

# Das 3D-Stadtmodell Wiens als Datenquelle für die Ermittlung des Primärenergiebedarfs von Wohngebäuden

## *The 3D City Model of Vienna as Data Source for Determination of Primary Energy Demand of Residential Buildings*

Giorgio Agugiaro<sup>1</sup>, Bernhard Skarbal<sup>1</sup>, Jan Peters-Anders<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Smart Cities and Regions Research Field, Center for Energy, Austrian Institute of Technology, Wien · giorgio.agugiaro@ait.ac.at

**Zusammenfassung:** Dieser Artikel beschreibt eine Methode zur Berechnung von Primärenergiebedarfswerten für Wohngebäude in der Stadt Wien und einige der zugrunde liegenden Gebäuderenovierungsszenarien. Ausgehend von einem CityGML-basierten 3D-Stadtmodell und gemäß der Richtlinie 6 des Österreichischen Instituts für Bautechnik wurden für jedes Gebäude unterschiedliche Energiekennzahlen berechnet. Sämtliche Ergebnisse und Szenarien können nun anhand verschiedener 3D-Visualisierungsmöglichkeiten abgefragt werden. In diesem Artikel werden die Schritte, die zur Entwicklung der Methode nötig waren, beschrieben, deren Ergebnisse dargestellt und die geplanten Verbesserungen diskutiert.

**Schlüsselwörter:** Semantische 3D-Stadtmodelle, CityGML, Energie, Stadtplanung

**Abstract:** *This article deals with the estimation of the primary energy demand for residential buildings in the city of Vienna, as well as the definition of some refurbishment scenarios. Several energy and energy-related parameters were obtained based on the guidelines issued by the Austrian Institute of Construction Engineering and starting from a CityGML-based semantic 3D city model. Results and the refurbishment scenarios are visualised in 3D using different solutions. The article describes all relevant steps implemented so far, presents the results and discusses planned enhancements and future steps.*

**Keywords:** *Semantic 3D city modelling, CityGML, energy, urban planning*

## 1 Motivation und Stand der Technik

Eine der vielen existierenden Definitionen des Begriffs Smart City fordert, dass die (nachhaltige) Entwicklung einer Smart City durch wirtschaftliche und gesellschaftliche Exzellenz auf allen Ebenen geprägt sein sollte (zu diesen Ebenen zählen z. B. Mobilität, Umwelt, Verwaltung, Gesundheit, Wohnen und Energie), welche die Lebensqualität aller in ihr lebenden Bürger verbessert. Eine solche Exzellenz kann jedoch nur durch Integration von Humanressourcen, Sozialkapital und IKT-Infrastruktur erreicht werden, was schlussendlich zu einem besseren Stadtinfrastrukturmanagement, einer Verbesserung der städtischen Dienstleistungen für die Bürger, sowie zu einer Minimierung der Kosten und Ressourcenaufwendungen führt.

Im Kontext der oben erwähnten Themenfelder konzentriert sich dieser Artikel auf den Teilaspekt *Energie*, der vor allem im Zusammenhang mit der Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in Fragen der Mobilität, der Nutzung erneuerbarer Energien oder auch bei der Renovierung existierender Bausubstanz eine bedeutsame Rolle spielt (da der Gebäudeenergieverbrauch –

bei Weitem – den größten Anteil am Gesamtenergieverbrauch einer Stadt darstellt, ist eine genaue (d. h. ortsbezogene) Kenntnis über den jetzigen und künftigen Energiebedarf dieser Gebäude im Rahmen urbaner Energieplanung von größter Bedeutung (Reinhart & Davila, 2016). Weltweit kommen seit einigen Jahren in diesem Zusammenhang immer öfter semantische 3D-Stadtmodelle zum Einsatz, wobei sie in unterschiedlichsten Disziplinen eingesetzt werden: In der Stadtplanung, zur Lärmkartierung, zur Erstellung von *Augmented-Reality*-Anwendungen bis hin zur Durchführung von Energiesimulationen (Kaden & Kolbe, 2013; Schiefelbein et al., 2015; Agugiaro, 2016a).

Das hierzu verwendete (Daten)Format CityGML ist ein internationaler Informations- und Datenmodell Standard für semantische Stadtmodelle. Mit CityGML können beliebige Stadtobjekte auf verschiedenen Skalen (vom Gebäudeinnenraum bis zur ganzen Stadt) dargestellt werden (Gröger & Plümer, 2012). Durch sogenannte *Application Domain Extensions* (ADE) kann CityGML beliebig erweitert werden. Zum Beispiel wird derzeit für Energiezwecke sehr aktiv eine Energy ADE entwickelt (Brenner et al., 2016; Cipriano et al., 2017). Diese Energy ADE ist so konzipiert, dass sie alle Anforderungen einer Datenmodellierung für energierelevante Objekte und Attribute abdeckt (Energy-ADE, 2017).

Dieser Artikel baut auf den Arbeiten von Agugiaro & Möller (2016) auf. In diesen wurden die ersten Ergebnisse in Bezug auf die Berechnung des Heizwärmebedarfs (HWB) für Wohngebäude präsentiert. Der Rechenansatz beruht zum einen auf der geltenden Richtlinie 6 des Österreichischen Instituts für Bautechnik (OIB) und zum anderen auf einem CityGML-basierten 3D-Stadtmodell. Für die Berechnung des HWB wurden die Inputdaten größtenteils direkt aus dem 3D-Stadtmodell extrahiert. Wo dies nicht möglich war, wurde auf existierende Parameter-Bibliotheken zurückgegriffen. Als Testareal wurde ein Teil des 12. Wiener Gemeindebezirk (Meidling) ausgewählt, in dem ungefähr 800 Gebäude, darunter ca. 560 Wohngebäude, verortet sind. Für jedes Wohngebäude wurde der HWB auf Jahres- und Monatsbasis ermittelt. Die Einbettung der Ergebnisse in das 3D-Stadtmodell bietet den weiteren Vorteil, dass die Ergebnisse somit für darauf aufbauende Analysen und Applikationen zu Verfügung stehen, wie z. B. die Möglichkeit, flächendeckende Energie-Karten zu erstellen oder verschiedene Szenarien zu berechnen.

Dieser Artikel baut direkt auf der oben erwähnten Methodik auf. Aus den bereits berechneten HWB-Werten wurden weitere Energiekennzahlen ermittelt. Auch in diesem Falle wurden die Inputdaten größtenteils direkt aus dem semantischen 3D-Stadtmodell extrahiert. Außerdem wurde die Methodik vom ursprünglichen Testareal auf den gesamten 12. Wiener Gemeindebezirk ausgedehnt, der ca. 7.400 Gebäude, darunter ca. 5.600 Wohngebäude, umfasst. Unterschiedliche 3D-Visualisierungsmöglichkeiten (in Google Earth und in Cesium WebGL Globe) wurden getestet, um die Ergebnisse und die Szenarien sowohl lokal (am Desktop) als auch im Internet abzufragen und zu präsentieren.

Der Artikel ist folgendermaßen strukturiert: Kapitel 2 enthält eine kurze Beschreibung des 3D-Stadtmodells und der enthaltenen Daten. Kapitel 3 erläutert die Methodik zur Berechnung der verschiedenen Energiekennzahlen, Kapitel 4 beschreibt die Visualisierungsmöglichkeiten. Abschließend werden im Kapitel 5 die Schlussfolgerungen und die nächsten geplanten Schritte und Verbesserungen diskutiert.

## 2 Das 3D-Stadtmodell

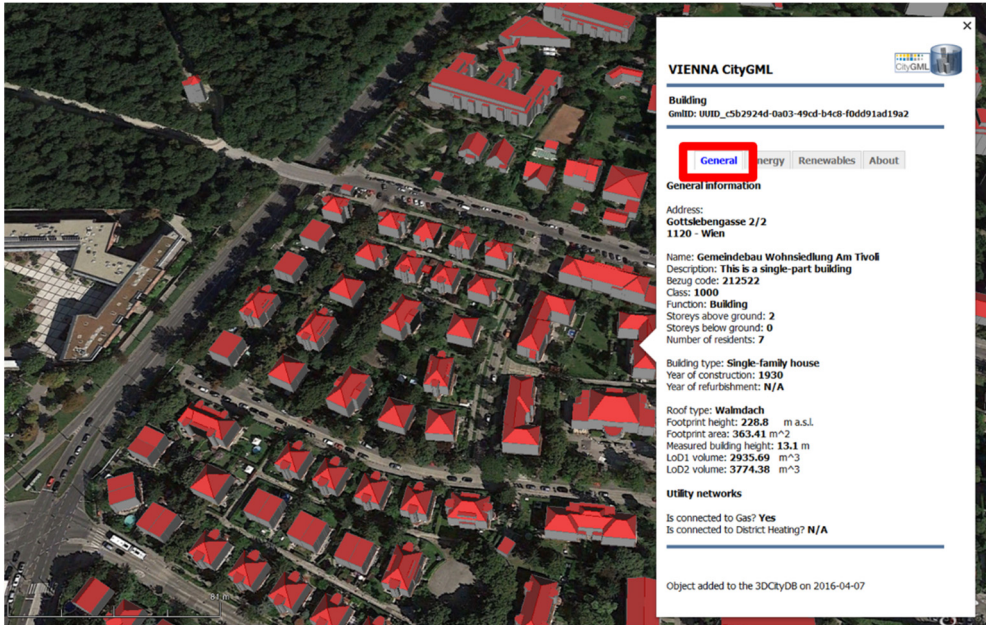
Der 12. Wiener Gemeindebezirk Meidling wurde wegen seiner Heterogenität in Form, Struktur und Charakteristik als Testareal zur Generierung des semantischen 3D-Stadtmodells ausgewählt. Der Gemeindebezirk umfasst eine Fläche von ca. 8,2 km<sup>2</sup> und ist ein dicht bewohntes Gebiet mit ca. 90.000 Einwohnern. In Meidling befinden sich ca. 7.400 Gebäude, die starke Unterschiede in Bezug auf Größe, Typologie und Nutzung aufweisen.

Seit 2015 werden zahlreiche, unterschiedliche Datensätze zusammengetragen und integriert. Alle Datensätze sind entweder bereits als Open Government Data (OGD) verfügbar oder wurden von der Stadt Wien freundlicherweise zu Verfügung gestellt. Eine detaillierte Beschreibung der für die Generierung des 3D-Stadtmodells notwendigen Datenintegration- und Harmonisierungsprozeduren würde den Rahmen dieses Artikels sprengen. Daher werden hier anschließend nur die relevantesten Eigenschaften aufgeführt. Weiterführende Informationen sind Agugiaro (2016b) und Agugiaro (2016c) zu entnehmen, während in Agugiaro & Möller (2016) eine ausführliche Auflistung und Beschreibung der energierelevanten Datensätze zu finden ist. Das 3D-Stadtmodell basiert auf CityGML 2.0 und wurde durch die Freie und Open-Source-3DCityDB-Software in eine PostgreSQL/PostGIS-Datenbank importiert. Diese wurde außerdem durch eine Implementierung der Energy ADE erweitert, um energiespezifische Entitäten und Attribute speichern zu können. Derzeit sind im 3D-Stadtmodell alle oberirdischen Gebäude, die Gas- und Fernwärmeversorgungsnetze, alle im Baumkataster enthaltenen Bäume modelliert und integriert.

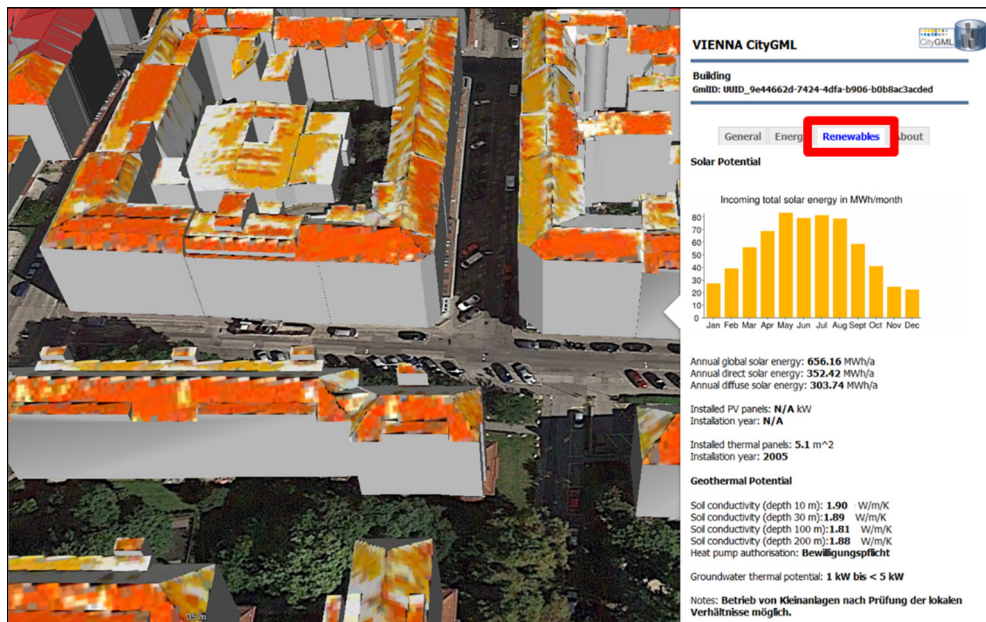
Die Gebäude sind in verschiedenen Levels of Detail (LoD) modelliert, welche den LoD0, LoD1 und LoD2 in CityGML entsprechen. Für jedes Gebäude sind außerdem zahlreiche Attribute vorhanden, wie z. B.:

- Name und Adresse des Gebäudes; Nutzung des Gebäudes; Baujahr;
- Anzahl der ober- und unterirdischen Geschossen; Gebäudehöhe; Bruttovolumen, Grundrissfläche;
- Anzahl der angemeldeten Einwohner;
- Summe aller Nettogeschossflächen, Summe aller konditionierten Nettogeschossflächen gemäß Adress-, Gebäude- und Wohnungsregister (AGWR);
- Vorhandensein und Eigenschaften von installierten Solar- und PV-Anlagen;
- Monats- und Jahres-Solareinstrahlungswerte auf Dächer, sowie der potenzielle Energieertrag für Solar- und PV-Anlagen; Eignung der Dachflächen zur Installation von Solar- und PV-Anlagen;
- Informationen über die Anbindung zu Gas- und Fernwärmeversorgungsnetzen;
- Jahres- und Monatswerte des Heizwärmebedarfs.

Des Weiteren wurden alle Gebäudedächer mit unterschiedlichen Texturen versehen, die dem Solarkataster oder den Orthophotos entnommen wurden. Letztere können bei der visuellen Kontrolle eines Gebäudes im Falle von bewohnten (d. h. beheizten) Dachgeschossen helfen. Die Abbildungen 1 und 2 stellen zwei Beispiele dar, wie die 3D-Stadtmodellobjekte und die entsprechenden Attribute visualisiert bzw. abgefragt werden können.



**Abb. 1:** 3D-Visualisierung der 3D-Stadtmodells Wiens mittels LoD2-Geometrien und einiger Gebäudeattribute



**Abb. 2:** 3D-Visualisierung der mit dem Solarkataster texturierten Dachgeometrien und einiger Gebäudeattribute im Bereich der erneuerbaren Energien

### 3 Berechnung der Energiekennzahlen und CO<sub>2</sub>-Emissionen

Während der Heizwärmebedarf Auskunft über die thermische Qualität eines Gebäudes gibt, sind für die Ermittlung des Endenergiebedarfs darüber hinaus die Form der Energiebereitstellung sowie das Nutzerverhalten zu berücksichtigen. Für den Großteil der betrachteten Wohngebäude ist bekannt, ob diese mit Erdgas oder Fernwärme beheizt werden. Für die verbleibenden Wohngebäude, für die kein Energieträger bekannt ist, wird in einem ersten Ansatz eine Versorgung durch Erdgas angenommen. Ausgehend vom Heizwärmebedarf und dem Warmwasserwärmebedarf wurden mittels der nach Energieträgern differenzierten Energieaufwandszahlen die jeweiligen Endenergiebedarfswerte ermittelt. Unter Hinzunahme des Haushaltsstrombedarfs wurden über die Primärenergiefaktoren und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren je Energieträger entsprechend OIB-Richtlinie 6 jeweils der Primärenergiebedarf (nicht erneuerbar, erneuerbar, gesamt), sowie die aus dem Energieeinsatz resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen berechnet.

Die Energiekennzahlen liegen durch die Berücksichtigung der jeweiligen Heizgradtagessummen und unterschiedlichen solaren Einstrahlungswerte somit nicht nur als Jahressumme, sondern auch monatlich vor. Dies ermöglicht die Darstellung der Energiekennzahlen über den Jahresverlauf und eine Differenzierung in Heiz- (Sichtbarwerden des Effekts der Gebäudehüllensanierung; geringer Ertrag durch Photovoltaik und Solarthermie) und Sommersaison (hohe urbane erneuerbare Energiebereitstellung durch Photovoltaik und Solarthermie) sowie die Gegenüberstellung von Bedarf und dezentraler Erzeugung (z. B. Deckung des Warmwasserwärmebedarfs durch Solarthermie über die Sommermonate) und der daraus erzielten Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen.

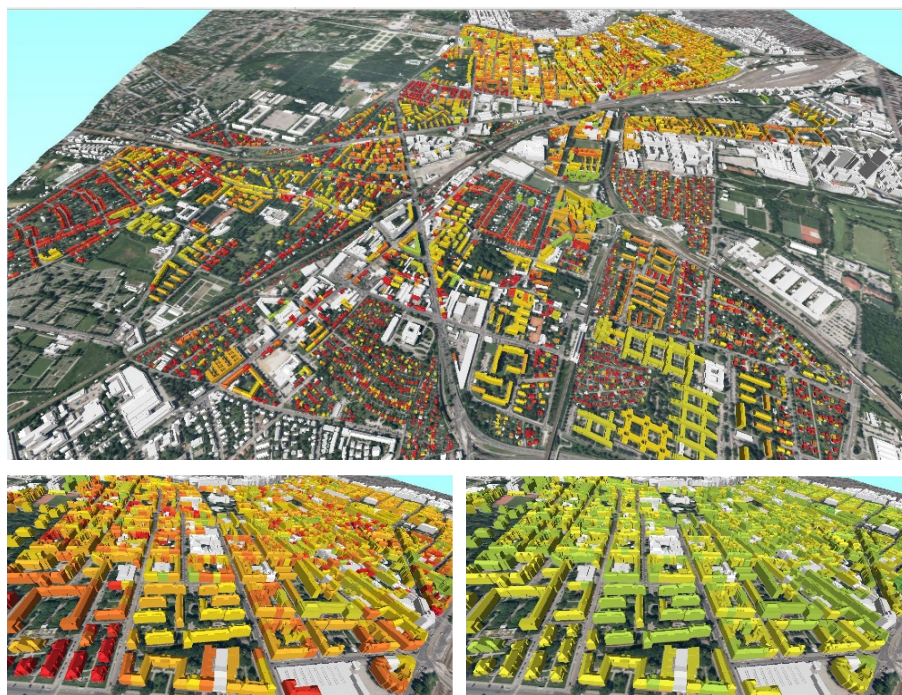


**Abb. 3:** 3D-Visualisierung von gebäudescharfen Energiekennzahlen, sowie Vergleich des Status quo mit einem Sanierungsszenario

Innerhalb dieses ersten Ansatzes wurden neben dem Basisszenario (Status quo) mithilfe zusätzlicher Annahmen und Kennzahlen aus der Literatur vier weitere Szenarien berechnet.

Die aktuellen Szenarien beschäftigen sich mit den Themen Energiebedarfsreduktion (thermisch-energetische Sanierung der Gebäudehülle), thermische sowie elektrische urbane erneuerbare Energiebereitstellung (Photovoltaik, Solarthermie), als auch Mischformen (Sanierung der Gebäudehülle in Kombination mit Photovoltaik).

Um von wirtschaftlich betreibbaren Anlagen auszugehen wird für das Solarthermie-Szenario von Anlagen mit einem jährlichen solaren Deckungsgrad für die Warmwasserbereitung von 50-60 % für Einfamilienhäuser und 30-40 % im Geschosswohnbau ausgegangen, mit einer bis zu 100%igen Deckung des Warmwasserwärmebedarfs im Sommer für Einfamilienhäuser. Für das Photovoltaik-Szenario wurden entsprechend dem Solarpotenzialkataster die geeigneten Dachflächen berücksichtigt.

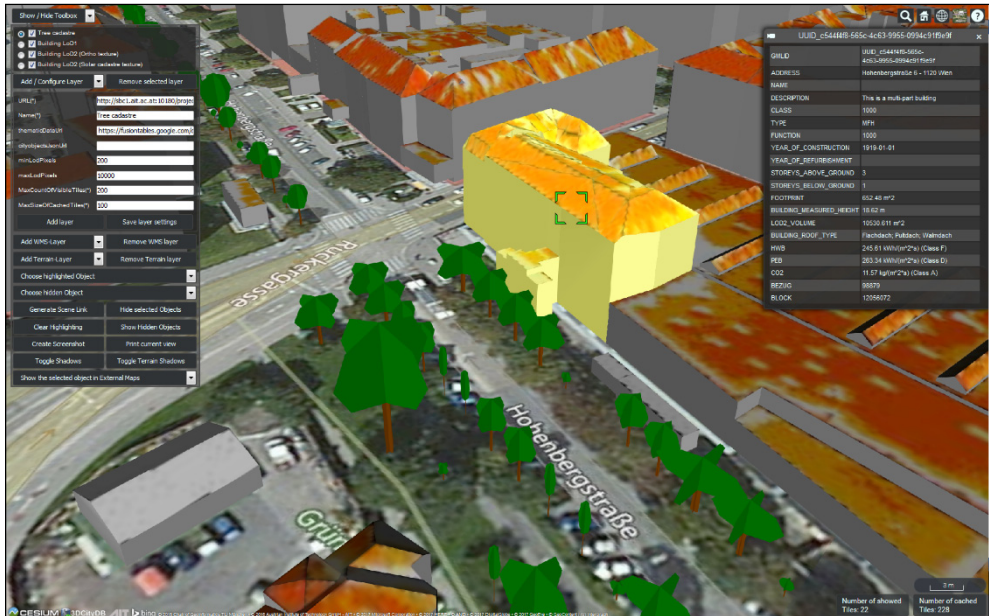


**Abb. 4:** [Oben] 3D-Visualisierung des ermittelten jährlichen flächenspezifischen Gesamtprimärenergiebedarfs für alle Wohngebäude im 12. Wiener Gemeindebezirk. Die Farben entsprechen den in der OIB-Richtlinie 6 vorgesehenen Energie-Klassen. [Unten] Detailansicht analoger Werte wie in Abbildung 4 für den Istzustand (links) und im Falle einer Sanierung der Gebäudehülle (rechts).

Beispiele für die Darstellung von gebäudescharfen Energiekennzahlen, sowie ein visueller Vergleich zwischen dem Istzustand und einem Sanierungsszenario sind in Abbildung 3 zu sehen. Abbildung 4 zeigt den flächenspezifischen Gesamtprimärenergiebedarf aller Wohngebäude des 12. Wiener Gemeindebezirks, klassifiziert entsprechend der in der OIB-Richt-

linie 6 vorgesehenen Energie-Klassen, sowie zwei Detailansichten, wo die Unterschiede zwischen Istzustand und einem Renovierungsszenario (Sanierung der Gebäudehülle) anhand einer 3D-Visualisierung verglichen werden.

## 4 3D-Visualisierung



**Abb. 5:** Webbasierte 3D-Visualisierung des 3D-Stadtmodells mittels Cesium. Sämtliche Stadtobjekte (z. B. Gebäude, Bäume, usw.) können abgefragt und ihre Attribute visualisiert werden.

Die im 3D-Stadtmodell enthaltenen oben erwähnten Daten wurden für die Darstellung in einem webbasierten Map Client aufbereitet, welcher auf der Cesium-Plattform basiert und in erster Linie von der TU München (Yao et al., 2016) entwickelt und als *Freie* und *Open-Source*-Software veröffentlicht wurde (3DCityDB-Web-Map-Client 2017).

Cesium (Kurzform von: *Cesium WebGL Virtual Globe and Map*) ist eine JavaScript-Bibliothek, die es ermöglicht – ohne Installation zusätzlicher Software (wie z. B. Google Earth) oder jeglicher Browser-Plug-ins – 3D-Daten direkt im Browser darzustellen, wobei die Bibliothek direkt auf die 3D-Funktionalitäten der Grafikkarte zurückgreift, was ein natives Rendering der 3D-Daten und damit eine äußerst gute Performance der Darstellung ermöglicht.

Um die Daten in Cesium darstellen zu können, wurden diese mithilfe des 3DCityDB-Exporters aus der Datenbank in sogenannte glTF (GL Transmission Format) Tiles exportiert. In einem nächsten Schritt wurden die glTF-Dateien dann mittels der glTF-Pipeline (Gltf-Pipeline 2017) in binäre glB-Dateien umgewandelt, um die Darstellungperformance im Browser noch weiter zu optimieren, indem die Ladezeiten verkürzt werden. Der Web-Map-Client er-

möglicht es anschließend, die exportierten Tiles mittels eines URL-Links in einem Konfigurationsfenster des Viewers einzubinden, wie in Abbildung 5 zu sehen ist (Fenster am linken Bildrand). Der Web-Map-Client ermöglicht es darüber hinaus, Attribute zu den dargestellten 3D-Objekten von einer Google Fusion Tabelle mittels einer Web-Query abzufragen und sie dann in einem weiteren Fenster darzustellen (Abb. 5, Fenster am rechten Bildrand).

Für den 12. Wiener Gemeindebezirk kann die Applikation unter folgendem Link abgerufen werden: <http://sbc1.ait.ac.at:10180/projects/meidling/cesium/webmap/index.html>.

## 5 Diskussion

In diesem Artikel wurden die Ergebnisse in Bezug auf die Weiterentwicklung und Implementierung von softwarebasierten Werkzeugen zur Berechnung des Primärenergiebedarfs, sowie anderer energierelevanter Parameter für Wohngebäude präsentiert.

Der Rechenansatz beruht zum einem auf der geltenden Richtlinie 6 des Österreichischen Instituts für Bautechnik (OIB) und zum anderen auf einem semantischen 3D-Stadtmodell. Letzteres basiert auf dem CityGML-Standard und wurde durch die *Energy Application Domain Extension* (ADE) erweitert.

Für die Berechnung des Primärenergiebedarfs wurden die Inputdaten größtenteils direkt aus dem 3D-Stadtmodell extrahiert. Wenn dies nicht möglich war, wurde auf existierende Parameter-Bibliotheken zurückgegriffen. Als Testareal wurde der gesamte 12. Wiener Gemeindebezirk, Meidling, ausgewählt. Dieser umfasst ca. 7.400 Gebäude, darunter ca. 5.600 Wohngebäude.

Ausgehend von dem bereits berechneten Heizwärmebedarf wurden für jedes Wohngebäude zusätzlich folgende Werte auf Monats- und Jahresbasis ermittelt: Warmwasserwärmebedarf, Heizenergiebedarf, Haushaltsstrombedarf, Endenergiebedarf, Primärenergiebedarf (erneuerbar, nicht erneuerbar, gesamt) und CO<sub>2</sub>-Emissionen, sowie je nach Szenario die dezentrale Energiebereitstellung durch Photovoltaik und Solarthermie. Die Kennzahlen lassen sich jeweils auf ihre Verursacher (Heizen, Warmwasserbereitung, Strombedarf) zurückführen. Die Anwendung eines semantischen 3D-Stadtmodells hat sich bewährt, um relevante Gebäudeparameter ermitteln zu können und die Anzahl der Annahmen zu reduzieren, die zur Ermittlung der Energiekennzahlen notwendig sind.

Einige Verbesserungen der Methodik sind bereits vorgesehen. Unter anderem ist geplant, den Ansatz auch auf Nicht-Wohngebäude zu erweitern und eine feinere Detailstufe für Gebäude mit Mischnutzung zu verwenden. Obwohl das Ziel dieser Arbeit in einem ersten Schritt die Weiterentwicklung und Implementierung der Methodik zum Ermitteln der Energiekennzahlen in Kombination mit einem semantischen 3D-Stadtmodell war, bleibt als weiterer wichtiger Punkt für zukünftige Arbeiten, diese zu kalibrieren. Ein direkter Ansatz dazu besteht zum Beispiel darin, die Ergebnisse mit den vorhandenen Energieausweisen einer ausgewählten Anzahl von Gebäuden oder mit realen Verbrauchsdaten zu vergleichen (zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Artikels waren noch keine Datenquellen von Seiten der Stadt Wien zur Verfügung gestellt worden). Erfahrungen mit anderen europäischen Städten haben jedoch gezeigt, dass eine Abweichung von bis zu  $\pm 30\%$  zwischen den Schätzwerten und den Energieausweisen zu erwarten ist (Nouvel et al., 2017). Falls keine Energieausweise oder Verbrauchsdaten zur Verfügung stehen, besteht eine Alternative darin, Ergebnisse zu vergleichen,



die mit ähnlichen Software-Tools zur Berechnung von Energieausweisen verwendet wurden, wie dies beispielsweise von Monien et al. (2017) vorgeschlagen wird.

Im Bereich der 3D-Visualisierung sind weitere Tests geplant, zum einen um die Performance der Darstellung im Browser zu steigern, zum anderen um die Darstellung mithilfe dynamischer Einfärbung der 3D-Flächen bzw. durch Signaturen zu verbessern. Des Weiteren wird an einer Schnittstelle gearbeitet, die es zukünftig ermöglichen soll, die Attribute im Web-Map-Client nicht nur abzufragen, sondern auch zu editieren, damit eventuelle Fehler oder leere Felder von einem (berechtigten) Anwender in der Datenbank direkt aus dem GUI heraus ausgebessert oder ergänzt werden können. Hierdurch wird eine integrierte IKT-Plattform entstehen, die einerseits die zentrale Verwaltung von Stadtdaten und andererseits die Anbindung von weiteren Applikationen ermöglichen soll.

## Danksagung

Die in diesem Artikel beschriebene Arbeit wurde zum Teil im Rahmen des europäischen FP7-PEOPLE-2013 Marie Curie Initial Training Network Projekts „CI-ENERGY“ (Grant Agreement Number 606851) [Ci-nergy 2017] durchgeführt.

Die Tests im Bereich der webbasierten 3D-Visualisierung mittels Cesium wurden im Rahmen des Projekts „IntegrCiTy“ (Projektnummer 855078) [IntegrCiTy 2017] durchgeführt, das im Rahmen des Programms ENERGIE DER ZUKUNFT / Programmlinie JPI Urban Europe im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) gefördert wird.

Besonderer Dank geht an Sebastian Möller für seine Unterstützung in den ersten Phasen dieser Arbeit und an Klaus Steinnocher für die Hinweise bei der Verfassung des Manuskripts.

Wie im Punkt 2 bereits erwähnt, wurden einige der verwendeten Datensätze freundlicherweise von der Stadt Wien zu Verfügung gestellt. Die Autoren bedanken sich dafür insbesondere bei den Magistratsabteilungen (MA): MA14 (Informations- und Kommunikationstechnologie), MA19 (Architektur und Stadtgestaltung), MA20 (Energieplanung), MA23 (Wirtschaft, Arbeit und Statistik) und MA41 (Stadtvermessung).

## Literatur

- 3DCityDB-Web-Map-Client. Retrieved Mar 31, 2017, from <https://github.com/3dcitydb/3dcitydb-web-map>.
- Aguiaro, G. (2016a). Energy planning tools and CityGML-based 3D virtual city models. Experiences from Trento (Italy). *Applied Geomatics*, 8(1), 41–56.  
doi:10.1007/s12518-015-0163-2.
- Aguiaro, G. (2016b). First steps towards an integrated CityGML-based 3D model of Vienna. *ISPRS Ann. of the Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, III-4, 139–146.  
doi:10.5194/isprs-annals-III-4-139-2016.
- Aguiaro, G. (2016c). Enabling “energy-awareness” in the semantic 3D city model of Vienna. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV-4/W1, 81–88.  
doi:10.5194/isprs-annals-IV-4-W1-81-201.

- Agugiaro, G., & Möller, S. (2016). Gebäudescharfe Schätzung des Heizwärmebedarfs anhand des semantischen 3D-Stadtmodells Wiens. *AGIT – Journal für Angewandte Geoinformatik*, 2-2016, 124–133. doi:10.14627/537622018.
- Benner, J., Geiger, A., & Häfele, K-H (2016). Virtual 3D city model support for energy demand simulations on city level – The CityGML energy extension. *Proc. of 21<sup>st</sup> Int. Conf. on Urban Planning, Regional Development and Information Society (REAL CORP 2016)* (pp. 777-786).
- Ci-nergy. Retrieved Mar 31, 2017, from <http://ci-nergy.eu>.
- Cipriano, P., Agugiaro, G., Nouvel, R., & Benner, J. (2017). The CityGML Energy Application Domain Extension (ADE) for energy analyses at urban scale. *Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions (SSPCR 2017)*, March 22-24, Bolzano/Bozen, Italy.
- Energy-ADE. Retrieved Mar 31, 2017, from <http://en.wiki.energy.sig3d.org>.
- Gröger, G., & Plümer, L. (2012). CityGML – Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71, 12–33.
- Gltf-Pipeline. Retrieved Mar 31, 2017, from <https://github.com/AnalyticalGraphicsInc/gltf-pipeline>.
- IntrgrCiTy. Retrieved Mar 31, 2017, from <http://integrcity.epfl.ch>.
- Kaden, R., & Kolbe, T. H. (2013). City-wide total energy demand estimation of buildings using semantic 3D city models and statistical data. *Ann. of the Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-2/W1, 163–171.
- Monien, D., Strzalka, A., Koukofikis, A., Coors, V., & Eicker, U. (2017). Comparison of building modelling assumptions and methods for urban scale heat demand forecasting. *Future Cities and Environment*, 3(1), 2.
- Nouvel, R., Brassel, K-H, Bruse, M., Duminiel, E., Coors, V., Eicker, U., & Robinson, D. (2015). SimStadt, A new workflow-driven urban energy simulation platform for CityGML city models. *Proc. of CISBAT 2015*.
- Nouvel, R., Zirak, M., Coors, V., & Eicker, U. (2017). The influence of data quality on urban heating demand modeling using 3D city models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64 (2017), 68–80.
- Reinhart, C. F. & Davila, C. C. (2016). Urban building energy modeling – A review of a nascent field. *Build. Environ.* 97, 196–202.
- Schiefelbein, J., Javadi, A., Lauster, M., Remmen, P., Streblow, R., & Müller, D. (2015). Development of a City information model to support data management and analysis of building energy systems withing complex city districts. *Int. Conf. Future Buildings and Districts – Sustainability from Nano to Urban Scale*, 949–954.
- Yao, Z., Chaturvedi, K., & Kolbe, T. H. (2016). Browserbasierte Visualisierung großer 3D-Stadtmodelle durch Erweiterung des Cesium Web Globe. In: T. H. Kolbe et al. (Eds), *Geoinformationssysteme 2016* (pp. 77–90). Berlin/Offenbach: Wichmann.