

Solarpotenzialanalyse und Web-Visualisierung von 3D-Geomassendaten am Beispiel der Stadtregion München

Antragsteller / Projektverantwortlicher / Kontaktperson

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung
Forschungsbereich 'Monitoring der Siedlungs- und Freiraumentwicklung'
Weberplatz 1, 01217 Dresden, Tel. +49.351.4679.0

Projektverantwortlicher:

Dr. Martin Behnisch

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung
Forschungsbereich 'Monitoring der Siedlungs- und Freiraumentwicklung'
Weberplatz 1, 01217 Dresden, m.behnisch@ioer.de, +49.351.4679.260

Technologieprovider / Dienstleister

Prof. Dr. Thomas Kolbe

Technische Universität München
Lehrstuhl für Geoinformatik
Arcisstraße 21, 80333 München, thomas.kolbe@tum.de, +49.89.289.23888

Projektteam

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung Forschungsbereich 'Monitoring der Siedlungs- und Freiraumentwicklung'

Dr. Martin Behnisch, m.behnisch@ioer.de, +49.351.4679.260

Markus Münzinger, m.muenzinger@ioer.de, +49.351.4679.249

Hanna Poglitsch, h.poglitsch@ioer.de

Technische Universität München Lehrstuhl für Geoinformatik

Thomas H. Kolbe, thomas.kolbe@tum.de, +49.89.289.22578

Bruno Willenborg, b.willenborg@tum.de, +49.89.289.22973

Ausgangssituation / Anwendungsszenario (Kurzbeschreibung)

Das Ziel der Bundesregierung – Klimaneutralität des Gebäudebestands bis zum Jahr 2050 – erfordert den verstärkten Ausbau der erneuerbaren Energien. Bauwerksintegrierte Photovoltaik (BIPV) ist vielversprechend, um die direkte Energieversorgung an Gebäuden zu gewährleisten [1, 2, 3].

Entwickelt und erprobt wird ein Untersuchungsansatz zur Analyse und Visualisierung von Geomassendaten (Gebäude und Vegetationselemente) im Kontext der Quantifizierung von Nutzungspotentialen für BIPV.

Hauptziel des Anwendungsszenarios ist eine Solarpotenzialanalyse und Web-Visualisierung der Ergebnisse (3D-Gebäudedaten, angereichert mit den Ergebnissen der Solarpotenzialanalyse). Das Anwendungsszenario greift die Problematik auf, dass aktuell kein Analysewerkzeug existiert, welches die Verschattung der umliegenden Bebauung, der Vegetation und des Geländes in 3D berücksichtigt.

Das Projekt “Solarpotenzialanalyse und Web-Visualisierung von 3D-Geomassendaten am Beispiel der Stadtregion München” impliziert die Untersuchung von Gebäude- und Fassadenmerkmalen im Zusammenhang mit ihrer Eignung für BIPV. In einer detaillierten Analyse wird das standortspezifische PV-Potenzial der Dach- und Fassadenflächen unter Berücksichtigung von Sonneneinstrahlung und Verschattung durch Gebäude oder Stadtgrün abgeschätzt. Modellierungen des solaren Ertragspotentials sind geeignet, um in Bezug auf Lage, lokale Verschattungssituation und räumliche Umgebung die Eignung von Fassaden- und Dachflächen für bauwerksintegrierte Photovoltaik zu erörtern.

Es wird eine automatisierte GIS-basierte Methodik entwickelt, implementiert und getestet. Zu Visualisierungszwecken werden weiterhin die texturierten CityGML-Gebäude, sowie weitere Objektarten (z.B. Vegetation, DGM) im glTF-Format bereitgestellt.

Im Fokus steht die Erfassung des Flächenpotentials von Gebäudefassaden in Bezug auf die Eignung für BIPV und die Abschätzung der Möglichkeit zur solaren Energiegewinnung an Fassaden (vgl. [4]). Während viele Städte das Potential von Gebäudedächern zur solaren Energiegewinnung bereits in Solarkatastern führen und damit Anreize zur Installation von PV-Modulen schaffen, waren Gebäudefassaden bisher kaum adressiert. Die flächendeckende Verfügbarkeit von dreidimensionalen Daten zum Gebäudebestand ermöglicht es, analog zum Potential der Dachflächen, nun auch Gebäudefassaden in Bezug auf ihre Eignung für BIPV einzuschätzen und damit die vertikale Stadt als solare Energiequelle perspektivisch stärker zu nutzen. Weiterer Vorteil eines jeden installierten Photovoltaik-Moduls an einer Hausfassade besteht darin Natur und kostbaren Boden zu schonen, indem der Bau flächenintensiver Solarparks verhindert wird.

Verwendete Daten

Der für das Anwendungsszenario entwickelte 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 (siehe vertiefend zur Methodik [5]).

Verwendet wurden die Originaldaten des LDBV. Aufgrund ihrer Größe werden die Eingangsdaten kachelweise abgegeben. Diese Kachelung wurde für eine effiziente Prozessierung beibehalten. Das Stadtgebiet München umfasst 383 Kacheln, die insgesamt eine Größe von 115 GB haben.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verwendeten Eingangsdaten. Die LiDAR-Punktwolke dient als Grundlage für die Erstellung des Baummodells, mit dem das 3D-Gebäudemodell zur Berücksichtigung der Verschattung durch Vegetation angereichert wird.

Tab. 1: Eingangsdaten und ausgewählte Merkmale.

Datensatz	Dateiformat	Größe einer Kachel 1 km x 1 km (Ø)	Dimension	Auflösung
3D-Gebäudemodell (LoD2)	CityGML	0 – 70 MB	3D	
DGM 1	TIFF	1,4 MB	2,5D	1 m
DOP (RGBI)	TIF	65 MB	2D	20 cm
LiDAR-Punktwolke	LAS	215 MB	3D	4 Pkt./m ²

•

Verwendete Software / Voraussetzungen

Das vorgestellte Anwendungsszenario gliedert sich in zwei Teilbereiche die getrennt voneinander zu betrachten sind und für die verschiedene Software genutzt wurde. Einerseits die Modellierung des urbanen Baumbestandes zur Anreicherung des 3D-Stadtmodells sowie die Solarpotentialanalyse auf dem semantischen 3D-Stadtmodell. Für die Prozessierung der LiDAR-Punktwolke und Kombination der dreidimensionalen Punktwolken mit dem Orthophoto zur Identifikation des urbanen Baumbestandes wurden Funktionalitäten der freien Softwareumgebung R in Verbindung mit ArcGIS genutzt. Die Modellierung der Bäume im CityGML-Schema anhand der aus der Punktwolke abgeleiteten Parameter erfolgt durch die Software FME. Die Umsetzung erfolgt auf einer Windows Arbeitsumgebung mit x64-basiertem 3,50GHz Prozessor und 64 GB Arbeitsspeicher.

Für die Solarpotentialanalyse wird eine in Java geschriebene Software des Lehrstuhls für Geoinformatik der Technischen Universität München eingesetzt (siehe vertiefend [6, 7]). Für die Verwaltung der Stadtmodellldaten während der Analyse und die Erzeugung von 3D-Visualisierungsmodellen wird die Open Source 3D City Database (3DCityDB) und der 3DCityDB Importer/Exporter genutzt. Alle Softwarekomponenten werden in Docker Containern bereitgestellt, was die Skalierung der Anwendung in der Cloud ermöglicht. Für die Berechnungen im Rahmen des Projekts wurde ein Rechencluster am Lehrstuhl für Geoinformatik aus derzeit ungenutzten Rechnern aus Computerräumen aufgebaut, das insgesamt ca. 130 CPU Kerne auf über 10 Rechnern mit Docker Swarm verwaltet.

Vorgehen / Umsetzung

Für die flächendeckende Erfassung und parametrisierte Modellierung des urbanen Baumbestands auf Basis der LiDAR-Punktwolke wird zunächst der urbane Baumbestand in der Punktwolke klassifiziert und in Einzelbäume segmentiert. Für die erkannten Einzelbäume werden aus der Punktwolke Parameter bestimmt, die eine realitätsnahe Modellierung ermöglichen. Der Workflow basiert auf einer Kombination der verschiedenen, bereits vorhandenen Datensätze.

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 und mit Hilfe einer Watershed-Segmentierung werden auf dem nDOM Segmente gebildet, die sich an die Baumkronenform annähern. Für diese Segmente werden unter Einbeziehung des DOP verschiedene geometrische und spektrale Metriken berechnet anhand derer der urbane Baumbestand klassifiziert wird.

Zur Segmentierung des klassifizierten Bestandes werden auf dem nDOM die Position und Höhe einzelner Baumspitzen detektiert und ausgehend von den ermittelten Baumspitzen anschließend die zugehörige Baumkrone abgeleitet. 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.

Das im Projekt verwendete Werkzeug für die Solarpotentialanalyse berechnet die solare Einstrahlung auf Fassaden und Dächern eines Level of Detail 2 (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 oben beschriebene Vegetationsmodell und ein hochaufgelöstes Geländemodell (DGM 1) im Nahbereich, sowie das DGM 25 zur Berücksichtigung der Verschattung durch Berg- und Tallagen in einem Umgriff von 20 km um das Untersuchungsgebiet berücksichtigt.

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-Database 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 Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) Projekt 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- oder Dachfläche aggregiert und persistent bei den zugehörigen Stadtmodellobjekten als generische Attribute gespeichert werden können. Dadurch werden Analysen auf Basis von bekannten Realweltobjekten wie z.B. pro Wandfläche, Gebäude oder Stadtviertel möglich. 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 Abb. 1 schematisch dargestellt.

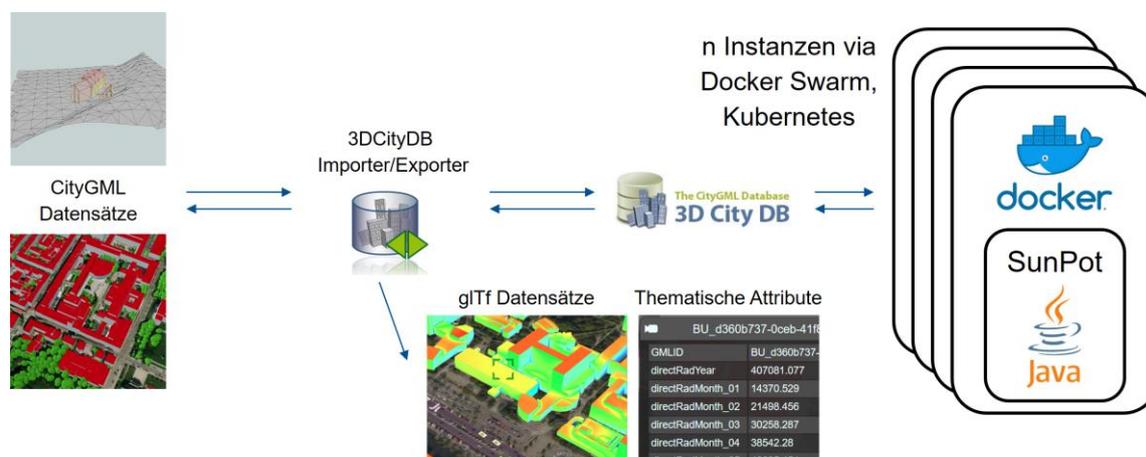


Abb. 1: Workflow der Solarpotentialanalyse: Alle Datensätze werden in eine 3DCityDB Instanz importiert. Das Simulationstool bezieht die benötigten Daten aus dieser DB und legt die Ergebnisse dort ab. Anschließend können die Ergebnisse als CSV, CityGML-Datei, oder in verschiedene Visualisierungsformaten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

Für die Durchführung der Berechnungen wurde ein eignes Rechencluster am Lehrstuhl für Geoinformatik aufgesetzt. Da aufgrund der Corona Pandemie die Rechner in den Computerräumen während der Projektlaufzeit ungenutzt waren, konnten diese Rechenkapazitäten für das Projekt verwendet werden. Insgesamt wurden auf diese Weise über 10 Rechner mit mehr als 130 CPU Kernen zusammengeschlossen. Zur Verwaltung des Clusters wurde Docker Swarm eingesetzt.

Ergebnis

Durch die flächendeckende Verfügbarkeit von hochgenauen Geomassendaten konnten das Vegetationsmodell und die Solarpotentialanalyse für das gesamte Münchner Stadtgebiet realisiert werden.

Es wurde eine automatisierte GIS-basierte Methodik angewandt und getestet, welche die flächendeckende Erfassung und parametrisierte Modellierung des urbanen Baumbestands auf Basis der LiDAR-Punktwolke ermöglicht. Die Bäume werden als Geometrien in das Stadtmodell in CityGML integriert, wobei jeder Baum mit der ermittelten Baumhöhe, dem Kronendurchmesser und seiner jeweiligen Position modelliert ist.

Die Ergebnisse der Grünmodellierung wurden im Anschluss in die Solarpotentialanalyse integriert, wodurch die Genauigkeit des Werkzeugs besonders auf Fassaden stark verbessert werden konnte. Abb. 2 zeigt eine Visualisierung der Ergebnisse. In Bild (d) wurden die Vegetationsobjekte ausgeblendet, wodurch der große Einfluss der Vegetationsobjekte auf die solare Einstrahlung besonders auf Fassaden aber auch überkronte Dachbereiche sichtbar wird. Eine genaue Quantifizierung des Einflusses des Vegetationsmodells auf die Analyseergebnisse ist Stand Fertigstellung dieses Berichts als weitere Folgearbeit geplant.

Durch die Umgestaltung des Analysewerkzeugs für die Cloud und die Verteilung der Simulation auf die Rechner des Clusters war es möglich die Simulationsdauer stark zu reduzieren. Das gesamte Münchner Stadtgebiet konnte mit dem oben beschriebenen Cluster in ca. 5 Tagen berechnet werden. Wie stark die Anwendung durch die Vergrößerung des Clusters weiter skaliert werden kann, muss noch genauer erforscht werden. Die Performancesteigerungen ermöglichen eine wiederkehrende Anwendung des Analysewerkzeugs zur Auswertung von verschiedenen Berechnungsszenarien. So können in Zukunft

simulierte Testrechnungen aufgebaut werden, um z.B. verschiedene Planungsalternativen hin zu einem klimaneutralen Energiesystem zu überprüfen.

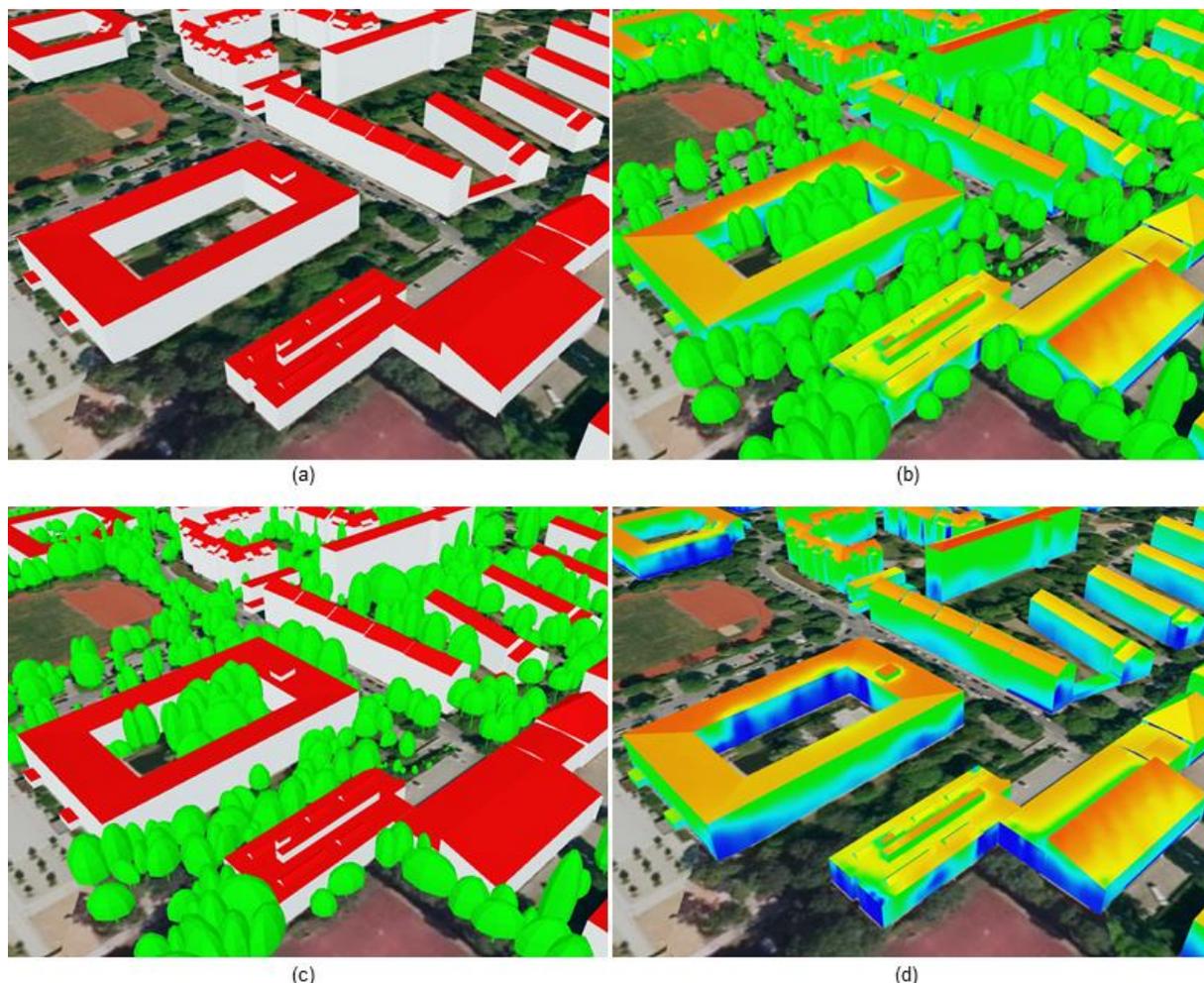


Abb. 2: Darstellung der Ergebnisse der Grünmodellierung und der Solarpotentialanalyse im 3D-Webclient. Bild (a) zeigt das LoD2-Gebäudemodell ohne Texturen, Bild (b) zeigt das Gebäudemodell Solartexturen (blau bis rot = wenig bis viel solare Einstrahlung) und Vegetation, Bild (c) zeigt das untexturierte Gebäudemodell mit Vegetation. Bild (d) zeigt das Gebäudemodell mit Solartexturen bei ausgeblendeter Vegetation. Die von der Vegetation verschatteten Fassadenbereiche sind deutlich zu erkennen.

Für die Visualisierung des Vegetationsmodells und der Ergebnisse der Solarpotentialanalyse 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 3D-Geographie 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. Abb. 3 zeigt einen Screenshot des 3D-Webclient vom Münchner Odeonsplatz. Durch Bereitstellung der Ergebnisse über einen Webbrowser können die Ergebnisse einfach einem großen Publikum zur Verfügung gestellt und interaktiv betrachtet und ausgewertet werden. Der 3D-Webclient

Projekt des Runden Tisch GIS e.V. zur Unterstützung der Verwendung von Geomassendaten durch Pilotanwender aus verschiedenen Anwendungsbereichen

zum Projekt ist [hier](https://bit.ly/3pre9H1) (<https://bit.ly/3pre9H1>) abrufbar. Für die beste Performance sollte der GoogleChrome Webbrowser verwendet werden.

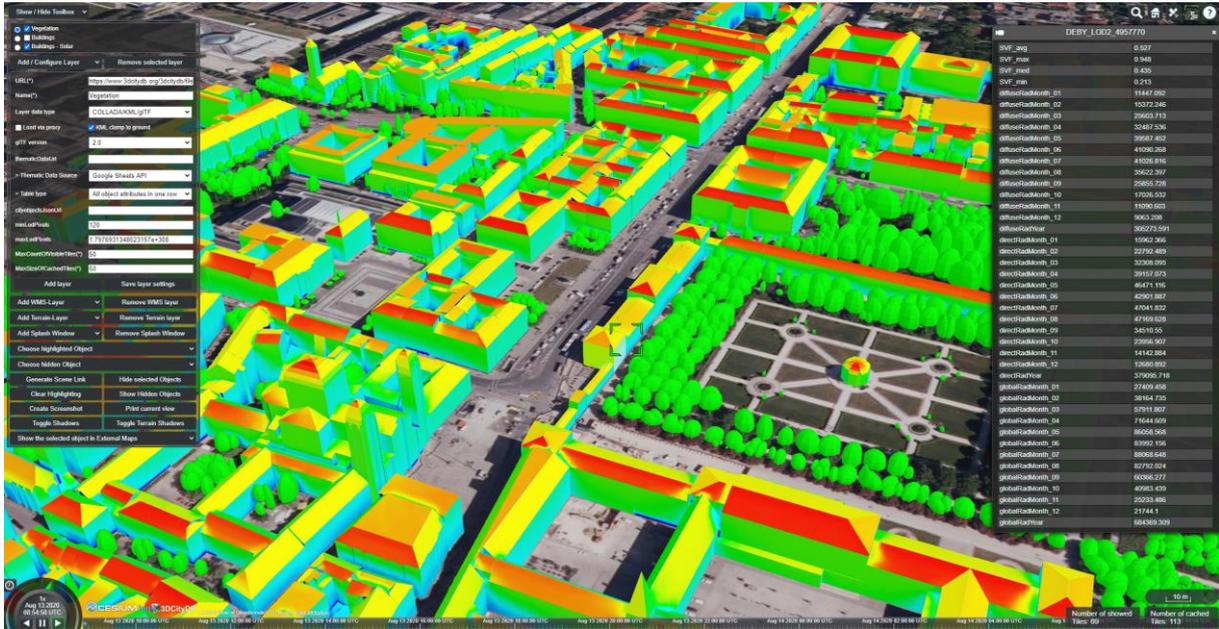


Abb. 3: Visualisierung des Vegetationsmodells und der Ergebnisse der Solarpotentialanalyse im 3D-CityDB-Webclients vom Münchner Odeonsplatz mit Blick Richtung Norden: Die solare Einstrahlung ist als Textur auf den LoD2-Gebäuden über eine Farbskala von blau (wenig Einstrahlung) bis rot (viel Einstrahlung)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

Auf Basis der Berechnungen für die Stadt München zeigt sich nach erster Einschätzung ein enormes Potenzial für die bauwerksintegrierte Photovoltaik an, um auf lokaler Ebene entscheidende Beiträge hin zu einem zukünftigen klimaneutralen Energiesystem zu leisten.

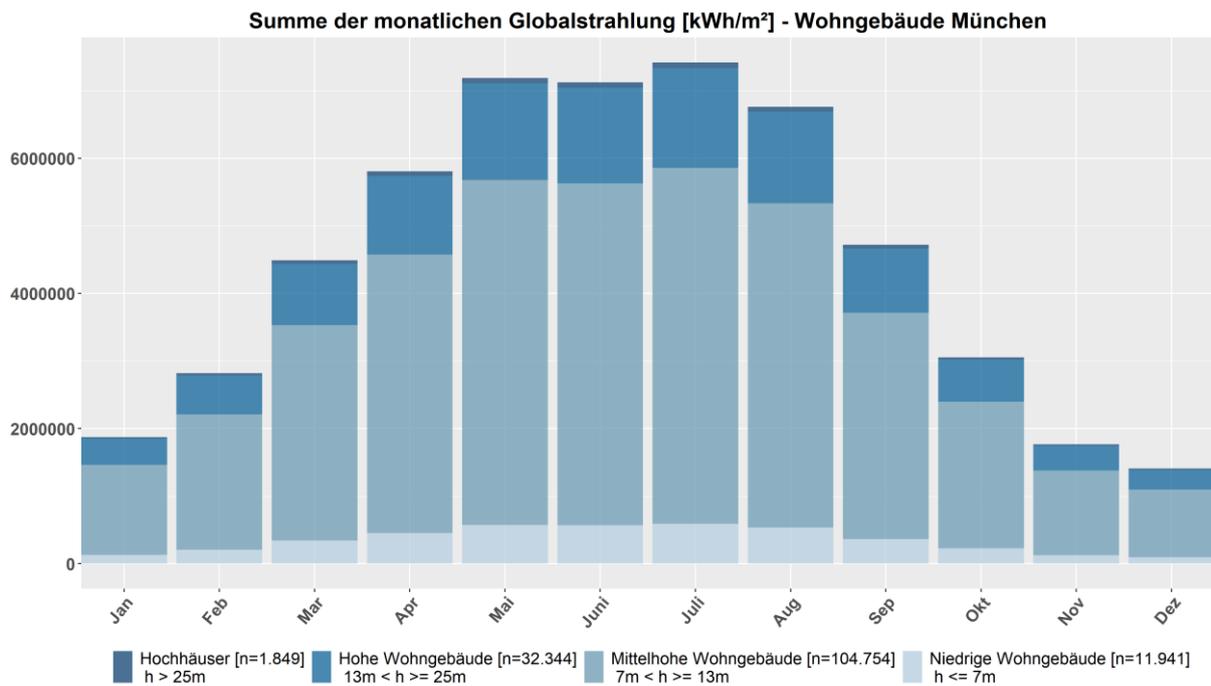


Abb. 4: Summe der monatlichen Globalstrahlung [kWh/m²] in München differenziert nach vier Typen der Wohnbebauung. (Quelle: Eigene Berechnung)

Auf Basis des browser-basierten 3D-Webclients bieten sich Möglichkeiten zur Interaktion im Rahmen von gesellschaftlichen Partizipationsprozessen. Anhand von lokalisierten

Gebäudeeigenschaften und modellierten Solarpotentialen könnte die Bereitschaft und Motivation für die Anwendung von BIPV im Speziellen und die Mitgestaltung der Energiewende im Allgemeinen gestärkt werden.

Bewertung / Erfahrungen

Im Rahmen des Projekts ist es gelungen, ein Analysewerkzeug einzusetzen welches eine Solarpotenzialanalyse unter Berücksichtigung der Verschattung durch umliegende Bebauung, der Vegetation und des Geländes in 3D ermöglicht. Eine Besonderheit ist dabei die Nutzung eines semantischen 3D-Stadtmodells als Analysegrundlage (siehe auch [8]). Dies ermöglicht die Berechnung der Einstrahlung auf Gebäudefassaden, die im Anwendungsszenario von besonderer Bedeutung sind und nachfolgend die getrennte Analyse von Dach- und Fassadenflächen.

Damit erfüllt das Ergebnis die eingangs formulierten Erwartungen. Die vom LDBV zur Verfügung gestellten 3D-Daten sind dabei nicht nur elementar für die vorgestellte Analyse, sondern sie 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 Baumodells mit hohem Detailgrad und die Umsetzung der facettenreichen Solarpotentialanalysen. Dadurch bietet die Verfügbarkeit von Geomassendaten einen großen Mehrwert.

Zudem wird durch das Anwendungsszenario aufgezeigt, wie sich 3D-Stadtmodelle im CityGML-Schema als Datenintegrationsplattform für Geoanalysewerkzeuge eignen. Vor dem eigentlichen Analyseverfahren werden alle benötigten Eingangsdaten in das Stadtmodell integriert. Das Analysewerkzeug speichert anschließend seine Ergebnisse persistent bei den zugehörigen Realweltobjekten im Stadtmodell. So können die Ergebnisse einerseits für verschiedene räumliche (Fassade, Dach, Gebäude, Stadtteil, Stadt, ...) und zeitliche (Monat, Jahr) Skalenebenen aggregiert werden. Andererseits, stehen die Ergebnisse so für weiterführende Analysen auf Basis derselben Realweltobjekte zur Verfügung. Soll z.B. eine Wärmebedarfsschätzung oder eine Stadtklimasimulation mit den gleichen Gebäuden durchgeführt werden, müssen die Ergebnisse der Solarpotentialanalyse lediglich aus dem Stadtmodell abgefragt werden.

Der Umgang mit Geomassendaten stellt allerdings auch große Herausforderungen an die Gestaltung der Workflows und die Skalierbarkeit der einzelnen Anwendungen. Teilweise waren sehr umfangreiche, zeitaufwändige Anpassungen für die Erstellung der Analysen notwendig. Da die Geomassendaten von den einzelnen Landesvermessungen unter Einhaltung derselben Standards erstellt werden sind die erstellten Workflows auf andere Untersuchungsgebiete übertragbar. Der Umstand der nahezu deutschlandweiten Anwendbarkeit (vergleichbare Datengrundlage in den Bundesländern) der entwickelten Workflows rechtfertigt allerdings aus Sicht des Projektteams den vergleichsweise hohen Zeitaufwand bei der Entwicklung.

Für die Datenprozessierung konnte auf bereits genutzte Arbeitsumgebungen zurückgegriffen werden. Zudem sind sowohl die Statistiksoftware R als auch die 3DCityDB quelloffen, was für neue Anwender den Einstieg ohne Paywall in Form von Lizenzgebühren stark erleichtert. Zudem bietet die aktive Open Source Community rund um die 3DCityDB gute Dokumentationen und Support für viele Arbeitsschritte.

Eine wichtige Erfahrung aus dem Projekt ist, dass durch den Einsatz von Cloudtechnologie die für die Verarbeitung von Geomassendaten notwendige Skalierbarkeit gewährleistet werden kann. Für die Cloudfähigkeit der Anwendung wurden alle Softwarekomponenten in Docker Container transferiert und in einem Docker Swarm Cluster ausgerollt. Die dadurch notwendige

Umgestaltung der Anwendung zum parallelen Betrieb in verteilten Systemen waren aufwändig, der Aufwand ist allerdings durch die stark verbesserte Performance mehr als gerechtfertigt.

In Bezug auf das erstellte Vegetationsmodell ergeben sich verschiedene Verwertungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel stadtklimatische Untersuchungen, Untersuchungen zur Lärmausbreitung oder Ansätze um die urbane Grünausstattung innerhalb einer Stadt wiederkehrend zu beobachten und zu bewerten. Hierzu ist eine regelmäßige Datenaktualisierung von großer Relevanz. Die wiederkehrende Anwendung der entwickelten Verfahren auf aktualisierte Daten ermöglicht schließlich die Vergleichbarkeit zu verschiedenen Zeitpunkten und damit ein raumbezogenes Monitoring.

Literatur

- [1] Henning, H.-M.; Palzer, A.: Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. Freiburg, 2015.
- [2] 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. Tagungsbeitrag zum 35. PV-Symposium 2020.
- [3] Sterchele, P.; Brandes, J.; Heilig, J.; Wrede, D.; Kost, C.; Schlegl, T.; Bett, A.; Henning, H.-M.: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem: Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Freiburg, 02.2020.
- [4] Poglitsch, Hanna; Hartmann, André; Schwarz, Steffen; Hecht, Robert; Eisenlohr, Johannes; Ferrara, Claudio; Behnisch, Martin: Eine Frage des Flächensparens: Wo können eine Milliarde Photovoltaik-Module in Deutschland installiert werden?, Bd. 76. In: Gotthard Meinel, Ulrich Schumacher, Martin Behnisch, Tobias Krüger (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring X : Flächenpolitik – Flächenmanagement – Indikatoren. Berlin : Rhombos-Verlag, 2018 (IÖR-Schriften, Band 76), S. 133–143.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.