
ENEKA Energie & Karten GmbH, Rostock

AKTUELLE 2D- UND 3D-GEBÄUDEGEOMETRIEN ALS BASIS KOMMUNALER ENERGIEKARTEN

Tobias Weinzierl

Zusammenfassung: Im Rahmen dieses Beitrags wird ein Konzept entwickelt, mit dem die bisher zweidimensionale Datengrundlage für die Produktidee Kommunale Energiekarten (KEK) in die Dreidimensionalität überführt werden kann, wobei der Ansatz qualitativ bewertet wird. KEK dienen der Bestimmung von Energiebedarfen innerhalb definierter Untersuchungsgebiete. Für die Entwicklung, Implementierung und Verifizierung des Konzepts wurden amtliche 3D-Gebäudemodelle bezogen, welche in der Modellierungssprache CityGML modelliert sind. Zuerst wird anhand eines bereits bestehenden Workflows bestimmt, welche Parameter (z. B. Grundfläche oder Geschosszahl) Eingang in den Berechnungsprozess finden. Anschließend wird ein Konzept und darauf aufbauend ein SQL-Skript entwickelt, das diese Parameter aus den amtlichen 3D-Gebäudemodellen ableitet. Dieser Prozess findet im Schema der 3DCityDB auf Basis einer PostGIS-Datenbank statt. Das Ergebnis der Arbeit ist ein SQL-Skript, welches alle für die KEK benötigten Parameter aus 3D-Gebäudemodellen ableitet, wobei mehrere Vorteile von 3D-Gebäudemodellen aufgrund deren fehlerhafter Modellierung, z. B. nicht geschlossener Volumenkörper, in der Praxis nicht zum Tragen kommen.

Schlüsselwörter: Energiebedarfe, CityGML, 3DCityDB, ALKIS

UP-TO-DATE 2D AND 3D BUILDING GEOMETRIES TO DERIVE MUNICIPAL ENERGY MAPS

Abstract: Within the scope of this paper a concept is developed, which transfers the existing two-dimensional data base for the project "municipal energy maps" (Kommunale Energiekarten – KEK) into three-dimensionality. The quality of this approach will be assessed simultaneously. The product KEK serves the determination of energy demands within certain survey areas based on cadastral geodata. Three-dimensional building models – modelled using the modelling-language CityGML – delivered from the German cadaster system are used for this paper. At first the necessary parameters (e. g. base area or number of stories) for the determination of energy demands will be derived by examining the existing workflow. Building on that, an SQL-Script is developed which derives these parameters from official three-dimensional building models, which are stored within the 3DCityDB scheme in a PostGIS-Database. The result of this work is an SQL-Script which derives all the parameters necessary for the KEK, whereby the theoretical advantages of 3D-building models cannot fully persuade due to incorrect modelling in the authoritative system.

Keywords: Energy demand, CityGML, 3DCityDB, ALKIS

Autor

B. Sc. Tobias Weinzierl
ENEKA Energie & Karten GmbH
Friedrichstraße 16
D-18057 Rostock
E: tobias.weinzierl@eneka.de

1 EINLEITUNG

1.1 DIE IDEE DER „KOMMUNALEN ENERGIEKARTEN“

Die Basis für die Produktidee „Kommunale Energiekarten“ (KEK), welche über das existierende Gründerstipendium gefördert wird, stellt die Erkenntnis dar, dass vor allem im Zuge der Energiewende ein starker Trend weg von großen zentralen Energieerzeugern hin zu kleinen dezentralen Anlagen besteht (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2018, Albersmann et al. 2017).

Diese Entwicklung hin zu vielen verteilten Anlagen zur Energieerzeugung hat implizit zur Folge, dass es immer mehr Akteure auf dem Feld der Anlagenbetreiber gibt. Für diese besteht ein großer Bedarf an Informationen bezüglich der Energiebedarfe und -verteilung innerhalb eines definierten Versorgungsgebiets, welche teilweise gebäudescharf, teilweise aber auch als Bedarfsdichte über ein größeres Gebiet aggregiert und visualisiert werden können. Zukünftige Anlagenbetreiber benötigen diese Informationen u. a. für die Dimensionierung ihrer Anlage und/oder für die (Neu-)Planung von Netzen zur Energieversorgung. Weitere Anwendungsfälle sind z. B. die Bestimmung möglicher Energieerträge aus Biomasse im Gemeindegebiet, die Visualisierung von Potenzialflächen für Photovoltaik oder die Unterstützung der Erstellung eines Klimaschutzkonzepts. Im Rahmen des Produkts KEK werden die drei Sektoren elektrischer Strom, Wärme und Mobilität behandelt. Dies stellt einen deutlich gesamtheitlicheren Ansatz als in der wissenschaftlichen Praxis dar, da sich im Rahmen der Literaturrecherche zu diesem Beitrag gezeigt hat, dass 3D-Gebäudemodelle in CityGML in der Wissenschaft in den meisten Fällen der Bestimmung von Wärmebedarfen dienen.

KEK stellen umfassende Informationen zu Energiebedarfen und Energiepotenzialen in Kommunen in Form von digitalen, kommentierten Karten auf der Grundlage amtlicher Geodaten bereit. Eine Beispielkarte ist über einen Gastzugang innerhalb des Web-GIS kwvMap verfügbar.

Es wird ein hochgradig automatisierter Prozess entwickelt, bei dem amtliche Geodaten – vornehmlich Auszüge aus dem digitalen Katasterwesen – in einer Datenbankumgebung prozessiert werden. Zur Ermittlung von Energiebedarfen dienen statistische

Annahmen, welche beispielsweise je nach Typologie eines Gebäudes variieren.

Das Ergebnis ist ein Produkt, welches in seiner Basisversion als Grundlage allein den digitalen Auszug aus dem Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) eines definierten Gebiets benötigt. Diese ALKIS-Daten werden lediglich in 2- bzw. 2,5-D geliefert. In der Wissenschaft sowie auch im privatwirtschaftlichen Sektor erfreuen sich jedoch 3D-Gebäudemodelle steigender Beliebtheit. Des Weiteren könnte es sein, dass aus der flexiblen und vielseitigen Struktur der 3D-Modellierung von Gebäuden mit der Modellierungssprache CityGML Vorteile bei der Erstellung von KEK generiert werden, z. B. durch die Modellierung von Teildachflächen und eine damit verbundene Ausweisung von Solarpotenzialen auf Teildachflächen und nicht als absoluten Wert für das gesamte Dach eines Gebäudes. In diesem Beitrag wird daher ein Konzept vorgestellt, mit dem die zweidimensionale Basis der Eingangsdaten für KEK durch amtliche dreidimensionale Gebäudemodelle ersetzt werden kann.

2 STAND DER FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

2.1 RELEVANTE ARBEITEN

Im Folgenden wird ein Überblick über relevante Arbeiten auf dem Gebiet der Bestimmung von Energiebedarfen basierend auf der Gebäudegeometrie gegeben. Dabei sollen sowohl Unterschiede bei der Art der Geometrie (2D oder 3D) als auch bei der Art und Weise der Berechnung (bauphysikalisches oder statistisches Verfahren) erläutert werden.

2.1.1 GENERELLE ANWENDUNGSPOTENZIALE VON 3D-MODELLEN

Der Standard des Open Geospatial Consortium (OGC) für den Austausch dreidimensionaler Stadtmodelle ist die Modellierungssprache CityGML, deren Entwicklung im Jahr 2002 (SIG 3D 2017) begann. Bereits im Jahr 2000 identifizierten Batty et al. zwölf Einsatzzwecke bzw. mögliche Anwender für 3D-Stadtmodelle: Rettungsdienste, Stadtplanung, Telekommunikation, Architektur, Gebäudemanagement, Marketing und Wirtschaftsförderung, Immobilien, Tourismus und Unterhaltung, E-Commerce, Umwelt- und Katastrophenmanagement, Bildung und Erziehung und

kommunale Verwaltungen (Batty et al. 2000). Dies geschah also schon vor dem Start der Entwicklung von CityGML, wobei Metral et al. (2009) in ihrer Arbeit noch einmal betonen, dass 3D-Gebäudemodelle unbedingt eine semantische Komponente besitzen müssen, um sie abgesehen von Visualisierungen noch weiteren Zwecken zuführen zu können. Sie verweisen explizit auf die 2009 noch junge Technologie CityGML als *best practice*.

Aufbauend auf der Arbeit von Batty et al. untersuchten Biljecki et al. im Jahr 2015 tatsächliche aktuelle Anwendungsgebiete von CityGML. Die Ergebnisse ihrer Arbeit zeigt Abbildung 1.

Dass Biljecki et al. (2015) die Berechnung von Energiebedarfen als eigenen Anwendungsfall von 3D-Stadtmodellen identifizieren, zeigt wie aktuell und bedeutsam dieser für die Praxis ist. Es existieren in diesem Forschungsfeld bereits eine Reihe wissenschaftlicher Veröffentlichungen beispielsweise von Strzalka et al. (2010), Kaden (2014), Carrión et al. (2010) oder Busch & Kleschin (2012).

2.1.2 ABLEITUNG VON ENERGIEBEDARFEN

Zu Beginn wird der Unterschied zwischen statistischem und bauphysikalischem Verfahren zur Ableitung von Energiebedarfen geklärt.

Statistische Verfahren fußen auf der Annahme, dass der Energiebedarf eines Gebäudes vor allem von der Funktion des Gebäudes abhängt, wobei in diesem Zuge gleichzeitig eine Information bezüglich des individuellen Nutzerverhaltens sowie der durchschnittlichen technischen Gebäudeausstattung impliziert wird. Anhand des beispielsweise in der Arbeit des Instituts für Wohnen und Umwelt (2015) errechneten spezifischen Heizwärmebedarfs für eine gewisse Gebäudetypologie werden diese dann mit geometrischen Eigenschaften eines Gebäudes verrechnet (Swan & Ugursal 2009, Kaden 2014).

Das *bauphysikalische Verfahren* basiert auf der Prämisse, dass für den Energiebedarf eines Gebäudes vor allem konstruktive Einflussfaktoren gelten. Aus diesem Grund besteht dieses Verfahren auf einer genauen Untersuchung der thermischen Hülle und der Technik eines Gebäudes. In der Realität jedoch reicht die bauphysikalische Betrachtung meist nicht aus und wird mit dem

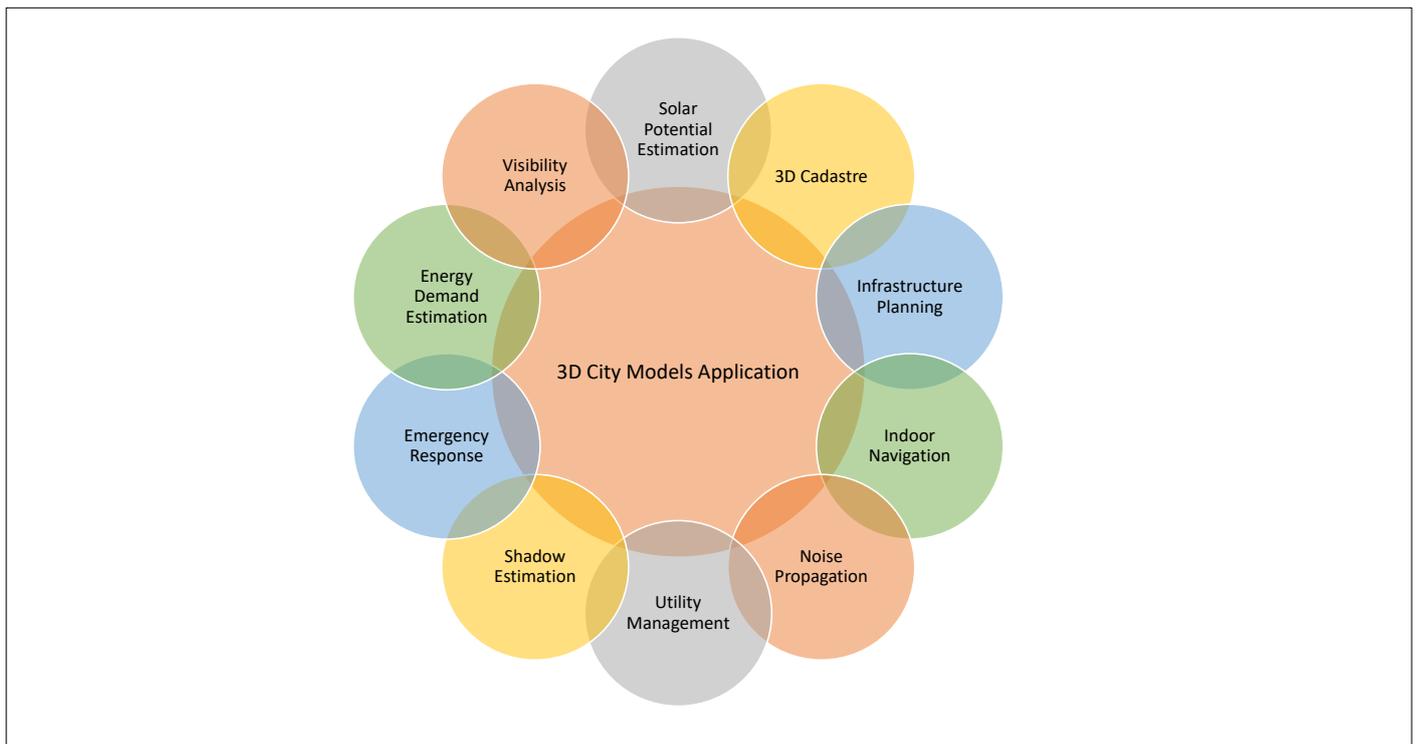


Abbildung 1: Anwendungsfälle von 3D-Modellen (aus Saran et al. 2018 nach Biljecki et al. 2015)

eben beschriebenen statistischen Verfahren kombiniert, was als sog. *Hybrides Verfahren* bezeichnet wird. Zusätzlich herangezogene statistische Daten beschreiben z. B. ein normiertes durchschnittliches Nutzerverhalten. Als bauphysikalische Eingangsdaten werden u. a. Wärmedurchgangskoeffizienten verschiedener Bauteile oder das Wand-Fenster-Verhältnis benutzt (Kaden 2014).

Einen Überblick über die verschiedenen Ausprägungen beider Verfahren geben Swan & Ugursal (2009).

2.1.3 FORSCHUNGSSTAND ZUR ABLEITUNG VON ENERGIEBEDARFEN

Im Rahmen dieser Arbeit wird generell nur auf Konzepte zur Ableitung von Energiebedarfen gemäß dem Bottom-up-Ansatz nach Johnston (2003) eingegangen. Hier werden Energiebedarfe von der kleinsten hierarchischen Einheit im Untersuchungsgebiet, z. B. ein Gebäude, bis zu einer gewünschten übergeordneten Einheit, z. B. ein Landkreis, aggregiert.

Strzalka et al. (2010) benutzen in ihrer Arbeit zwar dreidimensionale Modelle von Gebäuden zur Bestimmung von Energiebedarfen in urbanen Räumen, jedoch leiten sie diese aus dem zweidimensionalen Grundriss eines Gebäudes in Kombination mit Hö-

heninformationen aus Laserscanningdaten ab. Dies zeigt, dass zu dieser Zeit eine Anwendung von CityGML in Bezug auf Energiebedarfe noch nicht flächendeckend verbreitet war. Für die tatsächliche Berechnung der gebäudescharfen Wärmebedarfe im Untersuchungsgebiet wandten Strzalka et al. das bauphysikalische Verfahren an, wobei die Autoren u. a. Luftaustauschraten oder Wärmegewinne aus solarer Strahlung berücksichtigten. Da es für ihr Untersuchungsgebiet real gemessene Wärmeenergieverbräuche gab, konnten die Autoren die Übereinstimmung ihres Ansatzes überprüfen und stellten fest, dass die mittlere Abweichung zwischen 26% und 30% lag.

Neidhart & Sester (2006) verwenden als Datenbasis Produkte aus dem Airborne Laserscanning. Aus diesen Daten bestimmen sie das Volumen von Gebäuden, welche sie zusätzlich in eine Typologie einordnen. Der Wärmebedarfswert eines Gebäudes wird anschließend über die Multiplikation der Gebäudenutzfläche mit einem typologiespezifischen Wärmebedarfswert ermittelt, was indiziert, dass Neidhart & Sester das statistische Verfahren verwenden, wobei die Abweichung von realen Werten in ihrer Arbeit bei 10% bis 20% liegt.

Kaden (2014) bestimmt im Rahmen seiner Dissertation an der TU München Energiebedarfe sowohl auf der Ebene von ein-

zelnen Gebäuden als auch in aggregierter Form. Als Grundlage dienen hier 3D-Gebäudemodelle von Berlin in CityGML. Er leitet nicht nur Eingangswerte für die Berechnung von Energiebedarfen ab, sondernprozessiert diese anschließend, um Aussagen zu konkreten Energiebedarfen treffen zu können. Der Autor verwendet für die Bestimmung von Energiebedarfen das bauphysikalische Hybridverfahren, da er einerseits bauphysikalische Berechnungsprozesse implementiert, diese andererseits aber durch Information bzgl. der Funktion von Gebäuden und deren Alter unterstützt. Bei der Validierung seiner Arbeit anhand von 90 repräsentativen Gebäuden in einem Wohnquartier in Berlin kommt der Autor zu dem Ergebnis, dass die von ihm errechneten Heizwärmebedarfe im Schnitt 70% von der Realität abweichen und sich die Abweichungen in einem Intervall von -60% bis 220% bewegen. Kaden gelingt es, den von ihm entwickelten Workflow auf das gesamte Stadtgebiet Berlins anzuwenden, wobei die Datenhaltung und Teile der Prozessierung im Datenbankschema 3DCityDB realisiert sind.

In der Arbeit von Carrión et al. (2010) finden im gleichen Jahr bereits CityGML-Modelle urbaner Räume Anwendung. Sie leiten den energetischen Sanierungsgrad von Gebäuden ab. Grundlage hierfür sind

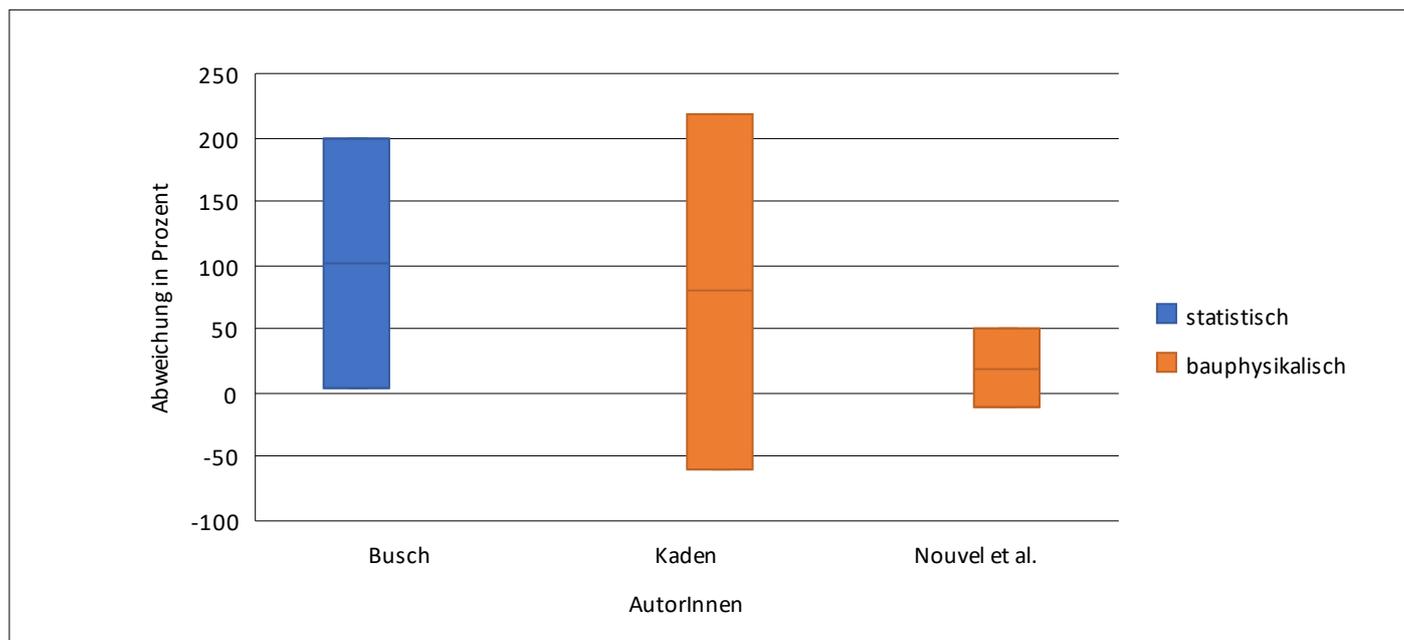


Abbildung 2: Intervalle der Abweichungen der ermittelten Heizwärmebedarfe von reell gemessenen Verbräuchen nach angewandtem Verfahren und AutorInnen (eigene Darstellung)

einerseits 3D-Gebäudemodelle in CityGML sowie andererseits real gemessene Heizenergiebedarfe dieser Gebäude. Es wird eine Abschätzung theoretischer Heizwärmebedarfe von Gebäuden auf Basis der Gebäudetypologie getroffen, was eine Anwendung des statistischen Verfahrens zur Bestimmung von Energiebedarfen indiziert. Leider geben sie keine Aussage bezüglich der Genauigkeit des statistischen Verfahrens zur Bestimmung von Wärmebedarfen. Carrión et al. kommen unter anderem zu dem Schluss, dass sich 3D-Gebäudemodelle in CityGML aufgrund ihres hohen Gehalts an semantischen Informationen sehr gut für die Ableitung energetisch relevanter Parameter von Gebäuden eignen. Hervorzuheben ist zudem, dass in dieser Arbeit bereits das Datenbankschema 3DCityDB zur Prozessierung von CityGML-Modellen benutzt wird.

Nouvel et al. (2013) verwenden 3D-Gebäudemodelle in CityGML, für welche Heizwärmebedarfe ermittelt werden sollen. Hierfür wird das bauphysikalische Verfahren auf zwei Untersuchungsgebiete in Süddeutschland angewendet. Die ermittelten Heizwärmebedarfe wichen in einem Intervall von -11% bis 50% von reellen Werten ab, wenn man die Ergebnisse beider Untersuchungsgebiete kombiniert.

Busch & Kleschin (2012) beschäftigen sich mit den Grundlagen einer Wärmebedarfsberechnung für die Stadt Greifswald

auf Basis amtlicher Geodaten. Die Autoren bestimmen grundlegende Parameter, welche für die Ableitung von Wärmebedarfen verwendet werden. Des Weiteren werden Prozessketten entwickelt, welche der Ableitung dieser Parameter aus Geobasisdaten dienen. Hier wird beispielsweise explizit die Abschätzung der Gebäudehöhe über die Geschosshöhe erwähnt. Auch die Vorteile der Vergabe von spezifischen Heizwärmebedarfen nach Gebäudetypologien gegenüber der aufwendigen bauphysikalischen Berechnung auf der Ebene einzelner Gebäude werden erläutert, was impliziert, dass für diese Arbeit das statistische Verfahren verwendet wurde. Diese vorbereiteten Prozesse münden in der praktischen Umsetzung und damit in der Bestimmung von Wärmebedarfen innerhalb der Stadt Greifswald auf alleiniger Basis amtlicher Geodaten. Busch & Kleschin (2012) kommen zu dem Schluss, dass eine statistische Wärmebedarfsberechnung auf Basis detaillierter Geodaten starke Vorteile bezüglich Performanz und Übersichtlichkeit mit sich bringt. Leider bieten die Autoren keinen Vergleich der von ihnen errechneten Wärmebedarfswerte mit reellen Werten an.

Busch (2016) leitet in einer weiteren Arbeit Wärmebedarfe großflächig auf der Basis amtlicher Geodaten ab. Im Gegensatz zu Busch & Kleschin (2012) beschreibt der Autor die Skalierbarkeit sowie unterschiedliche Detailgrade einer Energiebe-

darfsuntersuchung, wobei beide Punkte von der Qualität und Quantität der verfügbaren Daten abhängen. Zudem erläutert Busch bereits hier das Problem, dass amtliche Geodaten teilweise ungenügend gepflegt sind, z. B. fehlt oft die vorgesehene Information über die Geschosshöhe eines Gebäudes. Dies erschwert deren standardisierte Prozessierung und bietet großes Fehlerpotenzial, da oft Umwege für Berechnungen z. B. der Geschosshöhe eines Gebäudes in Kauf genommen werden müssen. Der Autor kommt zu dem Schluss, dass eine skalierbare Bestimmung von Energiebedarfen auf Basis amtlicher Geodaten durchaus möglich ist, wobei er eine regelmäßige und ausführliche Pflege dieser anmahnt. Des Weiteren beschreibt er den Vorteil des statistischen Verfahrens der Bestimmung von Energiebedarfen gegenüber dem bauphysikalischen Ansatz. Busch gibt einen groben Überblick über die Abweichungen seiner Methode, welche jedoch je nach Detailgrad und vorhandener Datengrundlage zwischen 5% und 200% im Vergleich zur Realität betragen kann.

Einen Vergleich der in den wissenschaftlichen Arbeiten angegebenen Intervallen der Abweichungen der Ergebnisse von bauphysikalischem und statistischem Verfahren von der Realität bietet Abbildung 2. Es ist allerdings zu beachten, dass Abbildung 2 nur eine qualitative Übersicht bietet, da die AutorInnen unterschiedliche

Geometrieabhängig	Geometrieunabhängig
Grundfläche	Baualterklasse
Geschosszahl	Gebäudetypologie nach Institut für Wohnen und Umwelt (2015) und BMVBS (2013)
Gebäudenutzfläche	
Statistischer Bewohnerwert	
Geometrie	

Abbildung 1: Parameter für die Bestimmung von Energiebedarfen bei KEK

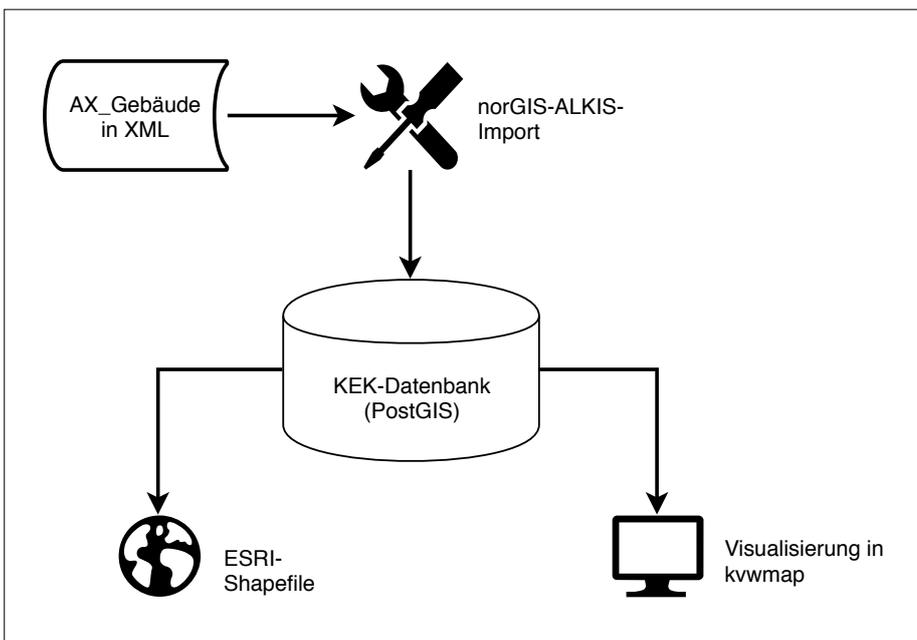


Abbildung 3: Systemarchitektur des Prozesses zur Erstellung von KEK (eigene Darstellung)

Zahlen an Gebäuden zur Validierung ihrer Herangehensweisen benutzen und sich zudem die Größe der Untersuchungsgebiete extrem unterschiedlich darstellt. Außerdem war nur bei der Recherche der drei aufgeführten Arbeiten die absolute Abweichung der Werte in Intervallen angegeben. Bei den Arbeiten von Strzalka et al. (2010) und Neidhart & Sester (2006) waren jeweils nur die Mittelwerte der Abweichung ersichtlich.

Alle beschriebenen Arbeiten außer Busch sowie Neidhart & Sester versuchen Energiebedarfe bzw. die für die Berechnung benötigten Parameter auf Basis von 3D-Gebäudemodellen in CityGML zu bestimmen. Im Rahmen des exist-Gründungsprojekts existiert jedoch bereits ein Prozess zur Berechnung von Energiebedarfen auf Grundlage amtlicher digitaler Katasterauszüge in 2D. Da mittelfristig eine Umstellung auf eine dreidimensionale Datenbasis

vorstellbar ist, stellt sich die Frage, inwiefern die Datengrundlage des bestehenden Workflows hin zu einer Dreidimensionalität migriert werden kann.

2.2 STAND DER ENTWICKLUNG INNERHALB DES PROJEKTS

Für den bestehenden Prozess zur Erstellung kommunaler Energiekarten werden diejenigen Parameter identifiziert, deren Ableitung aus einem 3D-Gebäudemodell in CityGML erfolgen soll. Der Prozess beruht auf einer von Michael Busch entwickelten Verarbeitung von Geobasisdaten mit QGIS. Hierfür wurden 56 Modelle entwickelt, aus deren Analyse folgende Parameter eines Gebäudes bestimmt wurden (Tabelle 1). Diese sind die Basis des Produkts.

Im Grunde ist die Bedeutung aller Parameter selbsterklärend, wobei die Gebäudenutzfläche einer weiteren Erläuterung bedarf. Diese ist nach der Energieein-

sparverordnung (EnEV) bei der Anwendung statistischer Methoden eine fiktive Bezugsfläche zur Berechnung der Energiebedarfe von Gebäuden (EnEV 2015, Kaden 2014).

Im bestehenden Prozess nach Busch werden alle Parameter aus dem ALKIS-Datensatz und innerhalb dessen aus der Objektart *AX_Gebäude* abgeleitet bzw. sind Attribute dessen und können direkt in einer Datenbankumgebung (PostGIS) prozessiert werden (Abbildung 3).

3 MATERIAL UND METHODEN

Die Recherche der beschriebenen relevanten Arbeiten unterstreicht, dass bei der Bestimmung von Energiebedarfen aus 3D-Gebäudemodellen die Modellierungssprache CityGML eine breite Anwendung findet. Aus diesem Grund werden auch im Rahmen der Arbeit, welche dieser Artikel behandelt, 3D-Gebäudemodelle in CityGML prozessiert. Diese Prozessierung findet im Datenbankschema 3DCityDB statt, welches ebenfalls bei verwandten Forschungsarbeiten angewandt wird.

3.1 CITYGML

CityGML ist seit 2008 ein OGC-Standard beim Austausch von 3D-Modellen und findet seit seiner Einführung nicht nur in der wissenschaftlichen Diskussion, sondern auch in der Praxis breite Anwendung (Gröger & Plümer 2012). Das Hauptaugenmerk bei der Anwendung von CityGML liegt laut Gröger & Plümer (2012) vor allem auf dem Informationsgehalt der Semantik eines Objekts, da dieser je nach Quantität und Qualität ein sehr breites Nutzungsspektrum des Modells eröffnet. Die Modellierungssprache bietet die Möglichkeit, eine breite Vielfalt thematischer Objekte zu modellieren, wobei jede der implementierten Objektarten (z.B. building, water body, vegetation) innerhalb des CityGML-Schemas als *Module* bezeichnet werden und bestimmten Standards unterliegen (Coors et al. 2016). Die Namensgebung der Modellierungssprache CityGML impliziert bereits, dass ein Hauptaugenmerk der Anwendung auf urbanen Räumen und damit auf Gebäuden liegt. Dies hat zur Folge, dass das Objekt, welches in Städten am gegenwärtigsten ist, auch in CityGML am detailliertesten und umfangreichsten ausdifferenziert und modelliert ist. Für eine detaillier-

tere Einsicht in das Modul *building* wird auf die Arbeit von Gröger et al. (2012) verwiesen.

3.2 3DCITYDB

Die sogenannte 3DCityDB ist ein frei verfügbares Datenbankschema im Sinne von Open Source. Mit der 3DCityDB werden diverse Werkzeuge für Import, Export, Analyse, Visualisierung und Prozessierung von 3D-Stadtmodellen, welche auf dem OGC-Standard CityGML basieren, geliefert. Das Schema setzt sowohl auf das kommerzielle relationale Datenbankmanagementsystem (DBMS) Oracle als auch auf das relationale Open-Source-Datenbankmanagementsystem PostGIS, welches eine Erweiterung des DBMS PostgreSQL darstellt, auf (Kolbe et al. 2016).

Das Datenbankschema an sich ist abgeleitet aus dem Datenmodell der Modellierungssprache CityGML und verfolgt das Ziel, dieses in ein möglichst „schlankes“ Schema zu transformieren, um erstens die Übersichtlichkeit der 3D-Stadtmodelle deutlich zu verbessern und zweitens das Arbeiten mit den Daten einfacher und effizienter zu gestalten (Kunde 2013). Die Komplexität der modellierten Objekte wird innerhalb der Datenbank durch verschiedene Tabellen und deren Schlüsselbeziehungen untereinander aufgelöst. Zusätzlich zu dem eigentlichen Datenbankschema wurde noch ein Importer-/Exporter-Tool erstellt, welches es ermöglicht, das Datenbankschema relativ schnell und einfach mit 3D-Massendaten direkt aus CityGML-Dateien zu befüllen (Kunde 2013).

3.3 UNTERSUCHUNGSGEBIETE UND BEISPIELDATEN

Die Datensätze, anhand derer in dieser Arbeit ein Ansatz zur Ableitung der Parameter zur Berechnung von Energiebedarfen entwickelt wird, umschließen die Verwaltungsgebiete Stadt Grevesmühlen sowie Amt Grevesmühlen-Land, die Stadt Gadebusch und das Amt Röbel-Müritz. Die Wahl der beispielhaften Untersuchungsgebiete fiel auf diese drei Gebiete, da sie das gesamte Spektrum möglicher Nutzer von KEK abdecken: Grevesmühlen als Stadt mit einer relativ hohen Bevölkerungsdichte, Gadebusch als Stadt mit einer mittleren Bevölkerungsdichte und das Amt Röbel-Müritz als großflächiges und damit weniger dicht besiedeltes Untersuchungsgebiet.

4 KONZEPT ZUR ABLEITUNG DER PARAMETER FÜR KEK AUS 3D-GEBÄUDEMODELLEN

Ziel der Arbeit, die dieser Artikel behandelt, ist es, ein Konzept zu entwickeln und zu implementieren, welches die in Tabelle 1 beschriebenen Parameter, die für die Bestimmung von Energiebedarfen im Rahmen des Produkts KEK benötigt werden, aus CityGML-Datensätzen ableitet. Das entwickelte Konzept zur Ableitung der notwendigen Parameter sowie dessen Systemarchitektur werden nun zusammengefasst dargestellt (Abbildung 4).

Als erstes wird eine Instanz der 3DCityDB auf einer existierenden PostGIS-Datenbank erstellt. Diese wird mithilfe des mitgelieferten Importer-/Exporter-Tools mit Daten aus dem amtlichen 3D-Gebäudemodell befüllt. Anschließend muss die Hilfstabelle, welche die Zuordnung Funktionscode des ALKIS-Datensatzes zu Gebäudetypologie enthält, angelegt und mithilfe einer .csv-Datei, welche die eben beschriebene Zuordnung beinhaltet, gefüllt werden. Abschließend wird lediglich das entwickelte SQL-Skript ausgeführt, welches automatisch die Tabelle *AUFBEREITET* erstellt und befüllt. Diese Tabelle stellt alle Gebäude des Eingangsdatensatzes dar, enthält jedoch als deren Attribute lediglich die für KEK benötigten Parameter. Auf dieser Basis setzen dann die weiteren Verarbeitungsskripte zur

Erstellung der KEK auf, welche jedoch nicht Teil dieses Beitrags sind.

5 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Bei der Diskussion der Frage, ob die zweidimensionale Datenbasis der KEK sinnvoll durch 3D-Gebäudemodelle in CityGML ersetzt werden kann, muss zwischen geometrieabhängigen und geometrieunabhängigen Parametern unterschieden werden.

Für die geometrieunabhängigen Parameter ist es mit relativ wenig Aufwand verbunden, einen Wechsel von 2D- auf 3D-Daten vorzunehmen. Für die Baualtersklasse muss in der Datenbank lediglich das Attribut gefunden werden, welches das jeweilige Baujahr eines Gebäudes enthält, wobei dieses bei allen drei Datensätzen dieser Arbeit nicht befüllt war. Analog hierzu wird auch für die Gebäudetypologie nur das Attribut benötigt, welches die Funktion eines Gebäudes beschreibt bzw. den korrespondierenden Funktions-Code enthält. Für geometrieunabhängige Parameter ist also ein Wechsel der Datenbasis für die KEK von 2D auf 3D ohne Weiteres möglich.

Differenzierter gestaltet sich die Beantwortung dieser Frage bei den geometrieabhängigen Parametern:

Die Berechnung der Grundfläche eines Gebäudes ist mit einem 2D-ALKIS-Auszug deutlich weniger aufwendig. Es bedarf hier lediglich der PostGIS-Funktion *ST_Area*, die auf das Geometrieattribut des Daten-

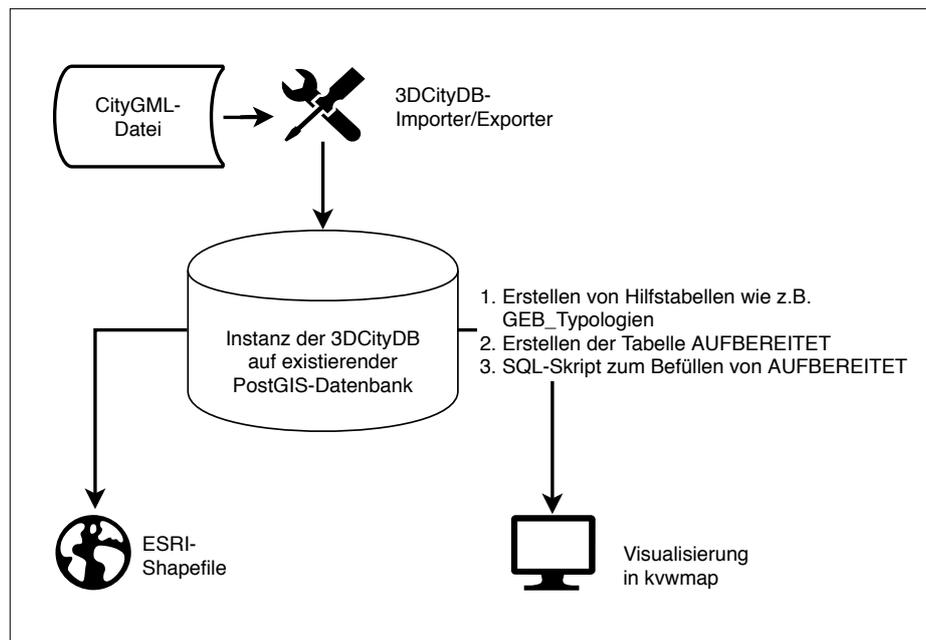


Abbildung 4: Systemarchitektur des Prozesses zur Ableitung der für KEK notwendigen Parameter aus amtlichen 3D-Gebäudemodellen (eigene Darstellung)

Parameter	Vorteil in der Theorie	Vorteil in der Praxis
Baualtersklasse	😊	😊
Gebäudetypologie	😊	😊
Grundfläche	😞	😞
Gebäudenutzfläche	😊	😊
Geschosszahl	😊	😊
Bewohner	😊	😊

Tabelle 2: Vorteile von 3D-CityGML-Daten gegenüber 2D-ALKIS-Daten in Theorie und Praxis

satzes angewandt wird. Bei CityGML-Gebäudemodellen muss erst ein Join zwischen den Tabellen *THEMATIC_SURFACE* und *SURFACE_GEOMETRY* erstellt werden, wobei gleichzeitig nach der *objectclass_id* 35 gefiltert wird, um die Geometrie der Grundfläche eines Gebäudes zu erhalten. Wenn dies geschehen ist, kann *ST_Area* wie gewohnt angewandt werden, wobei noch zusätzlich die Möglichkeit abgefangen werden muss, dass die Grundfläche eines Gebäudes durch ein MultiPolygon und damit mehreren Teilflächen repräsentiert wird. Insgesamt ist es also im Vergleich zu 2D-Daten deutlich aufwendiger, die Grundfläche eines Gebäudes aus einem CityGML-Modell abzuleiten.

Die Gebäudenutzfläche wird laut EnEV (2015) mit folgender Formel berechnet: $A_N = 0,32 \text{ m}^{-1} \cdot V_E$, wobei V_E = Bruttovolumen eines Gebäudes [m^3].

Bei der bisherigen Prozessierung zweidimensionaler ALKIS-Daten wird das Bruttovolumen eines Gebäudes über den Umweg *Grundfläche · Geschosszahl · durchschnittliche Geschosshöhe* berechnet. Dieser Schritt sollte bei der Verwendung dreidimensionaler Eingangsdaten eigentlich entfallen und durch die PostGIS-Funktion *ST_Volume* ersetzbar sein. Wenn diese auf die Geometrie eines Volumenkörpers angewandt wird, ist das Ergebnis der Wert des Volumens dieses Körpers. Da es bei allen in dieser Arbeit zur Verfügung stehenden Beispieldatensätzen zu Problemen aufgrund fehlerhafter Modellierung der Geometrien der Volumenkörper der Gebäude kam, wurde das Volumen trotz der dreidimensionalen Datenbasis mittels *Grundfläche · measured_height* bestimmt. Dieser Sachverhalt stellt laut Alam et al. (2014) ein grundlegendes Problem amtlicher 3D-Modelle in CityGML dar. Letzten

Endes ist dadurch der theoretische Vorteil dreidimensionaler Gebäudemodelle in der Praxis egalisiert.

Die Bestimmung der Geschosszahl sollte eigentlich unproblematisch über das Auslesen des Attributwerts von *storeysAboveGround* möglich sein. Leider ist dieses Attribut weder bei 2D-ALKIS- noch bei amtlichen 3D-CityGML-Datensätzen gepflegt. Da bei zweidimensionalen Daten keine Höheninformation mitgeliefert wird, muss hier in Handarbeit nachkartiert werden bzw. ist es auch möglich, die Gebäudehöhe aufwendig aus Daten des Airborne Laserscannings abzuleiten (Strzalka et al. 2010). Bei 3D-Gebäudemodellen kann die statistische Geschosszahl eines Gebäudes über das Attribut *measured_height* abgeschätzt werden. Hier ist also der CityGML-Datensatz deutlich im Vorteil.

Bei der Berechnung eines statistischen Bewohnerwerts muss auf die Vor- und Nachteile der Berechnung der Gebäudenutzfläche hingewiesen werden, da dieser allein auf dieser Basis ermittelt wird.

Um die Ergebnisse der vorhergehenden Analyse der möglichen Vorteile der Anwendung von 3D-Gebäudemodellen bei KEK zusammenzufassen, wurde Tabelle 2 erstellt: Lachende Emojis stellen einen realen Vorteil dar, neutrale Emojis stellen eine Gleichwertigkeit von 2D- und 3D-Daten dar und traurige Emojis stellen einen realen Nachteil dar.

Abschließend lässt sich der Schluss ziehen, dass 3D-Gebäudemodelle, welche in CityGML modelliert sind, bei der Anwendung für KEK in der Theorie mehr Vorteile haben als in der Praxis. Dies liegt an dem Grundproblem amtlicher 3D-Gebäudemodelle, welche vielfach fehlerhaft modelliert sind und damit die Vorteile der 3D-Modellierung kaum zum Tragen kom-

men. Für die Praxis von KEK lässt sich festhalten, dass es letzten Endes (noch) egal ist, welche Modellierung der Eingangsdaten gewählt wird. Da aber 3D-Daten eine deutlich größere Auswahl bezüglich der Visualisierung von Ergebnissen bieten, werden auch bei KEK nach Einschätzung des Autors in einem absehbaren Zeitraum dreidimensionale Gebäudemodelle zum Einsatz kommen.

6 AUSBLICK

Im Rahmen der Literaturrecherche zu dieser Arbeit sowie auch bei der Entwicklung des Konzepts wurde deutlich, dass dreidimensionale Gebäudemodelle in CityGML ein breites Anwendungsspektrum erfahren (siehe auch Abbildung 1). Für Anwendungen, bei denen eine Betrachtung der 3D-Gebäudemodelle im Vordergrund steht, z. B. virtuelle Stadtmodelle, ergeben sich keine Beschränkungen. Sobald die Modelle jedoch, wie z. B. in diesem Beitrag, prozessiert werden sollen, treten aufgrund fehlerhafter geometrischer Modellierung Schwierigkeiten auf. In Zukunft wird das Hauptaugenmerk bei der Erstellung amtlicher 3D-Gebäudemodelle darauf liegen müssen, dass eine geometrisch und topologisch einwandfreie Modellierung gewährleistet wird. Nur dadurch wird sichergestellt, dass es Entwicklern und Anwendern zukünftig ermöglicht wird, den Fokus auf die Anwendungsentwicklung und nicht auf den Umgang mit fehlerhaften Modellen zu legen.

DANKSAGUNG

Der Autor dankt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung im Rahmen eines EXIST-Gründerstipendiums (Förderkennzeichen 03EGSMV072).

Literatur

Alam, N.; Wagner, D.; Wewetzer, M.; Falkenhäuser, J. von; Coors, V.; Pries, M. (2014): Towards Automatic Validation and Healing of City GML Models for Geometric and Semantic Consistency. In: Isikdag, U. (Ed.): Innovations in 3D Geo-Information Sciences. Springer International Publishing, Cham.

Albersmann, J.; Dütsch, G.; Martin, J.; Theile, H.; Erken, E.; Kern, D. (2017): Die digitalisierte dezentrale Energieversorgung von morgen gestalten. Herausgegeben von der PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, Frankfurt/M.

Batty, M.; Chapman, D.; Evans, S.; Haklay, M.; Kueppers, S.; Shiode, N.; Smith, A.; Torrens, P. M. (2000): Visualizing the city: Communicating urban designs to planners and decision makers. In: Brail, R. K.; Klosterman, R. E. (Eds.): Planning Support Systems, Models and Visualisation Tools. Esri Press/Center Urban Policy Research, Rutgers University, Redland, S. 405-443.

Biljecki, F.; Stoter, J.; Ledoux, H.; Zlatanova, S.; Çöltekin, A. (2015): Applications of 3D City Models: State of the Art Review. In: ISPRS International Journal of Geo-Information, 4 (4), S. 2842-2889.

BMVBS (2013): Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude: Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzialen. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin.

Busch, M. (2016): Möglichkeiten der großflächigen Abbildung von Wärmebedarfen am Beispiel des Landkreises Nordwestmecklenburg. In: Bill, R.; Zehner, M.; Golnik, A.; Lerche, T.; Schröder, J.; Seip, S. (Hrsg.): GeoForum MV 2016 – Geo-Information im Alltag – Nutzen und neue Anforderungen. Gito, Berlin.

Busch, M.; Kleschin, S. (2012): Städtische Wärmeversorgung in der öffentlichen Diskussion – Geodaten bieten Mehrwert für alle Beteiligten in der Stadt Greifswald. In: Koch, A.; Kutzner, T.; Eder, T. (Hrsg.): Geoinformationssysteme. Beiträge zum 17. Münchner Fortbildungsseminar 2012. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Carrión, D.; Lorenz, A.; Kolbe, T. H. (2010): Estimation of the energetic rehabilitation state of buildings for the city of Berlin using a 3D City Model represented in CityGML. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-4/W15.

Coors, V.; Andrae, C.; Böhm, K.-H. (2016): 3D-Stadtmodelle: Konzepte und Anwendungen mit CityGML. Wichmann, Berlin/Offenbach.

EnEV (2015): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV).

Gröger, G.; Kolbe, T. H.; Nagel, C.; Häfele, K.-H. (2012): OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. 2.0.0. OGC International Standard, Doc. No. 12-019. Open Geospatial Consortium.

Gröger, G.; Plümer, L. (2012): CityGML – Interoperable semantic 3D city models. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 71, S. 12-33.

Institut für Wohnen und Umwelt (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt.

Johnston, D. (2003): A physically-based Energy and Carbon Dioxide Emission model of the UK housing stock. Leeds.

Kaden, R. (2014): Berechnung der Energiebedarfe von Wohngebäuden und Modellierung energiebezogener Kennwerte auf der Basis semantischer 3D-Stadtmodelle. Dissertation, TU München.

Kolbe, T. H.; Yao, Z.; Nagel, C.; Redweik, R.; Willkomm, P.; Hudra, G.; Müftüoğlu, A.; Kunde, F. (2016): 3D City Database for CityGML: Documentation Version 3.3.0.

Kunde, F. (2013): 3D-Stadtmodelle in PostGIS mit der 3D City Database. FOSSGIS 2013, Rapperswil.

Metral, C.; Falquet, G.; Cutting-Decelle, A. F. (2009): Towards Semantically Enriched 3d City Models: An Ontology Based Approach. In: Kolbe, T. H.; Zhang, H.; Zlatanova, S. (Eds.): Academic Track of Geoweb 2009 – Cityscapes. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII 3-4/C3, S. 40-45.

Neidhart, H.; Sester, M. (2006): Creating a digital thermal map using laser scanning and GIS. In: 10th International Symposium on District Heating and Cooling, September 3-5, 2006.

Nouvel, R.; Schulte, C.; Eicker, U.; Pietruschka, D.; Coors, V. (2013): CityGML-based 3D City Model for energy diagnostics and urban energy policy support. In: Proceedings of BS2013, 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, August 26-28, 2013, Chambéry, France.

Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2018): Die Bundesregierung | Energie erzeugen | Energiewende im Überblick. <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatistischeSeiten/Breg/Energiekonzept/0-Buehne/buehnenartikel-links-energiewende-im-ueberblick.html> (Zugriff: 03/2018).

Saran, S.; Oberai, K.; Wate, P.; Konde, A.; Dutta, A.; Kumar, K.; Senthil Kumar, A. (2018): Utilities of Virtual 3D City Models Based on CityGML: Various Use Cases. In: Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 46 (6), S. 957-972.

SIG 3D (2017): Handbuch für die Modellierung von 3D Objekten. Teil 2: Modellierung Gebäude (LOD1, LOD2 und LOD3). [http://wiki.quality.sig3d.org/index.php/Handbuch_f%C3%BCr_die_Modellierung_von_3D_Objekten_-_Teil_2:_Modellierung_Geb%C3%A4ude_\(LOD1,_LOD2_und_LOD3\)](http://wiki.quality.sig3d.org/index.php/Handbuch_f%C3%BCr_die_Modellierung_von_3D_Objekten_-_Teil_2:_Modellierung_Geb%C3%A4ude_(LOD1,_LOD2_und_LOD3)) (Zugriff: 04/2018).

Strzalka, A.; Bogdahn, J.; Eicker, U. (2010): 3D City Modelling for Urban Scale Heating Energy Demand Forecasting. In: Proceedings Policy final conference, September 15-17, 2010, Stuttgart, Germany.

Swan, L. G.; Ugursal, V. I. (2009): Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (8), S. 1819-1835.