

Abschätzung des nutzbaren Dachflächenanteils für Solarenergie mit CityGML-Gebäudemodellen und Luftbildern

Nizar Ben Fekih Fradj^{a,1} and Marc-Oliver Löwner^a

^a*Institut für Geodäsie und Photogrammetrie TU Braunschweig*

Citation Notes:

Ben Fekih Fradj, N. & Löwner, M.-O. (2012): Abschätzung des nutzbaren Dachflächenanteils für Solarenergie mit CityGML-Gebäudemodellen und Luftbildern. In: Löwner, M.-O., Hillen, F. & Wohlfahrt, R. (Hrsg.): Geoinformatik 2012 "Mobilität und Umwelt". Konferenzband zur Tagung Geoinformatik 2012 vom 28.-30.03.2012, Braunschweig, S. 171-177.

Abstract. CityGML roof surfaces have been combined with aerial photos to extract exclusive building installations (roof windows, chimneys and dormers). Knowing time of image acquisition and therefore the sun's position, shadows on known roof surfaces were used to reconstruct 3D geometries. Further, the enriched CityGML instance document was used to estimate the portion of roof surfaces that cannot be used for solar energy production. In addition to the footprints of the roof installations, buffer analysis was performed to calculate the shadowed roof surface. Approximately 10 % of roof surfaces are not feasible for solar energy production.

Keywords. CityGML, Solarpotenzial, Datenintegration

Einleitung

Die Abschätzung des Solarpotenzials auf Dachflächen erfolgt heute zum großen Teil unter Verwendung von luftgestützten Laserscandaten [1]. Aufgrund der Auflösung gängiger Laserscandaten (ca. 10 Punkte pro m²) [2] liefern diese keine verlässlichen Informationen über die Dachaufbauten. Für eine wachsende Anzahl von Gemeinden liegen mittlerweile allerdings auch Vektordaten in den vom Open Geospatial Consortium (OGC) spezifizierten Keyhole Markup Language (KML) [3] oder CityGML [4] vor, die sich hierfür nutzen lassen. Im Gegensatz zum Standard KML, der auf die Präsentation von Raummodellen spezialisiert ist und nur zu Visualisierungszwecken dient, werden in CityGML neben den geometrische auch semantische Informationen repräsentiert. Durch die Verwendung des semantischen Gebäudemodells von CityGML werden komplexe Anfragen an das Modell möglich, die bei rein geometrischen Repräsentationen nicht oder nur durch Anwendung

¹ Email: n.ben-fekih-fradj@tu-bs.de

aufwendiger geometrischer Algorithmen möglich sind. Eine Konvertierung der Daten aus dem höherwertigen Datenstandard CityGML in reine Geometrieformate ist hingegen kein Problem.

Neben der für die Analyse des Solarpotenzials entscheidende Ausrichtung einer Dachfläche kommt der Anteil der Fläche zum tragen, die verschattet wird. Hierbei kann Schattenwurf zum einen durch standortbedingte Strukturen (Bäume, Nachbargebäude), zum anderen durch entwurfsbedingte Strukturen (Schornsteine, Gauben) hervorgerufen werden [5]. Für die in dieser Arbeit relevanten entwurfsbedingten Verschattung lässt CityGML ab dem Detaillierungsgrad, Level of Detail 3 (LoD3) [6], die explizite Repräsentation von Dachfenstern und Dachaufbauten, wie Schornsteinen oder Gauben zu. Diese als Opening bzw. BuildingInstallation modellierten Objekte verringern die für die Solarenergieerzeugung nutzbare Fläche zum einen durch ihre Grundfläche selbst und zum anderen durch Schattenwurf auf die Dachfläche.

Verschattung meint dabei die Verhinderung des Eintreffens von Direktstrahlung auf eine Fläche. Sie wird nach Verursachung unterschieden also Standortbedingte (Bäume, Nachbarschaft hoher Gebäude) oder Entwurfsbedingte Verschattung (Gauben, Schornstein). Informationen über Dachfenster und Dachinstallationen liegen allerdings nicht für alle in CityGML gespeicherten 3D-Stadtmodelle vor.

Hier wird eine Methode vorgestellt, CityGML Daten durch Integration mit tief geflogenen Luftbildern um die Geometrien der Dachaufbauten zu ergänzen und deren Verringerung der zur Energieerzeugung zur Verfügung stehenden Flächen abzuschätzen. Da der Stand der Sonne zur Zeit der Luftbildaufnahme prinzipiell bekannt ist, werden die Schattenwürfe auf den bekannten Dachflächen analysiert, um die Dachaufbauten dreidimensional zu rekonstruieren. Die durch Abschattung betroffene Fläche wird approximativ durch eine von der Höhe der Dachelemente abhängige Bufferfläche ermittelt.

1. Rekonstruktion der 3D Geometrie von Dachelementen

Die geometrische Rekonstruktion von Fenstern, Schornsteinen und Dachgauben erfolgt durch Datenintegration von CityGML Dachflächen mit digitalisierten Geometrien aus tief geflogenen Luftbildern. Das Vorgehen zur geometrischen Rekonstruktion von Dachaufbauten wird hier exemplarisch am Beispiel des Schornsteins gezeigt.

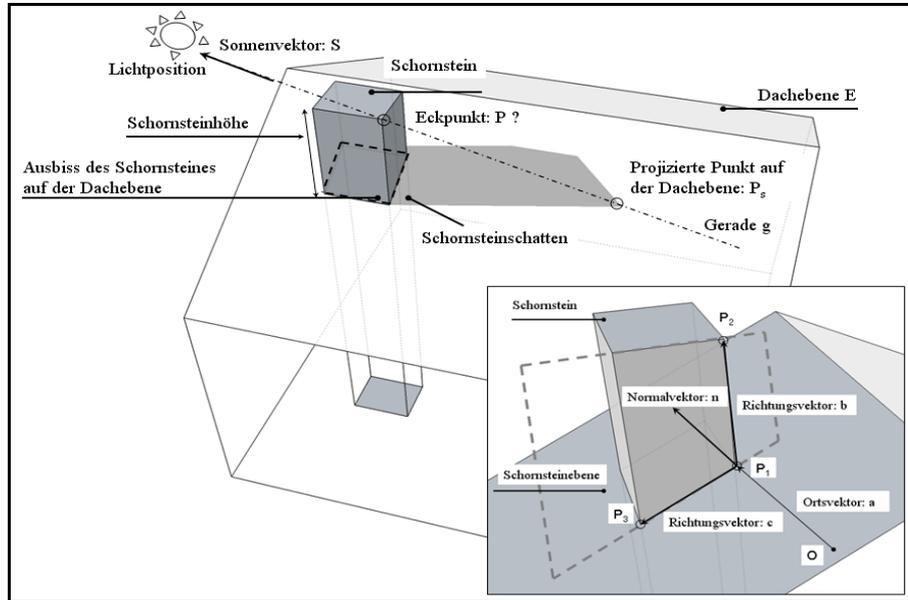


Abb. 1. Zusammenhänge zwischen Sonnenstand, Dachfläche und Schornsteinhöhe.

Während die Rekonstruktion der 3D Geometrie von Dachfenstern trivial ist, dabei reicht der Schnitt der 2D-Koordinaten mit den gegebenen Dachflächen, kann man zur Rekonstruktion von geraden oder schrägen Schleppgauben analog zu Schornsteinen vorgehen. Dafür wird die zusätzlich erforderliche Objekthöhe durch den Schattenwurf auf die gegebene Dachfläche rekonstruiert. Hierbei wird die Beziehung des über den Zeitpunkt der Luftbildaufnahme prinzipiell bekannten Sonnenvektors \vec{S} und den projizierten Punkt P_s auf der Dachfläche ausgenutzt (Abb. 1).

Zur geometrischen Rekonstruktion werden Informationen aus dem Luftbild, der Ausbiss und Schattenwurf des Schornsteines sowie Z-Koordinaten aus der 3D-Ebene des Daches aus der CityGML-Datei benötigt. Die Besonderheit dieser Methode liegt in der Berechnung der 3D-Koordinate durch Schattenwurf des Schornsteines auf der Dachebene. Der Schattenwurf eines Objektes ist von seiner geographischen Lage, dem Datum und der Uhrzeit und damit vom Einfallswinkel des Sonnenlichtes abhängig. Der Sonnenstand kann für jeden beliebigen Ort der Erde durch zwei verschiedene Winkel, die Sonnenhöhe (Elevation) γ_S und das Sonnenazimut α_S zu jeder Zeit eindeutig berechnet werden [7]. Für die eingeführten Winkel des Azimuts α_S und der Höhe γ_S kann nach (1) ein Vektor \vec{S} bestimmt werden, der in Richtung des parallel eintreffenden Sonnenlichtes zeigt.

$$\vec{S} = (\cos \gamma_S \cdot \cos \alpha_S, \cos \gamma_S \cdot \sin \alpha_S, \sin \alpha_S) \quad (1)$$

mit \vec{S} : der Sonnentvektor
 γ_S : die Sonnenhöhe
 α_S : das Sonnenazimut

Das Sonnenlicht fällt in der Richtung \vec{S} auf die Dachfläche bzw. auf den Schornstein. Die Lagekoordinaten (P_{SX}, P_{SY}) des Schnittpunkts mit der Dachebene P_S

werden aus den Luftbildern entnommen. Da der Schattenpunkt P_S eines Schornsteines auf der Dachebene liegt, wird die Z-Komponente (P_{SZ}) dieses Schnittpunktes mit der Gleichung der Normalenform der Dachebene berechnet. Durch die Bestimmung des Schnittpunktes P_S kann die Gerade g dieses Punktes in Richtung des Sonnenvektors \vec{S} ermittelt werden (2).

$$g = \vec{P}_S - \lambda \cdot \vec{S} \quad (2)$$

mit \vec{S} : der Sonnenvektor ist ein sogenannter Richtungsvektor, also ein Vektor, dessen Richtung parallel zur Geraden ist.
 \vec{P}_S : der Schattenpunkt eines Schornsteines ist ein Ortsvektor eines beliebigen, aber fest gewählten Punktes der Geraden (Stützpunkt).

In einem nächsten Schritt erfolgt die Identifizierung der Schornsteinebene, die durch die drei Punkte P_1 , P_2 und P_3 ausgespannt wird. Diese Ebene des Schornsteines wird durch einen Ortsvektor \vec{a} und zwei Richtungsvektoren \vec{b} und \vec{c} bzw. durch die Angabe von drei Punkten P_1 , P_2 und P_3 gegeben. Somit lautet die Gleichung der Ebene in Vektorschreibweise:

$$E = \vec{a} + \mu \cdot \vec{b} + \nu \cdot \vec{c} \quad (3)$$

mit $\vec{b} = (P_2 - P_1)$ und $\vec{c} = (P_3 - P_1)$: sind linear unabhängige Richtungsvektoren.

Der Normalenvektor \vec{n} zur Schornsteinebene lässt sich aus den beiden Richtungsvektoren \vec{b} und \vec{c} bestimmen.

$$\vec{n} = \vec{b} \times \vec{c} = (P_2 - P_1) \times (P_3 - P_1) \quad (4)$$

Die Koordinaten von P (verantwortlich für Spitze im Schattenwurf) können durch einen Parameter λ mit Hilfe der Geradengleichung $\vec{P} = \vec{P}_S + \lambda \cdot \vec{S}$ bestimmt werden. Da der Eckpunkt P auch innerhalb der Schornsteinebene liegt, folgt für den Parameter λ :

$$\lambda = \frac{-\vec{n} \cdot (\vec{P}_S - \vec{a})}{\vec{n} \cdot \vec{S}} \quad (5)$$

Durch Vorgabe des Normalenvektors \vec{n} und eines Ortsvektors \vec{a} der Schornsteinebene lässt sich durch Kenntnis des Sonnenvektors \vec{S} der dreidimensionale Vektor \vec{P} (P_X, P_Y, P_Z) für die Ermittlung der Schornsteinhöhe nach (6) berechnen.

$$\vec{P} = \vec{P}_S + \frac{\vec{n} \cdot (\vec{P}_S - \vec{a})}{\vec{n} \cdot \vec{S}} \cdot \vec{S} \quad (6)$$

2. Umsetzung des Konzeptes

Das Konzept wird auf der Datengrundlage von CityGML Instanzdokumenten und tief geflogenen Luftbildern realisiert. Als Basisdaten wurden Digitale Orthophotos (DOP) und CityGML-Daten des 3D Gebäudemodells von Berlin Ost verwendet. Unter Verwendung eines angepassten Feature Manipulation Engine (FME) Workbench werden die Geometriedaten der Dachflächen aus den CityGML Daten extrahiert und mit dem in ArcMap digitalisierten Grundriss- und Schattengeometrien zusammengeführt (Abb. 2).

In FME erfolgt auch die eigentliche Berechnung der 3D-Koordinaten. Die rekonstruierten Dachelemente werden mit den ursprünglichen CityGML-Daten zusammengeführt. Dabei werden Dachfenster als Opening und die Dachaufbauten als BuildingInstallation repräsentiert. Das Ergebnis ist ein CityGML-konformes Instanzdokument, das der Weiterverarbeitung zur Abschätzung des für die Solarenergieerzeugung nicht nutzbaren Flächenanteiles dient.

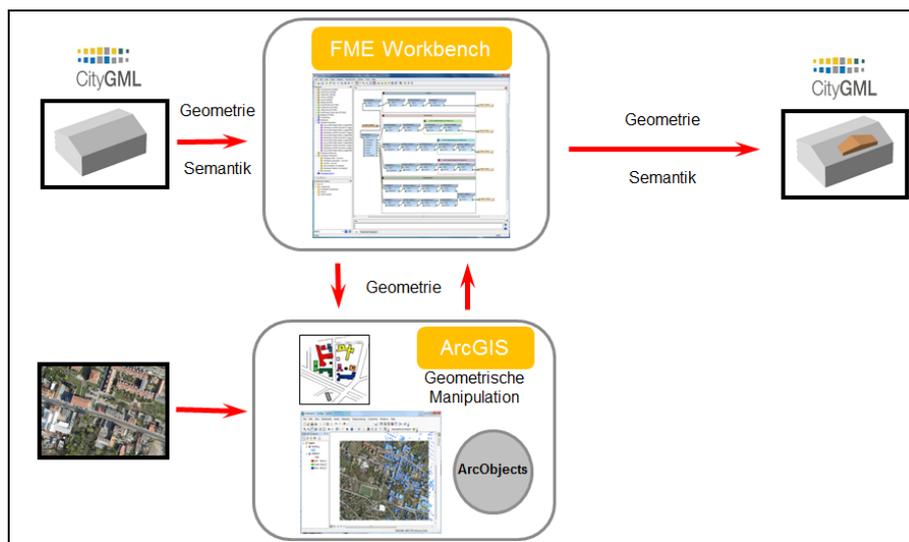


Abb. 2. Workflow zur Verbesserung von gegebenen CityGML Gebäudemodellen.

3. Beispielhafte Anwendung veredelter Dachgeometrien

Zur Abschätzung des für die Solarenergiegewinnung durch Dachelemente beeinflussten Dachflächenanteiles wurden diese für 531 Schrägdächer rekonstruiert. Die nachfolgende Abbildung (Abb. 3) illustriert die Ergebnisse dieser Arbeit.

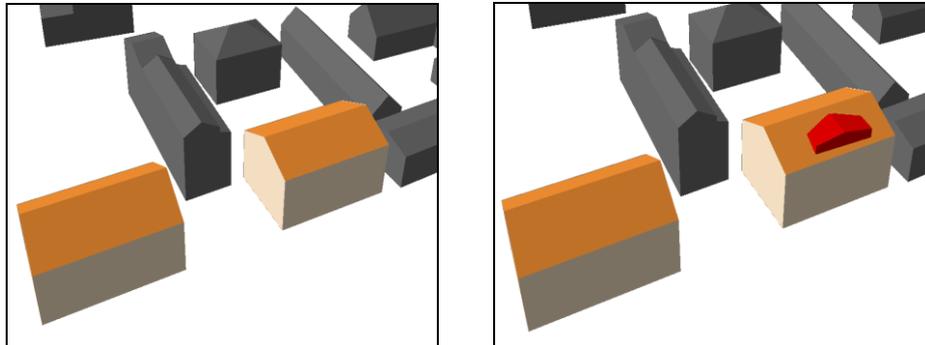


Abb. 3. Visualisierung von CityGML-Daten von Berlin vor der Verbesserung (links) und nach der Veredlung durch Dachelemente (rechts).

Die azimutalen Ausrichtungen der Dachflächen bleiben hier zunächst unberücksichtigt, da es hier um die generelle Abschätzung des Flächenanteils geht, der direkt oder durch Schattenwurf betroffen ist. Von den Schrägdachflächen wurden die Grundflächen der Dachelemente subtrahiert. Abgeschattete Flächen wurden durch die Flächenberechnung eines halben Buffers mit einem von der Höhe der Dachelemente abhängigen Radius approximiert.

Die Ergebnisse der Abschätzung des für Solarenergiegewinnung nicht zur Verfügung stehenden Flächenanteiles finden sich in Tabelle 1. Es zeigt sich, dass auf den 51185,4 m² der untersuchten 531 Schrägdächer die Gaube und ihre Abschattung mit insgesamt 6,9 % die größte Reduzierung des Solarpotenzials darstellt. Ohne Berücksichtigung der Dachelemente wird das Solarpotenzial von Schrägdächern um etwa 10 % überschätzt. Hierbei handelt es sich allerdings um einen Mindestwert, da konstruktionsbedingte Einschränkungen beim Aufbau von Solaranlagen noch nicht berücksichtigt wurden.

Table 1. Flächenanteile der Dachelemente und ihrer Schattenwürfe an den untersuchten Schrägdächern

Flächentyp	Fläche [m ²]	Anteil an Dachfläche [%]
Dachfenster	369,778	0,658
Gaube	3180,428	5,638
Gaube Verschattung	720,985	1,278
Schornstein	108,585	0,192
Schornstein Verschattung	845,765	1,499
Gesamt	5225,541	9,265

4. Diskussion

Hier wurde die Veredlung von CityGML-Daten unter Verwendung von tief geflogenen Luftbildern vorgestellt. Hierbei wurde ein Formelwerk zur Verwendung von Schattenwürfen auf bekannten Flächen bei prinzipieller Kenntnis des Sonnenstandes zur 3D Rekonstruktion von Dachelementen aufgestellt.

Der größte Fehlereinfluss bei der geometrischen Rekonstruktion von Dachelementen aus Luftbildern liegt in der Berechnung von Azimut- und Höhenwinkel der Sonne. Hierfür spielt der Zeitpunkt der Luftbildaufnahme eine entscheidende Rolle. Die vorliegenden Luftbilder, die aus mehreren Einzelbildern zusammengesetzt sind, liefern keiner detaillierten Information über die Uhrzeit dieser einzelnen Bilder im

betrachteten Untersuchungsgebiet. Zur Bestimmung des Sonnenvektors \vec{S} konnte nur auf ein Zeitintervall von etwa 05:12 min zurückgegriffen werden. Dies macht unter Umständen einen Winkelfehler von $1,08^\circ$ in der Höhe und $1,70^\circ$ im Azimut aus.

In [8] wird zur Extraktion von Schatten auf ein Digitales Oberflächenmodell (DOM) zurückgegriffen. Anhand des DOMs und dem Wissen über Sonnenstand und Aufnahmeparameter kann bestimmt, wo Schattenregionen im Bild zu erwarten sind. Diese Methode kann unter Kenntnis der hier rekonstruierten Geometrie dazu verwendet werden Zur Abschätzung des für die Solarenergiegewinnung durch Dachelemente beeinflussten Dachflächenanteiles.

Literaturverzeichnis

- [1] Ludwig, D., Lanig, S. & Kärle, M. (2009): Location analysis for solar panels by LiDAR-Data with Geoprocessing - SUN-AREA. Enviroinfo 2009. 23rd International Conference on Informatics for Environmental Protection. Berlin. Germany.
- [2] Bofinger, J. & Hesse, R (2010): Der Einsatz von Airbone Laserscanning zur Entdeckung von archäologischen Geländedenkmale. Mit Hightech auf den Spuren der Kelten. Archäologische Informationen aus Baden-Württemberg 61, 70-89
- [3] Open Geospatial Consortium (2008): OGC Approves KML as Open Standard.
- [4] Gröger, G.; Kolbe, Thomas H.; Czerwinski, A. & Nagel, C. (2008): OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard OGC Int. Standard (2008), Doc. No. 08-007r1 2008.
- [5] Baumanns, K. & Löwner, M.-O. (2009): Refined estimation of solar energy potential on roof areas using decision trees on CityGML-data. Geophysical Research Abstracts, 11.
- [6] Kolbe,Thomas H. (2008): CityGML, KML und das Open Geospatial Consortium / Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik. Tagungsband zum 13. Münchener Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme an der Technischen Universität München.
- [7] Schallock, J (2008): Internetseite ABC Solaranlagen (URL: <http://www.abc-solaranlagen.de/pages/thermische-solaranlagen-warmwasser.html>, 27.01.2012).
- [8] Eckstein,W.; Steger, C (1996): Fusion of Digital Terrain Models and Texture for Object Extraction, In Proceedings of the Second International Airbone Remote Sensing Conference and Exhibition, Vol III, S. 1-10.