

Energieatlas Berlin: Vom Gebäude zur Stadt – Am Beispiel zur Abschätzung der Wärmeenergiebedarfe von Gebäuden

Robert KADEN¹, Michael Prytula², Andreas Krüger² und Thomas H. KOLBE¹

¹Lehrstuhl für Geoinformatik · Technische Universität München · Arcisstraße 21 · 80333 München
E-Mail: {robert.kaden, thomas.kolbe}@tum.de

²Technische Universität Berlin · Straße des 17. Juni 135 · 10623 Berlin
E-Mail: {michael.prytula, andreas.krueger}@tu-berlin.de

1 Einführung

Die gegenwärtigen klima- und umweltschutzpolitischen Bemühungen beinhalten weitreichende Maßnahmen und führen zu umfangreichen Planungen bezüglich der Umgestaltung der Infrastrukturen in Städten. Ein klimapolitisches Ziel der Stadt Berlin ist beispielsweise die Senkung der CO₂-Emissionen um 40 Prozent bis zum Jahr 2020, was vor allem durch die Einbringung erneuerbarer Energien und durch die Steigerung der Energieeffizienz des Bestandes erreicht werden soll. Im Fokus des Berliner Umweltentlastungsprogrammes (UEP) (SENGUV 2011) stehen die Gebäude und ihr Wärmeenergiebedarf, welcher einen Anteil von bis zu 80% am Gesamtenergiebedarf eines Gebäudes ausmacht und sich auf bis zu 40% des gesamten städtischen Energiebedarfes summiert (AGEB 2012). Schwerpunkte des Berliner UEP sind daher die energetische Gebäudesanierung und die Nutzung erneuerbarer Energien zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Senkung der CO₂-Emissionen.

Die verschiedenen Maßnahmen zur Erfüllung der klima- und umweltschutzpolitischen Ziele führen zu großen Herausforderungen in Bezug auf die Planung von Anlagen und Infrastrukturen. Planungen umfassen beispielsweise die Standortwahl von neuen energieerzeugenden Anlagen wie Photovoltaik, Geothermie und Blockheizkraftwerke, die breite Einführung von E-Mobilitätslösungen und den damit verbundenen Netzausbau sowie die Planung großräumiger energetischer Gebäudesanierungen. Nicht selten widersprechen sich jedoch die möglichen Maßnahmen der Energiewende und der klima- und umweltschutzpolitischen Ziele, z.B. führt der Betrieb von Kohlekraftwerken oder auch Blockheizkraftwerken zu einem Anstieg der CO₂- und Feinstaubemissionen und die Verbreitung von E-Mobilität führt zu einem Anstieg des Strombedarfes in den Innenstädten. Durch die Nutzung erneuerbarer Energien, z.B. Photovoltaik, kann der steigende Strombedarf in den Innenstädten zum Teil kompensiert werden. Diese Beispiele verdeutlichen, dass die Planungen ganzheitlich erfolgen müssen, um ein Optimum aller Maßnahmen in Bezug auf die Gesamtbilanz von Energiebedarf, -produktion und Schadstoffreduktion zu ermöglichen. Darüber hinaus müssen weitere Aspekte wie z.B. die Sicherheit der Energieversorgung, stadtplanerische Vorgaben, Bauvorschriften, Akzeptanz durch die Bürger, Prognosen über die Stadtentwicklung sowie das Verhältnis zwischen Kosten und Nutzen in die Betrachtung und Planung einfließen (KADEN et al. 2012).

2 Energieatlas Berlin

Die strategische Planung der verschiedenen Maßnahmen erfordert eine ganzheitliche Betrachtung und die Verknüpfung von umfangreichen und vielschichtigen Informationen in einem gemeinsamen Informationsmodell. Zu diesem Zweck wurde die Initiative „Energieatlas Berlin“ durch Vertreter der Wissenschaft, Energiewirtschaft und Verwaltung initiiert und durch das *Knowledge and Innovation Center for Climate Change and Mitigation* (Climate KIC), *European Institute of Innovation and Technology* (EIT) gefördert.

Basierend auf dem semantischen Informationsmodell von CityGML (KOLBE 2008) ermöglicht der Energieatlas Berlin die Gestaltung einer integrativen, gemeinsamen Ontologie zur räumlich-semantischen Repräsentation der Stadtstruktur einschließlich energierelevanter Informationen verschiedener Fachdisziplinen (KADEN et al. 2012). Als Datenbasis dient das virtuelle 3D-Stadtmodell von Berlin (vornehmlich LOD2-Gebäudemodelle), welches durch Fachinformationen der beteiligten Akteure und Disziplinen angereichert wird (vgl. Abbildung 1 links). Darüber hinaus wurde im Rahmen des Schwesterprojektes *Neighbourhood Demonstrator* ein virtuelles 3D-Stadtmodell für ein Testgebiet in London erstellt und die entwickelten Konzepte aus dem Energieatlas Berlin überführt (vgl. Abbildung 1 rechts).



Abb. 1: Links: Virtuelles 3D-Stadtmodell von Berlin mit texturierten Gebäuden und Dacheinfärbungen bezüglich ihrer Eignungsklasse für Photovoltaikanlagen sowie farbigen Bezirksgrenzen als transparente Bodentextur, Rechts: Virtuelles 3D-Stadtmodell von London im Urzustand mit gewähltem (highlighted) Gebäude und Informationsballon.

Das thematische Modell von CityGML stellt bereits einen Großteil der benötigten Klassen und Attribute, z.B. zur semantisch aufgelösten Repräsentation der Gebäude mit ihren thematischen Flächen *WallSurface*, *RoofSurface* und *GroundSurface* (vgl. Abbildung 2) sowie zur Beschreibung der Dachform, Nutzungsart und Höhe der Gebäude, bereit. Fachspezifische Entitäten, welche nicht durch entsprechende CityGML-Klassen und -Attribute abgebildet werden können, werden durch die in CityGML bereitgestellten Erweiterungsmecha-

nismen *Application Domain Extension* (ADE) sowie generische Objekte und Attribute in den Energieatlas integriert (KADEN et al. 2012; KRÜGER und KOLBE 2012). Durch die Flexibilität der thematischen Repräsentation nahezu beliebiger Objekte mit einem Raumbezug sowie die möglichen Detaillierungsgrade und Skalenebenen erweist sich CityGML als ein ideales Informationsmodell für ein gemeinsames *Engineering Data Backbone* zur Umwelt- und Energieplanung. Dieses „Datenrückgrat“ beinhaltet zum einen die Repräsentation des Ist-Zustandes der umwelt- und energierelevanten Objekte und Parameter im Sinne einer Inventur und zum anderen die Untersuchung und Darstellung von Handlungsoptionen wie die Gegenüberstellung von geschätzten Energiebedarfen und den Ertrags- und Einsparpotentialen, z.B. durch erneuerbare Energien und der energetischen Gebäudesanierung einschließlich der ökonomischen Bilanzierung der Maßnahmen.

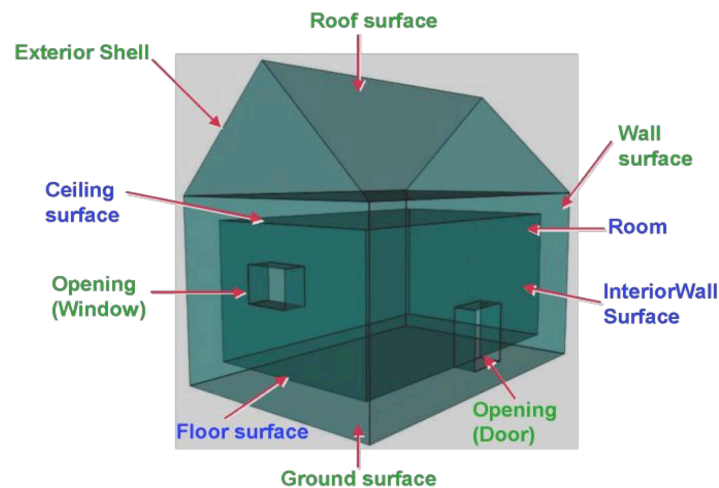


Abb. 2: Semantisch aufgelöstes Gebäude in CityGML mit seinen äußeren Begrenzungsflächen (grün) und den Begrenzungsflächen des Innenraumes (blau) (KOLBE, 2008; GRÖGER et al., 2012).

Die Handlungsoptionen basieren auf Analysen und Simulationen unter Verwendung der geometrischen und semantischen Informationen im Energieatlas Berlin und beinhalten u.a. die Abschätzung der Strom- und Wärmeenergiebedarfe von Gebäuden und die damit verbundenen energetischen Gebäudeeigenschaften sowie -sanierungspotentiale, die Gestaltung eines optimalen Energienetzausbaus unter Berücksichtigung des Strombedarfes und Lastspitzen, die Abschätzung des Energiebedarfes und der CO₂-Emissionen durch den Verkehr sowie die Nutzung der Geothermie- und Solarenergiepotentiale. Durch die anschließende Aggregation der ermittelten Kennwerte im Energieatlas Berlin nach unterschiedlichen räumlich-thematischen Kriterien, z.B. Blöcke, Stadtteile und Bezirke, aber auch Versorgungsgebiete von Infrastrukturen, dient der Energieatlas zur Planung und Entscheidungsfindung von Maßnahmen auf unterschiedlichen Entscheidungsebenen, vom Gebäude zur Stadt (KRÜGER und KOLBE 2012).

Ein wesentliches Ziel bei den Planungen zur Umgestaltung der Infrastrukturen ist die Gewährleistung der Energieversorgung der Gebäude. Demnach sind die Energiebedarfswerte

der Gebäude während der Planung und Optimierung von Maßnahmen von großer strategischer Bedeutung, da die Infrastrukturen auf aktuelle und zukünftige Verbräuche und Lastspitzen ausgelegt sein müssen. Zwar sind tatsächliche Verbrauchsdaten innerhalb der einzelnen Energieversorger vorhanden, jedoch sind diese aufgrund von Datenschutzbestimmungen sowie wirtschaftlichen Interessen nicht umfassend verfügbar. Um dennoch auf stadtplanerischer bzw. kommunaler Ebene bedarfsoptimierte Planungen zur Umgestaltung der Energieversorgung durchführen zu können, wurden in der Vergangenheit eine Reihe von Ansätzen zur Schätzung der Energiebedarfe vorgestellt sowie im Rahmen des Energieatlases Berlin entwickelt.

2 Ausgewählte Arbeiten zur Energiebedarfsabschätzung

STRZALKA et al. (2010, 2011) beschreiben ein Verfahren zur Abschätzung des Heizenergiebedarfes auf Stadtebene unter Verwendung von Gebäudegrundflächen und LIDAR-Daten sowie weiteren Gebäude- und Wetterdaten. Es wurden aus den Gebäudegrundflächen und den Höheninformationen ein 3D-Gebäudemodell und das beheizte Volumen der Gebäude sowie das Verhältnis von Außenwand und Volumen abgeleitet. Unter Verwendung der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Bauteile bezogen auf das Gebäudealter und den Wetterdaten wurde der Heizenergiebedarf für ein Testgebiet in Stuttgart mit einem Fehler von ca. 14% abgeschätzt. NEIDHART (2007) und NEIDHART et al. (2006) beschreiben ein Verfahren zur Ableitung einer digitalen Wärmebedarfskarte. Durch ein Gebäuderekonstruktionsverfahren werden aus LIDAR-Daten Gebäudevolumina ermittelt und unter Verwendung einer Gebäudetypologie der Siedlungsstruktur werden die Wärmeenergiebedarfe für Gebäude sowie für ganze Siedlungen ermittelt und in einer Wärmebedarfskarte dargestellt.

Im Rahmen des Energieatlases Berlin wurde in CARRIÓN (2010) und CARRIÓN et al. (2010) eine Methode zur Abschätzung des Wärmeenergiebedarfes von Gebäuden unter Verwendung des virtuellen 3D-Stadtmodells von Berlin beschrieben. Dieser Ansatz basiert analog zu den o.g. Verfahren auf der Hypothese, dass eine starke Korrelation zwischen der Gebäudecharakteristik und dem Heizenergieverbrauch besteht. Aus dem virtuellen 3D-Stadtmodell wird das beheizte Volumen und die Energiebezugsfläche (Nutzfläche) sowie der Gebäudetyp, das Gebäudealter und die Gebäudenutzung ermittelt und mit Hilfe eines entsprechenden Energiekennwertes [$\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$] der Heizenergiebedarf berechnet. Durch dieses Verfahren konnten für ein Testgebiet in Berlin die Heizenergiebedarfe mit einem durchschnittlichen Fehler von ca. 19% ermittelt werden.

Ein wesentliches Problem der genannten Verfahren ist, dass der tatsächliche energetische Gebäudezustand in der Regel nicht flächendeckend bekannt ist, sodass die Schätzungen zumeist auf Energiekennwerten oder Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile zum Bauzeitpunkt basieren. Häufig sind jedoch Bauteile wie Fenster erneuert oder Außenwände gedämmt worden, wodurch sich der Heizenergiebedarf gerade bei älteren Gebäuden drastisch reduziert und die ermittelten Werte stark vom tatsächlichen Wärmeenergiebedarf abweichen können. Darüber hinaus basieren die Energiekennwerte zur Berechnung des Wärmeenergiebedarfes zumeist auf einfachen Gebäudetypologien unter der Annahme von unspezifischen Gebäudegeometrien mit durchschnittlichen Hüllflächen pro Quadratmeter Wärmebezugsfläche. Die exakten Hüllflächen haben jedoch einen wesentlichen Einfluss

auf den spezifischen Transmissionswärmeverlust eines Gebäudes und dadurch auf den ermittelten Wärmeenergiebedarf.

3 Abschätzung der Wärmeenergiebedarfe und Sanierungspotentiale im Energieatlas Berlin

Zur Steigerung der Zuverlässigkeit der ermittelten Wärmeenergiebedarfe für ein spezifisches Gebäude wurde im Energieatlas Berlin der Ansatz von CARRIÓN (2010) um eine detailliert Berechnung der Transmissionswärmeverluste der einzelnen Hüllflächen in verschiedenen Sanierungsstufen erweitert. Der Wärmeenergiebedarf eines Gebäudes wird durch eine Reihe von Parametern beeinflusst, welche bei der Berechnung berücksichtigt werden. Diese Parameter lassen sich in den sechs Kategorien klimatischer Einfluss, Gebäudegeometrie, Gebäudenutzung, Nutzerverhalten, Baukonstruktion sowie Gebäude- und Versorgungstechnik zusammenfassen. Die Gebäude- und Versorgungstechnik, welche zur Berechnung des Primärenergiebedarfes eines speziellen Energieträgers benötigt wird, wird zunächst nicht betrachtet. Als Ergebnis der hier gezeigten Abschätzung wird der Nutzenergiebedarf Raumwärme nach dem Verfahren „Energiepass Heizung/Warmwasser“ des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) (LOGA und IMKELLER-BENJES 1997) berechnet.

3.1 Ermittlung der Eingangswerte

Klimadaten

Zur Beschreibung des klimatischen Einflusses können Durchschnittswerte der vergangenen Jahre einer Region dienen oder reale Wetterdaten genutzt werden. Als Eingangsparameter dient die so genannte Gradtagzahl nach VDI 2067 (VDI 2000), welche in Gradstunden Θ [kKh/a] in die Berechnung einfließt. Für die Stadt Berlin wurden ein Gradstundenwert von 79 kKh/a sowie eine Länge der Heizzeit t_H [d/a] von 212 d/a berechnet, bei einer Heizgrenze von 12°C und einer mittleren Raumtemperatur von 20°C.

Gebäudegeometrie

Die Gebäudegeometrie wird dem virtuellen 3D-Stadtmodell von Berlin entnommen. Für die Berechnungen nach IWU wird zunächst die Energiebezugsfläche A_{EB} benötigt, welche die beheizte Nutz- oder Wohnfläche eines Gebäudes beschreibt. Da exakte Innenraummodelle im virtuellen 3D-Stadtmodell von Berlin nicht zur Verfügung stehen, wird die Energiebezugsfläche wie folgt abgeschätzt.

$$A_{EB} = 0,75 \cdot n_G \cdot A_{FB} \quad [m^2] \quad (1)$$

0,75	Faktor zur Abschätzung der Nutz-/Wohnfläche aus der Gebäudegrundfläche pro Geschoss
n_G	Anzahl der beheizten Geschosse
A_{FB}	Gebäudegrundfläche (aus Stadtmodell berechnet) [m ²]

Die Anzahl der beheizten Geschosse n_G wird wie folgt bestimmt:

$$n_G = n_{KG} + n_{VG} + n_{DG} \quad (2) \quad n_{KG} \quad \text{Anteil beheizter Wohnfläche im Keller zur beheizten Wohnfläche in einem Vollgeschoss } \{0 \dots 1\}$$

n_{VG}	Anzahl Vollgeschosse $\{1,2,3, \dots\}$
n_{DG}	Anteil beheizter Wohnfläche im Dach zur beheizten Wohnfläche in einem Vollgeschoss $\{0 \dots 0,75\}$

Liegen keine Angaben zum Beheizungsgrad der Keller- und Dachgeschosse vor, müssen Annahmen getroffen werden. Im Fall der innerstädtischen Berliner Bebauung mit mehrstöckigen Mehrfamilienhäusern ist der Keller in der Regel nicht beheizt. Häufig handelt es sich auch bei den Dachgeschossen um unbeheizte Dachböden, weshalb die Dachgeschosse ebenfalls als unbeheizt eingestuft wurden. Die Anzahl der Geschosse n_G entspricht somit für die weiteren Berechnungen im Energieatlas Berlin der Anzahl der Vollgeschosse n_{VG} . Da die Anzahl der Vollgeschosse der Gebäude im virtuellen 3D-Stadtmodell von Berlin nicht enthalten sind, wird diese unter Verwendung der im Stadtmodell vorhandenen Gebäudehöhe bzw. Traufhöhe errechnet, wobei der Höhenwert durch die baualterstypische Geschosshöhe dividiert wird. In CARRIÓN (2010) wird eine weitere Methode zur Berechnung der Energiebezugsfläche nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2007 beschrieben. Diese Methode basiert auf dem Gebäudevolumen und der Geschosshöhe und kann je nach Daten- bzw. Informationsverfügbarkeit ebenso verwendet werden.

Zur Berechnung der Transmissionswärmeverluste werden die Flächenzahlen A_i der einzelnen Bauteile i {Dach, Außenwand, Fenster, Kellerwand} eines Gebäudes benötigt. Aufgrund der Vereinfachung, dass die Keller- und Dachgeschosse als unbeheizt betrachtet werden, kann auf die Berechnung der Dach- und Kellerwandflächen verzichtet werden. Stattdessen dient die horizontale Grundfläche des Gebäudes als Abschluss des Erdgeschosses zum unbeheizten Keller sowie des letzten Obergeschosses zum unbeheizten Dachboden. Die benötigten Flächenzahlen für die Grundfläche und die Außenwandfläche wurden aus dem semantischen 3D-Stadtmodell berechnet. Zur Außenwandfläche zählen nur die Flächenteile, welche an die Außenluft grenzen, jedoch nicht an Nachbargebäude. Da das virtuelle 3D-Stadtmodell von Berlin vornehmlich LOD2-Gebäudemodelle beinhaltet, können die exakten Fensterflächenzahlen eines Gebäudes nicht aus dem Energieatlas Berlin errechnet werden. Die Fensterflächenzahl kann in Abhängigkeit zur Gebäudetypologie geschätzt werden und wird im folgenden Kapitel dargestellt.

Zur Berechnung der Lüftungswärmeverluste wird das Luftvolumen V_L des Gebäudes benötigt. Das Luftvolumen ist das Produkt aus der Energiebezugsfläche A_{EB} und der mittleren (lichten) Raumhöhe der jeweiligen Gebäudetypologie. Wie in CARRIÓN (2010) kann das Luftvolumen auch aus dem virtuellen 3D-Stadtmodell berechnet werden.

Definition der baukonstruktiven Kennwerte

Als Anhaltspunkt zur Ermittlung der Baukonstruktion, insbesondere der bauphysikalischen Eigenschaften der Gebäudehüllflächen, dient die Baualtersklasse eines Gebäudes, welche im Energieatlas Berlin für einen Großteil der Gebäude zur Verfügung steht. Zur Berechnung der Transmissionswärmeverluste werden die Wärmedurchgangskoeffizienten U_i (U-Werte) der einzelnen Bauteile benötigt. Der U-Wert ist ein Maß für den Wärmedurchgang durch einen Bauteil in $W/(m^2K)$. Er drückt aus, welche Leistung pro Quadratmeter eines Bauteils auf einer Seite benötigt wird, um eine Temperaturdifferenz von einem Kelvin aufrecht zu erhalten. Drückt man die Leistung als Energie pro Zeiteinheit aus, kann vereinfacht gesagt werden, dass der U-Wert die Energiemenge angibt, welche pro Zeiteinheit durch ein Bauteil fließt.

Die ersten systematischen Untersuchungen zur Ermittlung des Energiesparpotenzials durch Wärmeschutzmaßnahmen des deutschen Gebäudebestandes wurden durch das Institut Wohnen und Umwelt (IWU) durchgeführt (EBEL et al. 1991). Auf der Grundlage von Typenvertretern und deren baualterstypischen Konstruktionsweisen, Fensterflächenanteil und anderen Charakteristiken wurde der Wärmebedarf abgeschätzt und in einer Matrix von Gebäudetypologien und Baualterklassen abgebildet. Baualterklassen werden seither häufig für Untersuchungen des urbanen Energieverbrauchs in Deutschland genutzt und im Rahmen des TABULA-Projekts wurde eine vergleichbare Studie auf europäischer Ebene erstellt (LOGA et al. 2012). Bundesweit gibt es jedoch keine einheitliche Regelung zur zeitlichen Klassifizierung der Gebäudealter. In den Geobasisdaten der Berliner Senatsverwaltung wurden die Gebäude zu neun Baualterklassen zugeordnet, welche im Rahmen des Energieatlases Berlin zu sechs Klassen mit ähnlichen baukonstruktiven Kennwerten zusammengefasst wurden (vgl. Tabelle 1). Aufgrund der fehlenden Fortführung der Baualterkarte nach 1993 wurde der Zeitraum 1994-2012 zu einer Baualterklasse zusammengefasst, obwohl gerade in diesem Zeitraum durch gesetzliche Regularien wie der Wärmeschutz- bzw. Energieeinsparverordnungen (WschVO und EnEV) eine detailliertere Differenzierung notwendig wäre.

Bei den Hüllflächen wird nach opaken und transparenten Flächen unterschieden. Die Bauteile opaker Flächen haben zumeist einen geringeren Wärmedurchgangskoeffizienten als transparente Bauteile, welche wiederum Wärmegewinne ermöglichen, die in der Wärmebilanz berücksichtigt werden müssen. Daher ist es notwendig, die Fenster-Wand-Flächenverhältnisse eines Gebäudes zu ermitteln. Hierfür wurden mehr Gebäudetypenvertreter verschiedener Baualterklassen untersucht und die durchschnittlichen Fenster-Wand-Verhältnisse errechnet (vgl. Tabelle 1). Bezogen auf die Baualterklassen wurden durchschnittliche Wärmedurchgangskoeffizienten (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 für den Energieatlas Berlin definiert. Zur Berechnung der Wärmegewinne der transparenten Flächen wurde für das Bauteil Fenster ein Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) festgelegt (vgl. Tabelle 1) (LOGA et al. 2005; JAGNOW 2005; BMVBS 2009; LOGA et al. 2012).

Tabelle 1: Übersicht über die definierten Baualterklassen mit den bauteilbezogenen U-Werten, g-Wert sowie den Fenster-Wand-Flächenverhältnissen.

BAK	Zeitraum	Durchschn. U-Wert Wand [W/(m ² K)]	Durchschn. U-Wert Fenster [W/(m ² K)]	Durchschn. g-Wert Fenster	Durchschn. U-Wert Dach [W/(m ² K)]	Durchschn. U-Wert Kellerdecke [W/(m ² K)]	Fenster-Wand-Flächenverhältnisse	mittleres Fenster-Wand-Flächenverhältnis
1	bis 1918	1,70	2,7	0,76	1,50	1,20	0,25 – 0,34	0,30
2	1919 – 1945	1,70	2,7	0,76	1,50	1,20	0,20 – 0,35	0,25
3	1946 – 1961	1,40	2,7	0,76	1,30	1,00	0,20 – 0,31	0,23
4	1962 – 1974	1,20	2,7	0,76	1,10	0,84	0,20 – 0,42	0,28

5	1975 – 1993	0,80*	2,7	0,76	0,45	0,60	0,20 – 0,40	0,33
6	1994 – 2012	0,40*	1,7	0,72	0,30	0,40	0,30 – 0,50	0,35

* Gebäudebestand ist nicht differenziert nach WschVO- (ab 1984) und EnEV-Standards (ab 2002) erfasst

Im Energieatlas Berlin wird der Transmissionswärmeverlust der einzelnen Bauteile eines Gebäudes zunächst durch die Hüllflächenzahl und dem entsprechenden Wärmedurchgangskoeffizienten des Bauteils zum Bauzeitpunkt geschätzt. Durch Instandhaltungs- und Sanierungsmaßnahmen älterer Gebäude wurden in der Regel Bauteile mit geringeren Wärmedurchgangskoeffizienten und einer verbesserten Energieeffizienz verbaut, wodurch der Transmissionswärmeverlust signifikant reduziert wird. Für jede Sanierungsstufe einer Baualtersklasse wurden analog zur oben gezeigten Tabelle baukonstruktive Kennwerte definiert.

3.2 Berechnung der Wärmeenergiebedarfe

Die Berechnung des Nutzenergiebedarfes von Gebäuden für die Raumwärme erfolgt nach dem Verfahren „Energiepass Heizung/Warmwasser“ des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) (LOGA und IMKELLER-BENJES 1997) für alle definierten Sanierungsstufen des Gebäudes gleichermaßen. Durch die Festlegung und Vorberechnung von mehreren energetischen Sanierungsstufen, welche u.a. den Austausch von Fenstern und die Wärmedämmung der Fassaden berücksichtigen, werden tatsächliche Einsparpotentiale verschiedener Maßnahmen im Energieatlas Berlin abgebildet. Dadurch besteht die Möglichkeit, verschiedene Szenarien bezüglich der energetischen Gebäudesanierung zu simulieren.

Das Berechnungsverfahren nach IWU basiert auf der detaillierten Betrachtung der Wärmeverluste durch die einzelnen Hüllflächen und durch das regelmäßige Lüften eines Gebäudes bei einer bestimmten Außentemperatur sowie auf den Wärmegewinnen durch die Sonneneinstrahlung auf Fensterflächen und durch die inneren Wärmequellen.

Der Nutzenergiebedarf Q_H eines Gebäudes wird aus der Differenz der Wärmeverluste und Wärmegewinne wie folgt berechnet.

$$Q_H = Q_V - Q_G \quad [\text{kWh/a}] \quad (3)$$

Q_V Wärmeverluste [kWh/a]
 Q_G nutzbare Wärmegewinne [kWh/a]

Die Wärmeverluste Q_V ergeben sich aus der Summe der Transmissionswärmeverluste und der Lüftungswärmeverluste, welche mit einem Faktor zur Nacht- und Wochenendabsenkung multipliziert werden. Aus der Dokumentation des IWU können Pauschalwerte für die Nachtabsenkung und für die kombinierte Nacht- und Wochenendabsenkung entnommen werden. Die angegebenen Korrekturfaktoren wurden durch dynamische Simulationen ermittelt. Für Gebäude mit vornehmlicher Wohnnutzung ist die Nachtabsenkung anzuwenden, während bei Gebäuden mit gewerblicher oder öffentlicher Nutzung die Nacht- und Wochenendabsenkung genutzt werden kann. Die Nutzungsarten der Gebäude sind im Energieatlas Berlin als CityGML-Attribut für jedes Gebäude gespeichert. –

$$Q_V = (Q_T + Q_L) \cdot f_{\text{Abs}} \quad [\text{kWh/a}] \quad (4)$$

Q_T Transmissionswärmeverluste [kWh/a]
 Q_L Lüftungswärmeverluste [kWh/a]
 f_{Abs} Faktor Nacht- Wochenendabsenkung

Der Transmissionswärmeverlust Q_T ergibt sich aus der Summe der Wärmeverluste aller Hüllflächen i . Im Energieatlas Berlin sind das die Wandfläche mit einer Verbindung zur Außenluft, die Grundfläche des Erdgeschosses zum unbeheizten Keller und die Deckenfläche des obersten Obergeschosses zum unbeheizten Dachboden.

$$Q_T = \sum (f_i \cdot U_i \cdot A_i) \cdot \Theta \quad [\text{kWh/a}] \quad (5)$$

f_i	Reduktionsfaktor
U_i	U-Wert des Bauteils i [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
A_i	Fläche des Bauteils i [m^2]
Θ	Gradstunden [kKh/a]

Nach IWU beträgt der Reduktionsfaktor f_i 1,0 für alle Bauteile, welche an die Außenluft grenzen und 0,5 für alle Bauteile, welche an einen Kellerraum, das Erdreich oder eine andere unbeheizte, jedoch gut gegen die Außenluft isolierte Gebäudezone grenzen.

Die Lüftungswärmeverluste Q_L entstehen durch den natürlichen Luftwechsel für verschiedene Gebäudenutzungen. Die Nutzungsarten der Gebäude sind im Energieatlas vorhanden und dienen zur Selektion des Pauschalwertes n aus der Dokumentation des IWU für den energetisch wirksamen Luftwechsel. Ein mechanischer Luftwechsel durch eine Lüftungsanlage wird im Energieatlas Berlin nicht betrachtet.

$$Q_L = 0,34 \cdot n \cdot V_L \cdot \Theta \quad [\text{kWh/a}] \quad (6)$$

n	energetisch wirksamer Luftwechsel [$1/\text{h}$]
V_L	Luftvolumen Gebäude [m^3]

Im Anschluss an die Berechnung der Wärmeverluste werden die nutzbaren Wärmegewinne ermittelt. Der als Heizwärmebeitrag nutzbare Wärmegewinn Q_G ist der nutzbare Anteil η_F der freien Wärme Q_F .

$$Q_G = \eta_F \cdot Q_F \quad [\text{kWh/a}] \quad (7)$$

η_F	nutzbarer Anteil der freien Wärme
Q_F	freie Wärme

Die freie Wärme Q_F setzt sich aus den inneren Wärmequellen Q_I und der solaren Einstrahlung Q_S zusammen.

$$Q_F = Q_S + Q_I \quad [\text{kWh/a}] \quad (8)$$

Q_S	solaren Einstrahlung
Q_I	innere Wärmequellen

Der Ausnutzungsgrad Freie Wärme η_F beschreibt den Anteil der freien Wärme, der für die Raumheizung genutzt wird. Er ist abhängig vom Verhältnis des Angebots an freier Wärme zu den Wärmeverlusten des Gebäudes.

$$\eta_F = 1 - 0,3 \cdot (Q_F/Q_V) \quad (9)$$

Der solare Wärmeeintrag Q_S der Fensterflächen wird in Abhängigkeit der Himmelsrichtung i {Ost, Südost, Süd, Südwest, West, Nordwest, Nord, Nordost} berechnet. Für die Globalstrahlung G_i während der Heizzeit (Heizgrenze 12°C) können die in der Dokumentation des IWU bereitgestellten Pauschalwerte genutzt werden.

$$Q_S = r \cdot g_s \cdot \sum (G_i \cdot A_{F,i}) \quad [\text{kWh/a}] \quad (10)$$

G_i	Globalstrahlung während der Heiztage auf Fläche mit Orientierung i [$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$]
$A_{F,i}$	Fensterfläche mit Orientierung i [m^2]

g_s	Energiedurchlassgrad der Verglasung
r	Reduktionsfaktor für Minderung solarer Strahlung durch das Fenster (Standardwert: 0,36, unverschattete Lage: 0,48)

Für die Berechnung des solaren Wärmeeintrages werden die Fensterflächenzahlen $A_{F,i}$ nach der Ausrichtung der Fenster zur Himmelsrichtung i {Ost, Südost, Süd, Südwest, West, Nordwest, Nord, Nordost} benötigt. Da die Fenster der Gebäude im virtuellen 3D-Stadtmodell von Berlin nicht explizit modelliert sind, wird im Energieatlas Berlin eine Vereinfachung getroffen. Die Fensterflächen mit Orientierung $A_{F,i}$ werden durch die geschätzte Gesamtfensterfläche A_F und die richtungsabhängige Globalstrahlung durch einen Mittelwert von 240 kWh/(m²a) für die vertikalen Fensterflächen ersetzt. Die o.g. Formel zur Berechnung des solaren Wärmeertrages vereinfacht sich dadurch wie folgt:

$$Q_S = r \cdot g_s \cdot 240 \cdot A_F \quad [\text{kWh/a}] \quad (11)$$

Der Reduktionsfaktor r (Standardwert: 0,36, bei unverschatteter Lage: 0,48) ergibt sich aus der Multiplikation der einzelnen Reduktionsfaktoren:

- zur Berücksichtigung des nicht-transparenten Anteils der Fensterflächen (Standardwert: 0,70)
- zur Berücksichtigung der Beschattung durch Nachbargebäude, Bäume, etc. (Standardwert: 0,63, bei unverschatteter Lage: 0,84)
- zur Berücksichtigung der Verschmutzung (Standardwert: 0,95)
- zur Berücksichtigung der verminderten Transmission bei nicht-senkrechttem Strahlungseinfall (Standardwert: 0,85)

Die g_s -Werte der Fenster sind abhängig vom Fenstertyp und sind Bestandteil der baukonstruktiven Kennwerte und Sanierungsstufen.

Die Berechnung der inneren Wärmequellen Q_I basiert auf Pauschalwerten für die spezifische Wärmeabgabeleistung der inneren Wärmequellen für verschiedene Gebäudenutzungen. Die Pauschalwerte in Abhängigkeit der Nutzungsart können der Dokumentation des IWU entnommen werden.

	0,024	Faktor zur Umrechnung von Watt auf Kilowatt und von Tag auf Stunden
$Q_I = 0,024 \cdot q_i \cdot t_H \cdot A_{EB} \quad [\text{kWh/a}] \quad (12)$	q_i	Spezifische Wärmeabgabeleistung innerer Wärmequellen [W/m ²]
	t_H	Länge der Heizperiode [d/a]
	A_{EB}	Energiebezugsfläche

Die Algorithmen zur Berechnung des Wärmeenergiebedarfes nach IWU sowie die geometrischen Berechnungen der Bezugsflächen wurden in Java implementiert. Als Eingabedatei wird ein LOD2-Gebäudemodell nach CityGML vorausgesetzt, einschließlich der Baualtersklassen und der Nutzungsarten der Gebäude. Die baukonstruktiven Kennwerte und Sanierungsstufen der einzelnen Baualtersklassen sowie die Klimadaten der Region Berlin werden durch eine externe CSV-Steuerungsdatei bereitgestellt. Die ermittelten Wärmeenergiebedarfe der einzelnen Sanierungsstufen werden den Gebäuden in Form von CityGML-Attributen hinzugefügt und stehen somit für weitere Auswertungen in interoperabler Weise

zur Verfügung. Abbildung 3 zeigt die Visualisierung der geschätzten Wärmeenergiebedarfe einer Sanierungsstufe durch die Einfärbung der Gebäude.

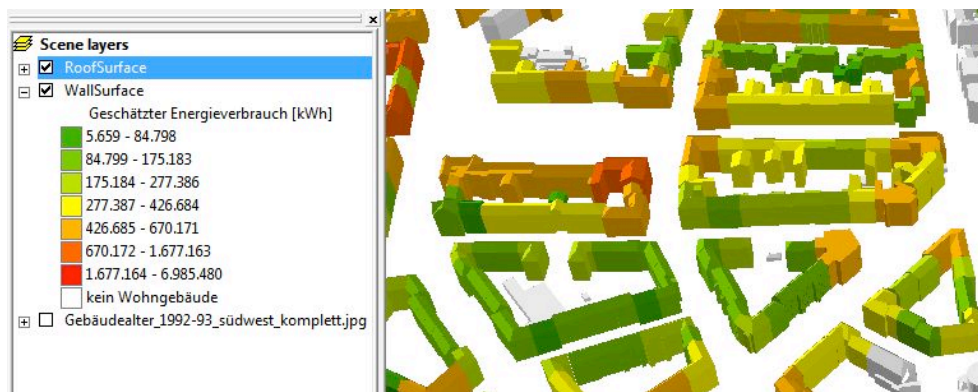


Abb. 3: Visualisierung der geschätzten Wärmeenergiebedarfe einer Sanierungsstufe durch Farbkodierung mittels ArcScene.

4 Hierarchische und multi-thematische Aggregation

Ein wesentliches Ziel des Energieatlasses Berlin ist die Entwicklung eines Werkzeuges zur Planung von Maßnahmen und zur Unterstützung der Entscheidungsfindung auf verschiedenen Maßstabsebenen. Diese reichen von der sogenannten „Ingenieursebene“ auf einzelnen Gebäuden bis hin zur kommunalen/unternehmerischen Ebene auf einem übergeordneten räumlichen Level. Die Verknüpfung der Hierarchie erfolgt durch die Aggregation der Objekte nach einer räumlich-thematischen Aggregationshierarchie, z.B. die administrative Struktur einer Stadt (Quartier, Stadtteil, Bezirk), sozio-ökonomische Hierarchien und Hierarchien unterschiedlicher Versorgungsinfrastrukturen (Versorgungsgebiete). Ein wesentlicher Vorteil der vertikalen Verknüpfung der einzelnen Entscheidungsebenen ist, dass die Auswirkungen von Maßnahmen in den unterschiedlichen Ebenen sichtbar gemacht werden können, z.B. eine Wohnungsbaugesellschaft plant auf Gebäudeebene umfangreiche energetische Sanierungen und es soll ermittelt werden, welchen Einfluss diese Maßnahmen auf die Energiebilanz des Stadtbezirkes haben. Ein weiteres Beispiel in umgekehrter Richtung ist die strategische Planung der Umsetzung der angestrebten CO₂-Reduktion auf politischer Ebene, wobei ein Stadtbezirk untersucht, welche Maßnahmen an ihren öffentlichen Gebäuden unternommen werden können, um eine festgelegte Energieeinsparung in ihrem Bezirk zu erreichen.

Diese vertikale, hierarchische Verknüpfung verschiedener Entscheidungs- und Maßstabsebenen kann im Energieatlas Berlin nach weiteren beliebigen thematischen Kriterien gleichzeitig erfolgen. Die Verknüpfung der unterschiedlichen thematischen Hierarchien erfolgt über die kleinste, gemeinsame Maßstabsebene, in der Regel auf der Ebene der Gebäude. Der wesentliche Vorteil dieser horizontalen Verknüpfung ist, dass auch die Auswirkungen von Maßnahmen auf andere Disziplinen untersucht werden können, z.B. ein Stadtbezirk beschafft sich eine größere Anzahl an Elektrofahrzeugen für den Dienstgebrauch mit

entsprechende Ladestationen an einigen öffentlichen Gebäuden und es soll ermittelt werden, welche Auswirkung diese Maßnahme auf das Stromnetz besitzt.

Die Implementierung der Aggregationshierarchien innerhalb des Energieatlasses Berlin basiert auf dem Gruppierungskonzept von CityGML. Die CityGML-Klasse *CityObjectGroup* (Gruppe von Stadtobjekten) erlaubt die Gruppierung einer beliebigen Menge an Objekten innerhalb eines Stadtmodells nach beliebigen thematischen Kriterien (GRÖGER et al., 2012). Darüber hinaus ist eine rekursive Aggregation, also die verschachtelte Gruppierung von Stadtobjekten in beliebiger Tiefe möglich. Die zur Aggregation herangezogenen Kriterien können zum einen räumlich, z.B. entsprechend der räumlichen Stadtstruktur Gebäude – Block – Stadtteil – Stadt, und zum anderen thematisch sein, z.B. entsprechend der Gebäudetypologie oder des Gebäudealters. Räumliche und thematische Kriterien lassen sich ebenso kombinieren, z.B. zur Aggregation von Gebäuden innerhalb eines Versorgungsgebietes, welche an ein bestimmtes Fernwärmenetz angeschlossen sind. CityGML erlaubt für alle *CityObjectGroups* die Vergabe von einem oder mehreren Namen, die Zuordnung spezifischer Attribute sowie die Speicherung der abgrenzenden Geometrie im Fall einer Aggregation anhand von räumlichen Kriterien. Dadurch ist es möglich, einer Gruppe von Stadtobjekten aggregierte Attributwerte der „Kindobjekte“, z.B. durch Summation oder Mittelung, zuzuordnen. Innerhalb eines virtuellen 3D-Stadtmodells lassen sich auf diese Weise verschiedene thematische Aggregationshierarchien gleichzeitig abbilden, wobei ein Objekt Bestandteil verschiedener thematischer Aggregationen sein kann (vgl. Abbildung 4).

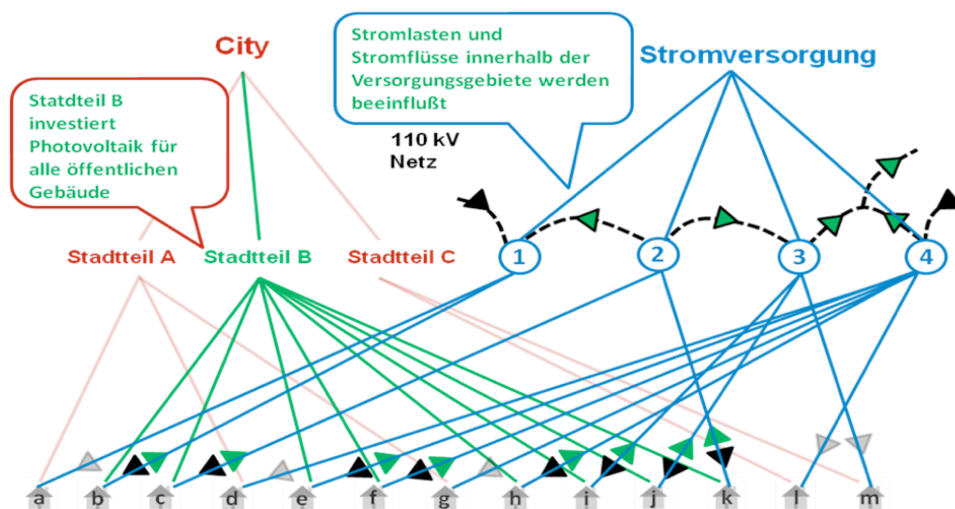


Abb. 4: Zwei thematische Aggregationshierarchien und ihre Verknüpfung über die Gebäude (unterste Ebene), wobei die Auswirkungen der Installation von Photovoltaik im Stadtteil B auf die Versorgungsgebiete/Transformatoren 1-4 propagiert werden können.

Abbildung 4 verdeutlicht das Konzept an einem Beispiel, in welchem die Auswirkungen von umfangreichen Installationen von Photovoltaikanlagen in einem Stadtteil und die massive Einspeisung von Stromflüssen und Lastspitzen auf die Stromversorgungsinfrastruktur

abgeschätzt werden sollen. In der Regel überlappen dabei die administrativen Grenzen von Stadtteilen und die sogenannten Versorgungsgebiete von Transformatoren des Stromnetzes. Im Beispiel werden zwei entsprechende Aggregationshierarchien für die administrativen Grenzen der Stadt und der Versorgungsgebiete des Stromnetzes gezeigt, wobei die Gebäude als kleinste gemeinsame Maßstabsebene (Gebäude als Bestandteil der Stadt und als Verbraucher der Stromnetzstruktur) anhand ihrer räumlichen Zugehörigkeit Bestandteil beider Hierarchien sind. Alle thematischen Attribute jedes Gebäudes können in beiden Hierarchien aggregiert werden, wodurch über die Gebäudeobjekte eine Verbindung zwischen den beiden Themenbereichen oder Disziplinen entsteht und fachübergreifende Untersuchungen ermöglicht werden. Im Beispiel werden die Auswirkungen auf das Stromnetz, z.B. Senkung des Strombedarfs, Einspeisung der gewonnenen Energie, ggf. Umkehrung des Stromflusses und Veränderung der Netzlast, untersucht, indem die Erzeugungspotentiale der betreffenden Gebäude des Stadtteils in die verschiedenen Versorgungsgebiete und somit an die Lastpunkte des Stromnetzes propagiert werden (KRÜGER und KOLBE, 2012).

Abbildung 5 zeigt die Visualisierung der aggregierten Photovoltaikpotentiale, welche auf Gebäudeebene berechnet und für die Stadtbezirke aggregiert wurden. Die Erzeugung der Visualisierungen im KML/COLLADA-Format erfolgt direkt aus der „3DCityDB“ unter Verwendung der Software „3DCityDB Importer/Exporter“ [<http://www.3dcitydb.net/>]. Die Darstellung in Abbildung 5 erfolgt in Google Earth unter der Verwendung von Informationsballons, welche sich durch Klicken auf den jeweiligen Stadtbezirk öffnen.

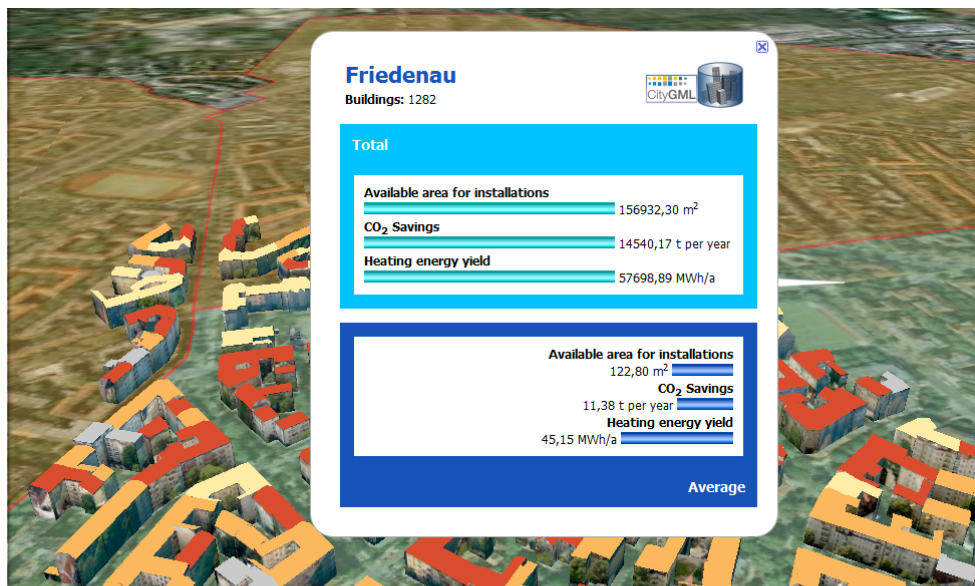


Abb. 5: Visualisierung der aggregierten Photovoltaikpotentiale für den Stadtbezirk Friedenau, zum einen als summierte Werte und zum anderen als Durchschnittswerte.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde das Konzept des Energieatlases Berlin vorgestellt. Es wurde gezeigt, dass die strategische Umwelt- und Energieplanung innerhalb von Städten durch unterschiedliche Themenbereiche beeinflusst wird, welche fachübergreifend als komplexes System zusammenwirken und gemeinsam während der Planungen von Maßnahmen zur Umgestaltung der Energieversorgung betrachtet werden müssen. Es ist daher notwendig, umfangreiche und vielschichtige Informationen in einem gemeinsamen Datenbestand zusammenzuführen. Der Energieatlas Berlin stellt dafür auf der Basis des semantischen Informationsmodells von CityGML eine gemeinsame, integrative Ontologie zur Verfügung. Diese Datenbasis dient zum einen zur Repräsentation des Ist-Zustandes und als Basis für fachübergreifende Analysen und Simulationen sowie als Visualisierungsplattform zur Repräsentation der Ergebnisse zur Entscheidungsunterstützung. Während der Umgestaltung der Energieversorgung im Rahmen der Energiewende ist ein wesentliches Ziel die Gewährleistung der Energieversorgung der Gebäude. Zu diesem Zweck wurde ein Verfahren zur Abschätzung des Wärmeenergiebedarfes verschiedener Sanierungsstufen auf der Basis des Energieatlases Berlin vorgestellt. Es ist dadurch möglich, die Einsparpotentiale durch die energetische Gebäudesanierung zu ermitteln. Durch die hierarchische und multi-thematische Aggregation der ermittelten Energiewerte und -einsparpotentiale sowie der Energiepotentiale erneuerbarer Energien und weiterer energierelevanter Parameter im Energieatlas Berlin können die Auswirkungen geplanter Maßnahmen auf die verschiedenen Entscheidungsebenen sowie auf andere Disziplinen und Akteure analysiert werden.

Die Methoden und Implementierungen des Energieatlases Berlin werden stetig weiterentwickelt und ausgebaut und auf weitere Städte wie London übertragen. Derzeit werden die baukonstruktiven Kennwerte der Sanierungsstufen ausführlich definiert bzw. ergänzt und die Wärmeenergiebedarfe aller Sanierungsstufen berechnet sowie die Ergebnisse validiert. Darüber hinaus werden Methoden zur Abschätzung des Strombedarfes der Gebäude entwickelt und implementiert. Bislang sind die ermittelten Wärmeenergiebedarfe sowie die im Energieatlas Berlin bereits enthaltenen Ergebnisse der Solarpotentialanalyse Jahreswerte, welche sich zur Simulation der Energieversorgung nur unzureichend in Verbindung bringen lassen, da das Erzeugungspotential z.B. von Wärme durch Solarthermie im Sommer sehr hoch ist, jedoch der Wärmeenergiebedarf im Winter am größten ist. Die weiteren Arbeiten im Energieatlas Berlin beinhalten daher die Berechnung und die zeitabhängige Repräsentation der Energiebedarfe und -potentiale für monatlich aufgelöste klimatische Durchschnittswerte und die kurzzeitliche Simulation der Energiewerte für täglich aufgelöste Wettervorhersagen.

Literatur

- AGEB (2012), Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2011. Berechnungen auf Basis des Wirkungsgradansatzes. Stand: September 2012. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., URL: <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=139> (10.01.2013).
- BMVBS (2009), Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand vom 30. Juli 2009. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, URL: http://www.bbsr-energieeinsparung.de/cln_033/nn_1025012/

- EnEVPortal/DE/EnEV/Bekanntmachungen/Download/NWGDatenaufnahme, templateId=raw.property=publicationFile.pdf/NWGDatenaufnahme.pdf (10.01.2013).
- 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, Technische Universität Berlin, Deutschland.
- 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.
- EBEL, W., EICKE, W., FEIST, W., GABLER, W. (1991), Dokumentation der Referenzgebäude, Wärmetechnische Gebäudetypologie für die Bundesrepublik Deutschland (alte Bundesländer). BMFT-Projekt: Instrumente für die Entwicklung von Strategien zur Reduktion energiebedingter Klimagasemissionen in Deutschland, Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), Darmstadt.
- GRÖGER, G., KOLBE, T., NAGEL, C., HÄFELE, K.-H. (2012), OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, v2.0, OGC Doc. No. 12-019. URL: <http://www.opengeospatial.org/standards/citygml> (13.01.2013).
- JAGNOW, K. (2005), Energetisch relevante Kennwerte eines Gebäudes. Kenwerte Außenbauteile. Weiterbildungskurs "Energieberater TGA" in Wolfenbüttel, URL: http://www.energieberaterkurs.de/export/sites/default/de/Dateien_Kennwerte/kennwerte_aussenbauteile.pdf (10.01.2013).
- 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 Energieatlasses 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, Deutschland.
- KOLBE, T. H., (2008), Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. In: LEE, J., ZLATANOVA, S. (Hrsg.), Lecture Notes in Geoinformation & Cartography, 20, Springer Verlag.
- KRÜGER, A., KOLBE, T. H. (2012), Building Analysis for Urban Energy Planning using Key Indicators on Virtual 3D City Models – the Energy Atlas of Berlin. International Archive Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, XXXIX-B2, 145-150, doi:10.5194/isprsarchives-XXXIX-B2-145-2012.
- LOGA, T., IMKELLER-BENJES, U. (1997), Energiepass Heizung/Warmwasser. Institut Wohnen und Umwelt (IWU), URL: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/ephw-1.pdf (25.01.2013).
- 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; Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag.
- LOGA, T., DIEFENBACH, N., STEIN, B. (Hrsg.), (2012 a), Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Main Results of the TABULA project. Final Project Report. TABULA Project Team, October 2012, 43 S., URL: http://www.buildingtypology.eu/downloads/public/docs/report/TABULA_FinalReport.pdf (10.01.2013).
- LOGA, T., MÜLLER, K. (2012 b), Evaluation of the TABULA Database Comparison of Typical Buildings and Heat Supply Systems from 12 European Countries. TABULA

- Project Team, October 2012, URL: http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/report/TABULA_WorkReport_EvaluationDatabase.pdf (10.01.2013).
- NEIDHART, H. (2007), Digitale Wärmebedarfskarte aus Laserscanning. Dreiländertagung der SGPF, DGPF und OVG: Von der Medizintechnik bis zur Planetenforschung – Photo-grammetrie und Fernerkundung für das 21. Jahrhundert, DGPF Tagungsband Nr. 16, S. 339-345.
- NEIDHART H., SESTER, M. (2006), Creating a digital thermal map using laser scanning and GIS. Proceedings of the 10th International Symposium on District Heating and Cooling, Hanover, Germany.
- SENGUV (2011), Klimaschutz in Berlin. Broschüre, Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz, Berlin, URL: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/klimaschutz/publikationen/infoblatt/index.shtml> (24.01.2012).
- STRZALKA, A., BOGDAHN, J., COORS, V., EICKER, U. (2011), 3D City modeling for urban scale heating energy demand forecasting. In: HVAC&R Research, Jg. 17, H. 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.
- VDI (2000), VDI 2067: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Energieaufwand der Nutzenübergabe bei Warmwasserheizungen, URL: <http://www.vdi.de/technik/fachthemen/bauen-und-gebaeudetechnik/fachbereiche/technischegebaeudeausrustung/richtlinienarbeit/vdi-2067/> (15.01.2013).