

Geometrische Kalibrierung von Thermografiekameras

THOMAS LUHMANN, JULIA OHM, JOHANNES PIECHEL & THORSTEN ROELFS, Oldenburg

Keywords: Thermalkamera, geometrische Kalibrierung, Genauigkeit, Testfeld, Bündelausgleichung

Summary: *Geometric Calibration of Thermal Cameras.* This paper discusses strategies, tools and methods for the geometric calibration of close-range thermal cameras as they are widely used for building monitoring and material testing. Two different testfields have been developed and tested whereby each of them provides target points in the thermal spectrum. Four different cameras with solid-state imaging sensors have been calibrated. In general, all lenses show relatively large distortions due to decentering of lenses and non-orthogonality of the image coordinate system. Using a 2D testfield with burning lamps an accuracy of 0.3 pixels can be achieved while a 3D testfield with reflective circular targets provides residuals in the order of 0.05 pixels. This leads to geometrically improved thermal images that can be used to achieve higher quality for various applications, such as mosaicking, 3D-texturing or pan sharpening.

Zusammenfassung: Dieser Beitrag befasst sich mit Strategien, Werkzeugen und Methoden zur geometrischen Kalibrierung von Thermografiekameras, wie sie für Bauwerksüberwachung und Materialprüfung eingesetzt werden. Hierfür wurden zwei verschiedene Testfelder entwickelt und erprobt, mit denen Punktziele im thermalen Spektralbereich der Kameras bereitgestellt werden können. Vier verschiedene Kameras mit Festkörper-Sensoren wurden kalibriert. Die Kalibrierergebnisse unterscheiden sich deutlich von Kamera zu Kamera. Alle Objektive weisen relativ große Verzeichnungen auf, hervorgerufen durch Dezentrierung der Linsen und durch Abweichungen von der Orthogonalität der Bildkoordinatenachsen. Die durchschnittlichen Genauigkeiten liegen bei 0,3 Pixel für ein mit Lämpchen versehenes, ebenes Testfeld, während ein reflektierendes 3D-Testfeld mit kreisförmigen Zielmarken zu Restfehlern von 0,05 Pixel führt. Ziel sind geometrisch verbesserte Thermalbilder für verschiedene Anwendungen, wie Mosaikbildungen, 3D-Texturierungen und Pan Sharpening, um deren Qualität signifikant zu steigern.

1 Kamertechnologie

1.1 Physikalischer Hintergrund

Thermografiekameras sind in den Bereichen Materialprüfung, Qualitätssicherung und Inspektion von Gebäuden weit verbreitet. In all diesen Fällen ist die radiometrische Information über Temperaturverteilung von größtem Interesse. Geometrische Anwendungen sind dagegen eher selten, die Entwickler und Anbieter von Kameras zeigen daher noch wenig Interesse an photogrammetrischen Techniken. Dementsprechend wird auch die geometrische Kalibrierung dieser Systeme in der Regel ver-

nachlässigt – mit Ausnahme einiger Beiträge, die sich mit dieser Problematik befassen (BUYUKSALIH & PETRIE 1999, LUHMANN et al. 2010). Allerdings werden mit steigender Auflösung von Thermografiekameras die geometrischen Eigenschaften der Bilder zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Zur präzisen geometrischen Modellierung eines Bildsensors ist es unerlässlich, die Wirkungsweise der Bildentstehung nicht nur in geometrischer Hinsicht, sondern auch in ihrer radiometrischen Weise zu verstehen. Im Folgenden werden daher die grundlegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten kurz erläutert.

Die spezifische spektrale Emission M_λ eines Objekts ist definiert durch das Planck'sche Strahlungsgesetz als Funktion der absoluten Temperatur und der Wellenlänge (WOLFE & ZISSIS 1985, SCHUSTER & KOLOBRODOV 2004):

$$M_\lambda \left[\frac{W}{\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}} \right] = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1} \quad (1)$$

mit

c_1 : 1. Strahlungskonstante
 $= 3,7418 \cdot 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$

c_2 : 2. Strahlungskonstante
 $= 1,4388 \cdot 10^4 \text{ K} \cdot \mu\text{m}$

T : absolute Temperatur [K]

λ : Wellenlänge [μm]

Gleichung (1) besagt, dass die Strahlungsleistung bei einer bestimmten Wellenlänge ausschließlich von der Temperatur der Strahlungsquelle abhängig ist. Abb. 1 stellt diesen Zusammenhang für verschiedene typische Oberflächentemperaturen dar. Sie macht deutlich, dass nur Objekte mit einer Temperatur von mehr als etwa 1000 K elektromagnetische Strahlung emittieren, die sichtbar für das menschliche Auge und konventionelle Kameras ist. Die Energiemenge entspricht dabei je-

weils der Fläche unter der Kurve. Am Beispiel der Sonne mit einer Temperatur von 5800 K wird deutlich, dass das Maximum der Strahlungsleistung bei ca. 580 nm liegt, also im gelben Bereich des sichtbaren Spektrums. Ein Körper mit Raumtemperatur (20 °C) strahlt dagegen mit einem Maximum um ca. 10 μm und deutlich geringerer Leistung.

Das Maximum der Strahlungsleistung verschiebt sich nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz mit zunehmender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen (Gerade in Abb. 1):

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2897,8}{T} \quad (2)$$

In Gleichung (2) wird der Wert 2897,8 als Wien'sche Verschiebungskonstante bezeichnet. Es besteht also ein reziproker Zusammenhang zwischen Temperatur und Wellenlänge (DERENIAK & BOREMAN 1996). Folglich benötigen Thermografiekameras Bildsensoren, die empfindlich sind für Wellenlängen zwischen 2,5 und 15 μm . Abhängig von der Detekortechnologie (siehe Abschnitt 1.2) können durch übliche Thermografiekameras Temperaturen zwischen -30 und +400 °C erfasst werden.

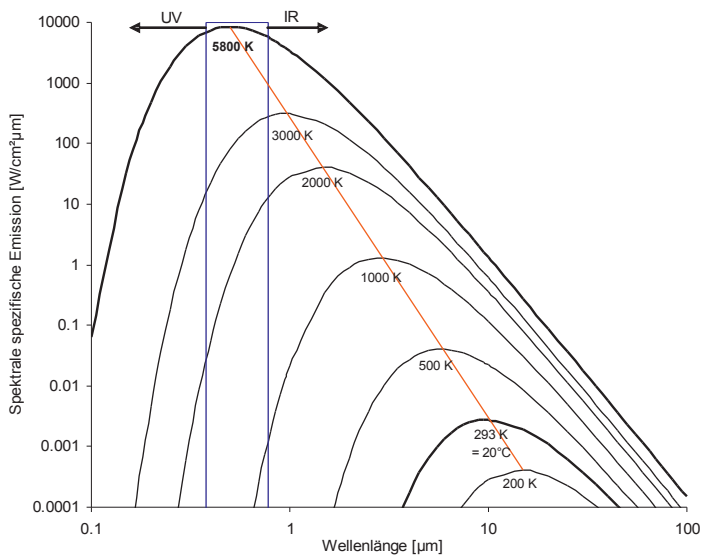


Abb. 1: Spektrale spezifische Strahlung bei verschiedenen Körpertemperaturen.

1.2 Detektoren

Die geometrische Auflösung von Bildaufnahmegeräten wird durch Beugung begrenzt. Der Durchmesser des Beugungsscheibchens (Airy-Scheibchens) d hängt ab von der Blende (Blendenzahl k) und der Wellenlänge:

$$d = 2,44 \cdot \lambda \cdot k \quad (3)$$

Als Beispiel ist die geometrische Auflösung bei einer Wellenlänge von $\lambda = 10 \mu\text{m}$ und einer Blendenzahl von $k = 2$ auf etwa $48 \mu\text{m}$ begrenzt. Gleichung (3) macht deutlich, dass die Pixelgröße von thermischen Sensoren viel größer sein kann als für Standard-RGB-Kameras. In der Tat arbeiten die meisten Thermalkameras mit Pixelgrößen zwischen 30 und $50 \mu\text{m}$.

Sensoren für Wärmebildkameras sind entweder Quantendetektoren oder thermische Detektoren (NOLTING 2007). Quantendetektoren basieren auf dem inneren photoelektrischen Effekt, bei dem Elektronen zwischen zwei Schichten eines Halbleiters freigesetzt werden. Quantendetektoren sind sehr empfindlich ($\pm 0,01 \text{ K}$) und schnell, benötigen aber eine externe Kühlung (Peltier-Elemente oder Stirling – FOUAD & RICHTER 2008).

Thermische Detektoren nutzen den Effekt, dass eine Temperaturänderung des Detektorelementes zu einer Veränderung der elektrischen Eigenschaften führt, z. B. des Widerstandes oder der Ladung (HIERL 2008). Diese Veränderungen können gemessen und in Intensitätswerte gewandelt werden. Thermische Detektoren sind in verschiedenen Ausführungen erhältlich, wie pyroelektrische Detektoren oder Bolometer. Sie sind weniger empfindlich ($\pm 0,1 \text{ K}$) und langsamer als Quantendetektoren, benötigen aber keine Kühlelemente. Sie sind daher preiswerter und werden meist für Anwendungen wie die Inspektion von Gebäuden eingesetzt.

Die modernsten thermischen Flächensensoren haben derzeit 320×240 Pixel bis zu 640×480 Pixel. Die Sensorgrößen liegen dann bei etwa $20\text{--}30 \text{ mm}$ in jeder Richtung. Neueste Kameraentwicklungen erreichen durch die Micro-Scanning-Technik (LUHMANN 2003, S. 187) Pixelzahlen von bis zu 1280×960 .

Im Prinzip können Thermografiekameras, die auf Festkörper-Sensoren basieren, wie photogrammetrische Standard-Kameras behandelt werden. Wegen der größeren Wellenlängen sind die Linsen von Thermografiekameras aus Germanium oder anderen einkristallinen Halbleitermaterialien gefertigt, was sie sehr teuer macht. Diese Objektive sind bezüglich der radiometrischen Auflösung optimiert, die geometrische Genauigkeit oder minimale Verzerrungen sind bisher von geringem Interesse.

2 Testfelder zur Kalibrierung

2.1 Ebenes Testfeld mit Lampen

Von der FH Dessau wurde ein ebenes Testfeld bereitgestellt, das aus 57 kleinen Lampen mit regelbarer Stromversorgung besteht, die sich beim Einschalten aufwärmen. Die Dimension der Grundplatte aus Holz beträgt etwa $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ (Abb. 2a). Die Positionen der Lämpchen wurden mit einem Theodolitmesssystem mit einer Genauigkeit von etwa $0,2 \text{ mm}$ kalibriert.

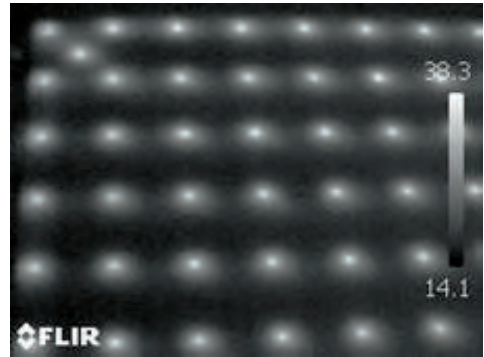
Die Qualität der aktiven Ziele erwies sich jedoch als nicht zufriedenstellend (Abb. 2b). Es ist offensichtlich, dass es sich nicht um Kreise (Ellipsen) handelt, und zentrale Punkte maximaler Temperatur sind nur schwer auszumachen. Daher können die Mitten der Lampen nicht mit einer Präzision gemessen werden, wie sie bei photogrammetrischen Zielmarken üblich ist. Darüber hinaus ist die Kalibrierung einer Kamera mit ebenem Testfeld im Vergleich zu einem 3D-Testfeld weniger aussagekräftig und zeigt höhere Korrelationen zwischen den Parametern der inneren und äußeren Orientierung (GODDING 1993, LUHMANN 2010).

2.2 Räumliches Testfeld mit codierten Zielmarken

Die Grundidee eines neu zu entwickelnden 3D-Testfeldes war, Zielmarken zu schaffen, die räumlich verteilt sind, scharf abgebildete Punktmuster erzeugen und genügend Bildkontrast im thermalen Spektrum bieten. Dar-



a) Testfeld



b) Abbildungsqualität der Zielpunkte

Abb. 2: Ebenes Testfeld mit aktiven Lampen.

über hinaus sollte das neue Prüffeld mobil und preiswert sein, einfach zu kalibrieren und ohne künstliche Erwärmung der Zielmarken funktionieren.

Verschiedene Experimente wurden durchgeführt, um eine geeignete Kombination von Material und Beleuchtung zu finden. Schließlich wurde der Effekt der kalten Himmelsstrahlung genutzt, die zu einer hinreichenden Reflexion auf einer polierten Aluminiumplatte führt. Damit konnte ein Testfeld-Design geschaffen werden, das die genannten Spezifikationen erfüllt.

Abb. 3 zeigt das zugrunde liegende Prinzip. Es geht davon aus, dass die Metallplatte des Testfeldes die kalte Temperatur des Himmels reflektiert. Die Zielmarken dagegen bestehen aus selbstklebender Folie und emittieren nur Strahlung, die sich aus der Eigentemperatur

ergibt. Im Bild entsteht dadurch ein starker Kontrast, die Zielmarken erscheinen hell, die Umgebung dagegen dunkel (Abb. 4).

Basierend auf diesem neuen Zielmarken-Design wurde ein mobiles Testfeld angefertigt. Es besteht aus 17 codierten und 35 uncodierten Marken und zusätzlichen, demontierbaren Höhenpunkten (Abb. 5), ergänzt durch temperaturstabile Maßstäbe aus CFK (grau) mit gleichartigen Zielmarken.

Wegen des beweglichen Aufbaus und der Wärmeausdehnung des Metalls muss das Testfeld unmittelbar vor und/oder nach jedem Einsatz konventionell photogrammetrisch kalibriert werden. Mit hochgenau kalibrierten Maßstäben (gelb), einer hochauflösenden Kamera und Bündelausgleichung werden präzise Koordinaten der Passpunkte abgeleitet. Bei einer Größe des Testfeldes von etwa

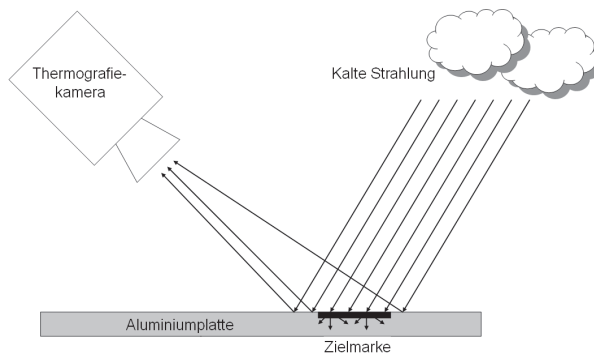
**Abb. 3:** Strahlung des kalten Himmels, absorbiert durch die Zielmarke.



Abb. 4: Zielmarken im Thermalbild.

1 000 mm × 700 mm × 200 mm liegt die Genauigkeit dieser Punkte bei etwa ± 8 µm im Objektraum (1 Sigma).

Das neue Testfeld ist fast ohne Einschränkungen – bei allen Außentemperaturen, bei bewölktem Himmel wie auch bei Sonnenschein – einsetzbar, weil die oberen Luftschichten (und auch die Wolken) immer kälter sind als Objekte am Boden. Weiterhin sollte freie Sicht nach oben herrschen, damit sich keine Häuser, Bäume usw. auf der Metallplatte spiegeln.

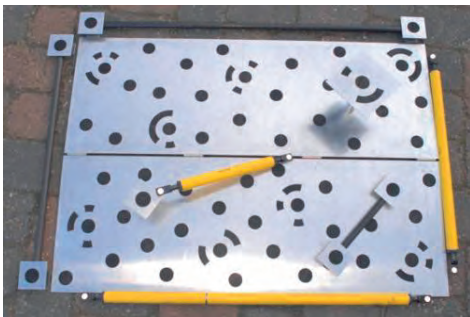


Abb. 5: 3D-Testfeld mit codierten Marken.

3 Ergebnisse der Kalibrierung

3.1 Kameras

Vier Thermografiekameras stehen derzeit an der Jade-Hochschule zur Verfügung, die in den Test einbezogen wurden (Abb. 6). Sie ähneln sich mehr oder weniger in ihren technischen Daten (Anzahl und Größe der Pixel), unterscheiden sich aber – vor allem wegen der Qualität der Objektive und der Detektorelemente – nicht unerheblich im Preis. Tab. 1 gibt



FLIR Infra Cam



FLIR B200



Testo 880-3



InfraTec VarioCam

Abb. 6: Untersuchte Thermografiekameras.

Tab. 1: Technische Daten der untersuchten Kameras.

	FLIR InfraCam	FLIR B200	Testo 880-3	InfraTec VarioCam
Pixelanzahl	240 × 240	320 × 240	320 × 240	384 × 288
Pixelgröße	0,025 mm	0,04 mm	0,035 mm	0,035 mm
Brennweite	10 mm	30 mm	10 mm	11 mm
Thermale Auflösung	± 0,2 °C	± 0,08 °C	< 0,3 °C	0,08 – 0,05 °C
Preis [€]	ca. 4000	ca. 9000	ca. 6500	ca. 19000

einen Überblick zu den technischen Daten der verwendeten Kameras.

3.2 Kalibrierung und Resultate

Jede Kamera wurde in den üblichen Aufnahmeanordnungen mit etwa 20 konvergenten Bildern kalibriert (LUHMANN 2003, GODDING 1993, LUHMANN 2010). Beide in Abschnitt 2 beschriebenen Testfelder wurden verwendet (Abb. 7). Das ebene Testfeld mit den aktiven Lampen kann in einem Labor aufgenommen werden, während das reflektierende 3D-Testfeld im Freien verwendet werden muss, dabei jedoch keine Stromversorgung benötigt.

Bildmessung und Ausgleichung wurden mit dem Programm AICON 3D Studio (Messung codierter Marken, Ausgleichung mit Simultankalibrierung) und der am IAPG entwickelten Software StereoMess (manuelle und automatische Messungen per Template Matching und mit Ellipsenoperator) durchgeführt. Die Bündeltriangulation wurde als freie Ausglei-

chung in Form einer Gesamtpurminimierung berechnet. Die Ergebnisse der Kalibrierung mit dem räumlichen Testfeld und mit einem Parametersatz, wie er für photogrammetrische Messkameras Anwendung findet (LUHMANN 2003, S. 120 ff.), sind in der Tab. 2 aufgelistet. Das ebene Testfeld führt zu ähnlichen Ergebnissen hinsichtlich der geschätzten Parameter – bei verminderter Genauigkeit der Bildmessung und der Parameter, die deswegen hier nicht weiter betrachtet werden.

Die Kameras FLIR InfraCAM, FLIR B200 und Testo 880-3 zeigen relativ schlechte Ergebnisse in Form von Bildmessgenauigkeiten (zwischen $\pm 2,6$ und $\pm 3,8 \mu\text{m}$) im Vergleich zur InfraTec VarioCam ($\pm 0,6 \mu\text{m}$) und entsprechend höhere Standardabweichungen von Kamerakonstante und Bildhauptpunkt.

Von den herstellerseitig angegebenen Brennweiten unterscheiden sich die Kamerakonstanten nicht unerheblich. Dies kann nicht nur daran liegen, dass die Kameras auf den Nahbereich fokussiert waren, sondern

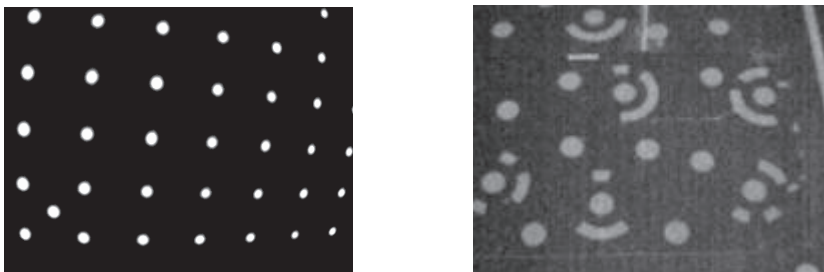


Abb. 7: Thermalbilder des ebenen (links) und des räumlichen Testfeldes (rechts).

Tab. 2: Kalibrierte Kameraparameter.

Parameter	FLIR InfraCam	FLIR B200	Testo 880-3	InfraTec VarioCam
c [mm]	-13,8971 \pm 0,0104	-36,9443 \pm 0,0223	-19,9373 \pm 0,0297	-11,8188 \pm 0,0014
x'0 [mm]	-0,2940 \pm 0,0188	1,4445 \pm 0,0574	-0,1571 \pm 0,0524	0,0201 \pm 0,0013
y'0 [mm]	-0,3430 \pm 0,0197	-1,8332 \pm 0,0420	0,2110 \pm 0,0376	0,1400 \pm 0,0012
A1	-2,80 \cdot 10 ⁻³ \pm 1,33 \cdot 10 ⁻⁴	-2,69 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 1,94 \cdot 10 ⁻⁵	-7,25 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 1,20 \cdot 10 ⁻⁴	-2,41 \cdot 10 ⁻³ \pm 4,93 \cdot 10 ⁻⁶
A2	6,86 \cdot 10 ⁻⁷ \pm 2,03 \cdot 10 ⁻⁵	-7,47 \cdot 10 ⁻⁷ \pm 6,94 \cdot 10 ⁻⁷	-9,59 \cdot 10 ⁻⁶ \pm 7,19 \cdot 10 ⁻⁶	8,76 \cdot 10 ⁻⁶ \pm 1,83 \cdot 10 ⁻⁷
A3	7,76 \cdot 10 ⁻⁷ \pm 9,52 \cdot 10 ⁻⁷	2,79 \cdot 10 ⁻⁹ \pm 7,40 \cdot 10 ⁻⁹	1,86 \cdot 10 ⁻⁷ \pm 1,28 \cdot 10 ⁻⁷	-2,67 \cdot 10 ⁻⁸ \pm 2,05 \cdot 10 ⁻⁹
B1	1,91 \cdot 10 ⁻⁵ \pm 2,10 \cdot 10 ⁻⁵	-2,78 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 5,21 \cdot 10 ⁻⁶	5,12 \cdot 10 ⁻⁵ \pm 1,22 \cdot 10 ⁻⁵	5,23 \cdot 10 ⁻⁵ \pm 1,11 \cdot 10 ⁻⁶
B2	-2,69 \cdot 10 ⁻⁵ \pm 2,25 \cdot 10 ⁻⁵	-1,72 \cdot 10 ⁻⁵ \pm 6,18 \cdot 10 ⁻⁶	-3,51 \cdot 10 ⁻⁵ \pm 1,72 \cdot 10 ⁻⁵	-1,29 \cdot 10 ⁻⁵ \pm 1,14 \cdot 10 ⁻⁶
C1	6,84 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 1,99 \cdot 10 ⁻⁴	-6,11 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 2,60 \cdot 10 ⁻⁴	7,50 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 3,16 \cdot 10 ⁻⁴	-7,79 \cdot 10 ⁻⁵ \pm 2,47 \cdot 10 ⁻⁵
C2	-2,22 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 2,21 \cdot 10 ⁻⁴	-8,66 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 2,61 \cdot 10 ⁻⁴	8,18 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 2,96 \cdot 10 ⁻⁴	1,85 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 1,91 \cdot 10 ⁻⁵

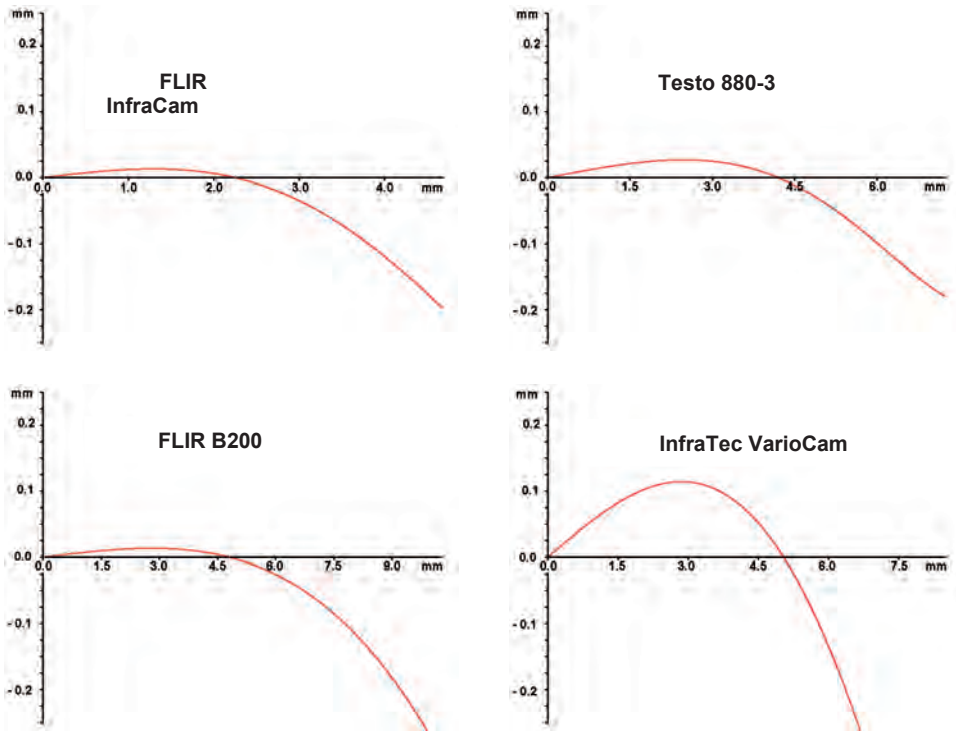


Abb. 8: Verzeichnungskurven.

es ist naheliegend, dass die publizierten Brennweiten und/oder die Pixelgrößen nicht der Realität entsprechen. Bemerkenswert ist weiterhin, dass bei der FLIR B200 die Hauptpunktverschiebung mehr als 1,4 mm bzw. 1,8 mm beträgt, was mehr als 35 Pixel bzw. 45 Pixel entspricht – bei Pixelanzahlen von 320×240 .

Alle Kameras zeigen relativ große radiale Verzeichnungswerte (Abb. 8). Der radialsymmetrische Anteil A1 ist vergleichsweise hoch und wird signifikant bestimmt, während die restlichen Parameter mehr oder weniger schlecht bestimmbar sind, da ihre

Standardabweichungen in der Größenordnung der Parameter selbst liegen. Während es in dieser Arbeit zunächst darum ging, die geometrischen Eigenschaften der Kameras näher zu untersuchen, sollte sich für Anwendungen in der Praxis die endgültige Ausgleichung auf die relevanten Parameter beschränken.

Die Kamera InfraTec VarioCam liefert die besten Ergebnisse in Bezug auf die Genauigkeit der geschätzten Parameter. Die Präzision der Bildpunktmessung liegt in der Größenordnung von $1 \mu\text{m}$ oder $1/30$ Pixel. Bei dieser Kamera ist der Hauptpunkt nur geringfügig

Tab. 3: RMS-Werte der Objektkoordinaten.

Kamera	X	Y	Z
FLIR InfraCam	0,110 mm	0,118 mm	0,143 mm
FLIR B200	0,148 mm	0,185 mm	0,145 mm
Testo 880-3	0,137 mm	0,160 mm	0,236 mm
Infratec VarioCam	0,038 mm	0,029 mm	0,062 mm

von der Bildmitte verschoben, und die Kamerakonstante liegt nahe bei der vom Hersteller angegebenen Brennweite.

Die resultierende Genauigkeit im Objekt-raum wird abgeschätzt durch die RMS-Werte der ausgeglichenen Objektkoordinaten. Tab. 3 fasst die Ergebnisse zusammen. Entsprechend der oben diskutierten Güte der Kalibrierung ergeben sich bei den drei Kameras FLIR InfraCAM, FLIR B200 und Testo 880-3 RMS-Werte (1 Sigma) von ca. 0,11 bis 0,24 mm. Dies entspricht einer relativen Genauigkeit von etwa 1 : 6000 in Bezug auf die größte Objektausdehnung. Bei der InfraTec VarioCam liegen die RMS-Werte bei 0,03 bis 0,06 mm, das entspricht etwa 1 : 20000.

4 Anwendungen

Wenn Thermografiekameras in Bezug auf das geometrische Bildmodell kalibriert sind, können sie für eine Vielzahl von praktischen Anwendungen verwendet werden (KAPLAN 2007).

4.1 Zweidimensionale Anwendungen

Für zweidimensionale Anwendungen können Thermalbilder in verzeichnungsfreie Bilder umgerechnet werden. Als ein Beispiel zeigt Abb. 9 das Originalbild, aufgenommen mit der InfraTec VarioCam. Die radiale tonnenförmige Verzeichnung ist deutlich sichtbar. Abb. 10 zeigt das gleiche Bild nach Korrektur der Verzeichnung. Geometrisch korrigierte thermografische Bilder können als thermale

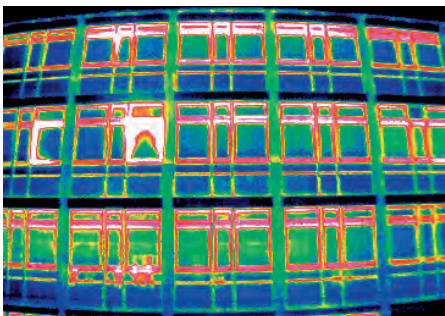


Abb. 9: Originales Thermalbild.

Orthophotos, als Karten oder Mosaik oder als präzise Texturen für 3D-Stadtmodelle oder Gebäudemodelle verwendet werden.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass modifizierte Thermografie-Aufnahmen oft nicht durch die Software-Pakete verarbeitet werden können, die mit einem bestimmten Kamerasystem mitgeliefert werden. Beispielsweise erlaubt die FLIR-Software eine Nachbearbeitung, z. B. von Temperaturskalen oder Farbtabelle, ausschließlich von originalen FLIR-Bildern.

4.2 3D-Verarbeitung

Dreidimensionale Anwendungen sind ebenfalls möglich, so dass Thermografie-Aufnahmen grundsätzlich in der gleichen Weise verwendet werden können wie herkömmliche photogrammetrische Bilder. Voraussetzung ist, dass ein entsprechender thermaler Bildverband aufgenommen wird und in diesem homologe Punkte bestimmbar sind. So ließen sich z. B. prinzipiell 3D-Gebäudemodelle aus Thermalaufnahmen ableiten, wenn keine anderen Bild- oder Messdaten zur Verfügung stehen.

Abb. 11 zeigt ein Beispiel von vier überlappenden Thermalbildern, die innerhalb weniger Minuten aufgenommen wurden, ohne die Kameraeinstellungen zu ändern. Es ist offensichtlich, dass die thermische Emission der Hauswand sich nicht wie ein diffuser Lambert-Strahler verhält. Identische Objektbereiche sind in verschiedenen Farben (Temperaturen) dargestellt.

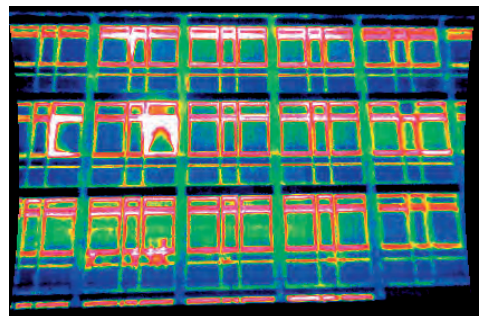


Abb. 10: Verzeichnungsfreies Thermalbild.

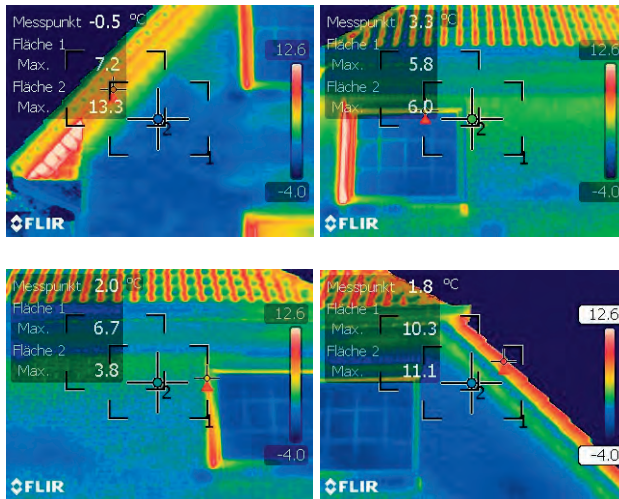


Abb. 11: Mehrbild-Thermografie.

Zukünftige Untersuchungen am IAPG werden sich u.a. auf die 3D-Modellierung mit Hilfe von Thermalbildern unter Berücksichtigung radiometrischer Objektmodelle konzentrieren.

4.3 Pan Sharpening

Wenn zusätzlich zum (niedrig aufgelösten) Thermalbild ein panchromatisches oder RGB-Bild mit hoher Auflösung verfügbar ist, so können beide per Pan Sharpening kombiniert werden. Dazu müssen beide Bilder geome-

trisch identisch sein. Abb. 12 zeigt den prinzipiellen Datenfluss beim thermalen Pan Sharpening, wie es in dem unten dargestellten Beispiel angewandt wurde.

Beispielhaft zeigt Abb. 13 ein originales Thermalbild einer Gebäudefassade. In Abb. 14 ist das Ergebnis des Pan Sharpening mit Hilfe eines hochauflösten digitalen Bildes einer Nikon D2x-Kamera. Im Gegensatz zu den Standardmethoden der Fernerkundung (z. B. TOET et al. 1989, EHLERS et al. 2009) erfordert in der Nahbereichsphotogrammetrie die Anwendung des Pan Sharpening auf nicht ebene Objekte entweder identische Perspektiven für

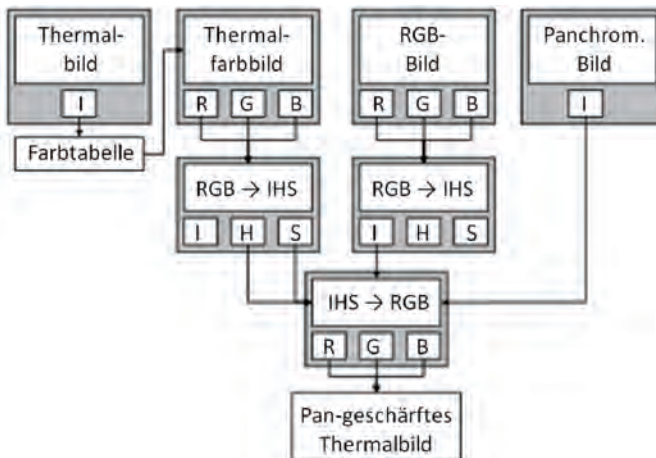


Abb. 12: Datenfluss beim Pan Sharpening von Thermalbildern.

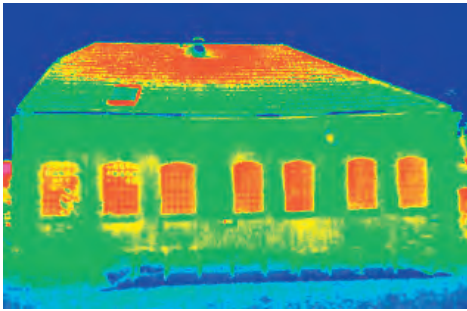


Abb. 13: Original-Thermalbild.

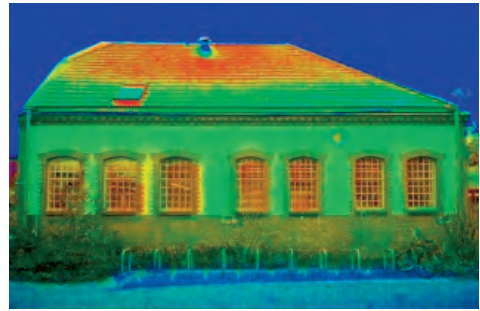


Abb. 14: Pan-geschärftes Thermalbild.

beide Bilder oder aber 3D-Objektmodelle und die vollständigen Orientierungsparameter für jedes Bild. Das obige Beispiel zeigt noch verbleibende geometrische Fehler beim hinteren Teil des Daches, da hier nur ein zweidimensionaler Korrekturansatz verwendet wurde.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass die Farben durch diese Verarbeitung verändert werden und eine Zuordnung von Temperaturen in einem folgenden Schritt zu falschen Werten führen kann. Andererseits ist die Methode des Pan Sharpening gut geeignet bei der Präsentation von thermografischen Untersuchungsergebnissen, da sich hiermit Objektetails gut hervorheben lassen.

5 Fazit

In diesem Beitrag haben wir das Potential einiger Thermografiekameras hinsichtlich ihrer geometrischen Eigenschaften untersucht. Standardverfahren der Kamerakalibrierung können auch auf Thermalbilder im Nahbereich angewendet werden, wenn es sich um Kameras mit Flächensensoren handelt. Darüber hinaus muss das beobachtete Objekt Zielpunkte besitzen, die im thermalen Spektralbereich sichtbar sind. Zu diesem Zweck wurde ein neues Testfeld konzipiert, das die kalte Thermalstrahlung des Himmels verwendet, um einen ausreichenden Bildkontrast zu schaffen.

Die Ergebnisse der Kamerakalibrierung zeigen, dass gängige Thermografiekameras hohe Verzeichnungswerte und große Hauptpunktverschiebungen haben. Nur eine der untersuchten Kameras (InfraTec VarioCam) bie-

tet eine Genauigkeit, die vergleichbar mit RGB-Kameras ist.

Einige beispielhafte Anwendungen werden angesprochen, die von zweidimensionaler Bildverarbeitung (Entzerrung, Mosaikbildung) und Ansätzen zum Pan Sharpening bis hin zu 3D-Modellierungen reichen, bei denen thermale Bilder in der gleichen Weise wie in der klassischen Mehrbildphotogrammetrie verwendet werden können. Es müssen jedoch die radiometrischen Modelle der thermischen Emission von Objekten noch detaillierter untersucht werden, um den Prozess der Bildentstehung in konvergenten Fällen besser zu verstehen.

Literatur

- BUYUKSALIH, G. & PETRIE, G., 1999: Geometric & Radiometric Calibration of Frame-Type Infrared Imagers. – ISPRS Joint Workshop Sensors and Mapping from Space 1999, Hannover.
- DERENIAK, E.L. & BOREMAN, G.D., 1996: Infrared Detectors and Systems. – Wiley-Interscience, 561 S.
- EHLERS, M., KLONUS, S., ÅSTRAND, P.J. & ROSSO, P., 2009: Multi-sensor image fusion for pansharpening in remote sensing. – *International Journal of Image and Data Fusion* 1 (1): 25–45.
- FOUAD, N.A. & RICHTER, T., 2008: Leitfaden Thermografie im Bauwesen. – Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 127 S.
- GODDING, R., 1993: Ein photogrammetrisches Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme. – *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* 2: 82–90.
- HIERL, T., 2008: Hochauflösende Infrarot-Detektormatrizen. – In: *Handbuch zur Industriellen Bild-*

- verarbeitung. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 41–46.
- KAPLAN, H., 2007: Practical applications of infrared thermal sensing and image equipment. – SPIE Publications, 192 S.
- LUHMANN, T., 2003: Nahbereichsphotogrammetrie. – Wichmann Verlag, Heidelberg, 570 S.
- LUHMANN, T., OHM, J., PIECHEL, J. & ROELFS, T., 2010: Geometric Calibration of Thermographic Cameras. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **38** (5): 411–416
- LUHMANN, T., 2010: Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. – Habilitationsschrift, Deutsche Geodätische Kommission C (645).
- NOLTING, J., 2007: Detektoren für optische Strahlung. – DOZ Optometrie **4**-2007: 50–56.
- SCHUSTER, N. & KOLOBRODOV, V.G., 2004: Infrarotthermographie. – Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 354 S.
- TOET, A., VAN RUYVEN, J.J. & VALETON, J.M., 1989: Merging thermal and visual images by a contrast pyramid. – Optical Engineering **28** (7): 789–792.
- WOLFE, W.L. & ZISSIS, G.J., 1985: The Infrared Handbook. – Environmental Research Institute of Michigan, 1700 S.

Adresse der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. habil. THOMAS LUHMANN, Dipl.-Ing. JULIA OHM, Dr.-Ing. JOHANNES PIECHEL und THORSTEN ROELFS (M.Sc.), Jade Hochschule Oldenburg, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, D-26121 Oldenburg, Tel.: +49-441-7708-3164, Fax: -3170, e-mail: vorname.name@jade-hs.de.

Manuskript eingereicht: September 2010
Angenommen: November 2010