

WEBBASIERTE BERECHNUNG DER ENERGIEBEDARFE UND SANIERUNGSPOTENZIALE VON WOHNGEBÄUDEN AUF DER BASIS SEMANTISCHER 3D-STADTMODELLE

Robert Kaden

Zusammenfassung: Die Berechnung der Nutzenergiebedarfe eines Gebäudes basiert auf der Hypothese, dass eine starke Korrelation zwischen den Energieverbräuchen und einer Reihe von Gebäudeeigenschaften, z. B. der geometrischen Ausprägung, der bauphysikalischen Zustände und der Gebäudenutzung, besteht. Zur Berechnung der Heizwärmebedarfe wurde das Gebäudesimulationsverfahren nach DIN V 18599 (2011) implementiert, welches auf der detaillierten Bilanzierung der Wärmeverluste durch die einzelnen Hüllflächen und durch das regelmäßige Lüften eines Gebäudes bei einer bestimmten Außentemperatur sowie auf den Wärmegewinnen durch Sonneneinstrahlung und durch innere Wärmequellen basiert. Die bauteilbasierte Methode ermöglicht darüber hinaus die Analyse und Simulation der Einsparpotenziale durch Gebäudesanierung und ist Bestandteil der geltenden Rechtsvorschrift Energieeinsparverordnung (EnEV) (2009) zur energetischen Bewertung von Gebäuden. Für die Berechnung des Strom- und Warmwasserbedarfs wurden hingegen nutzungs- bzw. bewohnerabhängige statistische Verfahren gewählt.

Als Datenbasis dienen integrierte Geobasis- und statistische Daten, welche in der Regel in einer klar definierten (z. T. amtlichen) Qualität flächendeckend für eine Region zur Verfügung stehen. Zum Beispiel wurden die Hüllflächenzahlen und Volumen der Gebäude aus dem virtuellen 3D-Stadtmodell berechnet und die Einwohnerzahl sowie die Gebäudealter aus Webdiensten der Stadt Berlin bezogen. Im Anschluss an die Berechnung und Ermittlung der Eingangswerte erfolgte die eigentliche Berechnung der Energiebedarfe innerhalb einer Webapplikation. Die Webapplikation ermöglicht es, verschiedene Varianten von Maßnahmen dynamisch und in Echtzeit zu berechnen, z. B. mögliche Auswirkungen einer Gebäudesanierung auf den Energieverbrauch und die Energieeffizienz (Kaden 2016).

Schlüsselwörter: Semantische 3D-Stadtmodelle, Geobasisdaten, Energiebedarfsberechnung, CityGML

WEB-BASED ESTIMATION OF ENERGY DEMANDS AND REHABILITATION POTENTIALS OF RESIDENTIAL BUILDINGS BASED ON VIRTUAL 3D CITY MODELS

Abstract: The calculation of building energy demands is based on the hypothesis that there is a strong correlation between the energy consumption and a number of building properties, e. g. the geometrical characteristics, the structural physics and the building use. The building simulation method according to DIN V 18599 (2011) has been implemented to estimate the building heat demands within a city. This method is based on the detailed balancing of the heat losses by the individual building envelope surfaces and by the regular ventilation of a building as well as on the heat gains by solar irradiation and by internal heat sources. Additionally, this component-based method allows the analysis and simulation of saving potentials due to building refurbishments and is an integral part of the German energy saving regulation (EnEV) (2009) for the energetic evaluation of buildings. For the calculation of the electricity and warm water demand, statistical methods have been selected and implemented.

Statistical and geo data were used as data bases, which are available in a clearly defined (in some cases official) quality for a region. For example, the envelope surface areas and volumes of the buildings were calculated from the virtual 3D city model and the number of population as well as the building age were obtained from web services of the city of Berlin. The actual calculation of the energy demands was carried out within a web application. The web application facilitates to estimate different variants of measures dynamically and in real-time, e. g. the possible effects of a building rehabilitation on energy consumption and energy efficiency (Kaden 2016).

Keywords: Semantic 3D city models, geobase data, energy demand estimation, CityGML

Autor

Dr.-Ing. Robert Kaden, Postdoc
 Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
 Fakultät Geoinformation
 Friedrich-List-Platz 1
 D-01069 Dresden
 E: robert.kaden@htw-dresden.de

1 EINFÜHRUNG

Die aktuellen klima- und umweltschutzpolitischen Zielstellungen der Bundesrepublik Deutschland beinhalten weitreichende Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und umfassen umfangreiche Planungen bezüglich des Umbaus der Infrastrukturen in Städten. Ein maßgebliches Kriterium ist dabei die Gewährleistung der Energieversorgung. Entsprechend sind Informationen über den Energieverbrauch der Gebäude während der Planungen von strategischer Bedeutung, da die Infrastrukturen auf die aktuellen und zukünftigen Verbräuche sowie Lastspitzen ausgelegt sein müssen. Zwar sind tatsächliche Verbrauchsdaten innerhalb der einzelnen Energieversorger vorhanden, jedoch sind diese aufgrund von Datenschutzbestimmungen sowie wirtschaftlichen Interessen in der Regel nicht umfassend verfügbar. Um dennoch auf stadtplanerischer Ebene bedarfsoptimierte Planungen zur Umgestaltung der Energieversorgung durchzuführen, ist es erforderlich, die Energiebedarfe von Gebäuden auf der Basis geeigneter Modelle großräumig zu berechnen (Kaden & Kolbe 2014, Kaden et al. 2012, Kaden et al. 2013b). Voraussetzung für eine bedarfsgerechte Planung der Energieversorgung und zur Erstellung eines Energiekonzepts ist die Ermittlung der Energiebedarfe für die Heizwärme, Warmwasserbereitung und elektrischen Strom (Hamacher 2011).

2 MODELLE ZUR ENERGIEBEDARFSBERECHNUNG

In der Vergangenheit wurden zahlreiche Modelle zur Berechnung des Energiebedarfs entwickelt, welche sich in ihrem Detaillierungsgrad, der Komplexität, den Eingangsdaten, dem Zeitraum, der geographischen Abdeckung und der Methodik

unterscheiden (Johnston 2003). Dabei wird zwischen den zwei grundsätzlichen Modellansätzen Top-down und Bottom-up unterschieden, welche auf unterschiedlichen Hypothesen beruhen und somit ganz unterschiedliche Datengrundlagen voraussetzen.

Der Top-down-Ansatz beruht auf einem hierarchischen Aufbau mit Betrachtung von „oben nach unten“. Eingabeparameter sind häufig das Bruttoinlandsprodukt, Energiepreise und das Pro-Kopf-Einkommen sowie allgemeine klimatische Bedingungen. Top-down-Modelle eignen sich vor allem zur Darstellung und Modellierung von Szenarien und Kosten-Nutzen-Auswirkungen unterschiedlicher Emissions- und Energiegesetze (Johnston 2003). Ein wesentlicher Nachteil des Top-down-Ansatzes ist jedoch der niedrige Detaillierungsgrad aufgrund der Sichtweise von oben nach unten. Das bedeutet, dass durch diese Verfahren keine Aussagen über feingranuläre Entitäten als die Eingangsgrößen getroffen werden können, z.B. zur Identifizierung von Gebieten oder Objekten, welche zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs beitragen können. Bauphysikalische Eigenschaften, welche den Energieverbrauch maßgeblich beeinflussen, werden nicht berücksichtigt, sodass sich diese Verfahren nicht zur Untersuchung der individuellen Energiebedarfe und Energieeffizienz eignen.

Verfahren des Bottom-up-Ansatzes folgen der umgekehrten Perspektive, von „unten nach oben“, wobei Informationen mit einem hohen Detaillierungsgrad untersucht und zu einem Gesamtsystem zusammengeführt werden. Auf Basis dieser Modelle können individuelle Endenergieverbräuche von Gebäuden oder Gebäudegruppen ermittelt und auf eine ganze Region oder Stadt übertragen werden (Swan & Ugursal

2009). Diese Modelle dienen daher häufig zur individuellen Bewertung von Gebäuden oder Gebäudetypen und der Identifizierung von Sanierungsmaßnahmen bzw. Austausch von Heizungsanlagen zur Erreichung der gesetzten CO₂-Reduktionsziele (Kavgic et al. 2010). Innerhalb des Bottom-up-Ansatzes wird zwischen zwei grundlegenden Verfahren unterschieden: 1.) statistische Verfahren und 2.) bauphysikalische bzw. Gebäudesimulationsverfahren. Diese Modelle unterscheiden sich wesentlich in ihrer Komplexität und den geforderten Eingangswerten.

Statistische Bottom-up-Verfahren verknüpfen gemessene Energieverbrauchsdaten mit einer bestimmten Endnutzung. Diese Verfahren folgen der Hypothese, dass die Energieverbräuche hauptsächlich von der Funktion der Gebäude, z. B. Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus, Büro oder Schule, abhängig sind. Die verschiedenen Gebäudefunktionen werden in einer Gebäudetypologie klassifiziert. Als Eingangswerte dienen z.B. jährliche Abrechnungsinformationen von Strom-, Fernwärme- oder Gasversorgern und Informationen zur Gebäudegeometrie. Durch Regressionsanalysen werden die Zusammenhänge zwischen den Energieverbräuchen und der Endnutzung von Gebäuden für jede Gebäudeklasse ermittelt und der Energiekennwert „spezifischer Heizwärmebedarf“ in Form des durchschnittlichen Heizwärmeverbrauchs pro Quadratmeter Nutzfläche und Zeiteinheit (kWh/(m² · a)) ermittelt. Mithilfe dieser Energiekennwerte können im Anschluss die Energiebedarfe weiterer Gebäude oder Regionen ermittelt werden (Swan & Ugursal 2009).

Im Rahmen des Projekts „Energieatlas Berlin“ wurde in Carrión (2010) und Carrión et al. (2010) ein statistisches Bottom-up-Verfahren zur Berechnung des Wärmebe-

darfs von Gebäuden unter Verwendung des virtuellen 3D-Stadtmodells von Berlin beschrieben. Aus dem virtuellen 3D-Stadtmodell sowie weiteren Geodaten der Stadt Berlin wurden u. a. das beheizte Volumen, die Energiebezugsfläche (Nutzfläche), der Gebäudetyp, das Gebäudealter und die Gebäudenutzung ermittelt. Darüber hinaus waren für ca. 100 Gebäude tatsächliche Wärmeverbrauchswerte gegeben, auf dessen Grundlage die Energiekennwerte für die ermittelte Gebäudetypologie statistisch berechnet wurden.

Im Gegensatz zu den statistischen Verfahren basieren die Methoden der bauphysikalischen Bottom-up-Verfahren auf der Hypothese, dass der Energieverbrauch eines Gebäudes vor allem von der Baukonstruktion abhängig ist. Diese Verfahren werden auch Gebäudesimulationsverfahren genannt und beinhalten eine detaillierte Betrachtung der spezifischen thermischen Gebäudehülle und der Gebäudetechnik. Diese Verfahren wurden ursprünglich zur energetischen Bewertung einzelner Gebäude entwickelt und sind aufgrund der umfangreichen geometrischen Eingangsdaten bislang kaum skalierbar gewesen. Aufgrund der wachsenden Verfügbarkeit von semantischen 3D-Stadtmodellen und in Verbindung mit Geobasisdaten der öffentlichen Hand können diese Verfahren großräumig angewandt werden. Als Eingangswerte dienen eine Reihe von messbaren Eigenschaften, wie die bauphysikalischen Kennwerte Wärmedurchgangskoeffizient und Gesamtenergiedurchlassgrad der Bauteile Wand, Dach, Boden und Fenster sowie deren Flächengrößen. Darüber hinaus werden weitere Variablen, z. B. die Effizienz von Raumheizungsanlagen, Innen- und Außentemperatur, Belüftungsrate und die durchschnittliche Nutzung berücksichtigt (Kavgic et al. 2010).

Bahu et al. (2013) beschreiben die Berechnung des Wärmeenergiebedarfs von Gebäuden auf Basis der ISO NF 13790, welche eine Bilanzierung der Energieverluste durch Transmission und Belüftung sowie der Energiegewinne durch solare und interne Quellen erlaubt. In Nouvel et al. (2013) wird der Wärmebedarf eines Stadtteils ebenfalls nach der ISO 13790 und unter Verwendung von meteorologischen Daten aus der DIN V 4108-6 berechnet. Der so ermittelte Heizwärmebedarf wurde auf Basis der in der DIN V 18599-2 von

2005 definierten Bezugsflächen normalisiert und somit der spezifische Heizwärmebedarf ermittelt. In Kaden & Kolbe (2013, 2014) wurde basierend auf dem bauphysikalischen Verfahren Energiepass Heizung/Warmwasser des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) (Loga & Imkeller-Benjes 1997) der Heizwärmebedarf von Gebäuden in Berlin Moabit berechnet. Strzalka et al. (2010, 2011) beschreiben die Untersuchung und den Vergleich von zwei Verfahren zur Berechnung der Wärmebedarfe, zum einen durch den einfachen Transmissionswärmeverlust der Bauteile und zum anderen durch eine gesamte Bilanzierung aus Wärmeverlusten und Wärmegegewinnen in einem Gebäude nach DIN 18599.

3 BERECHNUNG DES HEIZWÄRMEBEDARFS NACH DIN 18599

Zur Berechnung der Heizwärmebedarfe wurde das Berechnungsverfahren nach DIN V 18599 (2011) implementiert, das auf der detaillierten Bilanzierung der Wärmeverluste durch die Hüllflächen und durch das regelmäßige Lüften bei einer bestimmten Außentemperatur sowie auf den Wärmegegewinnen durch Sonneneinstrahlung und durch innere Wärmequellen basiert. Die bauteilbasierte Methode ermöglicht darüber hinaus die Analyse und Simulation der Einsparpotenziale durch Gebäudesanierung und ist Bestandteil der geltenden Rechtsvorschrift Energieeinsparverordnung (EnEV) (2009) zur energetischen Bewertung von Gebäuden.

3.1 ERMITTLUNG ERFORDERLICHER EINGANGSWERTE

In diesem Beitrag wurde ein Untersuchungsgebiet in Berlin Moabit gewählt, für welches die entsprechenden Geobasis- und statistischen Daten zusammengetragen und die Eingangswerte ermittelt wurden. Für die Übertragbarkeit der Methoden auf andere Regionen, vor allem außerhalb der Bundesrepublik Deutschland, sind gegebenenfalls Anpassungen der Konzepte erforderlich.

Geometrische Gebäudekennzahlen

Die Berechnung der geometrischen Kennzahlen umfasst die Ermittlung der wärmeübertragenden Umfassungsflächen der thermischen Hülle sowie die Bezugsvolumina und Bezugsflächen der einzelnen Gebäude. Die Berechnungen erfolgen auf der Ba-

sis des virtuellen 3D-Stadtmodells von Berlin. Durch die semantisch aufgelöste Repräsentation in CityGML ist es möglich, einzelne Gebäude sowie ihre thematischen Begrenzungsflächen eindeutig zu identifizieren und deren geometrische Eigenschaften direkt zu berechnen.

Die wärmeübertragenden Umfassungsflächen stellen die Bilanzgrenze eines Gebäudes dar. Sie umfassen die Begrenzungsflächen der thermischen Hülle der Gebäudezonen zur Außenluft oder zu einer nicht thermisch konditionierten Gebäudezone zur Außenluft. Entsprechende Regeln zur Festlegung der thermischen Hülle in horizontaler und vertikaler Ebene werden in der DIN V 18599-1 beschrieben. Die wärmeübertragenden Umfassungsflächen werden direkt aus dem semantischen 3D-Stadtmodell berechnet und umfassen die Ermittlung der Grund-, Dach- sowie Außenwandflächen durch die Berechnung und Summierung der einzelnen Polygone der jeweiligen thematischen Flächen eines Gebäudes. Die Fensterflächen können bei der Verwendung eines semantischen 3D-Stadtmodells mit einer Detaillierungsstufe kleiner als LOD3 nicht direkt berechnet werden. Sie werden während der Bilanzierung der Heizwärme anteilig, basierend auf einem durchschnittlichen Fensterflächenfaktor, aus den Außenwandflächen ermittelt. Zur Berechnung der reinen Außenwandfläche – also die Wandflächen der Gebäude mit Angrenzung zur Luft – werden die Flächenteile zu angrenzenden Nachbargebäuden separat ermittelt und von der gesamten Wandflächenzahl subtrahiert. Da die zum Zeitpunkt der Implementierung genutzte aktuelle Version der Java Topology Suite (JTS) zur Berechnung der Überlappungsflächen benachbarter Polygone keine Analysen von 3D-Geometrien erlaubt, wurden sämtliche Berechnungen der 3D-Geometrien mithilfe einer Transformation in der 2D-Ebene durchgeführt.

Bei der Berechnung des Gebäudevolumens wird zwischen Brutto- und Nettovolumen unterschieden. Das Bruttovolumen – oder auch externes Volumen – wird durch die wärmeübertragenden Umfassungsflächen begrenzt und beinhaltet nach DIN 277-1 (2005) alle Baukonstruktionen wie Außenwände, Innenwände und Luftschächte. Das Bruttovolumen eines Gebäudes entspricht demnach dem Volumen

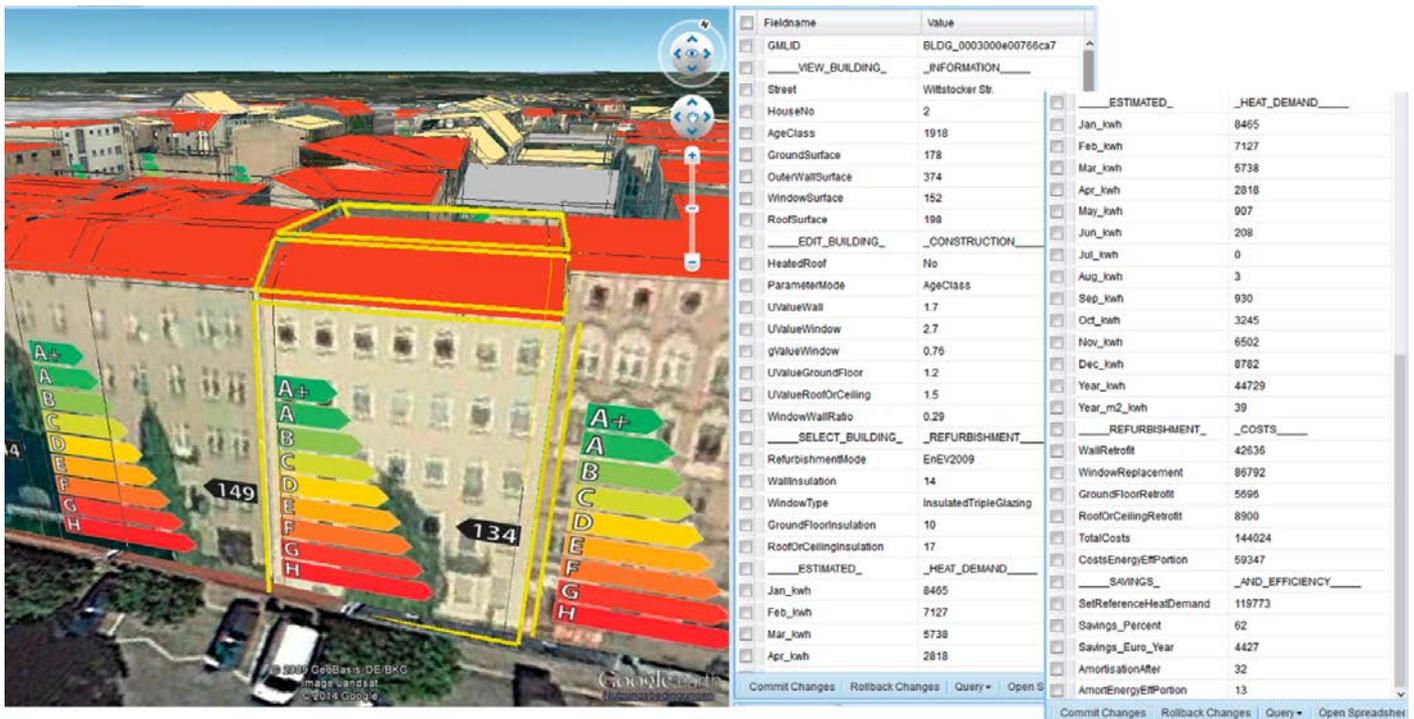


Abbildung 2: Selektiertes Gebäude mit einer Reihe von Attributen, z.B. unveränderliche Eigenschaften wie Wandflächenzahlen, veränderbare Attribute wie bauphysikalische Größen und dynamisch berechnete Werte wie Energiebedarfe

Ältere Gebäude im ursprünglichen Bauzustand weisen einen wesentlich höheren Energiebedarf auf, um eine gewisse Temperatur im Inneren aufrecht zu erhalten, als neuere Gebäude. Die Verwendung der Baualtersklasse zur Ermittlung der baukonstruktiven Kennwerte besitzt jedoch einen Nachteil. Innerhalb der Geobasisdaten der öffentlichen Hand wurden die Baujahre der Gebäude nicht flächendeckend und einheitlich erfasst und geführt, sodass diese nicht flächendeckend zur Verfügung stehen. In Berlin wurde bis 1993 eine analoge Karte geführt, welche den Gebäudebestand des innerstädtischen Bereichs gebäudescharf beinhaltet und durch Einfärbungen die Gebäude in Baualtersklassen unterteilt wurden. Diese Karte steht eingescannt als Web Map Service (WMS) im FIS-Broker (2012) der Senatsverwaltung von Berlin zur Verfügung (vgl. Abbildung 1).

Die ermittelten Baualtersklassen der Senatsverwaltung von Berlin erlauben es, Rückschlüsse auf die baukonstruktiven Kennwerte der Gebäudehüllflächen zum Bauzeitpunkt zu ziehen. Basierend auf Arbeiten von Loga et al. (2005), Jagnow (2005), BMVBS (2009), Loga et al. (2012) und Loga & Müller (2012) sowie eigener Berechnungen des Fachgebiets Gebäudetechnik und Entwerfen der TU Berlin wurden durchschnittliche Wärme-

durchgangskoeffizienten (U-Werte) für die Bauteile Wand und Fenster sowie für die Decke des obersten Vollgeschosses zum unbeheizten Dach und für den Boden des Erdgeschosses zum unbeheizten Keller definiert. Für die Berechnung der Wärmegewinne durch die transparenten Bauteile wurde ein Gesamenergiedurchlassgrad (g-Wert) für die Fenster festgelegt. Tabelle 1 zeigt die festgelegten Baualtersklassen und die definierten baukonstruktiven Kennwerte der Gebäudehüllflächen für das Untersuchungsgebiet Berlin Moabit.

Nutzungsbezogene Kennzahlen

Einen wesentlichen Einfluss auf die Berechnung der Heizwärmebedarfe besitzt die Gebäudenutzung innerhalb der Gebäudehülle. Die Information über die Nutzungsart der Gebäude wurde aus den Geobasisdaten des Landes Berlin in Form des CityGML-Attributs *function* in das semantische 3D-Stadtmodell integriert. In der DIN V 18599-10 werden für die Berechnung des Heizwärmebedarfs durchschnittliche Richtwerte für verschiedene Nutzungsarten als Nutzungsrandbedingungen definiert. Diese umfassen u. a. die Raum-Solltemperatur, die tägliche Nutzungsdauer sowie Nacht- und Wochenendabsenkungen und die nutzungsbezogenen internen Wärmequellen. Darüber hinaus werden in der DIN V 18599-10 Klimada-

ten für 15 Referenzorte definiert, welche die durchschnittliche monatliche Strahlungssintensität und die Außenlufttemperatur umfassen.

3.2 IMPLEMENTIERUNG DER METHODE ALS WEBAPPLIKATION

Im Anschluss an die Ermittlung der Eingangswerte erfolgt die Berechnung der Heizwärmebedarfe und der Sanierungspotenziale nach DIN 18599 innerhalb einer Webapplikation. Die Webapplikation ermöglicht eine Schnittstelle zwischen den komplex strukturierten semantischen 3D-Stadtmodellobjekten und den rechenintensiven Berechnungsverfahren auf der einen Seite und den für Planer und Entscheider vertrauten, einfach strukturierten Modellen der Text- und Tabellenverarbeitung auf der anderen Seite. Dies wird zum einen durch das Abbilden und Zusammenfassen von semantischen Entitäten und Eigenschaften des komplexen 3D-Stadtmodells auf einfache Tabellenstrukturen und zum anderen durch die Erstellung eines vereinfachten 3D-Visualisierungsmodells erreicht. Das 3D-Visualisierungsmodell wird mit den Tabellen der Sachinformationen in einer Cloud gespeichert und durch die Webapplikation dem Nutzer zur Analyse und Bearbeitung zur Verfügung gestellt (Yao et al. 2014).

Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt der Webapplikation. In der 3D-Visualisierung wird durch Anklicken ein Gebäude selektiert und die gebäudespezifischen Eigenschaften im Attributenfenster angezeigt. Diese umfassen unveränderliche Parameter wie GebäudelD, Anschrift, Wandflächenzahlen, Volumen und Bezugsflächengrößen sowie variable Eigenschaften wie bauphysikalische Kennwerte, Beheizungsgrad des Dachbodens und Sanierungszustand oder -ziel. Im unteren Drittel des Attributenfensters werden die dynamisch berechneten Eigenschaften wie die Energiebedarfe, Umfang notwendiger Sanierungsmaßnahmen zur Einhaltung der Sanierungsziele (nach EnEV-Vorgaben) und ungefähre Kosten der Sanierung dargestellt. Diese Werte werden entsprechend der Veränderung der variablen Attribute in Echtzeit neu berechnet und angezeigt. Diese Dynamik erlaubt es bspw. den bauphysikalischen Zustand, der zunächst aus dem Baualter abgeleitet wurde, durch gemessene Werte für jedes Bauteil individuell zu korrigieren. Notwendige Sanierungsmaßnahmen wie die erforderliche Stärke der Wärmedämmung können im Anschluss durch die Auswahl der bauphysikalischen Zielvorgaben einer beliebigen EnEV ermittelt werden.

Die Berechnungen erfolgen in einem Google Spreadsheet in Echtzeit. Die komplexen Formeln der DIN V 18599 wurden in grundlegende Algorithmen der Tabellenverarbeitung zerlegt. Das Google Spreadsheet erlaubt – analog zu Microsoft Excel – die Implementierung von mathematischen Ausdrücken einschließlich logischer Abfragen (if-then-else) sowie

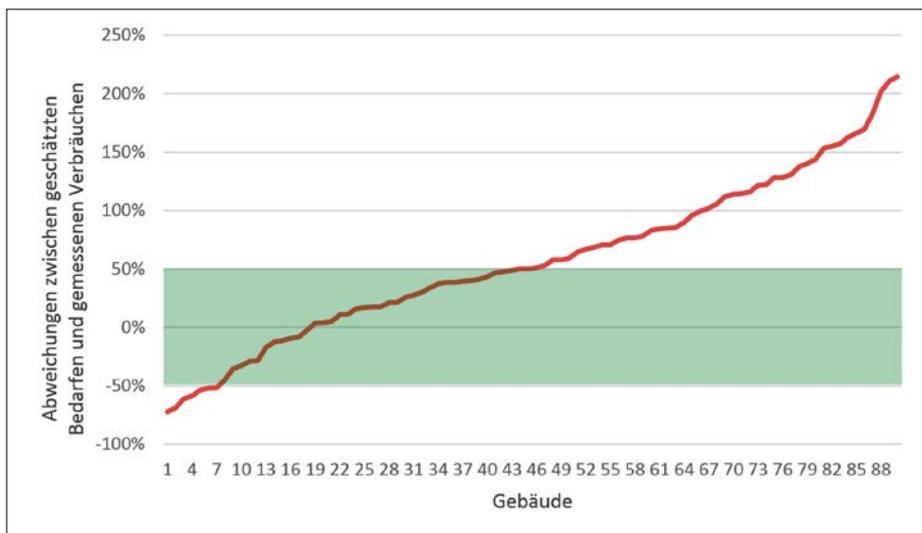


Abbildung 3: Aufsteigend sortierte Abweichungen zwischen den berechneten Heizwärmebedarfen und den gemessenen Verbräuchen für 90 Gebäude

die Referenzierung zwischen beliebigen Zellen innerhalb des Spreadsheet-Dokuments. Aufgrund der Komplexität der Berechnungen werden im Nachfolgenden die Rechenschritte kurz erläutert. Die entsprechenden Formeln wurden für die vorgestellte Methode zur Verwendung von semantischen 3D-Stadtmodellen in der Dissertation von Kaden (2016) zusammengestellt.

Für den bilanzierten Heizwärmebedarf wird die Wärmemenge zunächst für einen Tag (24 h) ermittelt. Dabei werden die Summe aller Wärmesenken und die Summe aller Wärmequellen ermittelt und über den Ausnutzungsgrad miteinander bilanziert. Der monatliche Heizwärmebedarf für Wohngebäude oder Gebäude mit durchgängiger Nutzung ergibt sich aus

der Hochrechnung der Tagessummen auf den Monat.

Der Gesamtbetrag der Wärmesenken setzt sich nach DIN V 18599-2 aus den Transmissions- und Lüftungswärmesenken sowie aus Kälteeinträgen von Lüftungsanlagen, internen Kältequellen in der Gebäudezone und den Strahlungsverlusten zusammen. Unter Berücksichtigung der festgelegten Randbedingungen, z.B. die Betrachtung eines Gebäudes als eine Gebäudezone, die Vernachlässigung von Lüftungsanlagen und internen Kältequellen sowie einen reduzierten Betrieb an Wochenenden, setzten sich die Wärmesenken aus den Transmissions- und Lüftungswärmesenken sowie den Strahlungsverlusten zusammen. Der Gesamtbetrag der Wärmequellen wird nach DIN V 18599-2 aus den

	Implementierungen dieser Arbeit	Energieberater mit „Energieberater“-Software
Kellerdecke	157 m ²	171 m ²
Außenwandfläche	351 m ²	387 m ²
Fensterfläche	105 m ²	78 m ²
Flachdach	157 m ²	171 m ²
Bruttovolumen	2553 m ³	2558 m ³
Nettovolumen	2043 m ³	2046 m ³
Bezugsfläche	817 m ²	818 m ²
Berechneter Heizwärmebedarf	90388 kWh/a	92600 kWh/a
Heizwärmebedarf pro Bezugsfläche	111 kWh/(a·m ²)	113 kWh/(a·m ²)

Tabelle 2: Gegenüberstellung der ermittelten Eingangswerte aus dem semantischen 3D-Stadtmodell und durch den Energieberater sowie die berechneten Heizwärmebedarfe für ein Gebäude in Berlin Moabit

	Anzahl Personen pro Haushalt			
	1	2	3	4 und mehr
Durchschnittlicher jährlicher Stromverbrauch [kWh/a]	2050	3440	4050	4750

Tabelle 3: Durchschnittlicher Stromverbrauch von Haushalten verschiedener Größen in der Stadt Berlin (Vattenfall 2012)

Wärmeeinträgen durch die solare Einstrahlung, aus Transmissionswärmeeinträgen, aus Lüftungswärmeeinträgen und aus internen Wärmequellen in der Gebäudezone gebildet. Unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen wurden in diesem Beitrag die solare Einstrahlung und die internen Wärmequellen berücksichtigt.

3.3 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die Validierungen der berechneten Heizwärmebedarfe bezüglich gemessener Verbräuche zeigten eine große Streuung der Abweichungen von wenigen Prozent bis hin zu weit über 100 Prozent. Abbildung 3 zeigt ein Diagramm der Abweichungen der berechneten Heizwärmebedarfe zu den gemessenen Verbrauchswerten für 90 Gebäude in Berlin, aufsteigend sortiert. Die Abweichungen zeigen, dass das Berechnungsmodell die Heizwärmebedarfe häufiger überschätzt.

Zur Validierung der EnEV-Konformität der Berechnung der Heizwärmebedarfe wurden ausgewählte Gebäude durch das Fachgebiet Gebäudetechnik und Entwerfen des Instituts für Architektur der Technischen Universität Berlin mittels der Software „Energieberater 18599 3D PLUS“ in der Version 7.2.2 (Hotgenroth 2012) energetisch bewertet. Tabelle 2 zeigt eine Auswahl und Gegenüberstellung der unabhängig voneinander ermittelten Eingangswerte und die berechneten Heizwärmebedarfe. Der Vergleich zeigte für das untersuchte Gebäude kaum Abweichungen, da beide Berechnungen auf demselben Berechnungsmodell DIN V 18599 basieren und die geometrischen Eingangswerte ähnlich ermittelt wurden.

4 BERECHNUNG DES STROM- UND WARMWASSERBEDARFS

Für die Berechnung des Strom- und Warmwasserbedarfs wurden nutzungs- bzw. bewohnerabhängige statistische Verfahren gewählt, welche auf statistisch ermittelten Energiekennwerten basieren, z.B. dem durchschnittlichen Stromverbrauch pro

Quadratmeter Wohnfläche. Da der elektrische Stromverbrauch in einem Gebäude maßgeblich von der Anzahl und Größe der Haushalte im Gebäude abhängig ist, wurden entsprechende statistische Erhebungen der Firma Vattenfall zum durchschnittlichen Stromverbrauch von Haushalten verschiedener Größen für die Stadt Berlin herangezogen und für die Berechnung des Strombedarfs genutzt (vgl. Tabelle 3).

Zur Berechnung der Anzahl der Wohneinheiten in Gebäuden wurde ein Indikator zur Quantifizierung der Anzahl von Wohneinheiten pro Kubikmeter Gebäudevolumen für jede Gebäudealtersklasse ermittelt. Zu diesem Zweck wurde eine Ortsbegehung zur Ermittlung der Wohneinheiten pro Gebäude für eine Auswahl von Gebäuden aller Baualtersklassen durchgeführt. Insgesamt wurden 374 Gebäude verschiedener Baualtersklassen, hauptsächlich im Bereich Berlin Moabit, untersucht. Im Anschluss wurde eine Auswahl an optimalen Typenvertretern pro Baualtersklasse getroffen, welche z.B. eine homogene Wohnnutzung aufwiesen und architektonisch der Mehrheit der Gebäude einer Baualtersklasse entsprachen. Mit den ausgewählten 20 Typenvertretern einer Baualtersklasse wurden separate Indikatoren (Wohneinheit/m³) für jede Baualtersklasse berechnet. Abbildung 4 zeigt die ermittelten Indikatoren als grafische Darstellung. Mithilfe der ermit-

telten Indikatoren und den Gebäudevolumen wurde die Anzahl der Wohneinheiten für alle übrigen Wohngebäude des Untersuchungsgebiets berechnet.

Die anschließende Berechnung der Haushaltsgrößen basiert zum einen auf veröffentlichten Einwohnerzahlen und zum anderen auf einer statistischen Verteilung von Ein-, Zwei-, Drei- und Mehrpersonenhaushalte der Stadt Berlin. Aufgrund des Datenschutzes werden Einwohnerzahlen in Berlin lediglich auf der Skalenebene der statistischen Blöcke bzw. homogener Stadtstrukturflächen veröffentlicht. Diese Daten des Amtes für Statistik Berlin-Brandenburg wurden über einen Web Feature Service (WFS) des FIS-Brokers, ein Portal zur Betrachtung umfangreicher Datensammlungen über das Berliner Stadtgebiet, bezogen (FIS-Broker 2012). Der verwendete Layer „Flächennutzung und Stadtstruktur 2010“ befindet sich in der Kategorie „Umweltatlas“ und beinhaltet die Anzahl der Einwohner der Stadtstrukturblöcke für ganz Berlin. Zunächst wurde die Anzahl der Bewohner eines Gebäudes unter Verwendung der Gebäudevolumina berechnet. Im zweiten Schritt wurden die ermittelten Bewohner eines Gebäudes auf die zuvor ermittelten Wohneinheiten verteilt. Als Anhaltspunkt für die Verteilung diente eine statistische Erhebung des Amtes für

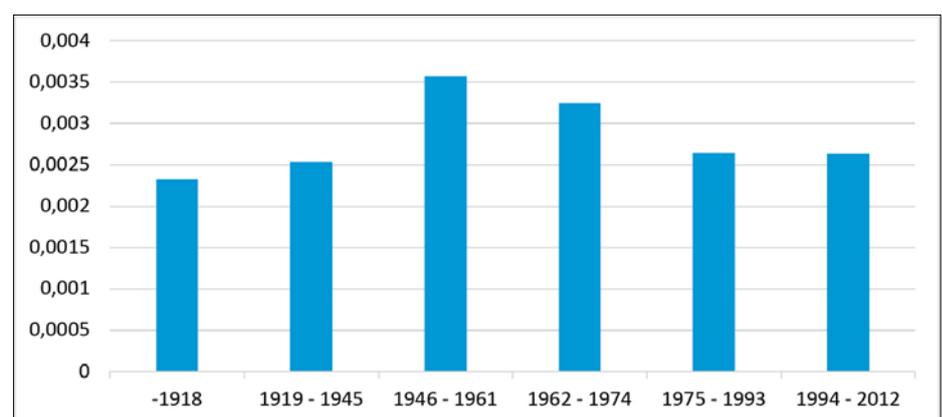


Abbildung 4: Diagrammdarstellung der ermittelten Indikatoren Wohneinheit pro Kubikmeter Gebäudevolumen für die definierten Baualtersklassen in Berlin.

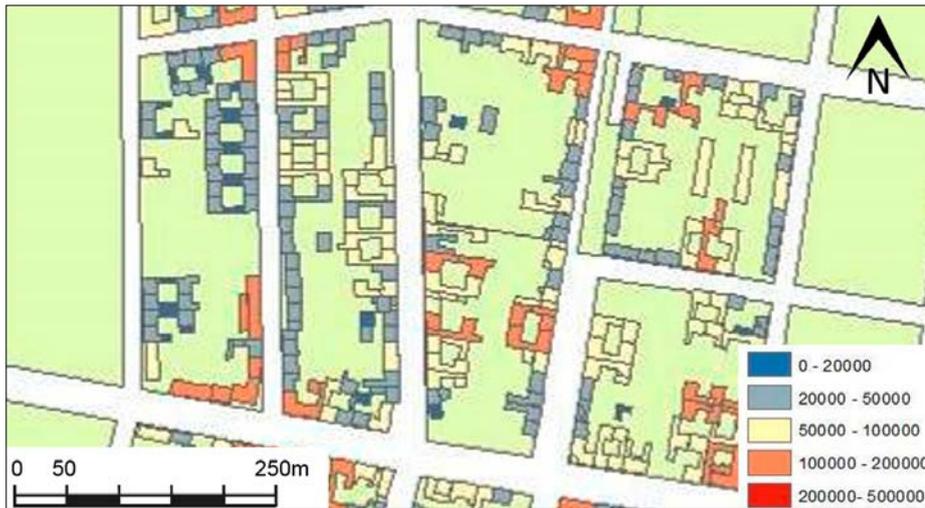


Abbildung 5: Kartendarstellung der eingefärbten Gebäudegrundrisse bezüglich des ermittelten Strombedarfs [kWh/a] in Berlin Moabit

Statistik Berlin-Brandenburg, welche das Verhältnis zwischen Ein-, Zwei-, Drei- und Mehrpersonenhaushalten in den Stadtbezirken angibt (Statistik BB 2012).

Unter Verwendung der ermittelten Anzahl an Ein-, Zwei-, Drei- und Mehrpersonenhaushalten wurde der elektrische Strombedarf für jedes Wohngebäude im Untersuchungsgebiet berechnet.

Abbildung 5 zeigt eine Kartendarstellung der ermittelten Strombedarfe in Kilowattstunden pro Jahr der einzelnen Gebäude im Untersuchungsgebiet Berlin Moabit. Die Darstellung beinhaltet ausschließlich Gebäude mit Wohnnutzung.

Der Energiebedarf zur Warmwasserbereitung in einem Gebäude ist vornehmlich von der Anzahl der Personen und ihrem Nutzerverhalten abhängig. Einige Energieversorger sowie das Institut Wohnen und Umwelt (IWU) veröffentlichten durchschnittliche Energieverbräuche für die Warmwasserbereitung pro Person. Im Untersuchungsgebiet Berlin Moabit wurde ein durchschnittlicher Verbrauch von 600 kWh/(P · a) (Loga & Imkeller-Benjes 1997) angewandt. Unter Verwendung der ermittelten Anzahl der Bewohner eines Gebäudes wurde der Energiebedarf zur Warmwasserbereitung berechnet.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Während der Umgestaltung der Energieversorgung im Rahmen der Energiewende ist die Gewährleistung der Energieversorgung der Gebäude ein wesentliches Ziel. In diesem Beitrag wurden Methoden zur

gebäudescharfen und großräumigen Berechnung der Energiebedarfe für die Heizwärme, den Strom und das Warmwasser entwickelt und implementiert. Die Berechnungen erfolgten unter Verwendung semantischer 3D-Stadtmodelle und integrierter Geobasis- und statistischer Daten der öffentlichen Hand. Um neben den Energiebedarfen auch die Einsparpotenziale an Heizwärme durch die Gebäudesanierung zu ermitteln, wurde das EnEV-konforme Gebäudesimulationsverfahren der DIN V 18599 gewählt. Die Berechnungen der Strom- und Warmwasserbedarfe wurden auf Basis statistisch ermittelter Durchschnittswerte durchgeführt. Die Eingangswerte sowie die berechneten Energiebedarfe wurden als Erweiterung der City Geography Markup Language (CityGML) modelliert. Die in der Dissertation von Kaden (2016) entwickelte Energy Application Domain Extension (EnergyADE) diente als Grundlage für die weiteren Arbeiten einer entsprechenden internationalen Arbeitsgruppe der Special Interest Group 3D (SIG 3D) und dem Open Geospatial Consortium (OGC) zur Standardisierung energiebezogener Informationen in einem virtuellen 3D-Stadtmodell. Ausführliche Informationen zu diesen Entwicklungen sind in SIG3D (2015) zu finden.

Literatur

Bahu, J.-M.; Koch, A.; Kremers, E.; Murshed, S. M. (2013): Towards a 3D Spatial Urban Energy Modeling Approach. In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. II-2/W1, ISPRS 8th 3DGeoInfo Conference & WG II/2 Workshop, 27.-29. November, Istanbul, Türkei.

BMVBS (2009): Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand vom 30. Juli 2009. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. http://www.bbsr-energieeinsparung.de/cIn_033/nn_1025012/EnEVPortal/DE/EnEV/Bekanntmachungen/Download/NWGDatenaufnahme,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/NWGDatenaufnahme.pdf, Zugriff 11/2013.

Carrión, D. (2010): Estimation of the energetic rehabilitation state of buildings for the city of Berlin using a 3D city model represented in CityGML. Masterarbeit, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, Technische Universität Berlin.

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: Proceedings of the 5th International Conference on 3D Geo-Information 2010 in Berlin, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-4/W15, S. 31-36.

DIN 277 (2005): Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau – Teil 1: Begriffe, Ermittlungsgrundlagen. Deutsches Institut für Normung, Berlin.

DIN V 18599 (2011): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung. Deutsches Institut für Normung, Berlin.

EnEV (2009): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. Bundesrechtsverordnung der Bundesrepublik Deutschland.

- FIS-Broker (2012): Geoportal Berlin. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt. <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/fis-broker>, Zugriff 06/2016.
- Hamacher, T. (2011): Geoinformationssysteme, Energiemodelle und die optimale Wärmeversorgung von Städten. In: Schilcher, M. (Hrsg.): Tagungsband 16. Münchner Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme, 21.-24. März. abcverlag, Heidelberg.
- Hottgenroth (2012): Energieberater 18599. <https://www.hottgenroth.de/M/SOFTWARE/EnergieNachweise/Energieberater-18599/Seite.html,73274,80422>, Zugriff 06/2016.
- Jagnow, K. (2005): Energetisch relevante Kennwerte eines Gebäudes. Kennwerte Außenbauteile. Weiterbildungskurs „Energieberater TGA“ in Wolfenbüttel. http://www.energieberaterkurs.de/export/sites/default/de/Dateien_Kennwerte/kennwerte_aussenbauteile.pdf, Zugriff 01/2013.
- Johnston, D. (2003): A physically-based energy and carbon dioxide emission model of the UK housing stock. Dissertationsschrift, Leeds Metropolitan University, UK.
- Kaden, R. (2016): Berechnung der Energiebedarfe von Wohngebäuden und Modellierung energiebezogener Kennwerte auf der Basis semantischer 3D-Stadtmodelle. Dissertation, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt (BGU), Technische Universität München. <https://mediatum.ub.tum.de/?id=1210304>, Zugriff 11/2016.
- Kaden, R.; Kolbe, T. H. (2013): City-Wide Total Energy Demand Estimation of Buildings using Semantic 3D City Models and Statistical Data. In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. II-2/W1, ISPRS 8th 3DGeoInfo Conference & WG II/2 Workshop, 27.-29. November, Istanbul, Türkei.
- Kaden, R.; Kolbe, T. H. (2014): Simulation-Based Total Energy Demand Estimation of Buildings using Semantic 3D City Models. In: International Journal of 3-D Information Modeling, 3 (2).
- Kaden, R.; Krüger, A.; Kolbe, T. H. (2012): Integratives Entscheidungswerkzeug für die ganzheitliche Planung in Städten auf der Basis von semantischen 3D-Stadtmodellen am Beispiel des Energieatlases Berlin. In: Seyfert, E. (Hrsg.): Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 21 (32. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 14.-17. März, Potsdam).
- Kaden, R.; Nagel, C.; Herreruella, J.; Kolbe, T. H. (2013a): Kopplung von 3D-Stadtmodellen mit Cloud-Diensten. In: Bill, R.; Flach, G.; Korduan, P.; Zehner, M.; Seip, S. (Hrsg.): Neue Horizonte für Geodateninfrastrukturen – Open GeoData, Mobility, 3D-Stadt (9. GeoForum MV, 15.-16. April, Rostock-Warnemünde). GITO, Berlin.
- Kaden, R.; Prytula, M.; Krüger, A.; Kolbe, T. H. (2013b): Energieatlas Berlin: Vom Gebäude zur Stadt – Am Beispiel zur Abschätzung der Wärmeenergiebedarfe von Gebäuden. In: Koch, A.; Bill, R.; Donaubaue, A. (Hrsg.): Geoinformationssysteme. Beiträge zum 18. Münchner Fortbildungsseminar 2013. Wichmann, Berlin/Offenbach.
- Kavgic, M.; Mavrogiani, A.; Mumovic, D.; Summerfie, A.; Stevanovic, Z.; Djurovic-Petrovic, M. (2010): A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. In: Building and Environment, 45, S. 1683-1697.
- Loga, T.; Diefenbach, N.; Knissel, J.; Born, R. (2005): Kurzverfahren Energieprofil. Ein vereinfachtes, statistisch abgesichertes Verfahren zur Erhebung von Gebäudedaten für die energetische Bewertung von Gebäuden. Endbericht des Forschungsprojekts. Bauforschung für die Praxis, Band 72, Fraunhofer IRB, Stuttgart.
- Loga, T.; Diefenbach, N.; Stein, B. (2012): Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Main Results of the TABULA project. Final Project Report, October 2012, 43 S. http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/report/TABULA_FinalReport.pdf, Zugriff 11/2013.
- Loga, T.; Imkeller-Benjes, U. (1997): Energiepass Heizung/Warmwasser. Institut Wohnen und Umwelt (IWU). http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/ephw-1.pdf, Zugriff 01/2013.
- Loga, T.; Müller, K. (2012): Evaluation of the TABULA Database Comparison of Typical Buildings and Heat Supply Systems from 12 European Countries. October 2012. http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/report/TABULA_WorkReport_EvaluationDatabase.pdf, Zugriff 11/2013.
- Nouvel, R.; Schulte, C.; Eicker, U.; Pietruschka, D.; Coors, V. (2013): CityGML-Based 3D City Model for Energy Diagnostics. In: Proceedings of BS2013. 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, 26.-28. August, Chambéry, Frankreich.
- SIG 3D (2015): Energy Application Domain Extension. Energy Working Group, Special Interest Group 3D (SIG 3D). <http://en.wiki.energy.sig3d.org>, Zugriff 11/2016.
- Statistik BB (2012): Ergebnisse des Mikrozensus im Land Berlin 2011. Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, Potsdam.
- Strzalka, A.; Bogdahn, J.; Coors, V.; Eicker, U. (2011): 3D City modeling for urban scale heating energy demand forecasting. In: HVAC&R Research, 17 (4), S. 526-539.
- Strzalka, A.; Eicker U.; Coors V.; Schumacher J. (2010): Modeling Energy Demand for Heating at City Scale. In: Proceedings of SimBuild 2010, 4th National Conference of IBPSA-USA, New York, USA.
- Swan, G. L.; Ugursal, V. (2009): Modeling of end-use energy consumption in the residential sector. A review of modeling techniques. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, S. 1819-1835.
- Yao, Z.; Sindram, M.; Kaden, R.; Kolbe, T. H. (2014): Cloud-basierter 3D-Webclient zur kollaborativen Planung energetischer Maßnahmen am Beispiel von Berlin und London. In: Kolbe, T. H.; Bill, R.; Donaubaue, A. (Hrsg.): Geoinformationssysteme 2014. Beiträge zur Münchner 1. Gl-Runde. Wichmann, Berlin/Offenbach.
- Vattenfall (2012): Energie sparen – Stromverbrauch prüfen. http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2013/21507/pdf/Stromverbrauch_pr_fen_22159646.pdf, Zugriff 05/2014.