

Integratives Entscheidungswerkzeug für die ganzheitliche Planung in Städten auf der Basis von semantischen 3D-Stadtmodellen am Beispiel des Energieatlasses Berlin

ROBERT KADEN, ANDREAS KRÜGER & THOMAS H. KOLBE

In diesem Beitrag wird die Entwicklung eines integrativen Entscheidungswerkzeuges für die strategische Energieplanung in Städten am Beispiel des Energieatlasses Berlin vorgestellt. Der Energieatlas Berlin ist ein ganzheitliches Entscheidungs- und Planungswerkzeug für energetische Fragestellungen auf der Basis des semantischen 3D-Stadtmodells von Berlin, welches konform zum CityGML-Standard modelliert ist. CityGML dient als semantisches Datenmodell und anwendungsunabhängiges Beschreibungs- und Austauschformat und umfasst Objektklassen, Attribute und Beziehungen zur Beschreibung geometrischer, topologischer, semantischer und visueller Eigenschaften, im Sinne einer Ontologie von Städten. Für die Betrachtung von energetischen Fragestellungen wird der Energieatlas durch energierelevante Objekte und Eigenschaften verschiedener Anwendungsfelder erweitert und integriert. Dies beinhaltet z.B. energetische Gebäudeparameter, Sanierungszustände, Energie- und Sanierungspotentiale von Maßnahmen sowie Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen, welche auf diese Weise in einen Zusammenhang gebracht werden können, z.B. der Energiebedarf eines Gebäudes mit der Netzinfrastruktur oder die Abhängigkeit von Elektrizität und Wasserversorgung. Es werden energetisch relevante Indikatoren und Daten vorgestellt sowie Konzepte und Anwendungen des Energieatlasses erläutert.

1 Einführung

Aktuelle Umwelt- und Energieplanungen setzen in einem immer stärkeren Maß eine ganzheitliche, interdisziplinäre Betrachtung der bestehenden Situation, der potentiellen Maßnahmen und deren Auswirkungen voraus. Durch die Berücksichtigung der Interdependenzen von Maßnahmen der verschiedenen Disziplinen und der Situation vor Ort wird eine Optimierung in Bezug auf die Gesamtbilanz aller Maßnahmen ermöglicht. Diese Abhängigkeiten sind bislang u.a. aufgrund von wirtschaftlichen Interessen sowie eines fehlenden gemeinsamen Datenrahmens für Planer und Entscheidungsträger in der Wirtschaft, der Verwaltung und der Politik häufig nicht oder nur wenig berücksichtigt worden. Die getrennte Betrachtung der einzelnen Anwendungsfelder führte in einer Vielzahl von Fachdisziplinen zu einer unterschiedlichen Klassifizierung und Strukturierung von Fachwissen und häufig zu individuellen IT-Lösungen, basierend auf einer jeweiligen Fachontologie. Die Ontologie stellt dabei einen Konsens über das Wissen einer Domäne dar und ermöglicht die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine, um Fachinformationen für Maschinen interpretierbar und verarbeitbar zu machen. GRUBER [1993] betrachtet die Ontologie im Sinne der Informatik als eine explizite Spezifikation einer Konzeptualisierung. Die Konzeptualisierung wiederum umfasst die abstrakte Darstellung von Phänomenen der realen Welt. Eine Ontologie eignet sich demnach um komplexe Strukturen spezieller Fachdomänen abzubilden und daraus ein Modell des Wissensbereiches abzuleiten. Die einem Modell zugrunde liegende Ontologie beinhaltet die Definition der Begriffe und Beziehungen, mit welchen das Wissensgebiet modelliert wird.

Im Bereich des Geodatenmanagements existieren räumliche Datenmodelle, basierend auf einer Ontologie der Topographie der realen Welt, wie z.B. das etablierte Datenmodell von CityGML. CityGML versteht sich als ein semantisches Datenmodell zur applikationsübergreifenden Repräsentation und zum Austausch von 3D-Stadtmodellen. CityGML ist ein XML-basiertes Speicherformat und ist als Anwendungsschema der *Geography Markup Language 3 (GML3)* implementiert. CityGML umfasst eine gemeinsame Definition von grundlegenden Objektklassen, Attributen und Relationen im Sinne einer Ontologie von 3D-Stadtmodellen in Bezug auf geometrische, topologische, semantische und visuelle Eigenschaften [OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM, 2008; KOLBE, 2008].

In der Vergangenheit wurde u.a. im Bereich der Planung, dem Management und Monitoring von Energie und Umwelt sowie Verkehr, Architektur und Bau eine Vielzahl von fachbezogenen Ontologien entwickelt. LUTZ et al. [2002] präsentieren eine Ontologie zur Spezifikation von Informationssystemen für Verkehrsplaner. Diese soll dem Anwender ermöglichen, heterogene Datenbestände zu integrieren und zu visualisieren, Analysen durchzuführen und durch die Integration mit Verkehrs- und Umweltmodellen neues Wissen zu erzeugen. Dies dient beispielsweise der Bewertung von Eingriffen im Straßenbau und deren einheitliche Kompensation durch Ausgleich. Für die Spezifikation wird eine Ontologie bezüglich der Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege entwickelt. MÉTRAL et al. [2010] beschreiben die Eignung von Ontologien zur Formalisierung von verschiedenen anwendungsbezogenen Informationen am Beispiel von Planungen im Bereich *Soft Mobility*. Es wird beispielhaft gezeigt, dass für eine Vielzahl von Anwendungen innerhalb der Prozesskette von Planungen in Städten sowie der Entscheidungsebenen virtuelle 3D-Stadtmodelle hilfreich sind, jedoch das zugrunde liegende CityGML-Datenmodell nicht ausreichend detailliert ist. Es wird ein Ausschnitt einer Ontologie zur Beschreibung von Routen für Fußgänger und Radfahrer einschließlich Eigenschaften wie z.B. Fußgängerzone, Promenade, Fahrradspur, Geschwindigkeit und Einbahnstraße gezeigt. FUCHS [2008] präsentiert eine ontologiebasierte Formalisierung der Semantik von Kontextinformationen und Zuständen in Infrastrukturnetzen wie z.B. Eisenbahnnetzen und Energienetzen.

Ziel des Energieatlasses Berlin ist es, einen gemeinsamen Rahmen für die Integration von umwelt- und energieplanerischen Aspekten der unterschiedlichen Ontologien zu schaffen. Dies beinhaltet die räumlich-semantische Repräsentation der relevanten Geoinformationen wie z.B. der Modellierung der Stadt und ihrer Bestandteile einschließlich umwelt- und energierelevanter Parameter sowie der Energiequellen, Verbraucher und Ver- und Entsorgungnetzen in verschiedenen, diskrete Skalenebenen, z.B. Gebäude, Quartier, Bezirk, Stadt. Die Integration aller Informationen und deren Visualisierung bilden einen komplexen Atlas der Energieversorgung und der Zusammenhänge aller Komponenten

2 Klima- und Umweltschutz vs. Energiewende

Die Klima- und Umweltschutzpolitik ist ein maßgeblicher Motor für die umfangreichen Veränderungen bei der Energieversorgung und ist aufgrund des besonders großen Anteils der weltweit

verursachten Treibhausgase vor allem ein Thema der Städte. Ein bedeutendes klimapolitisches Ziel in Berlin ist u.a. 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 erreicht werden soll. Im Fokus der Berliner Klimaschutzpolitik stehen die Gebäude, wobei der Energiebedarf von Gebäuden zu über 80 Prozent aus dem Wärmebedarf resultiert und sich auf zwei Drittel bis drei Viertel des gesamten städtischen Energiebedarfs summiert. Ein Schwerpunkt des Berliner Umweltentlastungsprogramms (UEP) ist dabei die energetische Gebäudesanierung [SenGUV, 2011]. Eine weittragende Maßnahme zum Umweltschutz ist der vereinbarte Ausstieg aus der Kernenergie, aber auch die Verpflichtung zur Reduktion der Feinstaubemissionen und der Lärmbelastung in Städten [BImSchG, 2011].

Die klima- und umweltschutzpolitischen Bemühungen führen zu maßgeblichen Veränderungen auf der Seite der Energieversorger, welche aktuell vor neuen Herausforderungen in Bezug auf die Planung und den Umbau von Anlagen und Infrastrukturen stehen. Die so genannte „Energiewende“ auf der Versorgerseite, aber auch der demographische (und industrielle) Wandel auf der Verbraucherseite erfordern umfassende Veränderungen der Energieversorgung, beispielsweise durch die verstärkte Einbringung erneuerbarer Energien, die Abschaltung von Kernenergieanlagen, die Versorgung durch so genannte „Brückentechnologien“ und die Dezentralisierung der Energieversorgung, was darüber hinaus Auswirkungen auf die bestehenden Netzinfrastrukturen der Betreiber hat. Die Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden und Anlagen durch die energetische Gebäudesanierung, ein bewussteres Verbraucherverhalten und der demografische Wandel in Deutschland führen darüber hinaus zu veränderten Energiebedarfen. Die breite Einführung von e-Mobilitätslösungen bringt zudem neue Anforderungen durch den benötigten Aufbau eines Netzes von Stromtankstellen mit sich.

Die Veränderungen aufgrund der Umsetzung der Klima- und Umweltschutzziele sowie der Energiewende setzen umfangreiche Planungen voraus, beispielsweise in Bezug auf großräumige energetische Gebäudesanierungen, die Standortwahl von neuen energieerzeugenden Anlagen wie z.B. Photovoltaik, Geothermie und Blockheizkraftwerke, den erforderlichen Netzausbau oder mögliche Stilllegungen bestehender Anlagen und Infrastrukturen. Nicht selten widersprechen sich jedoch die möglichen Maßnahmen der Energiewende und die klima- und umweltschutzpolitischen Ziele, z.B. führen die Einbringung von Brückentechnologien wie Kohlekraftwerke aber auch Blockheizkraftwerke auf der Basis von Gasturbinen zu einem Anstieg der CO₂- und Feinstaubemissionen und die Verbreitung von e-Mobilität führt zu einem Anstieg des Strombedarfes in Städten und Innenstädten. Durch die Einbringung erneuerbarer Energien, z.B. Photovoltaikanlagen auf den Gebäudedächern kann dem steigenden Strombedarf in Innenstädten, und somit der steigenden CO₂-Belastung, entgegen gewirkt werden. Diese Beispiele machen deutlich, dass die Planungen aufgrund des Klima- und Umweltschutzes sowie der Energiewende ganzheitlich erfolgen müssen, um ein Optimum aller Maßnahmen in Bezug auf die Gesamtbilanz von Energieproduktion und Schadstoffreduktion zu ermöglichen. Darüber hinaus müssen weitere Aspekte wie z.B. Sicherheit der Energieversorgung, stadtplanerische Vorgaben, Bauvorschriften, Akzeptanz durch die Bürger, Prognosen über die Stadtentwicklung sowie das Verhältnis zwischen Kosten und Nutzen (Potentiale) in die Betrachtung und Planung einfließen.

3 Informationsfusion im Energieatlas Berlin

Die in den letzten Dekaden stark fortgeschrittene Digitalisierung von energie- und umweltrelevanten Daten und die Vernetzung von Systemen erlauben es immer mehr, Informationen der verschiedenen Anwendungsfelder auszutauschen und zusammenzuführen sowie die ganzheitliche Betrachtung der Umwelt- und Energieplanungen zu ermöglichen. Dabei besteht jedoch häufig die Schwierigkeit, die unterschiedlichen Datenmodelle der verschiedenen Energieversorger, Netzbetreiber, Stadt- und Umwelplaner, aufgrund der unterschiedlichen Klassifizierung und Aggregation von Entitäten, miteinander zu verknüpfen. Die Untersuchungen im Rahmen des Energieatlases Berlin haben jedoch gezeigt, dass die fachbezogenen Ontologien aufgrund der geographischen Beziehungen der einzelnen Entitäten häufig eine hohe Kohärenz mit der räumlichen Aggregation von Geodaten aufweisen. Kern des Energieatlases Berlin ist es daher, planungsrelevante fachbezogenen Ontologien in dem räumlich-semantischen Datenmodell von CityGML zusammen zu führen. Im Unterschied zu dem Ansatz von MÉTRAL et al. [2010], in dem die Interoperabilität zwischen Modellen durch die Verknüpfung einer themenbasierten Ontologie mit einem CityGML basierten Stadtmodell erfolgte, werden in diesem Ansatz Konzepte des Ontologie-Mappings genutzt.

Zahlreiche Arbeiten beschreiben Methoden des Ontologie-Mappings¹, wobei drei Kategorien unterschieden werden; 1) die Abbildung einzelner Domänen-Ontologien auf eine integrative gemeinsame Ontologie, 2) die Abbildung einer Domänen-Ontologie auf eine andere Domänen-Ontologie und 3) die Verschmelzung von zwei Domänen-Ontologien [CHOI et al., 2006]. Der Energieatlas Berlin nutzt dabei zwei dieser Konzepte; die Abbildung der einzelnen fachbezogenen Ontologien auf eine integrative gemeinsame Ontologie und die Verschmelzung von zwei Ontologien. Der Energieatlas Berlin stellt die integrative gemeinsame Ontologie zur Verfügung, welche auf dem Datenmodell von CityGML basiert. Entitäten einer fachbezogenen Ontologie welche mit einer räumlichen Aggregation in CityGML kohärent sind, werden durch die entsprechenden CityGML-Klassen im Energieatlas abgebildet. Entitäten welche nicht durch entsprechende CityGML-Klassen repräsentiert werden, werden durch einen Erweiterungsmechanismus mit dem CityGML-Datenmodell verschmolzen. Das Konzept der *Application Domain Extension* (ADE) sowie die generischen Objekte und Attribute in CityGML ermöglicht es, beliebige Entitäten mit einem räumlichen Bezug in den Energieatlas zu integrieren.

Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Informationsfusion im Energieatlas. In der Mitte der Abbildung ist eine schematische Darstellung eines Auszuges aus dem CityGML Datenmodell dargestellt sowie links mögliche Entitäten bei der Solarpotentialanalyse und rechts eine vereinfachte Aggregation von Entitäten der Versorgungsinfrastruktur. Durch die hohe Kohärenz der Modellstruktur der Fachdomänen mit der räumlichen Aggregation im semantischen Stadtmodell lassen sich die Entitäten im Energieatlas direkt einander zuordnen. Das Beispiel zeigt, dass durch die Integration eine Verbindung der beiden Fachdomänen entstanden ist, wobei die ermittelten

¹ Zusammenfassung zu Ontologie-Mapping in Choi et al. [2006]

Solarpotentiale in Zusammenhang mit der Energiebilanz eines bestimmten Versorgungsgebietes gebracht wurden.

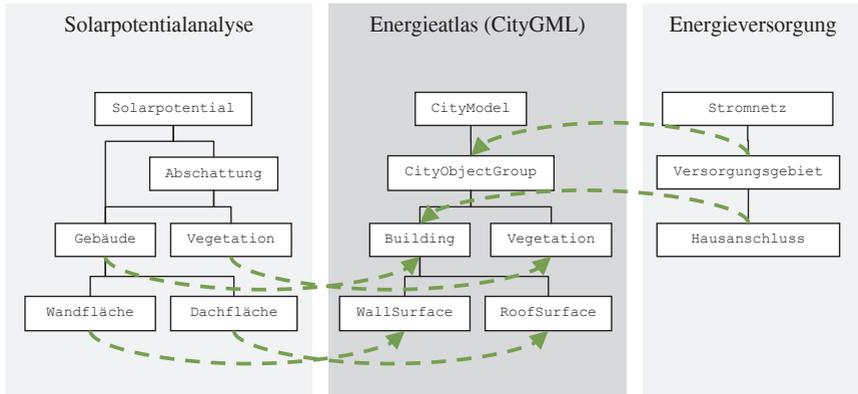


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Integration sich entsprechender Entitäten verschiedener fachbezogener Ontologien in den Energieatlas Berlin

Als Basis des Energieatlas Berlin dient das virtuelle 3D-Stadtmodell von Berlin², welches CityGML-konform modelliert ist. Es enthält ein Digitales Geländemodell (DGM) einschließlich einer Texturierung durch Luftbilder sowie mehr als 550.000 volltexturierte Gebäude, welche flächendeckend in der Detaillierungsstufe *Level of Detail* (LOD) 2 vorliegen. Darüber hinaus existieren circa 100 Gebäude, vornehmlich Sehenswürdigkeiten, in der Detaillierungsstufe LOD 3 sowie vier Gebäude in LOD 4. Neben den Informationen, welche bereits im virtuellen 3D-Stadtmodell vorhandenen sind, werden weitere umwelt- und energierelevante Parameter benötigt. Informationen, welche nicht durch das CityGML-Datenmodell abgebildet sind, werden innerhalb einer Fachschale „Energie“ (ADE) dem Modell hinzugefügt. Diese Fachschale umfasst die Modellierung und Speicherung von energetischen Gebäudeparametern, Versorgungsstrukturen, Verkehrs- und Energieflüssen sowie Potentiale von Maßnahmen und Handlungsoptionen. Um eine ganzheitliche strategische Energieplanung zu ermöglichen, ist es erforderlich, allen Ebenen der Entscheidungsfindung innerhalb einer Stadt zu entsprechen. Diese umfassen die sogenannte „Ingenieursebene“ über die „Entwurfs- und Planungsebene“ bis hin zur „politischen Entscheidungsebene“, wobei sich die Anforderungen an das Planungswerkzeug stark unterscheiden. Während bei der Ingenieursebene der Fokus auf der Effizienz und Bilanzierung von Komponenten und Maßnahmen für einzelne Gebäude oder Quartiere liegt, benötigen die übergeordneten Entscheidungsebenen eine generellere Sicht auf den Planungsbereich.(a)

(b)

² Informationen zum Berliner Stadtmodell: www.3d-stadtmodell-berlin.de (letzter Zugriff: 19.01.2012)

Abbildung 2 zeigt die verschiedenen Entscheidungs- und Aggregationsebenen, von einzelnen Gebäuden über Quartiere/Blöcke und Stadtteile bis hin zur Stadtebene.

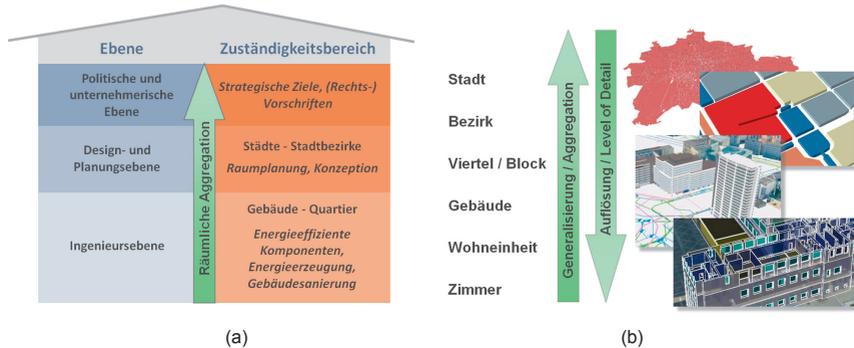


Abbildung 2: a) Darstellung der Entscheidungsebenen in Verbindung mit den Zuständigkeitsbereichen und b) die Skalenebenen des Energieatlasses

Die Integration aller umwelt- und energieplanerisch relevanten Informationen in einem Modell generiert neues Wissen und ermöglicht eine integrative, fachübergreifende Betrachtung der Situation. Das semantische Datenmodell ermöglicht analytische und simulierende Anwendungen, z.B. im Bereich des Katastrophenmanagements, der Stadt- und Landschaftsplanung und – im Beispiel des Energieatlasses Berlin – der strategischen Umwelt- und Energieplanung, welche dadurch disziplinübergreifend und unter Einbeziehung unterschiedlicher, thematisch relevanter Objekte und Parameter des Betrachtungsraumes durchgeführt werden können.

4 Potentiale und Entwicklung des Energieatlasses Berlin

Ziel des Energieatlasses Berlin ist die Schaffung eines strategischen Entscheidungswerkzeuges, welches eine transparente Planung zwischen verschiedenen Nutzergruppen aus der Industrie, z.B. Energieversorgungs- und Energietechnologieunternehmen, aus der Verwaltung und Politik sowie für Endverbraucher und Bürger ermöglicht. Dies beinhaltet zum einen die Repräsentation des Ist-Zustandes der umwelt- und energierelevanten Aspekte im Sinne einer Inventur und zum anderen die Darstellung von Handlungsoptionen einschließlich ihrer ökonomischen Aspekte wie die Gegenüberstellung von Potentialen versus Kosten von Maßnahmen. Durch das angereicherte 3D-Stadtmodell von Berlin wird der Energieatlas die Datengrundlage für ganzheitliche umwelt- und energiebezogene Untersuchungen und Planungen in der Stadt Berlin besitzen, z.B. für die Auswahl von Stadtgebieten für Investitionen in die energetische Gebäudesanierung, für den Umbau von Versorgungsinfrastrukturen und für die Einbringung von regenerativer Energieversorgung. Diese Untersuchungen und Planungen basieren auf Analysen und Simulationen sowie der kartographischen Visualisierung von Energieverbräuchen und -produktion, Energiebedarfen, Ertrags- bzw. Einsparpotentialen, energetischen Gebäudeklassen und -zuständen, Energie- und Verkehrsströmen, Versorgungsinfrastrukturen und anteiligen CO₂-Emissionen.

Im Rahmen des Energieatlasses Berlin werden am Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik derzeit zwei Projekte durch das *European Institute of Innovation and Technology* (EIT), angesiedelt im *Knowledge and Innovation Center for Climate Change and Mitigation* (Climate-KIC), gefördert; die Projekte „*Energy Atlas*“ und „*Neighbourhood Demonstrator*“, welche in Kooperation mit weiteren Instituten der Technischen Universität Berlin, dem Geoforschungszentrum Potsdam, den Energieversorgern Vattenfall und GASAG, der Senatsverwaltung für Wirtschaft, Technologie und Forschung sowie dem *Imperial College* und dem *Institute for Sustainability London* durchgeführt werden. Innerhalb dieser Projekte stehen zunächst die Datenintegration sowie die Entwicklung und Implementierung von Analyse- und Visualisierungswerkzeugen in Bezug auf die Themenbereiche Energie- und Verkehrsflüsse, Abschätzung von Energiebedarfen und energetische Gebäudeeigenschaften sowie die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle im Vordergrund. Die kartographische Aufbereitung der Analyseergebnisse erfolgt in Verbindung mit dem 3D-Stadtmodell Berlin und ermöglicht somit die visuelle Inspektion in Beziehung zur Stadtstruktur. Durch die Verwendung des standardisierten Datenmodells von CityGML ist es möglich, die entwickelten Konzepte und Systeme auf andere Städte zu übertragen, welche über ein CityGML-basiertes 3D-Stadtmodell verfügen.

4.1 Anwendungsfeld Schätzung des Heizenergiebedarfes von Gebäuden

Für Planungen innerhalb von Energieversorgungsunternehmen sind Energieverbrauchswerte der Gebäude, sowie deren Aggregation auf Versorgungsgebiete von großer strategischer Bedeutung, da die Netzinfrastrukturen auf aktuelle und zukünftige Verbräuche ausgelegt sein müssen. Tatsächliche Verbrauchsdaten sind innerhalb der einzelnen Energieversorger verfügbar, unterliegen jedoch strengen Datenschutzrichtlinien. Demnach kann bei einer marktwirtschaftlich getriebenen Versorgerstruktur nicht auf einen umfassenden Datenbestand für die gesamte Stadt oder größere Stadtgebiete zurückgegriffen werden. Daher ist es notwendig, dass Schätzmechanismen für die Ermittlung von Energiebedarfen angewendet werden. STRZALKA et al. [2010; 2011] beschreiben eine Methode zur Abschätzung des Heizenergiebedarfes auf Stadtebene unter Verwendung von Gebäudegrundflächen und LIDAR-Daten, weiteren Gebäude- und Wetterdaten sowie unter Verwendung eines Geoinformationssystems (GIS). Durch dieses Verfahren wird aus den Gebäudegrundflächen und den Höheninformationen ein 3D-Stadtmodell einschließlich der automatisch extrahierten beheizten Volumina abgeleitet. Durch die Einbeziehung der Wärmedurchgangswerte (U-Werte) der Gebäude sowie der Wetterdaten wird in diesem Beitrag der Heizenergiebedarf für das Testgebiet *Scharnhäuser Park* in Stuttgart abgeschätzt. Ein Verfahren zur Ableitung einer digitalen Wärmebedarfskarte wird durch NEIDHART [2007] und NEIDHART et al. [2006] beschrieben. Durch ein Gebäuderekonstruktionsverfahren werden aus LIDAR-Daten Gebäudevolumina ermittelt und unter Verwendung einer Gebäudetypologie und der Siedlungsstruktur der Wärmeenergiebedarf für Gebäude sowie für ganze Siedlungen abgeleitet und in einer Wärmebedarfskarte dargestellt.

Eine wachsende Zahl von Städten verfügt über flächendeckende CityGML-konforme 3D-Stadtmodelle sowie über 2D-Geobasisdaten. Diese vorhandenen Daten können für die Abschätzung von Energiebedarfen auf der Skalenebene einer Stadt oder Region genutzt werden.

Ausgehend von der Hypothese, dass starke Korrelationen zwischen der Gebäudecharakteristik und den anfallenden Heizenergieverbräuchen bestehen, wurde durch CARRIÓN [2010] und CARRIÓN et al. [2010] ein Verfahren zur Abschätzung des Heizenergiebedarfes in Gebäuden unter Verwendung des 3D-Stadtmodells von Berlin entwickelt. Demnach hängt der Heizenergieverbrauch von den geometrischen Eigenschaften eines Gebäudes (beheiztes Volumen, Nutzfläche), dem Sanierungszustand, dem Gebäudetyp und -alter sowie der Gebäudenutzung ab. Abbildung 3 zeigt die Korrelationsbeziehung zwischen den Gebäudeinformationen, welche aus der Semantik und Geometrie des Gebäudemodells abgeleitet werden, und den Katasterinformationen sowie weiteren statistischen Daten und Verbrauchsinformationen.

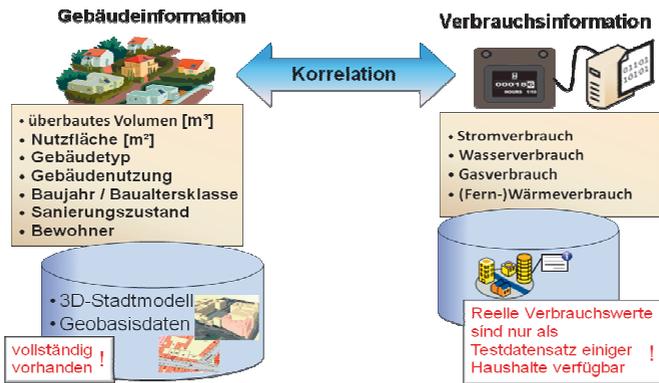


Abbildung 3: Abschätzung des Heizenergiebedarfes in Gebäuden unter Berücksichtigung der Korrelation zwischen Gebäudecharakteristik und Verbrauchswerten

In CARRIÓN [2010] und CARRIÓN et al. [2010] wird der Heizenergieverbrauch unter Verwendung der Etagenzahl, der Gebäudehöhe, dem beheizten Volumen, dem Baujahr, der Anzahl der Wohneinheiten und der Gebäudenutzung berechnet. Diese Daten können aus der Gebäudegeometrie des Berliner 3D-Stadtmodells (Volumen, Gebäudehöhe) ermittelt werden oder sind bereits als semantische Attribute (Etagenzahl, Gebäudenutzung, Baujahr) im Stadtmodell enthalten. Die Gebäudenutzfläche ermittelt sich entsprechend der Energieeinsparverordnung (EnEV) von 2009 über das beheizte Volumen und der durchschnittlichen Etagenhöhe, wobei die durchschnittliche Etagenhöhe aus der Division der Gebäudehöhe und der Etagenzahl ermittelt wird:

$$A_N = \left(\frac{1}{h_G} - 0.04m^{-1} \right) \cdot V_e$$

A_N Nutzfläche [m ²]	$h_G = \frac{h_B}{n}$	h_B Gebäudehöhe
h_G durchschnittliche Etagenhöhe [m]		n Etagenzahl
V_e beheiztes Volumen [m ³]		

Aus der Gebäudenutzung, der Etagenzahl, der Anzahl der Wohneinheiten und der Anzahl der Nachbargebäude lässt sich ein Gebäudetyp ableiten, z.B. freistehendes Einfamilienhaus, Reihen-

oder Doppelhaus, großes Mehrfamilienhaus oder mehrstöckiges Gebäude. Über eine zur Gebäudestruktur einer Stadt passenden Gebäudetypologie (Verzeichnis mit einem Verbrauchswertfaktor in kWh/m²a zugeordnet zu Gebäudetyp und Baujahr) kann der Heizenergiebedarf durch Multiplikation der Nutzfläche mit dem Verbrauchswertfaktor abgeschätzt werden:

$$E_H = A_N \cdot f_V$$

A_N Nutzfläche [m²]
 f_V Verbrauchwert - Faktor
 E_H Heizenergieverbrauch [kWh/a]

Abbildung 4 zeigt die Visualisierung der Bedarfswerte, welche auf der Basis des 3D-Stadtmodells und durch Einfärbung der Gebäudehüllen entsprechend einer festgelegten Klassifizierung erfolgt.



Abbildung 4: Visualisierung der geschätzten Heizenergiebedarfe im Testgebiet Berlin Charlottenburg-Wilmersdorf in Verbindung mit dem 3D-Stadtmodell [CARRIÓN, 2010]

Durch das Verfahren konnten für ein Testgebiet in Berlin die Heizenergiebedarfe mit einer durchschnittlichen Abweichung von 19% ermittelt werden. Ein Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten in den Projekten Energieatlas Berlin und Neighbourhood Demonstrator ist die Optimierung und Weiterentwicklung dieses Ansatzes.

4.2 Anwendungsfeld Solarthermische Heizenergieversorgung

Die Zuführung von Wärmeenergie aus konventioneller (fossiler) zentraler Energieerzeugung zu einzelnen Gebäuden und Gebäudegruppen lässt sich durch die dezentrale Energieversorgung mittels Solarthermie auf Dach- oder Fassadenflächen der jeweiligen Gebäude deutlich reduzieren. In Berlin wurde in den Jahren 2009 und 2010 eine Solarpotentialanalyse hinsichtlich der Eignung von Dachflächen für Solarthermie und Photovoltaik auf der Basis des virtuellen 3D-

Stadtmodells und durch LIDAR-Daten durchgeführt³. Die Ergebnisse werden potentiellen Nutzern online und kostenfrei zur Verfügung gestellt⁴. Bezüglich der Solarthermie wurden dabei folgende Werte ermittelt [simuPLAN, 2011]:

- Flachdach < 8° Neigung (ja/nein)
- dachflächenbezogene potentielle (ohne Verschattung) und mittlere Strahlungsmengen (inkl. Verschattung) in kWh/m²
- dachflächenbezogene prozentuale Einstrahlungsenergie bezogen auf die maximal mögliche jährliche Einstrahlung (1132 kWh/m²)
- dachflächenbezogene Dachneigung in Grad
- dachflächenbezogene Ausrichtung der Fläche in Grad (360° entspricht der nördlichen Ausrichtung)
- dachflächenbezogene installierbare Modulfläche in m²
- gebäudebezogener potentieller Wärmeertrag in MWh/a bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 35%
- gebäudebezogene Eignungsklasse für Solarthermie (geeignet/nicht geeignet)

Die Ergebnisse der Solarpotentialanalyse sind gebäude- sowie dachflächenbezogen im virtuellen 3D-Stadtmodell des Energieatlasses als generische Gebäudeattribute integriert.

Für die Neuplanung von Gebäuden sowie ganzer Nachbarschaften kann diese Ertragsberechnung durch die Nutzung des 3D-Stadtmodells entsprechend durchgeführt werden. LUDWIG et al. [2009] beschreiben ein Verfahren zur Solarpotentialanalyse durch die Geoprozessierung von LIDAR-Daten. In diesem Ansatz werden aus Punktwolken Dachflächen einschließlich ihrer geometrischen Eigenschaften abgeleitet und die jeweilige Einstrahlungsenergie ermittelt. Des Weiteren werden lokale Faktoren wie die Geometrie der Dachfläche, die Dachneigung, die Ausrichtung der Dachflächen, die globale Sonneneinstrahlung sowie der Einfallswinkel der Sonne beschrieben, welche für die Solarpotentialanalyse genutzt werden. Analog zur Ableitung der geometrischen Faktoren aus LIDAR-Daten können die Größe, Neigung und Ausrichtung von Dachflächen aus den Gebäudegeometrien eines 3D-Stadtmodells abgeleitet werden. Die globale Sonneneinstrahlung sowie der Einfallswinkel der Sonne fließen in ein Berechnungsmodell zur Bestimmung der Einstrahlungsmenge ein. Ein weiterer lokaler Faktor nach LUDWIG et al. [2009] ist eine schattenfreie Lage der Dachflächen. Anhand eines 3D-Stadtmodells kann die Verschattung über eine Sichtbarkeitsanalyse zum jeweiligen Sonnenstand unter Berücksichtigung der Flächegeometrie sowie der Morphologie der Nachbarschaften durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der solarthermischen Potentialanalyse werden in den Datenbestand des Energieatlas zurückgeführt. Dies ermöglicht die strategische Heizenergieplanung auf Gebäudeebene

³ Informationen zum Solaratlas Berlin: <http://www.businesslocationcenter.de/de/3d-stadtmodell/das-projekt/projektbeispiele/solaratlas> (letzter Zugriff: 19.01.2012)

⁴ Onlineportal zum Solaratlas Berlin: <http://www.wirtschaftsatlas.berlin.de/mapguide/Apps/Solar/Public/index.jsp> (letzter Zugriff: 19.01.2012)

wobei die Wärmebedarfsabschätzung aus Kapitel 4.1 und der Heizenergieertrag aus der Solarthermie zusammengeführt und subtrahiert werden können. Es ist dadurch möglich, den Bedarf an zuzuführender Energie, welcher durch andere Energieträger gedeckt werden muss, sowie das Einsparpotential zu ermitteln.

4.3 Ableitung von Indikatoren, Indexen und Metriken aus den Anwendungsfeldern

Eine ganzheitliche strategische Umwelt- und Energieplanung innerhalb des städtischen Raumes erfordert die Betrachtung der Stadt als ein komplexes Energiesystem. Analysen innerhalb von Energiesystemen arbeiten in der Regel über die Verknüpfung einzelner Parameter zu komplexen Zusammenhängen. Diese Parameter müssen aus dem angereicherten 3D-Stadtmodell (aus der Semantik, der topologischen Relationen und der Geometrie) abgeleitet werden. Hierfür wird der Ansatz von CARNEIRO [2011] genutzt, welcher Indikatoren und Indexe zur Prozessierung von LIDAR-Punktwolken verwendet. Für die Verwendung des Ansatzes im Energieatlas Berlin wird dieses Konzept auf semantisch angereicherte 3D-Stadtmodelle übertragen.

Indikatoren enthalten eine Reihe von Regeln für das Aufbereiten, Zusammenstellen und Organisieren von Daten, zur Bereitstellung von quantitativen oder qualitativen Resultaten über spezifizierte Anfragen [CARNEIRO, 2011]. Elementare Indikatoren können direkt aus den analysierten Werten über eine atomare Operation abgeleitet werden. Komplexe Indikatoren sind zusammengesetzt aus einer Menge von elementaren oder weiteren komplexen Indikatoren und bilden somit komplexere Analyseoperationen ab. Indexe unterliegen einem hohen Grad der Abstraktion mit minimalem Verlust an Information. Hierzu zählen die Verhältnisse und Einteilungen in Typklassen. Indexe setzen sich aus Indikatoren und/oder weiteren Indexen zusammen [CARNEIRO, 2011]. Zur computergestützten Verarbeitung sollen Indikatoren und Indexe einer Metrik unterliegen (numerische Werte) oder über eine Referenz auf entsprechende Werte verweisen (Tabellen, Listen).

Entsprechend der Repräsentation von Geometrie, Topologie, Semantik und äußerer Erscheinung durch virtuelle 3D-Stadtmodelle, lassen sich Indikatoren/Indexe nach ihrer zugrundeliegenden Metrik klassifizieren, welche sich auf Geometrie, Topologie, Morphologie und räumlich zugeordneter Semantik beziehen kann. Dabei ist zu erwähnen, dass die Topologie an sich keinen Metriken unterliegt. Mit einer Metrik bezogen auf die Topologie werden nicht die Topologierelationen an sich verstanden, sondern eine quantitative Angabe zum Vorkommen einer solchen Relation, bezogen auf ein Stadtojekt oder eine Menge von Stadtojekten. Für die beiden vorgestellten Anwendungsfelder in Abschnitt 4.1 und 4.2 lassen sich folgende Indikatoren und Indexe identifizieren und nach dem zugrundeliegenden Typ der Metrik klassifizieren. Tabelle 1 stellt die Klassifizierung dar. Diese Indikatoren und Indexe fließen in die Entwicklung der thematischen Erweiterung des Energieatlases in Form der CityGML Energy ADE ein.

Typ der Metrik	Elementare Indikatoren		Komplexe Indikatoren		Indexe	
	A	B	A	B	A	B
Metrik bezogen auf die Geometrie	Nutzfläche, beheiztes Volumen, Gebäudehöhe	Dachneigung, Dachfläche, Ausrichtung der Dachfläche		installierbare Modulfläche		
Metrik bezogen auf die Topologie	Anzahl der Nachbargebäude					
Metrik bezogen auf die Morphologie (Morphometrik)						Verschattung (Schatten / Bestrahlung Verhältnis)
Räumlich- semantische Metrik	Baujahr, Anzahl der Wohneinheiten, Gebäudenutzung	maximal mögliche jährliche Einstrahlung, Modulfläche pro Modul, Wirkungsgrad	Etagenzahl, Etagenhöhe, Gebäudenutzfläche		Gebäudetyp, Heizenergieverbrauch	Strahlungsmenge, Wärmeertrag

Tabelle 1: Indikatoren der Anwendungsfelder Schätzung des Heizenergieverbrauchs (A) und Solarthermische Heizenergieversorgung (B) klassifiziert nach der zugrundeliegenden Metrik

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden Konzepte und erste Implementierungen eines integratives Entscheidungs Werkzeug zur transparenten strategischen Energieplanung für verschiedene Nutzergruppen aus der Wirtschaft, Verwaltung, Politik und Endverbrauchern vorgestellt. Untersuchungen im Rahmen des Energieatlasses Berlin haben gezeigt, dass die strategische Umwelt- und Energieplanung innerhalb von Städten unterschiedliche Fachdisziplinen einbezieht, welche fachübergreifend als komplexes System zusammenwirken. Als Basis für den Energieatlas Berlin dient das Berliner virtuelle 3D-Stadtmodell, welches CityGML-konform modelliert ist und einen gemeinsamen integrativen Betrachtungsrahmen für umwelt- und energiebezogene Untersuchungen und Planungen zur Verfügung stellt. Fachthematische Informationen und Entitäten, welche nicht durch das CityGML-Datenmodell abgebildet werden, werden innerhalb einer Fachschale „Energie“ (ADE) dem Modell hinzugefügt. Themenspezifische Schlüsselindikatoren und Indexe stellen einen domänenspezifischen Regelsatz zum Aufbereiten, Zusammenstellen und Organisieren von Daten bereit, zugeordnet zu räumlich aggregierten Entitäten. Diese Entitäten innerhalb des Stadtmodells bilden Verknüpfungspunkte zwischen den Ontologien und stellen über die integrierten Indikatoren und Indexe einen umfassenden Regelsatz für fachübergreifende Analysen bereit. Im Bereich des Energieatlas Berlin lassen sich einige zukünftige Forschungsschwerpunkte identifizieren. Zukünftige Arbeiten umfassen die Identifizierung der relevanten Schlüsselindikatoren sowie deren räumliche Aggregation und die Erweiterung des CityGML Datenmodells um eine Energie-ADE für den Energieatlas. Darüber hinaus sollen weitere Use-Cases konzipiert und entwickelt, sowie Visualisierungskonzepte umgesetzt werden.

6 Literaturverzeichnis

- BIMSCHG, 2011: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. Bundesrepublik Deutschland
- CARNEIRO, C., 2011: Extraction of Urban Environmental Quality Indicators using LiDAR-Based Digital Surface Models. Doktorarbeit, École polytechnique fédérale de Lausanne, Schweiz
- 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, S. 31-36
- CHOI, N., SONG, I.-Y. & HAN, H., 2006: A Survey on Ontology Mapping. SIGMOD Record, Vol. 35, Nr. 3
- FUCHS, F., 2008: Semantische Modellierung und Reasoning für Kontextinformationen in Infrastrukturnetzen, Dissertation, Fakultät für Mathematik, Informatik und Statistik, Ludwig-Maximilians-Universität München, Cuvillier Verlag, Göttingen
- GRUBER, T. R., 1993: Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. Originally in: Guarino, N., Poli, R. (Hrsg.), International Workshop on Formal Ontology, Padova, Italy. Revised August 1993: International Journal of Human-Computer Studies, Vol. 43, Nr. 5-6, S. 907-928
- 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
- LUDWIG, D., LANIG, S. & KLÄRLE, M., 2009: Location analysis for solar panels by LiDAR-Data with Geoprocessing - SUN-AREA. Enviroinfo 2009, 23rd International Conference on Informatics for Environmental Protection, Berlin, Germany.
- LUTZ, M., MÖLTGEN, J. & KUHN, W., 2002: Ontologien zur Spezifikation von Informationssystemen für Verkehrsplaner. In: Schrenk, M. (Hrsg.), CORP - The 7th Symposium on Information Technology in Urban and Spatial Planning, Band 1, Technische Universität Wien, S. 151-156.
- MÉTRAL, C., BILLEN, R., CUTTING-DECELLE, A.-F. & VAN RUYMBEKE, M., 2010: Ontology-Based Approaches for Improving the Interoperability Between 3D Urban Models. Special Issue Bringing Urban Ontologies into Practice, Journal of Information Technology in Construction (ITcon), Vol. 15, S. 169-184
- NEIDHART, H., 2007: Digitale Wärmebedarfskarte aus Laserscanning. Dreiländertagung der SGPBF, DGPF und OVG: Von der Medizintechnik bis zur Planetenforschung – Photogrammetrie 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, 2006

- OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM INC., 2008: OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. URL: <http://www.opengeospatial.org/standards/citygml>, letzter Zugriff: 24.01.2012
- 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>, letzter Zugriff: 24.01.2012
- SIMUPLAN, 2011: Solarpotentialanalyse Berlin – Datendokumentation. URL: <http://www.businesslocationcenter.de/imperia/md/content/3d/solaratlas/datendokumentation.pdf>, letzter Zugriff: 19.01.2012
- 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, URL: <http://www.tandfonline.com/toc/uhvc20/17/4>
- 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

Publikationen der Deutschen
Gesellschaft für Photogrammetrie,
Fernerkundung und Geoinformation e.V.



Band 21

2012



Vorträge

**32. Wissenschaftlich-Technische
Jahrestagung der DGPF**

14. – 17. März 2012
in Potsdam

Erblicke – Perspektiven für die Geowissenschaften