

# Effiziente Verschattungsberechnung für die Solarpotenzialanalyse durch bildbasierte 3D-Analyse

*Juri Engel, Jürgen Döllner  
Hasso-Plattner-Institut  
Universität Potsdam*

## **Kontext**

Erneuerbare Energien tragen maßgeblich dazu bei die CO<sub>2</sub> Emission zu reduzieren und von den fossilen Rohstoffen unabhängiger zu werden. Rund acht Prozent aller deutschen Wohngebäude verfügen mittlerweile über eine Solarstrom- oder Solarwärmeanlage [1]. 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 Planung und Finanzierung sind detaillierte Informationen über die geeigneten Flächen und die potenziell erzeugbare Energiemenge notwendig. Erst durch eine vollautomatische Solarpotenzialanalyse ist die großflächige Identifikation von geeigneten Dächern und Flächen möglich.

## **Problem**

Die erzeugbare Energiemenge einer Photovoltaik-Anlage auf einem Dach ist abhängig von der Dachneigung und -ausrichtung sowie dem Grad der Verschattung [2]. Die Verschattungsanalyse ist dabei kritisch, da die meisten Anlagen, die heute installiert werden, in Reihe geschaltet sind. Ein einzelnes verschattetes Modul reduziert die Gesamtleistung einer solchen Anlage erheblich [3]. Denn fließt durch ein Modul kein Strom mehr, kann auch durch die anderen in Reihe geschalteten Module kein Strom fließen.

Die Solarpotenzialanalyse ist sehr zeitaufwendig. Dabei benötigt die Berechnung der Verschattung mehr Zeit als die Berechnung der Dachneigung und -ausrichtung aus den LiDAR Daten [4]. Die Dachneigung und -ausrichtung ist für jedes Dach statisch und muss nur einmal berechnet werden, wogegen die Verschattung des Daches sich im Laufe eines Tages und Jahres ändert und für eine kontinuierliche Zeitspanne berechnet werden muss. Des Weiteren ist die Verschattung nicht nur von Schornsteinen, Gauben, Antennen und anderen Gegenständen auf einem Dach abhängig, sondern auch von benachbarten Gebäuden und der Vegetation. Deshalb muss für die Berechnung zusätzlich die Umgebung eines Gebäudes herangezogen werden.

## **Lösungsansatz**

Die gängigen Algorithmen zur Verschattungsberechnung basieren zurzeit auf Image Processing von Höhenfeldern (rasterisierten LiDAR Daten) [4, 5]. Dabei wird in bestimmten Zeitintervallen für jeden zu analysierenden Punkt (z. B. ein Rasterpunkt, der zu einem Dach gehört) die Verschattung berechnet. In einem Raytracing-Verfahren wird von diesem Punkt die Sichtlinie zur Sonne an der jeweiligen 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  $O(z \cdot k \cdot n)$ .

Von jedem Punkt aus muss analysiert werden, ob die Sonne sichtbar ist. Diese Sichtbarkeitsanalyse kann mit der bildbasierten 3D-Analyse durch die Rendering-Pipeline der Graphikhardware beschleunigt durchgeführt werden.

Bei der bildbasierten 3D-Analyse wird ein 3D-Modell der Umgebung des zu analysierenden Daches durch eine einfache Triangulation des Höhenfeldes erstellt. Anschließend wird eine virtuelle Kamera an den zu analysierenden Punkt, in diesem Fall einem Rasterpunkt, der einem Dach zugeordnet werden kann, positioniert und die Umgebung gerendert. Zusätzlich wird ein Punkt an der Sonnenposition zu dem gewählten Zeitpunkt gerendert. Anschließend wird das Bild analysiert. Enthält

es den gerenderten Sonnenpunkt, dann ist die Sichtlinie zwischen virtueller Kamera und Sonne frei und der Dachpunkt ist nicht verschattet.

Dabei können für eine Konfiguration der virtuellen Kamera und eine einmal gerenderte Umgebung auch mehrere Sonnenpunkte (für alle Zeitpunkte des untersuchten Zeitraums) gleichzeitig gerendert werden. Die Anzahl der dabei nicht sichtbaren Sonnenpunkte ergibt den Verschattungsgrad des jeweiligen Dachpunktes an. 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 Rastergröße  $n$  und der Anzahl der untersuchten Zeitpunkte). Somit ist 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) und damit die Anzahl der zu analysierenden Zeitpunkte  $z$  sehr hoch gewählt werden, ohne die für die Analyse benötigte Zeit wesentlich zu erhöhen. 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  $15^\circ$ ) 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. 11% der Primitive der Umgebung.

### Kennzeichen

Die Genauigkeit der Verschattungsanalyse ist maßgeblich von dem gewählten Zeitintervall abhängig. Bei der Berechnung mit Hilfe der bildbasierten 3D-Analyse kann das Zeitintervall sehr klein und damit die Genauigkeit sehr hoch gewählt werden, ohne den Zeitaufwand für die Analyse 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%.

Die bildbasierte 3D-Analyse wird größtenteils auf der GPU ausgeführt und nutzt die Fähigkeiten neuester Graphikhardware um die Berechnungen zu beschleunigen. Zum einen können dadurch sowohl bekannte als auch neueste Optimierungs- und Beschleunigungsalgorithmen für das Rendering, insbesondere Gelände-Rendering (z. B. [6]), genutzt werden. Zum anderen profitiert das Verfahren von der enormen Performance-Entwicklung der Graphikhardware, 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 ermittelt aus dem Anteil der Zeit, in dem der jeweilige Punkt verschattet ist, gemessen an dem gesamten untersuchten Zeitraum. Abbildung 1 visualisiert die Ergebnisse der Verschattungsanalyse.

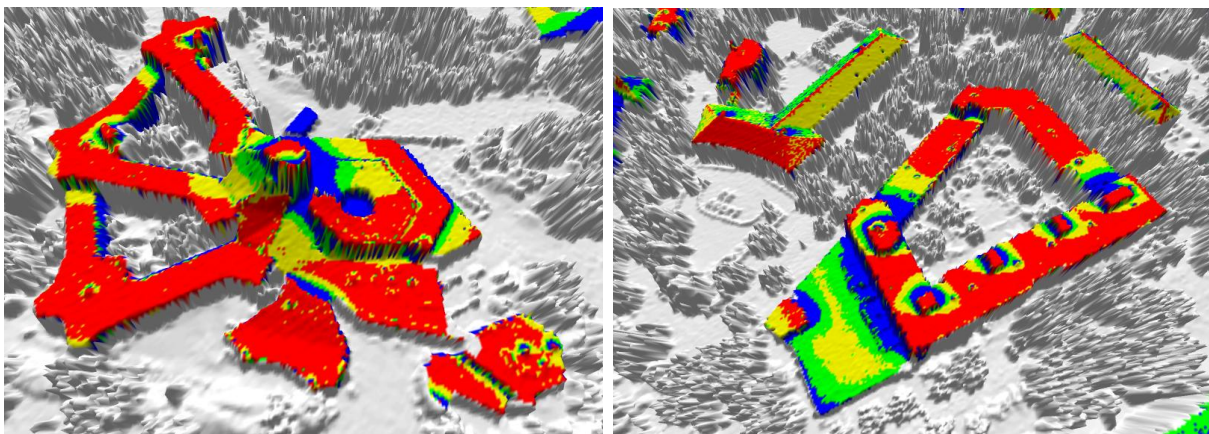


Abbildung 1: Verschattungsanalyse von Dachflächen für eine Solarpotenzialanalyse. Die Farbe gibt den Verschattungsgrad an (rot: <5%, gelb: 5-15%, grün: 15-25%, blau: >25%).

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 (wie z. B. in [7], [8] und [9]) 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 (abgeleitet aus den LiDAR Daten). Darüber hinaus ist aber eine Einbindung von zusätzlichen 3D-Modellen trotzdem möglich. Dadurch können komplexe Gebäude, z.B. mit einem Gebäudevorsprung, berücksichtigt werden, die durch LiDAR nicht ausreichend erfasst werden können.

<b>Zeitintervall</b>	<b>Anzahl der Sonnenpunkte</b>	<b>Berechnungszeit</b>
Zwei Tage im Monat, jeweils 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

**Tabelle 1. Berechnungszeit für 722 Gebäude im innerstädtischen Gebiet auf der Fläche von 1,44 km<sup>2</sup> in Abhängigkeit vom gewählten Zeitintervall und der damit verbundenen Genauigkeit (gemessen auf einem Core 2 Duo mit 3GHz, 4GB RAM, GeForce 9800 GT).**

## Literaturangaben

- [1] BSW – Bundesverband Solarwirtschaft: BSW-Solar: Solarenergie ist Innovationsbeschleuniger der Bauwirtschaft, 12. Januar 2009
- [2] Šúri M., Hofierka J.: A New GIS-based Solar Radiation Model and Its Application to Photovoltaic Assessments, in *Transactions in GIS*, Volume 8, 2004
- [3] Woyte A., Nijs J., Belmans R.: Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results, In *Solar Energy*, pp. 217-233, 2003
- [4] Klärle M., Ludwig D., Lanig S.: SUN-AREA – Ein Beitrag der Fernerkundung gegen den Klimawandel, in *ZfV*, pp. 71-78, 2009
- [5] Carneiro C., Morello E., Ratti C., Golay F.: Solar Radiation over the Urban Texture: LIDAR Data and Image Processing Techniques for Environmental Analysis at City Scale, in *3d Geo-Information Sciences*, Part II, pp. 319-340, 2008
- [6] Livny Y., Kogan Z., El-Sana J.: Seamless patches for GPU-based terrain rendering, in *The Visual Computer*, pp. 197-208, 2009
- [7] Jochem A., Höfle B., Hollaus M., Rutzinger M.: Object detection in airborne LiDAR data for improved solar radiation modeling in urban areas, in *IAPRS*, 2009
- [8] Jochem A., Höfle B., Rutzinger M., Pfeifer N.: Automatic Roof Plane Detection and Analysis in Airborne Lidar Point Clouds for Solar Potential Assessment, in *Sensors*, 2009
- [9] Kassne R., Koppe W., Schüttenberg T., Bareth G.: Analysis of the Solar Potential of Roofs by Using Official LIDAR Data, in *ISPRS*, 2008