

Detektion von Fensterverdachungen und Gesims in Fassadenbildern und Punktwolken

WOLFGANG BRANDENBURGER¹, MARTIN DRAUSCHKE²
WILLIAM NGUATEM² & HELMUT MAYER²

Zusammenfassung: In dieser Arbeit wird ein Ansatz für die automatische Detektion von Fensterverdachungen und Gesims vorgestellt, der auf der Analyse eines entzerrten Fassadenbildes in Kombination mit einer 3D-Punktwolke erfolgt. Die Punktwolke wird dabei aus einer Bildsequenz abgeleitet, z.B. nach (MAYER et al. 2012). Ausgehend von der Detektion der Fassadenwand als Ebene und der Bestimmung ihrer Begrenzung wird eine Fensterdetektion verwendet, um in einem möglichst kleinen Suchraum die Existenz von Verdachungen zu überprüfen. Neben der geometrischen Analyse werden auch detektierte Kanten ausgewertet. Das in diesem Aufsatz beschriebene Verfahren kann zuverlässig bogenförmige Fensterverdachungen von Dreiecksgiebeln und Gesims unterscheiden. Das wird in Experimenten auf Fassaden aus Freising, München und Schwabach gezeigt.

1 Einleitung

Mittels 3D-Stadtmodelle werden urbane Räume modelliert. Sie werden in diversen Bereichen eingesetzt, z.B. im Tourismus, in der Architektur oder in der Stadt- und Raumplanung. In diesen Bereichen wird eine realitätsnahe Darstellung mit einem hohen Detaillierungsgrad gefordert. Derzeitige 3D-Stadtmodelle weisen aber in aller Regel nur eine geringe Detaillierung auf. Die Modellierung auffälliger Gestaltungsmittel der Architektur wie Fensterverdachungen und Gesimse auf Gebäuden mit historischen Fassaden ist mit einem erheblichen manuellen Arbeitsaufwand verbunden und wird daher (wenn überhaupt) nur für einzelne Sehenswürdigkeiten vorgenommen.

LEBERL et al. (2012) leiten größere detailreiche 3D-Modelle von urbanen Räumen aus diversen Datenquellen ab, wobei Luftbilder für die grobe Modellierung des städtischen Raumes sowie Bilder und LIDAR-Daten von Fahrzeugen verwendet werden. Letztere werden zur Modellierung von Details verwendet. MAYER et al. (2012) kombinieren Bodenaufnahmen und Bilder von Drohnen / Unmanned Aircraft Systems (UAS) zur Generierung von dichten Punktwolken, aus denen detaillierte Oberflächen und grobe Gebäudestrukturen (NGUATEM et al., 2012) konstruiert werden.

Primäre Architekturglieder wie Fenster, Eingänge und schwach ausgeprägte 3D-Strukturen werden häufig unter Verwendung entzerrter Bilder und auf Basis einer baustiltypischen Grammatik detektiert, wie z.B. bei (SIMON et al., 2011). Für die Detektion von Detailstrukturen wie Fensterkreuze oder Ornamente an der Fassade werden zusätzlich noch LIDAR-Punktwolken verwendet, so z.B. bei (BECKER & HAALA, 2008), (HOHMANN et al., 2009) oder (SCHMITTWILKEN & PLÜMER, 2010).

¹ Wolfgang Brandenburger, Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr, Dezernat III 1 (1) Geländeanalyse, Frauenberger Straße 250, 53879 Euskirchen, Email: wolfgangbrandenburger@bundeswehr.org

² Martin Drauschke, William Nguatem, Helmut Mayer, Universität der Bundeswehr München, Institut für Angewandte Informatik, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg, Email: martin.drauschke@unibw.de, william.nguatem@unibw.de, helmut.mayer@unibw.de

In dieser Arbeit wird ein Ansatz für die Detektion auffälliger architektonischer Gestaltungsmittel wie Fensterverdachungen und Gesimse vorgestellt. Zunächst wird die allgemeine Vorgehensweise für die Fassadeninterpretation aufgezeigt (siehe Abb. 1), danach wird das neue Verfahren für die Detektion von Fensterverdachungen und Gesims präsentiert. Abschließend werden Ergebnisse für Fassaden aus dem Großraum München vorgestellt und die Performanz des Verfahrens diskutiert.

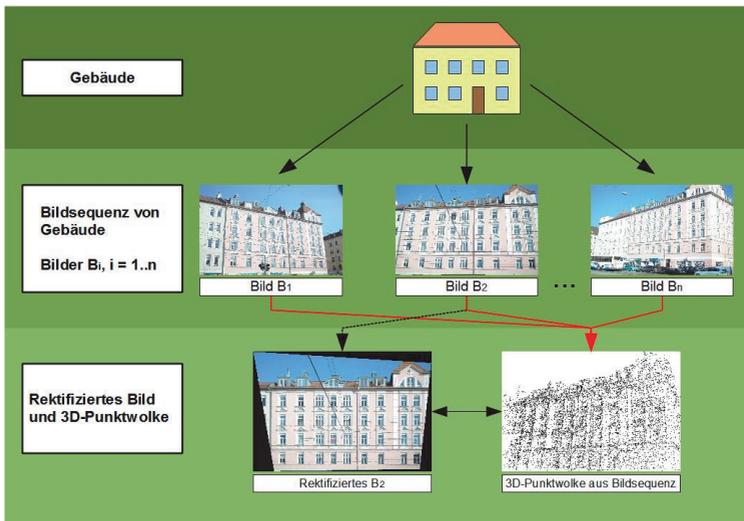


Abb. 1: Konzept für die Fassadeninterpretation mit Bildsequenz und Punktwolke.

2 Konzept für die Fassadeninterpretation

Datengrundlage (siehe Abb. 1) für die Fassadeninterpretation bilden mit handelsüblichen Kameras aufgenommene terrestrische Bildsequenzen. Mit Hilfe eines Rekonstruktionsverfahrens (MAYER et al., 2012) wird aus der Bildsequenz eine mittelmäßig dichte, aber sehr präzise Punktwolke abgeleitet. Neben diesen 3D-Punkten wird auch eine auf die Fassadenfläche entzerrte Aufnahme der Bildsequenz für die Weiterverarbeitung verwendet. Dazu werden zunächst die Lage und die Ausdehnung der Fassadenwand bestimmt. Hierfür eignet sich eine Ebenensuche in der 3D-Punktwolke mittels RANSAC (FISCHLER & BOLLES, 1981). Diese wird durch eine vorhergehende Segmentierung des Bildes ergänzt. Danach wird ein Bild mit möglichst senkrechter Blickrichtung auf die Fassade mittels einer Homographie so entzerrt, dass die Fassadenfläche im Bild rechtwinklig erscheint.

In entzerrten Fassadenbildern können durch Gradientenanalyse nach (LEE & NEVATIA, 2004) oder Implicit Shape Models nach (REZNIK & MAYER, 2008) Fenster erkannt werden. Dadurch kann die Suche nach Fensterverdachungen und Gesims auf kleine Bereiche oberhalb der Fenster eingeschränkt werden. Besonders häufig kommen die flache Gesimse, Dreiecksgiebel sowie

bogenförmige Fensterverdachungen vor (siehe Abb. 2). Deshalb beschränkt sich die Detektion von Verdachungen auf diese drei Erscheinungsformen.



Abb. 2: Verdachungsformen: Fenstergesims (links), Dreiecksgiebel (Mitte) und Bogensegment (rechts).

3 Umsetzung

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Detektion der Verdachungen in Fassadenbildern und daraus rekonstruierten Punktwolken. Grundlage sind die in Abschnitt 2 beschriebenen Schritte. Diese können vollautomatisch durchgeführt werden. Um das entwickelte Verfahren unabhängig von den vorhergehenden Arbeitsschritten testen zu können, wurden die Vorarbeiten überwacht und teilweise manuell korrigiert.

3.1 Detektion der Fassade sowie der Fenster

Unter Angabe des Maßstabs einer Punktwolke ist es möglich, die rekonstruierten 3D-Punkte in unmittelbarer Nähe der in Abschnitt 2 detektierten Wand von allen anderen zu unterscheiden. Damit ist eine Abgrenzung der Fassade im entzerrten Bild in erster Näherung möglich. Im nächsten Schritt wird der korrespondierende Bildausschnitt in zwei Bereiche segmentiert, wobei die Varianz des Abstands der Punkte des Umfelds von der Ebene und die Intensitätswerte im Bild berücksichtigt werden. Als Resultat erhält man die Bereiche der Fassade, die exakt auf der Fassade liegen (siehe Abb. 3). So lassen sich 3D-Punkte, die auf Fenster oder Ornamenten liegen, für die Verfeinerung der Modellierung der Fassadenebene ausschließen.

Nachdem die Fassadenebene und ihre Abgrenzung bekannt sind, wird nach den Fenstern im entzerrten Fassadenbild gesucht. Unter Annahme einer regelmäßigen Anordnung der Fenster innerhalb einer Fassade wird der Fensterdetektor von LEE & NEVATIA (2004) eingesetzt.

3.2 Detektion der Fensterverdachungen

3.2.1 Objektmodelle für Fensterverdachungen

Fensterverdachungen und Gesimse sind plastisch vor die Außenwand hervortretende Bauglieder einer Fassade, die sich direkt oberhalb von Fenstern befinden. Sie dienen allein der Dekoration und sollen die Fassade durch Schattenbildung beleben (KOEPEL & BINDING, 2005). Im Allgemeinen steht die Größe einer Verdachung im direkten Zusammenhang mit den zugehörigen Fenstern: Sie sind etwas breiter. Des Weiteren haben sie eine moderate Höhe. Diese Rahmenbedingungen bzgl. der Lage vor und innerhalb einer Fassade werden beim entwickelten Detektionsverfahren ausgenutzt.



Abb. 3: Segmentierung der Bereiche direkt auf der Fassade. Blau markierte Bereiche zeigen die Fassadenwand, d.h. sie weisen 3D-Punkte mit sehr niedriger Streuung um 3D-Ebene auf.

Die drei gängigsten Formen für Fensterverdachungen und Gesims sind in Abb. 2 dargestellt. Es handelt sich um das Fenstergesims, bestehend aus einer horizontalen Bedachung des Fensters, um den Dreiecksgiebel (gleichschenkliges Dreieck) und um das Bogensegment, das in dieser Arbeit durch einen Kreisbogen approximiert wird.

3.2.2 Suchbereich für Fensterverdachungen

Die detektierten Fenster werden entsprechend ihrer Anordnung mit zwei Indices i und j bezeichnet. Sei das Fenster F_{ij} mit den Parametern $(x_{ij}, y_{ij}, B_{ij}, H_{ij})$ für seine Lage (Schwerpunkt) und Ausdehnung (Breite und Höhe) gegeben. Dann wird der Suchbereich für eine Fensterverdachung dieses Fenster F_{ij} durch seine beiden horizontalen Nachbarn $F_{i,j-1}$ und $F_{i,j+1}$ sowie das darüber liegende Fenster $F_{i-1,j}$ definiert. Bei Fenstern ohne Nachbarn wird der Suchbereich bis zum Fassadenrand ausgedehnt. Abb. 4 zeigt einen Suchbereich.

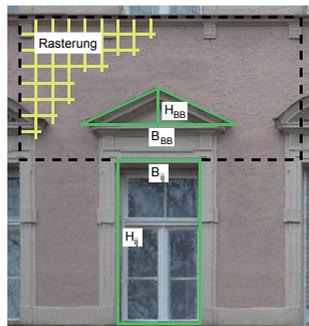


Abb. 4: Fenster und Suchbereich mit Rasterung und Teile der Parameter für Fenster und Dreiecksgiebel.

3.2.3 Erkennung aufgrund der 3D-Geometrie

Es wurde untersucht, ob allein die Analyse der Punkte bzgl. ihrer Lage zur Fassadenebene für die Erkennung von Fensterverdachungen und Gesims ausreicht. Dazu wird der oben definierte Suchbereich diskretisiert, und zwar so, dass die Fensterbreite B_j der Breite für zehn quadratische

Rasterfelder entspricht. In den Rasterfeldern wird die Punktdichte bestimmt und mit der über die gesamte Fassade berechneten Punktdichte statistisch verglichen, um Hinweise auf auffällige Strukturen zu erhalten. Anschließend werden die Ergebnisse mittels eines morphologischen Closings verbessert. Die zusammenhängenden Strukturen mit einer Breite B_{BB} und einer Höhe H_{BB} der zugehörigen Bounding Box werden hinsichtlich der geometrischen Übereinstimmung mit dem zugrunde liegenden Fenster bewertet. Wenn gilt

$$\bar{B}_{ij} \leq B_{BB} \leq 2\bar{B}_{ij}, \quad H_{BB} \leq \frac{1}{2} H_{ij},$$

wird die gefundene Struktur als Fensterverdachung bewertet.

3.2.4 Erkennung aufgrund von Kanten

Für die Erkennung von Fensterverdachungen und Gesims mittels Kanten werden diese im oben definierten Suchbereich mittels Canny-Operator (CANNY, 1986) extrahiert. Aufgrund starker radiometrischer Schwankungen in den Bildern wird ein sehr niedriger Schwellwert zur Konturverfolgung verwendet. Um robuste Ergebnisse zu erhalten werden mittels Tiefpassfilterung feine Strukturen unterdrückt.

In den Kantenbildern werden Geradenstücke und Kreisbögen gesucht (siehe Abb. 5). Mittels RANSAC (FISCHLER & BOLLES, 1981) werden die Parameter über eine zufällige Auswahl von Kantenpunkten geschätzt. Dabei sollen ausschließlich bedeutsame Geradenstücke und Kreisbögen ermittelt werden. Bedeutsame Strukturen liegen vor, wenn sowohl die Menge der ein Modell unterstützenden Punkte als auch die modellierte Instanz eine ausreichende Größe haben. Diese Mindestzahl von Punkten wird in Abhängigkeit von der Fenstergröße (B_{ij} , H_{ij}) festgelegt.

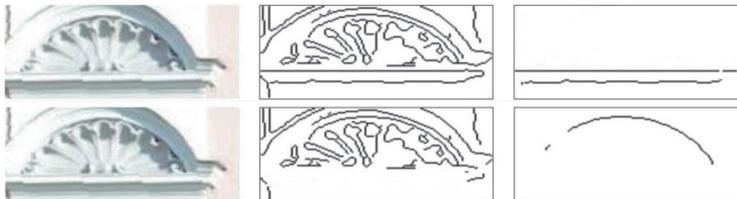


Abb. 5: RANSAC-Algorithmus zur Suche bedeutsamer Strukturen im Kantenbild. Links: Bildausschnitt mit bogenförmiger Verdachung. Mitte: Ergebnis der Kantendetektion mit verschiedenen Schwellwerten. Rechts: Ergebnis der Suche nach Geraden (oben) bzw. nach Kreisbögen (unten).

Es werden alle Geradenstücke entfernt, die einen Winkel betragsmäßig größer 45° zur Horizontalen aufweisen. Dieser Wert rührt daher, dass in der Regel nur stumpfwinklige Dreiecksgiebel vorkommen und vertikale Geraden bei der Unterscheidung der verschiedenen Fensterverdachungen keine Rolle spielen. Ebenso werden alle Kreisbögen entfernt, die keine unterstützenden Punkte im Bereich des oberen Scheitelpunkts haben.

Mittels eines Entscheidungsbaums wird nun klassifiziert, ob eine Fensterverdachung vorliegt und ob es sich um ein Gesims, einen Dreiecksgiebel oder ein Bogensegment handelt. Für ein Bogensegment muss der Mittelpunkt des aus dem Kreissegment abgeleiteten Kreises in einem Toleranzbereich um die vertikale Mittelachse des entsprechenden Fensters liegen. Bei einem Dreiecksgiebel müssen die beiden detektierten Geradenstücke annähernd gleiche Winkel mit

unterschiedlichem Vorzeichen haben und der gemeinsame Schnittpunkt in einem Toleranzbereich um die vertikale Mittelachse des entsprechenden Fensters liegt. Für ein Gesims müssen zwei horizontale Geraden detektiert werden, deren Mitte in einem Toleranzbereich um die vertikale Mittelachse des entsprechenden Fensters liegen. In allen drei Fällen wird der zulässige Toleranzbereich um die vertikale Mittelachse in Abhängigkeit von der Perspektive des Ausgangsbildes gewählt.

3.2.5 Kombination von 3D-Geometrie und Kanten

Die Performanz beider Ansätze zur Detektion von Verdachungen wird stark durch die Wahl der Parameter beeinflusst. Die Parameter können so eingestellt werden, dass keine Falschdetektionen erfolgen, die z.B. durch Schatten oder auf der Fassade gemalten Fensterverdachungen verursacht werden. Dann werden aber auch nicht alle korrekten Hypothesen als Verdachung erkannt. Oder die Parameter werden schwächer gestellt, so dass die Erkennungsrate steigt, aber auch die Zahl der Falschdetektionen. Die Zahl der Falschdetektionen kann dann verringert werden, wenn man beide Verfahren kombiniert. Dieses Zusammenführen wird durch eine logische Und-Operation auf den binären Ergebnisbildern der Einzelverfahren umgesetzt.

4 Experimente

4.1 Daten

Zehn Bildsequenzen von je einer Fassade zeigen meist historische, mittelgroße Fassaden in den Innenstädten Freisings, Münchens und Schwabachs. Sie umfassen zwischen sieben und 14 Bilder und wurden mittels des Verfahrens von (MAYER et al., 2012) orientiert. Die Punktwolken umfassen ca. 9.000 Punkte und die Punktdichte auf den Fassadenwänden liegt häufig bei ca. 20-50 Punkten pro m².

4.2 Ergebnisse

In Tab. 1 sind die Resultate der Experimente dargestellt. Die in den Bildsequenzen abgebildeten Fassaden zeigen insgesamt 95 Fenster (ohne Schaufenster und ohne Gaubenfenster). Von diesen haben 16 keine Verdachung, oberhalb von 79 Fenstern sind die Fassaden entweder durch Bogensegmente, Dreiecksgiebel oder Fenstergesimse verziert.

Tab. 1: Ergebnisse der Detektion von Fensterverdachungen und Gesims. Bei Versuch 1 wurde ausschließlich untersucht, ob Fassadenelemente vor der Fassade liegen. Bei Versuch 2 wurde starke Kanten für die Erkennung der Objekte untersucht. Beim dritten Versuch wurden beide Verfahren kombiniert.

	Keine Verdachung	Verdachungen insgesamt	Bogensegment	Dreiecksgiebel	Fenstergesims
Versuch	16	79	39	21	19
1: Geom.	16 (100%)	52 (66%)	29 (74%)	16 (76%)	7 (37%)
2: Kanten	16 (100%)	50 (63%)	32 (82%)	18 (86%)	0 (0%)
3: G + K	16 (100%)	61 (77%)	32 (82%)	18 (86%)	11 (58%)

Von allen drei untersuchten Verfahren wird zuverlässig erkannt, wenn keine Fensterverdachungen existieren. Die Erkennung von vorhandenen Fensterverdachungen ist

dagegen weniger erfolgreich. Die Ergebnisse sind am besten, wenn Informationen aus geometrischer Analyse und Kantendetektion miteinander verknüpft werden. Die Erkennung von Bogensegmenten und Dreiecksgiebel ist wesentlich erfolgreicher als die Erkennung von Fenstergesimsen. Dies liegt vor allem an den charakteristischen Formen der beiden Fensterverdachungen. Dagegen weisen Fenstergesims oft keine starken 3D-Strukturen auf, und horizontale Kanten sind keine zuverlässige Evidenz für Gesimse bilden.

Wenn Verdachungen nicht erkannt wurden, liegt das häufig daran, dass die rekonstruierte Punktwolke in diesen Bereichen zu wenige 3D-Punkte vor der Fassade aufweist. Der Misserfolg bei der Erkennung von Gesimsen mittels Kanten liegt an der Wahl einiger Parameter.

5 Diskussion und Ausblick

Es wurde ein Verfahren zur Detektion von Fensterverdachungen und Gesims in Fassadenbildern vorgestellt. Die Fassadenbilder werden zusammen mit präzisen Punktwolken aus Bildsequenzen abgeleitet. Die Fassadenbilder sind so entzerrt, dass die Strukturen der Fassade wieder eine rechteckige Form zeigen. Aufbauend auf einer präzisen Extraktion der Fassadenebene sowie einer zuverlässigen Fensterdetektion, durch die der Suchbereich eingeschränkt wird, werden Fensterverdachungen und Gesimse erfolgreich erkannt. In den Experimenten wurde gezeigt, dass die alleinige Ausnutzung der Information, dass zahlreiche 3D-Punkte im Suchbereich vor der Fassadenebene liegen, für eine zuverlässige Erkennung nicht ausreicht. Ähnlich ungeeignet ist die alleinige Betrachtung detektierter Kanten. Dagegen liefert die Kombination beider Informationen zufriedenstellende Ergebnisse. Abb. 6 zeigt die Ergebnisse bzgl. der Detektion mittels 3D-Geometrie und Kanten für zwei repräsentative Fassaden aus Freising. Die eingezeichneten Modelle verdecken dabei häufig die auffälligsten Bildstrukturen der Fensterverdachungen.



Abb. 6: Ergebnisse der Detektion von Verdachungen bei zwei Bildern von Fassaden aus Freising. Beide Bildausschnitte wurden entsprechend entzerrt und ausgeschnitten. Neben den Verdachungsformen für Bogensegmente, Dreiecksgiebel und Gesims werden auch die vor der Fassadenwand liegenden Punkte angezeigt. Diese liegen vor allem im Bereich der Verdachungen.

Die Erkennung der Fensterverdachungen und Gesimse kann verbessert werden, indem eine extrem dichte Punktwolke verwendet wird, wie sie z.B. durch das Semiglobale Zuordnungsverfahren von HIRSCHMÜLLER (2008) erzeugt wird. Für eine Automatisierung der

Detektion der Fassadenebene, der Bestimmung ihrer Begrenzung, die Auswahl und Entzerrung eines Bildes für die Detailanalyse sowie die Fensterdetektion im entzerrten Bild kann diese Arbeit in die Prozesskette von NGUATEM et al. (2012) integriert werden.

6 Literaturverzeichnis

- BECKER, S. & HAALA, N., 2008: Integrated LIDAR and Image Processing for the Modelling of Building Facades. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, **2008** (2), S. 65-81.
- CANNY, J., 1986: A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **8** (6), S. 679-698.
- FISCHLER, M.A. & BOLLES, R.C., 1981: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Application to Image Analysis and Automated Cartography. *ACM*, **24** (3), S. 381-395.
- HISCHMÜLLER, H., 2008: Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **30** (2), S. 328-341.
- HOHMANN, B., KRISPEL, U., HAVEMANN, S. & FELLNER, D., 2009: Cityfit: High-Quality Urban Reconstruction by Fitting Shape Grammars to Images and Derived Textured Point Clouds. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **38** (5/W1).
- KOEPF, H. & BINDING, G., 2005: *Bildwörterbuch der Architektur*. Vierte, überarbeitete Auflage, Alfred Kröner Verlag, Stuttgart. 678 Seiten.
- LEBERL, F., MEIXNER, P., WENDEL, A. & IRSCHARA, A., 2012: Automated Photogrammetry for Three-Dimensional Models of Urban Spaces. *Optical Engineering*, **51** (2), S. 1-12.
- LEE, S.C. & NEVATIA, R., 2004: Extraction and Integration of Window in a 3D Building Model from Ground View Images. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. II: 113-120.
- MAYER, H., BARTELSEN, J., HIRSCHMÜLLER, H. & KUHN, A., 2012: Dense 3D Reconstruction from Wide Baseline Image Sets. *Outdoor and Large-Scale Real-World Scene Analysis – 15th International Workshop on Theoretical Foundations of Computer Vision*, Lecture Notes in Computer Science 7474, S. 285-304.
- NGUATEM, W., DRAUSCHKE, M. & MAYER, H., 2012: Finding Cuboid-Based Building Models in Point Clouds. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **39** (B3), S. 149-154.
- REZNIK, S. & MAYER, H., 2008: Implicit Shape Models, Self-Diagnosis, and Model Selection for 3D Facade Interpretation. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, **2008** (3), S. 187-196.
- SCHMITTWILKEN, J. & PLÜMER, L., 2010: Modelbased Reconstruction and Classification of Facade Parts in 3D Point Clouds. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **38** (3A), S. 269-274.
- SIMON, L., TEBOUL, O., KOUTSOURAKIS, P. & PARAGIOS, N., 2011: Random Exploration of the Procedural Space for Single-View 3D Modeling of Buildings. *International Journal of Computer Vision*, **93** (2), S. 253-271.