



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

**SULZER Wolfgang¹⁾, KERN Katharina¹⁾, BAUER Christian¹⁾,
LAZAR Reinhold¹⁾, MUDRI Martin²⁾, GANSTER Winfried³⁾**

¹⁾ Institut für Geographie und Raumforschung, Karl Franzens Universität
Graz, Heinrichstrasse 36, A-8010 Graz

²⁾ Mudri Messtechnik, Schanzelgasse 20, A-8010 Graz

³⁾ Stadtvermessungsamt Graz, Europaplatz 20, 8010 Graz

Projektrahmen

TIR4U – **T**hermal **I**nfra**R**ed detection of Roof heat loss **for** the **U**niversity of Graz

Das Projekt **TIR4U** ist Teil eines **langfristigen Kooperationsprojektes (seit 2004) mit der Stadt Graz bzw. dem Amt der Steiermärkischen Landesregierung**, bei dem Fragen des Stadtklimas bzw. der Stadtentwicklung laufend behandelt werden.

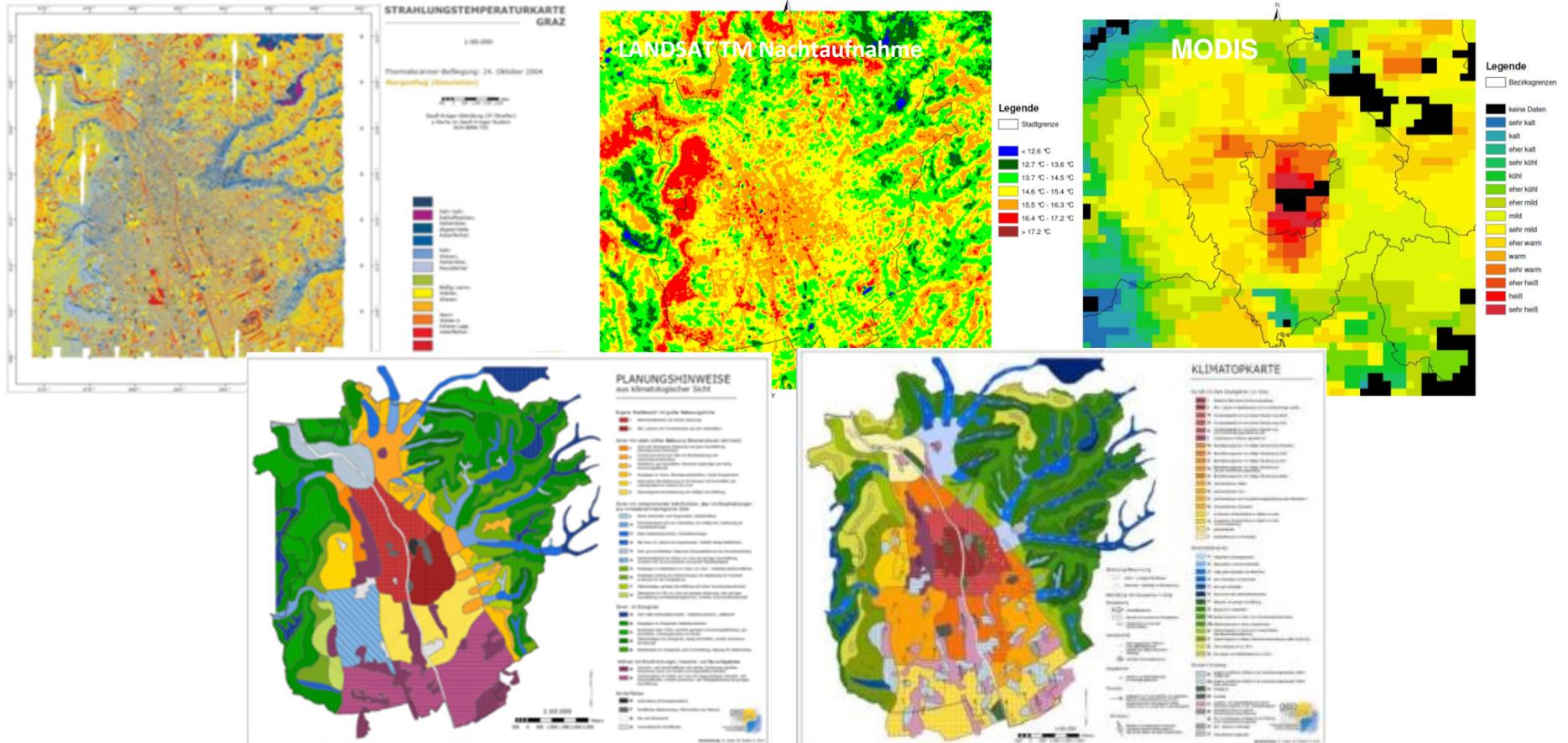
- **Stadtentwicklung Graz 1952-2011 (Luftbilder)**
- **Stadtklima Graz (Klimatopkarten, Klimaeignungskarten, Thermalkarten 1986, 1996, 2004 und 2011)**
- **Bodenbedeckungsklassifikation Graz aus multispektralen Fernerkundungsbilddaten (1986, 1996, 2004, 2007, 2011, 2015)**
- **Versiegelungskarten 1986, 1996, 2004, 2007, 2011, 2015**
- **Thermalkarten der Grazer Dachlandschaft (2011)**
- **Change Detection 2007-2011-2015**
- **...**

(LAZAR und PODESSER 2009, SULZER und KERN 2008 und 2009, SULZER et al. 2009, MUICK 2012, SULZER 2013, SALENTINIG 2013, SULZER und LAZAR 2014, ...)

Stadtklimaanalyse

Schwerpunkte :

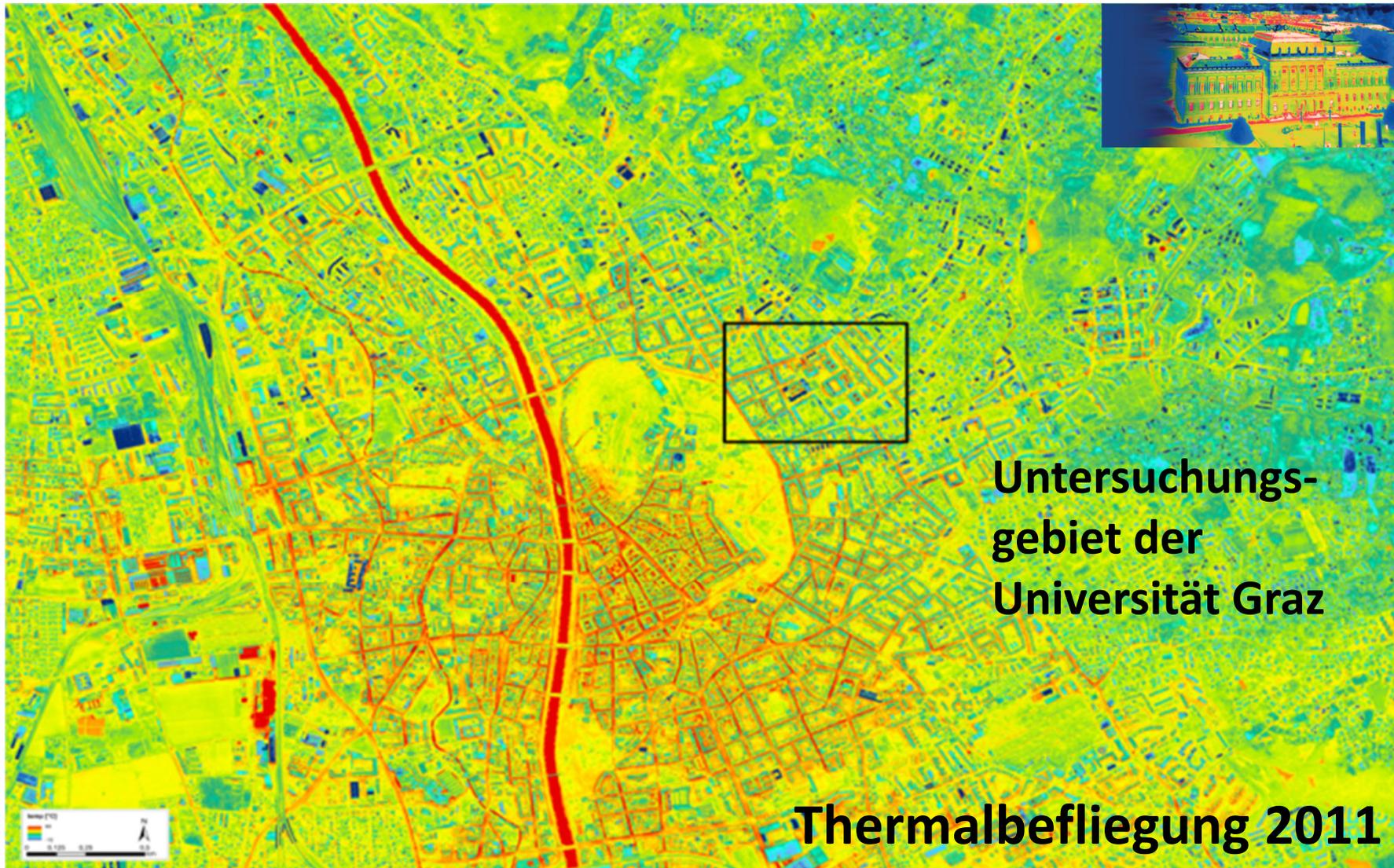
- **Verteilung städtischer Wärmeinsel („urban heat island“)**
- **Analyse der Frisch- und Kaltluftproduktion aus den Seitentälern (Sulzer et al. 2009)**
- **Erstellung von Klimatopkarten/Planungskarten**



Thermalbefliegungen

- **1977: 1.THERMALBEFLIEGUNG**
- **1986: Stadtklimaanalyse mit Unterstützung von DAEDALUS Aufnahmen (2.THERMALBEFLIEGUNG)**
- **1994: Fertigstellung der Stadtklimaanalyse auf der Basis der Befliegung von 1986**
- **1990 und 2002 Revision des Flächenwidmungsplanes unter Einbindung der Ergebnisse der Stadtklimaanalyse**
- **1996: 3.THERMALBEFLIEGUNG durch die DLR und der Stadt Graz**
- **2004: Revision der Stadtklimaanalyse (4.THERMALBEFLIEGUNG) mit adaptieren Klimatopkarten und Klimaeignungskarten**
- **2011: Revision der Stadtklimaanalyse (5.THERMALBEFLIEGUNG) mit adaptieren Klimatopkarten und Klimaeignungskarten**

TIR4U – **T**hermal **I**nfra**R**ed detection of Roof heat loss **for** the **U**niversity of Graz

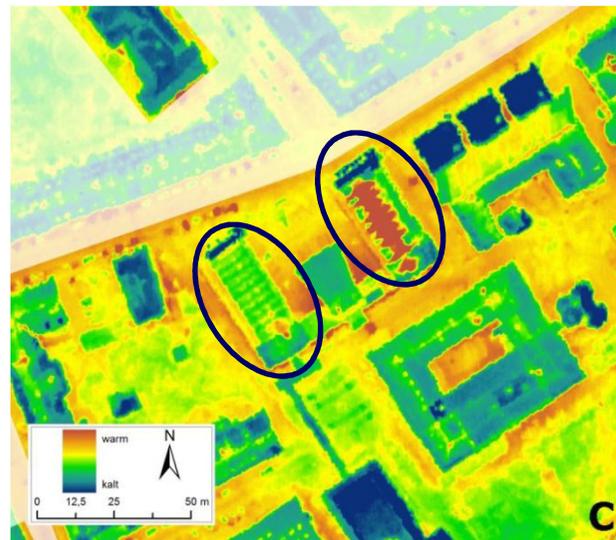


Inhalt

1. Einleitung / Das Projekt TIR4U / Projektrahmen
2. TABI 1800 Datensatz
3. Gebäudeabgrenzung und Klassifikation der Dacheindeckung
4. IN-SITU Erfassung der Emissionsgrade
5. Dachflächenanalyse Beispielsgebäude
6. Ergebnisse / Problemfelder
7. Ausblick



UltraCam Orthophoto



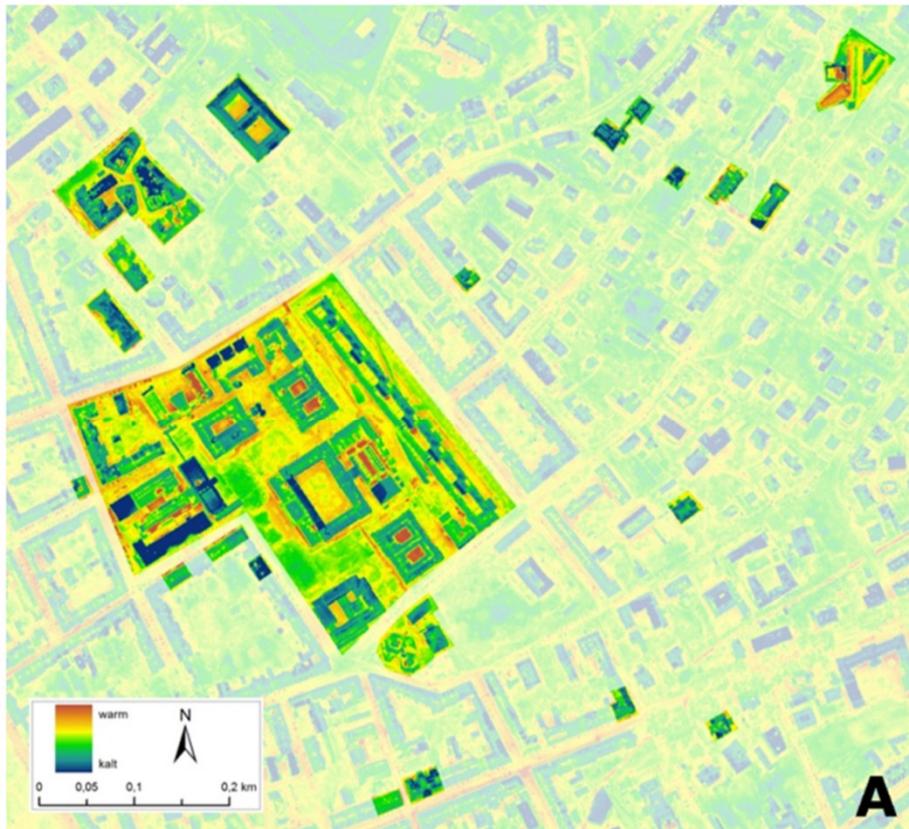
TABI Daten



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** anderer öffentlicher Gebäude und schließlich auch von Firmengebäuden und privaten Häusern zu wecken.
- Als **Feasibility Study** und evtl. auch als **Best-Practice-Beispiel** soll das Projekt Initialzündung für die Durchführung ähnlicher Studien in anderen Städten sein.

Lage der Gebäude der Universität Graz

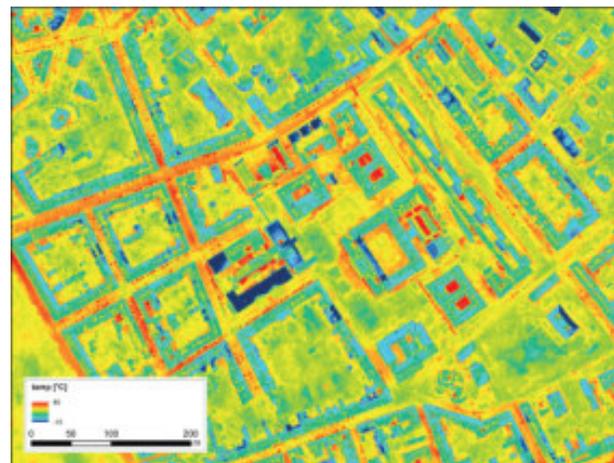


Thermal Airborne Broadband Imager 1800 (TABI-1800)

- **Thermalsensor TABI-1800 (Thermal Airborne Broadband Imager) von ITRES Research Limited (Calgary, Kanada)**
- **Wellenlängenbereich von 3,7 bis 4,8 μm**
- **Befliegung am 20. Dezember 2011 (ca. 20.00 bis 22.00 Uhr)**
- **Flughöhe von ca. 1850m über Grund**
- **Geometrische Auflösung von 60 cm und einer**
- **Thermale Auflösung von 0,05° K**
- **Post-Processing der Rohdaten erfolgte über die Sensorherstelle**
- **Orthorektifizierung durch die AVT ZT GmbH Imst (Österreich)**



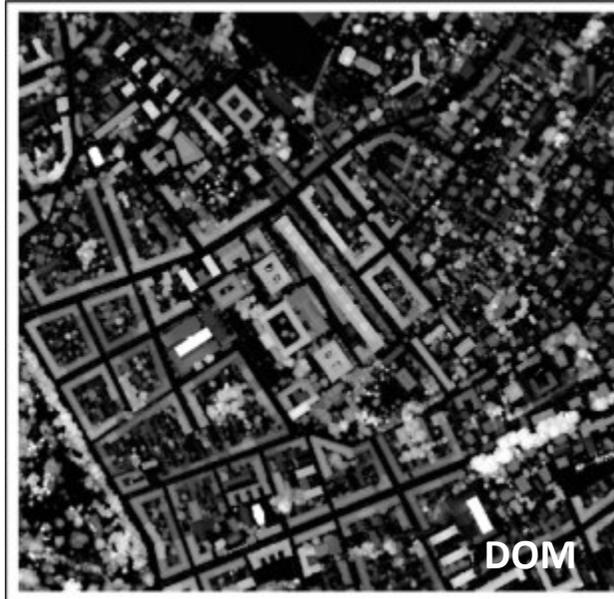
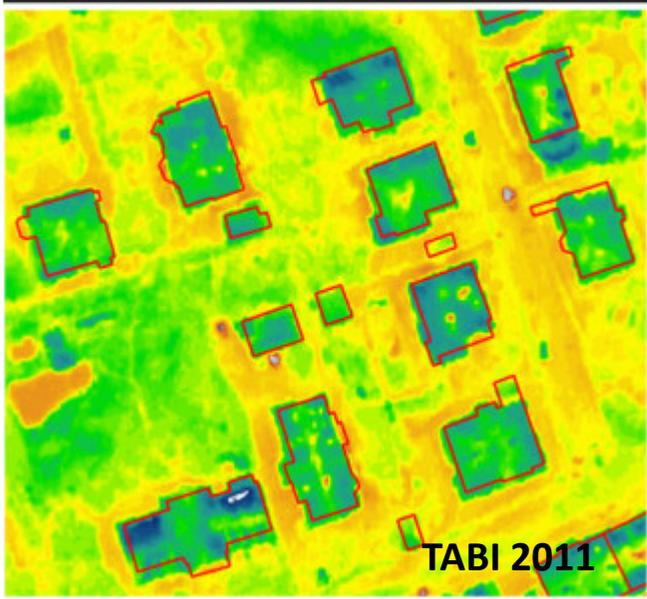
UltraCam



TABI-1800



Gebäudeabgrenzung und Klassifikation der Dacheindeckung



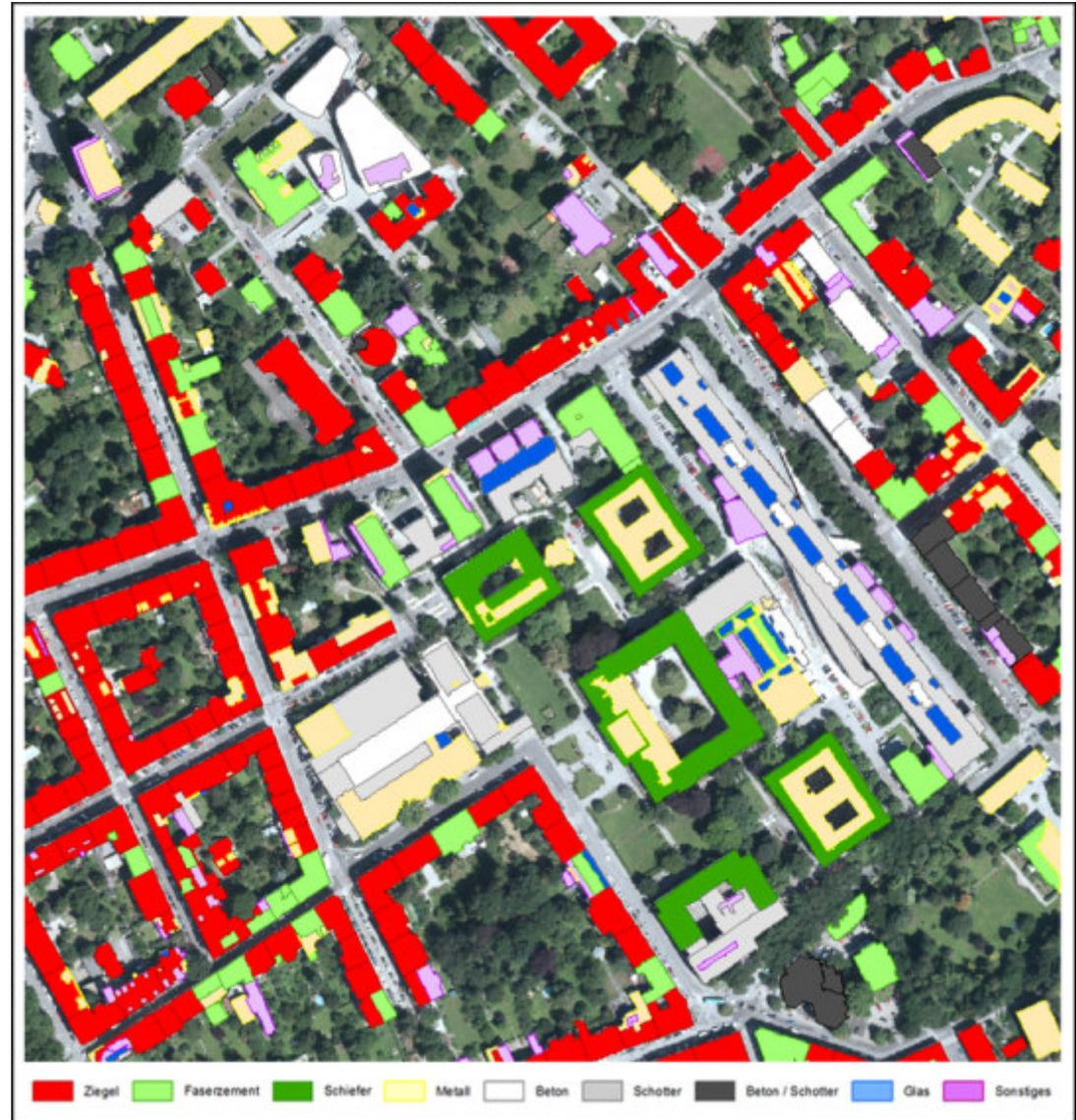
Gebäudeinformation aus dem Kataster und Abgrenzung der Gebäude in den **Thermaldaten**

Methode zur **automatischen Abgrenzung** der Gebäudeaußengrenzen wurde aus einer Kombination von multispektralen Daten und einem digitalen Oberflächenmodell (DOM) entwickelt.



Klassifikation der Dacheindeckung

- Emissivität der Dacheindeckungsmaterialien
- Objektbasierter Klassifikationsansatz
- Einschränkung: RGB +IR, MMU der UltraCam
- Aggregieren der Klassen (Vielgliedrigkeit)
- Verbesserung: Hyperspektralbefliegung



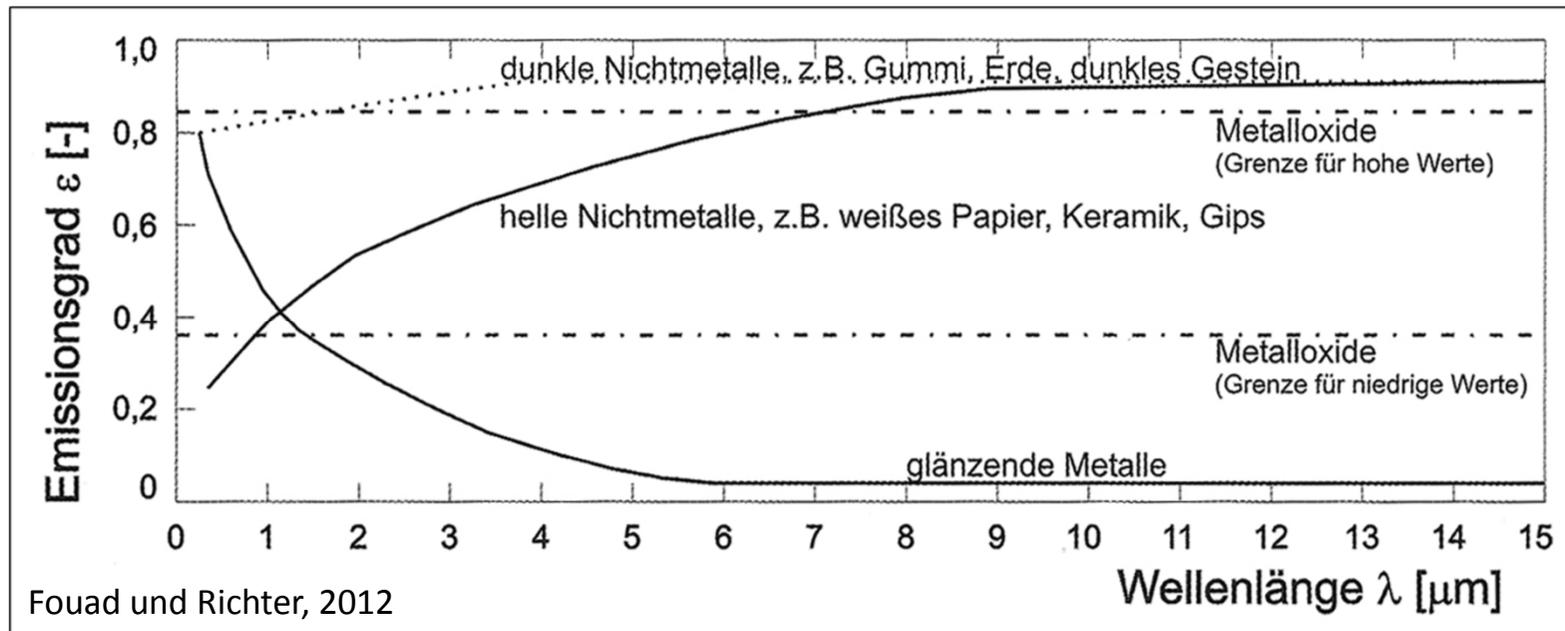
In Situ Erfassung der Emissionsgrade

Warum ist es wichtig, die Emissionsgrade zu erfassen?

- Bei **IR-Thermalaufnahmen** wird die **Oberflächentemperatur nicht direkt gemessen**; erfasst wird die sogenannte **Strahlungstemperatur**.
- **Strahlung und Temperatur eines Körpers** unmittelbar an seiner **Oberfläche** stehen in einem **funktionalen Zusammenhang** (Stefan-Boltzmann).
- Ein **Emissionsvermögen** von 1 ist nur theoretisch bei sogenannten schwarzen Strahlern gegeben die keinerlei Strahlung reflektieren.
- **Natürliche und künstliche Objekte** (in der Stadt) **absorbieren die einfallende Strahlung nicht vollständig** und emittieren damit weniger Wärmestrahlung als ein Schwarzkörper gleicher Temperatur.
- Soll die wahre Temperatur einer Oberfläche durch Fernerkundung bestimmt werden, so muss der **Emissionsgrad der Oberfläche** und der **atmosphärische Einfluss** sehr genau bekannt sein.
- Zudem gibt es einen **Wärmestrom** von der Oberfläche des Körpers **nach unten** (bzw. einen Wärmestrom von unten **nach oben**).

In Situ Erfassung der Emissionsgrade

Emissionsgrad



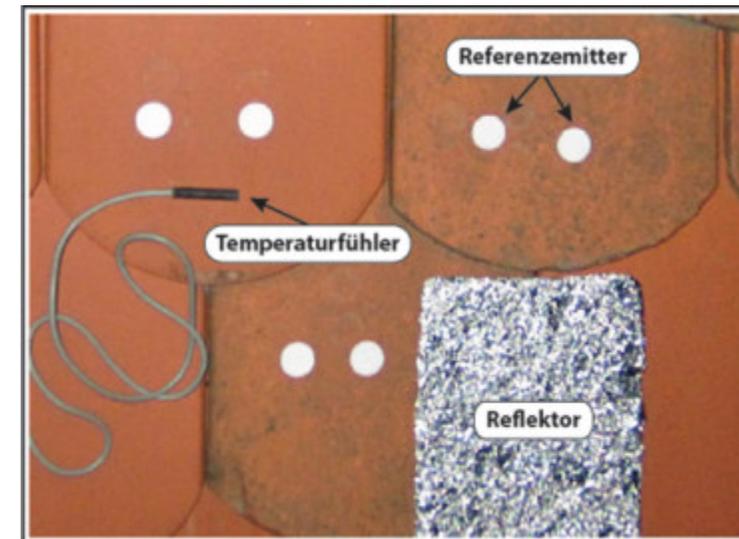
Emissionsgrade verschiedener Stoffe bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Wellenlänge

- Der **Emissionsgrad** gibt an, wie viel Strahlung ein **realer Körper im Vergleich zu einem idealen schwarzen Körper** abgibt; dieser liegt zwischen **0 und 1**.
- 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**.

In Situ Erfassung der Emissionsgrade

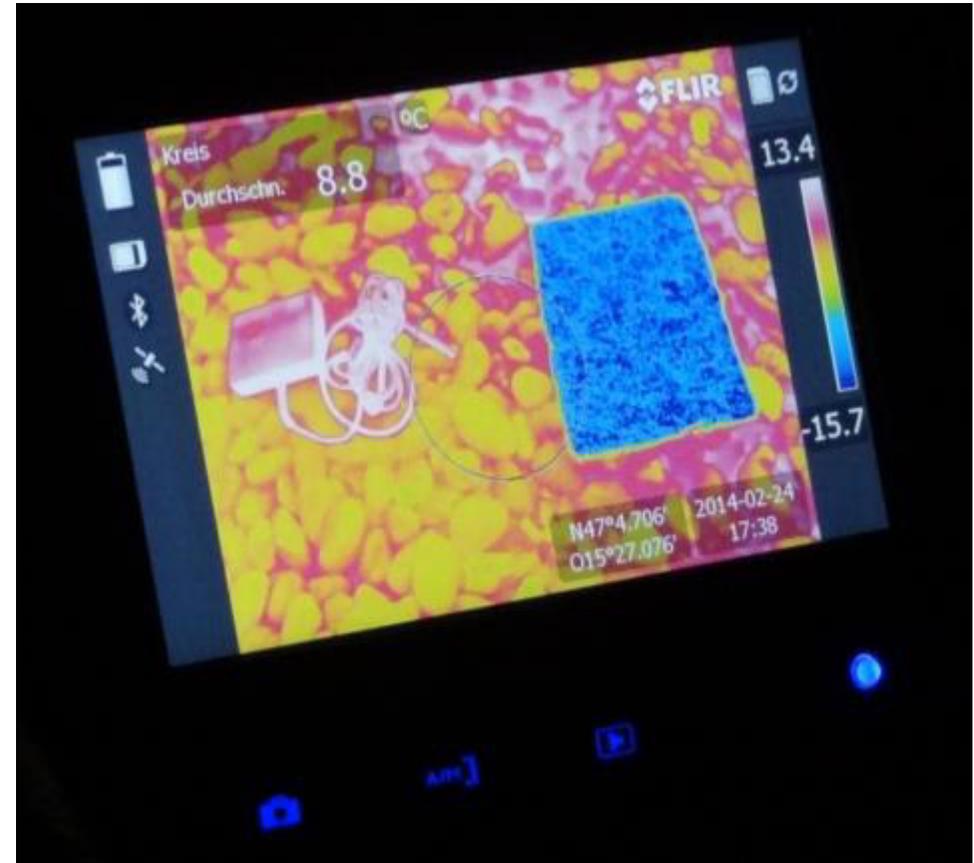
Messsetting und Messvorgang

- **7 unterschiedliche Dacheindeckungs-materialien** (Betonplatten, Glas, Faserzement-schindel, Metall, Schiefer, Schotter und Ton-ziegel)
- **5 Gebäude des Campus** der Universität
- **im Februar 2014**
- **Infrarotkamera der Typs FLIR T 640,**
- **Spektralbereich von 7,5 bis 14 μm**
- **1 bis 3 Stunden nach Sonnenuntergang** bei einer Lufttemperatur von ca. 3°C und einer relativen Luftfeuchte von 60%.



In Situ Erfassung der Emissionsgrade

Messsetting und Messvorgang



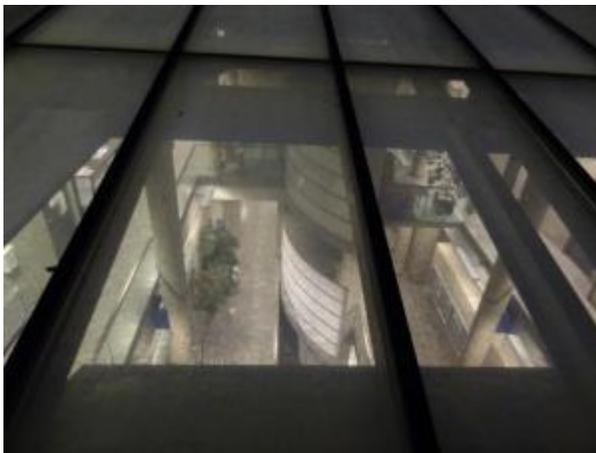
In Situ Erfassung der Emissionsgrade

In-Situ Messwerte vs. Literaturangaben

Material	ϵ in-situ	ϵ Tabellen	Material	ϵ	ϵ Tabellen
Betonplatten	0,94	0,88-0,95 ¹	Schiefer	0,74	0,97 ²
Metallumfassung	0,86	0,02-0,97 ²	Faserzement I	0,93	0,88-0,95 ¹
Schotter	0,93	-	Faserzement II	0,93	0,88-0,95 ¹
Glas	0,83	0,76-0,94 ²	Tonziegel	0,88 - 0,95	0,91-0,93 ²

¹ Beton/Zementbeton; Parker et al., 2006, ² OMEGA, 2014

Vergleich der in-situ erhobenen Emissionsgrade mit Tabellenwerten aus der Literatur

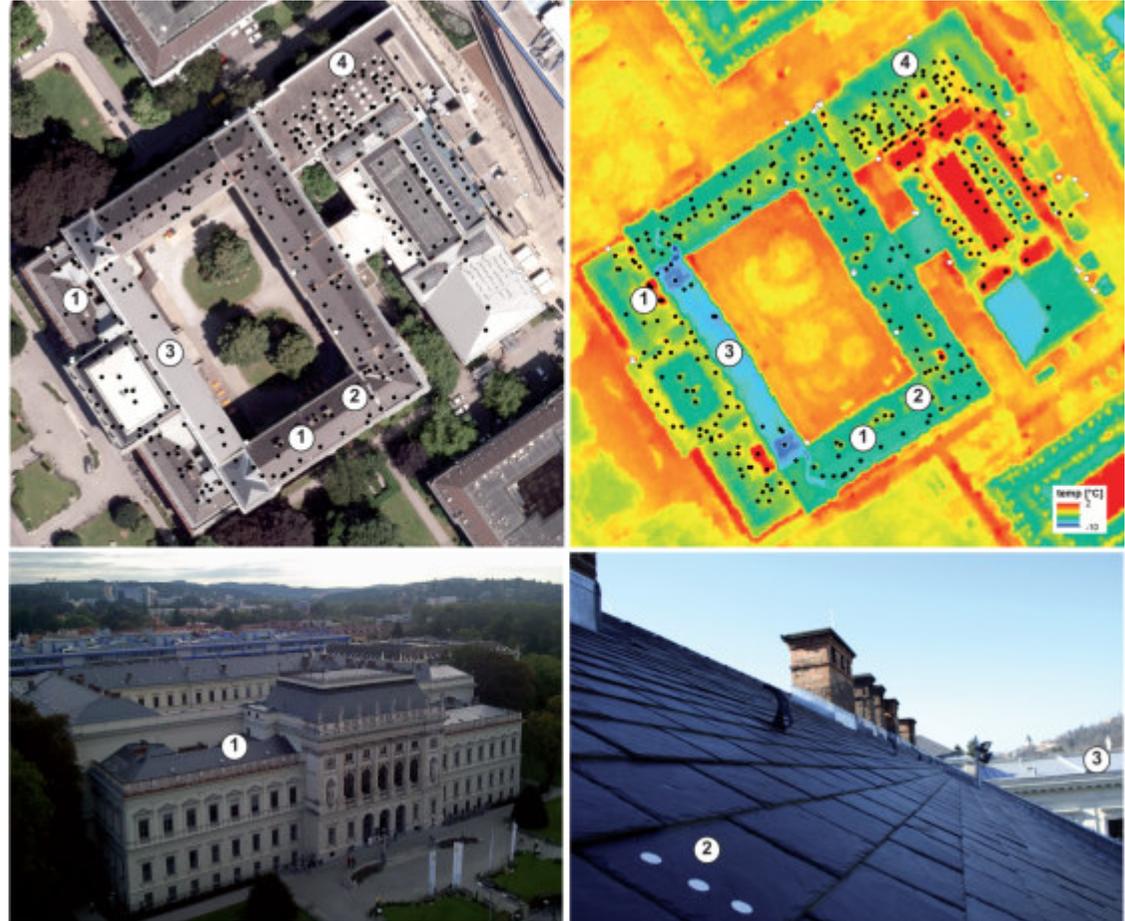


Dachflächenanalyse / Beispielsgebäude

Analyse thermaler Anomalien mittels automatischer Hot Spot Detektion

In zwei Schritten:

- 1) Ausweisung als potenzielle Hot Spots
- 2) Überlappende Nachbarschaftsanalyse der erfassten potenziellen Hot Spots



- 1: Position der Datenlogger
- 2: Position der in-situ Messung
- 3: Metalldach
- 4: Ventilatoren

Ergebnis der Hot Spot Detektion am Beispiel des Hauptgebäudes der Universität Graz

Dachflächenanalyse / Beispielsgebäude

Analyse thermaler Anomalien mittels automatischer Hot Spot Detektion

Die Modellparameter-Kalibrierung erfolgte für zwei Gebäudetypen:

(a) **Typus Einzelgebäude:**

homogene Dachlandschaft; geringe Anzahl an Kaminen und Entlüftungen

(b) **Typus komplexe Gebäude:**

Sehr heterogene Dachlandschaft; hohe Anzahl an Kaminen und Entlüftungen; komplexe Installationen (Klimaanlagen)

Positionierung der Datenlogger

- Berücksichtigung der Verhältnisse des obersten Dachraumes
- Beitrag zur Methodenverbesserung dieser Fernerkundungsmethode
- 8 Gebäude mit 18 Temperaturdatenlogger (jeweils 2 pro Raum, im Hauptgebäude 2 Räume, 10-Minuten Intervall Temperatur und Luftfeuchte, Juni 2013 – Juli 2014)

Dachflächenanalyse / Beispielsgebäude

Positionierung der Datenlogger



Mozartgasse 8
(keine Bodendämmung)



Mozartgasse 14
(Bodendämmung und Lüftung vorhanden)



- 1: Elisabethstraße 27
- 2: Holteigasse 6
- 3: Mozartgasse 3
- 4: Mozartgasse 8

- 5: Mozartgasse 14
- 6: Schubertstraße 51
- 7/8: Universitätsplatz 3



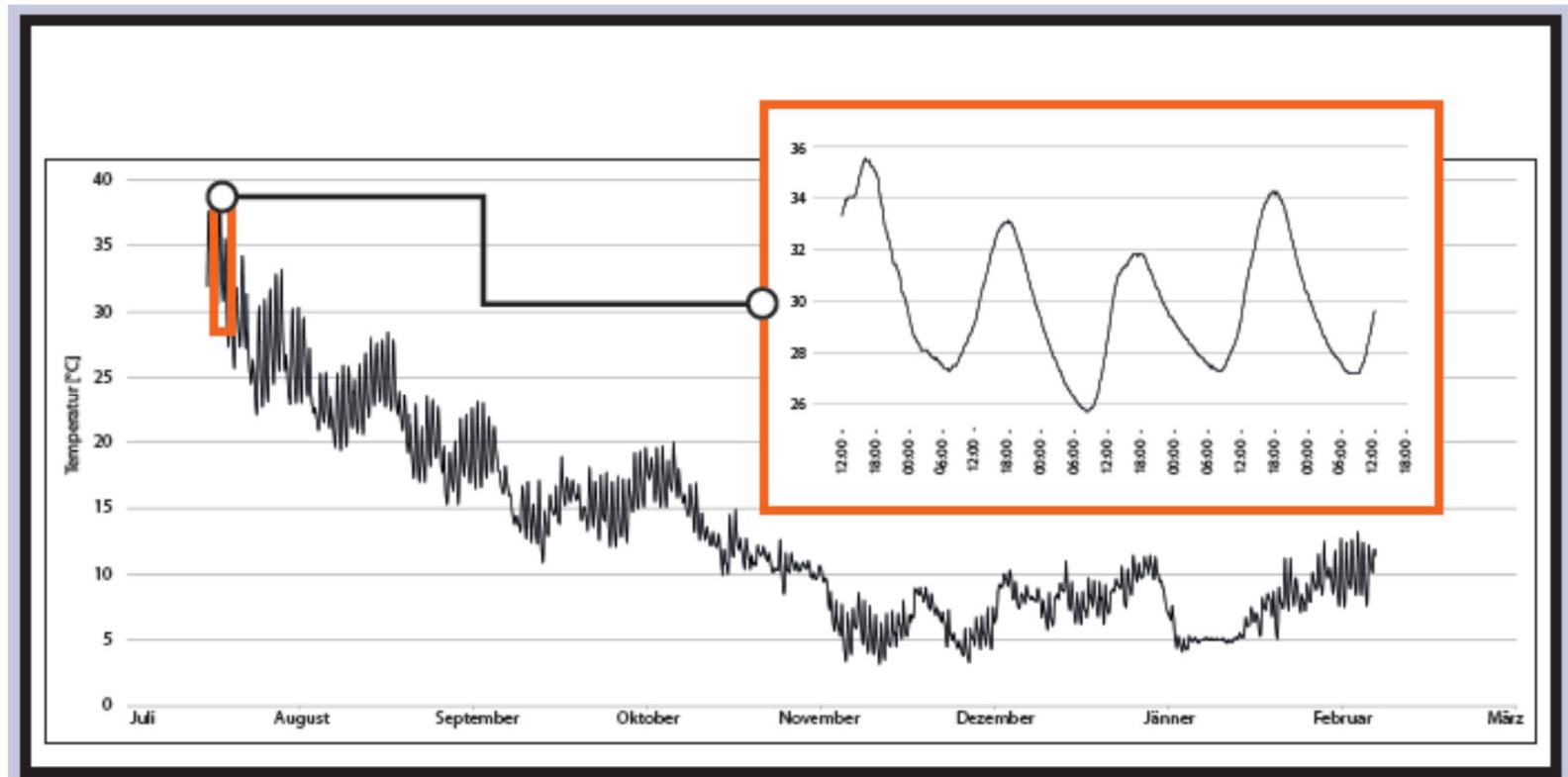
Position Datenlogger ca. 3m
über Boden



Position Datenlogger ca.
0,5m über Boden

Dachflächenanalyse / Beispielsgebäude

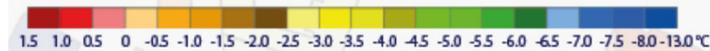
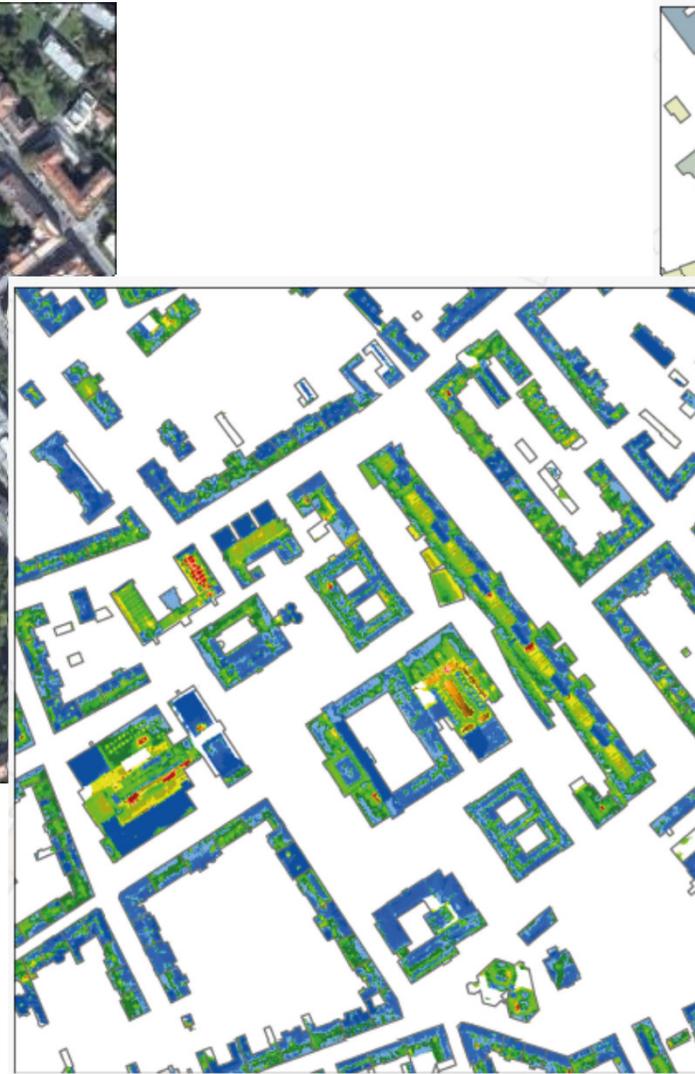
Berücksichtigung der thermalen Situation im obersten Dachraum



**Beispiel Temperaturdatenlogger Hauptgebäude der Karl Franzens Universität
Graz (Universitätsplatz 3)**

Der nicht gedämmte oberste Dachraum zeigt einen ausgeprägten Tagesgang der Temperatur.

Dachflächenanalyse

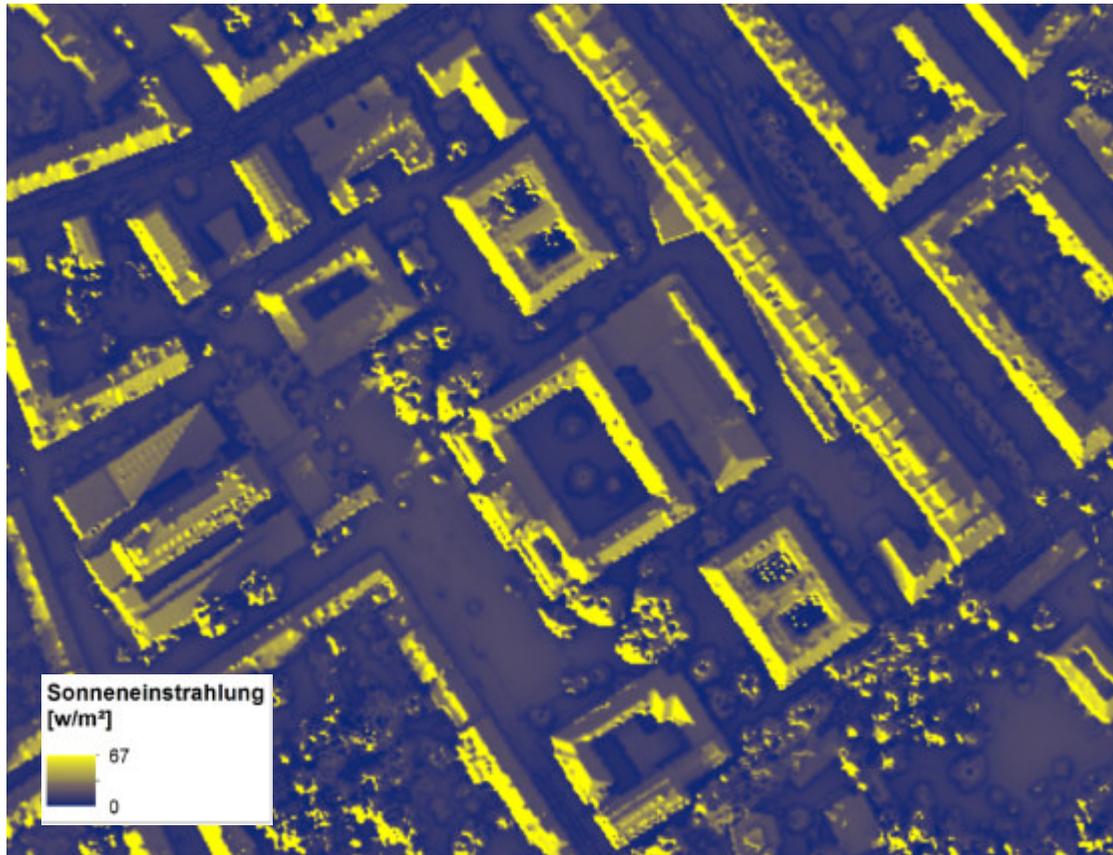


Ergebnisse / Problemfelder

- **Aufnahmezeitpunkt: 20.12.2011, 19:52-21:51 Uhr**
- **Wellenlängenbereich**
- **Geometrische Auflösung**
- **Emissionsgrad**

Ergebnisse / Problemfelder 1

Aufnahmezeitpunkt: 20.12.2011, 19:52-21:51 Uhr

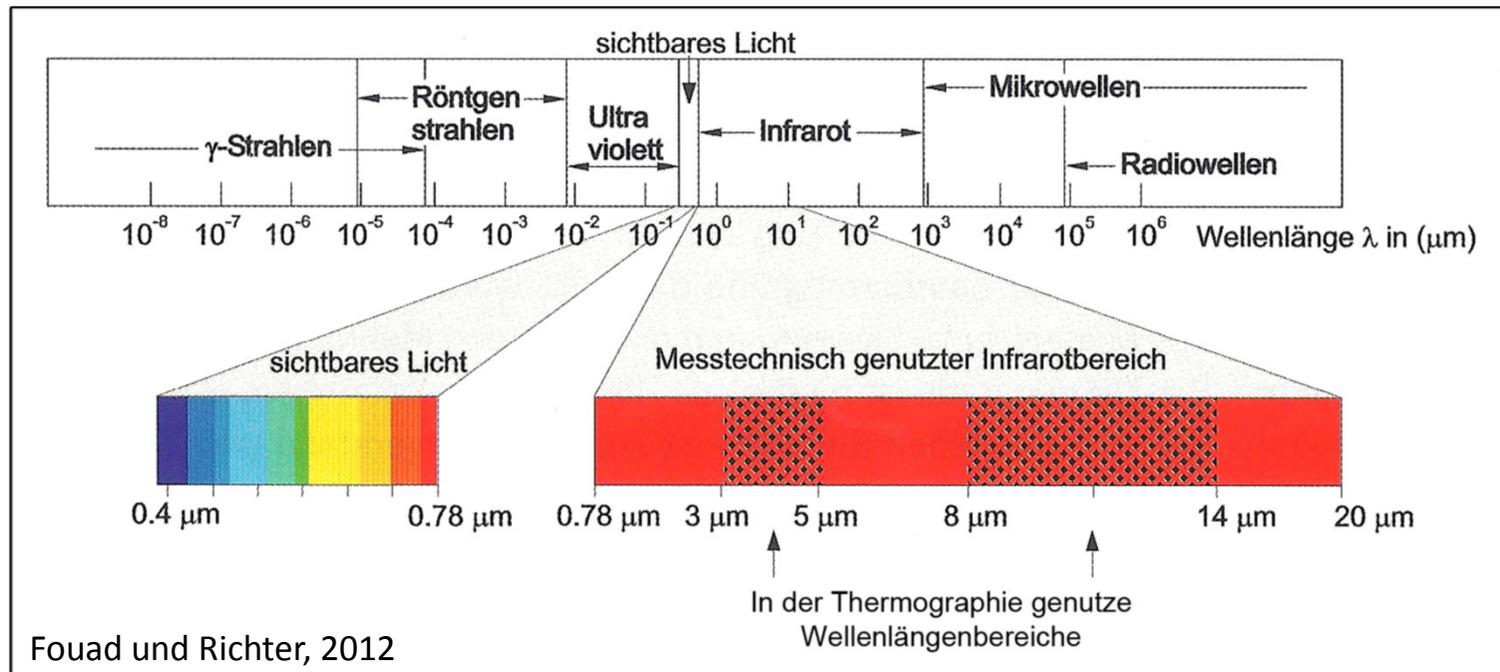


Summe der direkten und diffusen Sonneneinstrahlung
sechs Stunden vor dem Zeitpunkt der Befliegung

- **Thermische Einflüsse** durch Sonneneinstrahlung
- **Angaben in der Literatur:** 4 bis 12 Stunden nach So-Untergang
- **Graz:** Auskühlungszeit von 3-5 Stunden
- **Modellierung der Himmelsstrahlung** auf Basis eines DOM's 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.

Ergebnisse / Problemfelder 2

Wellenlängenbereich



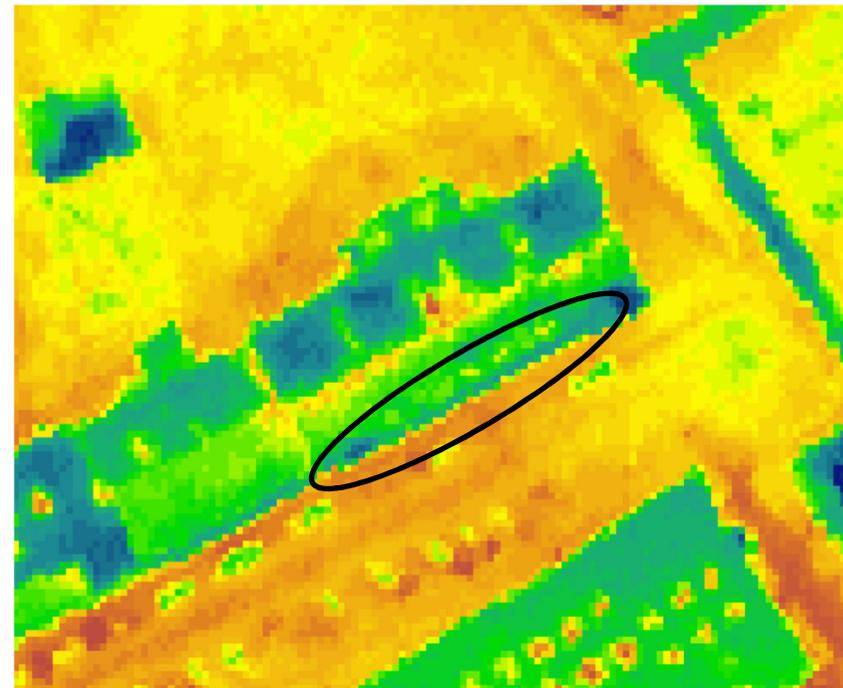
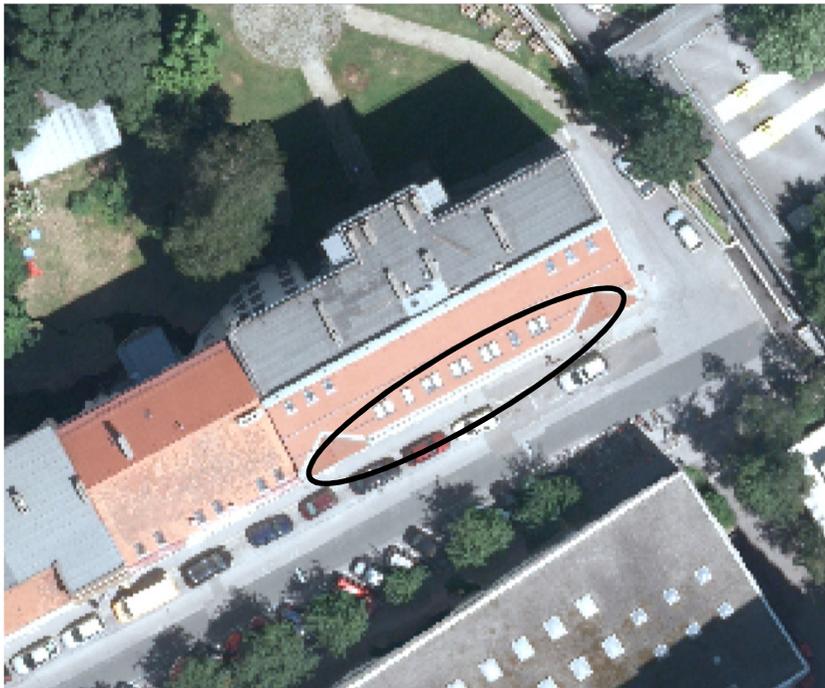
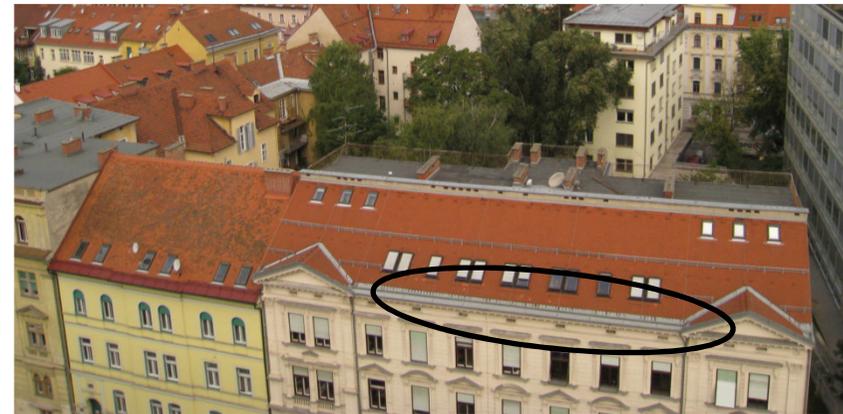
Elektromagnetisches Spektrum und der messtechnisch genutzte Infrarotbereich

- Sensor TABI -1800: **3,7 – 4,8 μm** (mittleres Infrarot)
- Detektion von **sehr hohen Temperaturen**
- **Wärmeverlust von Gebäuden:** Wellenlängenbereich von 8 -13 μm (langwelliges IR)
- „**Handheld**“ Thermalkameras für Referenzmessungen im mittleren IR schwer verfügbar.

Ergebnisse / Problemfelder 3

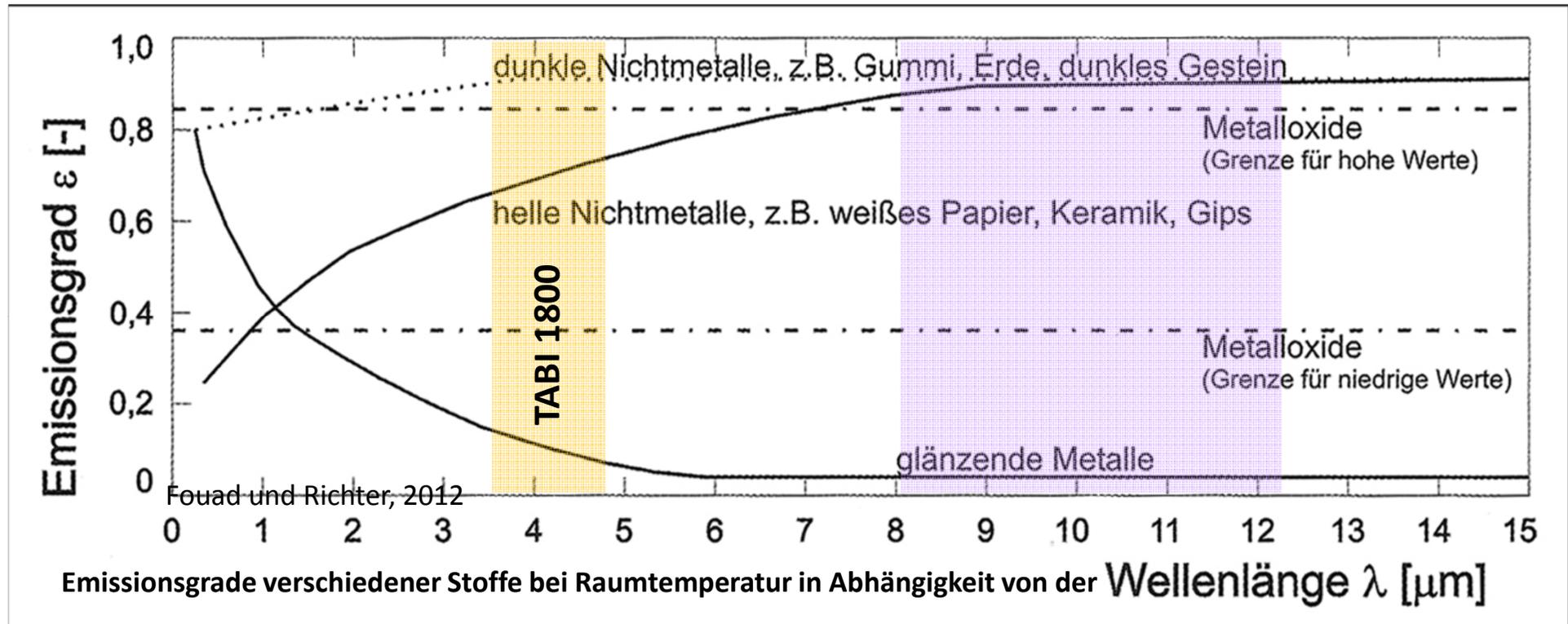
Geometrische Auflösung

- Geometrische Auflösung: 60cm
- Heterogenität der Dachlandschaft
- Kleinere Einheiten aus Metallen mit einem niedrigen Emissionsgrad
- Hoher Anteil an Mischpixeln und somit Mischtemperaturen



Ergebnisse / Problemfelder 3

Emissionsgrad



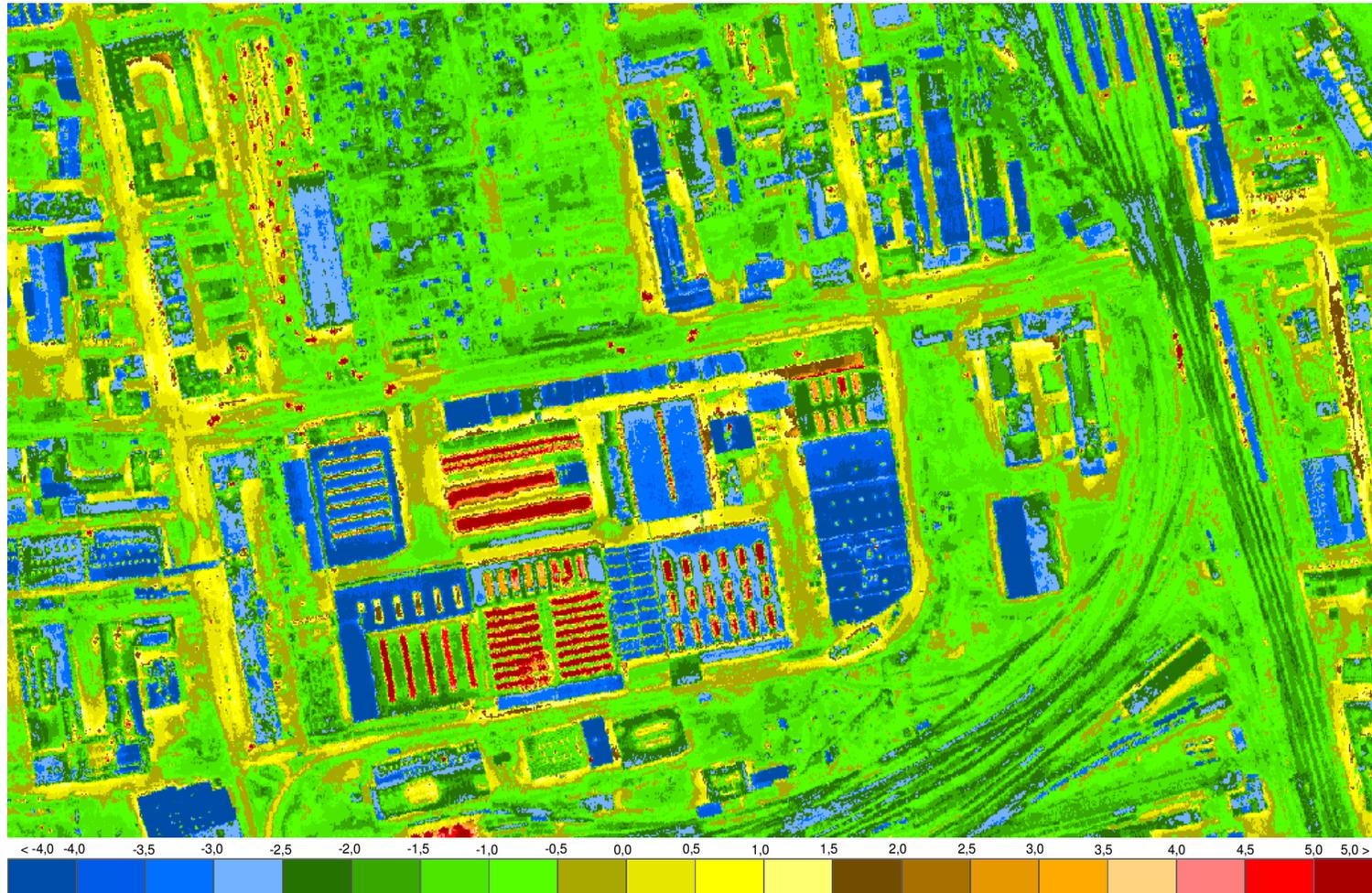
- **Temperatur, die ein Körper abgibt** (und vom **Sensor** aufgenommen) ist immer kleiner als die wahre Temperatur des Körpers.
- **Berechnung der wahren Temperatur eines Körpers** durch Erfassung des Emissionsgrades
 - aus Tabellenwerken oder durch in-situ Messungen
- **Heterogenität und Kleingliedrigkeit der Dachlandschaft**

Ergebnisse

- Das Projekt TIR4U hat **wichtige Erkenntnisse für die methodische Umsetzung** einer Thermalbefliegung zum Zwecke der Dachanalysen gebracht.
- **Betreuung der Flugkampagne** hinsichtlich der klimatischen Rahmenbedingungen (Wetter / Aufnahmezeitpunkt / Jahreszeit / zusätzliche Messkampagnen im Gelände ...)
- Notwendigkeit einer **Einbindung der Bevölkerung**: wichtige Grundlage für die Analyse der Daten: Informationen über die Gestaltung, Eindeckung, Dämmung und Nutzung zum Befliegungszeitpunkt.
- Hausbesitzer/-in bekommt **Informationen über das thermische Verhalten der Dächer**.
- Dieser **Informationsaustausch** erfolgt entweder über eine analoge Fragebogenaktion oder über ein WEBGIS gestütztes Online Formular.

Ergebnisse

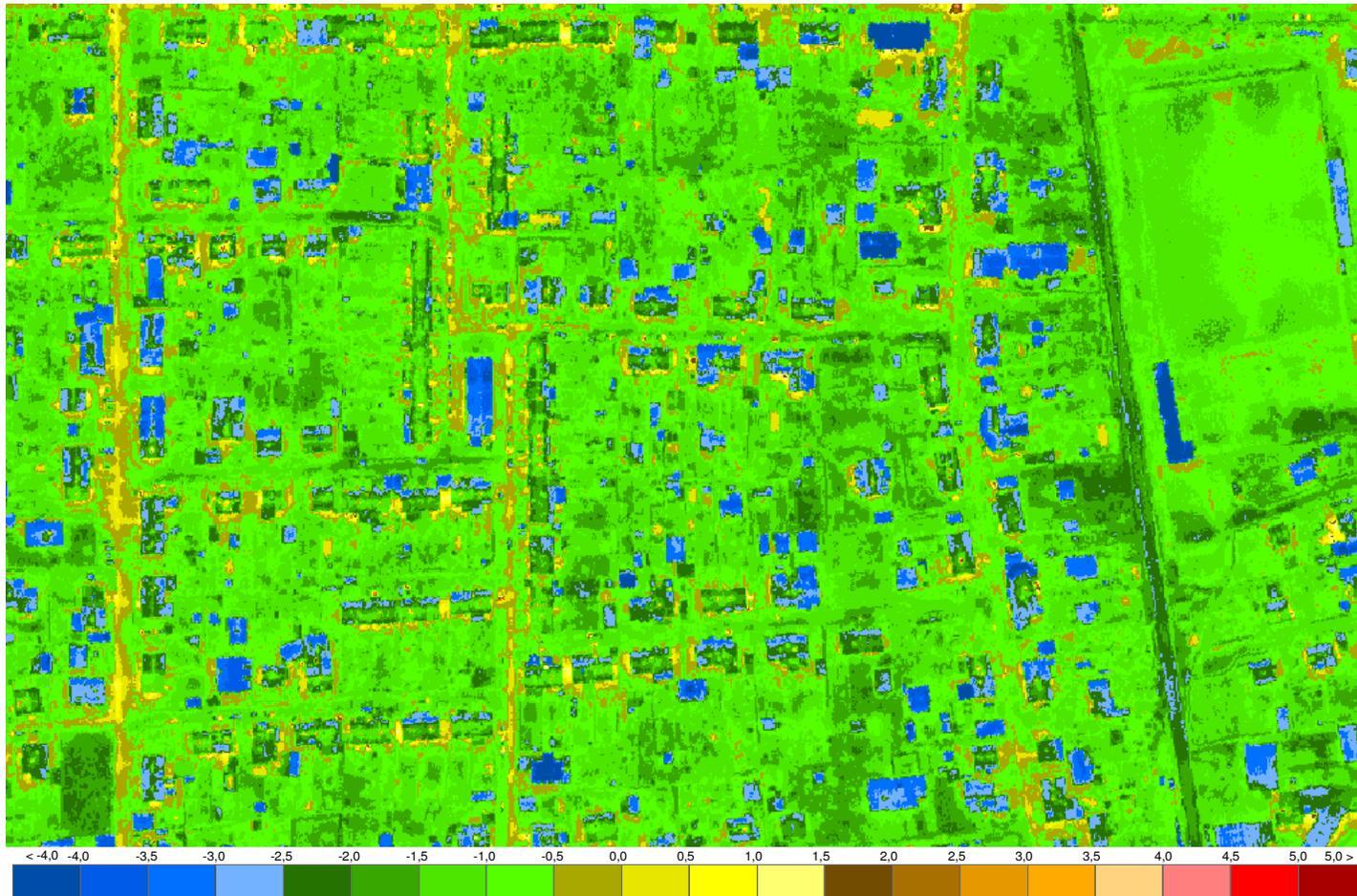
Dachflächen / Industriegebiet



Temperaturangaben in °C

Ergebnisse

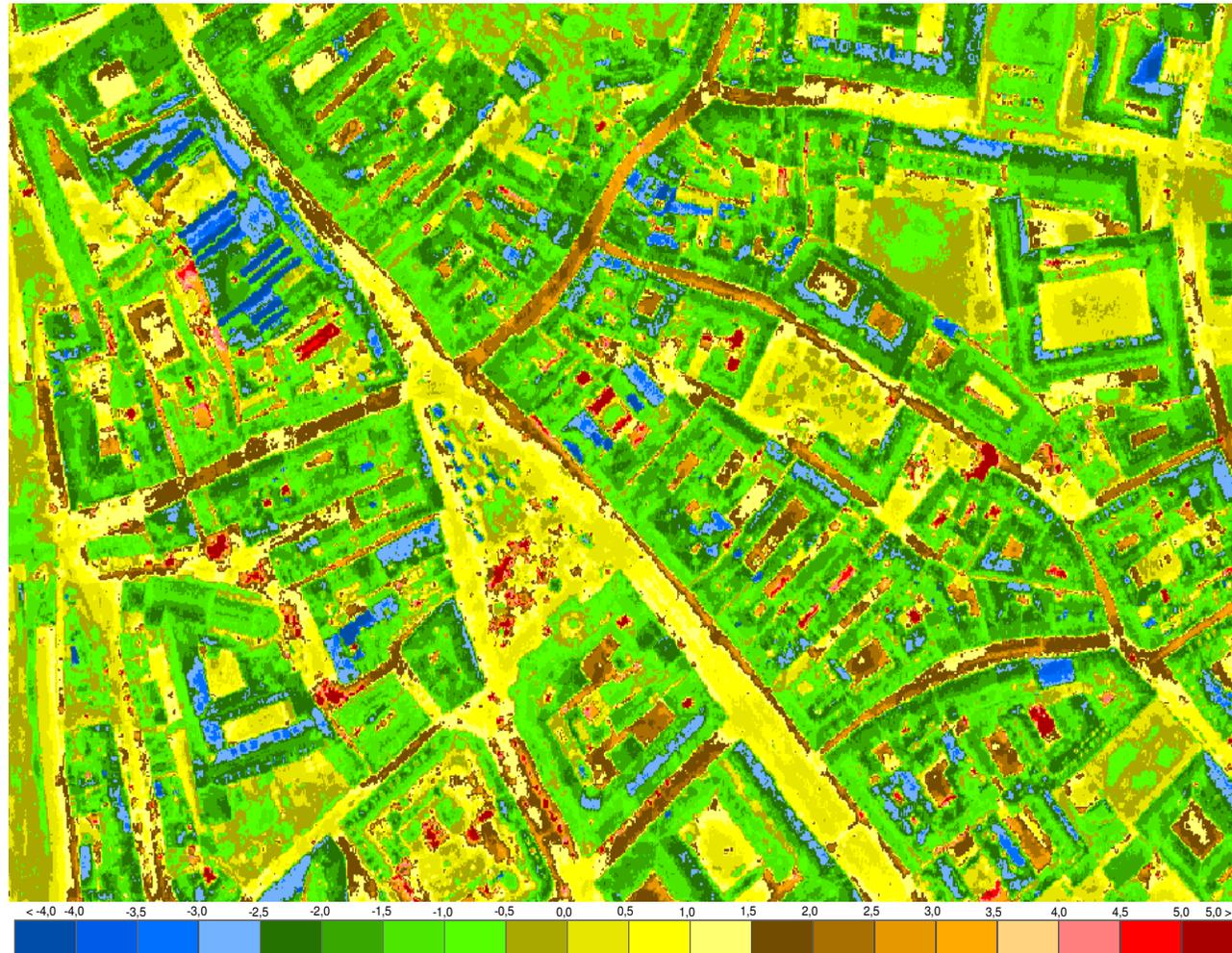
Dachflächen / Gartenstadt



Temperaturangaben in °C

Ergebnisse

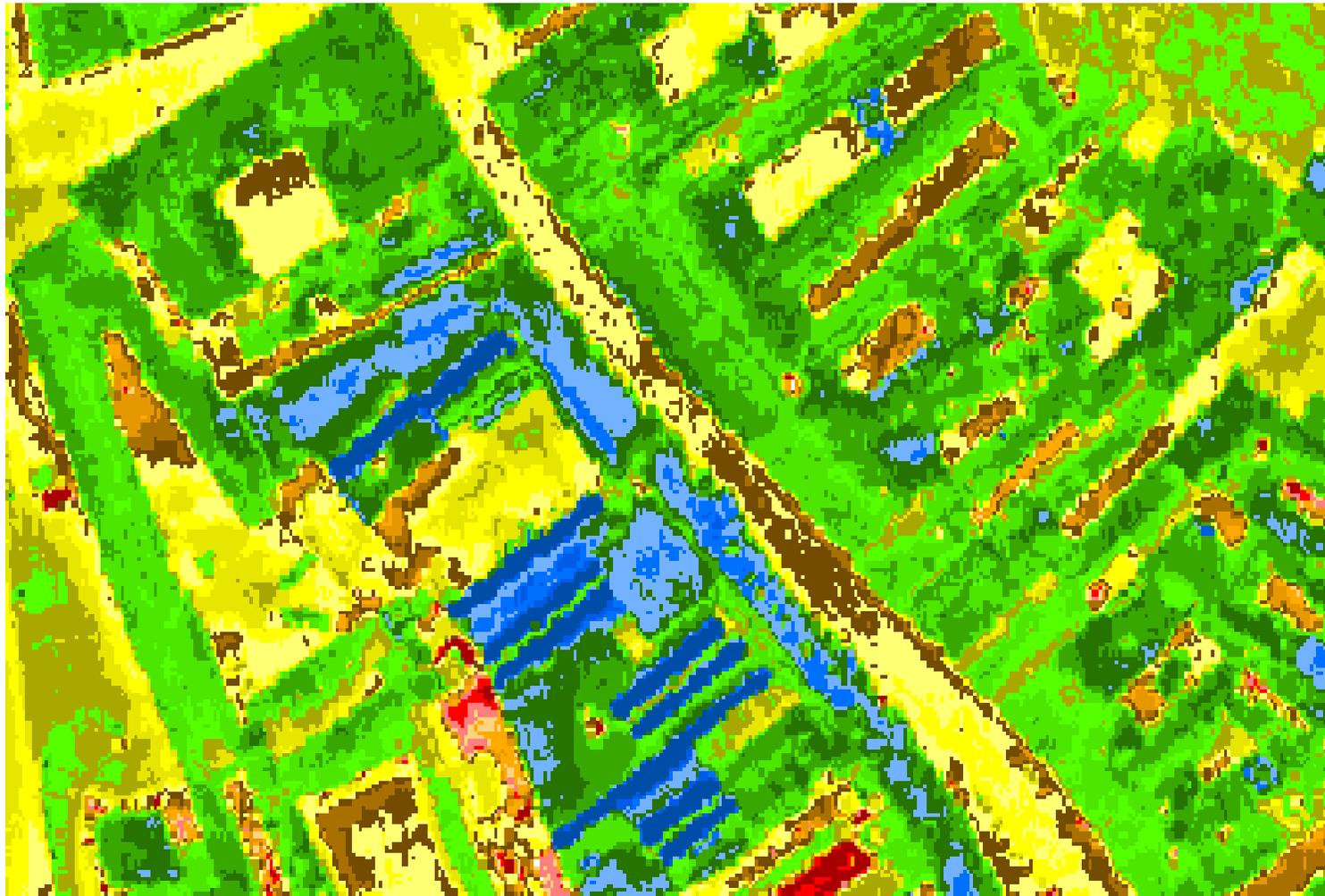
Dachflächen / Altstadt



Temperaturangaben in °C

Ausblick

Dachflächen / Altstadt



< -4,0 4,0 -3,5 -3,0 -2,5 -2,0 -1,5 -1,0 -0,5 0,0 0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 4,5 5,0 5,0 >

Temperaturangaben in °C

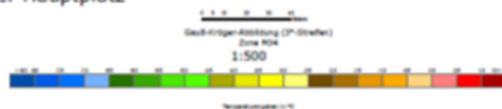


STRAHLUNGSTEMPERATURKARTE GRAZ



Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011
- Detailansicht Grazer Hauptplatz

18:52 - 20:11 MEZ



Datengrundlage: TABE 1800 Thermalscannerbefliegung vom 20.12.2012, Bodenauflösung 0,6 m x 0,6 m
Geometrische Entzerrung: Vermessung AVT-ZT-GmbH, Imst
Strahlungstemperaturkarte: Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz
Bearbeitung: W. Sulzer, A. Salentreg



WÄRME AUSSTRAHLUNG AN DACHFLÄCHEN GRAZ



Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011
- Detailansicht Grazer Hauptplatz

18:52 - 20:11 MEZ



Datengrundlage: TABE 1800 Thermalscannerbefliegung vom 20.12.2012, Bodenauflösung 0,6 m x 0,6 m
Geometrische Entzerrung: Vermessung AVT-ZT-GmbH, Imst
Hintergrund: S200 Maps Austria
Kartengestaltung: Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz
Bearbeitung: W. Sulzer, A. Salentreg



Ausblick

Neubefliegung



- Die **Flugplattform ADAM/ARGUS** von Joanneum Research ermöglicht multisensorale Fernerkundung / Thermalkamera (INFRATEC)
- **Joanneum Research:** Datenaufnahme, Datenübertragung und die Erstellung des Orthobildmosaikes
- **Institut für Geographie und Raumforschung:** Datenanalyse, Interpretation und Darstellung
- **Dieser Workflow dient als Best Practice Beispiel für andere Städte**

An aerial photograph of a large, multi-story building complex, likely a university or government building, with a central courtyard. The building is surrounded by other buildings and greenery. The text "Danke für die Aufmerksamkeit!" is overlaid in the center of the image.

**Danke für die
Aufmerksamkeit!**