

# 3D-punktbasierte Solarpotenzialanalyse für Gebäudefassaden mit freien Geodaten

Robert REGVAT, Martin HÄMMERLE, Sabrina MARX,  
Kristina KÖNIG und Bernhard HÖFLE

Geographisches Institut, Universität Heidelberg · martin.haemmerle@geog.uni-heidelberg.de

*Dieser Beitrag wurde durch das Programmkomitee als „reviewed paper“ angenommen.*

## Zusammenfassung

Im Zuge der Debatten um den globalen Wandel, nachhaltige Entwicklung und steigenden Energiebedarf werden erneuerbare Energiequellen als zentral wichtig angesehen. Die Installation von Photovoltaikanlagen an vertikalen Flächen, wie Fassaden, hat ein großes Potenzial zur Energieproduktion. Zur lokalen Abschätzung des Solarpotenzials von Fassaden sind detailreiche 3D-Geodaten nötig. Die Verwendbarkeit freier Geodaten aus dem Web 2.0-Projekt OpenStreetMap (OSM) für die Solarpotenzialanalyse eines Stadtgebietes wird in diesem Beitrag am Beispiel der Stadt Bregenz untersucht. Die Fassaden werden auf der Grundlage von i) OSM und Laserscanningdaten und ii) amtlichen Katasterdaten in dreidimensionalen Punktrastern modelliert. Für jeden Fassadenpunkt wird das Solarpotenzial anhand von Verschattungen und Einfallswinkeln der Sonnenstrahlung berechnet. Im Vergleich zu Referenzwerten aus amtlichen Daten zeigt das Solarpotenzial für OSM-Daten vor allem in Bereichen mit viel Vegetation deutlich abweichende Werte. Ohne Einfluss von Vegetation zeigen 89 % der Solarpotenzialwerte aus OSM-Daten weniger als 10 % Abweichung von den Referenzwerten. Gebäudedichte und die abweichende Repräsentation von Gebäudegrundrissen und Dachgeometrien in OSM haben zudem Einfluss auf die Berechnung des Solarpotenzials. Mit homogenen, aktuellen, detailreichen und dreidimensionalen OSM-Daten erschließt sich jedoch eine frei verfügbare Datenquelle für Standortanalysen von Photovoltaikanlagen an vertikalen Gebäudeflächen.

## 1 Motivation

Energie aus erneuerbaren Quellen spielt eine zentrale Rolle in der Diskussion um den globalen Wandel: Durch steigende Lebensstandards und eine wachsende Weltbevölkerung wird mehr Energie verbraucht. Wegen des begrenzten Vorrates an fossilen Energieträgern und deren Umweltschädlichkeit wird zunehmend in Technologien investiert, mit denen erneuerbare Energiequellen nachhaltig erschlossen werden können. In Deutschland hat dabei die Photovoltaik einen sehr starken Ausbau erfahren, welche im Jahr 2012 etwa 4,4 % des Nettostromverbrauches abdeckte (BÖHME & NICK-LEPTIN 2013). Mit einer installierten Nennleistung von 35,7 GW steht die Photovoltaik nach der Windenergie an zweiter Stelle der Kraftwerkstypen für erneuerbare Energien in Deutschland und ist somit zu einem Pfeiler für die Energiewende geworden (ISE 2012).

Mit Rahmenbedingungen wie der EU-Richtlinie 2010/31/EU, nach welcher ab 2021 alle Neubauten den Standards von Niedrigstenergiehäusern entsprechen sollen, wird auch eine wachsende installierte Leistung von Photovoltaikanlagen angenommen (IPSER et al. 2012). Die herkömmliche Installation von Solarmodulen auf Dächern und Freiflächen wird zunehmend durch gebäudeintegrierte Photovoltaik ergänzt, bei welcher die komplette Gebäudehülle als Montageort für PV-Module infrage kommt (CERÓN et al. 2013). Nach Angaben des Bundesverbands Solarwirtschaft ließe sich mit Photovoltaikanlagen an Fassaden nahezu ein Drittel des gesamten deutschen Stromverbrauchs decken (GFF 2011). Die geringere Energieausbeute an vertikalen Flächen aufgrund ungünstigerer Einstrahlwinkel wird dabei durch das größere Angebot an Flächen insgesamt aufgewogen (REDWEIK et al. 2013), die überdies nicht in Konkurrenz zu landwirtschaftlichen Flächen stehen.

Für die Planung des Ausbaus von Photovoltaik stellen Solarpotenzialkataster ein effektives Hilfsmittel dar. Ein solches Kataster zeigt für die untersuchte Region räumlich und zeitlich differenziert die zu erwartenden Solarenergieerträge auf. Mit diesem Wissen um günstige Standorte können privaten und öffentlichen Akteuren Impulse für Investitionen in PV-Anlagen gegeben werden (HELMSTADT 2012). Da ein vollständiges Solarpotenzialkataster auch die zu erwartende Energieausbeute für Fassadeninstallationen beinhalten muss, sind hochauflösende 3D-Geodaten nötig. Entsprechende Datensätze werden bislang mit aufwendigen Methoden wie Laserscanning oder Photogrammetrie aufgenommen (JOCHM et al. 2011, HELMSTADT 2012, HOFIERKA & ZLOCHA 2012, REDWEIK et al. 2013). Es besteht somit Bedarf an frei verfügbaren, flächendeckenden Datensätzen, welche die Berechnung des Solarpotenzials auch für Fassadenflächen erlauben.

Im Folgenden werden zunächst ausgewählte Untersuchungen vorgestellt, die sich ebenfalls mit der Berechnung des Solarpotenzials vertikaler Flächen beschäftigen. Davon ausgehend wird die in dieser Analyse bearbeitete Frage entwickelt, inwiefern sich freie Geodaten für vergleichbare Berechnungen des Solarpotenzials eignen. Der Zusammenstellung der Methoden, mit denen das Solarpotenzial aus freien Geodaten mit Referenzdaten verglichen wird folgt eine Diskussion der festgestellten Unterschiede und ihrer Ursachen. Aus der Zusammenschau der Ergebnisse werden schließlich weiterführende Fragestellungen abgeleitet.

## 2 Stand der Forschung

Die Solarpotenzialberechnung für horizontale oder geneigte Flächen unterscheidet sich von der Analyse vertikaler Fassaden. Im ersten Fall kann mit 2.5D-Rasterdaten (ein z-Wert pro x-, y-Koordinatenpaar) gearbeitet werden, welche die untersuchten Flächen repräsentieren. Modelle senkrechter Flächen verlangen dagegen mehrere z-Werte pro x-, y-Koordinate (HOFIERKA & ZLOCHA 2012).

Eine Möglichkeit, diese Einschränkung zu umgehen, zeigt CARNEIRO (2011) mit der Unterteilung eines auf Laserscanningdaten basierenden Gebäudehöhenrasters in vertikal gestapelte Segmente und die anschließende Berechnung des Solarpotenzials pro Rasterzelle und Segment. Die direkte Betrachtung der Fassadenflächen nehmen HOFIERKA & ZLOCHA (2012) mithilfe eines photogrammetrisch erstellten 3D-Stadtmodells vor. Das von den Autoren vorgestellte GRASS-GIS Modul *v.sun* segmentiert das eingehende Stadtmodell in Voxel gewünschter Auflösung und berechnet für die je Voxel entstandenen Polygone die

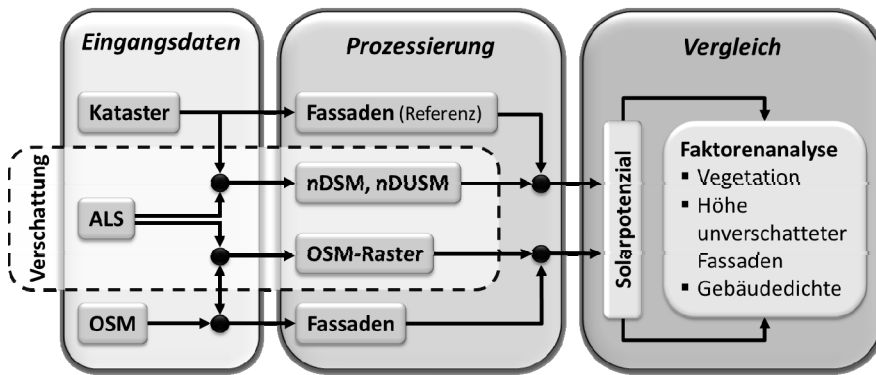
Einstrahlungsenergie unter Berücksichtigung von Fassadenausrichtung, atmosphärischer Trübung und Verschattung. Ein weiterer Weg zur Berechnung des Solarpotenzials von Fassaden führt über die Modellierung vertikaler Flächen mit Hyperpunkten (REDWEIK et al. 2013) bzw. einer Punktwolke, in welcher die Fassade von mehreren  $z$ -Werten je  $x$ -,  $y$ -Koordinate repräsentiert ist. JOCHEM et al. (2011) nutzen zur Solarpotenzialberechnung eine 3D-Punktwolke aus mobilem Laserscanning. Darauf aufbauend berechnen PETERS & HÖFLE (2013) das Solarpotenzial für vertikale Lärmschutzwände, und HELBICH et al. (2013) erreichen mit der gewonnenen Information eine deutliche Verbesserung hedonischer Immobilienpreismodelle.

Die genannten Untersuchungen bedienen sich ausnahmslos aufwendig erstellter Datensätze, um Informationen über Fassadenhöhen abzuleiten. Ziel dieser Untersuchung ist es deshalb, das Potenzial freier Geodaten für Solarpotenzialanalysen als Ergänzung zu kommerziellen oder amtlichen Geodaten zu ermitteln.

Gewählt wurden Daten aus dem OpenStreetMap-Projekt (OSM). OSM stützt sich vorwiegend auf von Personen freiwillig digitalisierte Karten und gilt vor allem in urbanen Räumen als aktuell und qualitativ hochwertig (ZIELSTRA & ZIPF 2010, ROICK et al. 2011, NEIS et al. 2012, HECHT et al. 2013, NEIS et al. 2013). Auf Basis von OSM-Daten wird in dieser Untersuchung das Solarpotenzial des Stadtgebietes von Bregenz (Vorarlberg, Österreich) berechnet. Als Referenz für die Berechnungen sind amtliche Katasterdaten verfügbar. Analysiert werden die Unterschiede der Solarpotenzialberechnungen für Fassaden aus i) kombinierten OSM- und Laserscanningdaten und ii) amtlichen Daten. Betrachtet werden dabei der Einfluss verschattender Vegetation, schattenfreier Fassadenanteile sowie der Bebauungsdichte.

### 3 Methodik

Um verschattende Objekte in die Solarpotenzialberechnungen einzubeziehen, wurden aus Laserscanningdaten (ALS von engl. airborne laser scanning) des Landes Vorarlberg vorbereitend folgende Rastermodelle mit einer Zellgröße von  $1 \text{ m}^2$  generiert: Normalisiertes digitales Oberflächenmodell (nDSM, normalized DSM), normalisiertes digitales Stadtmodell (nDUSM, normalized digital urban surface model) und OSM-Raster (Abbildung 1). Die Gebäude in nDSM und nDUSM enthalten der Rasterauflösung entsprechend gestufte Dächer, deren Höhenwerte aus den ALS-Daten abgeleitet wurden. Im nDUSM wurde Vegetation entfernt, indem nDSM-Rasterzellen außerhalb von Gebäudegrundrissen auf einen  $z$ -Wert von  $0 \text{ m}$  gesetzt wurden. Das OSM-Raster enthält für die Rasterzellen innerhalb von Gebäuden die mittleren Höhenwerte der ALS-Höhen (KLONNER et al. 2014) und simuliert damit das in OSM verwendete LOD1. Die Ableitung der Gebäudehöhen aus ALS-Daten war notwendig, da Gebäudehöhendaten in OSM noch eine sehr geringe Abdeckung von unter  $1 \%$  haben (z. B. GOETZ & ZIPF 2012). Auch im OSM-Raster wurden die Rasterzellen außerhalb von Gebäuden auf  $z = 0$  gesetzt, um das Fehlen von Vegetation in OSM zu berücksichtigen. Um den verschattenden Einfluss ausschließlich von OSM- und Katasterdaten vergleichend zu analysieren, wurde die Topographie des Untersuchungsgebietes nicht in die Berechnungen einbezogen. Als Grundhöhe für nDSM, nDUSM und OSM-Raster wurden  $400 \text{ m}$  Höhe über Meeresspiegel vorgegeben, um eine dem Untersuchungsgebiet entsprechende Berechnung der Sonneneinstrahlung zu erhalten.



**Abb. 1:** Überblick der Teilschritte der vergleichenden Solarpotenzialanalyse.

Zur Fassadenmodellierung wurden die Gebäudegrundrisspolygone im OSM- und Katasterdatensatz in Linien umgewandelt. Linien an Gebäudeaußenseiten, welche mehr als  $45^\circ$  von einer südlichen Ausrichtung ( $180^\circ$ ) abweichen, wurden von den weiteren Berechnungen ausgenommen. Im Falle der Katasterdaten konnte die Fassadenhöhe direkt aus dem Originaldatensatz übernommen werden. Bei den OSM-Daten wurde die Fassadenhöhe aus dem nDSM übernommen. Ausgehend von den Fassadenlinien wurden horizontal und vertikal im Abstand von einem Meter virtuelle 3D-Punkte generiert, die die Fassade modellhaft repräsentieren.

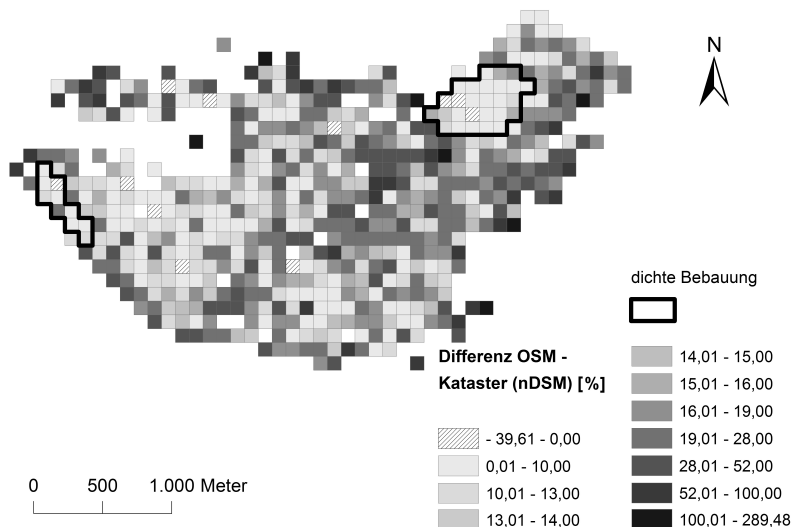
Die Berechnung des jährlichen Solarpotenzials (in  $\text{kWh/m}^2/\text{a}$ ) erfolgt für jeden konstruierten 3D-Fassadenpunkt (JOCHM et al. 2011). Sie erfolgt in zwei Schritten auf der Grundlage von HOFIERKA & SÚRI (2004). In einem ersten Schritt wird auf Basis der Eingangsraaster die Verschattung durch Hindernisse im Umkreis von 300 m berücksichtigt. Die benötigten Sonnenstände im Jahres- und Tagesverlauf werden mit SOLPOS (NREL 2002) generiert. Im zweiten Schritt erfolgt die Berechnung der Globalstrahlung auf Grundlage der jeweiligen Verschattung und der daraus folgenden Ermittlung des Potenzials aus dem direkten und diffusen Strahlungsanteil. Für das Untersuchungsgebiet wurde hierfür aus dem PVGIS-Projekt (SÚRI et al. 2008) ein einheitlicher clear-sky-Index von  $K_c = 0,6378$  ermittelt. Um lokale Unterschiede des Solarpotenzials herausarbeiten zu können, wurde Kacheln von  $100 \times 100$  m jeweils der mittlere Wert des Solarpotenzials aller Fassadenpunkte zugewiesen. Es wurden 601 Kacheln berücksichtigt, von denen jede mindestens ein Fassadenelement aus OSM- sowie aus Katasterdaten enthält.

In der Analyse wird das Solarpotenzial für die OSM-basierten Fassaden mit den Werten für die katasterbasierten Fassaden verglichen. Die OSM-Fassaden werden dazu mit dem OSM-Raster verschattet. Die katasterbasierten Fassaden erfahren Verschattung einerseits durch das nDSM und andererseits durch das nDUSM, um den Einfluss von Vegetation festzustellen. Weitere Analyseschritte vergleichen die Solarpotenzialabweichungen zwischen OSM- und katasterbasierten Fassaden in Abhängigkeit dreier Faktoren: i) prozentualer Vegetationsanteil ii) durchschnittliche Höhendifferenz zwischen Fassaden und Vegetation iii) Gebäudedichte pro Kachel. Die Verschattung der Fassaden erfolgt für den Einzelfaktorenvergleich jeweils mit dem nDSM. Aus den Vergleichen kann dann geschlossen werden, welche Faktoren eine Solarpotenzialberechnung aus OSM-Daten beeinflussen.

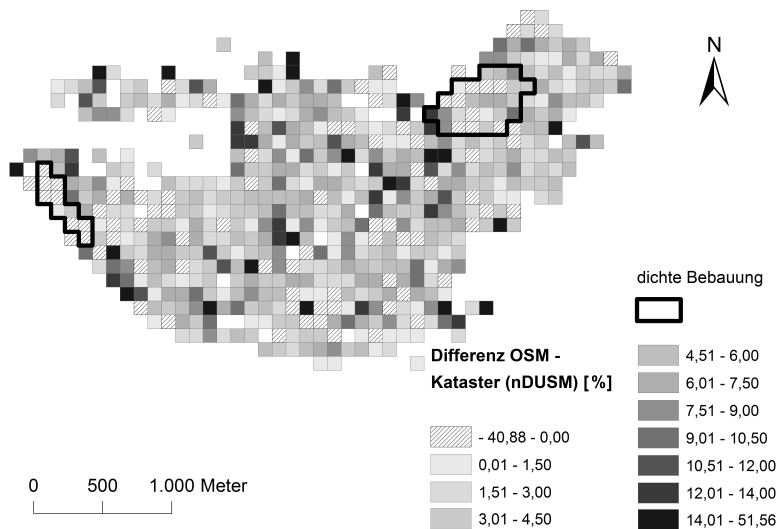
## 4 Ergebnisse

Da die Fassadenextraktion die Grundlage für die anschließenden Solarpotenzialanalysen ist, wird hier kurz auf sie eingegangen. Aus den Katasterdaten wurden 10.166 Fassadenelemente extrahiert, welche eine durchschnittliche Länge von 5,83 m aufweisen. Demgegenüber stehen 4.863 OSM-Fassadenelemente mit 11,82 m Länge. Als Hauptgrund für diese deutlichen Unterschiede kann eine vereinfachte Repräsentation der Gebäudegeometrien in den OSM-Daten angenommen werden, durch die kleine Gebäudevorsprünge und -schluchten unberücksichtigt bleiben. Stellt man die Gesamtlänge der Fassaden gegenüber (Kataster: 59.268 m, OSM: 57.481m), kann der Unterschied mit etwa 3 % als relativ gering angesehen werden. Der Unterschied in der Fassadenhöhe ist ebenfalls klein: Die durchschnittliche Gebäudehöhe im Kataster liegt bei 8,00 m und die aus ALS-Höhen gewonnenen Gebäudehöhen für den OSM-Datensatz bei 7,89 m. Die Anzahl der Einzelpunkte, mit welchen die Fassaden in 3D modelliert wurden, liegt bei 575.410 Punkten in den katasterbasierten Fassaden und 547.439 Punkten im OSM-Datensatz.

Die Abweichungen zwischen dem Solarpotenzial auf Kataster- und OSM-Fassaden sind in Abbildung 2 dargestellt. Das Solarpotenzial der Katasterfassaden wurde mit dem nDSM als Verschattungsdatensatz gerechnet. Im Ergebnis wurden für fast alle OSM-basierten Fassaden (589 von 601 Kacheln) höhere Einstrahlungswerte berechnet. Dabei weichen 77 % der Kachelwerte um mehr als 10 % voneinander ab (Mittelwert der Abweichung: 21.2 %). Die Verschattung der Katasterfassaden durch Vegetation und das dadurch reduzierte Solarpotenzial kommt in diesen Differenzen zum Ausdruck. Bereiche geringer und großer Abweichung lassen sich räumlich abgrenzen: In eng bebauten Stadtgebieten mit geringem Vegetationsanteil sind auch die Unterschiede gering (eingerahmte Kacheln in Abbildung 2). Bei lockerer Bebauung oder hohem Vegetationsanteil weichen die Berechnungen stärker voneinander ab.



**Abb. 2:** Solarpotenzialunterschiede zwischen OSM- und katasterbasierten Fassaden in Prozent. Die Verschattung der katasterbasierten Fassaden erfolgte durch das nDSM.



**Abb. 3:** Solarpotenzialunterschiede zwischen OSM- und katasterbasierten Fassaden in Prozent. Im Gegensatz zu Abb. 2 erfolgte die Verschattung hier mit dem vegetationslosen nDUSM.

Wird das vegetationslose nDUSM zur Verschattung der Katasterfassaden verwendet, sind die Unterschiede deutlich geringer mit einer mittleren Abweichung von 4,1 % (Abbildung 3). Der Anteil von Kacheln mit negativer Abweichung, in denen das mittlere Solarpotenzial der OSM-Fassaden niedriger ist als das der Katasterfassaden, steigt von 1,8 % (11 Kacheln) auf 14,6 % (88 Kacheln). Circa 89 % der Kachelwerte weichen um maximal 10 % voneinander ab und nur 1 % der Kachelwerte haben Abweichungen über 20 %. Die berechneten Solarpotenzialwerte gleichen sich somit bei Ausschluss der verschattenden Vegetation an, das Überwiegen höherer Werte für die OSM-Fassaden bleibt jedoch bestehen. Diese auch nach Ausschluss der Vegetation verbleibenden Unterschiede weisen erneut auf die vereinfachte geometrische Repräsentation der Gebäudeobjekte im OSM-Datensatz hin. Durch sie wird vor allem die auch von HOFIERKA & ZLOCHA (2012) als wichtig eingestufte Eigenverschattung (z. B. durch Gebäudevorsprünge) zu wenig berücksichtigt. Ein weiterer Grund für die verbleibenden Differenzwerte kann in den unterschiedlichen Dachgeometrien gesehen werden: Im OSM-Raster sind die einzelnen Hausdächer einheitlich hoch, während im nDUSM Satteldächer im Raster gestuft modelliert sind.

Der starke Einfluss von Vegetation auf die Solarpotenzialberechnung für OSM- oder katasterbasierten Fassaden zeigt sich auch in Tabelle 1. In Kacheln mit niedrigem Vegetationsanteil (nDSM-Rasterzellen außerhalb von Gebäudegrundrissen und über 1 m Höhe) ist auch der Einstrahlungsunterschied zwischen den beiden Fassadendatensätzen gering. Betrachtet man die Höhendifferenz von Fassaden und Vegetation, unterscheidet sich das Solarpotenzial am geringsten in Zellen mit hohen Fassaden oder niedriger Vegetation in Gebäudenähe.

Die Gebäudedichte schließlich zeigt ein inverses Verhalten zur Vegetationsdichte. In Kacheln mit hoher Gebäudedichte sind die Unterschiede zwischen OSM- und katasterbasier-

ten Fassaden geringer als in lockerer Bebauung. Als Grund hierfür wird der geringere Anteil von Vegetation im Bereich hoher Gebäudedichte angenommen.

**Tabelle 1:** Einfluss einzelner Faktoren auf die Solarpotenzialberechnung für OSM- und katasterbasierte Fassaden (nDSM-verschattet). Kacheln mit entsprechendem mittlerem Faktorwert fallen in die zugehörige Differenzklasse OSM-Katasterfassade.

| <i>Kacheleigenschaft</i>              | <b>Differenzklasse (Abweichung OSM-Katasterfassaden)</b> |                  |                  |                  |                  |                  |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                                       | <b>&lt; 10 %</b>                                         | <b>10 – 20 %</b> | <b>20 – 30 %</b> | <b>30 – 40 %</b> | <b>40 – 50 %</b> | <b>&gt; 50 %</b> |
| <i>Vegetationsanteil [%]</i>          | 16,3                                                     | 21,8             | 30,3             | 39,8             | 48,5             | 62,4             |
| <i>Fassaden – Vegetationshöhe [m]</i> | 7,6                                                      | 6,4              | 5,5              | 3,8              | 3,2              | 0,2              |
| <i>Gebäudedichte [%]</i>              | 23,7                                                     | 17,3             | 14,4             | 13,7             | 10,3             | 6,5              |

## 5 Fazit

In dieser Untersuchung wurden Solarpotenzialberechnungen für Fassaden aus freien Geodaten sowie amtlichen Katasterdaten verglichen. OpenStreetMap-Daten wurden für das Stadtgebiet Bregenz unter Zuhilfenahme von ALS-Höhenwerten bis zu einer dreidimensionalen punktbasierten Modellierung der relevanten Fassaden aufbereitet. Das Solarpotenzial je Fassadenpunkt wurde berechnet und mit dem zugehörigen Referenzwert aus der Berechnung basierend auf amtlichen Katasterdaten verglichen. Die größten Unterschiede bei den Berechnungen bestehen in Bereichen mit hohem Vegetationsanteil. Nach dem Entfernen der abschattenden Vegetation weichen nur 11 % der Solarpotenzialwerte aus OSM-Daten um mehr als 10 % von den Referenzwerten ab, wobei der Großteil der OSM-Fassaden (ca. 85 %) ein im Mittel um 5.4 % höheres Solarpotenzial aufweist. Für diese verbleibenden Abweichungen werden hauptsächlich zwei Gründe angenommen: Durch die relativ stark vereinfachte geometrische Repräsentation der OSM-Gebäudegrundrisse werden Eigenverschattungen nicht ausreichend berücksichtigt. Zudem wirken sich die vereinfachten Dachgeometrien (LOD1) auf den Schattenwurf auf Fassaden aus. Bei der Verwendung von Solarpotenzialberechnungen aus OSM-Daten sind somit die fehlende Informationen über Vegetation und die Tendenz zur Überschätzung des Solarpotenzials zu berücksichtigen, beispielsweise über einen vom Vegetationsanteil abhängigen Korrekturfaktor. Eine Verbesserung von Solarpotenzialberechnungen mit OSM-Daten kann zudem durch eine detailreichere Erfassung der Gebäudegrundrisse erreicht werden. Freie 3D Stadtmodelle wie OSM-3D (GOETZ & ZIPF 2012) können einen wichtigen Beitrag leisten, nicht nur die Generalisierung der Gebäudegrundrisse zu vermindern, sondern auch realitätsnahe Dachgeometrien in Solarpotenzialanalysen einzubinden. Detailreiche 3D-Gebäudemodelle erlauben zudem, Fassadenelemente wie Fenster zu berücksichtigen.

Die vorgestellten Analysen zeigen, dass sich auf der Grundlage von freien Geodaten Aussagen über die räumliche Verteilung des Solarpotenzials auf Ebene eines Stadtgebietes treffen lassen. Die Verfügbarkeit der Gebäudehöhen ist dabei jedoch eine Grundvoraussetzung. Bei einer Übertragung auf andere Untersuchungsgebiete muss zudem berücksichtigt werden, dass sich die Qualität der OSM-Daten regional stark unterscheiden kann (KLON-

NER et al. 2014) und Solarpotenzialberechnungen eng an die Qualität der Eingangsdaten gekoppelt sind.

Eine detaillierte Betrachtung von Einzelgebäuden kann mit dem vorgestellten Ansatz nicht ersetzt werden. Für eine regionale Einschätzung des Solarpotenzials können freie Geodaten jedoch eine kostengünstige Ergänzung zu anderen Datensätzen darstellen. Weitere Untersuchungen sind nötig, um Ansprüche an die Daten zu formulieren und damit PV-Standortanalysen für Fassaden weiter zu verbessern.

## Danksagungen

Die Autoren danken der Stadt Bregenz, Dienststelle GIS, für die Bereitstellung der Katasterdaten sowie dem Land Vorarlberg, Landesamt für Vermessung und Geoinformation, für die Bereitstellung der ALS-Daten.

## Literatur

- BÖHME, D. & NICK-LEPTIN, J. (2013), Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung. Berlin, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- CARNEIRO, C. (2011), Extraction of urban environmental quality indicators using LiDAR-based Digital Surface Models. Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Doktorarbeit Nr. 5050).
- CERÓN, I., CAAMAÑO-MARTIN, E. & NEILA, F. J. (2013), 'State-of-the-art' of building integrated photovoltaic products. *Renewable Energy*, 58, 127-133.
- GFF (2011), Heben Sie einen verborgenen Schatz: Technikspezial Photovoltaik in der Fassade. GFF – Das Praxismagazin für Produktion und Montage, 6.
- GOETZ, M. & ZIPF, A. (2012), OpenStreetMap in 3D – Detailed Insights on the Current Situation in Germany, Agile – Avignon, April 24-27, 2012.
- HECHT, R. C., KUNZE, C. & HAHMANN, S. (2013), Measuring Completeness of Building Footprints in OpenStreetMap over Space and Time. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2, 1066-1091.
- HELBICH, M., JOCHEM, A., MÜCKE, W. & HÖFLE, B. (2013), Boosting the predictive accuracy of hedonic house price models through airborne laser scanning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 39, 81-92.
- HELMSTADT, S. (2012), Vorlage an den Verwaltungsausschuss und den Bau- und Umweltausschuss: Befliegung Solarflächenpotentiale.
- HOFIERKA, J. & SÚRI, M. (2004), A New GIS-based Solar Radiation Model and Its Application to Photovoltaic Assessments: Research Article. *Transactions in GIS*, 8 (2), 175-190.
- HOFIERKA, J. & ZLOCHA, M. (2012), A New 3-D Solar Radiation Model for 3-D City Models. *Transactions in GIS*, 16 (5), 681-690, 10.1111/j.1467-9671.2012.01337.x.
- IPSER, C., BOINTNER, R. & SIEDORF, K. (2012), Planungsleitfaden Plusenergie: Energieeffizienz und gebäudeintegrierte regenerative Energieträgertechnologien in Vorentwurf und Entwurf. Wien, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.

- ISE (2012), Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme.
- JOCHER, A., HÖFLE, B. & RUTZINGER, M. (2011), Extraction of Vertical Walls from Mobile Laser Scanning Data for Solar Potential Assessment. *Remote Sensing*, 3 (4), 650-667.
- KLONNER, C., BARRON, C., NEIS, P. & HÖFLE, B. (2014), Updating digital elevation models via change detection and fusion of human and remote sensor data in urban environments. *International Journal of Digital Earth*, 10.1080/17538947.2014.881427 (Onlineveröffentlichung am 20.02.2014).
- NEIS, P., ZIELSTRA, D. & ZIPF, A. (2012), The Street Network Evolution of Crowdsourced Maps: OpenStreetMap in Germany 2007-2011. *Future Internet*, 4, 1-21, 10.3390/fi4010001.
- NEIS, P., ZIELSTRA, & ZIPF, A. (2013), Comparison of Volunteered Geographic Information Data Contributions and Community Development for Selected World Regions. *Future Internet*, 5 (2), 282-300, 10.3390/fi5020282.
- NREL (2002), SOLPOS Documentation: Technical Report. Golden, Co, USA, Renewable Resource Data Center.
- PETERS, R. & HÖFLE, B. (2013), Solarpotenzialanalyse an vertikalen Strukturen mit ArcGIS und GRASS GIS am Beispiel von Lärmschutzwänden. *Proceedings of the Geoinformatik 2013*, 1-3.
- REDWEIK, P., CATITA, C. & BRITO, M. (2013), Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy*, 97, 332-341.
- ROICK, O., NEIS, P. & ZIPF, A. (2011), Volunteered Geographic Information – Datenqualität und Nutzungspotentiale am Beispiel von OpenStreetMap. *Symposium Königslutter 2011, Kommission „Angewandte Kartographie – Geovisualisierung“ der Deutschen Gesellschaft für Kartographie*.
- SÚRI, M., HULD, T., CEBECAUER, T. & DUNLOP, E. D. (2008), Geographic Aspects of Photovoltaics in Europe: Contribution of the PVGIS Website. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1 (1), 34-41.
- ZIELSTRA, D. & ZIPF, A. (2010), A Comparative Study of Proprietary Geodata and Volunteered Geographic Information for Germany. *Guimaraes, Portugal, 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2010*.