

Abbildung 40:
Strahlungstemperaturkarte im Bereich
Hauptplatz am
20. Dezember
(0,6-m-Auflösung)

Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011 – Detailansicht Grazer Hauptplatz
18:52–20:11 MEZ



Temperaturangaben in °C

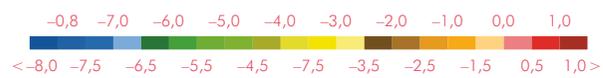


Abbildung 41:
Strahlungstemperaturkarte im Bereich
Messe am
20. Dezember
(0,6-m-Auflösung)

Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011 – Detailansicht „Magna Steyr Fahrzeugtechnik“
18:52–20:11 MEZ



Temperaturangaben in °C

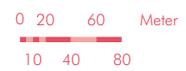
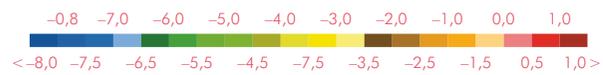


Abbildung 42:
Strahlungstemperaturkarte im Bereich Reininghausgründe am 20. Dezember (0,6-m-Auflösung)

Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011 – Detailansicht Reininghausgründe
18:52–20:11 MEZ



Temperaturangaben in °C

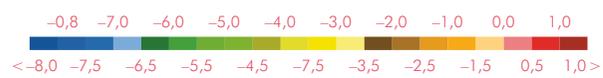


Abbildung 43:
Strahlungstemperaturkarte im Bereich
Bad zur Sonne am
20. Dezember
(0,6-m-Auflösung)

Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011 – Detailansicht Hallenbad „Bad zur Sonne“
18:52–20:11 MEZ



Temperaturangaben in °C

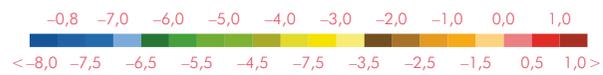


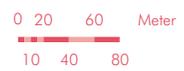
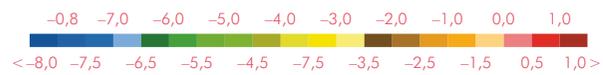
Abbildung 44:
Strahlungstemperaturkarte im Bereich
Stahlwerk Marienhütte am 20. Dezember
(0,6-m-Auflösung)

Strahlungstemperaturkarte Graz

Thermalscanner-Befliegung: 20. Dezember 2011 – Detailansicht Stahlwerk „Marienhütte“
18:52–20:11 MEZ



Temperaturangaben in °C



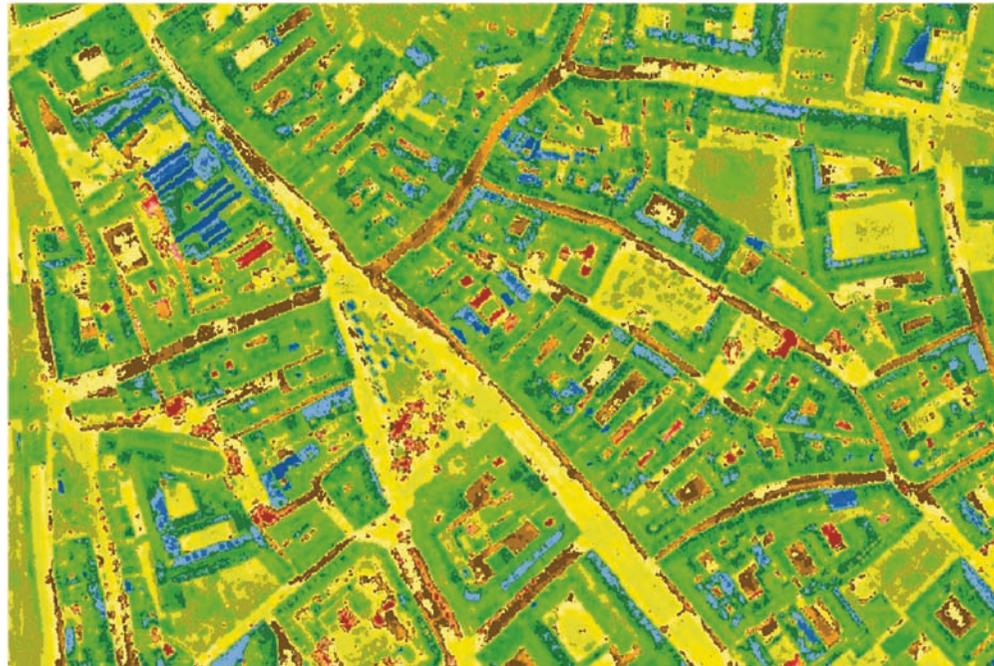
Analyse der Ergebnisse:

Oberflächentemperaturkarten eignen sich hervorragend, um Temperaturverteilungsmuster in bestimmten Siedlungsgebieten zu identifizieren und zu beschreiben. Besonders in Städten ist deutlich zu erkennen, dass unterschiedliche Bebauungsstrukturen ein unterschiedliches Temperaturverhalten aufweisen. Dadurch lassen sich beispielsweise versiegelte Flächen aufgrund ihrer starken Überwärmung sehr gut von anderen Oberflächen unterscheiden. Dieser und weitere Sachverhalte sollen in den folgenden Absätzen dokumentiert werden.

Baukörperstrukturen

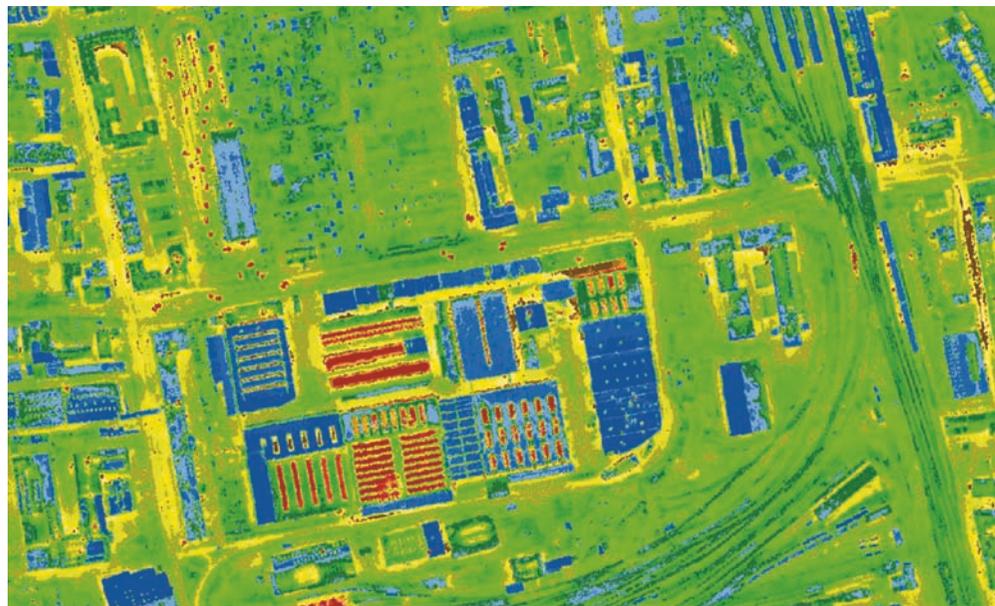
Altstadt: Die Überwärmung des historischen Teils der Stadt Graz durch den hohen Anteil an versiegelten Flächen wird anhand der Oberflächentemperaturkarte eindeutig sichtbar. Gebäude lassen sich gut von Straßenanlagen unterscheiden, da diese Wärme in geringerem Ausmaß zu speichern vermögen. Da die Befliegung in der Vorweihnachtszeit stattfand, sind auch die Christkindlmärkte in der Altstadt gut zu erkennen.

Abbildung 45:
Strahlungstemperaturkarte im Bereich Altstadt
(Hoher Versiegelungsgrad)

**Temperaturangaben in °C**

Gründerzeitliche Bebauung: Im Bereich östlich des Stadtparks lässt sich die charakteristische Struktur der gründerzeitlichen Bebauung sehr gut erkennen. Da es sich bei den Daten um eine Nachtaufnahme handelt, weisen die Dachflächen geringfügig niedrigere Temperaturwerte als die mit Vegetation bedeckten Innenhöfe auf. Als Erklärung hierfür könnte eine raschere nächtliche Abkühlung der Dachflächen im Vergleich zu den Innenhöfen dienen. Dieses Muster der leicht wärmeren Innenhöfe erstreckt sich über das gesamte Stadtgebiet.

Abbildung 46:
Strahlungstemperaturkarte im Bereich von einem Industrie- und Gewerbegebiet



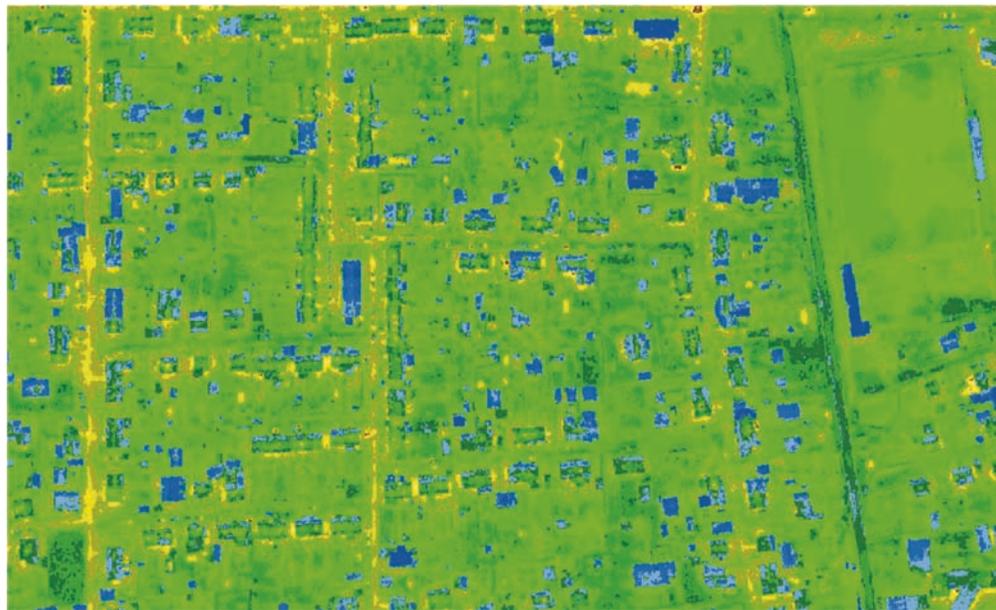
Temperaturangaben in °C



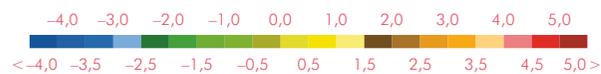
Industrie- und Gewerbeflächen: Industrie- und Gewerbeflächen weisen einen hohen Versiegelungsgrad auf. Prinzipiell sollte das zu einer Überwärmung führen. In der Industriezone westlich des Grazer Hauptbahnhofs wird das anhand der Straßenanlagen deutlich sichtbar. Die Dachflächen erscheinen allerdings deutlich kälter. Das liegt wiederum an den Dachmaterialien (Metalldächer) und der damit verbundenen raschen nächtlichen Auskühlung. Besonders ins Auge stechend ist auch der Wärmeverlust durch Dachfenster. Des Weiteren sind überwärmte Dachflächen ein Indiz für rege Arbeitstätigkeit innerhalb des Industriegebäudes zum Zeitpunkt der Befliegung.

Gartenstadt: Die sogenannte „Gartenstadt“ wird gekennzeichnet durch eine lockere Bebauung mit Ein- und Zweifamilienhäusern und durch einen hohen Grünflächenanteil. In der Oberflächentemperaturkarte weist die Gartenstadt ein relativ heterogenes Erscheinungsbild auf. Straßen und Gebäude können eindeutig von den umliegenden Grünflächen unterschieden werden. Ähnlich wie bei den Innenhöfen in der gründerzeitlichen Bebauungsstruktur sind die Oberflächentemperaturen an Grünflächen aufgrund der geringeren nächtlichen Auskühlung in einer Winternacht geringfügig höher als an Gebäuden.

Abbildung 47:
Strahlungstemperaturkarte – Typus Gartenstadt



Temperaturangaben in °C



Grünflächen und landwirtschaftlich genutzte Flächen

Grünflächen und Parks: In den Sommermonaten haben die innerstädtischen Grünflächen und Parks eine kühlende Wirkung, was besonders durch den Stadtpark verdeutlicht wird. Im Winter ist dieser Effekt allerdings nur bedingt gültig. Bei der vorliegenden Oberflächentemperaturkarte ist zwar erkennbar, dass die Temperaturen in der Innenstadt höher sind als im Stadtpark, allerdings trifft das nicht auf die anderen umliegenden Bebauungsstrukturen zu.

Wiesen- und Ackerflächen: Aufgrund der unterschiedlichen Bewuchsarten bei landwirtschaftlich genutzten Flächen weisen diese eine große Streuung der Oberflächentemperaturen auf. Im vorliegenden Beispiel sind die Ackerflächen wärmer als die Wiesenflächen in der Mitte des Bildausschnitts.

Wälder: Wälder weisen hauptsächlich expositionsbedingte Unterschiede im Temperaturverhalten auf. Nordexponierte Wälder sind in der Regel kälter als tagsüber besonnte Wälder.

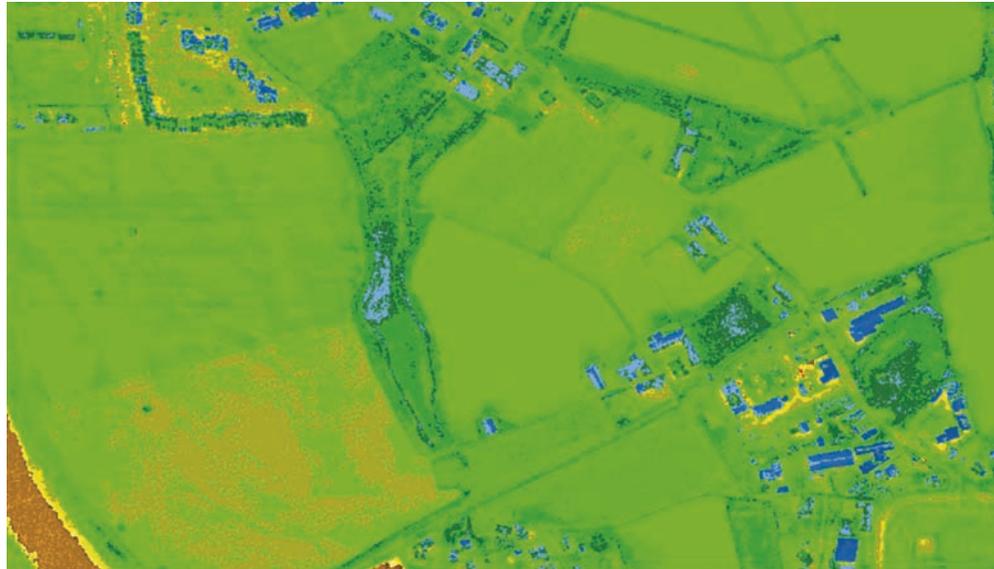
Abbildung 48:
Strahlungstemperaturkarte – der Stadtpark und der Schlossberg im Vergleich zu den umliegenden Gebieten



Temperaturangaben in °C



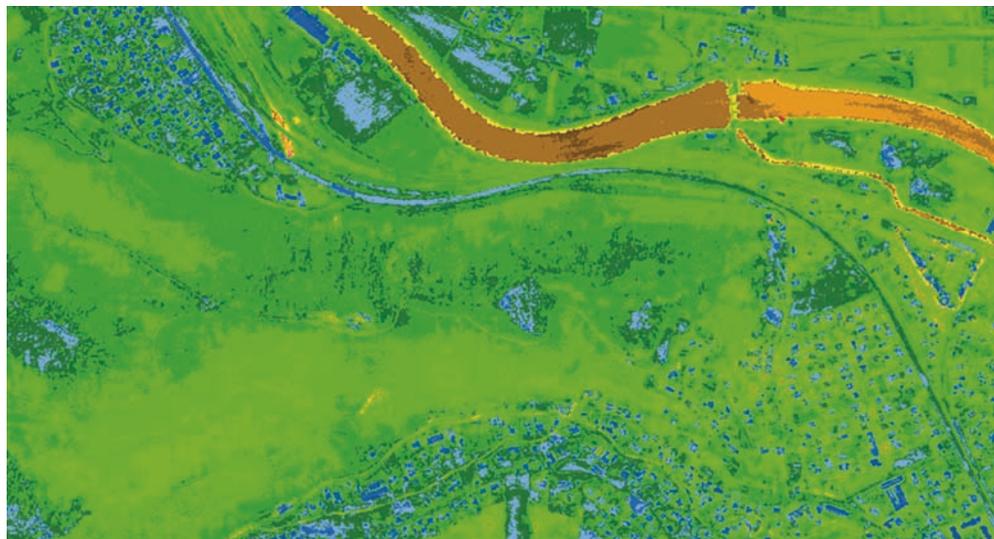
Abbildung 49:
Strahlungstemperatur-
karte – Wiesen- und
Ackerflächen



Temperaturangaben in °C



Abbildung 50:
Strahlungstemperatur-
karte – Einfluss der Ex-
position auf Oberflä-
chentemperaturen von
Wäldern



Temperaturangaben in °C



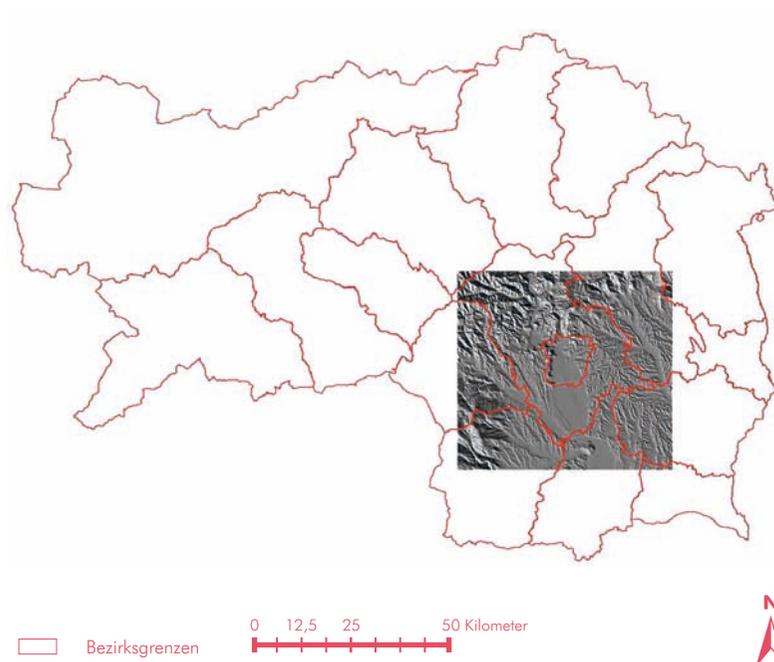
4.6 EINBINDUNG VON LANDSAT-NACHTAUFNAHMEN

Das Beispiel der städtischen Wärmeinsel von Graz sowie die Temperatur-, Wind- und Wetterverhältnisse im Großraum Graz sollen das Potenzial und die vielfältigen Möglichkeiten einer Thermal-Nachtaufnahme darbieten. Anhand der LANDSAT-Thermal-Nachtaufnahme vom 20. August 2000 wurde zuerst eine Strahlungstemperaturkarte erstellt und diese anschließend ausgewertet. Da LANDSAT-Aufnahmen systembedingt nur Tagesaufnahmen macht, muss hier auf historische Daten zurückgegriffen werden. Die Arbeiten wurden im Rahmen einer Seminararbeit von Christian Stiegler durchgeführt.

Der geographische Untersuchungsraum wurde so gewählt, dass der Zentralraum Graz annähernd den geographischen Mittelpunkt darstellt. Das Gebiet erfasst ebenfalls die urbanen Räume Weiz, Gleisdorf, Voitsberg, Köflach, Gratkorn sowie Gratwein. Als nordwestliche Begrenzung wurde die Gleinalm gewählt, als südliche der Wildoner Buchkogel. Abbildung 51 zeigt die genaue Lage des Untersuchungsgebietes.

Für die Analyse der städtischen Wärmeinsel sowie die Darstellung der Temperaturverhältnisse im Großraum Graz steht als zentrales Datenmaterial eine LANDSAT-Nachtaufnahme der Steiermark mit dem Aufnahmezeitpunkt von 22:30 Uhr MEZ zur Verfügung. Der verwendete Thermalbereich im Kanal 6 liegt zwischen 10,4 und 12,5 μm , die räumliche Auflösung beträgt 60 mal 60 Meter und die radiometrische Auflösung wird mit 8 Bit angegeben. Des Weiteren findet ein digitales Höhenmodell der Steiermark Verwendung.

Abbildung 51:
Lage der LANDSAT-
Nachtaufnahme



Meteorologische Messdaten/Wetterlage: Für den Aufnahmezeitpunkt vom 20. August 2000 stehen zusätzlich Messdaten der Lufttemperatur, der Windgeschwindigkeit, des Niederschlags, der relativen Luftfeuchte und des Luftdrucks der Stationen Graz Universität, Laßnitzhöhe, St. Radegund und Schöckl zur Verfügung. Außerdem liegen Daten von Sondenaufstiegen am Flughafen Graz Thalerhof vor. Laut Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG (2009) herrscht im Alpenraum vom 18. bis zum 21. August 2000 schwacher Hochdruckeinfluss mit flacher Druckverteilung. Diese gradientschwache Lage G sorgt außerdem für Zufuhr heißer Luft aus Südwest und damit verbunden sehr hohen Temperaturen, welche am 20. August 2000 um 15 Uhr MESZ in Graz den Höchstwert von 34,8 °C erreichen.

Erstellung Strahlungstemperaturkarte: Als Ausgangsprodukt für eine spätere Darstellung des Potenzials einer nächtlichen Thermalaufnahme dient eine Strahlungstemperaturkarte. Da der Sensor am Satelliten die Oberflächentemperatur anhand der empfangenen Strahlung misst und diese zuerst die Atmosphäre durchdringen muss und dabei Veränderungen bzw. Streuung oder teilweiser Absorption unterzogen ist, wird eine Atmosphärenkorrektur durchgeführt. Mit Hilfe der Funktion „Haze Reduction“ in ERDAS IMAGINE werden dabei die atmosphärischen Einflüsse herausgefiltert. Das Histogramm der Aufnahme zeigt nach der Korrektur eine Verteilung der Pixelwerte im Bereich zwischen ca. 108 bis 140.

Die Umrechnung der Temperatur erfolgt in mehreren Schritten und orientiert sich im Wesentlichen an die Ausführungen von STRATHOPOULOU und CARTALIS (2007). Zuerst wird der jeweilige Pixelwert (DN) des Kanals 6 der LANDSAT-Nachtaufnahme in die Spektralstrahlung L umgewandelt. Dies erfolgt mit folgender Formel:

$$L = 0,0370588 \cdot DN + 3,2$$

L = Spektralstrahlung (Wm-2sr-1µm-1)

DN = digital number, jeweiliger Pixelwert des Grauerthistogramms

Anschließend erfolgt die Umwandlung der Spektralstrahlung in die vom Satellitensensor gemessene Strahlungstemperatur (BT) mit der Formel:

$$BT = \frac{K_2}{\left\{ \ln \left(\frac{K_1}{L} + 1 \right) \right\}}$$

Wobei:

BT = am Satellitensensor gemessene Strahlungstemperatur (in Kelvin)

K2 = Kalibrationskonstante von LANDSAT 7 (1282,71 Kelvin)

K1 = Kalibrationskonstante von LANDSAT 7 (666,09 Wm-2sr-1µm-1)

L = Spektralstrahlung am Satellitensensor (Wm-2sr-1µm-1)

Die Umrechnung der Strahlungstemperatur von Kelvin in Grad Celsius erfolgt durch:

$$T(^{\circ}C) = - 273,15 + T \text{ K}$$

Die somit erhaltene Strahlungstemperatur dient als Basis für weitere Analysemöglichkeiten und liegt im Untersuchungsgebiet im Bereich von 9,5 bis 19,2°C.

Anschließend wurde mit Hilfe des „Knowledge Engineer“ die Strahlungstemperatur in 16 Klassen unterteilt. Daraus erfolgte eine Generierung der Strahlungstemperaturkarte, welche in Abbildung 52 dargestellt ist. Die Farbdarstellung mit Hilfe von assoziativen Farben stellt sich jedoch als wenig zufriedenstellend dar und im Vergleich zur Grauwertdarstellung können Temperaturunterschiede visuell nicht mehr so gut wahrgenommen werden. Deshalb erfolgte eine Einschränkung des Untersuchungsraums auf die Stadt Graz. Außerdem wurde die Klassenanzahl von ursprünglich 16 auf sieben Klassen reduziert. Das Ergebnis ist in Abbildung 54 dargestellt und zeigt deutlich einen Informationsgewinn gegenüber Abbildung 52; Abbildung 53 und Abbildung 55 zeigen gegenübergestellt eine Grauwertdarstellung des Untersuchungsgebiets.

Abbildung 52:
Strahlungstemperatur-
karte Untersuchungs-
gebiet

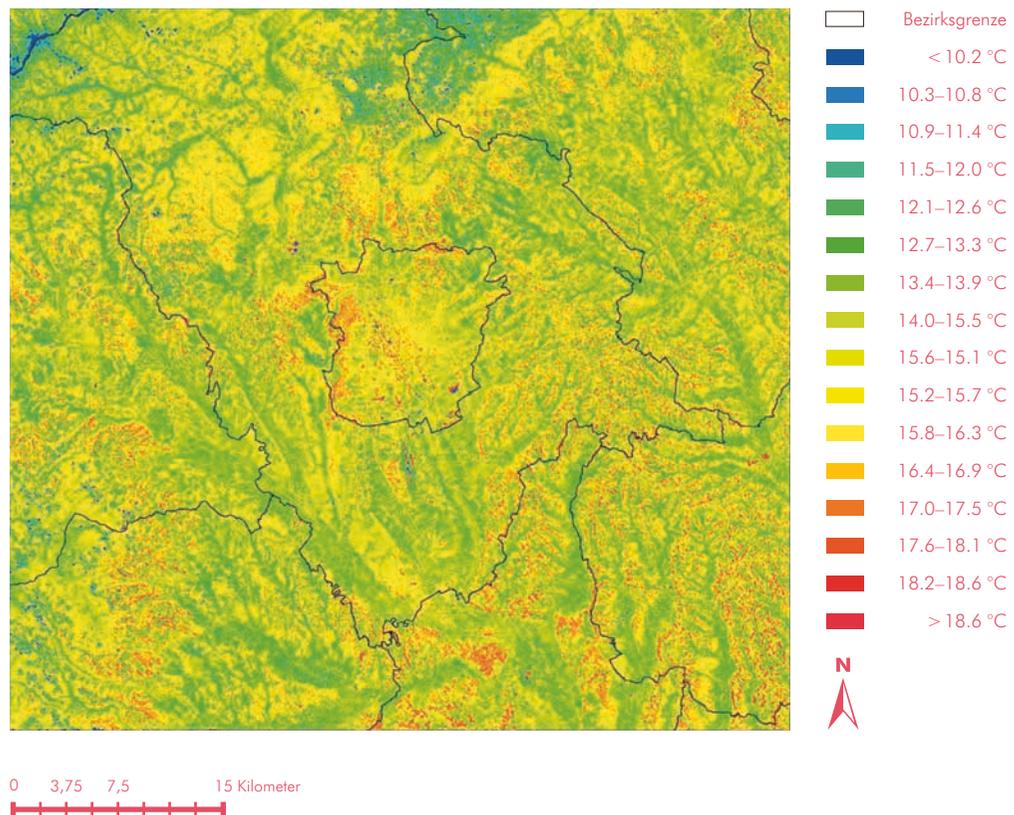
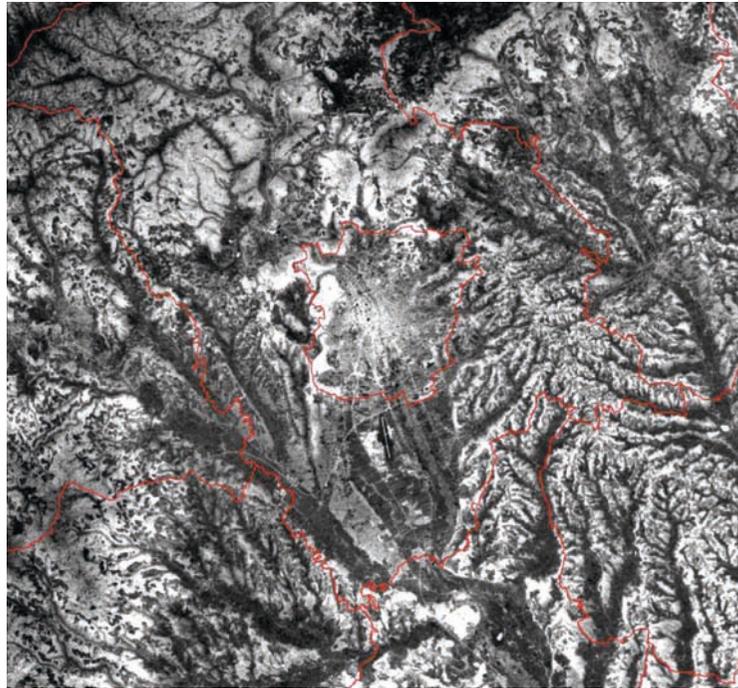


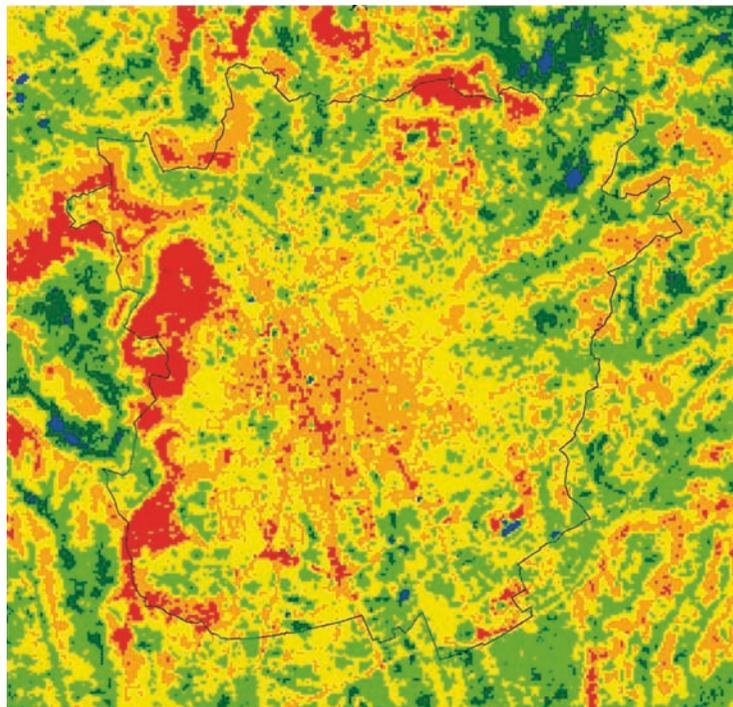
Abbildung 53:
Grauwertdarstellung
Untersuchungsgebiet



Bezirksgrenze



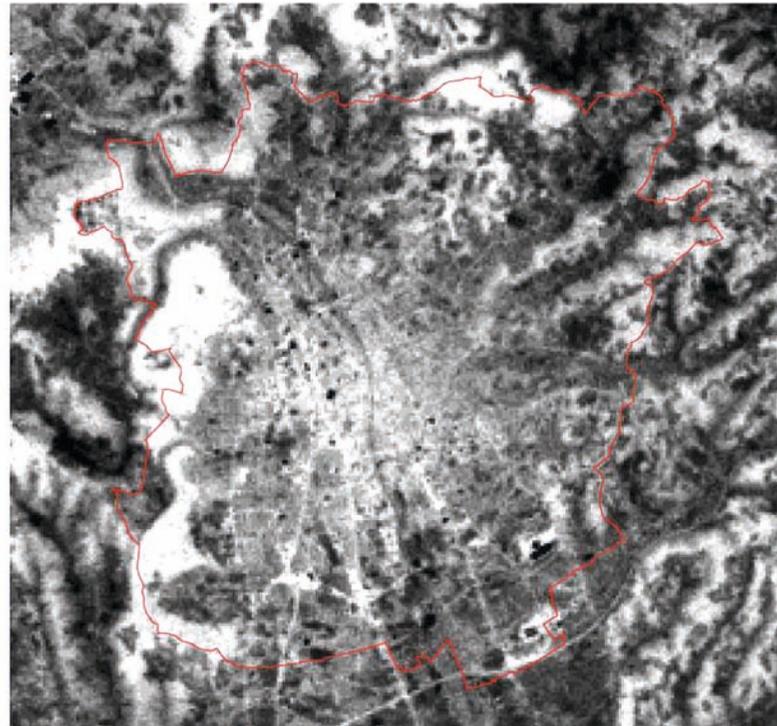
Abbildung 54:
Strahlungstempera-
turkarte Graz



- Stadtgrenze
- < 10.6 °C
- 12.7–13.6 °C
- 13.7–14.5 °C
- 14.6–15.4 °C
- 15.5–16.3 °C
- 16.4–17.2 °C
- > 17.2 °C



Abbildung 55:
Grauwertdarstellung
Graz



□ Bezirksgrenze

0 1,5 3 6 Kilometer

Die Strahlungstemperatur ist jene Temperatur, die ein schwarzer Körper in der Wellenlänge von $11,5 \mu\text{m}$ ausstrahlt. Die jedoch nicht einheitliche Emissivität der Landoberfläche erfordert eine zusätzliche Korrektur, aus der anschließend eine Oberflächentemperatur generiert wird. Dabei ist die Einbeziehung der unterschiedlichen Ausstrahlung der verschiedenen Landbedeckungsarten entscheidend. Die Werte der Oberflächenemissivität sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9:
Mittlerer Emissionsgrad
verschiedener Ober-
flächen
(Quelle: Strathopoulou
& Cartalis, 2007,
Triebnig-Löffler, 1992)

OBERFLÄCHE	MITTLERER EMISSIONSGRAD ϵ
Wasser	0,993
Vegetation, Wald- und Wiesenflächen, Ackerflächen	0,980
Dichte städtische Verbauung	0,946
Lockere städtische Verbauung	0,964
Verkehrs- und Industrieflächen	0,950

Die Oberflächentemperatur T_s berechnet sich wie folgt:

$$T_s = \frac{BT}{\left\{ 1 + \left[\frac{\lambda \cdot BT}{\rho} \cdot \ln \epsilon \right] \right\}}$$

Wobei:

T_s = Oberflächentemperatur (in Kelvin)

BT = am Satellitensensor gemessene Strahlungstemperatur (in Kelvin)

λ = die Wellenlänge der emittierten Strahlung (11,5 μm)

r = $1,438 \cdot 10^{-2}$ m K

e = mittlerer Emissionsgrad

Die Umrechnung der Oberflächentemperatur von Kelvin in Grad Celsius erfolgt durch:

$$T(^{\circ}\text{C}) = T_s - 273,5$$

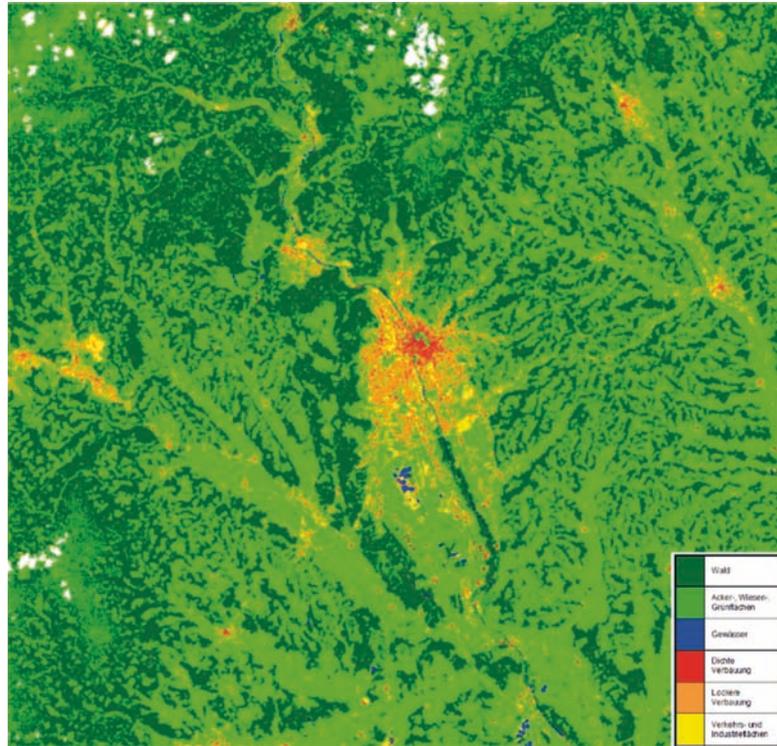
Die nun berechnete Temperatur spiegelt jene der unterschiedlichen Oberflächen wider und liegt im Bereich von 10,0 bis 23,1 $^{\circ}\text{C}$. Für klimageographische Fragestellungen ist die Umrechnung von Strahlungs- in Oberflächentemperaturen nicht zwingend notwendig, da eine Darstellung relativer Werte durch ein Grauwertbild für die Analyse der Verteilung von Temperaturmustern ausreichend ist.

Bodenbedeckungskarte: Um eine Interpretation der Strahlungstemperatur zu ermöglichen, wurde zusätzlich eine Bodenbedeckungskarte generiert. Dabei findet eine Unterteilung des Untersuchungsgebiets in folgende sechs Klassen statt:

- Wasserflächen
- Wald
- Grün-, Acker- und Wiesenflächen
- dichte städtische Verbauung
- lockere (städtische) Verbauung
- Verkehrs- und Industrieflächen

Abbildung 56 zeigt die Bodenbedeckung im Untersuchungsgebiet. Das Ergebnis deckt sich in guter Näherung mit einer visuellen Interpretation.

Abbildung 56: Bodenbedeckungskarte des Untersuchungsgebiets



Einbeziehung zusätzlicher Daten: Die thermale Bildaufnahme ist ein mögliches Instrument der Untersuchung von klimageographischen Fragestellungen. Jedoch ist ihre Aussagefähigkeit bzw. die Interpretation der gewonnenen Daten nur im Zusammenhang mit weiteren Parametern, Analysen und Datenmaterialien sinnvoll. Die Meteorologie liefert in dieser Beziehung wichtige Zahlen, da sie die Temperatur direkt am Boden messen kann bzw. auf ein breites Netz an Messstationen zurückgreift. In-situ-Messungen der Lufttemperatur, Windverhältnisse, des Luftdrucks sowie der Luftfeuchtigkeit sind ebenfalls ein wichtiges Instrument.

Eine zusätzliche Informationsquelle stellen Messungen mit einem sogenannten Bandstrahlungs-pyrometer dar. Dieses Gerät misst die von einem Objekt ausgesendete Strahlung in einem Spektralbereich von ca. 8 bis 20 μm . Der Pyrometer ermöglicht eine Kontrolle der vom Satellitensensor berechneten Strahlungstemperatur mit Hilfe von thermalen Passpunkten. Diese In-situ-Messungen werden häufig an Gewässern durchgeführt. Gewässer, besonders Flüsse, reagieren thermal sehr träge, d. h., dass die Oberflächentemperatur sich im Laufe eines Tages nur geringfügig ändert. Der Pyrometer zeigt punktuell die Oberflächentemperatur des gemessenen Objektes bzw. der gemessenen Oberfläche an und gibt somit Aufschluss über die Abweichung zwischen gemessener Strahlungstemperatur am Boden und aufgezeichneter Temperatur vom Satellitensensor. Laut WENG (2009, S. 339) gestaltet sich die Generierung re-

präsentativer thermaler Passpunkte für stadtklimatologische Analysen schwierig. Begründet wird dies durch die Komplexität der städtischen Strukturen. Außerdem stellen In-situ-Messungen meist nur eine tägliche Variabilität der Temperaturen dar und nicht eine saisonale oder langjährige.

Information über womöglich herrschende Inversionswetterlagen geben Sondenaufstiege, welche ein vertikales Profil der Atmosphäre erstellen. Ihre Miteinbeziehung in die Analyse der Thermalaufnahme ermöglicht bestimmte Temperaturanomalien besser sichtbar zu machen sowie deren Magnitude und geographische Ausbreitung festzustellen. **Abbildung 57** zeigt einen Sondenaufstieg vom 20. August 2000.

Ohne die Einbeziehung meteorologischer Messdaten sowie In-situ-Messungen besteht bei satellitengenerierten Strahlungstemperaturkarten mit großer Wahrscheinlichkeit eine hohe Fehleranfälligkeit und gefährdet somit eine verlässliche Aussage bzw. Interpretation von verschiedenen Parametern. Des Weiteren spielt die Bodenbedeckung eine entscheidende Rolle. Die unterschiedliche Emissivität einzelner Oberflächen wirkt sich auch auf die Darstellung der Strahlungstemperatur aus. Oberflächen mit hohem Reflexionsgrad erzeugen dementsprechend höhere Strahlungstemperaturwerte, jene mit geringem Reflexionsgrad hingegen bewirken u. a., dass im Bild sogenannte „kalte oder schwarze Flecken“ auftauchen. Speziell Oberflächen aus Metall wie z. B. Aluminium, Blech oder Kupfer können aufgrund ihres niedrigen Emissionsgrades solche Flecken in der Darstellung erzeugen. Am Beispiel des Untersuchungsgebietes lässt sich dies exemplarisch im Südosten des Grazer Stadtgebietes darstellen. Ohne die Generierung einer Bodenbedeckungskarte bzw. ohne vorhandene Kenntnis über die landschaftliche Nutzung der Oberfläche sind Interpretationen der Strahlungstemperatur nicht aussagekräftig und führen zu Fehldarstellungen. Als wichtige Informationsquelle dient auch die Landnutzungsklassifizierung des CORINE-Programms (Coordination of Information on the Environment). Die EU-weit einheitliche Klassifizierung ermöglicht einen besseren Vergleich von Daten untereinander und gewährt einen detaillierten Einblick in die Nutzung der Erdoberfläche. Somit findet sie auch für klimageographische Fragestellungen Verwendung.

Einbindung von MODIS-Aufnahmen

Die Daten des MODIS-Radiometers können von der Homepage des „Land Processes Distributed Active Archive Center“ (LP DAAC) <https://lpdaac.usgs.gov/> bezogen werden. Der verwendete Datensatz wird unter dem Begriff „MOD11A1“ bzw. „MODIS LST Night 1 km“ zusammengefasst. Er deckt ein Gebiet von 1100 mal 1100 Kilometern mit einer räumlichen Auflösung von einem Kilometer im Nadir ab. Die verwendete Szene stammt vom 1. August 2003.

Vergleich zwischen LANDSAT- und MODIS-Daten: Um das Potenzial einer LANDSAT-Thermal-Nachtaufnahme darstellen zu können, wurde ebenfalls eine MODIS-Thermal-Nachtaufnahme untersucht. Sie verfügt über eine räumliche Auflösung von einem Kilometer im Nadir und stammt vom 1. August 2003. Laut ZAMG (2010) herrschte zu diesem Zeitpunkt eine gradientenschwache Wetterlage mit geringen Druckunterschieden über Mitteleuropa. Feuchtlabile Luft lagerte über Österreich und der Tag verlief eher bewölkt mit lokalen Schauern oder Strichregen bei maximal 19 bis 31 °C.

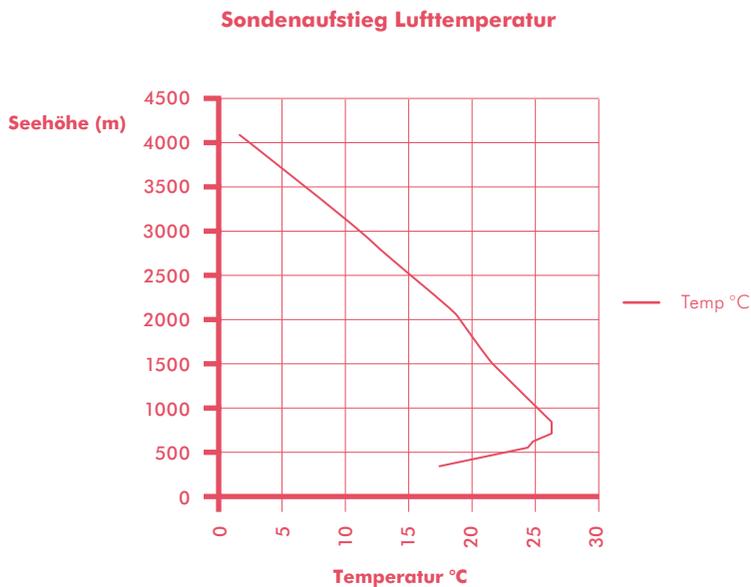
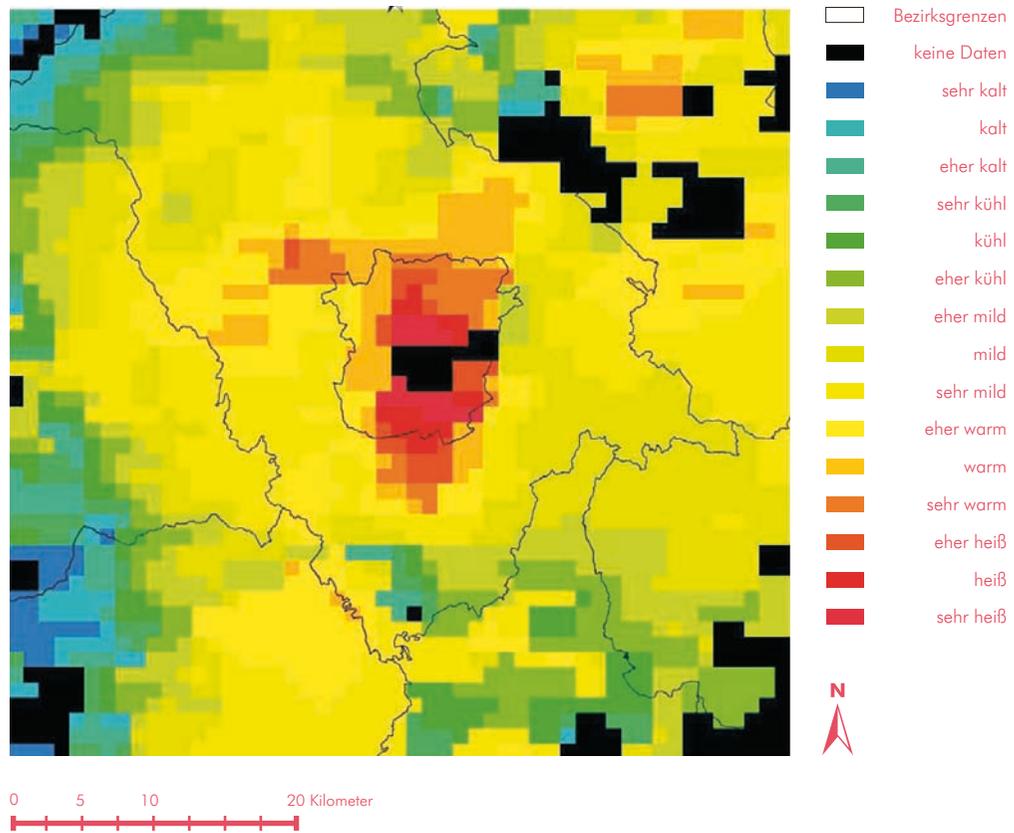


Abbildung 57:
Sondenaufstieg
vom 20. August

Die MODIS-Daten wurden zu Beginn einer atmosphärischen Korrektur unterzogen und anschließend das Untersuchungsgebiet in 16 Klassen eingeteilt. Das Stadtgebiet von Graz wurde in 8 Klassen unterteilt. Auf die Umrechnung der Grauwerte in Strahlungstemperaturwerte wurde verzichtet, da erstens keine meteorologischen Messdaten über diesen Zeitpunkt zur Verfügung stehen und zweitens eine Temperaturdarstellung bei einer räumlichen Auflösung von einem Kilometer bei der geringen Größe des Untersuchungsgebietes als wenig sinnvoll erachtet wird. Außerdem gestaltet sich die Umrechnung der Grauwerte in Temperaturwerte als schwierig. Primär soll aus der visuellen Interpretation die Temperaturdifferenz zwischen Stadt und dem Umland ersichtlich werden und das Potenzial einer LANDSAT-Thermal-Nachtaufnahme gegenüber den MODIS-Daten darstellen. Abbildung 58 zeigt die Darstellung des Untersuchungsgebietes mit assoziativen Farben. Die visuelle Interpretation der Daten zeigt, dass das Stadtgebiet von Graz eine Erwärmung gegenüber seinem Umland aufweist. Die Temperaturen innerhalb des Stadtgebietes sind die höchsten im gesamten Untersuchungsgebiet. Kühlere Regionen sind die Gleinalm sowie an der Grenze zu Kärnten. Schwarze Flecken im Bild sind eventuell zurückzuführen auf mögliche Bewölkung. Sie stören das Bild, da auch mitten im Grazer Stadtgebiet ein solcher schwarzer Fleck vorhanden ist.

Die räumliche Auflösung von einem Kilometer lässt keine Rückschlüsse auf kleinräumige Temperaturunterschiede zu. Lokale Kaltluftseen oder Windsysteme sind nicht mehr erkennbar und zeigen somit deutlich das Potenzial der LANDSAT-Thermal-Nachtaufnahme gegenüber dieser MODIS-Thermal-Nachtaufnahme.

Abbildung 58:
Untersuchungsgebiet
MODIS-Thermaldaten



5. VERGLEICHENDE ANALYSE DER THERMALBEFLIEGUNGEN 1986 – 1996 – 2004 – 2011

5.1 DATENGRUNDLAGEN

Die Befliegung des Grazer Stadtgebietes mit Thermalscannersystemen ist ein Unterfangen, welches mittlerweile einen beeindruckenden Zeitraum abdeckt. Der Datenbestand, welcher in Abbildung 1 näher beschrieben ist, bildet die Basis dieser Arbeit.

Abbildung 1:
Datenbestand

Aufnahmezeit	1986	1996	2004	2011
Sensor	DAEDALUS	DAEDALUS	DAEDALUS	TABI 1800
Vormittag	X			
Mittag	X	X	X	
Nacht	X			X

Die Aufgabenstellung liegt nun in der Erstellung einer vergleichenden Analyse der einzelnen Datensätze. Bevor diese Herausforderung in Angriff genommen werden kann, muss zu Beginn eine kritische Durchsicht des Datenbestandes erfolgen.

FOLGENDE PUNKTE WURDEN BEI DIESER UNTERSUCHUNG ÜBERPRÜFT:

Genauigkeit der geometrischen Entzerrung

Projektion der einzelnen Befliegungen

Abdeckung des Stadtgebietes (Datenlücken)

Radiometrische Qualität

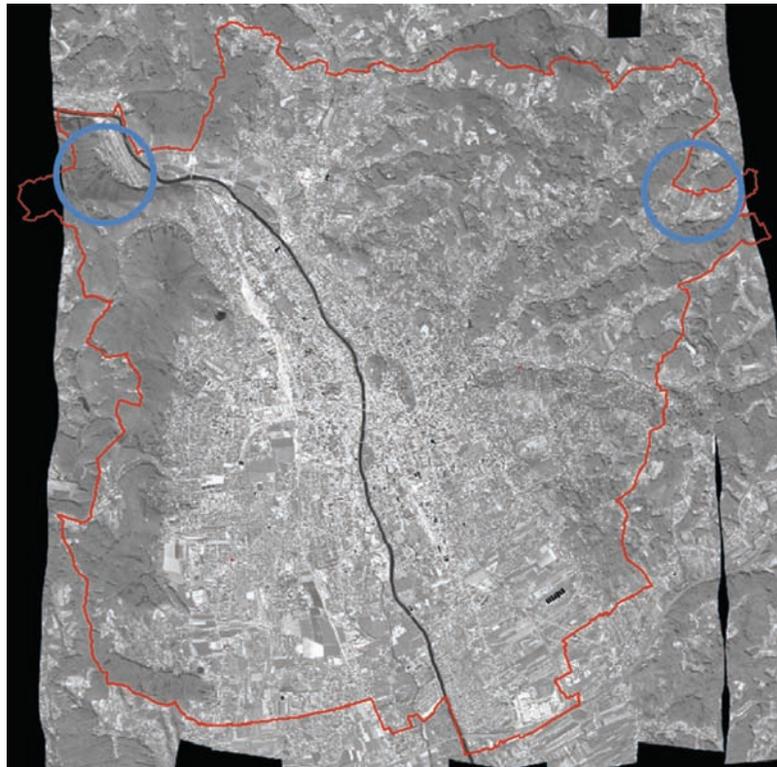
Verzerrungen

Geometrische Auflösung

Aufnahmedatum

Thermalsscannerbefliegung 1986: Die Befliegung von 1986 bildet auf Grund der Chronologie den Ausgangsdatensatz der vergleichenden Analyse. Wie in Abbildung 1 ersichtlich, ist der Datensatz aus diesem Jahr der einzige, welcher über eine „komplette“ tageszeitliche Abdeckung verfügt. Die Untersuchung der Daten auf Basis der 6 Punkte der oben beschriebenen Aufzählung ergab einige Problembereiche. Die größte Schwierigkeit stellt die bereits in diesem Datensatz auftretende Inhomogenität der geometrischen Entzerrung dar. Besonders offensichtlich treten diese Effekte an Hängen auf. Auch innerhalb der mittelalterlichen und gründerzeitlichen Verbauung sind diese Lagefehler deutlich sichtbar, weiters bietet auch die Mur eine gute Möglichkeit diese Effekte zu erkennen. Auch der Vergleich zur DAEDALUS-Befliegung 2004 und dem UltraCam-Orthophotomosaik von 2007 zeigt diese Problematik. Der Datenbestand lag in der Gauss-Krüger-Projektion-M34, mit dem geodätischen Datum MGI Hermannskogel vor. Die vollständige Abdeckung des Stadtgebietes ist für die Mittagsaufnahme nicht gegeben (Abbildung 2). Die radiometrische Qualität ist als durchgehend sehr gut zu bewerten.

Abbildung 2:
Datenlücken Mittags-
situation 1986

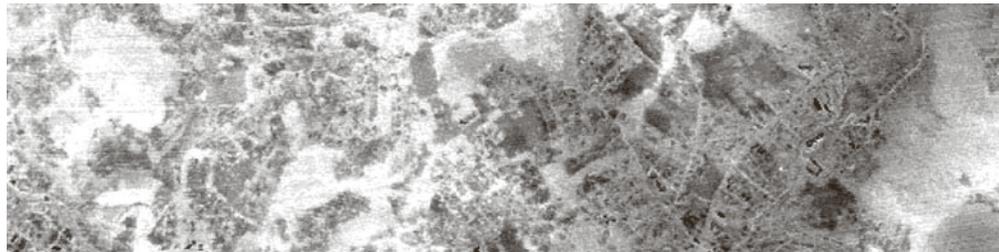


Als weiterer negativer Faktor fallen die Verzerrungen in den Daten auf, welche im Rahmen der Entzerrung offensichtlich nicht behoben werden konnten. Weiters weisen die Morgen- und Nachtsituation ein teilweise deutliches West-Ost-Striping auf.

Abbildung 3:
Verzerrungen im
südlichen Bereich
des Hauptbahnhofes
(Morgensituation)



Abbildung 4:
Striping (Morgensituation)



Diese Tatsachen sind aber nicht auf mangelnde Sorgfalt bei der Entzerrung zurückzuführen, sondern auf die Datenausgangssituation (bei der Befliegung kein GPS+INS). Die geometrische Auflösung der drei Datensätze liegt bei 5 Metern. Aufgenommen wurde am

02.10.1986, 21:57–23:32 Nachtsituation

03.10.1986, 05:05–06:28 Morgensituation

03.10.1986, 12:47–14:20 Mittagsituation

Thermalscannerbefliegung 1996: Auf Grund der Tatsache, dass für die Befliegung von 1996 keine Oberflächentemperaturdaten als Referenzdaten zur Verfügung standen, wurde auf die Verwendung des Datensatzes von 1996 verzichtet. Zudem wurden die Originalwerte des thermalen Kanals verändert und für eine optimale Darstellung gespreizt. Dadurch ist es unmöglich, klimatologische Aussagen zu treffen.

Thermalscannerbefliegung 2004: Die Befliegung von 2004 stellt die aktuellste Variante einer Thermalscannerbefliegung für die Mittagssituation dar. Somit ergibt sich eine Zeitspanne für die Vergleichbarkeit von 18 Jahren. Die Genauigkeit der geometrischen Entzerrung ist als sehr gut zu bezeichnen. Als Referenz kam ein Orthofotomosaik der UltraCam-Befliegung von 2007 zum Einsatz. Der Datenbestand lag in der Gauss-Krüger-Projektion-M34, mit dem Geodätischen Datum MGI Hermannskogel vor.

Abbildung 5:
Datenlücken 2004,
Mittagsituation

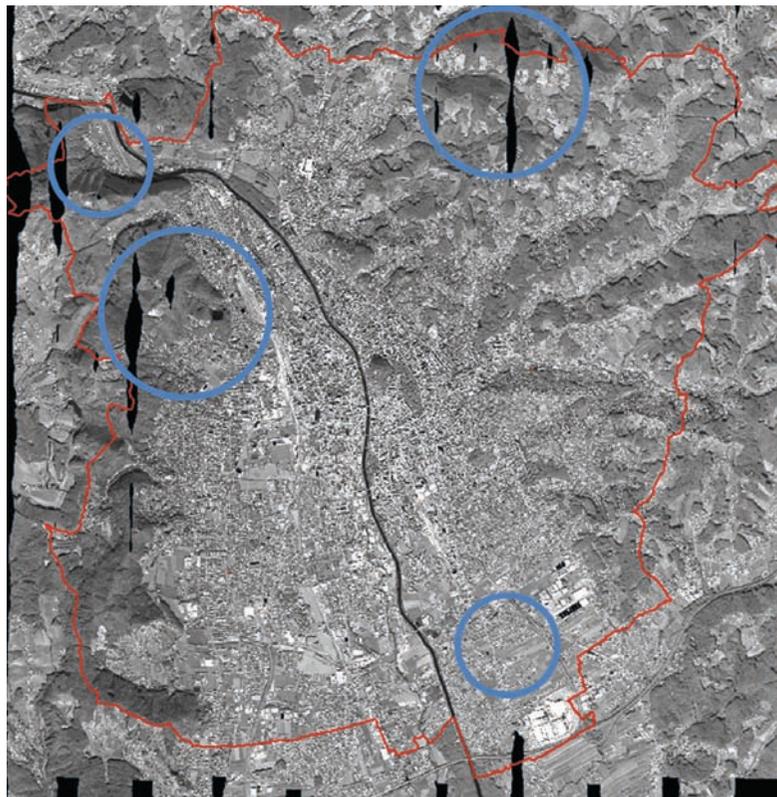


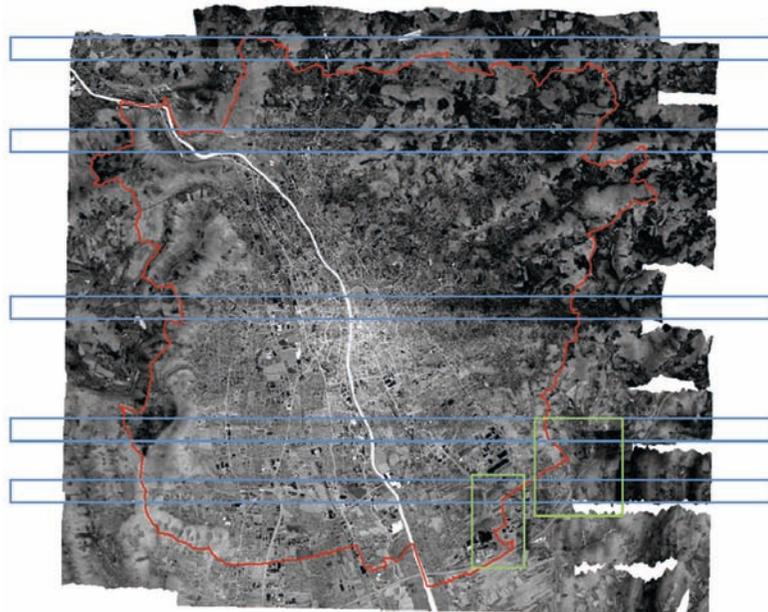
Abbildung 5 veranschaulicht die markanten Datenlücken mit Nord-Süd-Ausrichtung. Radiometrisch betrachtet sind die Daten von 2004 auf einem sehr guten Niveau. Auch Verzerrungen oder Striping-Effekte sind nicht vorhanden. Die geometrische Auflösung liegt bei 1 Meter. Aufgenommen wurde am 24.10.2004, 12:02–14:15.

Thermalscannerbefliegung 2011: Im Unterschied zu den restlichen Befliegungen kam 2011 ein neuer Sensor (TABI 1800 Thermal Airborne Broadband Imager) zum Einsatz. Die Genauigkeit der geometrischen Entzerrung ist als sehr gut zu bezeichnen. Als Referenz dient auch für diesen Vergleich das UltraCam-Orthofotomosaik von 2007. Die Abdeckung des Stadtgebietes konnte flächendeckend erfüllt werden. Die Untersuchung der radiometrischen Qualität brachte einige Problemstellen ans Licht, welche in der Folge genauer beschrieben werden.

1. Sichtbare Cutlines (verlaufen jeweils in der Mitte der blauen Box)

2. Striping Effekte in homogenen Flächen (grüne Box)

Abbildung 6:
Radiometrie Problem-
bereiche



Auf Grund dieser Fehler wurden die von der Firma AVT gelieferten Flugstreifen einzeln untersucht. So konnte ausgeschlossen werden, dass die Fehler bei der Erstellung des Mosaiks entstanden sind. Des Weiteren wurde auch der Überlappungsbereich der Flugstreifen untersucht. Die Basisüberlegung für diese Überprüfung war, dass in einem optimalen Szenario mit perfekt radiometrisch kalibrierten Flugstreifen (X und Y) die Subtraktion des Überlappungsbereiches den Wert Null erreichen müsste.

Ausgehend von diesem optimalen Szenario ist natürlich zu erwähnen, dass der zu erwartende Wert sich gegen null einstellen sollte, aber wahrscheinlich nicht null selbst erreicht. Bezogen auf das gesamte Stadtgebiet wären hier Werte von $\pm 0,45$ K (Kelvin) schon die obere Grenze des Toleranzbereiches.

FÜR DIESE UNTERSUCHUNG WURDE FOLGENDER WORKFLOW ANGEWANDT:

Import der gelieferten Flugstreifen (.hdr zu .img)

Subtraktion der Bildstreifen

Teilausschnitt des Überlappungsbereiches

Klassifikation

Abbildung 7:
Temperaturdifferenzen der Überlappungsbereiche in Kelvin

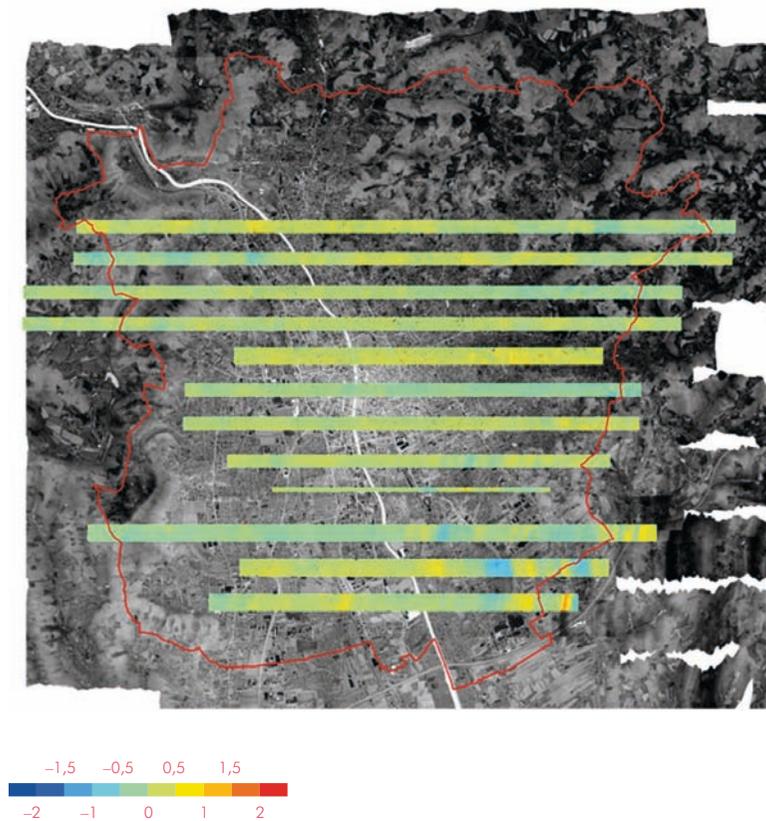
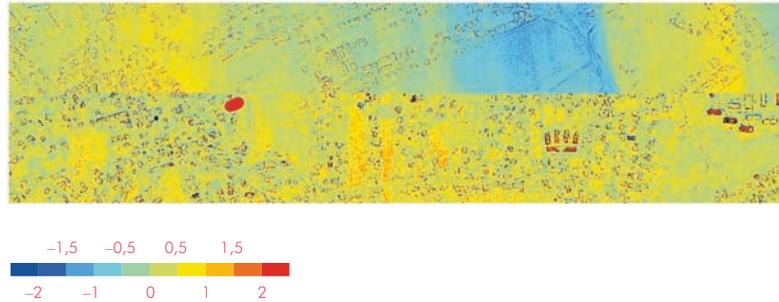


Abbildung 7 zeigt eindeutig, dass diese Werte in vielen Bereichen nicht erreicht werden. Abbildung 8 zeigt zwei Überlappungsbereiche im Detail.

Abbildung 8:
Temperaturdifferenzen der Überlappungsbereiche im Detail in Kelvin



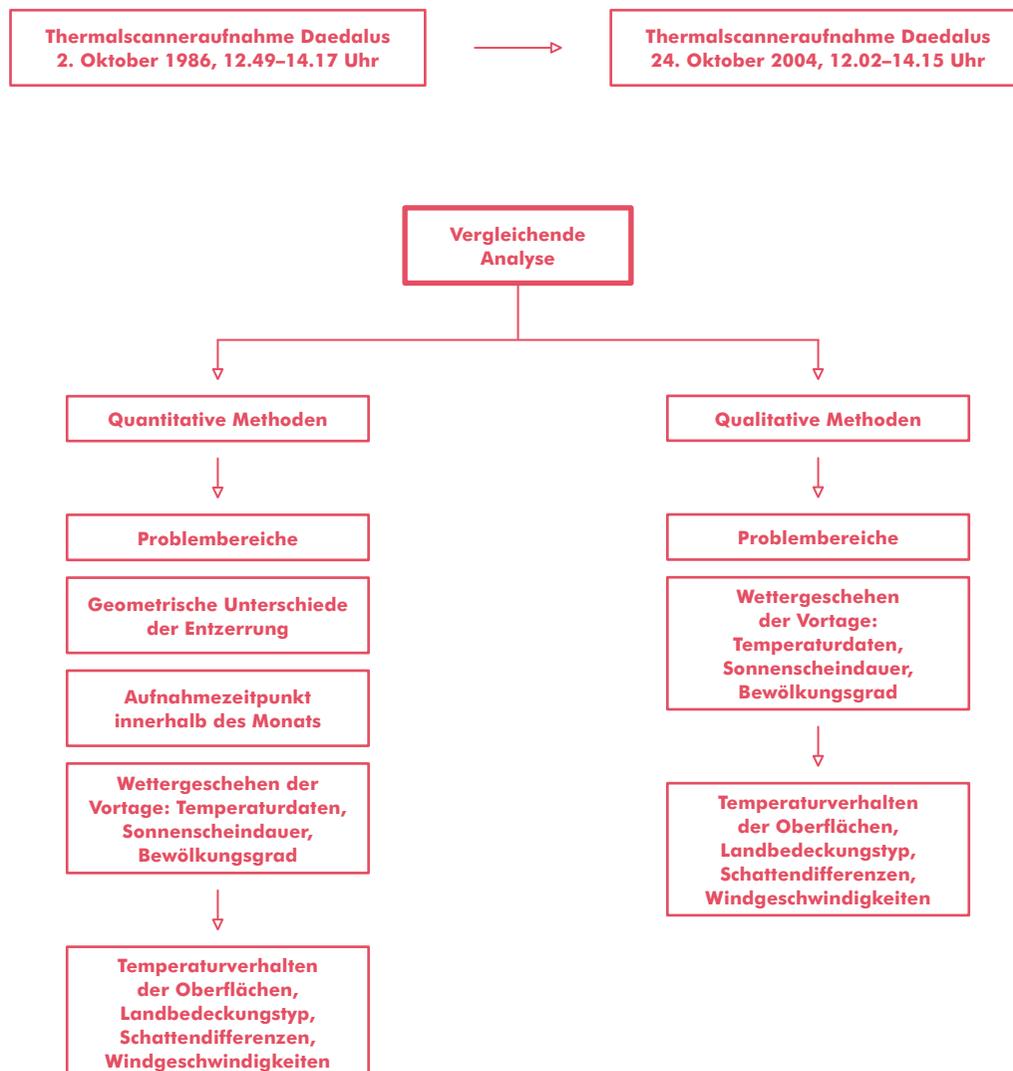
Diese radiometrischen Fehler haben somit sehr große Auswirkung auf die Verwendbarkeit der Daten. So sind zum Beispiel Ableitungen aus den Daten, welche zu Aussagen über das gesamte Stadtgebiet liefern sollen, nicht zulässig. Die Darstellung der Temperaturwerte in einer Karte für das Stadtgebiet ist zwar möglich, verlangt aber vom Kartennutzer, die eben beschriebenen Fakten beim Betrachten bzw. bei der Interpretation dringlichst zu beachten. Der Datenbestand lag in der Gauss-Krüger-Projektion-M34, mit dem geodätischen Datum MGI Hermannskogel vor. Die geometrische Auflösung liegt bei 0,6 Meter. Aufgenommen wurde am 20.12.2012, 18:52–20:51.

5.2 MÖGLICHKEITEN DER VERGLEICHBARKEIT

Nachdem das komplette Datenmaterial hinsichtlich der 7 Punkte untersucht wurde, muss nun überlegt werden, welche Vergleiche möglich und zulässig sind

und auch welche Methoden zum Einsatz kommen sollen. Einen Teil dieser Überlegungen zeigt Abbildung 9.

Abbildung 9:
Vergleichbarkeit



In dieser schematischen Darstellung sind Überlegungen zur Methodik und die Problembereiche für einen Vergleich der Mittagssituation von 1986 und 2004 visualisiert. Speziell zu erwähnen ist hier die Tatsache, dass sich diese beiden Datensätze auf Grund des Aufnahmedatums noch am besten für einen Vergleich eignen. Die Auflistung der Problembereiche zeigt deutlich, wie komplex die Zusammenhänge sind, welche in Anschluss beschrieben werden.

Die erste Aussage, die getroffen werden kann, ist jene, dass ein quantitativer Vergleich der Datensätze nicht zulässig ist. Der primäre Grund ist die Tatsache, dass die geometrische Entzerrung des Bildmaterials von 1986 nicht gut genug mit den Daten von 2004 übereinstimmt. Diese Problematik verhindert sowohl einen Vergleich auf pixelbasierten Methoden wie auch die Verwendung von objektbasierten Ansätzen. Weiters müssten für eine quantitative Analyse auch meteorologische Gesichtspunkte Berücksichtigung finden. Dies zu modellieren wäre sehr zeitintensiv, aber prinzipiell möglich. Dennoch stünde einer quantitativen Analyse dann noch immer die mangelhafte Georeferenzierung der Daten von 1986 im Weg. Nachdem für diese Überlegung der vom Aufnahmezeitpunkt am besten zueinander passende Datensatz gewählt wurde (2. Oktober 1986 zu 24. Oktober 2004), ist noch zu ergänzen, dass die Vergleichbarkeit mit quantitativen Methoden der Nachtszenen von 1986 und 2011 als noch geringer eingestuft werden muss.

Von diesen Tatsachen ausgehend war ein Vergleich auf qualitativer Ebene die einzige Alternative. Wobei auch hier die Interpretation der Daten unter strenger Berücksichtigung der für den quantitativen Fall bereits beschriebenen Faktoren erfolgen muss.

Methodik: Grundsätzlich wurde ein objektbasierter Ansatz realisiert. Dies bedeutet eine Zusammenfassung von Pixelwerten zu Polygonshapes. Die Auswahl dieser Methodik erleichtert die weitere Verarbeitung der Daten im Rahmen von etwaigen Analysen. Weiters ist es auch möglich, sinnvollere Generalisierungen

durchzuführen, womit sich zum Beispiel Effekte wie die Ausdehnung von Wärmeinseln einfach darstellen lassen. Softwareseitig wurden die Programme Arc Gis 10, Erdas Imagine und Ecognition Developer 8.0 verwendet.

Workflow: Nachdem der Datensatz von 1986 als Basis für die Vergleiche zu den Daten von 2004 (Mittag) und 2011 (Nacht) dient, wurde dessen Auflösung von 5 Metern auch für die Datensätze 2004 und 2011 übernommen. Somit konnte eine die geometrische Auflösung betreffend einheitliche Basis geschaffen werden. Für die Darstellung innerhalb eines Kartenwerkes, welches die gesamte Stadtfläche darstellt, ist diese Auflösung leicht ausreichend. Vor allem unter dem Aspekt der weiteren Generalisierung. Diese Basisdaten wurden im Anschluss mit dem Programm Ecognition Developer segmentiert (Erstellung der Polygone). Dies geschah in zweistufiger Art und Weise. Die erste Stufe stellt eine sehr feine Segmentierung dar, während die zweite Stufe eine wesentlich gröbere Segmentierung aufweist. Diese Polygone, welche bei diesen Segmentierungen entstanden sind, wurden im Anschluss als Esri Shape File exportiert. Sie beinhalten nun als Hauptinformation einen Temperaturmittelwert aller Pixel, die sich innerhalb des Polygons befanden, in ihrer Attributtabelle. Für die anstehenden Vergleiche wurde die Klassifikation in 10 Klassen durchgeführt, wobei das Hauptaugenmerk beim Erstellen der Schwellwerte auf eine möglichst gute Darstellung des Datensatzes gelegt wurde. Dabei wurde auch deutlich, dass 10 Klassen als ausreichend zu betrachten sind. Es sei an dieser Stelle noch einmal auf das Ausdrücklichste darauf hingewiesen, dass ein Vergleich der Datensätze untereinander aufgrund der unterschiedlichen Datensätze, Befliegungszeitpunkte, meteorologischen Verhältnisse und radiometrischen Fehler nicht ohne Weiteres zulässig ist. Am ehesten sinnvoll erscheint ein Vergleich der Temperaturverhältnisse mit einer groben ganzheitlichen Betrachtungsweise.

5.3 VERGLEICHENDE ANALYSE DER ERGEBNISSE 1986 BIS 2011

5.3.1 VERGLEICH NACHTAUFNAHMEN 1986 – 2011

Bereits auf den ersten Blick fallen die unterschiedlichen Wetterlagen zwischen 1986 und 2011 auf. Während die Aufnahme von 1986 von einer deutlichen Inversionslage dominiert wird, ist dieses Phänomen 2011 wesentlich schwächer ausgeprägt. Verwendet man nun die oben erwähnte ganzheitliche Betrachtung, dann fällt weiters auf, dass die Seitentäler im Osten von Graz auch 2011 kühler sind als der Stadtkern. Eine Art Übergangszone stellt zu beiden Zeitpunkten die gründerzeitliche Verbauung der Bezirke Geidorf und St. Leonhard dar. Vergleicht man nun das Temperaturverhältnis der Seitentäler mit den Ackerflächen im Süden von Graz, dann lässt sich festhalten, dass dieses Verhältnis sich 1986 als sehr ähnlich darstellt. Die Situation stellt sich 2011 erheblich anders dar. Hier sind die Ackerflächen im Süden wärmer als die Seitentäler. Im Besonderen betrifft dies die Bezirke Straßgang, Puntigam, Liebenau und Teile von St. Peter sowie Wetzelsdorf. Für die Abschätzung der Ausbreitung der Wärmeinsel ist eine Generalisierung der Datenstruktur von Vorteil. Diese wurde durch die zuvor bereits beschriebene gröbere Segmentierung erreicht. Im Vergleich der beiden Befliegungen fallen die unterschiedlichen Positionen des Wärmeinseleffektes auf. Während sich der wärmste Teil 1986 noch recht gleichmäßig westlich und östlich der Mur in den Bezirken Innere Stadt, Jakomini, Lend, Gries und Geidorf erstreckt, liegen 2011 die Flächen zu größeren Teilen östlich der Mur in den Bezirken Innere Stadt, Jakomini, Gries und in sehr geringem Maße auch St. Leonhard. Die maximalen Temperaturdifferenzen zwischen der Wärmeinsel und den kühlestern Teilen (Seitentäler im Osten) des Stadtgebietes liegen sowohl 2011 wie auch 1986 bei etwa 10 °C.

Bei der Interpretation der Nachtaufnahmen von 1986 und 2011 ist auf die unterschiedliche Legende zu achten, welche zwar die gleiche Farbpalette verwendet, aber sich in den Temperaturschwellwerten deutlichst unterscheidet.

Abbildung 10:
Oberflächentem-
peratur 1986 (Nacht),
Segmentgröße 3

Oberflächentemperatur Graz
Nachflug, Segmentgröße 3

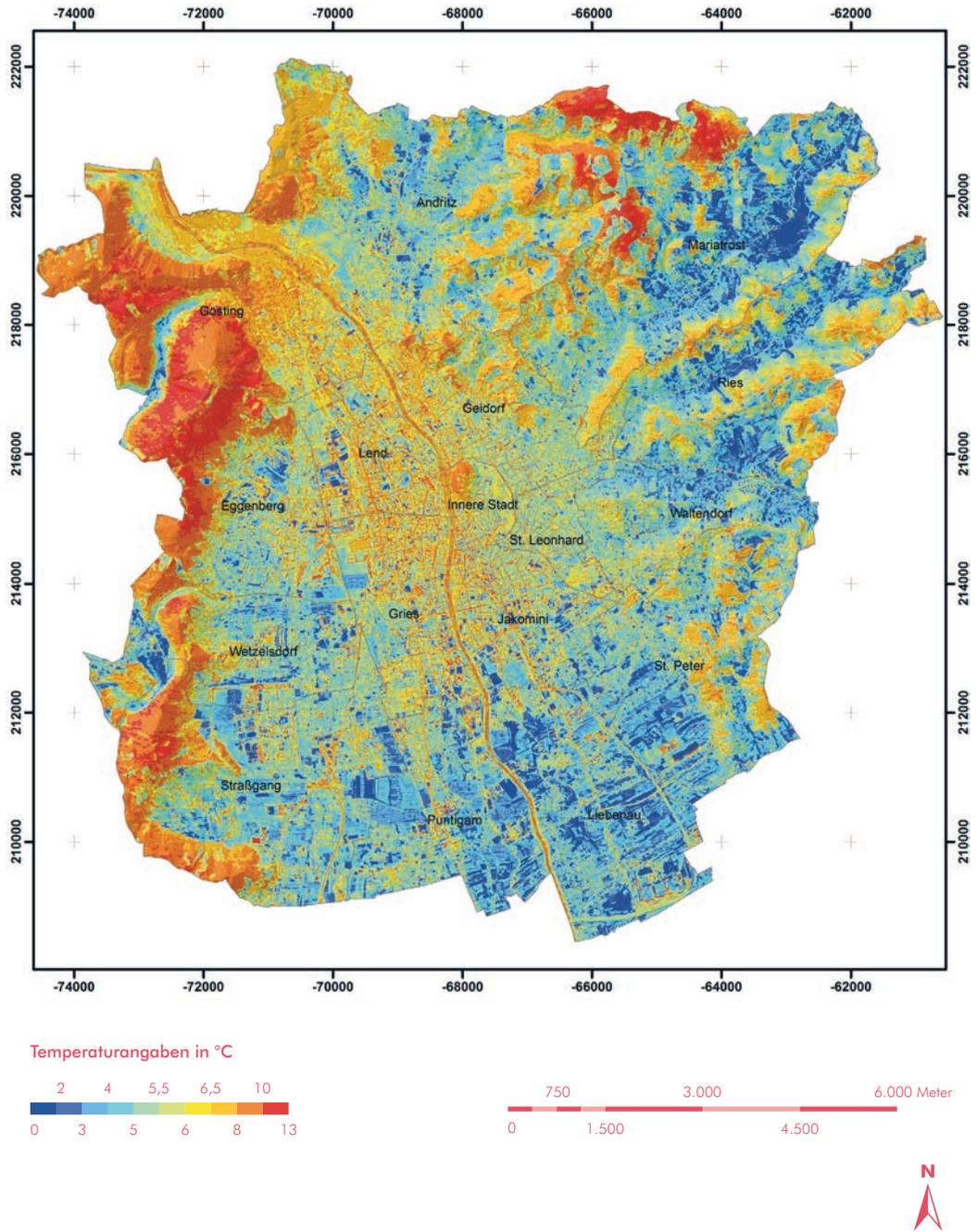
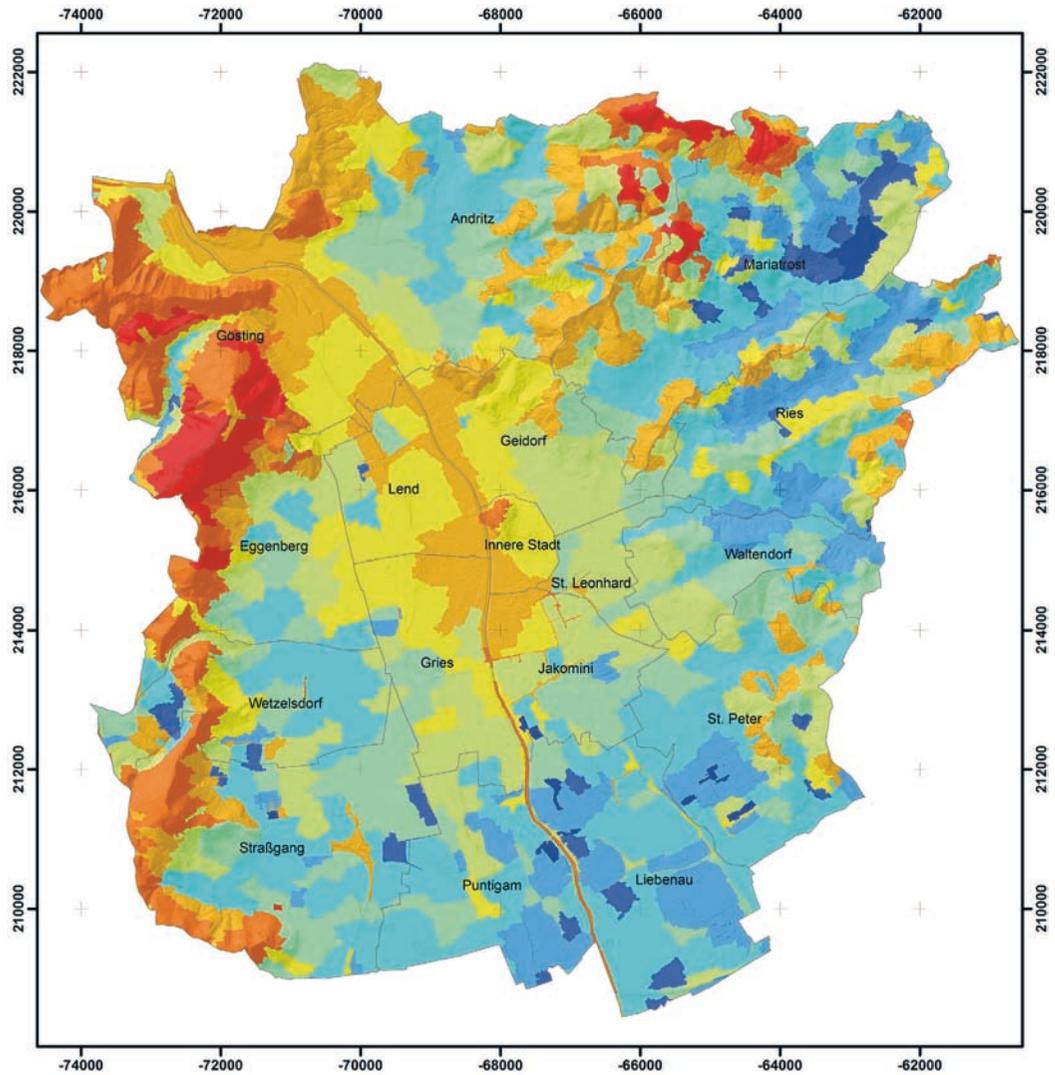


Abbildung 11:
Oberflächentem-
peratur 1986 (Nacht),
Segmentgröße 25

Oberflächentemperatur Graz 1986

Nachflug, Segmentgröße 25



Temperaturangaben in °C



5.3.2 VERGLEICH DER MITTAGSAUFNAHMEN 1986 UND 2004

Für den Vergleich der Mittagsaufnahmen von 1986 und 2004 war es möglich, auf Grund des ähnlichen Befliegungszeitpunktes innerhalb des Monats und innerhalb des Tages die gleichen Temperaturschwellwerte und die gleiche Farbpalette zu verwenden. Abgesehen von den generell etwas höheren Oberflächentemperaturen 1986 sind die Verhältnisse aber ähnlicher, als dies bei den nächtlichen Befliegungen der Fall war. Ein Unterschied, welcher besonders bei den Karten mit der Segmentgröße 3 zu Tage tritt, ist die deutlich stärkere Erwärmung der Dachflächen 1986.

DIESER UNTERSCHIED LÄSST SICH VERMUTLICH AUF 2 GRÜNDE ZURÜCKFÜHREN

Geringerer Strahlungsinput 2004 (22 Tage späterer Aufnahmezeitpunkt)

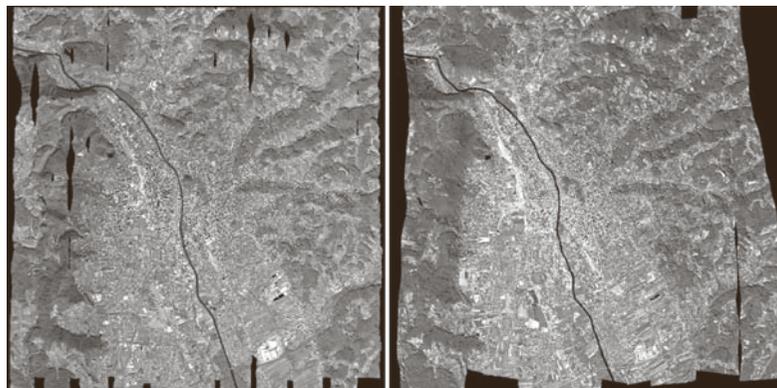
Wetterlage der Vortage 1986 wahrscheinlich günstiger
(längere Sonnenscheindauer)

Besonders deutlich werden diese Unterschiede in den Bezirken Innere Stadt, Lend, St. Leonhard und Geidorf.

Der Effekt der Wärmeinsel ist 1986 deutlich stärker ausgeprägt, als dies 2004 der Fall war. 1986 sind besonders die Bezirke Gries, Lend, Innere Stadt und Jakomini von diesem Phänomen betroffen.

Nachdem die Daten der Befliegung des Mittagstermins in die jeweiligen Dateiformate importiert und der Arbeitsablauf mit Hilfe der oben genannten Informationen durchgeführt wurden, konnte erstmals eine Darstellung der scheinbaren Oberflächentemperaturen für den gesamten Befliegungszeitraum visualisiert und quantifiziert werden.

Abbildung 12:
Visueller Vergleich
der scheinbaren Ober-
flächentemperaturen
von 1986 (rechts)
und 2004 (links)



Bereits bei der ersten Betrachtung mit freiem Auge lässt sich aufgrund der Grauwertkodierung eine Differenzierung der Befliegungen zu Mittag 1986 und 2004 erkennen (Abbildung 12 u. 13). Prinzipiell erscheinen Bereiche der Abbildung von 1986 wärmer, was durch das gehäufte Auftreten von helleren Bildelementen repräsentiert wird. Man kann davon ausgehen, dass dies aufgrund des Tagesganges der Witterung und die unterschiedlichen Befliegungszeitpunkte (Anfang Oktober, Ende Oktober) zurückzuführen ist.

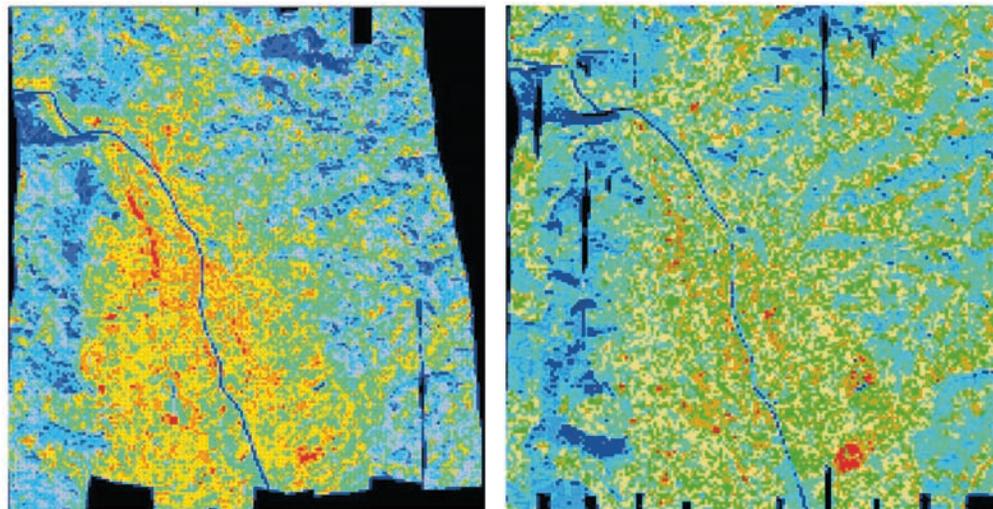
Die auf diesem Wege erstellten scheinbaren Oberflächentemperaturen wurden mit den Daten der Pyranometermessungen, welche zum gleichen Zeitpunkt der Befliegungen stattgefunden haben, verglichen. Vorzüglich handelte es sich bei den Messungen um verschiedene Arten der Bodenbedeckung im Bereich Vegetation, Versiegelte Flächen und Gewässer.

Der Vergleich der errechneten scheinbaren Oberflächentemperaturen mit den am Boden gemessenen zeigte eine mittlere Abweichung des Scanners von 4,5 °C auf. Diese Unterschiede weisen auf einen systematischen Temperaturunterschied hin, welcher bereits in mehreren Literaturquellen diskutiert wurde (siehe: Kaufmann 1989).

Im Speziellen wurden für diese Kalibrierung die gewonnenen Messdaten von Wassertemperaturen und Wasseroberflächentemperaturen verwendet.

Während man bei fließenden Oberflächengewässern davon ausgehen kann, dass aufgrund der hohen Durchmischung die Wassertemperatur auch der Oberflächentemperatur entspricht, muss für stehende Gewässer die Oberflächentemperatur gemessen werden, was im Zuge der Pyranometermessungen auch geschehen ist.

Abbildung 13:
Farbkodierte Darstellung
der Mittagsflüge
(Resampling 80m)



Mittagsflug, 1986

Mittagsflug, 2004

Abbildung 14:
Temperaturunterschied
zw. Mittagsflug 1986
und Mittagsflug 2004
(rot = wärmer,
blau = kälter)

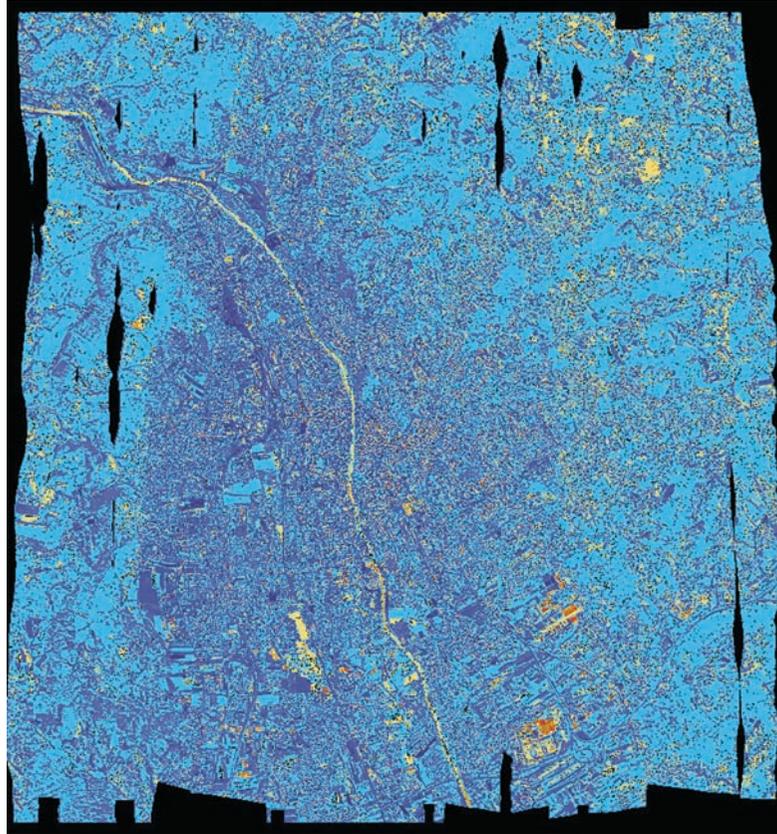


Abbildung 14 dokumentiert die Temperaturunterschiede zwischen den Mittagsflügen. Auffallend ist hier der generell kältere Tag 2004, die Differenzen betragen von einer Temperaturabnahme von 10 °K bis hin zu einer Temperaturzunahme von 15 °K. Eine deutliche Zunahme erfolgt in neu versiegelten Flächen, eine Abnahme hauptsächlich in ehemals versiegelten bzw. an mit offenem Boden versehenen Flächen. Abbildung 15 dokumentiert die Situation im Südosten von Graz. Hierbei ist auffällig, dass neu versiegelte Flächen besonders durch wärmere Temperaturstrukturen hervortreten, obwohl 2004 generell kältere Temperaturen als 1986 auftreten.

Abbildung 15:
Temperaturdifferenz-
karte des Mittagsfluges
(1986–2004) im
SE von Graz

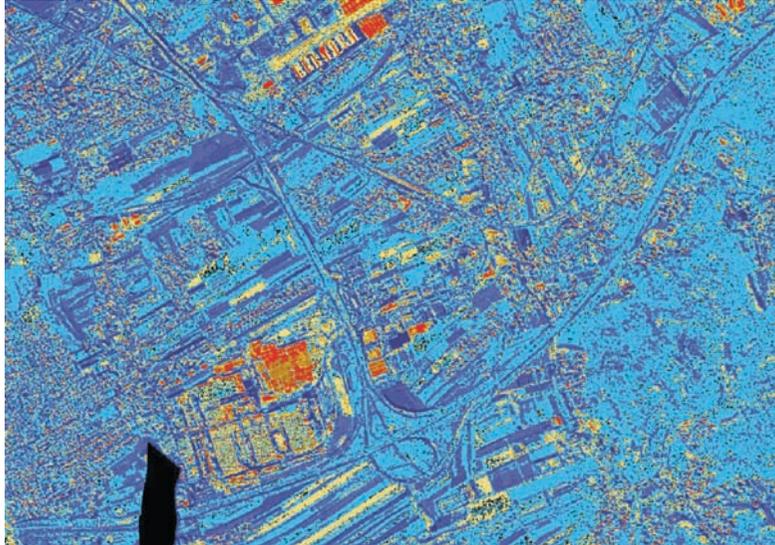


Abbildung 16 zeigt ein Beispiel aus dem Föllinger Becken, wo Verbauungstätigkeit zu generell zu wärmeren Temperaturstrukturen führt.

Abbildung 16:
Vergleich der mittäg-
lichen Temperatur-
verteilung im Föllinger
Becken

