

Effiziente Verschattungsberechnung für die Solarpotenzialanalyse durch bildbasierte 3D-Analyse

Juri Engel¹, Jürgen Döllner²

¹Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam
juri.engel@hpi.uni-potsdam.de

²Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam
doellner@hpi.uni-potsdam.de

Abstract. In diesem Paper stellen wir ein neues Verfahren zur effizienten Berechnung von Verschattungsdaten als zentralen Bestandteil einer Solarpotenzialanalyse vor. Erneuerbare Energien tragen maßgeblich dazu bei, die CO₂ Emissionen zu reduzieren und von fossilen Rohstoffen unabhängiger zu werden. Private Investoren sowie auch Kommunen sind daran interessiert, potenzielle Flächen für die Anbringung von Solaranlagen zu identifizieren. Eine großflächige Identifikation von Flächen ist nur durch eine vollautomatische Solarpotenzialanalyse möglich. Der hier vorgestellte Algorithmus für die Verschattungsberechnung basiert auf der 3D-Analyse einer virtuellen 3D-Umgebung. Die Genauigkeit der Verschattungsberechnung ist maßgeblich von dem Zeitintervall für die Diskretisierung eines untersuchten Zeitraums abhängig. Mit unserem Verfahren ist die Berechnungszeit jedoch nahezu unabhängig von dem Zeitintervall. Zusätzlich nutzt es moderne Grafikhardware um die Berechnung zu beschleunigen, indem die 3D-Analyserechnungen durch bildbasierte Verfahren approximiert werden. Weder Erkennung noch explizite Modellierung von Gebäuden oder Vegetation sind für die Solarpotentialanalyse notwendig, was den Einsatz der effizienten Verschattungsanalyse in einer Vielzahl von Anwendungen und Systemen ermöglicht.

1 EINLEITUNG

Erneuerbare Energien tragen maßgeblich dazu bei, die CO₂ Emission zu reduzieren und von fossilen Rohstoffen unabhängiger zu werden. Rund acht Prozent aller deutschen Wohngebäude verfügen mittlerweile über eine Solarstrom- oder Solarwärmanlage (BSW 12. Jan 2009). Sowohl private Investoren als auch Kommunen sind daran interessiert, weitere potentielle Flächen, insbesondere Dächer, zu identifizieren, die für die Anbringung von Solaranlagen geeignet sind. Für die Planungs- und Finanzierungsstrategien sind detaillierte Informationen über geeignete Flächen und die potenziell erzeugbare Energiemenge notwendig. Erst durch eine vollautomatische Solarpotenzialanalyse ist die großflächige Identifikation von geeigneten Flächen möglich, die den Behörden zum Beispiel die Erstellung eines „Solarpotenzialatlas“ ermöglicht.

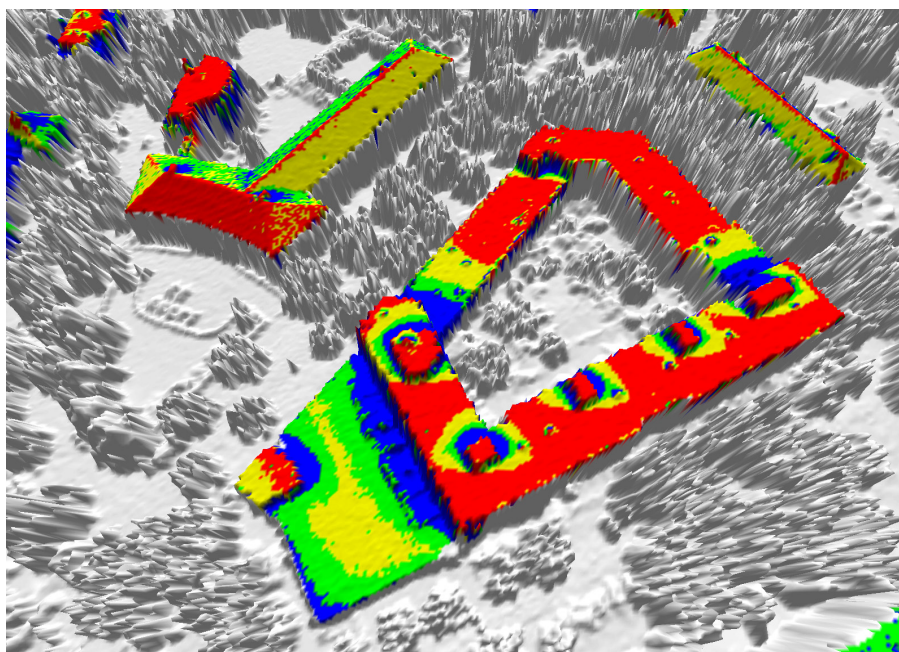


Abbildung 1: Ergebnisse der Verschattungsanalyse von Dachflächen eines Gebäudes. Die Helligkeit gibt den Verschattungsgrad an, d.h. den Anteil der Zeit im Schatten im Verhältnis zu der gesamten analysierten Zeitspanne (weiß: <5%, hellgrau: 5-10%, dunkelgrau: 10-15%, schwarz: >15%).

Die erzeugbare Energiemenge einer Photovoltaik-Anlage auf einem Dach ist abhängig von der Dachneigung und -ausrichtung sowie dem Grad der Verschattung (Šúri, Hofierka 2004). Insofern ist die Verschattungsanalyse kritisch, da die meisten Anlagen, die heute installiert werden, in Reihe geschaltet sind. Ein einzelnes verschattetes Modul reduziert die Gesamtleistung einer solchen Anlage erheblich (Woyte et al. 2003), denn fließt durch ein solches Modul kein Strom mehr, kann auch durch die anderen in Reihe geschalteten Module kein Strom fließen. Deshalb ist die Berücksichtigung der *Verschattung* essentiell für die Auswahl von geeigneten Flächen für Photovoltaik-Anlagen. Abbildung 1 visualisiert beispielhaft die Ergebnisse einer Verschattungsanalyse.

Die Solarpotenzialanalyse in Städten ist aus algorithmischer Sicht zeitaufwendig, da für eine im Allgemeinen großen Menge von 3D-Objekten eine Sichtbarkeitsermittlung durchgeführt und diese für eine im Allgemeinen große Zahl von Zeitschritten wiederholt werden muss. Dabei ist die Komplexität der Verschattungsberechnung ungleich höher als die Komplexität der Berechnung einfacher geometrischer Charakteristiken, wie z. B. Dachneigung und -ausrichtung (z. B. aus LiDAR Daten in Klärle et al. 2009). Die Verschattungsberechnung muss für eine kontinuierliche Zeitspanne berechnet werden und berücksichtigen, dass sich die Verschattung im Laufe eines Tages und im Verlauf des Jahres stetig ändert. Des Weiteren muss die Verschattungsberechnung in lokalen Bereichen wie einer einzelnen Dachfläche ein möglichst präzises, lokales 3D-Umgebungsmodell

heranziehen, das z. B. Vegetation, Schornsteine, Gauben und Dachaufbauten repräsentiert.

Die Genauigkeit der Verschattungsanalyse ist direkt abhängig von der geometrischen Genauigkeit und Auflösung des 3D-Umgebungsmodells. Diese Modelle stehen zunehmend in Form von amtlichen oder privatwirtschaftlichen 3D-Modellen bereit, etwa in Form von DEMs, die aus LiDAR-Daten rasterisiert werden, oder in Form virtueller 3D-Stadtmodelle (Döllner et al. 2006; Kolbe 2009).

Die Genauigkeit der Verschattungsanalyse ist weiter abhängig von dem Zeitintervall für die Diskretisierung eines zu untersuchenden Zeitraums. Abbildung 2 visualisiert die Ergebnisse der Analyse mit unterschiedlichen Zeitintervallen. Ein kürzeres Zeitintervall erhöht die Wahrscheinlichkeit, alle schattenwerfenden Merkmale der Umgebung zu berücksichtigen.

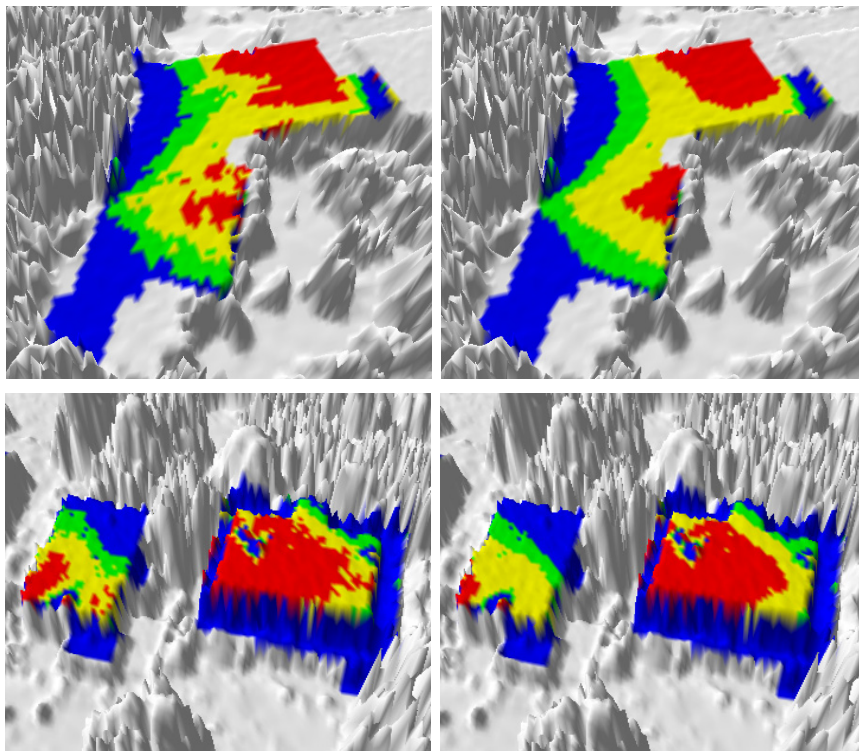


Abbildung 2: Verschattungsgrad berechnet mit unterschiedlicher Genauigkeit. Die beiden linken Grafiken zeigen die Ergebnisse der Analyse mit geringer Genauigkeit (189 berücksichtigte Sonnenpositionen) und die beiden rechten Grafiken mit hoher Genauigkeit (34440 Sonnenpositionen).

2 VERWANDTE ARBEITEN

Eine Vielzahl von Algorithmen wurden für die Berechnung der Verschattung aus LiDAR- und DEM-Daten vorgestellt; darunter Verfahren, die auf Raytracing im DEM basieren (Ludwig et al. 2009, Klärle et al. 2008 und Carneiro et al. 2009). Dabei wird in einem bestimmten Zeitintervall für je-

den zu analysierenden Punkt (z. B. einen Rasterpunkt, der einem Dach zugeordnet werden kann) die Verschattung berechnet. Von diesem Punkt aus wird die Sichtlinie zur Sonne an einer bestimmten Sonnenposition zurückverfolgt. Für jede Rasterzelle zwischen dem zu analysierenden Punkt und der Sonne wird der Strahl auf einen Schnittpunkt mit der Umgebung getestet. Der Dachpunkt ist verschattet wenn ein Schnittpunkt existiert. Dabei ist die für die Berechnung notwendige Zeit abhängig von dem Zeitintervall und der daraus resultierenden Anzahl der untersuchten Zeitpunkte z , der Anzahl der Dachpunkte k und die Größe des Rasters n . Die zeitliche Komplexität ist $O(z \cdot k \cdot n)$.

Ratti und Richens (2004) und Carneiro et al. (2008) erstellen für jede Sonnenposition eine Shadow Map durch Image Processing des DEMs. Mit Hilfe dieser Shadow Maps kann dann für jeden zu analysierenden Punkt dessen Verschattung bestimmt werden. Kassner et al. (2008) benutzten die GIS „Hillshade“ Analysefunktion um für jede Sonnenposition die Verschattung zu berechnen. Bei diesem Ansatz müssen für eine fehlerfreie Berechnung die Vegetationsobjekte identifiziert und mit höher aufgelösten Daten modelliert werden. Die Berechnungszeit beider Verfahren ist direkt proportional zu der Anzahl der berücksichtigten Sonnenpositionen. Das hier vorgestellte Verfahren hat die Anzahl der Sonnenpositionen nahezu keine Auswirkung auf die Berechnungszeit. Außerdem sind weder Erkennung noch Modellierung von Vegetation oder anderen Objekten notwendig.

Jochem et al. (2009a und 2009b) berechnen für jeden zu analysierenden Punkt einen Horizont. Der Horizont gibt für jeden Azimut die minimale Sonnenhöhe an, bei der der zu analysierende Punkt noch beleuchtet wird. Ist der Horizont berechnet, kann die Verschattung für jede Sonnenposition daraus ermittelt werden. Alle notwendigen Berechnungen werden dabei auf der CPU ausgeführt. Unser Ansatz hingegen ist für GPUs optimiert.

3 KONZEPT DER BILDBASIERTEN 3D-ANALYSE

Um die Verschattung für einen Punkt zu berechnen muss analysiert werden, ob die Sonne von diesem Punkt aus sichtbar ist. Unser Verfahren für die Verschattungsberechnung basiert auf dem Konzept der bildbasierten 3D-Analyse. Dadurch kann die Sichtbarkeitsanalyse durch die Rendering-Pipeline der Grafikhardware beschleunigt durchgeführt werden.

Konzeptionell beruht die bildbasierte 3D-Analyse darauf, einen unendlich kleinen, virtuellen Sensor zu nutzen, der eine Menge von Abtastpunkten traversiert. Von jedem Abtastpunkt sendet er ein Bündel von Strahlen aus, von denen jeder eine oder mehrere Eigenschaften der virtuellen 3D-Umgebung erfasst. Die Abtastpunkte können durch Diskretisierung der zu analysierenden Flächen (z. B. Oberflächen von Dächern) bestimmt werden.

Für eine pragmatische, effiziente Implementierung approximieren wir das Strahlenbündel durch Projektion und Rasterisierung mit Hilfe der Grafikhardware. Für jeden Abtastpunkt erstellen wir interne perspektivische Ansichten der virtuellen 3D-Umgebung in Form von *Geometric Buffers* (G-Buffers), auf denen eine bildbasierte Analyse durchgeführt wird. Geometric Buffers (Saito, Takahashi 1990) bilden einen erweiterten Bildraum, in dem jeder Pixel zusätzliche Informationen enthält, z. B. Tiefe, Normale, Objekttyp oder ID; ein G-Buffer kann z. B. durch ein Multilayer-Bild kodiert werden. OpenGL unterstützt die Implementierung von G-Buffers z. B. durch Mechanismen wie „render-to-texture“, d. h. durch eine verallgemeinerte Nutzung der 2D-Texturierungsfunktionalität.

4 VERSCHATTUNGSANALYSE

Die Eingabedaten für die Verschattungsanalyse ist ein digitales Höhenmodell (DEM), welches z. B. aus Daten von LiDAR-Luftaufnahmen berechnet werden kann. Die bildbasierte 3D-Analyse benötigt ein 3D-Modell, das gerendert werden kann. Dieses erstellen wir durch Triangulation der für die Analyse eines Daches relevanten Umgebung. Die relevante Umgebung eines Daches ist der Bereich des Höhenfeldes, der alle Objekte beinhaltet, die potenziell Schatten auf dieses Dach werfen.

Anschließend wird eine virtuelle Kamera an dem zu analysierenden Punkt, in diesem Fall ein Rasterpunkt, der einem Dach zugeordnet werden kann, positioniert und die Umgebung gerendert. Diese Zuordnung geschieht anhand einer topologischen Grundrisskarte. Das Verfahren ist dabei aber nicht auf Dächer beschränkt, sondern kann auf jeden beliebigen Bereich des Höhenmodells angewendet werden.

Da die Sichtbarkeit der Sonne berechnet werden soll, rendern wir einen Punkt an der Sonnenposition zu einem gewählten Zeitpunkt. Die Größe dieses *Sonnenpunktes* ist ein Pixel. Anschließend analysieren wir das erzeugte Bild. Enthält es den Sonnenpunkt, dann ist die Sichtlinie zwischen virtueller Kamera und Sonne frei und der Dachpunkt ist nicht verschattet.

Für eine Konfiguration der virtuellen Kamera und eine einmal gerenderte Umgebung können auch mehrere Sonnenpunkte (für alle diskreten Zeitpunkte des untersuchten Zeitraums) gleichzeitig gerendert werden. Die Anzahl der dabei nicht sichtbaren Sonnenpunkte ergibt den *Verschattungsgrad* des jeweiligen Dachpunktes an, d.h. den Anteil der Zeit im Schatten im Verhältnis zu der gesamten analysierten Zeitspanne.

Es ist nicht möglich alle potenziellen Sonnenpositionen innerhalb des View-Frustums (Sicht-Pyramide) einer virtuellen Kamera zu erfassen. Deshalb approximieren wir das notwendige Strahlenbündel durch zwei View-Frustums und rendern die Szene zweimal. Um alle möglichen Son-

nenpositionen zu erfassen, haben die Frustums einen Öffnungswinkel von 120° und sind annähernd in Richtung Südosten und Südwesten orientiert. Um sicherzustellen, dass kein Sonnenpunkt doppelt gerendert wird, sind die Frustums so orientiert, dass sie sich nicht überlagern.

Um die Berechnungen zu beschleunigen, benutzen wir *Occlusion Queries* (Bartz et al. 1998, Bittner et al. 2004). Occlusion Queries liefern die Anzahl der Fragmente zurück, welche die Tests der Fragment-Pipeline bestehen (Tiefentest, Stencil-Test). Wir benutzen sie um die Anzahl der tatsächlich gerenderten Sonnenpunkte zu erhalten. Mittels Division durch die Gesamtanzahl der Sonnenpunkte errechnen wir den Verschattungsgrad. Dieses Vorgehen ist erheblich effektiver als den Framebuffer von der Grafikkarte zu kopieren und die Pixel zu zählen.

Somit ist die benötigte Zeit bei der bildbasierten 3D-Analyse abhängig von der Anzahl der Dachpunkte k und der Anzahl der gerenderten 3D-Primitive (Summe aus der Größe des Rasters n und der untersuchten Zeitpunkte z). Daraus ergibt sich die zeitliche Komplexität $O(k \cdot (z+n))$.

Da n in den meisten Fällen um ein Vielfaches größer ist als z , kann das Zeitintervall sehr klein (im Minutenbereich) gewählt werden, ohne die für die Analyse benötigte Zeit wesentlich zu erhöhen. Tabelle 1 zeigt die für die Verschattungsberechnung benötigte Zeit. Diese steigt von der kleinsten Genauigkeit zur höchsten um nur ca. 10,4%. Im Fallbeispiel besteht die Umgebung eines Daches bei einer Triangulation des Höhenfeldes aus ca. 320.000 Dreiecken. Die Anzahl der Sonnenpositionen (über dem relevanten Sonnenstand von 15°) beträgt hingegen bei einem Intervall von einer Stunde nur 2.884. Sogar bei einem Intervall von nur fünf Minuten beträgt die Anzahl der Sonnenpositionen und damit der zu renderten Punkte nur 34.440. Das sind ca. 10,8% der Primitive der Umgebung.

Tabelle 1: Berechnungszeit für 722 Gebäude im innerstädtischen Gebiet auf der Fläche von $1,44 \text{ km}^2$ (Gemessen auf einem Core 2 Duo mit 3 GHz, 4 GB RAM und einer GeForce 9800 GT).

Zeitintervall	Anzahl der Sonnenpunkte	Berechnungszeit
Zwei Tage im Monat, stündlich	189	4.313,03 s
Jeden Tag stündlich	2.884	4.346,42 s
Jeden Tag fünf-minütlich	34.440	4.762,15 s

5 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag haben wir ein effizientes Verfahren für die Verschattungsanalyse vorgestellt, die einen zentralen Baustein einer Solarpotenzialanalyse repräsentiert. Unser Verfahren beruht auf der bildbasierten 3D-Analyse, was uns z. B. erlaubt das Zeitintervall zu reduzieren ohne

den Zeitaufwand für die Analyse wesentlich zu erhöhen. Dies ist entscheidend für die Genauigkeit der Verschattungsberechnung, die maßgeblich von dem Zeitintervall neben der geometrischen Genauigkeit und Auflösung abhängig ist. Ein kürzeres Zeitintervall erhöht die Wahrscheinlichkeit alle schattenwerfenden Merkmale der Umgebung zu berücksichtigen.

Die bildbasierte 3D-Analyse wird größtenteils auf der GPU ausgeführt und nutzt die Fähigkeiten moderner Grafikhardware um die Berechnungen zu beschleunigen. Auch können alle Optimierungs- und Beschleunigungsalgorithmen für das Rendering, insbesondere Culling und Gelände-Rendering-Verfahren (z. B. Livny et al. 2009), genutzt werden um die Berechnungszeit zu reduzieren. Zusätzlich profitiert das Verfahren von der enormen Performance-Entwicklung der Grafikhardware, die in den letzten Jahren stattgefunden hat und auch in der Zukunft zu erwarten ist.

Die Ergebnisse der bildbasierten 3D-Analyse sind nicht binär, d.h. „verschattet“ oder „nicht verschattet“, sondern geben den Grad der Verschattung an. Dieser wird aus dem Anteil der Zeit ermittelt, in dem der jeweilige Punkt verschattet ist, gemessen am gesamten untersuchten Zeitraum.

Ein weiterer Vorteil des vorgestellten Ansatzes besteht darin, dass weder eine Modellierung noch eine Rekonstruktion von 3D-Gebäuden, Dächern, Vegetation oder sonstigen Objekten aus den LiDAR-Daten für die Berechnungen notwendig sind. Auch eine Selektion und Filterung der Daten nach den einzelnen Typen ist nicht erforderlich. Der Algorithmus arbeitet auf dem kompletten Höhenfeld. Darüber hinaus ist ohne Einschränkung möglich, explizite 3D-Modelle einzubinden, die z. B. lokal eine höhere Genauigkeit oder beliebige Topologie und Geometrie besitzen. Praktisch können insbesondere komplexe Gebäude, z. B. mit einem Gebäudevorsprung, berücksichtigt werden, die durch LiDAR-Daten nur unzureichend repräsentiert wären. Die Verschattungsberechnung selbst erlaubt es, alle Formen geometrischer Repräsentation von Umgebungsmodellen in beliebiger Kombination zu verarbeiten.

6 DANKSAGUNG

Dieses Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und ist Teil der InnoProfile Nachwuchsforschergruppe 3DGeoinformationen (www.3dgi.de).

7 REFERENZEN

Bartz D., Meißner M., Hüttner T. (1998): Extending graphics hardware for occlusion queries in OpenGL, in *HWWS '98: Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EuroGraphics workshop on Graphics Hardware*, 97-104.

- Bittner J., Wimmer M., Piringer H., Purgathofer W. (2004): Coherent hierarchical culling: Hardware occlusion queries made useful, in *Proceedings EuroGraphics 2004*, Volume 23, 615-624.
- BSW – Bundesverband Solarwirtschaft (2009): BSW-Solar: Solarenergie ist Innovationsbeschleuniger der Bauwirtschaft, 12. Januar 2009.
- Carneiro C., Morello E., Ratti C., Golay F. (2008): Solar radiation over the urban texture: LiDAR data and image processing techniques for environmental analysis at city scale, *3d Geo-Information Sciences*, 319-340.
- Carneiro C., Karzand M., Golay F., Lu Y., Vetterli M. (2009): Assessing digital surface models by verifying shadows: a sensor network approach, in *6th International Symposium on Spatial Data Quality*.
- Döllner J., Kolbe T. H., Liecke F., Sgouros T., Teichmann K. (2006): The Virtual 3D City Model of Berlin - Managing, Integrating, and Communicating Complex Urban Information, in *UDMS*.
- Jochem A., Höfle B., Hollaus M., Rutzinger M. (2009): Object detection in airborne LiDAR data for improved solar radiation modeling in urban areas, in *IAPRS*.
- Jochem A., Höfle B., Rutzinger M., Pfeifer N. (2009): Automatic roof plane detection and analysis in airborne LiDAR point clouds for solar potential assessment, in *Sensors*.
- Kassner R., Koppe W., Schüttenberg T., Bareth G. (2008): Analysis of the solar potential of roofs by using official LiDAR data, in *ISPRS*.
- Klärle M., Ludwig D., Lanig S. (2009): SUN-AREA – Ein Beitrag der Fernerkundung gegen den Klimawandel, in *ZfV*, 71-78.
- Kolbe T. H. (2009): Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML, in *3D Geo-Information Sciences*
- Livny Y., Kogan Z., El-Sana J. (2009): Seamless patches for GPU-based terrain rendering, in *The Visual Computer*, 197-208.
- Ludwig D., Lanig S., Klärle M. (2009): Towards location-based analysis for solar panels by high resolution remote sensors (laser scanner), in *24th International Cartography Conference*.
- Ratti C., Richens P. (2004): Raster analysis of urban form, in *Environment and Planning B: Planning and Design*, Volume 31, 297-309.
- Saito T., Takahashi T. (1990): Comprehensible rendering of 3-D shapes, in *SIGGRAPH Computer Graphics*, Volume 24, 197-206.
- Šuri M., Hofierka J. (2004): A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments, in *Transactions in GIS*, Vol. 8.
- Woyte A., Nijs J., Belmans R. (2003): Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results, In *Solar Energy*, 217-233.