

**Band 18**

**2009**



## **Vorträge**

### **29. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF**

24. – 26. März 2009  
in Jena

***Zukunft mit Tradition***

# Aufbereitung von mehrfachen IR-Fassadentexturen dreidimensionaler Gebäudemodelle für thermische Inspektionen

LUDWIG HOEGNER<sup>1</sup> & UWE STILLA<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Kombination von Infrarottexturen von Gebäudefassaden zur thermischen Inspektion. Die Texturen werden aus Infrarot-Bildsequenzen abgeleitet und dreidimensionalen Gebäudemodellen zugeordnet, um für die 2D-Bildinformation einen dreidimensionalen Raumbezug herzustellen. Dies ermöglicht Bilddaten verschiedener Messkampagnen in Bezug zu setzen. Die Bilddaten können dabei zu verschiedenen Zeitpunkten, aus verschiedenen Blickrichtungen und von unterschiedlichen IR-Sensoren aufgenommen sein. Der Beitrag greift die Probleme der Überlagerung auf und diskutiert die Auswertung der überlagerten Texturen durch Differenzbilder.*

## 1 Einleitung

Energieeffizienz von Gebäuden und Klimawandel sind zwei eng verbundene Schlagworte der letzten Zeit. Für die Bewertung der Energieeffizienz fehlen aber meist die benötigten Daten. Thermalaufnahmen von Gebäuden können helfen, Schwach- und Schadstellen zu lokalisieren und notwendige Sanierungsmaßnahmen festzulegen (KLINGERT, 2005). Solche Aufnahmen können auch nach einer erfolgten Modernisierung wiederholt werden, um die Änderungen zu dokumentieren. In der bisherigen Praxis der Gebäudethermographie findet die Auswertung direkt auf den Bildern statt. Bei großen Gebäuden sind jedoch mehrere Aufnahmen nötig, um eine Fassade komplett zu erfassen. Die Inspektion von großflächigen Fassaden oder ein Vergleich einer Fassade zu verschiedenen Zeitpunkten wird erheblich vereinfacht durch die Zuordnung der zweidimensionalen Bilddaten zu einem raumbezogenen dreidimensionalen Gebäudemodell (HOEGNER et al, 2007). Die Verwendung eines Gebäudemodells ermöglicht es weiterhin, die äußere Orientierung der Thermalkamera zu bestimmen.

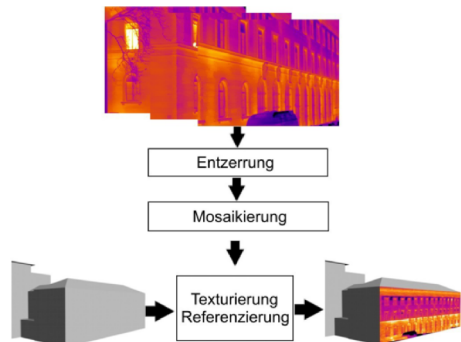


Abb. 1. Schritte zur Texturierung von Gebäudemodellen

- 1) Ludwig Hoegner, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München; E-Mail: [ludwig.hoegner@bv.tum.de](mailto:ludwig.hoegner@bv.tum.de)
- 2) Uwe Stilla, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München; E-Mail: [stilla@tum.de](mailto:stilla@tum.de)

Die Information der äußeren Orientierung wird verwendet, um Teilt Texturen zusammensetzen und vollständige Texturen von großen oder verschachtelten Fassaden zu erhalten. Zu jeder Fassadenfläche lassen sich in CityGML prinzipiell mehrere Texturen speichern, die z.B. von verschiedenen Blickrichtungen, Zeitpunkten oder Spektralbereichen stammen. Dies erlaubt zum einen die Ergänzung von Bereichen der Fassade, die in einer Textur nicht sichtbar oder schlecht aufgelöst waren, durch eine andere Textur, die die Szene zu einem vergleichbaren Zeitpunkt aus einer anderen Perspektive aufgenommen hat. Zum anderen ermöglicht es die Messung von Intensitätsunterschieden zweier Texturen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen worden sind. Diese Unterschiede werden als Differenz-Textur dargestellt und erlauben Aussagen zur Abkühlung oder Erwärmung eines Gebäudes. Liegt eine ganze Reihe von Texturen einer Fassade vor, die die Temperaturänderung in einem bestimmten Zeitraum zeigen, kann mit dieser Methode für einzelne Teile der Fassade eine Kennlinie der Temperaturänderung erstellt werden. Darüber hinaus lässt sich die Extraktion der Geometrie von thermisch auffälligen Strukturen durch die kombinierte Auswertung mehrerer Infrarot-Texturen verbessern, da sich einige auffällige Strukturen in einer Differenztextur vom Fassadenhintergrund besser abheben als in einer einzelnen Aufnahme.

## 2 Aufgabenstellung

Die Erzeugung von Differenztexturen aus verschiedenen Messungen stellt hohe Anforderungen, an die geometrische Zuordnung von Bild und Modell und an die Mosaikierung einer Fassadentextur aus mehreren Texturen einer Bildsequenz (STILLA & HOEGNER, 2008). Dabei liegen die extrahierten Texturen aus verschiedenen Messungen meistens nicht deckungsgleich und in gleicher Auflösung übereinander. Aus Einzelbildern (siehe z.B. Abb. 2) einer Sequenz, die bei der Vorbeifahrt an einem Gebäude entsteht, wird für jede sichtbare Fassade oder Fassadenteile automatisch ein korrespondierender Bildbereich ausgeschnitten und mit weiteren Bildausschnitten der Sequenz zusammengeführt. Das zur Fassade zugeordnete Bild erhält über ein 3d Gebäudemodell einen Raumbezug und wird als Textur gespeichert (Abb. 4). So ist es möglich, Texturen aus verschiedenen Aufnahmen zu gewinnen und einander zuzuordnen. Ein Vergleich von Texturen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden, erlaubt Aussage zu Temperaturänderungen. Prinzipiell sind dafür radiometrisch kalibrierte Kameras nötig. Die zur Projektion der Bilddaten auf die Fassadenflächen des Modells verwendeten Kameraparameter sind nicht ausreichend genau, um eine direkte Kombination von Texturen durchzuführen. Daher muss die relative Zuordnung von Fassadenaufnahmen verbessert werden.

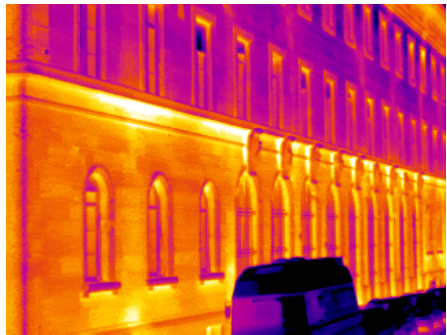


Abb. 2. Einzelbild einer Sequenz von Infrarotaufnahmen einer Fassade

## 2.1 Geometrische Korrektur der Einzeltexturen

Fassaden kühlen typischerweise in der Nacht ab und wärmen sich morgens auf. In zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommenen Bildern variieren somit die Intensitäten. Trotz dieser Variationen zeigen viele Strukturen wie z.B. Fenster in den Texturen einen Kontrast zum Rest der Fassade. Dies erlaubt eine Koregistrierung auf Basis einer Korrelation zwischen zwei Texturen (STEGER et al, 2008). Die Position des Korrelationsmaximums liefert die Lagekorrektur der zweiten Textur relativ zur ersten. Weiterhin wird die Korrelation mit leichten Rotationen durchgeführt, um kleine Winkelabweichungen zwischen den Texturen zu erkennen und zu korrigieren.

## 2.2 Kombination mehrerer Texturen

In der Einleitung in Kapitel 1 sind die verschiedenen Anwendungen für die Texturkombination bereits angesprochen worden. Die Differenztextur kann entweder zur Markierung von unsicheren Intensitätswerten einer Textur verwendet werden, wenn zwei Texturen dieselbe Szenen aus unterschiedlichen Blickwinkeln zeigen, oder sie wird zur Messung der Intensitätsänderung über einen bestimmten Zeitraum verwendet. Im letzteren Fall ist es hilfreich zunächst unsichere Intensitätswerte zu bestimmen. Abbildung 3 zeigt schematisch die einzelnen Schritte, die im Folgenden erläutert werden. Nach den Anpassungen aus Kapitel 2.1 darf davon ausgegangen werden, dass die Texturen einer Fassade deckungsgleich koregistriert vorliegen. Außerdem liegen nach den zu Beginn festgesetzten Vorgaben die Texturen radiometrisch kalibriert vor. Dann gilt für die Intensität  $I(p_{x,y})$  jedes Pixels  $p_{x,y}$  einer Differenztextur  $\Delta p$  zweier Texturen  $p'$  und  $p''$ :

$$I(p_{x,y}) = I(p_{x,y}') - I(p_{x,y}'') \quad (1)$$

Die Textur  $\Delta p$  stellt also für jedes Pixel die Änderung der Intensität von der ersten zur zweiten Textur dar, wobei ein positiver Wert einer Aufheizung entspricht, ein negativer Wert einer Abkühlung.

Sollen zwei Texturen  $A_1$  und  $A_2$  kombiniert werden, um Lücken oder Störungen innerhalb der Fassadentextur zu entfernen, müssen die zu kombinierenden Texturen in kurzem Zeitabstand von verschiedenen Standorten aus aufgenommen werden. Da für kurze Zeitabstände die Intensität der Fassade als konstant angenommen werden kann, zeigt die Differenztextur  $\Delta A$  nur die durch den geänderten Blickwinkel aufgetretenen Unterschiede durch nicht in der Fassadenebene liegende Objekte wie Verdeckungen z.B. durch Fahrzeuge vor der Fassade oder Strukturen, die aus der Fassadenebene hervorstehen oder zurückgesetzt sind. Zeigt Textur  $A_2$  einen Teil der Fassade, der in Textur  $A_1$  nicht enthalten ist, weil eine Verdeckung bereits bei der Texturgenerierung erkannt wurde, so wird das Loch in  $A_1$  mit den Werten aus  $A_2$  aufgefüllt. Besitzen  $A_1$  und  $A_2$  widersprüchliche Informationen an einer bestimmten Position, wird diese Stelle als unsicher markiert. Die daraus resultierende Textur  $A$  beinhaltet jetzt die Informationen aus beiden Eingangstexturen  $A_1$  und  $A_2$  und die Information über unsichere Intensitätswerte der Textur. Die Differenztextur dient in diesem Fall als Maske zum Markieren unsicherer Intensitätswerte bei der Kombination von zwei Texturen.

Soll durch eine Differenztextur die Veränderung der Strahlungsintensität einer Fassade zwischen zwei Aufnahmen bestimmt werden, muss für die Ausgangstexturen A und M folgendes gelten. Beide Texturen zeigen die Fassaden im selben Blickwinkel und unsichere Intensitätswerte sind nach dem bereits beschriebenen Verfahren markiert. Dadurch wird sichergestellt, dass geometrische Effekte die Berechnung nicht beeinflussen. Die Differenztextur D von A und M zeigt in diesem Fall nach Formel (1) die Abnahme und Zunahme der Strahlungsintensität der Fassade. Unsichere Differenzen werden durch die Differenztexturen  $\Delta A$  und  $\Delta M$  markiert und nicht weiter behandelt. Die Differenz der Intensitäten zwischen den Texturen A und M an einer Position  $p_{x,y}$  lässt sich nach (1) für bekannte Aufnahmezeiten t der Texturen auch ausdrücken als:

$$d = \frac{dI(p_{x,y})}{dt} \quad (2)$$

Dabei ist d die Steigung, wobei eine positive Steigung einer Zunahme der Intensität entspricht und eine negative Steigung einer Abnahme.

Die Pixel der Texturen können anschließend anhand ihres in d beschriebenen Verhaltens segmentiert und gruppiert werden. Schreibweise aus (2) wird insbesondere interessant, wenn eine ganze Reihe von Texturen den Verlauf der Intensitätsänderung aufgezeichnet hat. Für Differenztexturen  $D_1$  bis  $D_n$  ergeben sich  $d_1$  bis  $d_n$  Steigungen für jedes Pixel  $p_{x,y}$ , die einen abschnittsweise linearen Verlauf der Intensitätsänderung beschreiben. Bei ausreichend hoher zeitlicher Dichte der Aufnahme kann daraus eine Funktion der Intensitätsänderung über die Zeit angenähert werden.

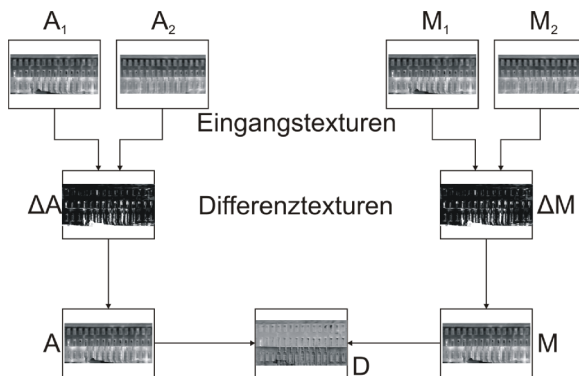


Abb. 3. Einzelne Schritte beim Einsatz der Differenztextur

### 3 Beispieldaten

Abbildung 4 zeigt ein Gebäudemodell mit Infrarottexturen, die aus einer Kameravorbeifahrt automatisch extrahiert wurden (HOEGNER et al, 2007). Auf Grund der Schrägsicht bei der Aufnahme (Abb. 2) und des geringen Abstands von der Fassade durch enge Bebauung ergibt sich ein Restfehler in der Positionierung und Skalierung der Texturen auf den Fassaden. Die Fassaden wurden mit vier Fahrten aufgenommen: Abends mit Sicht nach vorne und anschließend nach hinten und am darauffolgenden Morgen kurz vor Sonnenaufgang mit Sicht nach vorne und anschließend nach hinten. Durch den Wechsel der Blickrichtung ergeben sich Sichtbarkeitsunterschiede auf den Texturen. Die Fassade hat sich von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang abgekühlt.

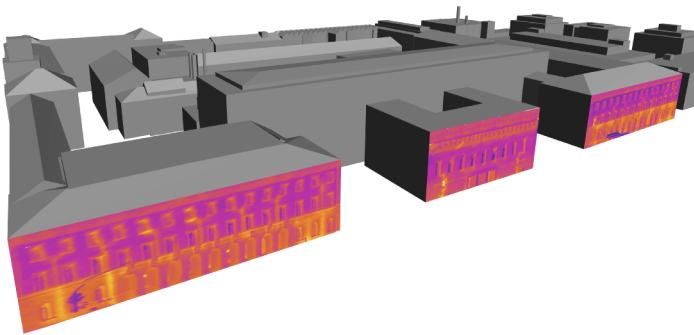


Abb. 4. Gebäudemodell im infraroten Spektrum mit texturierter Straßenseite. Nicht texturierte Fassaden sind durch andere Fassaden oder Störobjekte teilweise verdeckt.

Für die in Kapitel 2.2 beschriebene Kombination von zwei Texturen zur Detektion von Fehlern in den Texturen sind zwei Texturen wie in Abbildung 5 notwendig, die aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen worden sind: Vorwärtssicht (Abbildung 5a) und Rückwärtssicht (Abbildung 5b). Technisch bedingt konnten die Texturen nicht wie in 2.2 gefordert gleichzeitig

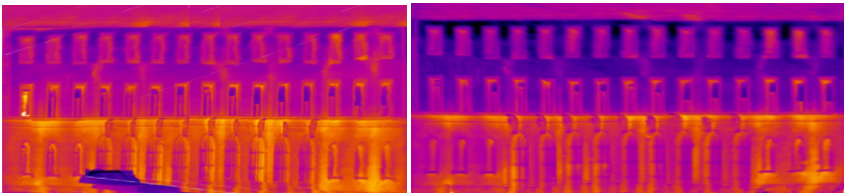


Abb. 5. a) links: Infrarottextur aus der Vorwärtsfahrt, b) rechts: Infrarottextur aus der Rückwärtsfahrt

aufgenommen werden, sondern mit einem geringen zeitlichen Versatz, der zu einer leichten Abkühlung der Fassade geführt hat. Diese Abkühlung für Abbildung 5b wurde für die Erzeugung

der Differenztextur bestimmt und herausgerechnet, um eine gleichzeitige Aufnahme der beiden Texturen zu simulieren. Die Differenztextur beider Texturen ist in Abbildung 6 dargestellt. Zur besseren Visualisierung sind die absoluten Beträge der Änderung dargestellt.

Das linke Fenster der mittleren Reihe (Abb. 6a) ist geöffnet und zeigt eine höhere Temperatur als die Fassade. Das ist nur in der ersten Textur zu sehen. Folglich gibt es hier eine große Temperaturabnahme. Weiterhin parkt vor der Fassade ein Fahrzeug (Abb. 6b), zu sehen im linken Bild (Abb. 5a) unten, das auf Grund der geänderten Perspektive der Aufnahme in der zweiten Textur (Abb. 5b) nicht zu sehen ist. Da das Fahrzeug kälter als die Fassade ist, scheint die Wand hier wärmer zu werden. Die Fenster liegen nicht in der Fassadenebene, sondern sind deutlich zurückversetzt. Auf Grund der Schrägsicht sieht die Kamera jeweils nur eine Innenseite der Fensternische. Diese hat eine andere Temperatur als die Fenster selber, die als Spiegel wirken und die Fensterrolläden, die teilweise heruntergelassen sind. Die Fenster mit Rollläden

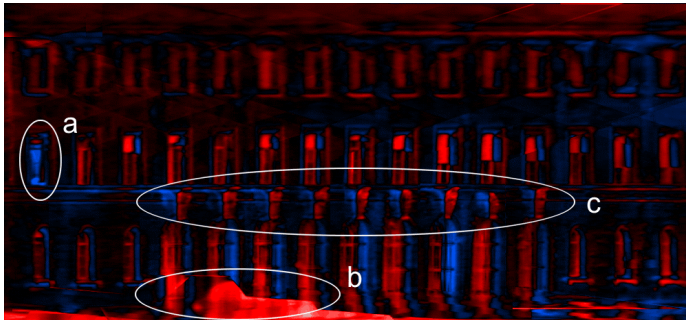


Abb. 6. Differenzbild von Abbildung 5a und 5b. Schwarz: konstante Intensität, rot: höhere Intensität in Textur 5b, blau: höhere Intensität in Textur 5a

sind gut erkennbar an dem Rot-Blauen Balken. Bei den vergitterten Fenstern im Erdgeschoss kommt noch eine Hintergrundbeleuchtung aus dem Gebäude hinzu, die in einer Fahrtrichtung durch das Fenster auf die Kamera scheint. Am deutlichsten ist die Differenz der beiden Texturen bei den oberhalb der unteren Fensterreihe angebrachten Steintafeln (Abb. 6c). Diese stehen aus der Fassade hervor und sind kühler als diese. Durch die Geometrie verdecken sie in den beiden Texturen gegenseitig einen Teil der Fassade. Der rötliche und bläuliche Schimmer auf der Fassadenfläche kommt durch den Zeitversatz der Aufnahmen und die Schätzung der mittleren Abkühlung zu Stande und kann hier ignoriert werden.

Zur Bestimmung der Abkühlung der Fassade wurde eine Abendtextur mit einer Morgentextur verglichen (Abb. 7). Gegenüber Abbildung 6 fällt auf, dass keine kalt-warm Kanten an Tiefsprünge auftreten, da beide Texturen von derselben Richtung aus aufgenommen worden sind. Zu sehen ist die deutliche Abkühlung aller Fassadenteile. Man erkennt das geöffnete Fenster und auch die Störung durch das parkende Fahrzeug im Bild unten. Zu sehen ist, dass der obere Gebäudeteil unter dem Dach weniger ausgekühlt ist, als die drei Stockwerke mit Büros. Dieser Teil war bereits am Abend deutlich kühler (Abb. 5a). Zu sehen ist auch noch die Störung durch das parkende Fahrzeug.



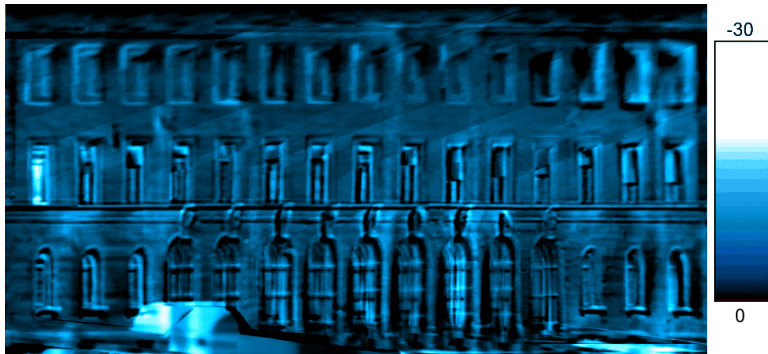


Abb. 7. Differenztextur der Abendtextur und der Morgentextur, weiß: stärkste Abkühlung

## 4 Diskussion

Die Umwandlung von Infrarotbildern in Gebäudetexturen erlaubt gegenüber der klassischen 2D-Auswertung die Untersuchung von Abkühlungs- oder Aufheizprozessen oder den Vergleich von Fassaden vor und nach Sanierungsmaßnahmen. Da die absolute Abstrahlung eines Gebäudes von vielen Einflüssen wie Heizleistung und Witterung abhängig ist, kann bei längerfristigen Beobachtungen ein Mittelwert als Textur genommen werden. Für die Detektion von Objekten im Infrarot eignet sich die Differenzmessung besonders dadurch, dass die normalen Hintergrundeffekte ausgeblendet werden können und die auffälligen Objekte sich verstärkt abheben. Die hier verwendeten Texturen wurden alle mit derselben Kamera und in annähernd derselben Auflösung aufgenommen, wenn auch aus verschiedenen Blickwinkeln. Es ist auch möglich, Texturen aus anderen Quellen hinzuzufügen, z.B. niedrig aufgelöste Texturen aus Luftbefliegungen. Außerdem ist es durch die Einbettung der Bilddaten in ein 3D-Modell möglich, bestimmte thermale Effekte auf Fassaden zu erklären. Die Aufwärmung einer Fassade durch die Sonne beispielsweise lässt sich im 3D-Raum durch den Sonnenstand erklären oder durch eine zusätzliche Textur, die den Schlagschatten der Sonne zeigt (Abb. 8). Durch die Verfolgung eines Sonnenaufgangs und die Erwärmung der Fassade lassen sich wiederum Rückschlüsse auf die Beschaffenheit der Fassade ziehen. Die Auswertung benötigt für die Validierung und Interpretation Hintergrundwissen, das bisher nur durch den Nutzer geliefert werden kann. Die Aufwärmung oder Abkühlung der Fenster setzt Wissen über den Blickwinkel und die Umgebung voraus, um eine Fehlinterpretation zu verhindern. Ebenso ist es notwendig, zu wissen, wie die Nutzung des Gebäudes war. Ist während der Messungen ein Fenster geöffnet oder geschlossen worden? Ein Fenster, das geöffnet worden ist, kann für die spätere Bestimmung nicht benutzt werden, wie im Falle des offenen Fensters (Abb. 6a). Für eine genaue Bestimmung der Wärmeverluste ist Wissen über die Materialien und ihre Emmissionkoeffizienten notwendig, um den tatsächlichen Wärmeverlust schätzen zu können.



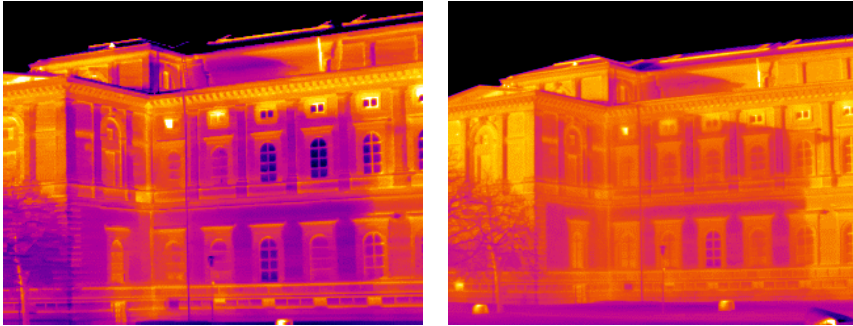


Abb. 8. Gebäude in zwei verschiedenen Spektren: a) links: langwelliges IR, die Fassade ist im Schatten kühler, der Schatten aber nicht direkt zu erkennen, b) rechts: mittleres IR, die Fassade ist im Schatten kühler. Hier tritt der Sonnenschatten klar heraus.

## 5 Danksagung

Für die Bereitstellung des Messfahrzeuges mit IR-Kameras und der Unterstützung bei der Messung danken die Autoren Herrn Dr. Clement, Herrn Dr. Schwarz und Herrn Kremer von FGAN-FOM, Ettlingen.

Die vorgestellten Arbeiten sind Teil des DFG-geförderten Forschungsprojektes „Enrichment and Multi-purpose Visualization of Building Models with Emphasis on Thermal Infrared Data“, das im Rahmen des DFG-geförderten Bündelprojektes „Interoperation of 3D Urban Geoinformation (3DUGI)“ bearbeitet wird.

## 6 Literaturverzeichnis

- HOEGNER, L.; KUMKE, H.; MENG, L.; STILLA, U., 2007: Automatic extraction of textures from infrared image sequences and database integration for 3D building models. PFG Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 2007(6), S. 459-468
- KLINGERT, M., 2005: Methoden der digitalen Bildverarbeitung in der Infrarotbauwerks-thermografie. Forum Bauinformatik, BTU Cottbus, S. 287-294
- RUSS, J.C., 2006: The Image Processing Handbook. CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742
- STILLA, U. & HOEGNER, L., 2008: IR-Texturierung von 3D-Gebäudemodellen zur thermographischen Inspektion von Stadtquartieren, GIS.Science, 2008(4), S. 12-19
- STEGER, C.; ULRICH, M. & WIEDEMANN, C., 2008: Machine Vision Algorithms and Applications, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, ISBN 978-3-527-40734-7