

Cloud-basierter 3D-Webclient zur kollaborativen Planung energetischer Maßnahmen am Beispiel von Berlin und London

Zhihang YAO, Maximilian SINDRAM, Robert KADEN und Thomas H. KOLBE

Lehrstuhl für Geoinformatik · Technische Universität München · Arcisstraße 21 · 80333 München

E-Mail: {zhihang.yao, maximilian.sindram, robert.kaden, thomas.kolbe}@tum.de

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund einer Zunahme extremer Klimaphänomene, dem steigenden anthropogenen CO₂-Ausstoß und den Gefahren verbunden mit der bestehenden Energieerzeugung, wie Katastrophen in Fukushima und Tschernobyl zeigen, werden klima- und umweltschutzpolitische Maßnahmen zur umfangreichen Umgestaltung der Energiesysteme beschlossen. Mit bis zu 40% des gesamten städtischen Energiebedarfs stellt der Wärmeenergiebedarf von Gebäuden einen großen Anteil am urbanen Gesamtenergiebedarf dar. In der Energiebilanz eines Gebäudes kann dieser Anteil sogar bis zu 80% betragen (AGEB, 2012). So definiert das Berliner Umweltabkommen (UEP) (SENGUV 2011) als Ziel eine Senkung der CO₂-Emissionen um 40%, die zum einen durch Einsatz energetisch effizienter Komponenten und zum anderen durch die Sanierung des Gebäudebestands bis zum Jahr 2020 erreicht werden soll.

In der Stadt London steht die Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden ebenfalls im Fokus der Energieplanung. Neben der geplanten Senkung der CO₂-Emissionen stellt in einigen Regionen der Stadt die so genannte *Fuel Poverty* – Armut durch zu hohe Energiekosten – einen der Hauptgründe für eine rasche Steigerung der Energieeffizienz und der Senkung der Energiekosten dar. Die Anzahl der Haushalte, die in Bezug auf ihr Einkommen nicht in der Lage sind, sich zu angemessenen Preisen mit ausreichend Wärme zu versorgen, ist in den letzten Jahren stetig gewachsen. Wie in Berlin soll dieser Entwicklung durch die Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden entgegengewirkt werden. Zu diesem Zweck wurde das sogenannte *Energy Companies Obligation (ECO)-Funding-Programm* durch die Britische Regierung initiiert, in dessen Rahmen energetische Gebäudesanierungen finanziell gefördert werden. Kriterien für die Förderung sind dabei der Energiebedarf für die Raumwärme sowie deren Einsparpotential von massiven Gebäuden ab vier Stockwerken. Zur Ermittlung dieser Kriterien und somit der förderbaren Gebäude werden zurzeit mehrere Pilotprojekte durch den Lehrstuhl für Geoinformatik der TU München, dem Londoner *Institute for Sustainability* und den Wohnungsbaugesellschaften *Popular HARCA* und *Tower Hamlets Homes* in der Region *Bromley By Bow* in London durchgeführt. Innerhalb dieser Projekte werden die Energiebedarfe und die Einsparpotentiale durch energetische Sanierung der Wohngebäude untersucht. Die Berechnungen basieren auf energetischen Simulationen des Gebäudebestandes nach Methoden des Institutes Wohnen und Umwelt (LOGA & IMKELLER-BENJES 1997) und der DIN V 18599 auf der Basis komplex strukturierter semantischer 3D-Stadtmodelle nach dem CityGML-Standard (vgl. KOLBE 2009, GRÖGER et al. 2012).

Häufig besitzen die Nutzer und Entscheider bei den Wohnungsbaugesellschaften, aber auch in der Energie-, Stadt- und Umweltplanung, nur wenig GIS-Kompetenz und haben selten Zugang zu professionellen Geoinformationssystemen. Die Umsetzung energiepolitischer Ziele erfordert eine ganzheitliche und komplexe Planung, die von vielen Fachdisziplinen und unterschiedlichen Entscheidungsebenen gestemmt werden muss. Diese Entscheidungen werden auf Basis von Datenquellen in unterschiedlicher räumlicher Auflösung und semantischer Tiefe getroffen. So sind beispielsweise für die strategische Planung der künftigen Heizwärmeversorgung auf der einen Seite detailliertes bauphysikalisches Fachwissen über die einzelnen Gebäude und auf der anderen Seite aggregierte Informationen über Quartiere und statistische Blöcke zur Planung von Fördermaßnahmen notwendig. Der Planer einer Energieversorgung für einen Wohnblock ist dabei nicht an den komplexen Berechnungsmethoden der Energiewerte selber interessiert, sondern nur an deren Ergebnissen. Er analysiert die Zusammenhänge dieser Werte auf der Basis von Schlüsselindikatoren (Key Performance Indicators, KPIs) und leitet daraus Handlungsempfehlungen ab. Aus diesem Grund müssen Entscheidungsunterstützungssysteme sowohl komplexe Berechnungen und Simulationen der energetischen Performanz individueller Gebäude als auch schnelle Analysen und Kosten-/Nutzen-Rechnungen zur Abwägung unterschiedlicher Planungsvarianten und -konfigurationen in einem Rahmenwerk integrieren.

Ziel der in diesem Beitrag vorgestellten Arbeiten ist es daher, im Hinblick auf die Anforderungen des skizzierten Anwendungsfeldes eine Schnittstelle zwischen den komplex strukturierten 3D-Stadtmodellobjekten mit den darauf aufsetzenden rechenintensiven Simulations- und Berechnungsverfahren einerseits und für die Endnutzer – also Planer und Entscheider – vertrauten und einfach strukturierten Modellen der Text- und Tabellenverarbeitung andererseits zu schaffen. Dieses Ziel wird zum einen durch die anwendungsspezifische Abbildung bzw. Zusammenfassung von Teilen des komplexen semantischen 3D-Stadtmodells (Aggregationen, geometrische Eigenschaften wie Volumen und Flächengrößen, Auswahl thematischer Attribute) auf einfache Tabellenstrukturen erreicht. Zum anderen wird für die räumlich und thematisch relevanten Teile des Stadtmodells ein 3D-Visualisierungsmodell erzeugt. Das 3D-Visualisierungsmodell wird schließlich mit den in einfachen Tabellen strukturierten Sachinformationen in der Cloud gespeichert und mittels eines 3D-Webclients den Endnutzern zur kollaborativen und intuitiven Analyse und Bearbeitung bereitgestellt.

2 Architektur für Web-basierte 3D-Stadtmodell-Anwendungen

Die in der Einleitung skizzierte Schnittstelle von Endnutzern zur Arbeit mit und Analyse von komplex strukturierten 3D-Stadtmodellen wird durch eine mehrstufige Systemarchitektur realisiert (siehe Abb. 1). Das Prinzip greift den in den letzten Jahren gewachsenen Trend zu sogenannten „Apps“ (Applikationen) auf, wie er im Kontext von mobilen Endgeräten wie z.B. Smartphones und Tablet-PCs etabliert ist. Applikationen haben dabei einen sehr spezifischen und beschränkten Funktionsumfang, sind aber deshalb einfach zu verstehen und intuitiv zu bedienen. Dieser Trend ist mittlerweile auch bei Geoinformationssystemen zu beobachten.

Auf der untersten Ebene wird das semantische 3D-Stadtmodell vorgehalten, welches neben den topographischen Informationen insbesondere auch die thematischen Daten unterschiedlicher Anwendungsdomänen beinhaltet. Die Stadtmodelldaten werden im Sinne eines Informationsrückgrats (*Information Backbone*) in einem gemeinsamen Datenbestand (virtu-

ell oder auch tatsächlich) integriert. Durch die Verwendung eines gemeinsamen Datenmodells und Austauschformats sorgt der internationale Standard CityGML für eine einheitliche sowie gleichzeitig flexible Repräsentation und stellt dabei sowohl die syntaktische, Schema- als auch teilweise semantische Interoperabilität sicher. „Urban Analytics Toolkit“ bezeichnet eine beliebig erweiterbare Werkzeugsammlung von Modulen, die anwendungsspezifische Berechnungen und Simulationen durchführen und dabei ihre Eingangsdaten aus dem CityGML-basierten Stadtmodell beziehen und die Ergebnisse den CityGML-Stadtmodellobjekten anreichern. Die angereicherten Objekte stehen sowohl für andere (Folge-) Simulationen als auch zur Exploration und weiteren Analyse durch die Endnutzer bereit.

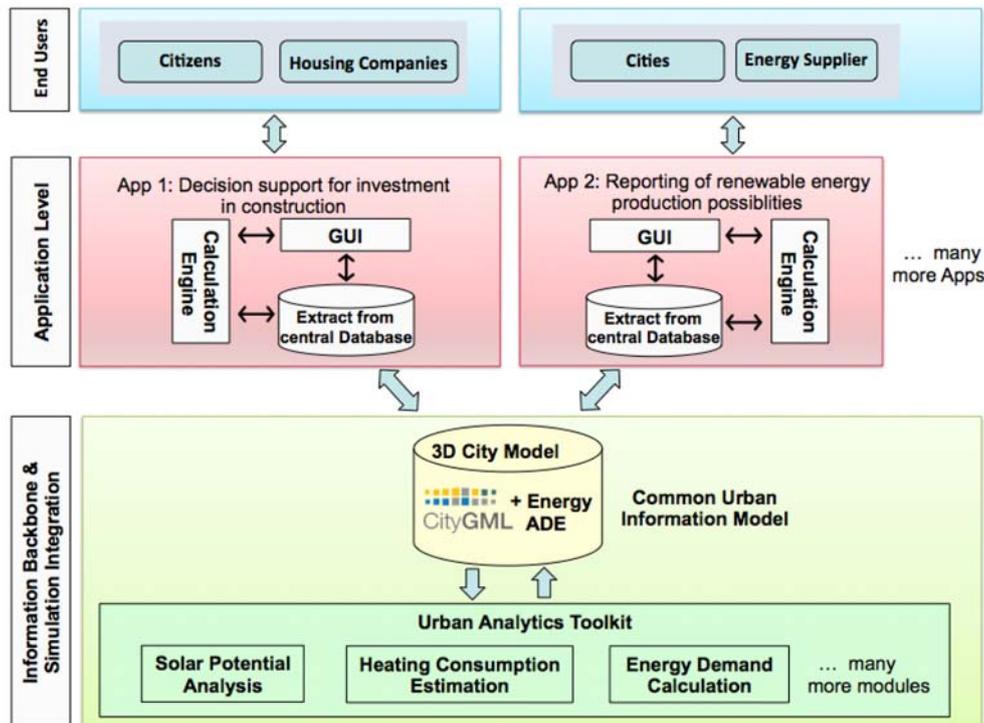


Abb. 1: Mehrstufige Systemarchitektur zur Integration komplexer Stadtmodelle und schwergewichtigen Simulationen mit leichtgewichtigen Applikationen („Apps“) als Endbenutzerschnittstellen

Auf der obersten Ebene befinden sich unterschiedliche Benutzergruppen (*End Users*), die jeweils individuelle Fragestellungen auf der Basis des Stadtmodells beantworten müssen. Das können z.B. Wohnbaugesellschaften sein, die die Optionen zur energetischen Sanierung ihres Gebäudebestands durchrechnen wollen. Es können aber auch Energieversorger sein, die die Entwicklung der Energiebedarfe in ihren Versorgungsgebieten für unterschiedliche Trends und Perspektiven abschätzen möchten.

Typischerweise erfordern unterschiedliche Anwendungen verschiedene Informationen aus dem bzw. Sichten auf das 3D-Stadtmodell. Auch die Analysefunktionen sind in der Regel anwendungsabhängig. Um den Endnutzern eine auf sie zugeschnittene Anwendung bereit-

zustellen, werden auf der Anwendungsebene (*Application Level*) nur die für die Anwendung relevanten Informationen aus dem Stadtmodell extrahiert, wobei die Daten der komplex strukturierten Stadtmodellobjekte auf einfache Tabellenstrukturen abgebildet und aus den entsprechenden 3D-Geometrien ggf. kartographisch gestaltete 3D-Computergrafik-Elemente erzeugt werden. Dieser Extrakt wird über Cloud-Dienste wie Google Spreadsheets und Dropbox zum Zugriff über das World Wide Web bereitgestellt. Der kollaborative 3D-Webclient integriert diese Ressourcen und ermöglicht durch entsprechende Konfiguration der Benutzerschnittstelle und Auswahl bereitzustellender Funktionsblöcke somit die Definition spezifisch angepasster 3D-Stadtmodell-Anwendungen.

3 Cloud-basierte Realisierung

Zur Realisierung des Informationsrückgrates (untere Ebene in Abb. 1) wird in dem Anwendungsprojekt zur Planung energetischer Sanierungen das 3D-Stadtmodell in der 3DCityDB gespeichert und verwaltet. Bei der 3DCityDB handelt es sich um ein Open-Source-Programmpaket zur effizienten Speicherung, Verwaltung und Visualisierung von CityGML-basierten 3D-Stadtmodellen (siehe STADLER et al. 2009). Es kann unter www.3dcitydb.org kostenlos heruntergeladen werden und besteht aus einem Datenbankschema für um räumliche Datentypen erweiterte relationale Datenbanken, wobei derzeit Oracle Spatial und PostGIS unterstützt werden. Zudem wird ein Import/Export-Programm zum Einlesen und Ausgeben (fast) beliebig großer CityGML-Dateien, zum Erzeugen von 3D-Visualisierungsmodellen in KML und COLLADA sowie zum Export von Daten in einfache Tabellenstrukturen wie Microsoft Excel oder Google Spreadsheets mitgeliefert (siehe KOLBE et al. 2013). Die 3DCityDB ist weltweit in zahlreichen Städten und in Deutschland zudem bei fast allen Landesvermessungsämtern bzw. -betrieben im professionellen Einsatz.

Die Analysemodule des „Urban Analytic Toolkits“ greifen entweder direkt auf die Tabellen der 3DCityDB zu oder sie exportieren die relevanten Daten im CityGML-Format zunächst mittels des Import-/Export-Programms. Die CityGML-Daten werden dann von den Berechnungs- und Simulationsprogrammen eingelesen und die Berechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse reichern die CityGML-Objekte um neue oder aktualisierte Eigenschaften an, welche dann wieder in die 3DCityDB importiert werden.

Für die eingangs skizzierte Anwendung wird eine Schätzung der Energiebedarfe jedes (Wohn-)Gebäudes benötigt. Dazu werden in einem Java-Programm die Volumina der Gebäude und die Flächeninhalte der Wand-, Boden- und Dachflächen berechnet. Ferner wird für jedes Haus die Größe der Berührungfläche zu den angrenzenden Gebäuden berechnet. Gebäude werden aufgrund ihrer Nutzungsart und den räumlichen Eigenschaften in Kategorien wie z.B. Reihenhause, Mehrfamilienhaus, Hochhaus gemäß der DIN V 18599 klassifiziert (siehe dazu auch KADEN et al. 2013). Für die Anwendungskontexte in London und Berlin liegen jeweils CityGML-Gebäudemodelle in LOD2 mit umfangreicher thematischer Attributierung und semantisch klassifizierten Flächen in Wand-, Dach- und Bodenflächen vor. Die Ergebnisse der Kalkulationen und Klassifikation werden dann den CityGML-Gebäudemodellen als generische Attribute in der 3DCityDB angereichert. Die eigentliche Abschätzung der Energiebedarfe erfolgt nach der in KADEN & KOLBE 2013 beschriebenen Methode, die Berechnungen laufen aber erst später auf der Anwendungsebene.

Für die Realisierung der Anwendungsebene werden nur die für die jeweilige Anwendung relevanten Teile des Stadtmodells aus der 3DCityDB exportiert. Neben der Beschränkung auf eine bestimmte Region werden auch nur jene Objektarten und Attribute exportiert, die für die spezifische Anwendung und ihre Analyseverfahren nötig sind. Dabei werden prinzipiell zwei Arten von Daten erzeugt:

- 1) ein 3D-Visualisierungsmodell im KML/COLLADA-Format, welches die relevanten Objekte zur Darstellung in einem 3D-Betrachtungsprogramm wie z.B. Google Earth aufbereitet (in unserem Anwendungsfall sind das die Gebäude); und
- 2) eine einfache Tabelle, die die interessierenden Attribute und ihre Werte für jedes der Objekte beinhaltet. Bei diesem Schritt werden in der Regel komplex strukturierte Objekte durch Aggregation oder Selektion von Eigenschaften bestimmter Unterobjekte auf eine einfache Tabellenstruktur abgebildet und damit strukturell mitunter stark vereinfacht.

Abb. 2 zeigt die verschiedenen Komponenten mit ihren Datenimport- und Exportwegen.

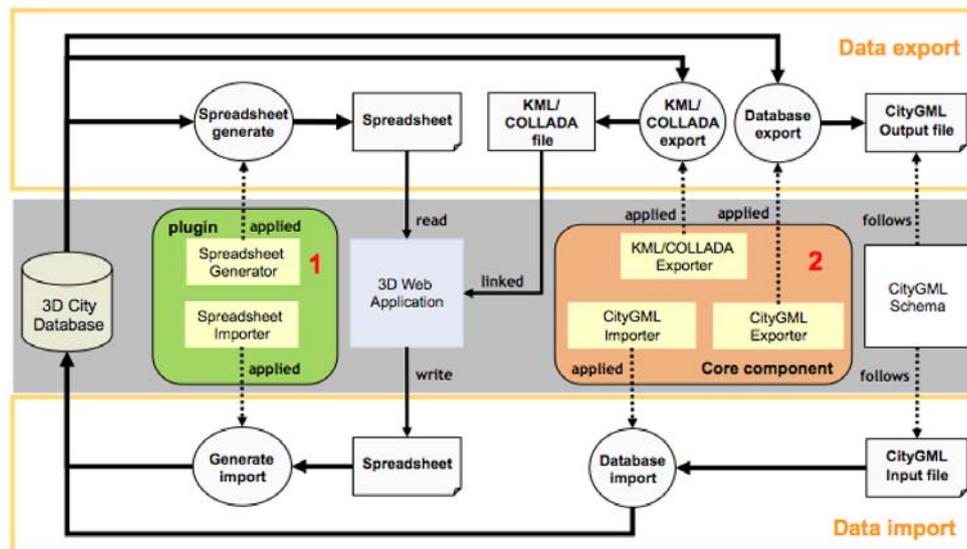


Abb. 2: Im- und Export von Stadtmodelldaten in verschiedenen Formaten mit der 3DCityDB. Kasten 2 zeigt den Im- und Export von CityGML sowie Export von KML/COLLADA, der Kasten 1 den Export und (Re-) Import von Stadtmodell- daten in Form einfacher Tabellen.

Beide Datensätze – das 3D-Visualisierungsmodell und die Sachdatentabelle – werden anschließend mittels geeigneter Dienstanbieter in die Cloud geladen und stehen darüber nun den Endnutzern (oberste Ebene in Abb. 1) zur Verfügung. Die KML/COLLADA-Dateien werden auf Cloud-Dienste wie z.B. Dropbox hochgeladen, sodass die KML/COLLADA-Dateien über die HTTP-Schnittstelle von Dropbox im Web publiziert und somit über das Internet von einem 3D-Viewer wie z.B. Google Earth geöffnet werden können. Die in Form einer Tabelle repräsentierten Sachdaten zu den Stadtobjekten lassen sich über den 3DCityDB-Spreadsheet-Generator direkt in den Cloud-Dienst „Google Docs“ hochladen. Letzteres ist eine von dem Unternehmen Google betriebene Web-Anwendung und ermöglicht die Speicherung und Webbrowser-basierte Bearbeitung von verschiedenen Dokumen-

tenarten wie Texten oder Tabellen. Die Google Spreadsheets erlauben neben der Speicherung, Darstellung, Bearbeitung und Abfrage auch die Definition von einfachen Formeln, auf deren Basis einzelne Tabellenfelder aus den Werten anderer Felder dynamisch berechnet werden können. Diese Funktionalität wird später in dem 3D-Webclient zur Implementierung der Energiebedarfsabschätzung verwendet. Die von der Datenbank exportierten thematischen und geometrischen Datensätze werden über einen eindeutigen Schlüssel (GMLID) miteinander logisch verknüpft. Details zum Export des 3D-Visualisierungsmodells und der Sachdaten sowie ihrer Verknüpfung in der Cloud über eindeutige Schlüssel werden in HERRERUELA et al. 2012 sowie YAO & KOLBE 2014 gegeben.

Die Entkopplung der Endnutzer von der 3DCityDB hat den Vorteil, dass die Nutzer weder die Datenbank (und das 3D-Stadtmodell) noch ein GIS selber betreiben müssen. Auch definiert das Spreadsheet eine Schnittstelle zum Stadtmodell, das letzteres sowohl in Bezug auf die Strukturierungskomplexität vereinfacht als auch den Datenumfang reduziert. Zudem können die Sachdaten im Spreadsheet einfach editiert werden. Dynamische Berechnungen können durch die Definition eigener Berechnungsfunktionen als Spreadsheet-Formeln realisiert werden. Dies ermöglicht die ad hoc Analyse der Auswirkungen verschiedener Szenarien. Die editierten Sachdaten und die Ergebnisse der Berechnungen können mittels Spreadsheet-Importer im Anschluss in die 3DCityDB zurückgeschrieben werden um eine persistente und CityGML-konforme Datenhaltung zu gewährleisten. Weitere Vorteile durch die Cloud-basierte Bereitstellung des Spreadsheets ergeben sich durch die Möglichkeit der kollaborativen Bearbeitung bei einfacher Festlegung von Zugriffsrechten. Verschiedene Nutzer können gleichzeitig die Stadtmodellobjekte visualisieren und Sachdaten bearbeiten.

Die eigentliche Anwendung wird nun als Web-Applikation realisiert, die in einem Webbrowser läuft und dabei den Zugriff auf die in der Cloud gespeicherten Daten implementiert. Viele Web-basierte 3D-Anwendungen verfügen über keine Verknüpfungsmöglichkeit zu thematischen Daten und bieten nur die Fähigkeit, 3D-Stadtobjekte zu visualisieren. Die Bearbeitung vieler Fragestellungen im urbanen Kontext bedingt jedoch Aggregations-, Anfrage- und Analyse-Funktionalitäten von Sachdaten und geometrischen Daten, welche bisher nur von Desktop-GIS-Anwendungen wie z.B. ArcMap oder explizit Cloud-basierten GIS wie ArcGIS Online der Fa. ESRI angeboten werden. Der im nächsten Abschnitt vorgestellte 3D-Webclient kombiniert die 3D-Visualisierung mit Analysefunktionen.

4 Kollaborativer 3D-Webclient

Der 3D-Webclient zur graphischen Visualisierung, kollaborativen Datenbearbeitung und dynamischen Analyse der 3D-Stadtmodelle bildet einen wichtigen Teil der Anwendungsinfrastruktur. Er kann unterschiedlich konfiguriert werden und realisiert so jeweils auf eine Aufgabe und Benutzergruppe zugeschnittene Web-Applikation. Er bildet damit die Schnittstelle zwischen dem komplex strukturierten 3D-Stadtmodell und den einfach strukturiert aufbereiteten Daten und Auswertungsfunktionen für die Endnutzer. Der 3D-Webclient bietet folgende Vorteile:

- Er ist Web-basiert und daher an jedem Ort mit Internetzugang verfügbar. Benutzer können den 3D-Client über das Internet mittels Webbrowser unmittelbar verwenden ohne lokal Software installieren zu müssen. Derzeit muss allerdings noch das Google Earth Plugin installiert sein. Künftig sollen alternativ auch WebGL-basierte digitale

Globen wie z.B. OpenWebGlobe oder Cesium verwendbar sein, die ohne Browser-Plugins auskommen.

- Der Webclient ist eine rein JavaScript-basierte statische Anwendung und kann mit jedem beliebigen Webserver wie z.B. Apache oder Dropbox betrieben werden. Daher ist kein Applikationsserver nötig, was nur wenig Administrationsaufwand erfordert.
- Die reduzierten GIS-Funktionen und die Verwendung des Google Earth Plugins vereinfachen die Handhabung und ermöglichen einen schnellen Zugang, sodass Nutzer mit geringen GIS-Kenntnissen die Bedienung und die Funktionalitäten intuitiv erfassen.

Zur Realisierung des 3D-Webclients, dessen Bestandteile in der folgenden Abbildung angezeigt sind, wurde auf Open Source Software oder freie Komponenten zurückgegriffen, sodass eine möglichst freie und flexible Nutzung des Webclients möglich wird (Lizenzbestimmungen der bereitstellenden Firmen sind dabei jedoch zu beachten).

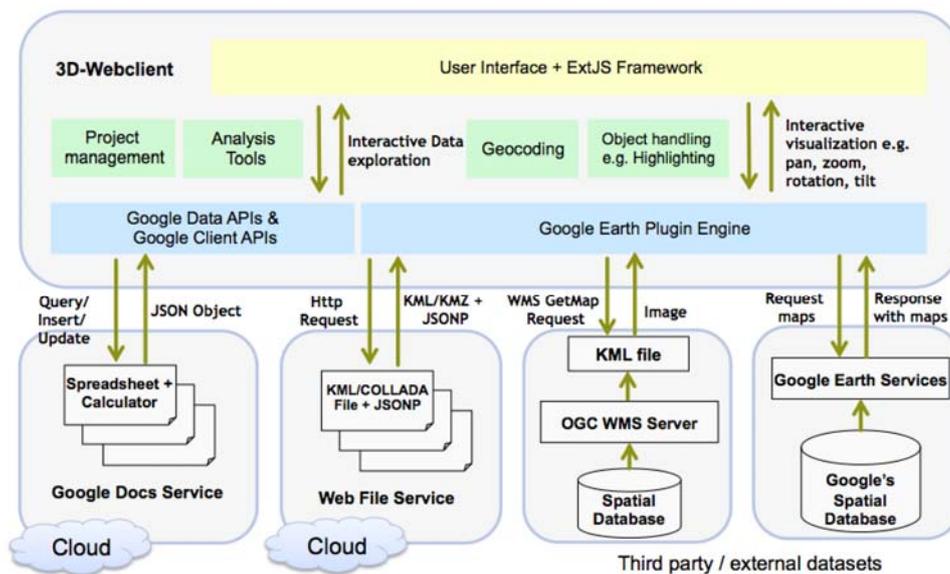


Abb. 3: Funktionalitäten und verwendete Komponenten des kollaborativen Webclients

Das Grundgerüst der Benutzeroberfläche wird mit dem JavaScript-basierten ExtJS Web-Framework erzeugt. Die graphische Darstellung der 3D-Stadtmodelle und räumliche Operationen wie Geocoding lassen sich mit dem eingebetteten Google Earth Plugin und der Google Maps API vornehmen und deren dynamische Elemente mittels JavaScript-Befehlen steuern. Zur Darstellung, Abfrage und Analyse der thematischen Daten werden die Google Data API und Google Client API im Webclient verwendet.

Auf Basis der vorgestellten Komponenten implementiert der Webclient folgende Funktionalitäten:

- **Interaktive Exploration:** Durch eine interaktive 3D-Visualisierung eröffnet sich eine Vielzahl von Möglichkeiten, graphische Informationen zum Zielgebiet darzustellen. Die Änderungen der virtuellen Kamera z.B. Panning, Zoom, Rotation mit 3D-View des 3D-Webclients werden durch das Google Earth Plugin mit seinen mitgelieferten Werkzeugen, die die grundlegenden Funktionalitäten zur Navigation in der 3D-GIS-Karte enthalten, bereitgestellt. Der 3D-Webclient ermöglicht es, ein oder mehrere Stadtobjekte zu selektieren und deren Attributwerte tabellarisch darzustellen. Die selektierten Objekte können für die Datenverarbeitung, Sachdatenabfrage oder weitere Analysen genutzt werden. Weiterhin können die selektierten Objekte sowohl in der 3D-Ansicht farblich hervorgehoben als auch aus der aktuellen Ansicht ausgeblendet werden. Über einen Auswahlbaum können die in der 3D-Ansicht anzuzeigenden Layer ein- oder ausgeblendet werden.
- **Interaktive Änderung von thematischen Eigenschaften von Stadtmodellen:** Die Editierfunktion des Webclients erlaubt es berechtigten Benutzern, die thematischen Eigenschaften von Stadtmodellen interaktiv für Einzelobjekte oder ganze Gruppen selektierter Objekte zu ändern (z.B. Korrekturen, Aktualisierung und Hinzufügen weiterer Informationen). Die editierten Sachdaten werden automatisch im Google Spreadsheet abgespeichert. Mit der Spreadsheets-Web-Applikation bietet Google auch eine eigene Anwendung zur Tabellenverarbeitung an, mit der die im Spreadsheet gespeicherten Sachdaten im Webbrowser weiter editiert und ausgewertet werden können. Diese geänderten Informationen können wiederum im 3D-Webclient visualisiert und zur Weiterbearbeitung bereitgestellt werden. Benutzer haben dabei jederzeit die Wahl, ob sie Sachdaten in der Tabellenverarbeitung oder der 3D-Ansicht bearbeiten und auswerten möchten.
- **Informationsanreicherung und -integration:** Mittels der Google Spreadsheet Web-Applikation können durch Hinzufügen weiterer Spalten einfach neue Attribute bzw. weitere Eigenschaften zu den Stadtobjekten ergänzt werden. Zudem können beliebige, über Web- oder Cloud-Dienste bereitgestellte KML-Dateien als eigene Layer hinzugefügt werden. Damit lassen sich sehr einfach Rasterdaten wie z.B. von OGC Web Map-Diensten oder 2D- und 3D-Vektordaten (letzteres z.B. auch aus dem Google 3D Warehouse) hinzuladen.
- **Darstellung der Szene in alternativen Kartendiensten:** Der 3D-Webclient kann und wird von Sachbearbeitern auch dazu benutzt, thematische Eigenschaften von Stadtobjekten zu überprüfen bzw. zu ergänzen. Konkret ging es in dem Anwendungskontext der Energieplanung darum, die Stockwerkszahlen der Gebäude und den Sanierungszustand der Fenster zu bestimmen. Zu diesem Zweck kann durch einen Mausklick ein neues Fenster geöffnet werden, in dem andere Karten-Dienste wie z.B. Google Streetview, Schrägluftbilder in Microsoft Bing Maps oder die Mash-Up-Anwendung DualMaps aufgerufen werden, wobei direkt die der aktuellen 3D-Perspektive entsprechende Region dargestellt wird, mit Blickrichtung auf die im 3D-Webclient selektierten Objekte.

- **Anfragen:** Thematische Anfragen sind oft genutzte Analysemethoden in GIS-Anwendungen. Durch einfache Bedingungen auf einem oder mehreren Attributen lassen sich die Stadtobjekte thematisch filtern. In dem geschilderten Anwendungskontext der Energieplanung in London kann z.B. einfach nach allen Gebäuden des Eigentümers PoplarHARCA mit einem Wärmeenergiebedarf von mehr als 100 kwh pro Jahr und m^2 Nutzfläche gesucht werden. Selektierte Objekte können graphisch hervorgehoben und deren eindeutige Schlüssel im 3D-Webclient aufgelistet werden.
- **Informationsaggregation:** Thematische Daten von Gruppen betroffener Stadtobjekte können per Mausklick aggregiert werden. So können für eine Gruppe selektierter Stadtobjekte Summen, Mittelwerte, Minimal- bzw. Maximalwerte numerischer Attribute direkt im 3D-Webclient berechnet werden. Für die Energieplanung kann z.B. der Gesamtwärmebedarf der Wohngebäude einer Straße ermittelt werden, indem zunächst die Gebäude in der Straße über eine Anfrage oder auch manuelle Auswahl selektiert und dann die Summenfunktion auf das Gebäudeattribut „Wärmeenergiebedarf“ angewendet wird.
- **Berechnung und Simulation:** Einfache Simulationen oder Berechnungen können direkt im Webclient durchgeführt werden. Solche Simulationen erfolgen oftmals auf der Basis von Eigenschaften und Kenngrößen wie Volumen und Flächengrößen, die vorab aus den geometrischen Eigenschaften des 3D-Stadtmodells berechnet oder abgeleitet wurden. Im Anwendungskontext der Entscheidungsunterstützung für die energetische Sanierung werden die Energiebedarfe auf der Basis der geometrischen Kenngrößen, die vorher auf der 3DCityDB für die Gebäude bestimmt wurden, sowie weiteren Parametern wie dem Sanierungszustand der Wände und Fenster dynamisch berechnet. Dabei werden die Berechnungsfunktionen mittels Spreadsheet-Formeln realisiert. Ändert der Benutzer den Sanierungszustand, wird automatisch der Energiebedarf neu abgeschätzt, ohne erneuten Zugriff auf die Datenbank.
- **Speicherbare Konfigurationen:** Die Konfigurationseinstellungen eines Projekts werden ebenfalls in einem Google Spreadsheet gespeichert. Sie umfassen u.a. die URLs der geladenen Visualisierungsmodelle (KML-Dateien), die URLs der damit verbundenen Spreadsheets zur Speicherung der Sachdaten, die Benutzerkommentare sowie gespeicherte 3D-Kameraperspektiven. Durch die Verwendung derselben Konfiguration können mehrere Nutzer gleichzeitig auf demselben Projekt arbeiten. Die Konfigurationsdatei kann auf Wunsch einschließlich der thematischen Daten mit dem 3D-Webclient geklont und danach eigenständig weiterbearbeitet werden.

Mit den vorgestellten Funktionalitäten reicht das Anwendungsspektrum des 3D-Webclients von der reinen Visualisierung von 3D-Stadtmodellen über die Exploration und Bearbeitung von Sachdaten der 3D-Stadtmodelle in Form von Tabellen bis hin zur Berechnung von Ergebnissen komplexer Analysen und Simulationen der semantischen Stadtmodelle. Der 3D-Client wurde indessen ausdrücklich nicht zur Bearbeitung der 3D-Geometrien oder semantischen Strukturierung des 3D-Stadtmodells in der 3D-Geodatenbank konzipiert.

5 Anwendungsbeispiele in Berlin und London

Zur Umsetzung energiepolitischer Ziele im Gebäudesektor werden umfangreiche öffentliche Förderinstrumente für Gebäudeeigentümer eingerichtet. Durch Förderprogramme werden energetische Sanierungsmaßnahmen finanziell unterstützt und es wird somit ein Anreiz geschaffen, in Maßnahmen zur Energieeinsparung zu investieren. Die Förderung ist je nach Maßnahme an spezifische Voraussetzungen gebunden. Sie umfassen gebäudespezifische Parameter wie Gebäudetyp, -alter und Zustand der Heizanlage sowie sozio-ökonomische Indikatoren wie die soziale Lage des Gebäudes.

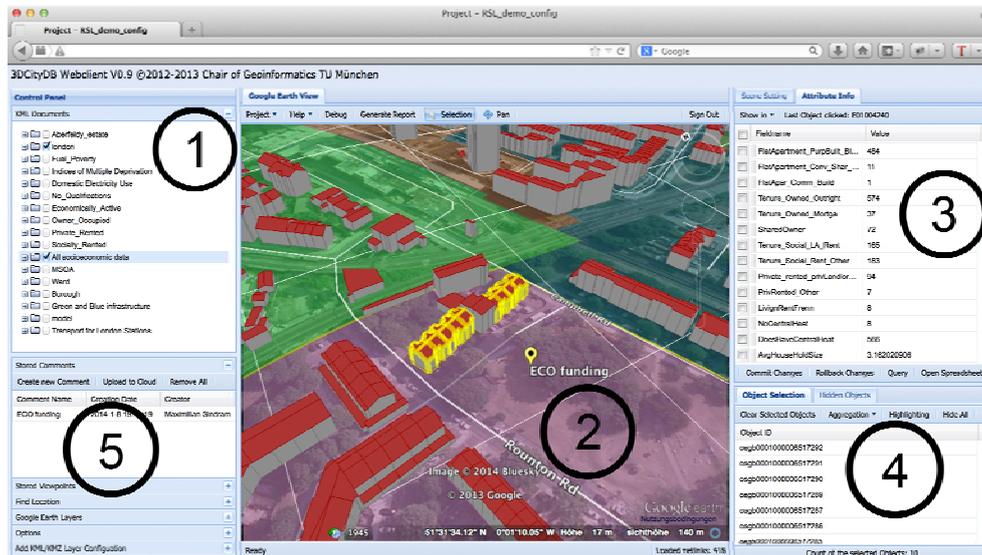


Abb. 4: Bildschirmkopie des 3D-Webclients mit einer Szene aus London. Gezeigt wird das 3D-Stadtmodell mit sozioökonomischen Daten für statistische Blöcke.

Sozialwohnungsgesellschaften, die meist eine Vielzahl an Gebäuden und Gebäudekomplexen verwalten, verfügen selten über geeignete Werkzeuge, die eine Prüfung des Gebäudebestands hinsichtlich der Förderbedingungen ermöglicht und somit sicherstellen, dass ausgewählte Gebäude für eine Förderung geeignet sind. Neben der Prüfung der bauphysikalischen, technischen und sozio-ökonomischen Eingangsbedingungen stehen vor allem die Fragen nach den Auswirkungen der Sanierungsmaßnahmen auf den Gebäudebestand im Fokus der Wohnungsgesellschaften.

Im Jahr 2013 wurde in Großbritannien das *Energy Companies Obligation (ECO)* Förderprogramm gestartet, welches neben der *Green Deal* Initiative für schwer zu sanierende Gebäude konzipiert wurde, die in sozial benachteiligten Gebieten liegen. Der 3D-Webclient wird zur Identifikation potentiell geeigneter Gebäude von der Eigentümergesellschaft PoplarHARCA aus dem Stadtteil Bromley-by-Bow in London eingesetzt. Dazu werden neben dem semantischen 3D-Stadtmodell und den darüber geschätzten Energiebedarfen sozio-ökonomische Daten u.a. zur *Fuel Poverty* integriert (siehe Abb. 4). Letztere Daten stehen jedoch nicht gebäudescharf zur Verfügung. Sie basieren auf den in England eingeführten

statistischen Vergleichsgebieten, den Super Output Areas (SOA). Diese Einheiten definieren eine Fläche, die im Falle der Lower SOAs Gebiete mit 400 bis 1200 Haushalten beschreiben und im Falle der Middle SOAs Gebiete mit 2000 bis 6000 Haushalten repräsentiert. Die amtliche Statistik stellt alle sozio-ökonomischen Daten in dieser Aggregationsebene zur Verfügung.

Über eine Auswahlliste (siehe Punkt 1 in Abbildung 4) können Layer selektiert werden, die in der 3D-Kartenansicht (Punkt 2) gemeinsam eingeblendet werden. Zusätzlich können Sachinformationen der Objekte des aktuell selektierten Layers abgefragt werden. Diese werden in der Tabellenansicht unter Punkt 3 angezeigt. In einer weiteren Ansicht (Punkt 4) werden die eindeutigen Schlüssel der Objekte aufgelistet, die beispielsweise für eine Aufsummierung der Gesamtenergieverbräuche selektiert wurden. Punkt 5 in Abbildung 4 zeigt die Funktionalität, zu einem aktuellen Ausschnitt der 3D-Kartenansicht Kommentare zu speichern. Diese können von weiteren Nutzern eingesehen, ergänzt und verändert werden und erleichtern dadurch die Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten.



Abb. 5: Interaktive Veränderung von Gebäudeparametern (als Folge einer Wärmedämmung) und deren Auswirkungen auf den Energiebedarf. Gezeigt wird eine Szene eines Quartiers in Berlin Moabit.

Durch eine Vorselektion werden die Gebäude lokalisiert, die in sozial benachteiligten SOAs liegen. In einem zweiten Schritt wird über die Stockwerkszahl ein Indikator für den Aufwand der Sanierungsmaßnahme abgeleitet. ECO definiert ein Gebäude mit mehr als vier Stockwerken als schwer zu sanieren. Über die Markierungsfunktion (*Highlighting*) im Client werden dem Planer nun die für eine Förderung gut geeigneten Gebäude angezeigt.

Um die Auswirkungen der geplanten Sanierungsmaßnahmen auf die energetische Bilanz der vorselektierten Gebäude zu simulieren, bietet der Client eine dynamische Simulationsfunktion an. Mit dieser Funktion können für ein oder mehrere Gebäude gleichzeitig durch Anpassung der Wärmetransmissionskoeffizienten der Außenwände, Dächer und Fenster (die sogenannten U-Werte) in der Attributtabelle an die nach einer Sanierungsmaßnahme geltenden neuen U-Werte ein voraussichtlicher Wärmeenergiebedarf (u.a. der Jahresgesamtwärmeenergiebedarf [kwh/a] und der Jahreswärmeenergiebedarf pro m² Nutzfläche) berechnet werden (siehe Abb. 5). Dies geschieht ad hoc und ermöglicht dadurch eine schnelle Bewertung der geplanten Maßnahmen hinsichtlich der in der Realität entstehenden Auswirkungen. Die energetischen Berechnungsverfahren auf der Basis des CityGML-Gebäudemodells werden in den Arbeiten von KADEN et al. 2013 und KADEN & KOLBE 2013 detailliert beschrieben.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Neuartige Anwendungen wie die Entscheidungsunterstützung zur Vergabe von Förderungen energetischer Gebäudesanierungen, die die in 3D-Stadtmodellen enthaltenen Informationen zur Berechnung von Schlüsselindikatoren ausnutzen, erfordern auf der einen Seite umfangreiche Daten über die betreffenden Objekte. Die energetische Simulation erfordert zudem u.a. die Klassifikation von Gebäuden, die Berechnung von Gebäudevolumina und -flächeninhalten sowie der Größen aller Berührungsflächen topologisch adjazenter Gebäude. Diese Anforderungen können von komplex strukturierten semantischen 3D-Stadtmodellen nach dem CityGML-Standard und darauf aufsetzenden Analysemodulen erfüllt werden. Auf der anderen Seite sind die Benutzer solcher Anwendungen in der Regel weder Spezialisten für GIS noch für 3D-Stadtmodelle. Planer und Entscheider benötigen intuitiv bedienbare Werkzeuge, die 1) auf ihnen vertrauten Strukturen und Bedienkonzepten aufsetzen, die 2) den Zugriff auf räumliche Eigenschaften und die Visualisierung des räumlichen Kontextes ermöglichen, sie 3) aber von der Komplexität detailliert strukturierter semantischer 3D-Stadtmodelle abschirmt.

In diesem Beitrag wurde eine logische Architektur vorgestellt, die diesen Anforderungen durch die Definition zweier unterschiedlich komplexer Systemebenen Rechnung trägt, wobei die (komplexere) Basisebene die Integration semantischer 3D-Stadtmodelle und komplexer Berechnungsverfahren bzw. Simulationen umfasst und die Anwendungsebene die Erstellung spezieller Applikationen („Apps“) mit fokussierten Informationen und einfachen Analyseverfahren adressiert. Zur Realisierung der anwendungsspezifischen Applikationen wurde gezeigt, wie die relevanten Informationen in Form von Tabellen und 3D-Visualisierungsmodellen aus einer CityGML-basierten 3D-Geodatenbank (der 3DCityDB) extrahiert, über Cloud-Dienste bereitgestellt und dem Benutzer mittels eines 3D-Webclients integriert als kollaborative Web-Applikation zur Verfügung gestellt werden können.

Im Vergleich zu anderen, bereits bestehenden 3D-Web-Anwendungen, ermöglicht dieser prototypische 3D-Webclient nicht nur eine 3D-Visualisierung, sondern auch die Objekte der virtuellen 3D-Stadtmodelle einschließlich der relevanten thematischen Informationen über das Internet im Webbrowser bearbeiten zu können. Im Rahmen der durch das Climate KIC geförderten Forschungsprojekte Energieatlas Berlin und Neighbourhood Demonstrators wird der spezielle 3D-Webclient für die Planung der energetischen Gebäudesanierung aktuell von Wohnbaugesellschaften eingesetzt und evaluiert.

Der 3D-Webclient soll in der Zukunft sowohl konzeptuell als auch technisch erweitert werden. Die meisten Funktionsblöcke basieren derzeit auf frei zugänglichen Diensten der Fa. Google. Neben der Fokussierung auf einen Hersteller ist dies für viele Anwender u.a. hinsichtlich der Lizenzierungs- und Datenschutzaspekte problematisch. Konzeptuell wird es darum gehen, die Funktionsblöcke, aus denen Webclients für 3D-Stadtmodell-Anwendungen zusammengesetzt werden, zu kategorisieren, präzise zu beschreiben und von spezifischen Implementationen und Herstellern zu abstrahieren. So soll es künftig möglich sein, statt der Google Spreadsheets auch relationale Datenbanken wie z.B. Oracle oder PostgreSQL zur Speicherung der Sachdatentabelle zu verwenden. Für die 3D-Ansicht ist derzeit zwingend das (kostenlos erhältliche) Google Earth Plugin notwendig; künftig soll es möglich sein, die Visualisierungskomponenten alternativer Anbieter zu verwenden. OpenWebGlobe und Cesium sind zwei Open-Source-Produkte, welche die Vorteile eines kostenlosen 3D-Webviewers auf der Basis der zunehmend etablierten WebGL-Technologie bieten, die im

Gegensatz zum Google Earth 3D-Webviewer auf die Nutzung von Plugins im Browser verzichtet. Darüber hinaus können diese Open Source 3D-Webviewer benutzerdefinierte digitale Geländemodelle (DGM) verwenden. Generell sollen die Komponenten der Benutzeroberfläche des 3D-Webclients für unterschiedliche Nutzergruppen konfigurierbar gemacht werden. So kann es sein, dass ein Nutzer lediglich eine 3D-Ansicht der Gebäude benötigt ohne dabei Zugriff auf Attribute zu haben. In diesem Fall wird die Komponente zur Darstellung und Bearbeitung der Attribute im Webclient ausgeblendet, so dass der zusätzliche Platz auf dem Bildschirm für die Darstellung des 3D-Kartenviews zur Verfügung steht.

Literatur

- AGEB (2012), Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2012. Berechnungen auf Basis des Wirkungsgradansatzes. Stand: September 2012. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., URL (9. 1. 2014): <http://www.ag-energiebilanzen.de/DE/daten-und-fakten/auswertungstabellen/auswertungstabellen.html>
- GRÖGER, G., KOLBE, T. H., 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> (9. 1. 2014).
- HERRERUELA, J., NAGEL, C. & KOLBE, T. H. (2012), Value-added Services for 3D City Models using Cloud Computing. In: LÖWNER, M., HILLEN, F. & WOHLFAHRT, R. (Hrsg.), Geoinformatik 2012 „Mobilität und Umwelt“, Shaker Verlag, 327-335.
- KADEN, R. & KOLBE, T. H. (2013), City-wide Total Energy Demand Estimation of Buildings using Semantic 3D City Models and Statistical Data. In: Proc. of the 8th Int. Conference on 3D Geo-Information 2013 in Istanbul. ISPRS Annals, Vol. II-2/W1, 163-171.
- KADEN, R., PRYTULA, M., KRÜGER, A. & KOLBE, T. H. (2013), Energieatlas Berlin: Vom Gebäude zur Stadt – am Beispiel zur Abschätzung der Wärmeenergiebedarfe von Gebäuden. In: KOCH, A., BILL, R. & DONAUBAUER, A. (Hrsg.), Geoinformationssysteme 2013, Beiträge zum 18. Münchner Fortbildungsseminar, Wichmann Verlag, 17-32.
- KOLBE, T. H., NAGEL, C., & HERRERUELA, J. (2013): 3D City Database for CityGML. Addendum to the 3D City Database Documentation, Version 2.1, URL (9. 1. 2014): <http://www.3dcitydb.org>
- KOLBE, T. H. (2009): Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. In: LEE, J. & ZLATANOVA, S. (Eds.): 3D Geo-Information Sciences, Springer, 15-31.
- LOGA, T. & IMKELLER-BENJES, U. (1997), Energiepass Heizung/Warmwasser. Institut Wohnen und Umwelt (IWU), URL (9. 1. 2014): http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/ephw-1.pdf.
- STADLER, A., NAGEL, C., KÖNIG, G. & KOLBE, T. H. (2009): Making Interoperability Persistent: A 3D Geodatabase Based on CityGML. In: LEE, J. & ZLATANOVA, S. (Eds.): 3D Geo-Information Sciences, Springer, 175-192.
- 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> (9. 1. 2014).
- YAO, Z. & KOLBE, T. H. (2014), Cloud-basierter 3D-Webclient für kollaboratives Arbeiten auf semantischen 3D-Stadtmodellen. Erscheint in: Tagungsband zur 34. wissenschaftlich-technischen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Hamburg, 26.-28. 3. 2014, DGPF.