

---

# BIM gestütztes Monitoring von Bauwerken aus Bildsequenzen verschiedener Sensoren und Epochen

Ludwig HOEGNER, Sebastian TUTTAS, Uwe STILLA

Technische Universität München, · ludwig.hoegner@tum.de, sebastian.tuttas@tum.de, stilla@tum.de

## Zusammenfassung

Durch die Verknüpfung verschiedener Sensoren und Aufnahmezeitpunkte wird es möglich, sowohl geometrische als auch radiometrische Veränderungen von Bauwerken im BIM zu dokumentieren und auszuwerten. Insbesondere bei der Kombination verschiedener Sensoren treten dabei Zuordnungsprobleme auf, da sich die Sichtbarkeit geometrischer oder radiometrischer Strukturen sowohl mit der Auflösung des Sensors, der Orientierung, dem Aufnahmezeitpunkt und dem Spektrum des Sensors ändern kann. Zur Lösung des Zuordnungsproblems werden zwei verschiedene Ansätze untersucht: Zum einen wird aus den Bildern jeder Sequenz eine eigene 3D Punktwolke durch Verknüpfung der Einzelbilder über Features erzeugt und die Punktwolken anschließend koregistriert. Da für die Orientierungen der Einzelbilder Näherungswerte aus dem GPS vorliegen, kann davon ausgegangen werden, dass die resultierenden Punktwolken annähernd übereinanderliegen und dieselbe Skalierung aufweisen. Alternativ wird das Vorwissen eines vorhandenen BIMs eingebettet, indem die Bildsequenzen auf das BIM koregistriert werden. Die so in das BIM eingebetteten Bilddaten und 3D Punktwolken der einzelnen Bildsequenzen können nun auf geometrische und radiometrische Änderungen untersucht werden. Die Verfahren werden anhand von zwei Szenarien bewertet. Zum einen wird eine terrestrische Bildsequenz einer Fassade im sichtbaren (RGB) und thermischen Infrarot (TIR) betrachtet. Zum anderen wird ein Gebäude betrachtet, das von einem UAV aus ebenfalls mit einer RGB Kamera und einer TIR Kamera aufgenommen wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass die Integration verschiedener Sensordaten in Kombination mit einem BIM geeignet ist, geometrische und radiometrische Änderungen an Bauwerken zu dokumentieren.

## 1 Motivation

Für die Extraktion von 3D Objektpunkten und die Koregistrierung von Bildern auf Bauwerksinformationsmodelle ist die Orientierung der Bildsequenzen notwendig. Dies geschieht meist über Verknüpfungspunkte zwischen den Bildern (HARTLEY & ZISSERMAN 2004), wobei bei ausreichender Redundanz die innere Orientierung der Kameras mitgeschätzt werden kann (AGARWAL et al. 2009, MAYER et al. 2012). Bei bekannter Kamerakalibrierung ist die Orientierung von Bildpaaren mit 5 Punktkorrespondenzen möglich (NISTER 2004). Insbesondere bei terrestrischen Aufnahmen urbaner Szenen, die von planaren Strukturen wie Fassaden dominiert werden, wird die Orientierung statt auf Bildpaaren auf Bildtriplets bestimmt (HARTLEY 1997, FITZGIBBON & ZISSERMAN 1998, MCGLONE 2004). In einem zweiten Schritt können Korrespondenzen für die meisten Bildpixel geschätzt werden, die in einem sogenannten Dense Matching dann zur Berechnung einer verdichteten 3D

Punktwolke verwendet werden (HIRSCHMUELLER 2008). Diese Methode ist auch für Bildsequenzen von RPAS-getragenen RGB-Kameras (MAYER et al. 2012, TUTTAS et al. 2015) und thermischen Infrarotkameras (WESTFELD et al. 2015, HOEGNER et al. 2016) untersucht worden.

Untersuchungen zur geometrischen Kalibrierung von thermischen Infrarotkameras wurden erstmals durchgeführt von SIMMLER (2010) und LUHMANN et al. (2010). Verfahren zur 3D Rekonstruktion und Texturextraktion aus Thermalbildern wurden für terrestrische Bildsequenzen (HOEGNER et al. 2007, HOEGNER & STILLA 2015) und Thermalbilder von einem RPAS (WESTFELD et al. 2015, HOEGNER et al. 2016) oder einem Helikopter (IWASZCZUK et al. 2012) untersucht. Sowohl die 3D Rekonstruktion als auch die Texturextraktion werden dabei von verschiedenen äußeren Bedingungen beeinflusst, da die Abstrahlung der Fassade abhängig ist von der Innen- und Außentemperatur, den Wetterbedingungen und den Materialien. Da technisch bedingt die Anzahl der Pixel auf einem Thermalsensor geringer ist als bei gewöhnlichen Kameras im sichtbaren Licht, ist bei ähnlichem Bildausschnitt die Auflösung am Objekt und damit die Genauigkeit bei der Bestimmung von 3D Koordinaten entsprechend geringer.

Kombiniert man die 3D Rekonstruktion mit einem Bauwerksinformationsmodell (BIM), so können über dieses Modell verschiedene Bilddatensätze verschiedener Epochen oder Sensoren kombiniert werden. HOEGNER et al. (2007) erzeugen Fassadentexturen aus fusionierten Bildern einer Bildsequenz, während bei IWASZCZUK et al. (2012) direkt einzelne Bilder auf das Gebäudemodell koregistriert werden. Die Texturen können anschließend mit Verfahren der Digitalen Bildverarbeitung analysiert werden. So können Segmentierungsalgorithmen eingesetzt werden und z.B. Heizungsrohre und Leckagen aus Thermaltexturen extrahieren. Auch die Extraktion von Fenstern basierend auf Grammatiken wurde bereits auf Thermaltexturen übertragen (MICHAELSEN et al. 2012). Durch den Raumbezug im BIM erhalten solche extrahierten Objekte 3D Koordinaten im Gebäudekoordinatensystem. Die Extraktion von 3D Punktwolken und die Koregistrierung mit einem BIM erlauben auch Aussagen über den geometrischen Zustand eines Bauwerks, z.B. bei der Baufortschrittskontrolle (TUTTAS et al. 2015), um zu bestimmen, welche Teile eines Bauwerks bereits konstruiert sind.

## 2 3D Rekonstruktion und Koregistrierung von Bildsequenzen

### 2.1. Koregistrierung von vororientierter Bildsequenz und BIM

Die relative Orientierung basiert auf einem von MAYER et al. (2012) vorgestellten Verfahren. Dabei wird Nistér's Fünf-Punkt-Algorithmus auf sich überlappende Bildtriplets angewandt (NISTÉR 2004). In den Bildern werden SIFT-Features (LOWE 2004) detektiert und über eine Kreuzkorrelation durch die Bildsequenz verfolgt. RANSAC (FISCHLER & BOLLES 1981) wird verwendet, um bei der Schätzung der Fundamentalmatrix  $F$  und des Trifokal-tensors  $T$  (HARTLEY & ZISSERMAN 2004) fehlerhafte Punktkorrespondenzen zu entfernen. Die überlappenden Bildtriplets der gesamten Sequenz werden anschließend in einer zweiten Bündelausgleichung zu einer Sequenz verbunden. Für die aus der relativen Orientierung bestimmten 3D Modellkoordinaten der homologen Punkte wird der Normalenvektor aus der lokalen Nachbarschaft bestimmt und die Punkte damit in Gruppen segmentiert, die zur

selben Fassadenfläche gehören. Anschließend wird die 3D-Punktwolke über eine Ähnlichkeitstransformation zwischen dem geschätzten Kamerapfad aus der relativen Orientierung und den aufgezeichneten GPS-Positionen ins globale Koordinatensystem überführt. Die segmentierten 3D Punkte werden der nächstliegenden Fassade mit einem ähnlichen Normalenvektor zugewiesen. Dieser Abstand wird in einer Bündelausgleichung minimiert, in dem die sieben Parameter der absoluten Orientierung geschätzt werden.

## 2.2. Integration des BIM in die Orientierung der Bildsequenz

Es wird von der Annahme ausgegangen, dass der 3D Objektpunkt eines homologen Punktepaars auf der Fassadenebene liegen muss, wenn es sich um einen Fassadenpunkt handelt. Andernfalls handelt es sich entweder um keinen Fassadenpunkt oder um eine Fehlzuordnung homologer Punkte. Ein Objektpunkt  $(X_i, Y_i, Z_i)$  ist über die Kollinearitätsgleichungen mit seinen  $k$  homologen Punkten  $(x_{ik}, y_{ik})$  verbunden. Wird diese Verbindung über Beobachtungsgleichungen für alle Objektpunkte und ihre homologen Punkte durchgeführt, so ergibt sich ein Gleichungssystem, in dem die unbekannt Parameter der äußeren Orientierung aller Bilder geschätzt werden und gleichzeitig Verbesserungen an den Bildkoordinaten der homologen Punkte angebracht werden. Homologe Punkte mit großen Verbesserungen werden als Fehlzuordnungen verworfen. Für die Parameter der äußeren Orientierung werden die GPS/INS Messwerte als Näherungswerte eingeführt. Das Vorwissen des Gebäudemodells wird durch zusätzliche fiktive Beobachtungen in die Ausgleichung eingebracht. Beschreibt man die Fassadenebenen in der Hesse-Normalform  $(\vec{r} \cdot \vec{n} - d = 0)$ , so erfüllt ein 3D Objektpunkt  $\mathbf{r} = (X_i, Y_i, Z_i)$  diese Gleichung genau dann, wenn er auf der Fassadenebene liegt. Die Gewichte werden dabei entsprechend des Abstandes zur nächsten Fassadenfläche gewählt, wobei das Gewicht mit kleinerem Abstand zunimmt. Hierdurch wird die Bildsequenz nicht nur auf Basis der homologen Punkte orientiert, sondern bereits an das BIM angepasst.

## 2.3. Koregistrierung von RGB und TIR Punktwolken

In diesem Verfahren werden zunächst auf Basis von SIFT-Features (LOWE 2004) die Bilder der RGB-Sequenz und die Bilder der TIR-Sequenz unter Einbeziehung der GPS/INS Informationen getrennt voneinander in einer Bündelblockausgleichung orientiert. Auf Basis der ausgeglichenen Orientierungsparameter wird mittels Semi-Global-Matching (HIRSCHMUELLER 2008) für beide Bildsequenzen eine dichte Punktwolke gerechnet. Die auf Basis der Ausgleichung geschätzten Orientierungsparameter werden als genau genug angesehen, um davon auszugehen, dass sowohl die Lage und Orientierung, also auch die Skalierung der beiden Punktwolken ähnlich sind und somit eine Koregistrierung über Iterative Closest Point (ICP) (RUSINKIEWICZ & LEVOY 2001) möglich ist. Hierbei wird die auf Grund der geringeren Pixelzahl dünnere TIR-Punktwolke auf die dichtere RGB Punktwolke transformiert.

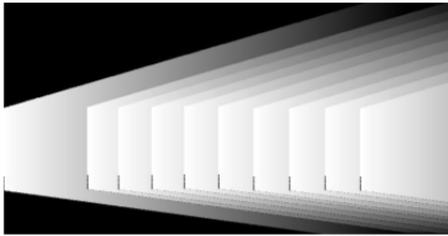
## 2.4. Textur Extraktion

In den meisten Bildern der terrestrischen Sequenzen sind die Fassaden nicht vollständig zu sehen. Die Fassadentexturen werden daher aus Teiltexturen aus den einzelnen Bildern zusammengesetzt. Dabei werden jeweils die vier nächsten Pixel aller projizierten Teiltexturen für eine bilineare Interpolation der Fassadentextur verwendet. Um bei den Fassadenvorbei-

fahrten der terrestrischen Sequenzen sowohl die Abdeckung der Fassade in voller Höhe zu erreichen, als auch eine möglichst hohe geometrische Auflösung der Texturen, werden die Sequenzen hier in Schrägsicht aufgenommen, so dass die Kamera nicht frontal auf die Fassaden, sondern schräg nach vorne blickt. Dadurch entstehen Fassadentexturen mit nicht einheitlicher Auflösung. Abbildung 1 zeigt symbolhaft die Verteilung der Auflösung in einer solchen Fassadentextur. Die schwarzen Bereiche der Fassaden waren in den verwendeten Bildern nicht sichtbar. Weiß entspricht der höchsten Auflösung. Je dunkler die Farbe, desto geringer die Auflösung. Diese Aufnahmesituation führt dazu, dass in einer geordneten Sequenz alle Teile einer Fassade, die das nächste Bild sieht, höher aufgelöst sind, als im Bild davor. In diesem Fall können für die Erstellung der vollständigen Fassadentextur die Teiltexturen in der Aufnahmereihenfolge der Bilder übereinandergeschrieben werden.

## 2.5 Baufortschrittskontrolle – Abgleich zwischen BIM und Ist-Zustand

Liegt für eine Baustelle ein BIM vor, in dem die jeweiligen Baufortschritte eingepflegt sind, so kann die Koregistrierung von 3D Punktwolke und BIM dazu verwendet werden, zu identifizieren, welche Teile des Bauwerks bereits erstellt sind (TUTTAS et al. 2015). Hierfür wird eine Sichtbarkeitsanalyse in einem Voxelspace durchgeführt, um zu klären, welche Gebäudeteile, die nicht zu sehen sind, auf Grund von Verdeckungen vorhanden sein können oder evtl. sogar müssen, und welche Elemente nicht vorhanden sein können, weil sie aus der Blickrichtung des Sensors ein sichtbares Element eigentlich verdecken müssten. Darüber hinaus müssen Punkte entfernt werden, die außerhalb eines Schwellwerts vor den Fassaden des BIM liegen. Diese Punkte gehören häufig z.B. zu Baugerüsten und werden aus der Punktwolke entfernt.



**Abb. 1:** Schematische Darstellung der geometrischen Auflösung einer aus Schrägsichten erzeugten Textur. weiß: höchste Auflösung, schwarz: nicht erfasste Bereiche der Fassade.

## 3. Verwendete Daten

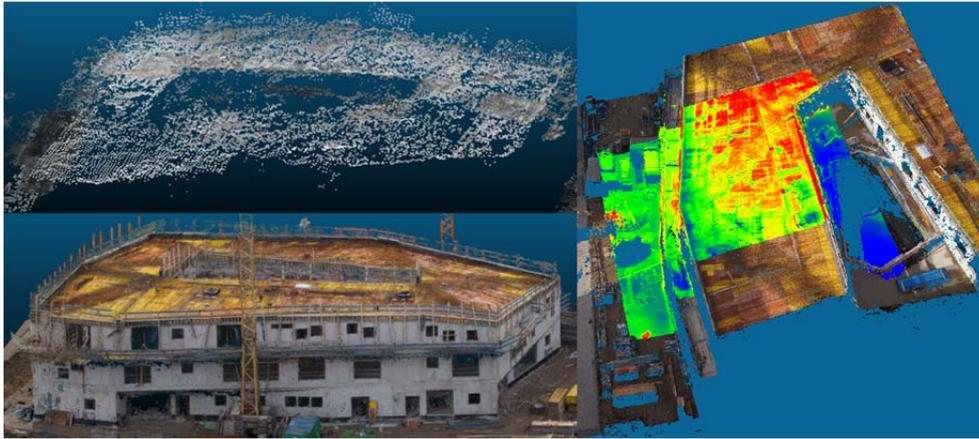
Für die Untersuchung der terrestrischen Bildsequenzen wurde eine Vorbeifahrt an der Technischen Universität München gewählt. Die Szene wurde mit einer FLIR SC3000 Thermalkamera mit 320x240 Pixeln und einer Temperaturauflösung von 0,02 K bei einer Bildwiederholrate von 50 Hz aufgenommen. Die GPS Position wurde für Keyframes einmal pro Sekunde erfasst. Mit diesem Szenario werden die Methoden zur 3D Rekonstruktion und Texturextraktion ohne bzw. mit Vorwissen untersucht. In der zweiten Kampagne wurde von einem Falcon 8 Octocopter aus nacheinander mit demselben programmierten Flugpfad Bilder mit einer Sony Nex-7 mit 6000 x 4000 Pixeln und einer FLIR Tau 640 Thermalkamera mit 640 x 512 Pixeln die Baustelle eines Kindergartens aufgenommen. Hier wird die Koregistrierung von Bildsequenzen aus dem sichtbaren und thermischen Spektrum und der Abgleich der RGB-Punktwolke mit dem Baufortschritt aus dem BIM untersucht.

## 4. Ergebnisse

Tabelle 1 zeigt die Genauigkeiten der Orientierung ohne und mit Vorwissen für vier terrestrische Thermalbildsequenzen (a bis d). Während sich bei der Berechnung ohne Vorwissen die Genauigkeiten der einzelnen Vorbeifahrten auf Grund der verschiedenen Struktur der Fassaden und der unterschiedlichen Abschattung des GPS Signals unterscheiden, zeigt sich, dass sich durch die Hinzunahme des Vorwissens die Genauigkeiten der einzelnen Sequenzen annähern. Dies ist besonders für die Sequenzen b und d der Fall, bei denen die Fassaden wiederholende Muster und nur wenige Fassadenebenen aufweisen. Für das Szenario zwei wurde sowohl die RGB-Punktwolke als auch die Thermalpunktwolke mit Semi-Global-Matching erzeugt (Abb. 2). Deutlich zu sehen ist, dass die RGB-Punktwolke auf Grund der höheren geometrischen Auflösung deutlich dichter als die Thermalpunktwolke ist. Außerdem wurden mit der Thermalkamera nur Aufnahmen des Daches gemacht. Dadurch beinhaltet die Punktwolke hier auch überwiegend Punkte auf der Dachfläche und am Boden. Bei der Überlagerung der Punktwolken im rechten Bild sieht man, dass die Koregistrierung auf die Dachfläche optimiert ist. Bei der Bodenfläche links sind noch Projektionsfehler zu sehen. Tabelle 2 zeigt die Genauigkeiten bei der 3D Rekonstruktion der vom RPAS aus aufgenommenen RGB- und TIR-Bildsequenzen. Die höhere geometrische Auflösung der RGB-Bilder führt zu mehr homologen Punkten in der relativen Orientierung und zu mehr dichten Punkten im Semi-Global-Matching. Der Root-Mean-Squares-Error (RMS) für die äußere Orientierung zeigt leicht bessere Werte für die Thermalbilder. Das liegt daran, dass durch die niedrigere geometrische Auflösung ein größerer Teil der Restfehler in die Beobachtungen geschoben wird. Dennoch sind die Werte sowohl für die Thermalbilder als auch die RGB-Bilder relativ hoch, was mit der ursprünglichen Messgenauigkeit des im RPAS eingebauten GPS/INS Systems zu tun hat. Da die Dichte der RGB Punktwolke deutlich höher ist als die der Thermalpunktwolke, wird davon ausgegangen, dass für jeden Punkt der Thermalpunktwolke ein nächster Punkt der RGB-Punktwolke existiert. Die Koregistrierung der Punktwolken mittels ICP reduziert den mittleren Abstand der 3D Punkte der Thermalpunktwolke zum nächsten Nachbarpunkt der RGB Punktwolke von 1.81998 m auf 0.108672 m und die Standardabweichung der 3D Koordinaten der Thermalpunktwolke von 0.589367 m auf 0.251902 m.

**Tabelle 1:** Genauigkeiten der Orientierung mit und ohne Vorwissen für die terrestrischen Bildsequenzen

	Relative Orientierung				Absolute Orientierung			
	a	b	c	d	a	b	c	d
$\sigma_{xy}[\mu\text{m}]$	0.3857	12.74	0.9486	14.71	0.3534	1.529	0.9185	1.405
$\sigma_{xyz}[\text{m}]$	0.06855	0.3627	0.1068	0.3815	0.05944	0.1910	0.09583	0.1748
$\sigma_{x0}[\text{m}]$	0.1285	0.2512	0.08374	0.3486	0.04454	0.06776	0.04969	0.03390
$\sigma_{y0}[\text{m}]$	0.04055	0.1856	0.2731	0.4502	0.02294	0.01750	0.1005	0.1972
$\sigma_{z0}[\text{m}]$	0.02063	0.05744	0.06718	0.0815	0.009547	0.03065	0.06421	0.04909
$\sigma_{\omega0}[\text{gon}]$	0.03016	0.05230	0.6114	1.029	0.02323	0.3148	0.5981	0.6936
$\sigma_{\varphi0}[\text{gon}]$	0.06945	0.2041	0.09485	0.5176	0.02196	0.08770	0.05319	0.4930
$\sigma_{\kappa0}[\text{gon}]$	0.2259	0.4583	0.5834	1.923	0.2016	0.3806	0.5991	1.522



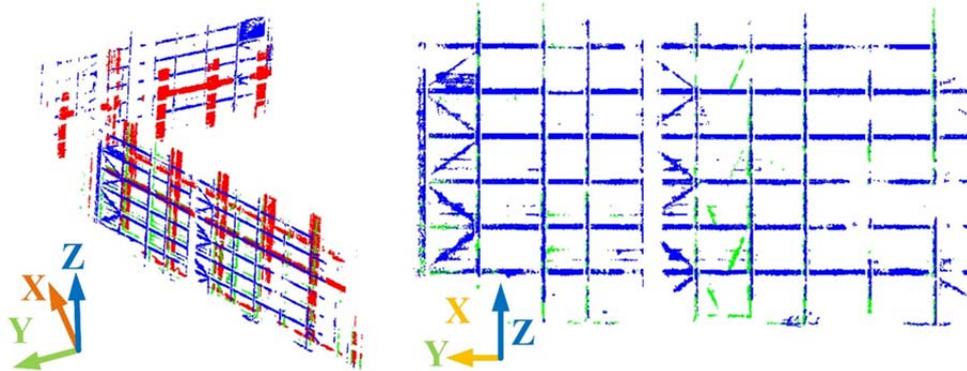
**Abb. 2:** Punktwolken aus Thermalbildern (oben) und RGB-Bildern (unten). Die Punktwolke der Thermalkamera ist nur aus Bildern in Nadirsicht erzeugt und beinhaltet kaum Fassadenpunkte. Die RGB-Punktwolke mit ihrer höheren Punktdichte zeigt Teile der Kräne und des Baugerüsts. Rechts: RGB Punktwolke mit überlagerten koregistrierten TIR Intensitäten.

**Tabelle 2:** Ergebnisse der Bündelblockausgleichung für die Sequenz der RGB-Bilder und der Thermalbilder, die mit einem RPAS aufgenommen worden sind. Man sieht deutliche Verbesserungen durch die Ausgleichung insbesondere bei den äußeren Orientierungen, die vom GPS/INS des RPAS aufgezeichnet wurden.

	<b>TIR</b>	<b>RGB</b>
Abweichung innere Orientierung	1.97 %	5.08 %
RMS $X_0$ [m]	0.795129	0.320422
RMS $Y_0$ [m]	0.397178	0.334195
RMS $Z_0$ [m]	0.627111	0.585101
RMS $\omega_0$ [Grad]	7.105335	16.816294
RMS $\varphi_0$ [Grad]	7.597303	22.161192
RMS $\kappa_0$ [Grad]	7.92476	15.828145
Mittlere Anzahl Tie-Points / Bild	6810	37612
Mittlere Anzahl Matches / Bild	1608	14170
Anzahl 2D Tie-Points	39409	1204638
Anzahl 3D Punkte	17137	465868
Mittlerer Projektionsfehler [pixels]	0.218287	0.152046
Anzahl Punkte dichte Punktwolke	41126	32313301

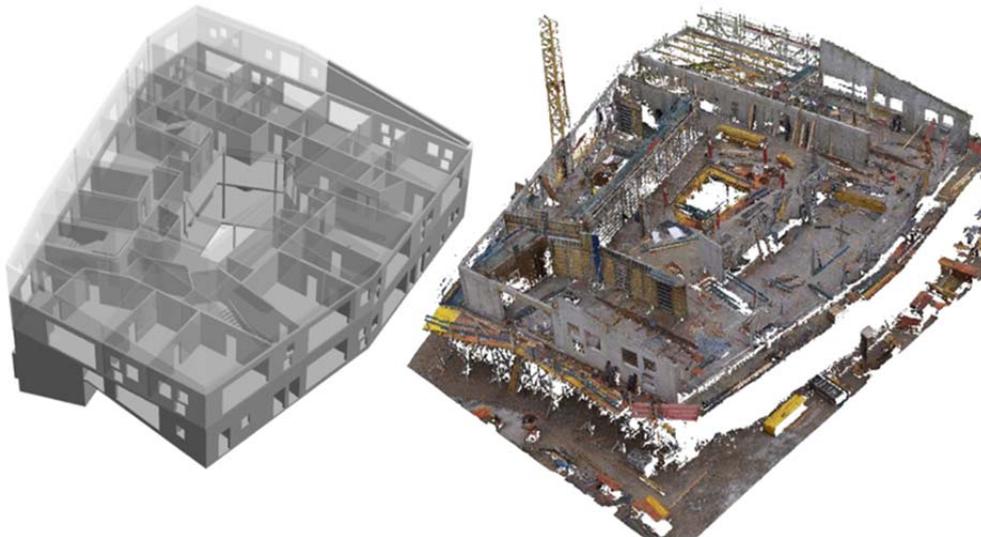
Liegt zu den Punktwolken ein BIM vor, so kann man 3D Punkte, die vor den Fassaden liegen, erkennen. Abbildung 3 zeigt die aus der ursprünglichen RGB-Punktwolke einer Baustelle extrahierten Gerüstelemente (XU et al. 2016). Zu sehen ist, dass sowohl die Streben, als auch die Stege der Gerüste erkannt wurden. Hier wurde zunächst nach Punkten

gesucht, die außerhalb einer Toleranz vor der Fassaden liegen und anschließend die Punkte durch ein fitting mit geometrischen Primitiven segmentiert.



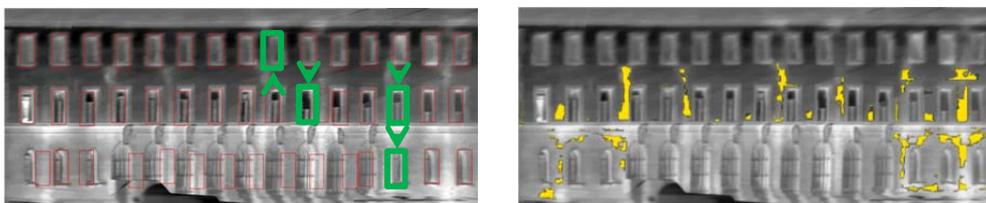
**Abb. 3:** Aus der Punktwolke extrahierte Gerüstelemente, die nicht Teil der Fassade sind.

Ist im BIM nicht nur die Bauwerksgeometrie hinterlegt, sondern auch die Reihenfolge, in der die einzelnen Elemente gebaut werden, so kann die 3D Punktwolke verwendet werden, um zu bestimmen, welche Elemente bereits gebaut sind. Ein Beispiel ist in Abbildung 4 dargestellt (TUTTAS et al. 2015). Die nicht durch entsprechende Segmente der Punktwolke validierten Teile des Bauwerks sind teiltransparent dargestellt.



**Abb. 4:** Abgleich zwischen der 3D Punktwolke und dem BIM. Bauteile, die nicht durch Segmente der Punktwolke validiert werden konnten, sind teiltransparent dargestellt.

Aus den Texturen können Leckagen und Fenster detektiert und dem BIM hinzugefügt werden. Abbildung 5 zeigt die Thermaltextur einer Fassade. Man erkennt, dass die geometrische Auflösung der Fenster im zweiten Obergeschoss deutlich geringer ist als im Erdgeschoss und ersten Obergeschoss. Dies kommt von der Schrägaufnahme der Fassade und dem Zusammensetzen der Teilfassaden. Trotz der unterschiedlichen geometrischen Auflösung zeigt Abbildung 5a, dass es möglich ist die Fenster mittels eines Gestalt-Systems zu detektieren. (MICHAELSEN et al. 2012). Man erkennt, dass ein Großteil der Fenster korrekt detektiert wurde, sodass die fehlenden Fenster oder Fehldetektionen durch die Annahme einer regulären Fassadenstruktur ergänzt bzw. entfernt werden können. Abbildung 5b zeigt die Ergebnisse der Detektion von Leckagen in der Fassade. Unter der Annahme, dass nach der Entfernung der Fenster verbleibende auffällige Abweichungen vom Mittelwert der Intensität der Textur Leckagen darstellen, sind diese Bereiche als Schadstellen in Gelb segmentiert worden. Zu sehen ist, dass die Detektion der Leckagen an den rechteckigen Fenstern der beiden Obergeschosse gut funktioniert. Bei den großen vergitterten Fenstern in der Mitte des Erdgeschosses werden keine Leckagen detektiert. Auch die Detektion der Fenster zeigt, dass dort zwar das Vorhandensein von Fenstern erkannt wird, dass sie auf Grund ihrer Form aber nicht korrekt lokalisiert werden können.



**Abb. 5:** Thermaltextur einer Fassade. a) Detektierte Fenster in rot und fehlende Fenster in Grün. b) Detektierte Leckagen in Gelb.

## 5. Ausblick

In diesem Beitrag ist gezeigt worden, dass die Verfahren zur Extraktion von 3D Punktwolken aus thermischen Infrarotbildern eine ausreichende Qualität liefern, um die Bildsequenzen auf dichte RGB Punktwolken oder BIMs zu koregistrieren. Dadurch wird es möglich, aus dem thermischen Infrarot extrahierte Objekte wie Fenster und Leckagen in das BIM zu integrieren. Die Koregistrierung von Punktwolken aus dem sichtbaren und thermischen infraroten Spektrum aus mehreren Epochen erlaubt die Verfolgung zeitlicher Änderungen der Geometrie, z.B. bei der Baufortschrittskontrolle, und der Radiometrie, z.B. bei der Beobachtung des Aufwärm- oder Abkühlverhaltens von Fassaden. Es hat sich gezeigt, dass durch die Hinzunahme des BIM bei der Orientierung von Bildsequenzen, die Genauigkeiten der äußeren Orientierung und damit der Extraktion von 3D Punktwolken und Texturen erhöht werden kann, insbesondere in urbanen Bereichen, in denen auf Grund der Abschattung die Genauigkeit von GPS Signalen nachlässt.

## Literatur

- AGARWAL, S., SNAVELY, N., SIMON, I., SEITZ, S. & SZELISKI, R. (2009) Building Rome in a day. Proceedings of the International Conference on Computer Vision.
- FISCHLER, M. & BOLLES, R. (1981) Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM* 24(6), 381–395.
- FITZGIBBON, A. & ZISSERMAN, A. (1998) Automatic camera recovery for closed or open image sequences. *Lecture Notes in Computer Science*.
- HARTLEY, R. (1997) Lines and points in three views and the trifocal tensor. *International Journal of Computer Vision* 22(2), 125–140.
- HARTLEY, R. & ZISSERMAN, A. (2004) *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 4 edn, Cambridge University Press. ISBN 0521540518.
- HIRSCHMUELLER, H. (2008) Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 30(2), 328–341.
- HOEGNER, L., TUTTAS, S., XU, Y., EDER, K., & STILLA, U. (2016) Evaluation of Methods for Coregistration and Fusion of RPAS-based 3D Point Clouds and Thermal Infrared Images, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41(B3), 241-246
- HOEGNER, L. & STILLA, U. (2015) Building facade object detection from terrestrial thermal infrared image sequences combining different views. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 2(3/W4), 55–62.
- 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* 2007(6), 459–468.
- IWASZCZUK, D., HOEGNER, L., SCHMITT, M. & STILLA, U. (2012) Line based matching of uncertain 3d building models with IR image sequences for precise texture extraction. *PFG Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 2012(5), 511–521.
- LOWE, D. (2004) Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60(2), 91–110.
- LUHMANN, T., OHM, J., PIECHEL, J. & ROELFS, T. (2010) Geometric calibration of theographic cameras. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38(5), 411–416.
- MAYER, H., BARTELTSEN, J., HIRSCHMUELLER, H. & KUHN, A. (2012) Dense 3d reconstruction from wide baseline image sets. In: F. DELLAERT, J.-M. FRAHM, M. POLLEFEYS, L. LEAL-TAIXE AND B. ROSENHAHN (eds), *Outdoor and Large-Scale Real-World Scene Analysis* Springer, Berlin, 7474, 285–304.
- MCGLONE, C. (2004) *Manual of Photogrammetry*. ASPRS. ISBN 1570830711.
- MICHAELSEN, E., IWASZCZUK, D., SIRMACEK, B., HOEGNER, L. & STILLA, U. (2012) Gestalt grouping on facade textures from ir image sequences: Comparing different production systemse. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 39(B3), 303–308.

- NISTER, D. (2004) An efficient solution to the five-point relative pose problem. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 26(6), 756–777.
- POLLEFEYS, M., NISTÉR, D., FRAHM, J.M., AKBARZADEH, A., MORDOHAI, P., CLIPP, B., ENGELS, C., GALLUP, D., KIM, S.J., MERRELL, P., SALMI, C., SINHA, S., TALTON, B., WANG, L., YANG, Q., STEWÉNIUS, H., YANG, R., WELCH, G. & TOWLES, H. (2008) Detailed real-time urban 3D reconstruction from video. *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, 78(2-3), 143-167.
- RUSINKIEWICZ, S. & LEVOY, M. (2001) Efficient variants of the ICP algorithm. *Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, 145–152.
- SIMMLER, C. (2009) Entwicklung einer Messanordnung zur geometrischen Kalibrierung von Infrarot-Kameras. Bachelor's Thesis.
- TUTTAS, S., BRAUN, A., BORRMANN, A. & STILLA, U. (2015) Validation of bim components by photogrammetric point clouds for construction site monitoring. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 2(3/W4), 231–237.
- XU, Y., TUTTAS, S., HOEGNER, L. & STILLA, U. (2016) Classification of photogrammetric point clouds of scaffolds for construction site monitoring using subspace clustering and PCA. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41(B3), 725-732
- WESTFELD, P., MADER, D. & MAAS, H. (2015) Generation of tir attributed 3d point clouds from uav-based thermal imagery. *PFG Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 2015(5), 381–394.