

Fernerkundungsgestützte Wärmeverlustdetektion von Dachflächen als Beitrag zur Energieeffizienzsteigerung von Stadträumen – Ergebnisse einer Fallstudie in Graz/Österreich

Wolfgang Sulzer, Katharina Kern, Christian Bauer, Reinhold Lazar, Martin Mudri, Winfried Ganster

(A.o.Univ.Prof. Mag.Dr. Wolfgang Sulzer, Karl Franzens Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung, Heinrichstrasse 36, A-8010 Graz/Austria, wolfgang.sulzer@uni-graz.at)

(Mag.Dr. Katharina Kern, Karl Franzens Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung, Heinrichstrasse 36, A-8010 Graz/Austria, katharina.kern@uni-graz.at)

(Mag.Dr. Christian Bauer, Karl Franzens Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung, Heinrichstrasse 36, A-8010 Graz/Austria, christian.bauer@uni-graz.at)

(A.o.Univ.Prof.Dr. Reinhold Lazar, Karl Franzens Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung, Heinrichstrasse 36, A-8010 Graz/Austria, reinhold.lazar@uni-graz.at)

(Mag. Martin Mudri, Mudri Messtechnik, Schanzelgasse 20, A-8010 Graz/Austria, office@zt-mudri.at)

(Winfried Ganster, Stadtvermessungsamt Graz, Europaplatz 20, 8010 Graz/Austria, winfried.ganster@stadt.graz.at)

1 ABSTRACT

Der Beitrag dokumentiert die Ergebnisse eines Forschungsprojektes, das zum Ziel hat, die komplexen Zusammenhänge von Sensor, Atmosphäre, Dachbedeckung, Dachkonstruktion und Nutzung am Fallbeispiel der Gebäude des Campus der Karl-Franzens-Universität näher zu untersuchen. Die Vielzahl an unterschiedlichen Dacheindeckungen, die heterogene Altersstruktur der Bausubstanz sowie die Erfassung der Nutzung des Dachraumes geben einen differenzierten Blick auf den Aussagewert der Thermaldaten und dienen somit als ideale Testbasis zur Methodenentwicklung bzw. -verbesserung. Über eine kritische Betrachtung der Datenakquisition und des Zusammenhangs von Emissivität und Oberflächentemperatur sowie über die Erfassung der unterschiedlichen Dachbedeckungen bzw. -konstruktionen und der darunter liegenden Nutzungen kann schließlich eine qualitative Erfassung der Wärmeabgabe und der baulichen Defizitgebiete an den Dächern erfolgen.

2 RELEVANZ DER THEMATIK

Die zunehmende Breitenwirkung des Klimawandeldiskurses (v. a. im Fokus der Reduktion von CO₂ Emissionen) der letzten Jahre bewirkte eine deutliche ökologische Bewusstseinssteigerung in der Bevölkerung. Durch eine Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden ließe sich der Gesamtenergiebedarf der Europäischen Union um 5 bis 6% und die CO₂-Emissionen um circa 5% verringern. Hier spielen vor allem thermisch-energetische Sanierungsmaßnahmen eine bedeutende Rolle (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2015). Sowohl bei Neubauten als auch bei der Sanierung von Gebäuden wird das Thema Energieeffizienz immer bedeutender (NICOL und HUMPHREYS 2002, KROMP-KOLB und JAROS 2009, BERGER und PUNDY 2009). Bei nicht gedämmten Gebäuden wird, je nach Bauart und Baualter, von einem Wärmeverlust von durchschnittlich 10–15 % (LILLESAND et al. 2008), 15–20% (FEDDECK 2003) bzw. von bis zu 30% (HEMACHANDRAN 2013) der gesamten Raumwärme über das Dach ausgegangen. Aufgrund des nach wie vor hohen Bestandes an Gebäuden mit thermisch-energetisch deutlich verbesserbarem Zustand besteht in Österreich jedoch noch immer erhebliches Reduktionspotenzial, denn derzeit liegt die jährliche Rate umfassender thermisch-energetischer Gebäudesanierungen mit 1% deutlich unter den in der Klimastrategie 2007 angestrebten 3% (UMWELTBUNDESAMT 2014).

Als Mittel zur Visualisierung von Wärmebrücken an Gebäudehüllen kommen häufig Wärmebildkameras zum Einsatz. Diese Technik ist mittlerweile gut ausgebreitet und wird von der Bevölkerung gut angenommen. Der Wärmestrom nach oben, und somit der Energieverlust über das Dach, ist im Bewusstsein der Bevölkerung aber bei weitem nicht so stark verankert. Ein Grund dafür liegt in Tatsache, dass dieser bisher schwierig zu erfassen bzw. zu visualisieren war. Durch den Einsatz von neuartigen, hochauflösenden flugzeuggetragenen Thermalsensoren ist es nun aber möglich den potenziellen Wärmeverlust über Dachflächen zu detektieren. Die Analyseergebnisse der Befliegungsdaten können in einem weiteren Schritt als Zusatzinformation in die Maßnahmen zur Dachsanierung integriert werden und liefern dadurch einen wertvollen Beitrag zur Minimierung des Energieverbrauches und von CO₂-Emission. Die Untersuchung des Wärmeverlustes von Gebäuden insgesamt kann nur mit sehr großem Messaufwand gemessen werden (PARKER et al. 2000, SANTAMOURIS et al. 2001, HARTZ et al. 2006). Die flugzeuggetragene Thermografie wird seit den 1970er-Jahren für die flächendeckende Erfassung von Wärmeverlusten über Dachflächen in Städten und Gemeinden eingesetzt. Durchgeführt werden die Kampagnen zu einem überwiegenden Teil im Rahmen von Bewusstseinsbildungs- und Energiesparprogrammen. Die Ergebnisse

der ersten noch rein qualitativ ausgerichteten Untersuchungen wurden bereits in den ausgehenden 1970er-Jahren methodisch kritisch hinterfragt. So zeigten erste wissenschaftliche Untersuchungen, dass die aus dem Flugzeug erfassten Thermaldaten durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren bestimmt werden. Daraufhin wurde versucht, neue Modelle zu entwickeln, mit deren Hilfe die Wärmeverluste auch quantitativ erfasst werden können. Viele der für die Berechnung der Oberflächentemperatur notwendigen Einflussparameter sind aber nur schwer zu berücksichtigen bzw. ist dazu eine Menge, nur aufwändig zu ermittelnder, zusätzlicher Daten notwendig, sodass hier meist nur vereinfachte Annahmen getroffen werden (KERN 2015).

Mit dem Rückgang der Energiepreise Mitte der 1980er-Jahre geht auch die Zahl der Anwendungen und Publikationen stark zurück. Erst mit dem Aufkommen des Klimawandeldiskurses und dem zunehmenden Bewusstsein über den Zusammenhang zwischen der Emission von Treibhausgasen und der globalen Erwärmung sowie einem neuerlichen Anstieg der Energiepreise wird die Energieeffizienz von Gebäuden in den 1990er-Jahren wieder zum Thema. Die gegenwärtigen Projekte (Tab. 1), die vorwiegend von Städten und Gemeinden (in einigen Fällen, wie z. B. in den Projekten der RWE Deutschland, auch heute noch in Kooperation mit lokalen Energieversorgern) in Auftrag gegeben werden, werden in erster Linie von kommerziellen Interessen geleitet. Die zu erzielenden Projektergebnisse sind dadurch klar vorgegeben und die Projektfinanzierung an die Zielerreichung gekoppelt. Eine intensive, kritische, wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Thematik erfolgt heute, im Gegensatz zur Beginnzeit der Anwendung, meist nur mehr randlich (KERN, 2015). Die Probleme, die die Anwendung mit sich bringt, sind aber trotz neuer technischer Möglichkeiten sowohl im Bereich der Sensoren als auch der Auswertetechniken vielfach immer noch dieselben. Thermalbefliegungen werden auch heute noch als eine im Vergleich zu terrestrischen Methoden günstige und schnelle Alternative zur flächenmäßigen Erfassung von Wärmeverlustinformationen eines großen Gebietes angeboten. Da mit Thermalprojekten nach wie vor ein hoher Grad an Aufmerksamkeit in der Bevölkerung erzielt werden kann, werden derartige Projekte auch gerne zu PR-Zwecken eingesetzt. Dass es sich bei den im Rahmen der Projekte zur Verfügung gestellten Thermaldaten in der Regel um qualitative Anwendungen handelt, deren Aussagekraft vielfach anzuzweifeln ist, wird meist nicht weiter kommentiert und die Ergebnisse werden einer breiten Öffentlichkeit größtenteils ungefiltert, z. B. über WebGIS-Portale zugänglich gemacht.

Projekt	Zeitraum	Sensor	Geometr. Auflösung	Zusätzliche Daten / Informationen	Methode	Kommunikationsmedium
Heat	Phase I (2008–2011)	TABI-320 (LW)	1,0 m	Dacheindeckungsmaterial über die Webseite durch Freiwillige	Quantitativ	Webseite (öffentlich) Öffentlichkeit
	Phase II (2011/2013)	TABI-1800(MW)	0,5 m			
EnergyCity	2010/2013	TS9260 (LW)	~0,5 m	Referenzmessungen (T, ε), Dacheindeckungsmaterial über Klassifikation	Quantitativ	Webseite (nicht öffentlich) lokale Entscheidungsträger
RWE Flugthermografie	seit 2012	Silver 660M (MW)	0,6 ¹ m	Fragebogen bzw. über Interpretationsschlüssel für die Bevölkerung	Qualitativ	Webseite (nicht öffentlich) Gebäudeeigentümer
TIR4U	2013/2014	TABI-1800 (MW)	0,6m (0,75 m) ²	Dacheindeckungsmaterial über Klassifikation, ε unterschiedlicher Materialien, T/LF im Dachraum	Qualitativ/ Quantitativ	Bericht, Posterausstellung, Auftraggeber, Stadtverwaltung

LW = Langwelliges Infrarot, MW = Mittelwelliges Infrarot; T = Temperatur, LF = Luftfeuchte, ε = Emissionsgrad

¹ Angabe gültig für Arnsberg (STADT ARNSBERG 2015) und Sonsbeck (GEMEINDE SONSBECK 2015).

² Die Daten wurden mit 0,75 m aufgenommen und auf 0,6 m entzerrt (MOSKOPP und LEGAT 2013).

Tab. 1: Übersicht über ausgewählte aktuelle Thermalprojekte (KERN 2015).

3 FALLSTUDIE: TIR4U - THERMAL INFRARED DETECTION OF ROOF HEAT LOSS FOR UNIVERSITY OF GRAZ

Auf Initiative der Stadt Graz ist das Institut für Geographie und Raumforschung der Karl-Franzens-Universität Graz seit 1986 in regelmäßigen Abständen (1996, 2004 und 2011) mit der Datenauswertung von flächendeckenden Thermalbefliegungen beauftragt worden. Die daraus gewonnen Expertise dient als wesentliche Grundlage für die Analyse des Stadtklimas in den Jahren 1986 bis 1992, 2004 bis 2006 und 2011/12 (LAZAR et al. 1993 und 1994, LAZAR und PODESSER 1999, LAZAR und SULZER 2013 und 2014). Die Schwerpunkte liegen dabei in der Verteilung städtischer Wärmeinsel („urban heat island“) und der Analyse der Frisch- und Kaltluftproduktion aus den Seitentälern (SULZER et al. 2009). Daraus abgeleitete Klimatopkarten und Planungskarten stellen in Graz seit 1986 wichtige Entscheidungsgrundlagen in der städtischen Raumplanung bzw. Stadtentwicklung dar. Die Änderung stadtklimatischer Elemente ist vor allem im Fokus der lokalen Modifikationen durch die Verbauungstätigkeit und der globalen bzw. daraus resultierenden regionalen Klimaänderungen von hohem Interesse. Der hohe Stellenwert von Fernerkundungsmethoden in der Stadtklimaforschung (u. a. VOOGT und OKE 2003, QUATTROCHI and LUVALL 2004, XU et al. 2008) und die Erfahrungen des Instituts für Geographie und Raumforschung soll in dieser Studie um den Einsatz von Thermaldaten in der thermischen Sanierung erweitert werden. Die erstmalig im Winter (20. Dezember 2011) durchgeführte Thermalbefliegung der Stadt Graz ermöglicht auch Aussagen über die besonderen klimatischen Verhältnisse in der Heizperiode. Bei der stadt- und geländeklimatologischen Analyse zeigte sich, dass durch die hohe Auflösung detaillierte Analysen der thermalen Strukturen der Stadt Graz und somit auch Aussagen über den Wärmehaushalt von Hausdächern durchführen lassen. Die spezielle klimatische Situation (kein Schnee, Windarmut, niedrige Lufttemperaturen) während der Befliegung im Dezember eignet sich sehr gut für die Erfassung der Wärmeabgabe der städtischen Strukturen an die Atmosphäre. Somit kann die Wärmeabgabe künstlicher Oberflächen analysiert und visualisiert werden.

3.1 Projektziele

Hauptziel des Projektes ist es anhand eines Fallbeispiels (die öffentlichen Gebäude der Karl-Franzens-Universität Graz) Methoden zur Analyse und Visualisierung thermaler Infrarot-Fernerkundungsdaten zu entwickeln und ein Bewusstsein für eine eventuell notwendige thermische Sanierung von Dächern anderen öffentlichen Gebäuden (z. B. des Magistrats, des Amtes für die Steiermärkische Landesregierung) und schließlich auch von Firmengebäuden und privaten Häusern zu wecken. Die öffentliche Verwaltung (entsprechende Abteilungen des Magistrats Graz, Landesregierung Steiermark) ist von Beginn an in die Projektentwicklung eingebunden und tritt somit zugleich auch als Bauträger und finanzieller Förderer von Gebäudesanierungen auf. Die Analysemethodik und Visualisierung der Thermaldaten, die beispielhaft an der Universität Graz durchgeführt wird, soll die Grundlage für eine flächendeckende Umsetzung in Graz sein.

Ein weiteres Ziel des Projektes ist eine differenzierte Methodenentwicklung für die Datenanalyse der Thermalaufnahmen unter Einbindung der klimatischen und baulichen Rahmenbedingungen im Bereich des Universitätsstandortes. Der Campus der Karl-Franzens-Universität besteht aus vielen unterschiedlichen Bauepochen. Neben der alten gründerzeitlichen Kernsubstanz (engerer Campus mit dem Hauptgebäude) gibt es auch barocke Bauten (z. B. Meerscheinschloss), Gebäude aus den 1960er Jahren (z. B. Erdwissenschaften), aus den 1990er Jahren (Mathematik-/Geographie-/Anglistikgebäude) und Gebäude aus dem beginnenden 21. Jahrhundert (Zentrum für Molekulare Biologie). Somit wird mit diesem Projekt ein breites Spektrum an verschiedenen Dachkonstruktionen (Bedeckung und Nutzung) erfasst. Durch die vergleichende Darstellung verschiedener Dachtypen werden Informationen in qualitativer und auch quantitativer Form ermittelt, die zur Berechnung des tatsächlichen Energieverlustes einbezogen werden können um eine ökologisch nachhaltige und ökonomisch effiziente Sanierung von Dachflächen zu unterstützen.

3.2 Datenakquisition

Die Informationsbasis für die Erfassung von potentiellen Wärmeverlusten über Dachflächen stellen thermale Infrarot-Fernerkundungsdaten dar, die im Zuge einer Befliegung am 20. Dezember 2011 (ca. 20.00 bis 21.30 Uhr) erhoben wurden. Dabei kam der Thermalsensor TABI-1800 (Thermal Airborne Broadband Imager) von ITRES Research Limited (2012), der im einem Wellenlängenbereich von 3,7 bis 4,8 μm Daten aufnimmt, zum Einsatz. Dieser lieferte bei einer Flughöhe von ca. 1850 m über Grund Daten mit einer geometrischen

Auflösung von 75 cm und einer thermalen Auflösung von $0,05^{\circ}$ K. Eine erste Prozessierung der Rohdaten erfolgte bei der Sensorherstellerfirma ITRES in Calgary (Kanada). Die nachfolgende Orthorektifizierung wurde von der Vermessung AVT ZT GmbH durchgeführt. Dabei wurde eine geometrische Auflösung von 60cm festgelegt. Zur Abdeckung des TIR4U Untersuchungsgebietes wurde lediglich einer der insgesamt zwanzig Flugstreifen benötigt. Dadurch konnten für das gesamte Untersuchungsgebiet einheitliche Aufnahmebedingungen während der Datenakquise sichergestellt werden und es mussten keine radiometrischen Anpassungen der Befliegungsstreifen durchgeführt werden.

Um die kleinräumigen Strukturen von Baublöcken und Gebäuden mit unterschiedlichen Dacheindeckungsmaterialien für die geplante nachfolgende Korrektur der Emissionsgrade erfassen zu können, sind Fernerkundungsdaten mit einer entsprechend hohen geometrischen Auflösung erforderlich. Zur Erfassung der Dacheindeckungsmaterialien wurden multispektrale Bilddaten in Form von UltraCam Daten verwendet (Fig. 1).

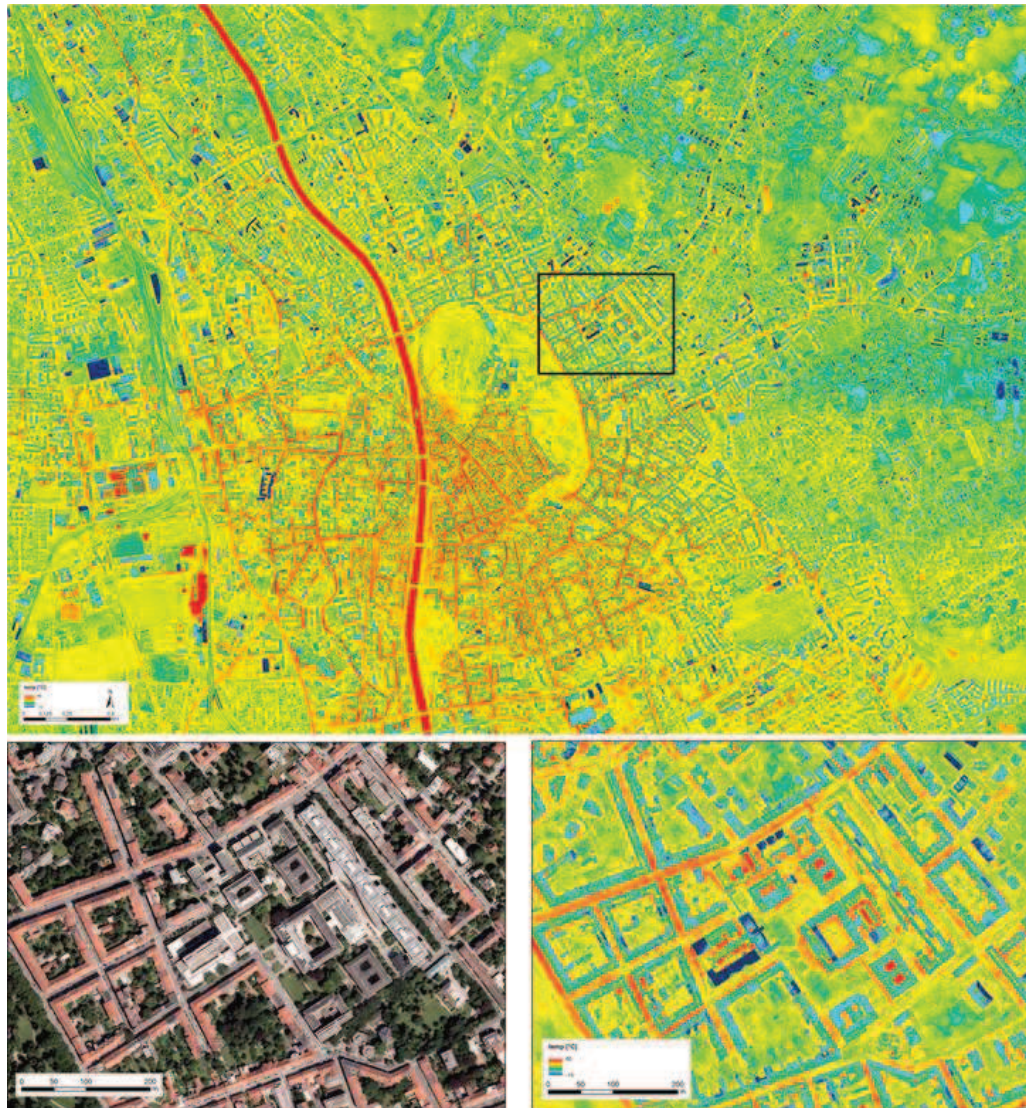


Fig. 1: Untersuchungsgebiet. Links unten: Detailausschnitt Campus Universität Graz UltraCam (Stadt Graz 2012); Rechts unten: Detailausschnitt Campus Universität Graz TABI-1800 (Stadt Graz, 2011)

3.3 Erstellung eines Dachflächenkatasters

Da reale Körper keine perfekten Emittler sind, ist die Temperatur der Dachfläche die von Sensor aufgenommen wird, stets kleiner als die wahre Temperatur der Fläche. Um für quantitative Untersuchungen die annähernd wahre Temperatur einer Dachfläche berechnen zu können, muss daher auch ihr Emissionsgrad bekannt sein. Da sich die Baustruktur und somit auch die Dachlandschaft im Untersuchungsgebiet als sehr heterogen darstellt, greifen herkömmliche Ansätze aus der Literatur, die meist den Gesamtdatensatz mit nur einem Korrekturwert anpassen, hier zu kurz. Da die Information über die Dacheindeckung in amtlicher Form

nicht verfügbar ist, müssen alle Gebäude im Untersuchungsgebiet räumlich erfasst und nach Dacheindeckungsmaterialien klassifiziert werden. Zusätzlich wurden die Emissionsgrade ausgewählter Dacheindeckungsmaterialien in-situ erhoben.

Zur Abgrenzung der Gebäude in thermalen Infrarotdaten werden bei kleineren Untersuchungsgebieten oft eigens erstellte Vektordaten in Form von Gebäude-Shapefiles verwendet. In größeren Gebieten kommt häufig die Gebäudeinformation des amtlichen Katasters zum Einsatz (u. a. ALLINSON 2007, HEMACHANDRAN 2013). Bei der Verwendung der Gebäudegrenzen aus dem Kataster tritt das Problem auf, dass die beiden Datensätze, Gebäude-Shapefile und thermale Infrarotdaten, auch bei präziser Ko-Registrierung nicht immer deckungsgleich übereinander passen bzw. Gebäude(-teile) noch nicht oder noch immer eingetragen sind und es dadurch bei der Verschneidung der beiden Datensätze in den Thermaldaten im Randbereich der Gebäude zu Informationsverlusten kommt. Daher wurde im Zuge des Projektes ein objektbasierter Ansatz zur automatischen Erfassung der Gebäudeaußengrenzen entwickelt. Mit Hilfe der Software eCognition konnte durch den kombinierten Einsatz eines Digitalen Oberflächenmodells mit Multispektraldaten, in Form der Verfügung stehenden UltraCam Daten, alle Gebäude im Untersuchungsgebiet erfasst werden.

Die wichtigste Datenbasis zur Ermittlung der Gebäudegrenzen liefert das Digitale Oberflächenmodell. Damit wurden die Gebäude und andere erhobene Objekte in einem ersten Schritt über Höhendifferenzen und Neigungsinformationen grob abgeleitet. Zur exakten Abgrenzung der Gebäude und zur Differenzierung zwischen Gebäuden und anderen erhobenen Objekten, wie etwa Bäumen, wurde die spektrale Information aus den UltraCam Daten hinzugezogen. Die vegetationsbedeckten Flächen wurden im Zuge eines iterativen Prozesses über den Vegetationsindex NDVI von den Gebäudeflächen unterschieden. Die wichtigsten Schritte des Vorgangs der Gebäudeabgrenzung sind in Fig. 2 beispielhaft dargestellt.

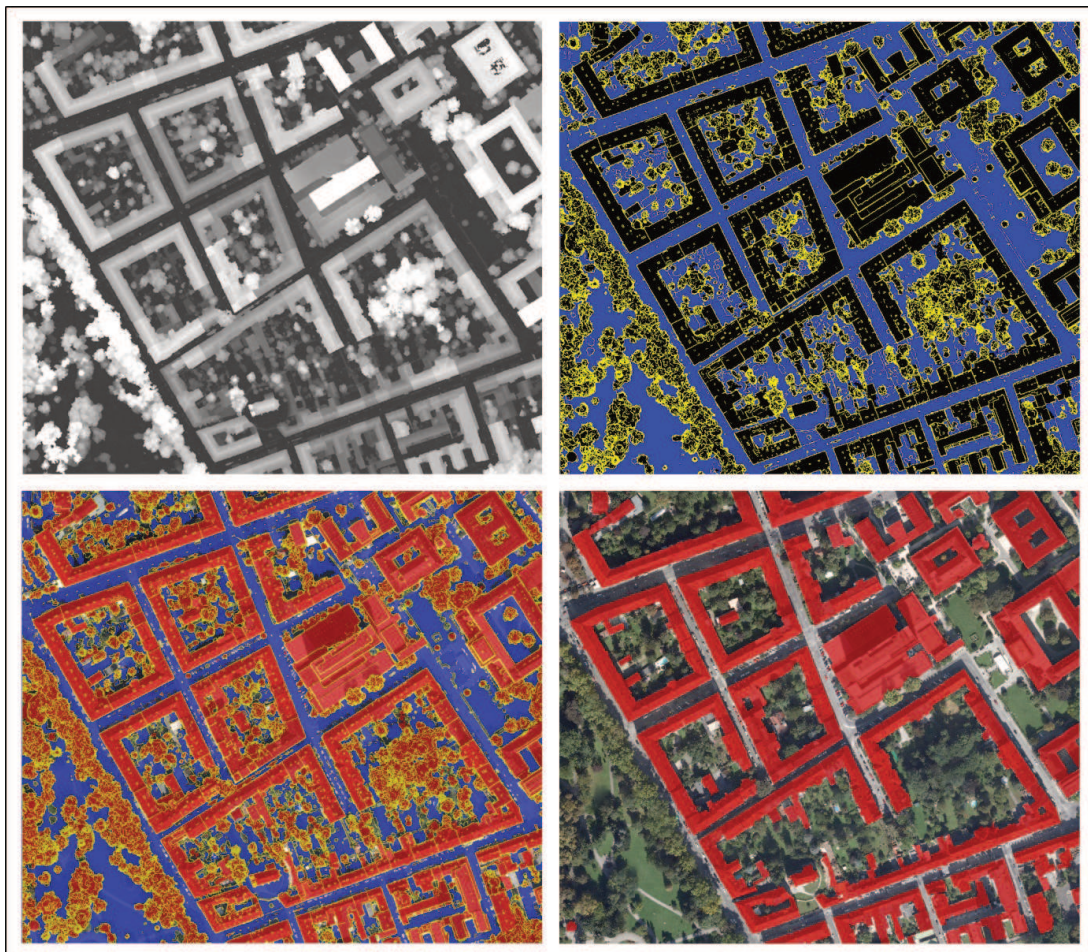


Fig. 2: Überblick über den Ablauf der Ableitung der Gebäudegrenzen. DOM (links-oben), Klassifikation der Geländegrundfläche (rechts-oben), Erfassung der erhobenen Objekte im DOM (links-unten) und die Gebäudegrundflächen nach der Trennung von den Vegetationsflächen (rechts-unten).

Für die nachfolgende Klassifikation der Dacheindeckungsmaterialien wurde ebenfalls ein objektbasierter Auswertevorgang gewählt. Aufgrund der bereits vorliegenden Ergebnisse aus der Gebäudeerfassung konnten für die Erfassung der Dacheindeckungsmaterialien alle Nicht-Gebäudeflächen vorab automatisch ausgeschlossen werden und die nachfolgende Klassifikation wurde nur mehr innerhalb der Gebäudeflächen durchgeführt. Um auch die unterschiedlichen Dacheindeckungsmaterialien innerhalb eines Gebäudes oder Baublockes ableiten zu können, wurden die Gebäudeflächen auf Basis der spektralen Information aus den UltraCam-Daten mit Hilfe eines Segmentierungsalgorithmuses in kleine Einheiten unterteilt. Dafür wurde eine „minimum mapping unit“ (MMU) von 9m² mit einer Objektmindestbreite von 2m (8 Pixel in den UltraCam-Daten) bestimmt. Diese Mindestgröße war auf Grund der geometrischen Auflösung der Thermaldaten von 0,6m und den in den Thermaldaten vorhandenen Mischpixeln notwendig. Dacheinspengelungen und anderen kleineren Dacheindeckungseinheiten wie Dachflächenfenstern konnten dadurch nicht als eigenständige Bildobjekte erfasst und klassifiziert werden. Die im Zuge des Segmentierungsvorganges entstandenen Einheiten wurden nun im Rahmen des Klassifikationsvorganges den Dacheindeckungsmaterialklassen: Ziegel, Faserzement / Schiefer, Metall, Beton, Schotter, Beton / Schotter, Glas und Sonstiges zugewiesen. Da bei Baublöcken mit einheitlicher Dachbedeckung aneinandergrenzende Gebäude nicht automatisch als Einzelgebäude erfasst werden konnten, wurden diese nachfolgend manuell voneinander getrennt. Auf Grund der geringen spektralen Unterschiede von Faserzement und Schiefer in den UltraCam-Daten konnten diese beiden Klassen nicht automatisch getrennt voneinander klassifiziert werden. Die am Universitätscampus vorhandenen Schieferdächer mussten daher in-situ erhoben und manuell eingezeichnet werden. Sonderflächen wurden auf Basis einer visuellen Klassifikation ebenfalls manuell eingezeichnet. Fig. 3 zeigt die Ergebnisse der Dacheindeckungsklassifikation.



Fig. 3: Ergebnis der Dacheindeckungsklassifikation.

Studien, wie beispielsweise jene von HEIDEN und HELDENS (2010), zeigen, dass mit dem Einsatz von hyperspektralen Fernerkundungsdaten einen höherer Differenzierungsgrad bei der automatischen Klassifikation der Dacheindeckungsmaterialien erzielt werden kann.

3.4 In-situ-Erhebung der Emissionsgrade und Umrechnung der Emisivität auf reale Oberflächentemperaturen

Neben der Art des Dacheindeckungsmaterials muss auch der jeweilige materialspezifische Emissionsgrad bekannt sein. Der Emissionsgrad gibt an, wie viel Strahlung ein realer Körper im Vergleich zu einem idealen schwarzen Körper abgibt. Der Wert kann zwischen 0 und 1 liegen. Die Fähigkeit eines Körpers Strahlung abzugeben und somit der Emissionsgrad, ist abhängig von der materiellen Zusammensetzung des Körpers, seiner Oberflächenstruktur, der Wellenlänge sowie seiner Temperatur (Fig. 4, FOUAD und RICHTER 2012). Das bedeutet, dass die Temperatur, die ein Körper abgibt und die von einem Sensor aufgenommen wird, immer kleiner ist als die wahre Temperatur des Körpers. Um für quantitative Untersuchungen die annähernd wahre Temperatur eines Körpers berechnen zu können, muss daher auch sein Emissionsgrad bekannt sein.

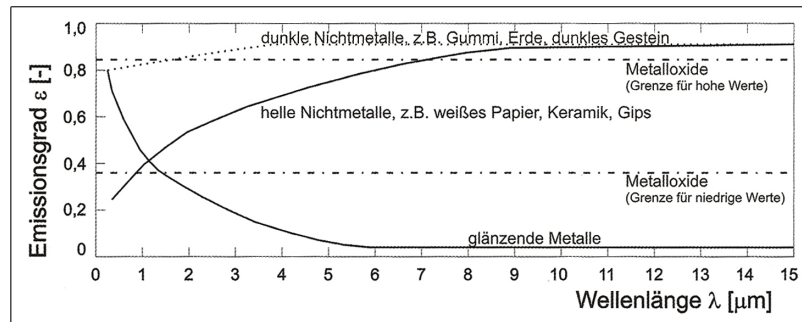


Fig. 4: Emissionsgrade verschiedener Materialien bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Wellenlänge (FOUAD und RICHTER, 2012).

Zur Abschätzung der Emissionsgrade werden üblicherweise Werte aus gängigen Tabellenwerten verwendet. Doch hier tritt häufig das Problem auf, dass meist nur Werte für den Wellenlängenbereich von 8 bis 14 μm verfügbar sind, die angegebenen Werte eine sehr große Streuung aufweisen und diese in der Regel unter Laborbedingungen erhoben wurden. Doch schon kleine Abweichungen von angenommen zum tatsächlichen Emissionsgrad einer Oberfläche können zu deutlichen Fehlern bei der berechneten Temperatur führen.

Da für den Wellenlängenbereich von 3 bis 5 μm keine allgemein verfügbaren Tabellenwerte zur Verfügung stehen und auf Grund der großen Unsicherheiten bei der Verwendung von Emissionsgradangaben aus Tabellenwerken und der signifikanten Fehler, die daraus bei der Berechnung der Oberflächentemperaturen entstehen können, empfiehlt es sich die Emissionsgrade für die im Untersuchungsgebiet vorhandenen Materialien im Labor oder in-situ zu erheben. Da in der Gebäudethermographie heute keine Mittelwellenkameras (mehr) verwendet werden, mussten für die Untersuchungen auf ein Langwellengerät zurückgegriffen werden. Die Problematik der gängigen Verwendung von Tabellenwerken kann aber auch damit gut aufgezeigt werden.

Im Zuge des Projektes wurden die Emissionsgrade unterschiedlicher Dacheindeckungsmaterialien (Betonplatten, Glas, Faserzementschindel, Metall, Schiefer, Schotter und Tonziegel) an fünf Gebäuden des Campus der Universität Graz in-situ erhoben. Zu Erhebung wurde eine Infrarotkamera der Typs FLIR T 640, die in einem Spektralbereich von 7,5 bis 14 μm aufnimmt, verwendet. Eine Infrarotkamera, die im selben Spektralbereich wie der für die Befliegung verwendete TABI-1800, nämlich 3,7 bis 4,8 μm , aufnimmt stand für die Untersuchungen nicht zur Verfügung. Die Aufnahmen erfolgten ca. 1 bis 3 Stunden nach Sonnenuntergang bei einer Lufttemperatur von ca. 3° C und einer relative Luftfeuchte von 60%.

Zur Erhebung der Emissionsgrade wurden jeweils drei Referenzemitter, in Form von Klebepunkten, deren Emissionsgrad bereits bekannt war, auf die zu untersuchende Fläche aufgebracht. Die Ermittlung der Strahlungstemperatur des Hintergrundes erfolgte mit Hilfe eines Reflektors aus Aluminiumfolie. Darüber hinaus wurde bei jeder Messung mit einem Temperaturfühler auch die Umgebungstemperatur erhoben. Messsetting, Thermogramm sowie die Ergebnisse der Emissionsgraderhebung für das Hauptgebäude der Universität Graz sind in Fig. 5 dargestellt.

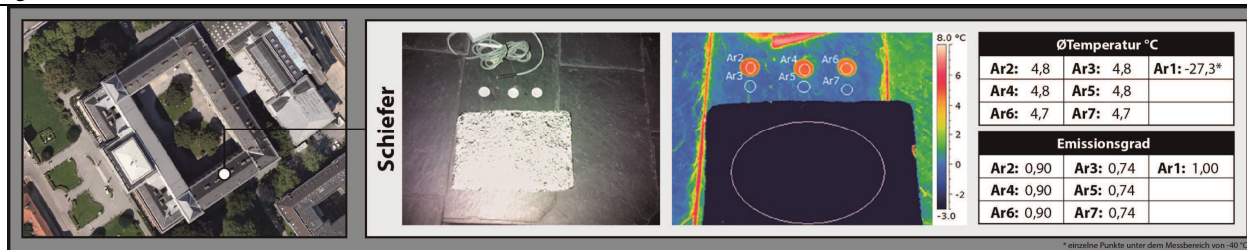


Fig. 5: Erhebung der Emissionsgrade am Dach des Hauptgebäudes der Universität Graz. Dachfläche im Luftbild (links), Messsetting, Thermogramm sowie Temperaturwerte und ermittelte Emissionsgrade (rechts; MUDRI, 2014).

Tab. 2 zeigt die Ergebnisse der in-situ-Erhebung für alle untersuchten Dacheindeckungsmaterialien. Mit Ausnahme der Werte für Tonziegel, wurden im Zuge der in-situ Erhebung für die jeweiligen Messpunkte der Materialien einheitliche Emissionsgrade ermittelt. Der Emissionsgrad bei Tonziegeln variiert in Abhängigkeit des Verwitterungszustandes zwischen $\epsilon = 0,88$ und $\epsilon = 0,95$. Hier ist ein deutlicher Anstieg des Emissionsgrad mit zunehmender Verwitterung des Material zu erkennen ist. Neben den in-situ ermittelten Emissionsgraden sind in Tabelle 1 auch Vergleichswerte aus gängigen Tabellenwerten aus der Literatur angeführt. Die erhobenen Werte liegen, außer bei Schiefer, alle innerhalb der angegeben Schwankungsbreiten. Die großen Schwankungsbreiten der Literaturwerte zeigen aber auch deutlich die Problematik der Verwendung von Werten aus der Literatur auf.

Material	ϵ in-situ	ϵ Tabellen	Material	ϵ	ϵ Tabellen
Betonplatten	0,94	0,88-0,951	Schiefer	0,74	0,972
Metallumfassung	0,86	0,02-0,972	Faserzement I	0,93	0,88-0,951
Schotter	0,93	-	Faserzement II	0,93	0,88-0,951
Glas	0,83	0,76-0,942	Tonziegel	0,88 - 0,95	0,91-0,932

¹Beton/Zementbeton (PARKER et al. 2000, 2 OMEGA 2014)

Tab. 2: Vergleich der in-situ erhobenen Emissionsgrade mit Tabellenwerten aus der Literatur.

Die Emissionsgrade der Materialien im Untersuchungsgebiet können im Zuge einer in-situ Erhebung sehr genau erhoben werden, doch auf Grund der Heterogenität der Dachlandschaft am und um den Campus ist es mit verträglichem Zeit- und Kostenaufwand kaum möglich die Emissionsgrade für alle vorkommenden Materialien inkl. ihrer Verwitterungszustände (z.B.: Ziegel) zu erheben. Daher muss eine vereinfachte Herangehensweise getroffen werden, die aber große Unsicherheiten bei der Ermittlung der realen Oberflächentemperatur mit sich bringt. Schon kleine Abweichungen des Emissionsgrades können in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur zu großen Fehlern bei der berechneten Temperatur führen. Diese Unsicherheit ist in Fig. 6 grafisch dargestellt. So erscheint beispielsweise eine Oberfläche mit einem Emissionsgrad von 0,7 (wie Schiefer) die real eine Temperatur von -3°C aufweist bei einer Hintergrundtemperatur von -30°C in der thermalen Infrarotaufnahme mit $6,3^{\circ}\text{C}$. Die Hintergrundtemperatur wurde während der Befliegung aber nicht erfasst und die Emissionsgrade der Oberflächen für den Wellenlängenbereich von 3 bis $5\ \mu\text{m}$ sind nicht verfügbar.

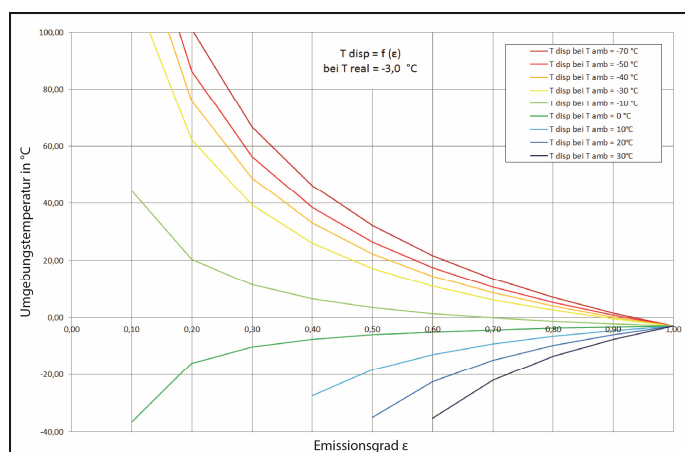


Fig. 6: Angezeigte Temperatur (T disp) in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur (T amb) bei unterschiedlichen Emissionsgraden ϵ (MUDRI, 2014b).

Hinzu kommen noch die Unsicherheiten bzw. die Einschränkungen durch die räumliche Auflösung sowohl der thermalen Infrarotdaten als auch der UltraCam Daten bei der automatischen Erfassung der Dacheindeckungsmaterialien. Eine quantitative Auswertung ist daher nur für homogene Untersuchungsgebiete zu empfehlen. Aus diesen Gründen wurde im Rahmen des Projektes von einer Umrechnung der scheinbaren Temperaturen in berechnete Oberflächentemperaturen Abstand genommen.

3.5 Ausarbeitung eines Parameterkataloges

Ein großes Ziel des Forschungsprojektes war es, Einschränkungen dieser Fernerkundungsmethode im Kontext der vorhandenen Daten aber auch im Vergleich mit bisherigen Studien aufzuzeigen und gegebenenfalls Lösungsansätze bereitzustellen. Einige der Einschränkungen lassen sich in einer, speziell für diesen Verwendungszweck der Thermaldaten abgestimmten, Datenakquise aufheben. Teilweise sind Einschränkungen sehr stark abhängig an begleitenden in-situ Messkampagnen, sodass eine quantifizierbare Auswertung der Thermaldaten nur mit höherem Personalaufwand, und damit einhergehend Kostenaufwand möglich ist. Hier gilt es präzise den weiteren Verwendungszweck (quantifizierbare / qualifizierbare Aussagen) mit dem zu betreibenden Aufwand abzustimmen.

3.5.1 Befliegungszeitpunkt

Die Angaben in der Literatur weisen für thermale Infrarotaufnahmen bezüglich des frühesten möglichen Aufnahmezeitpunktes nach Sonnenuntergang Schwankungen von 4 bis 12 Stunden auf (u. a. ÖNORM 1999, ALLINSON 2007; MEIER et al. 2010, LAGOUARDE et al. 2012). Bei den Aufnahmen der Stadt Graz konnte aber nur eine maximale Auskühlungszeit von 3-5 Stunden erreicht werden. Bedingt durch den frühen Befliegungszeitpunkt sind thermische Einflüsse durch Sonneneinstrahlung in den Daten nicht ganz auszuschließen (Fig. 7). Die Ergebnisse der Modellierung der Sonneneinstrahlung auf Basis eines digitalen Oberflächenmodelles der Stadt zeigen, dass in den Daten für alle süd- bis westlich exponierten Dachflächen zum Befliegungszeitpunkt noch Effekte der im Laufe der 6 Stunden eingegangenen Sonneneinstrahlung zu erwarten sind.

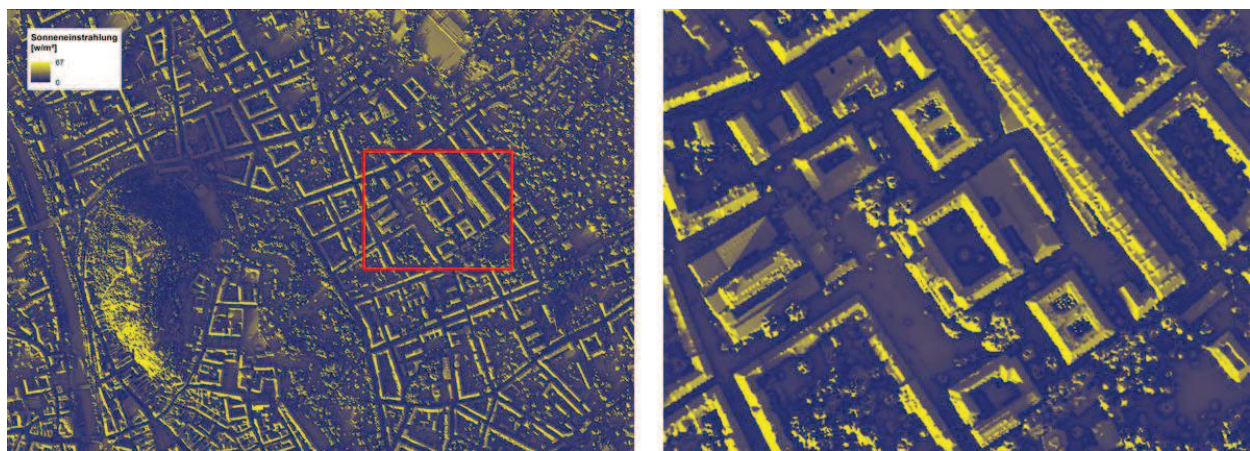


Fig. 7: Summe der direkten und diffusen Sonneneinstrahlung in W/m² im Stadtgebiet berechnet sechs Stunden vor dem Zeitpunkt der Aufnahme. Teile des Bezirks Innere Stadt mit Schlossberg, sowie Geidorf und St. Leonhard (links), Detailansicht Campus Uni Graz (rechts).

3.5.2 Wellenlängenbereich des Sensors

Der verwendete Sensor TABI -1800 operiert in einem Wellenlängenbereich von 3,7 – 4,8 μm , also im mittleren Infrarot. Dieser Wellenlängenbereich eignet sich besonders gut zur Detektion von sehr hohen Temperaturen. Für Fragestellungen rund um das Thema Wärmeverlust von Gebäuden wären aber Sensoren, die im Wellenlängenbereich von 8 bis 13 μm , dem langwelligen Infrarot, aufnehmen, besser geeignet. Zudem sind heute Thermalkameras, die im mittleren Infrarot aufnehmen und für Referenzmessungen am Boden benötigt werden, nur mehr schwer verfügbar.

3.5.3 Geometrische Auflösung

Die im Projekt verwendeten Thermaldaten verfügen über eine geometrische Auflösung von 60 cm. Auf Grund der großen Heterogenität der Dachlandschaften im Untersuchungsgebiet ist eine detailgenaue Erfassung von kleineren Einheiten wie metallische Einfassungen, Dachrinnen, Schneefänger, kleinere

Dachflächenfenster oder Lüftungen nicht möglich. Häufig bestehen diese kleineren Einheiten aus Metallen, also Materialien mit einem sehr niedrigen Emissionsgrad. Diese führt zu einem hohen Anteil an Mischpixeln und somit Mischtemperaturen in der Thermalaufnahme, die dadurch in diesen Bereichen nur mehr schwer bzw. nur mit großen Einschränkungen interpretierbar ist.

3.5.4 Partizipative Beteiligung der Bürger

Das Projekt TIR4U hat wichtige Erkenntnisse für die methodische Umsetzung einer Thermalbefliegung zum Zwecke der Dachanalysen gebracht. Neben der forschungsorientierten Betreuung der Flugkampagne hinsichtlich der klimatischen Rahmenbedingungen (Wetter / Aufnahmezeitpunkt / Jahreszeit / zusätzliche Messkampagnen im Gelände) hat sich die Notwendigkeit einer Einbindung der Bevölkerung herausgestellt. Hier wurde mit dem Magistrat Graz schon eine entsprechende Vorgehensweise eingeleitet. Die Bevölkerung soll als wichtige Grundlage für die Analyse der Daten, unter anderem Informationen über die Gestaltung, Eindeckung, Dämmung und Nutzung liefern. Dafür bekommt der Hausbesitzer / die Hausbesitzerin Informationen über das thermische Verhalten der Dächer. Dieser Informationsaustausch erfolgt über ein WEBGIS gestütztes Online Formular.

3.6 Dachflächenemissivitätsanalyse anhand von Beispielgebäuden

Als Testgebiet wurde das 1895 errichtete Hauptgebäude der Karl-Franzens Universität mit der angrenzenden Universitätsbibliothek gewählt. Der angrenzende Gebäudeteil der Universitätsbibliothek ist von einer sehr komplexen Dachlandschaft gekennzeichnet.

Um einen Überblick betreffend der wärmsten Bereiche (potenzielle Leckagen) zu bekommen, wurde eine Hot Spot Analyse durchgeführt. Die Detektion der Hot Spots funktioniert in zwei Schritten. In einem ersten Schritt erfolgt die Ausweisung von Rasterzellen als potenzielle Hot Spots. Also solche werden Rasterzellen bezeichnet deren Wert höher ist als jener der acht Nachbarzellen. In einem zweiten Schritt erfolgt mittels einer Nachbarschaftsanalyse eine detaillierte Untersuchung der zuvor erfassten potenziellen Hot Spots. Der verwendete Algorithmus greift dabei jede Zelle im Raster auf und berechnet ein definiertes statistisches Kriterium mit einer identifizierten Nachbarschaft.

Als statistisches Kriterium wurde die Überschreitung einer Temperaturspanne (range) gesetzt. Die Nachbarschaftsanalyse funktioniert überlappend, daher werden Zellen mehrmals in die Kalkulation einbezogen. Erfüllt eine Rasterzelle beide Kriterien, erfolgt die Zuweisung als Hot Spot. Diese Berechnung wird für alle im Zuge der Dacheindeckungsklassifikation ermittelnden Flächen durchgeführt. Dadurch ist der Algorithmus auch für Thermaldaten anwendbar, die nicht hinsichtlich der Emissivität korrigiert worden sind. Das limitierende Kriterium stellt die Segmentierung der Dacheindeckung dar.

Die Kalibrierung des Algorithmus erfolgte für zwei Gebäudetypen. Erstens für den Typus „Einzelgebäude“, mit einer relativ homogenen Dachlandschaft und einer geringen Anzahl an Kaminen und Entlüftungen. Zweitens für den Typus „komplexe Gebäude“, mit sehr heterogener Dachlandschaft, einer hohen Anzahl an Kaminen und Entlüftungen bzw. komplexe Installationen (Klimaanlagen). Beispielhaft für die erzielten Ergebnisse ist in Fig. 8 das Hauptgebäude sowie die Universitätsbibliothek dargestellt.

Die bisherigen Anwendungen von Fernerkundungstechniken im Kontext der thermischen Sanierung integrieren thermische Einflussfaktoren des obersten Dachraumes nur ansatzweise. Ziel des Projektes war es, durch die Berücksichtigung der Verhältnisse des obersten Dachraumes, den Grund der thermalen Emissivität eines Gebäudes zu analysieren und damit einen Beitrag zur Methodenverbesserung dieser Fernerkundungsmethode zu liefern. Zu diesem Zweck wurden in 8 Gebäuden 19 Temperaturdatenlogger installiert (Fig. 9), die in einem 10-Minuten-Intervall Temperatur und Luftfeuchte aufzeichnen.

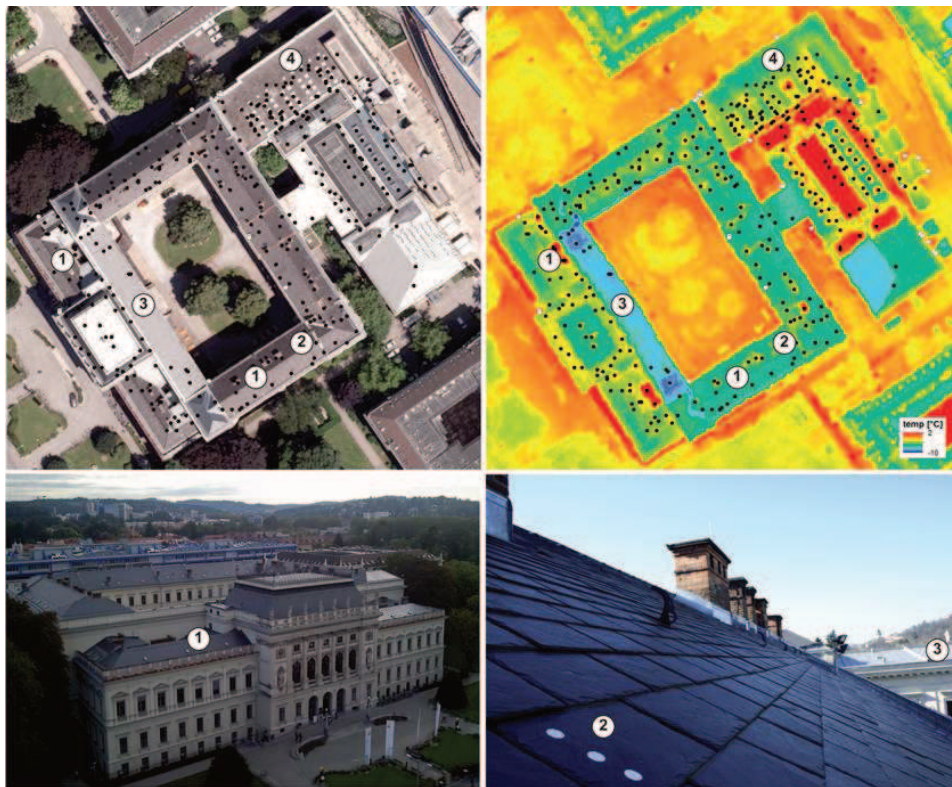


Fig. 8: Ergebnis der Hot-Spot-Detektion am Beispiel des Hauptgebäudes der Karl-Franzens-Universität Graz (Universitätsplatz 3) und angrenzender Universitätsbibliothek. (1) Position der Datenlogger; (2) Position der In-situ-Emissivitätsmessung für die Dacheindeckung Schiefer; (3) Metalldach; (4) Ventilationsinstallationen.



Fig. 9: Position der Datenlogger. (1) Elisabethstraße 27; (2) Holteiggasse 6; (3) Mozartgasse 3; (4) Mozartgasse 8; (5) Mozartgasse 14; (6): Schubertstraße 51; (7/8) Universitätsplatz 3.

Die Aufzeichnung der Datenlogger (Fig 10) dienen als Zusatzinformation über den obersten Dachraum betreffend Durchlüftung oder Temperaturstau.

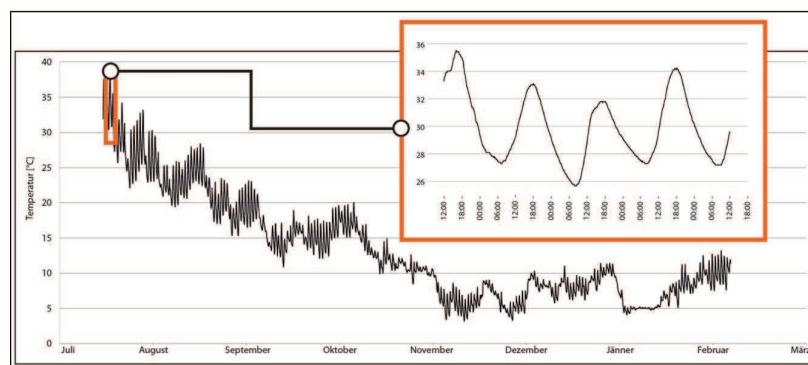


Fig. 10: Beispiel Temperaturdatenlogger Hauptgebäude der Karl-Franzens-Universität Graz (Universitätsplatz 3). Der nicht gedämmte oberste Dachraum zeigt einen ausgeprägten Tagesgang der Temperatur.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Projekt TIR4U hat wichtige Erkenntnisse für die methodische Umsetzung einer Thermalbefliegung zum Zwecke der Dachanalysen gebracht. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass quantifizierbare Aussagen mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten nur unter einem großen zusätzlichen, zeitlichen und finanziellen Aufwand erzielt werden können. Neben der forschungsorientierten Betreuung der Flugkampagne hinsichtlich der klimatischen Rahmenbedingungen (Wetter / Aufnahmezeitpunkt / Jahreszeit / zusätzliche Messkampagnen im Gelände /...; weitere Details können aus KERN 2015 entnommen werden) hat sich die Notwendigkeit einer Einbindung der Bevölkerung herausgestellt. Hier wurde mit dem Magistrat Graz schon eine Vorgehensweise eingehend diskutiert. Die Bevölkerung soll als wichtige Grundlage für die Analyse der Daten, unter anderem Informationen über die Gestaltung, Eindeckung, Dämmung und Nutzung des Gebäudes zum Befliegungszeitraum, liefern. Dafür bekommt der Hausbesitzer / die Hausbesitzerin Informationen über das thermische Verhalten des Daches. Dieser Informationsaustausch soll über ein WEBGIS gestütztes Online Formular erfolgen. Die Umsetzung ist ab Herbst 2016 geplant.

5 REFERENCES

- ALLINSON, D.: Evaluation of aerial thermography to discriminate loft insolation in residential housing. PhD Thesis, University of Nottingham, p. 194, 2007.
- BERGER, T., PUNDY, P.: Adapting office buildings to climate change - Optimization of thermal comfort and energy demand. Final report StartClim2009.E within StartClim2009: adaptation to climate change: contributions to the establishment of a national Austrian adaptation strategy, p. 220, Wien, 2009.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION: Energy Efficiency. Saving energy, Saving money, Buildings. <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>, 2015.
- FEDDECK, P.: Was ist Energie? BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe, Bonn, basisEnergie 15, p.6, 2003.
- FOUAD, N. A., RICHTER, T.: Leitfaden Thermografie im Bauwesen. Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung. Fraunhofer IRB Verlag, 4. Auflage, Stuttgart, p. 171, 2012.
- GEMEINDE SONSBECK: RWE Flug-Thermografie Sonsbeck. Abrufbar unter: http://www.sonsbeck.de/formular%20dateien/Info_Thermografie.pdf, 2015.
- HARTZ, D.A., BRAZEL, A.J., HEISLER, G.M.: A case study in resort climatology of Phoenix, Arizona, USA, Int. J. Biometeorol., 51, pp. 73–83, 2006.
- HEIDEN, U., HELDENS, W.: Automatische Erkennung von Oberflächenmaterialien städtischer Objekte. In: TAUBENBÖCK, H. und DECH, S. (Hrsg), Fernerkundung im urbanen Raum. Erdbeobachtung auf dem Weg zur Planungspraxis. WBG, Darmstadt, pp. 76-83, 2010.
- HEMACHANDRAN, B.: Developing HEAT Scores with H-Res Thermal Imagery to Support Urban Energy Efficiency. Master's Thesis, University of Calgary, p.79, 2013.
- ITRES (ITRES Research Limited): TABI-1800 – Thermal Airborne Broadband Imager. <http://www.itres.com/wp-content/uploads/2014/10/TABI-1800.pdf>, 2012.
- KERN, K.: Der Einsatz der flugzeuggetragenen Infrarotthermografie zur Erfassung von Wärmeverlusten über Dachflächen – Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung. Dissertation an der Universität Graz, Graz, p. 219, 2015.
- KROMP-KOLB, H., JAROS, M.: Klimawandelszenarien für Österreich und potenzielle Auswirkungen des Klimawandels auf den Energieverbrauch von Gebäuden. – Perspektiven, 1 (2), pp.70-72, 2009.
- LAGOUARDE, J. P., HÉNON, A., IRVINE, M., VOOGT, J., PIGEON, G., MOREAU, P., MASSON, V. und MESTAYER, P.: Experimental characterization and modelling of the nighttime directional anisotropy of thermal infrared measurements over an urban area: Case study of Toulouse (France). Remote Sensing of Environment, 117, pp. 19-33, 2012.
- LAZAR, R., BADER, T., BRAUN, N., KUNCIC, E., SULZER, W.: Geländeklimatologische Untersuchungen in der Steiermark. Wetter und Leben, 3 (93), pp. 45-51, 1993.
- LAZAR, R., BUCHROITHNER, M.F., KAUFMANN, V.: Stadtklimaanalyse Graz; Magistrat Graz, Stadtplanungsamt, p. 16, 1994.
- LAZAR, R., PODESSER, A.: An urban climate analysis of Graz and its significance for the planning in the lateral valleys east of Graz. Atmospheric Environment, 33, pp. 4195-4209, 1999.
- LAZAR, R. und SULZER, W.: Stadtklimaanalysen Graz 1986 – 1996 – 2004 – 2011. Magistrat Graz, <http://www.geoportal.graz.at/cms/beitrag/10223258/5414865>, p. 297, 2013.
- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W., CHIPMAN, J. W.: Remote Sensing and image interpretation. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, p.756, 2008.
- MEIER, F., SCHERER, D., RICHTERS, J.: Determination of persistence effects in spatio-temporal patterns of upward long-wave radiation flux density from an urban courtyard by means of Time-Sequential Thermography. Remote Sensing of Environment, 114 (1), pp. 21-34, 2010.
- MOSKOPP, E., LEGAT, K.: Projektbericht Thermalflug Graz (GZ 31564/11). Unpubl. Bericht, p. 4, 2013.
- MUDRI, M.: Bestimmung der Emissionskoeffizienten der Dachmaterialien an Gebäuden des Campus der Karl-Franzens-Universität. Unpubl. Bericht, Graz, p.14, 2014a
- MUDRI, M.: Abhängigkeit der scheinbaren Temperatur. Excel-Tabellen. Persönliche Kommunikation, Graz, 2014b.
- NICOL, J.F., HUMPHREYS, A.M.: Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. Energy and Buildings, 34 (6), pp. 563–572, 2002.
- OMEGA (2014): Table of Total Infrared Emissivity. Abrufbar unter: <http://www.omega.com/temperature/Z/pdf/z088-089.pdf> [19. März 2014].
- ÖNORM EN 13187: Wärmetechnisches Veralten von Gebäuden. Qualitativer Nachweis von Wärmebrücken in Gebäudehüllen. Infrarot-Verfahren (ISO 6781:1983, modifiziert). Österreichisches Normungsinstitut, Wien, p. 16, 1999.

- PARKER, D. S., MCILVAINE, J. E. R., BARKASZI, S. F., BEAL, D. J., ANELLO, M.T.: Laboratory Testing of the Reflectance of Properties of Roofing Material, FSEC-CR-670-00, Florida Energy Center, Cocoa, FL, USA.
<http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/html/FSEC-CR-670-00/> , 2000.
- QUATTROCHI, D.A., LUVALL, J.C.: Thermal Remote Sensing in Land Surface Processing. CRC Press, p. 440, 2004.
- SANTAMOURIS, M., PAPANIKOLAOU, N., LIVADA, I., KORONAKIS, I., GEORGAKIS, C., ARGIRIOU, A., ASSIMAKOPOULOS, D.N.: On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Solar Energy*, 70, pp. 201-216, 2001.
- STADT ARNSBERG: RWE-Thermografieflug erfolgreich abgeschlossen. Abrufbar unter: <http://www.arnsberg.de/thermografie/TH-befliegung.php> , 2015.
- SULZER, W., WURM, M. und LAZAR, R.: The use of multitemporal airborne DAEDALUS ATM data for climatological investigations in Graz/Austria. Abstract Book of the 29th EARSeL Symposium "Imagine Europe", 15-18.Juni 2009, Chania, 2009.
- SULZER, W. und LAZAR, R.: 40 years of urban climate analyses (1974-2014) for planning purposes in Graz/Austria. IGU Regional Conference, Kraków, Poland, 18-22 August 2014, 2014 Book of Abstracts, p. 1381, 2014.
- UMWELTBUNDESAMT: Klimaschutzbericht 2014. REP-0491. Umweltbundesamt GmbH, Wien, p. 167, 2014.
- VOOGT, J. A., OKE, T. R.: Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86, pp. 370–384, 2003.
- XU, W., WOOSTER, M., GRIMMOND, C.: Modelling of urban sensible heat flux at multiple spatial scales: A demonstration using airborne hyperspectral imagery of Shanghai and a temperature - emissivity separation approach. In: *Remote Sensing of Environment*, Vol. 112, pp. 3493-3510, 2008.