungen.

Referenzen

- [1] *Expertenrat für Klimafragen: Zweijahresgutachten 2022*. Gutachten zu bisherigen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen, Trends der Jahresemissionsmengen und Wirksamkeit von Maßnahmen (gemäß § 12 Abs. 4 Bundes-Klimaschutzgesetz), 2022, https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2022/11/ERK2022_Zweijahresgutachten.pdf [Zugriff am: 25.03.2023].
- [2] *Stede, J.; Schütze, F.; Wietschel, J.*: Wärmemonitor 2019: Klimaziele bei Wohngebäuden trotz sinkender CO₂-Emissionen derzeit außer Reichweite. *In: DIW Wochenbericht* (2020), Heft 40, S. 769-779. https://doi.org/10.18723/DIW_WB:2020-40-1.
- [3] *Bienvenido-Huertas, D.; Moyano, J.; Marín, D. et al.*: Review of in situ methods for assessing the thermal transmittance of walls. *In: Renewable and Sustainable Energy Reviews* 102 (2019), S. 356-371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.016>.
- [4] DIN EN ISO 6946: Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren. Norm, Ausgabe 2018.
- [5] DIN EN ISO 12631: Wärmetechnisches Verhalten von Vorhangfassaden - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten. Norm, Ausgabe 2018.
- [6] *Lu, X.; Memari, A.M.*: Comparison of the Experimental Measurement Methods for Building Envelope Thermal Transmittance. *In: Buildings* 12 (2022), Heft 3, S. 282. <https://doi.org/10.3390/buildings12030282>.
- [7] *Gori, V.; Biddulph, P.; Elwell, C.*: A Bayesian Dynamic Method to Estimate the Thermophysical Properties of Building Elements in All Seasons, Orientations and with Reduced Error. *In: Energies* 11 (2018), Heft 4, S. 802. <https://doi.org/10.3390/en11040802>.
- [8] *Bienvenido-Huertas, D.; Rodríguez-Álvaro, R.; Moyano, J. et al.*: Determining the U-Value of Façades Using the Thermometric Method: Potentials and Limitations. *In: Energies* 11 (2018), Heft 2, S. 360. <https://doi.org/10.3390/en11020360>.

- [9] *Garay-Martinez, R.; Arregi, B.; Lumbreras, M.*: Surface heat transfer coefficients in building envelopes: Uncertainty levels in experimental methods. *In: Journal of Building Physics* (2023), 174425912211502. <https://doi.org/10.1177/17442591221150250>.
- [10] *Borrmann, A.; König, M.; Koch, C. et al.*: Einführung. *In: Borrmann, A.; König, M.; Beetz, J.* (Hrsg.): *Building Information Modeling – Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015, S. 1-21.
- [11] *Entzian, K.; Scharmann, R.*: BIM für Bauen im Bestand. *In: Borrmann, A.; König, M.; Beetz, J.* (Hrsg.): *Building Information Modeling – Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015, S. 371-383.
- [12] *Rashdi, R.; Martínez-Sánchez, J.; Arias, P. et al.*: Scanning Technologies to Building Information Modelling: A Review. *In: Infrastructures* 7 (2022), Heft 4, S. 49. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7040049>.
- [13] *Reiterer, A.; Merkle, D.; Schmitt, A.*: Digitalisierung von Bestandsbauwerken mit KI. *In: Bautechnik* 99 (2022), Heft 6, S. 425-432. <https://doi.org/10.1002/bate.202200013>.
- [14] *Gorzalka, P.; Estevam Schmiedt, J.; Götsche, J. et al.*: Remote Sensing For Building Energy Simulation Input – A Field Trial. *In: Corrado, V.; Fabrizio, E.; Gasparella, A. et al.* (Hrsg.): *Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA, Building Simulation Conference proceedings*. IBPSA, Rome, Italy, 2020, S. 4094-4101.
- [15] *Sun, J.; Peng, B.; Wang, C.C. et al.*: Building displacement measurement and analysis based on UAV images. *In: Automation in Construction* 140 (2022), S. 104367. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104367>.
- [16] *Feroz, S.; Abu Dabous, S.*: UAV-Based Remote Sensing Applications for Bridge Condition Assessment. *In: Remote Sensing* 13 (2021), Heft 9, S. 1809. <https://doi.org/10.3390/rs13091809>.
- [17] *Schulze, R.G.; Mader, D.; Eltner, A.*: Genauigkeitspotential direkt georeferenzierter UAS-Messungen am Beispiel eines Bahnhaltdepotpunktes. *In: Kersten, T.P.; Tilly, N.* (Hrsg.): *42. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 5.-6. Oktober 2022 in Dresden: Beiträge, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. Heft 30. Geschäftsstelle der DGPF, 2022, S. 243-255.*
- [18] *Teledyne FLIR*: What is the typical spectral response for certain camera/lens combination?, <https://www.flir.com/support-center/Instruments/what-is-the-typical-spectral-response-for-certain-camera-lens-combination/> [Zugriff am: 20.03.2023].
- [19] *Schott, J.R.*: Methods for estimation of and correction for atmospheric effects on remotely sensed data. *In: Kohnle, A.; Miller, W.B.* (Hrsg.): *Atmospheric Propagation and Remote Sensing II, SPIE Proceedings*. SPIE, Orlando, FL, 1993, S. 448-482.
- [20] *Kölsch, B.; Pernpeintner, J.; Schiricke, B. et al.*: Air Leakage Detection in Building Façades by Combining Lock-In Thermography with Blower Excitation. *In: Proceedings of the 42nd AIVC Conference “Ventilation Challenges in a Changing World”*. AIVC, Rotterdam, 2022, S. 46-54.
- [21] ISO 9869-2: Thermal insulation: Building elements: In-situ measurement of thermal resistance and thermal capacitance: Infrared method for frame structure dwelling. Technical standard, Ausgabe 2018.
- [22] *Fox, M.; Coley, D.; Goodhew, S. et al.*: Time-lapse thermography for building defect detection. *In: Energy and Buildings* 92 (2015), S. 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.021>.
- [23] *Bayomi, N.; Nagpal, S.; Rakha, T. et al.*: Building envelope modeling calibration using aerial thermography. *In: Energy and Buildings* 233 (2021), S. 110648. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110648>.
- [24] *Schott, J.R.; Biegel, J.D.; Wilkinson, E.P.*: Quantitative Aerial Survey Of Building Heat Loss. *In: Courville, G.E.* (Hrsg.): *Thermosense V, SPIE Proceedings*. SPIE, Detroit, 1983, S. 187-195.
- [25] *Mayer, K.; Haas, L.; Huang, T. et al.*: Estimating building energy efficiency from street view imagery, aerial imagery, and land surface temperature data. *In: Applied Energy* 333 (2023), S. 120542. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120542>.
- [26] *Lumoview Building Analytics*: Wie die Messung funktioniert, 2023, <https://www.lumoview.com/products#products> [Zugriff am: 29.03.2023].
- [27] *Fichter, E.*: Automatisierte Erzeugung geometrischer Modelle für die BIM-basierte Gebäudesimulation. Aachen, RWTH Aachen, Dissertation, 2022.
- [28] *Workswell*: WIRIS Pro Radiometric Inspection Thermal Camera, <https://workswell-thermal-camera.com/workswell-wiris-pro-thermal-inspection-camera-with-ultrazoom/> [Zugriff am: 22.03.2023].
- [29] *Agisoft*: Thermal imagery processing, 2023, <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000158942-thermal-imagery-processing> [Zugriff am: 22.03.2023].
- [30] *Pix4D*: How are the Internal and External Camera Parameters defined?, 2021, <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559089-How-are-the-Internal-and-External-Camera-Parameters-defined> [Zugriff am: 22.03.2023].
- [31] *Iwaszczuk, D.*: Automatic Texturing of 3D Models of Urban Areas Using Image Sequences from Airborne TIR Cameras. München, Technische Universität München, Dissertation, 2015.

- [32] *Frommholz, D.; Linkiewicz, M.; Poznanska, A.M.*: Inlining 3D Reconstruction, Multi-source Texture Mapping and Semantic Analysis Using Oblique Aerial Imagery. *In: ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B3* (2016), S. 605-612. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B3-605-2016>.
- [33] *Nicodemus, F.E.; Richmond, J.C.; Hsia, J.J. et al.*: Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance, NBS Monograph Heft 160, U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, Washington, DC, 1977.
- [34] *Vollmer, M.; Möllmann, K.-P.*: Infrared thermal imaging – Fundamentals, research and applications. Wiley-VCH, Weinheim, 2018.
- [35] *Fokaides, P.A.; Kalogirou, S.A.*: Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. *In: Applied Energy* 88 (2011), Heft 12, S. 4358-4365. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.014>.
- [36] *Gaussorgues, G.*: Infrared Thermography, Microwave technology series no. 5, Chapman & Hall, London, 1994.
- [37] *Teledyne FLIR*: Messgenauigkeit und -unsicherheit von Infrarotkameras einfach erklärt, 2016, <https://www.flir.de/discover/rd-science/infrared-camera-accuracy-and-uncertainty-in-plain-language/> [Zugriff am: 25.03.2023].
- [38] *Budzier, H.; Gerlach, G.*: Thermal Infrared Sensors – Theory, Optimisation and Practice. Wiley, s.l., 2010.
- [39] *Workswell*: Workswell Wiris Pro User Manual, Prag Ausgabe Dezember 2020.
- [40] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.*: Gtom – Messsystem für schnelle und genaue energetische Analysen von Gebäudehüllen für Gebäude und Quartiere. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FKZ 03ET1405A, 2021, https://www.dlr.de/sf/PortalData/73/Resources/dokumente/qualifizierung/gebaeude/Gtom_Abschlussbericht.pdf [Zugriff am: 25.03.2023].
- [41] ISO 9869-1: Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal capacitance - Heat flow meter method. Norm, Ausgabe 2014.
- [42] *New Technologies Research Centre University of West Bohemia*: Washable thermographic paint for special applications HEWP-LT-MWIR-BK-11, 2023, <https://paints.labir.eu/homepage/thermographic-washable-paint> [Zugriff am: 25.03.2023].
- [43] VDI 6007 Teil 1: Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Raummodell. Richtlinie, Ausgabe 2015.
- [44] *Dall'O', G.; Sarto, L.; Panza, A.*: Infrared Screening of Residential Buildings for Energy Audit Purposes: Results of a Field Test. *In: Energies* 6 (2013), Heft 8, S. 3859-3878. <https://doi.org/10.3390/en6083859>.
- [45] *Madding, R.*: Finding R-Values of Stud Frame Constructed Houses with IR Thermography. *In: InfraMation 2008 Proceedings*, 2008, S. 261-277.
- [46] *Rakha, T.; El Masri, Y.; Chen, K. et al.*: Building envelope anomaly characterization and simulation using drone time-lapse thermography. *In: Energy and Buildings* 259 (2022), S. 111754. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111754>.
- [47] *Patel, D.; Estevam Schmiedt, J.; Röger, M. et al.*: Approach for external measurements of the heat transfer coefficient (U-value) of building envelope components using UAV based infrared thermography. *In: 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference (QIRT)*. QIRT Council, Berlin, 2018, S. 379-386.
- [48] *Kölsch, B.; Schiricke, B.; Lüpfert, E. et al.*: Detection of air leakage in building envelopes using microphone arrays. *In: Proceedings of the 41st AIVC - ASHRAE IAQ joint conference*, 2022.