



Flächennutzungsmonitoring XII mit Beiträgen zum Monitoring von Ökosystemleistungen und SDGs

IÖR Schriften Band 78 · 2020

ISBN: 978-3-944101-78-1

Anwendungsszenarien von Geomassendaten zur Modellierung von Grünvolumen und Solar- flächenpotenzial

*Martin Behnisch, Markus Münzinger, Hanna Poglitsch,
Bruno Willenborg, Thomas H. Kolbe*

Behnisch, M.; Münzinger, M.; Poglitsch, H.; Willenborg, B.; Kolbe, T. H. (2020): Anwendungsszenarien von Geomassendaten zur Modellierung von Grünvolumen und Solarflächenpotenzial. In: Meinel, G.; Schumacher, U.; Behnisch, M.; Krüger, T. (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring XII mit Beiträgen zum Monitoring von Ökosystemleistungen und SDGs. Berlin: Rhombos, IÖR Schriften 78, S. 251-261.

DOI: <https://doi.org/10.26084/12dfns-p025>

Anwendungsszenarien von Geomassendaten zur Modellierung von Grünvolumen und Solarflächenpotenzial

Martin Behnisch, Markus Münzinger, Hanna Poglitsch, Bruno Willenborg, Thomas H. Kolbe

Zusammenfassung

Der Runde Tisch GIS e. V. hat im Jahr 2019 im Zuge einer Ausschreibung die Verwendung von Geomassendaten intensiv unterstützt, indem Pilotanwender aus verschiedenen Anwendungsbereichen aufgefordert wurden, auf Basis von Daten des Landesamtes für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) in Bayern mögliche Anwendungsszenarien zu skizzieren und darauf aufbauend im Rahmen einer einjährigen Projektarbeit zu untersuchen. In diesem Beitrag wird das Projekt „Solarpotenzialanalyse und Web-Visualisierung von 3D-Geomassendaten am Beispiel der Stadtregion München“ vorgestellt. Im Ergebnis wurde eine automatisierte GIS-basierte Methodik angewandt und getestet, die eine realitätsgetreue Erfassung und ein künftiges Monitoring des urbanen Grünbestandes ermöglicht. Zudem wurde ein Analysewerkzeug für die großflächige Bestimmung des Solarpotenzials für Dächer und Fassaden auf Basis von semantischen 3D-Stadtmodellen eingesetzt. Durch wiederkehrende Anwendung dieses Analysewerkzeuges können simulierte Testrechnungen aufgebaut werden, um Möglichkeiten der Zielerreichung hin zu einem klimaneutralen Energiesystem zu überprüfen. Die Ergebnisse der Grünmodellierung und der Solarpotenzialanalyse werden in einem browser-basierten 3D-Webclient visualisiert und können damit auch interaktiv betrachtet und ausgewertet werden.

Schlagnorte: Solarpotenzialanalyse, Gebäudeintegrierte Photovoltaik, Urbanes Grünmonitoring, 3D-Geomassendaten, CityGML

1 Ausgangssituation

Ein Teil der von den Landesvermessungsverwaltungen erstellten Geodatenbestände wird mit dem Begriff Geomassendaten charakterisiert, da es sich üblicherweise um große und komplexe Datenmengen handelt. Zu den Geomassendaten gehören beispielsweise die folgenden Datenprodukte: Digitale Orthophotos (z. B. DOP20 mit 20 cm Bodenaufösung), Digitale Geländemodelle mit bis zu einem Meter Auflösung (DGM1), prozessierte Laserscandaten aus Befliegungen, Digitale Oberflächenmodelle mit Farbwerten (z. B. DOM40) sowie Gebäudemodelle (LoD1, LoD2). Geomassendaten verfügen über ein großes Anwendungspotenzial und sind in Deutschland zunehmend auch

als Open Data verfügbar (z. B. in Thüringen, Nordrhein-Westfalen, Hamburg u. a.). Sie unterstützen die Möglichkeit der flächendeckenden Raumanalyse (z. B. auf städtischer Ebene), verfügen über eine Metadatenbeschreibung und unterliegen definierten Aktualisierungsroutinen. Zudem ergeben sich durch die Kombination verschiedener Geomassendaten neue Ansatzpunkte für die Analyse und Visualisierung dreidimensionaler Daten sowie zur Detektion von Veränderungen und Unterschieden (thematisch, räumlich und zeitlich). Zentrale Bedeutung erlangen in diesem Kontext auch Fernerkundungsdaten, die sowohl eine Analyse von Farbwerten als auch Reflexionen ermöglichen und wichtige Grundlagendaten für Smart City-Ansätze generieren.

Das Projekt „Solarpotenzialanalyse und Web-Visualisierung von 3D-Geomassendaten am Beispiel der Stadtregion München“ ist eines von fünfzehn Pilotprojekten, welches im Jahr 2019 vom Runden Tisch GIS e. V. zusammen mit dem LDBV ausgewählt wurde, um anhand eines Anwendungsszenarios die stärkere Nutzung von Laserscandaten, Digitalen Oberflächenmodellen und Gebäudemodellen zu befördern und künftigen Anwendungen performante und praxisorientierte Verarbeitungs-, Analyse-, und Visualisierungsmöglichkeiten vorzustellen. Der hier vorliegende Beitrag widmet sich der strukturierten und nachvollziehbaren Darstellung des Anwendungsszenarios, welches die Problematik aufgreift, dass aktuell kein Analysewerkzeug existiert, welches die Verschattung der umliegenden Bebauung, der Vegetation und des Geländes in 3D berücksichtigt. Im Ergebnis werden Nutzungsmöglichkeiten für gebäudeintegrierte Photovoltaik (BIPV) gebäudescharf modelliert und zusätzlich Anknüpfungspunkte für ein Monitoring des Grünvolumens und der Grünausstattung geschaffen.

2 Verwendete Daten

Die vorgestellte Methodik basiert auf bereits erhobenen und standardmäßig verfügbaren Geomassendaten der Landesvermessungen der Bundesländer. Die Eingangsdaten unterscheiden sich sowohl in ihrer Ausprägung als auch im Dateiformat und werden in diesem Kapitel näher charakterisiert. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verwendeten Daten.

Der Workflow ist für die flächendeckende Berechnung in größeren Analysegebieten konzipiert. Im Rahmen des Projekts wurden die Erstellung des Baummodells und die Strahlungsanalyse für das gesamte Stadtgebiet München mit einer Fläche von 310 km² durchgeführt. Aufgrund ihrer Größe werden die Eingangsdaten kachelweise abgegeben. Für München umfasst das Stadtgebiet insgesamt 383 Kacheln mit einer Gesamtgröße von 115 GB.

Zur Durchführung der Solaranalyse unter Berücksichtigung von Bäumen und dem Gelände als Verschattungsobjekten soll das bisher rein aus Gebäuden bestehende Stadtmodell mit den zusätzlichen Komponenten angereichert werden. Als Zielschema dient CityGML. Dabei handelt es sich um ein Format zur Speicherung und zum Austausch

von 3D-Stadtmodellen, bei dem neben der Geometrie auch die semantischen und topologischen Eigenschaften modelliert werden. Dadurch eignen sich 3D-Stadtmodelle im CityGML-Schema als Datenintegrationsplattform für Geoanalysewerkzeuge und sind nicht nur für Visualisierungszwecke, sondern auch für Planung und Simulation nutzbar (Kolbe 2009; OGC 2012).

Tab. 1: Eingangsdaten und ausgewählte Merkmale (Quelle: eigene Berechnungen)

Datensatz	Dateiformat	Größe einer Kachel 1 km x 1 km (Ø)	Dimension	Auflösung
3D-Gebäudemodell (LoD2)	CityGML	13 MB	3D	
DGM 1	TIFF	~1 MB	2,5D	1 m
DOP 20	TIF	65 MB	2D	0,2 m
LiDAR-Punktwolke	LAS	215 MB	3D	4 Pkt./m ²

Das Digitale Geländemodell (DGM) beschreibt die Geländeoberfläche durch ein regelmäßiges Gitter von Punkten mit dreidimensionalen Koordinatenangaben. Für München liegt ein hochaufgelöstes DGM mit einem Punktabstand von 1 m vor. Dieser Datensatz kann direkt in CityGML konvertiert und in das Stadtmodell integriert werden.

Zum urbanen Baumbestand liegen keine flächendeckenden dreidimensionalen Daten vor, weshalb aus den vorhandenen Informationen ein neuer Datensatz erzeugt wird. Als Grundlage für die Modellierung des urbanen Baummodells dient eine LiDAR-Punktwolke. LiDAR ist eine aktive Fernerkundungstechnik, bei der die Oberflächenform eines Geländes inklusive der sich darauf befindlichen Objekte abgetastet wird, indem für jeden ausgesendeten Laserpuls durch die Laufzeitmessung die Distanz vom Sensor zur Erdoberfläche gemessen wird. Mit diesem Verfahren kann die Höhe des Geländes und von Objekten auf dem Gelände erfasst werden. Gegenüber anderen Fernerkundungstechniken bieten LiDAR-Daten den Vorteil, dass durch die Fähigkeit der Strahlen durch die oberste Schicht der Baumkronen zu penetrieren die dreidimensionale Struktur des Kronendachs charakterisiert werden kann (Vauhkonen et al. 2014). In Kombination mit den spektralen Informationen aus dem Digitalen Orthophoto und dem 3D-Gebäudemodell kann der urbane Baumbestand in der Punktwolke klassifiziert und modelliert werden.

Als Digitale Orthophotos (DOP) werden entzerrte und georeferenzierte Luftbilder bezeichnet. Orthophotos werden hinsichtlich ihrer spektralen Ausprägung in Echtfarbenbilder und multispektrale Bilder eingeteilt. Echtfarbenbilder beinhalten die Kanäle Rot, Grün und Blau. Multispektrale Bilder zeichnen sich in unserem Fall durch einen zusätzlichen Infrarotkanal aus. Der Infrarotkanal hat speziell für die Berechnung von Vegetationscharakteristika wie dem „Normalized Difference Vegetation Index“ (NDVI) große Bedeutung, der die Trennung von vegetationslosen (z. B. versiegelten) und vegetationsbestandenen Flächen ermöglicht. Ein Kriterium für die Eignung von Orthophotos

ist, dass sie aus Sommerbefliegungen stammen, die Bäume also unabhängig von der Baumart belaubt sind.

3 Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zur Nutzung von Geomassendaten im Kontext der Abschätzung der urbanen Grünausstattung sowie der Quantifizierung von Nutzungspotenzialen für BIPV vorgestellt. Der vorgestellte Ansatz gliedert sich in zwei getrennt voneinander zu betrachtende Teilbereiche. Einerseits die flächendeckende Erfassung und parametrisierte Modellierung des urbanen Baumbestands auf Basis der LiDAR-Punktwolke sowie die Solarpotenzialanalyse mit semantischen 3D-Stadtmodellen.

3.1 Modellierung des urbanen Baumbestands für semantische 3D-Stadtmodelle

Die Erstellung des Baummodells ist ein Beispiel dafür, wie durch die Kombination verschiedener bereits vorhandener Datensätze ein Mehrwert geschaffen werden kann (Münzinger 2018). Ziel des vorgestellten Workflows ist es, den urbanen Baumbestand in der Punktwolke zu klassifizieren und in Einzelbäume zu segmentieren. Für die erkannten Einzelbäume werden aus der Punktwolke Parameter bestimmt, die eine realitätsnahe Modellierung ermöglichen.

Gebäude sind das prägendste Element im urbanen Raum. Durch das 3D-Gebäudemodell im Level of Detail 2 (LoD2) sind bereits Informationen über die Lage von Gebäuden sowie die Dachform und -höhe vorhanden. Durch eine Verschneidung der Punktwolke mit dem 3D-Gebäudemodell können in der Punktwolke Dachpunkte identifiziert und gefiltert werden.

Nach dem Entfernen der Gebäude enthält die Punktwolke hauptsächlich Bäume und kleinere anthropogene Objekte. Zur Trennung dieser ist die Kombination der geometrischen Informationen aus der Punktwolke mit den spektralen Merkmalen aus dem Orthophoto hilfreich. Dafür wird aus der Punktwolke das normalisierte Digitale Oberflächenmodell (nDOM) berechnet, welches die konkreten Objekthöhen enthält. Zur Berechnung des nDOM wird die Punktwolke anhand des DGM 1 normalisiert und anschließend jeder Zelle der Wert des höchsten Laserpunktes innerhalb dieser Zelle zugewiesen. Mithilfe einer Watershed-Segmentierung werden auf dem nDOM Segmente gebildet, die sich an die Baumkronenform annähern. Für diese Segmente werden verschiedene geometrische und spektrale Metriken berechnet anhand derer der urbane Baumbestand klassifiziert wird.

Voraussetzung für die realitätsgetreue Modellierung der Baumkronen ist eine erfolgreiche Segmentierung des Bestandes in einzelne Bäume. Analog zu bereits etablierten

Verfahren aus den Forstwissenschaften werden hierzu die Position und Höhe einzelner Baumspitzen detektiert und ausgehend von den ermittelten Baumspitzen anschließend die zugehörige Baumkrone abgeleitet (Koch et al. 2014).

Anhand der abgeleiteten zweidimensionalen Baumsegmente erfolgt die Klassifikation der Einzelbäume in der Punktwolke. Für die geometrische Modellierung der Bäume in CityGML werden für jeden Baum die Baumhöhe, die Stammhöhe, der Kronendurchmesser und die Lage des Baumes bestimmt. In der vorgestellten Arbeit werden die modellierten Bäume in das Stadtmodell integriert und als Verschattungsobjekte bei der Solaranalyse berücksichtigt. Die Klassifikation des urbanen Baumbestandes in der Punktwolke ermöglicht zeitgleich aber auch die Bestimmung des urbanen Grünvolumens und Aussagen zur urbanen Grünausstattung.

3.2 Cloud-basierte Solarpotenzialanalyse auf Basis von semantischen 3D-Stadtmodellen

Semantische 3D-Stadtmodelle auf Basis des OGC¹-Standards CityGML stellen eine ideale Basis für urbane Analysewerkzeuge dar. Sie bilden die geometrischen, visuellen, semantischen und topologischen Aspekte von Stadt- und Landschaftsobjekten in ein offenes Datenmodell ab, das als Basis für verschiedenste Analysewerkzeuge genutzt werden kann (Kolbe 2009; OGC 2012; Biljecki 2015). Zudem ist heute eine Reihe von Open-Source-Softwarewerkzeugen² für das Datenmanagement, die Datenhaltung und Visualisierung von CityGML-Stadtmodellen verfügbar, die die Entwicklung von Analysewerkzeugen stark vereinfachen.

Das im Projekt verwendete Analysewerkzeug berechnet die solare Einstrahlung auf Fassaden und Dächern eines LoD2-Gebäudemodells. Dabei können beliebige Features des 3D-Stadtmodells als 3D-Verschattungsobjekte in die Analyse mit einbezogen werden. In diesem Beispiel wurden die Gebäude, das Vegetationsmodell (siehe 3.1) und das umliegende Gelände berücksichtigt. Im Nahbereich wird ein hochaufgelöstes Geländemodell (DGM1) verwendet. Zur Modellierung der Verschattung durch Berg- und Tallagen in einem Umgriff von 20 km um das Untersuchungsgebiet wird ein aus dem DGM1 abgeleitetes Geländemodell mit einer Gitterweite von 25 m (DGM 25) genutzt.

In der Analyse werden die direkte und diffuse solare Einstrahlung einbezogen, die reflektierte Strahlung wird nicht berücksichtigt. Für die direkte Strahlung werden die Sonnenstände im Betrachtungszeitraum in einem stündlichen Intervall in der 3D-City-Database¹ als Punkte um das Stadtmodell herum modelliert. Für die diffuse Strahlung wird analog eine künstliche Hemisphäre aus Punkten erzeugt. Dieses Solarmodell wird anschließend mit 22-jährigen Mittelwerten der solaren Einstrahlung aus dem NASA-Projekt Surface

¹ Open Geospatial Consortium

² <https://www.3dcitydb.org>

Meteorology and Solar Energy (SSE) kalibriert, um die lokalen meteorologischen und klimatischen Gegebenheiten abzubilden. Als Berechnungsgrundlage auf den Gebäuden wird ein Raster aus Samplingpunkten erzeugt. Die Verschattungsanalyse wird auf Grundlage des Solarmodells und der Samplingpunkte in 3D mit einem Ray-Casting-Ansatz durchgeführt. Dabei bleibt die logische Verknüpfung der Samplingpunkte mit den semantischen Einheiten des Stadtmodells (Gebäude, Dach- und Wandflächen) erhalten, wodurch die Analyseergebnisse in verschiedenen Zeitschritten pro Gebäude, Wand- sowie Dachfläche aggregiert und persistent bei den zugehörigen Stadtmodellobjekten als generische Attribute gespeichert werden können. Dadurch werden Analysen auf Basis von bekannten Realweltobjekten möglich, beispielsweise pro Wandfläche, Gebäude oder Stadtviertel. Weiterhin werden aus den Ergebnissen Gebäudetexturen zur Visualisierung der Strahlungssummen erzeugt. Das Tool ist in Java implementiert und wird als Docker Image bereitgestellt, um ausreichende Skalierbarkeit für die Verarbeitung von 3D-Geomassendaten in der Cloud zu gewährleisten. Der gesamte Analyseworkflow mit den verwendeten Werkzeugen ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt (Willenborg et al. 2018; Yao et al. 2018).

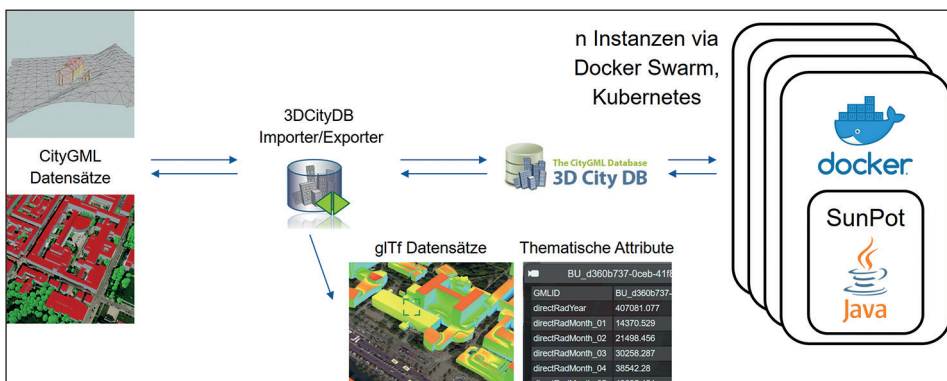


Abb. 1: Workflow der Solarpotenzialanalyse: Alle Datensätze werden in eine 3DCityDB Instanz importiert. Das Simulationstool bezieht die benötigten Daten aus dieser DB und legt die Ergebnisse dort ab. Anschließend können die Ergebnisse als CSV, CityGML-Datei, oder in verschiedene Visualisierungsformaten (kml, gITF) exportiert werden. (Quelle: eigene Bearbeitung)

4 Ausgewählte Ergebnisse

Die dargestellten Vorgehensweisen aus der Geoinformatik dienen der Modellierung der urbanen Grünausstattung – und hier insbesondere der Identifikation von sogenannten Verschattungselementen. Ferner kann das theoretische Flächenpotenzial für BIPV bestimmt werden sowie das solare Ertragspotenzial an Dächern und Fassaden quantifiziert werden.

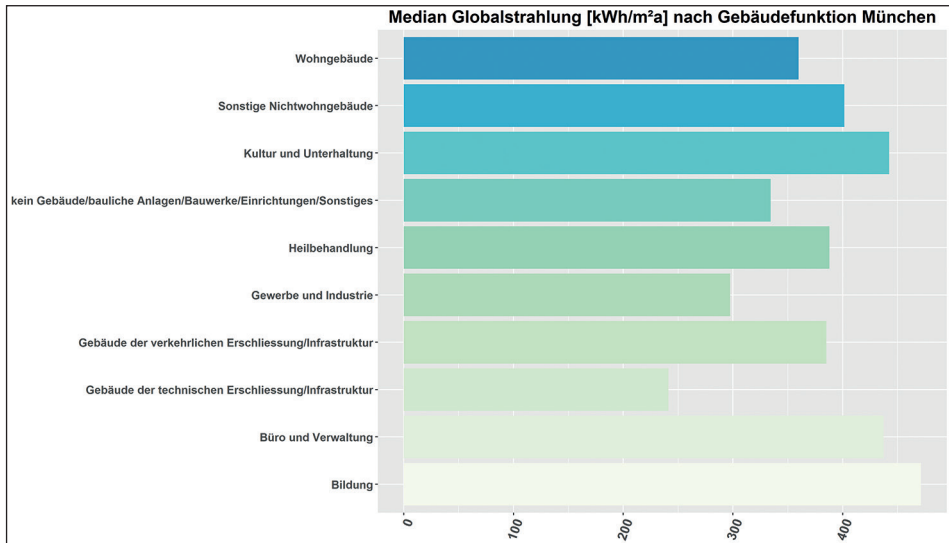


Abb. 2: Median der jährlichen BIPV-Potenziale ($\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$) für unterschiedliche Gebäudefunktionen in der Stadt München (Quelle: eigene Berechnungen)

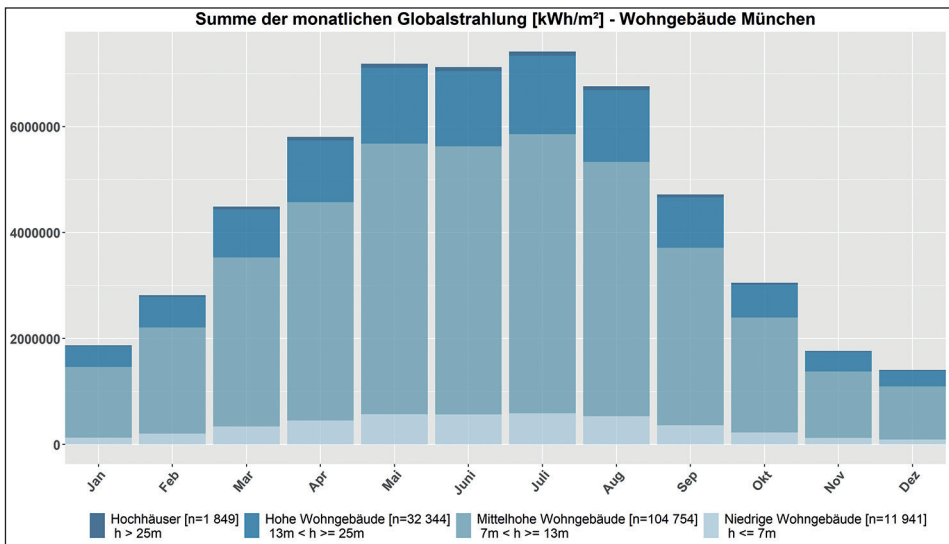


Abb. 3: Summe der monatlichen Globalstrahlung (kWh/m^2) in München differenziert nach vier Typen der Wohnbebauung (Quelle: eigene Berechnungen)

Insgesamt enthält der LoD2-Datensatz der Stadt München 321 899 Gebäudeobjekte. Aus dem erstellten Baummodell werden ca. 2,15 Mill. Verschattungsobjekte abgeleitet und bei der Solareinstrahlungsanalyse mit berücksichtigt. Die Stadt München verfügt über ein theoretisches Dachflächenpotenzial von 50,13 km^2 sowie über ein theoretisches Fassadenpotenzial von 121,97 km^2 . In Summe ergibt sich eine Gesamtpotenzialfläche

von 172,11 km². Für den gesamten Gebäudebestand beträgt das Verhältnis von Dach- zu Fassadenfläche etwa 1:2,5. Der solare Gesamtertrag beziffert sich den Berechnungen zur Folge auf 107 557 331 kWh/m²a.

Abbildung 2 illustriert die Ausdifferenzierung verschiedener Gebäudefunktionen³ in Bezug auf ihre typischen jährlichen Gesamterträge. Dargestellt ist der Median der Globalstrahlung in kWh/m²a.

Speziell große Gebäude, wie z. B. Produktionsgebäude, Hallen, Bildungseinrichtungen und Öffentliche Gebäude, eignen sich zur gebäudeintegrierten Photovoltaik sowohl in Bezug auf das theoretische Flächenpotenzial als auch in Bezug auf den modellierten solaren Gesamtertrag besonders gut.

Abbildung 3 zeigt ein Beispiel für die Darstellung der monatlichen Globalstrahlung (kWh/m²) in Bezug auf unterschiedliche Höhenklassen der Wohnbebauung. Die größten Erträge erzielen sicherlich auch anzahlbedingt mittelhohe Wohngebäude (n = 104 754). Dabei ist zu berücksichtigen, dass viele Wohngebäude in der Regel sehr individuell gestaltet sind und aufgrund von Fenster- und Türanteilen nicht über große, zusammenhängende Flächen verfügen. Von Bedeutung ist in diesem Kontext auch der Schutz hochwertiger Bestandsgebäude sowie Fragestellungen der Denkmalpflege.

5 Visualisierung mittels 3D-Webclient

Für die Visualisierung des Vegetationsmodells und der Ergebnisse der Solarpotenzialanalyse wurde der browser-basierte Open Source 3D-CityDB-Web-Map-Client genutzt. Der 3D-Webclient implementiert verschiedene Erweiterungen des virtuellen Globus CesiumJS, einer Open-Source-Software für die plattformübergreifende Visualisierung von dreidimensionalen geographischen Inhalten mit JavaScript und WebGL. Die wichtigste neue Funktionalität ist die Unterstützung und Verwaltung von konfigurierbaren Datenlayern, um Visualisierungs-Mashups zu erstellen, die aus digitalen Geländemodellen, Bilddaten sowie aus gekachelten 3D-Visualisierungsmodellen in Formaten wie KML, CZML, glTF, 3DTiles oder Punkten bestehen.

Der Nutzer kann über eine grafische Oberfläche interaktiv Layer ein- und ausblenden, hinzufügen, entfernen oder bearbeiten. Weiterhin können thematische Informationen zu den dargestellten Objekten über verschiedene Datenquellen, wie z. B. Google Spreadsheet oder PostgREST, einer REST-API-Implementierung für PostgreSQL-Datenbanken, eingebunden und bei Selektion eines Objekts in Form einer Tabelle angezeigt werden (Yao et al. 2018). Abbildung 4 zeigt eine Webclientvisualisierung mit den Ergebnissen aus diesem Projekt.

³ Gebäudefunktion werden nach ALKIS-Objektartenkatalog Bayern geführt.

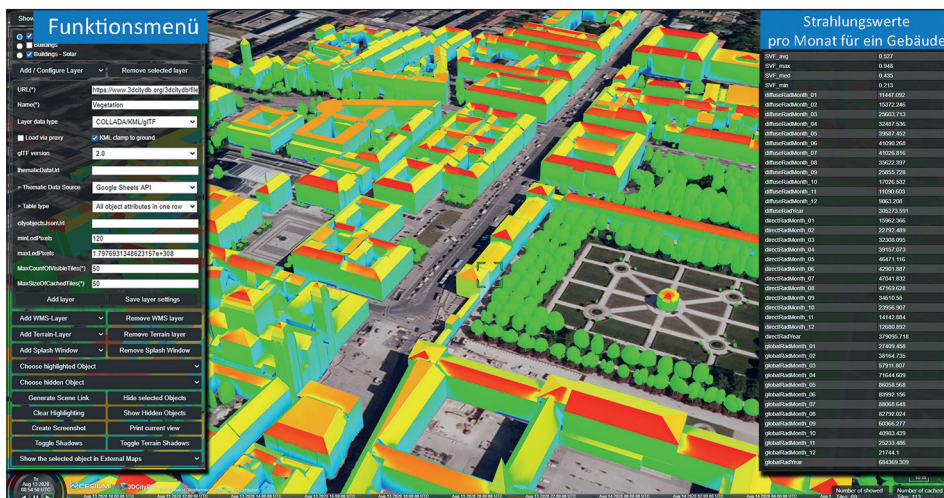


Abb. 4: Visualisierung des Vegetationsmodells und der Ergebnisse der Solarpotenzialanalyse im 3D-CityDB-Webclients vom Münchner Odeonsplatz mit Blick Richtung Norden: Die solare Einstrahlung ist als Textur auf den LoD2-Gebäuden über eine Farbskala von blau (wenig Einstrahlung) bis rot (viel Einstrahlung) dargestellt. Links im Bild ist das Funktionsmenü zu sehen, rechts ist die Tabelle mit den generischen Attributen zur solaren Einstrahlung des ausgewählten Gebäudes eingblendet. (Quelle: eigene Bearbeitung)

Es existiert weiterhin eine (noch) nicht quelloffene Version des Webclients, die interaktive, beliebig komplexe Abfragen mit diesen Sachattributen ermöglicht. So können im Browser z. B. alle Gebäude mit einer bestimmten Nutzungsart selektiert werden, die eine für PV-Module hinreichende solare Einstrahlung aufweisen.

6 Schlussfolgerungen

Durch die Verfügbarkeit von hochgenauen Geomassendaten konnte ein Vegetationsmodell und eine Solarpotenzialanalyse für das gesamte Münchner Stadtgebiet realisiert werden.

Die genutzten 3D-Daten schaffen insofern einen Mehrwert im Vergleich zu bestehenden Workflows, da diese oft mit weniger bzw. Daten von geringerer Qualität auskommen müssen. Erst die Kombination verschiedener Datensätze (Punktwolken, Luftbilder, Geländemodelle, Stadtmodelle) erlaubt die Erstellung des hier gezeigten Baummodells mit hohem Detailgrad, das hilft die Aussagekraft der Solarpotenzialanalyse zu verbessern. Durch den freien Zugang zu Geomassendaten können bestehende Analysewerkzeuge ohne zeitaufwändige Datenerfassung eingesetzt werden. Weiterhin werden durch die große räumliche Ausdehnung der Daten belastbarere Fallstudien möglich. Der Umgang mit Geomassendaten birgt allerdings auch große Herausforderungen, insbesondere was die Gestaltung von Workflows und die Skalierbarkeit von einzelnen Anwendungen

angeht. Teilweise waren sehr umfangreiche, zeitaufwändige Anpassungen an Workflows und Softwarewerkzeugen notwendig, um die automatisierte und performante Verarbeitung der großen Datenmengen umzusetzen. Einen wesentlichen Beitrag bei der Realisierung von skalierbaren Lösungen können Cloudtechnologien, wie z. B. Softwarecontainer, leisten.

Bei der Bewertung der aus der Solarpotenzialanalyse abgeleiteten exemplarischen Kennziffern ist zu berücksichtigen, dass der LoD2-Datensatz weder Informationen zur Fassadengestaltung enthält noch Dachfenster oder Auskragungen wie Dachüberstände modelliert. Durch Abschlagsrechnungen mittels bereits erprobter Kennziffern lassen sich in Zukunft weitere Annäherungen an die tatsächlich verfügbare Fläche, die tatsächliche Modulfläche, das Ertragspotenzial, den erzielbaren elektrischen Jahresenergieertrag sowie die jährliche Volllaststundenzahl realisieren (Eggers et al. 2020). Detailanalysen zum solaren Ertrag sind für spezifische Wand- als auch Fassadenflächen vorstellbar, aber auch für Teilmengen des Gebäudebestands (z. B. nach Gebäudefunktion oder nach morphologischen Eigenschaften). Darüber hinaus lassen sich die bauteilbezogenen Erträge für spezifische Himmelsausrichtungen auswerten. Sogenannte Crowd-Sourcing-Ansätze (Howe 2010) könnten zusätzlich helfen, um durch Auswertung von umfangreichem Bildmaterial neue Kennziffern zur Ausgestaltung von Fassaden und Dächern zu gewinnen.

Auf Basis der Berechnungen für die Stadt München zeigt sich nach erster Einschätzung ein enormes Potenzial für die gebäudeintegrierte Photovoltaik, um auf lokaler Ebene entscheidende Beiträge hin zu einem zukünftigen klimaneutralen Energiesystem zu leisten. Um die Zielerreichung einem Monitoring zu unterziehen, bedarf es künftig der Auswahl geeigneter Indikatoren und Messgrößen. In Bezug auf das erstellte Vegetationsmodell ergeben sich aus Sicht der Autoren verschiedene Verwertungsmöglichkeiten. Sei es, um die urbane Grünausstattung innerhalb einer Stadt wiederkehrend zu beobachten und zu bewerten (z. B. Ableitung von Messgrößen zum urbanen Grünvolumen oder der Grünerreichbarkeit), oder um Städte in ihrer Grünausstattung untereinander zu vergleichen. Darüber hinaus wäre zu prüfen, inwieweit das hier vorgestellte Vegetationsmodell geeignet ist, um stadtklimatische Untersuchungen oder Untersuchungen zur Lärmausbreitung in Städten zu qualifizieren. Es ergeben sich darauf aufbauend weitere Anknüpfungspunkte für die räumliche Planung, die digitale Umweltplanung, den Aufbau von urbanen Simulationsmodellen sowie für die Unterstützung von raumbezogenen Transformationsansätzen.

7 Literatur

- Biljecki, F.; Stoter, J.; Ledoux, H.; Zlatanova, S.; Cöltekin, A. (2015): Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4): 2842-2889.
- Eggers, J.-B.; Behnisch, M.; Eisenlohr, J.; Poglitsch, H.; Phung, W. F.; Münzinger, M.; Ferrara, C.; Kuhn, T. E. (2020): PV-Ausbauerfordernisse versus Gebäudepotenzial: Ergebnis einer gebäudescharfen Analyse für ganz Deutschland. Eingereichter Konferenzbeitrag zum PV-Symposium 2020 (im Druck).
- Howe, J. (2010): Weblog von Jeff Howe. <http://crowdsourcing.typepad.com/>
- Koch, B.; Kattenborn, T.; Straub, C.; Vauhkonen, J. (2014). Segmentation of Forest to Tree Objects. In Maltamo, M.; Næsset, E.; Vauhkonen, J. (Hrsg.): *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning*, Bd. 27: 89-112. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8663-8_5
- Kolbe, T. H. (2009): Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. In: Lee, J.; Zlatanova, S. (eds): *3D Geo-Information Sciences, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, Berlin Heidelberg: Springer: 15-31.
- Münzinger, M. (2018): Erkennung und parametrisierte Modellierung des urbanen Baumbestandes aus LIDAR-Punktwolken zur Integration in 3D-Stadtmodellen im CityGML-Schema. Masterarbeit an der Fakultät Umweltwissenschaften, Professur für Kartographische Kommunikation, Technische Universität Dresden.
- OGC – Open Geospatial Consortium (2012): Open Geospatial Consortium. City Geography Markup Language (CityGML). Encoding Standard 2.0. <https://www.ogc.org/standards/citygml> (Zugriff: 19.08.2020).
- Vauhkonen, J.; Maltamo, M.; McRoberts, R. E.; Næsset, E. (2014). Introduction to Forestry Applications of Airborne Laser Scanning. In Maltamo, M.; Næsset, E.; Vauhkonen, J. (Hrsg.): *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning*, Bd. 27: 1-16. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8663-8_1
- Willenborg, B.; Sindram, M.; Kolbe, T. H. (2017): Applications of 3D City Models for a better Understanding of the Built Environment. In: Behnisch, M.; Meinel, G. (eds): *Trends in Spatial Analysis and Modelling, Geotechnologies and the Environment*, Berlin, Heidelberg: Springer International Publishing: 167-191.
- Yao, Z.; Nagel, C.; Kunde, F.; Hudra, G.; Willkomm, P.; Donaubaue, A.; Adolphi, T.; Kolbe, T. H. (2018): 3DCityDB – a 3D Geodatabase Solution for the Management, Analysis, and Visualization of Semantic 3D City Models based on CityGML. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3 (5): 1-26.

Förderhinweis

Die vorgestellten Ergebnisse und Vorgehensweisen stehen in engem Kontext zum Förderprojekt „Standard-BIPV“, Förderkennzeichen 0324063, vom BMWi gefördert.