

Untersuchungen zur Detektion von spekulären Reflexionen in Fassadenbildern

MARTIN DRAUSCHKE¹ & HELMUT MAYER²

Zusammenfassung: Schlagschatten und Spiegelungen zeigen den Einfluss von direkter Beleuchtung während der Bildgewinnung und damit die Notwendigkeit, sie bei der Bildanalyse zu berücksichtigen. Bei der Visualisierung virtueller Welten kommen Beleuchtungsmodelle zum Einsatz, wie z.B. das Modell von PHONG (1975), bei dem zwischen diffuser Streuung des Lichts und spekulären Reflexionen unterschieden wird. Im vorgelegten Beitrag werden zwei bestehende Ansätze für die Detektion von spekulären Reflexionen vorgestellt, und es wird untersucht, ob diese nicht nur unter Laborbedingungen, sondern bei der Analyse von Fassadenbildern eingesetzt werden können. Es wird gezeigt, dass selbst unter Hinzunahme weiterer Information wie die 3D-Geometrie der Szene, d.h. des rekonstruierten Objekts und der Lokalisierung einer potentiellen Lichtquelle in einer Richtungskugel, helle, diffuse Streuung die Detektion spekulärer Reflexionen stark behindert.

1 Einleitung und Motivation

Bei der photogrammetrischen Bildanalyse werden oft keine oder nur implizite Annahmen über die Beleuchtung einer Szene gemacht, die z.B. die Existenz von Schatten in Bildern erklären. Für eine realistische Visualisierung der Szene ist die Beleuchtung aber essentiell, so dass in der Computer Grafik z.T. komplexe Beleuchtungssituationen und Reflexionen modelliert werden (PHONG 1975; COOK & TORRANCE 1981; WARD 1992). Bei Stadtlandschaften sollte zunächst eine punktförmige Lichtquelle, die Sonne, betrachtet werden. Hinzu kommt eine ambiente Beleuchtung, die ihre Ursache in der Streuung in der Atmosphäre und in gegenseitigen Reflexionen an den Objektflächen hat. So haben Reflexionen bei (PHONG 1975) zwei Anteile: diffuse Streuung und gerichtete Spiegelungen. Während die diffuse Streuung zu einer allgemeinen Ausleuchtung einer Szene beiträgt, können spekuläre Reflexionen (Spiegelungen) zu einer lokalen Blendung führen, die bei der Bildbetrachtung, bei der Rekonstruktion der Szene oder bei der Bildinterpretation stören (siehe Abb. 1).

Da die Beleuchtungseffekte sowohl von der Lichtquelle als auch von den Oberflächeneigenschaften des beleuchteten Objekts abhängen, werden die Reflexionseigenschaften (infinitesimal) kleiner Oberflächen mittels der bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF) beschrieben. Zur Bestimmung einer diskretisierten BRDF wird ein Objekt aus sehr vielen Perspektiven mit ebenso vielen Beleuchtungsrichtungen fotografiert, z.B. durch zahlreiche Kameras mit Blitzlicht, die auf einem halbkugeligen Gerüst angeordnet sind (SCHWARTZ et al. 2014). Ein solches Verfahren ist für die Analyse von

¹ Dr.-Ing. Martin Drauschke, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Robotik und Mechatronik, Abteilung Perzeption und Kognition, Münchener Str. 20, 82234 Weßling; E-Mail: martin.drauschke@dlr.de

² Univ.-Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer, Universität der Bundeswehr München, Institut für Angewandte Informatik, Professur für Visual Computing, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg, E-Mail: helmut.mayer@unibw.de

Reflexionen an Gebäudefassaden nicht geeignet. Einerseits gibt es Beschränkungen bei der Positionierung der Kamera, wenn man vom Einsatz von unbemannten Fluggeräten absieht. Andererseits gibt es nicht nur lokalisierte Lichtquellen, sondern diverse Quellen ambienter Beleuchtung. Eine direkte Übertragbarkeit von Reflexionseigenschaften eines Ziegels, eines Stücks Putz oder einer kleinen Fensterscheibe auf eine große Fassadenszene kann aus diesen Gründen bezweifelt werden.



Abb. 1: Fassadenbild mit spekulärer Reflexion in einem Fenster (links) und mit (MAYER et al. 2012) rekonstruierte, texturierte Gesamtszene (Mitte) sowie rekonstruierter Ausschnitt des entsprechenden Fensters (rechts). In dem Ausschnitt sind die Traufkante und die Fensteröffnung darunter gut zu erkennen, die Form des rekonstruierten Fensters passt nicht zum realen, rechteckigen Fenster.

Für die Bildanalyse wäre es hilfreich, wenn man die geschilderten Störungen durch spekuläre Reflexionen automatisch detektieren und lokalisieren könnte. Dann könnten diese Bildbereiche bei der 3D-Rekonstruktion, bei der Texturierung der Szene und bei der Bildinterpretation ausgeschlossen bzw. mit Vorsicht oder sogar auf Grundlage eines spekulären Reflexionsmodells verwendet werden.

Für die Detektion von Spiegelungen einer dominanten Lichtquelle in einzelnen Bildern gab es in den vergangenen Jahren mehrere Vorschläge, deren Potential an Bildern demonstriert wurde, die unter Laborbedingungen aufgenommen wurden. Bei allen Ansätzen werden mehr helle Pixel als potentielle Reflexionen segmentiert, als im Bild vorkommen, um möglichst wenige Spiegelungen im Vorfeld auszuschließen. Dafür wird ein anschließender Schritt zur Validierung der Kandidaten durchgeführt.

In diesem Beitrag werden zwei Ansätze für die Detektion von spekulären Reflexionen vorgestellt und dahingehend untersucht, ob sie auch zur Analyse von Fassadenbildern eingesetzt werden können. Es wird gezeigt, dass selbst unter Hinzunahme weiterer Information wie die 3D-Geometrie der Szene, d.h. des rekonstruierten Objekts und der Lokalisierung einer potentiellen Lichtquelle in einer Richtungskugel, helle, diffuse Streuung die Detektion spekulärer Reflexionen stark behindert.

Dieser Beitrag ist wie folgt strukturiert. Im nächsten Abschnitt werden die beiden Ansätze zur Detektion von spekulären Reflexionen in Bildern vorgestellt. Es zeigt sich, dass sie zwar auf Fassadenbilder angewendet werden können, es aber viele Segmentierungen heller Bildbereiche gibt, die nicht notwendigerweise spekuläre Reflexionen zeigen. Deshalb wird in Abschnitt 3 versucht, die 3D-Geometrie der rekonstruierten Szene zur Lokalisierung der potentiellen

Lichtquelle, d.h. der Sonne, zu berücksichtigen. Die Experimente und Ergebnisse werden in Abschnitt 4 vorgestellt und diskutiert. Im abschließenden Abschnitt 5 wird die Untersuchung zusammengefasst, und es werden Fragestellungen für zukünftige Arbeiten vorgeschlagen.

2 Detektion spekulärer Reflexionen in einzelnen Bildern

2.1 Relevante Ansätze in der Literatur

In den vergangenen Jahren wurden zwei eher einfache Ansätze für die Detektion von spekulären Reflexionen in einem einzelnen Grauwertbild vorgestellt. Beide Ansätze verwenden eine Schwellwertsegmentierung zur Detektion von Spiegelungen, wobei sie beide einen niedrigen Schwellwert wählen, und anschließend alle Kandidaten in einem weiteren Schritt analysieren und verifizieren.

MCHENRY et al. (2005) detektieren Objekte aus Glas in Bildern, wobei die Lokalisierung spekulärer Reflexionen als eines von mehreren Merkmalen genutzt wird. Als Pixel mit spekulärer Reflexionen werden alle Pixel betrachtet, deren Intensitätswerte größer als das 0.9-fache des hellsten Grauwerts des Bildes sind. Das Bildmaterial von MCHENRY et al. (2005) scheint sehr dunkel zu sein, denn die Autoren führen eine weitere Histogramm-Analyse durch, um zusätzliche Pixel am Rand der spekulären Reflexionen zu erhalten. Für die Erkennung von Gegenständen aus Glas werden neben den erkannten spekulären Reflexionen auch Helligkeitswerte im Vergleich mit der Umgebung, das lokale Rauschverhalten des Bildes und Texturunterschiede in den Klassifikator integriert.

Der zweite in Betracht gezogene Ansatz zur Detektion von spekulären Reflexionen wurde von OSADCHY et al. (2008) vorgeschlagen. Statt einen Schwellwert an einen Grauwert zu koppeln, werden hier die 5% hellsten Pixel ausgewählt, so dass bei dunklen Bildern z.T. Pixel mit relativ niedriger Intensität als spekuläre Reflexion eingestuft werden. Im weiteren Vorgehen werden die detektierten Pixel mit gerenderten 3D-Modellen einer Datenbank und deren Reflexionen bei einer angenommenen Lichtquelle verglichen.

Beide Verfahren demonstrieren ihr Potential an Szenen, die unter Laborbedingung entstanden sind. Insofern erscheint eine Untersuchung sinnvoll, inwiefern diese Ansätze zur Erkennung von Pixeln mit starken spekulären Reflexionen auf Fassadenansichten übertragbar sind.

2.2 Verwendete Datensätze

Es wurden im August 2013 mehrere Bildsequenzen mit sieben bis zwanzig Aufnahmen je Sequenz in Berlin fotografiert. Alle Bilder haben eine einheitliche Größe von 1208×906 Pixeln. Alle Szenen zeigen typische Fassaden der Gründerzeit mit unterschiedlichsten Beleuchtungen, d.h. die Bilder zeigen sowohl schattige als auch indirekt und direkt beleuchtete Fassadenbereiche. In einzelnen Aufnahmen sind direkte Reflexionen des Sonnenlichts deutlich erkennbar.

Die Bildsequenzen wurden mittels (MAYER et al. 2012) relativ zueinander orientiert, dichte Tiefen (HIRSCHMÜLLER 2008) und eine optimale, dichte Punktwolke (KUHN et al. 2013) bestimmt sowie ein Mesh von Objektoberflächen erzeugt (BODENMÜLLER 2009). Die Anzahl der rekonstruierten 3D-Punkte und Dreiecke variiert von Sequenz zu Sequenz: Die Szenen enthalten

zwischen 60 000 und 560 000 Dreiecke und ca. halb so viele 3D-Punkte. Auf Fassaden liegen häufig mehr als 100 rekonstruierte 3D-Punkte in einem Quadratmeter.

Dreiecke befinden sich meistens im Bereich der Fassaden und anderer in den Bildern sichtbarer Objekte, wie Bäume und Autos, dagegen selten im Bereich des Himmels und der Straße. Die Dreiecksnetze können Löcher enthalten, die z.B. Stellen zeigen, die in den Bildern nicht sichtbar sind, oder wo die Bestimmung der dichten Tiefen versagte.

2.3 Detektion spekulärer Reflexionen in Fassadenbildern

Die beiden Segmentierungen von MCHENRY et al. (2005) und OSADCHY et al. (2008) sind intensitätsbasiert und berücksichtigen weder die Umgebung der Pixel noch die Semantik der darin abgebildeten Objektoberfläche. Folglich werden alle sehr hellen Bildbereiche als Hypothesen für spekuläre Reflexionen ausgewählt. In Fassadenbildern sind das neben den hellen Spiegelungen des Lichts vor allem weiß gestrichene Wände und Fensterrahmen sowie Wolken und Verkehrsschilder. In Abb. 2 werden für einzelne Fassadenbilder die Segmentierungen nach MCHENRY et al. (2005) und OSADCHY et al. (2008) gezeigt.

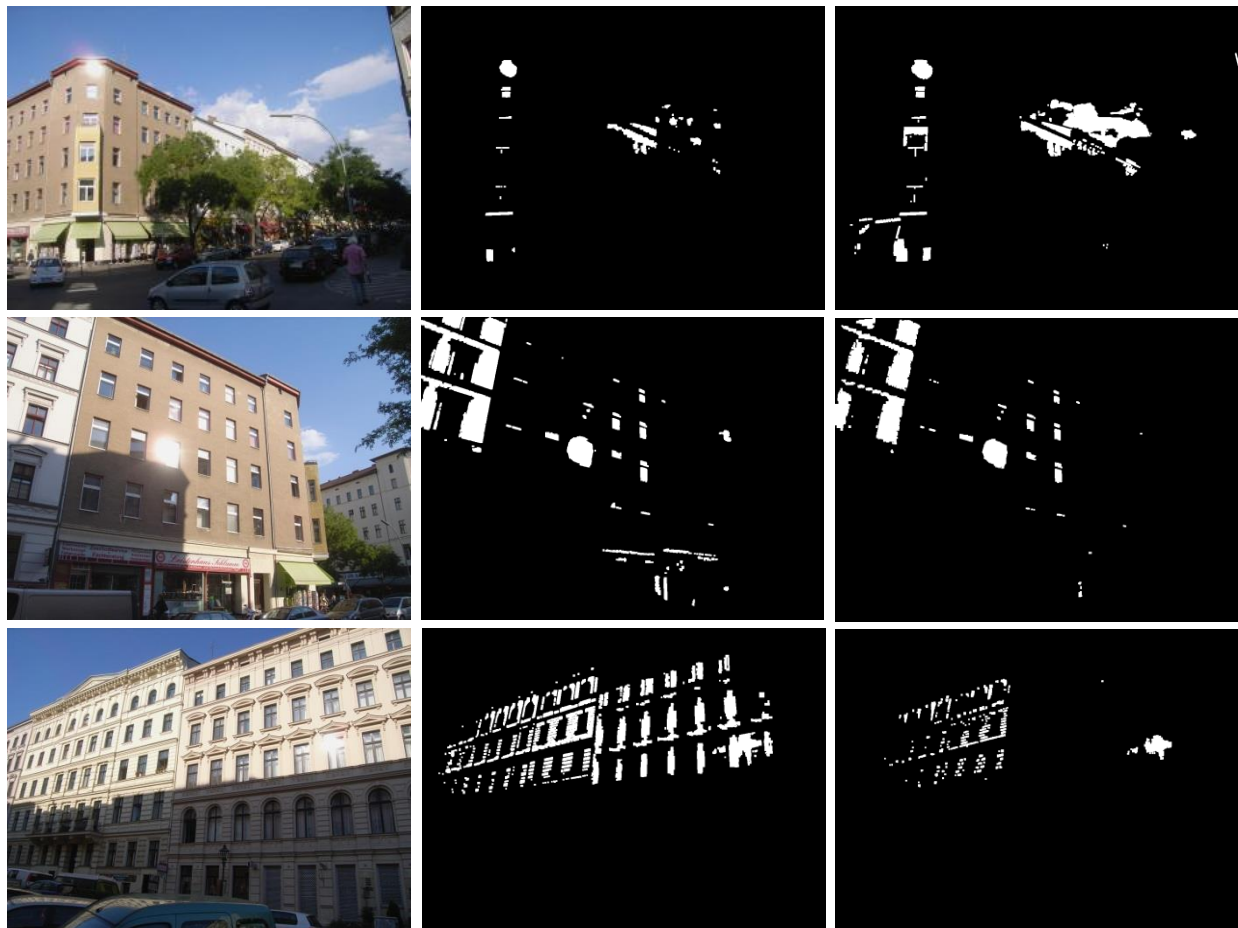


Abb. 2: Fassadenbilder – links – und die Segmentierungen für Hypothesen spekulärer Reflexionen nach (MCHENRY et al. 2005) – Mitte – bzw. nach (OSADCHY et al. 2008) – rechts.

Die Segmentierungsergebnisse in Abb. 2 zeigen die spekulären Reflexionen deutlich. Sie zeigen aber auch viele andere Pixel von abgebildeten hellen Objekten. In Abhängigkeit von der Hellig-

keitsverteilung eines Bildes schneidet bzgl. der Anzahl falscher Kandidaten für spekuläre Reflexionen einmal das erste, ein anderes Mal das zweite Verfahren besser ab. Beide Verfahren sind ähnlich gut bzw. schlecht geeignet, um spekuläre Reflexionen in Fassadenbildern zu detektieren.

Da die Ergebnisse auch helle Pixel von bewegten Objekten und Wolken zeigen, können beide Segmentierungen verbessert werden, indem zusätzlich zur Helligkeit eines Pixels auch überprüft wird, ob es eine rekonstruierte Objektoberfläche zeigt. Das ist einerseits möglich, indem die rekonstruierten 3D-Punkte X_j ins Bild projiziert werden, d.h.

$$x_j = P \cdot X_j \quad (1)$$

wobei P die Projektionsmatrix ist. Ein rekonstruiertes Oberflächendreieck mit den Eckpunkten X_1 , X_2 und X_3 wird in alle Pixel abgebildet, die in der konvexen Hülle der Pixel x_1 , x_2 und x_3 liegen. Alternativ kann auch für jedes Pixel der einfallende Strahl berechnet werden, zu dem das sich schneidende Dreieck des Meshes mittels Ray-Polygon-Schnitt von BADOUEL (1990) ermittelt wird. Beide Verfahren können effizient implementiert und insbesondere parallelisiert werden.

Mit der eben dargestellten zusätzlichen Überprüfung kann die Anzahl der falschen Hypothesen für spekuläre Reflexionen deutlich verringert werden, teilweise bleiben nur noch 25% der Pixel übrig. Bei einer Bildgröße von 1 Million Pixel können dies aber immer noch 10 000 helle Pixel sein, die neben den Spiegelungen des Lichts auch helle Fassadenteile umfassen. Echte Spiegelungen der Sonne kommen dagegen in nur ein paar hundert Pixeln eines Bildes jeder Sequenz vor. Bei allen anderen Bildern der Sequenz zeigen 100% der segmentierten Pixel keine spekuläre Reflexion, die Detektion weist dann eine Korrektheit von 0% auf. Aus diesem Grund ist ein weiteres Kriterium zur Erkennung spekulärer Reflexionen notwendig.

3 Lokalisierung von Hypothesen für die direkte Lichtquelle

Jede Bildsequenz entstand innerhalb weniger Minuten, so dass man eine konstante, direkte Lichtquelle annehmen kann. Im Weiteren soll untersucht werden, ob die Position dieser Lichtquelle in einer Himmelskarte bzw. Richtungskugel eindeutig und korrekt bestimmt werden kann. Dazu werden alle Bilder B_i einer Sequenz und zunächst die Segmentierung potentieller spekulärer Reflexionen nach (MCHENRY et al. 2005) betrachtet. Anschließend wurden die Versuche mit der Segmentierung von OSADCHY et al. (2008) wiederholt, ohne dass sich die Ergebnisse der folgenden Experimente stark verändern.

Nach der Orientierung der Bilder ist die relative Lage aller Bilder untereinander und zum 3D-Modell bekannt. Nach (MAYER et al. 2012) verfügt die Szene über ein einheitliches Koordinatensystem, das seinen Ursprung in der Kameraposition des ersten Bildes der Sequenz hat und auch entsprechend gedreht ist. Die Skalierung der Szene erfolgt durch Hinzunahme des zweiten Bildes, das einen Abstand 1 vom ersten Bild erhält. Bei den terrestrischen Aufnahmen entstanden die Bilder in Abstand von wenigen Bildern, so dass die Spannweite der Koordinaten der rekonstruierten 3D-Punkte meist im einstelligen Bereich liegt. Eine Himmelskugel mit einem Radius von 1000 ist daher ausreichend weit entfernt von der Szene.

Es wird angenommen, dass in der Realität der folgende Vorgang stattfindet: Sei L die mögliche Lichtquelle, dann trifft ein Lichtstrahl r' den Objektpunkt S und wird an der Objektoberfläche abhängig von der Normalenrichtung n reflektiert. Der reflektierte Strahl r wird dann in Bild B_i

beobachtet. Dieser Vorgang muss umgedreht werden. Ausgehend von Pixel x_{ij} des i -ten Bildes einer Sequenz wird der einfallende Lichtstrahl r_{ij} berechnet (MUGNIER et al. 2004 – Formel 3.165) und invertiert, so dass der Strahl r_{ij} durch das Projektionszentrum O_i der Kamera zum Objektpunkt S_j führt. Die Spiegelung von r_{ij} in Punkt S_j an der entsprechenden Objektoberfläche mit Normalenvektor n_j wird unter Berücksichtigung des Gesetzes der Optik, dass Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel ist, berechnet. Als Ergebnis erhält man den Lichtstrahl r'_{ij} . Dieser geht invertiert von der möglichen Position der Lichtquelle L_{ij} aus und trifft den Objektpunkt S_{ij} .

Gibt es keinen Schnittpunkt S_j , dann geht der Strahl r_{ij} entweder durch ein Loch des Objekts oder am Objekt vorbei. Dann könnte die Lichtquelle direkt ins Bild leuchten, d.h. die Position der Lichtquelle L_{ij} wird dann direkt aus r_{ij} bestimmt statt aus r'_{ij} .

Der Lichtstrahl r'_{ij} wird in ausreichend großer Entfernung (s.o.: Radius 1000) mit einer Himmelskugel geschnitten. So erhält man die kartesischen Koordinaten der möglichen Lichtquelle L_{ij} . Analog zu (Bär 2013) können die Koordinaten in eine Parameterdarstellung der Kugeloberfläche transformiert werden, wie man sie von den Breiten- und Längengradangaben (φ, ϑ) der Erdoberfläche kennt. In dieser Parametrisierung ist die Himmelskarte als Bild einfach visualisierbar, z.B. als quadratische Plattkarte, in der alle benachbarten Breiten- und Längengrade mit gleichem Abstand dargestellt werden. D.h. in Nord-Südrichtung ist die Visualisierung längentreu, in Ost-West-Richtung nur entlang des Äquators. Die beiden Pole im Norden und im Süden werden als obere bzw. untere Bildkante dargestellt. Abb. 3 zeigt eine solche Himmelskarte. In ihr sind alle Koordinatenpaare (φ, ϑ) weiß dargestellt, in denen mindestens eine Position für eine mögliche Lichtquelle bestimmt wurde, alle anderen sind schwarz. Die beiden Pole wirken in dieser Darstellung etwas dünner besetzt als die Gegenden entlang des Äquators. Dies liegt an der unterschiedlichen Dichte des Gradnetzes. Die Bildebene des ersten Bildes der Bildsequenz liegt bei der gewählten Ausrichtung der Richtungskugel in der Schnittfläche des Äquators, die Pole liegen in direkter Blickrichtung nach vorn bzw. nach hinten.

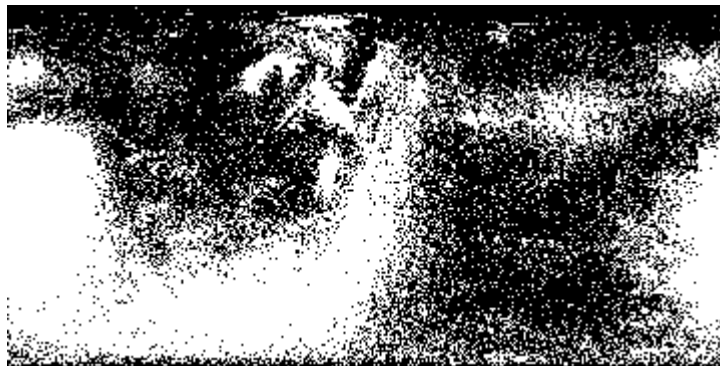


Abb. 3: Himmelskarte als Binärbild. Weiß bedeutet mögliche Positionen der Lichtquelle.

Unter den beiden Annahmen, dass es genau eine Lichtquelle gibt und diese die meisten spekulären Reflexionen im Bild verursacht, müsste ein Koordinatenpaar besonders häufig auftreten. Abb. 4 zeigt die Himmelskarte als Akkumulator-Bild, in dem der Grauwert die Häufigkeit angibt, wie oft eine Position (φ, ϑ) für die Lichtquelle bestimmt wird. Durch die Ungenauigkeiten im 3D-Modell sind Fehler bei der Bestimmung der Position der Lichtquelle zu erwarten. Daher wird nicht das Maximum gewählt, sondern zunächst die größte

Zusammenhangskomponente bestimmt. Dazu wird das Bild zuerst geglättet, wobei die Fortsetzung des Bildes entsprechend der Kugelanordnung zu beachten ist. D.h. das Bild wird periodisch am linken und rechten Bildrand fortgesetzt. Oben und unten erfolgt die Fortsetzung 180 Grad weiter links bzw. rechts am gleichen Bildrand. Eigentlich müsste die Glättung an den Polen anisotrop erfolgen, darauf wurde in den Experimenten aber aus Performanzgründen verzichtet. Auch bei der Bestimmung der Zusammenhangskomponenten wurden die periodischen Fortsetzungen des Bildes beachtet.

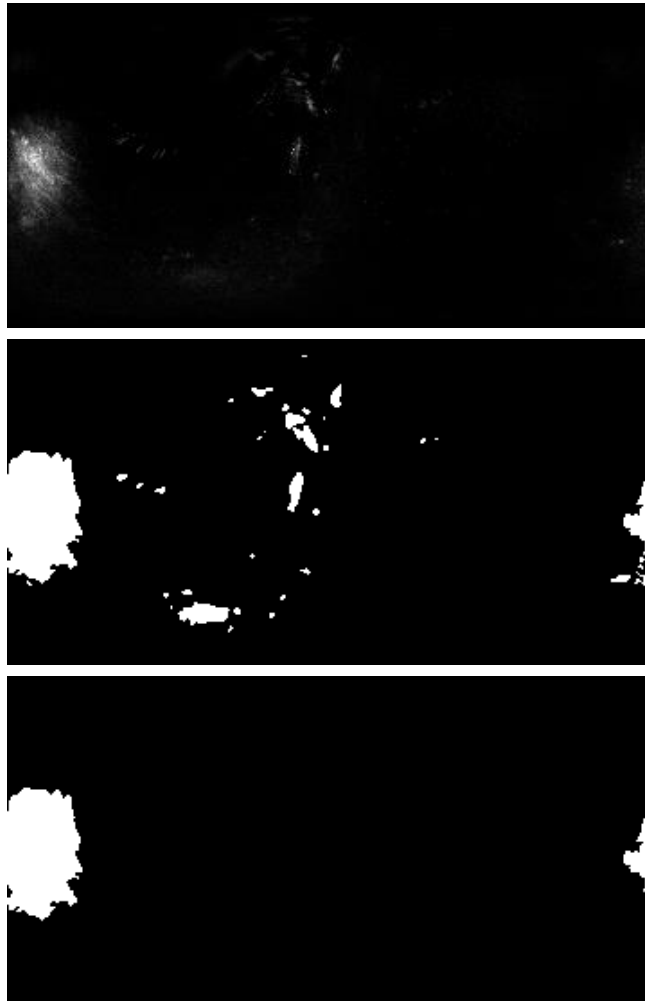


Abb. 4: Oben: Himmelskarte als Akkumulatorbild – die Grauwerte zeigen an, wie oft ein Koordinatenpaar als Position der Lichtquelle bestimmt wurde. Mitte: Binärbild mit allen Zusammenhangskomponenten nach Unterdrückung selten bestimmter Positionen. Unten: Größte Zusammenhangskomponente.

4 Experimente

Um die vorgestellte Methode absolut zu evaluieren, fehlen Referenzdaten für die wahre Position der Sonne und damit ihrer Position in den bestimmten Himmelkarten, deren Orientierung von dem Koordinatensystem abhängt, in dem die rekonstruierte Szene vorliegt.

Als Alternative wurden die eindeutig wahrnehmbaren spekulären Reflexionen in zumindest einem Bild je Sequenz manuell annotiert. Somit können die 3D-Punkte des 3D-Modells bestimmt werden, die in diese annotierten Bildregionen projiziert werden. Unter der Annahme, dass die Spiegelung an einer (größeren) Ebene erfolgt, wird durch diese Punkte eine Ebene mittels RANSAC (FISCHLER & BOLLES 1981) gelegt, um robust gegenüber Ausreißern zu sein. Die Strahlen r_{ij} von den annotierten Bildregionen aus werden an der Ebene gespiegelt, und man erhält eine Referenzposition für die Lichtquelle auf der Himmelskugel.

Für die Experimente standen neun der 15 oben vorgestellten Bildsequenzen und die daraus abgeleiteten 3D-Oberflächenrekonstruktionen zur Verfügung. Die anderen zeigen keine eindeutig spekulären Reflexionen, so dass in diesen Fällen nur die Himmelskarten bestimmt werden können ohne ihre Analyse mit einer Referenz vergleichen zu können. Sechs dieser Vergleiche werden in Abb. 5 gezeigt. Die Himmelskarten variieren nur leicht, wenn man zwischen den Segmentierungen (MCHENRY et al. 2005) und (OSADCHY et al. 2008) wechselt.

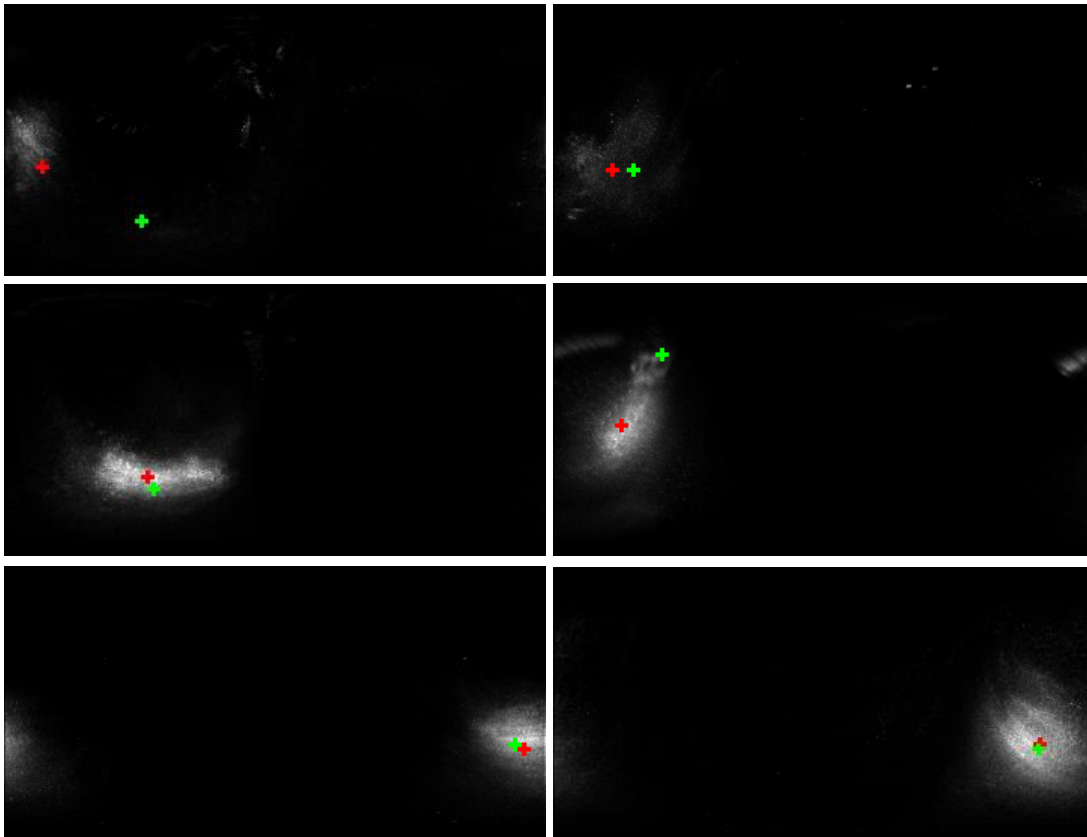


Abb. 5: Sechs Himmelskarten von Szenen mit spekulären Reflexionen als Akkumulatorbilder. Grün wird zusätzlich die manuelle bestimmte Referenzposition der möglichen Lichtquelle angezeigt, rot das Maximum der ermittelten größten Zusammenhangskomponente.

Für vier der Beispiele liegen die manuell bestimmte Referenzposition der Lichtquelle und die bestimmte mögliche Position dicht beieinander. In zwei Fällen sind beide Positionen deutlich voneinander entfernt. In einem dieser Fälle (Abb. 5 oben links) liegt die Referenzposition nicht in oder nahe der größten Zusammenhangskomponente. Die Akkumulatorbilder der Datensätze

ohne spekuläre Reflexionen weisen nur kleine helle Bereiche auf, siehe Abb. 6. Das liegt vor allem daran, dass in diesen Fällen weniger helle Bildpixel gefunden werden. Das Beispiel oben links zeigt ein Szene mit direktem Blick in die Sonne, daher sind dort wieder viele helle Bildbereiche erkennbar.

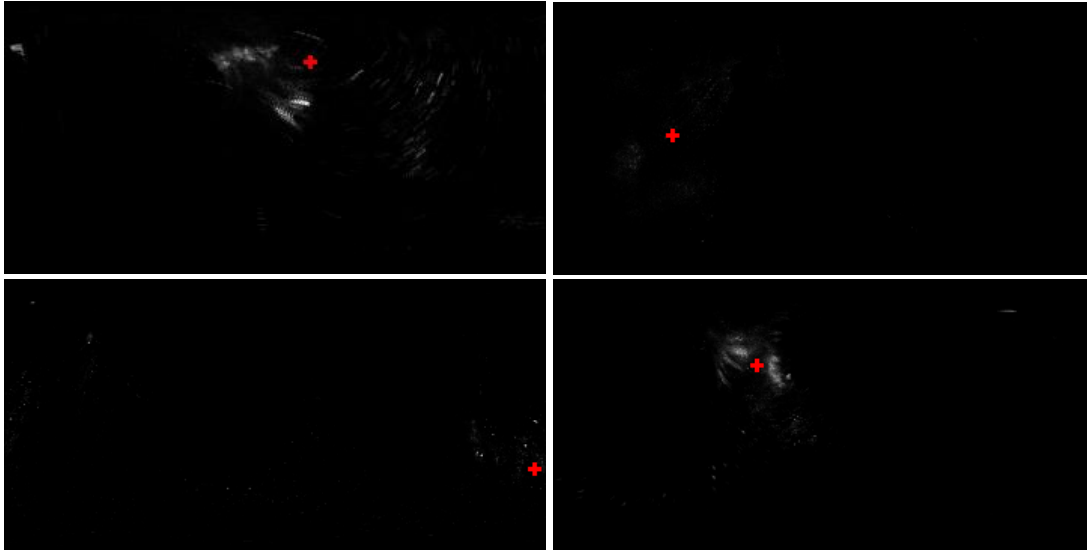


Abb. 6: Vier Himmelskarten von Szenen ohne spekuläre Reflexionen als Akkumulatorbilder. Rot zeigt das Maximum der ermittelten größten Zusammenhangskomponente.

Anhand der durchgeführten Experimente mit 15 Datensätzen wird deutlich, dass spekuläre Reflexionen nicht allein auf Grund ihrer Helligkeit detektiert werden können. Für die zusätzliche Bestimmung der möglichen Lichtquelle weisen die abgeleiteten Himmelskarten signifikante Unterschiede auf, so dass ermittelt werden kann, ob eine Bildsequenz Bilder mit starken Reflexionen zeigt. Auch wenn die Position der Lichtquelle nicht fehlerfrei bestimmt werden kann, sind die Fehler in vielen Fällen allerdings relativ klein.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Aufsatz wurden zwei Untersuchungen zur Detektion spekulärer Reflexionen in Fassadenbildern beschrieben. Zunächst wurden die beiden Segmentierungsansätze (MCHENRY et al. 2005) und (OSADCHY et al. 2008) für die Detektion spekulärer Reflexionen in Einzelbildern vorgestellt. Auf Fassadenbildern liefern beide Verfahren sehr viele falsche positive Ergebnisse. Beide Verfahren sind hierbei als gleichwertig einzuschätzen. Des Weiteren wurde unter Hinzunahme weiterer Information versucht, die Position der Lichtquelle zu rekonstruieren, um so auf die korrekten spekulären Reflexionen schließen zu können. Die Experimente haben gezeigt, dass sich die dabei erstellten Himmelskarten deutlich zwischen Szenen mit spekulären Reflexionen und Szenen mit ausschließlich diffuser Streuung unterscheiden. Erste Ergebnisse zur Bestimmung der Position der Lichtquelle zeigen den Erfolg des vorgeschlagenen Verfahrens, auch wenn die Ergebnisse insbesondere bei komplexen Szenen, z.B. mit Bildern eines Eckhauses, fehlerbehaftet sind.

Einige Fehler können durch die Ungenauigkeit der rekonstruierten Szene entstehen, weshalb die Experimente mit einer verbesserten Orientierung und 3D-Rekonstruktion auf höher aufgelösten Daten wiederholt werden sollten. Methodisch sollte das Verfahren zusätzlich verbessert werden, indem die gespiegelten Strahlen r'_{ij} (die potentiellen Lichtstrahlen) genauer analysiert werden. So sollte überprüft werden, ob diese wieder auf ein rekonstruiertes Objekt treffen oder auf eine zuvor definierte Bodenebene. So könnte die Hälfte aller möglichen Positionen auf der Himmelskugel ausgeschlossen werden. Zusätzlich könnte auch die Genauigkeit der Lage der Objektoberfläche, insbesondere ihres Normalenvektors, bei der Bestimmung der Position der Lichtquelle berücksichtigt werden.

6 Literaturverzeichnis

- BADOUËL, D., 1990: An Efficient Ray-Polygon-Intersection. In: Graphic gems. Academic Press Professional, Inc., S. 390-393.
- BÄR, G., 2013: Geometrie: Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Teubner, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, S. 46-48.
- BODENMÜLLER, T., 2009: Streaming Surface Reconstruction from Real Time 3D Measurements. Promotion, Technische Universität München.
- COOK, R. & TORRANCE, K., 1982: A Reflectance Model for Computer Graphics. ACM Transactions on Graphics, **1** (1), S. 7-24.
- FISCHLER, M.A. & BOLLES, R.C., 1981: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. Communications of the Association for Computing Machinery, **24** (6), S. 381-395.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2008: Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. Pattern Analysis and Machine Intelligence, **30** (2), S. 328-341.
- KUHN, A.; HIRSCHMÜLLER, H. & MAYER, H., 2013: Multi-Resolution Range data Fusion for Multi-View Stereo Reconstruction. 35th German Conference on Pattern Recognition, Lecture Notes in Computer Science (LNCS), **8142**, S. 41-50.
- MAYER, H.; BARTELSSEN, J.; HIRSCHMÜLLER, H. & KUHN, A., 2012: Dense 3D Reconstruction from Wide Baseline Image Sets. In: Outdoor and Large-Scale Real-World Scene Analysis. Lecture Notes in Computer Science (LNCS), **7474**, S. 285-304.
- MCHENRY, K.; PONCE, J. & FORSYTH, D., 2005: Finding Glass. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).
- MUGNIER, C.J.; FÖRSTNER, W.; WROBEL, B.; PADERES, F. & MUNJI, R., 2004: The Mathematics of Photogrammetry. In: MCGLONE, J.C. (Ed.): Manual of Photogrammetry, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Fifth Edition, S. 181-316.
- OSADCHY, M.; JACOBS, D.; RAMAMOORTHY, R. & TUCKER, D., 2008: Using Specularities in Comparing 3D Models and 2D Images. CVIU, **111**, S. 275-294.
- PHONG, B.T., 1975: Illumination for Computer Generated Pictures. Communications of the ACM, **18** (6), S. 311-317.
- SCHWARTZ, C.; SARLETTE, R.; WEINMANN, M., RUMP, M. & KLEIN, R., 2014: Design and Implementation of Practical Bidirectional Texture Function Measurement Devices Focusing on the Developments at the University of Bonn. Sensors, **14**, S. 7753-7819.
- WARD, G., 1992: Measuring and Modeling Anisotropic Reflection. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, **26** (2), S. 265-272.