

Erfassung und Fortführung von 3D-Gebäudemodellen auf Basis von Airborne LiDAR-Daten, ImageMatching und Katasterinformationen

Klement Aringer, Josef Dorsch und Robert Roschlaub

Zusammenfassung

Das Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern hat damit begonnen, ein landesweites 3D-Gebäudemodell mit standardisierten Dachformen ohne Texturen für alle 8,1 Millionen Gebäude in Bayern zu erstellen. Im Rahmen der Erfassung des 3D-Gebäudemodells dienen als Datengrundlage Airborne LiDAR-Daten und die Gebäudegrundrisse der amtlichen Liegenschaftskarte. Die Datenhaltung des 3D-Gebäudemodells erfolgt in einer zentralen Datenbank unter Verwendung eines deutschlandweit standardisierten Datenschemas und der Datenaustauschnittstelle CityGML. Die Aktualisierung des 3D-Gebäudemodells erfolgt einerseits für Neubauten durch die terrestrische Gebäudeeinmessung im Rahmen der Fortführung des amtlichen Liegenschaftskatasters. Andererseits werden Dächer von Gebäuden, die erst nach der LiDAR-Befliegung verändert und noch nicht terrestrisch gemessen wurden, mit Hilfe eines aus orientierten Luftbildern generierten bildbasierten digitalen Oberflächenmodells (bDOM) erfasst. Erfordernisse an den Datenaustausch und die Umsetzung der Anforderungen aus INSPIRE werden formuliert.

Summary

The Bavarian State Office for Surveying and Geoinformation has launched a statewide 3D Building Model with standardized roof shapes without textures for all 8.1 million buildings in Bavaria. For acquisition of the 3D Building Model Airborne LiDAR-data is used as basis in combination with the building ground plans of the official cadastral map and a list of standardized roof shapes. The data management of the 3D Building Model is carried out by a central database with the usage of a nationwide standardized data model and the data exchange interface CityGML. On the one hand the update of the 3D Building Model for new buildings is done by terrestrial building measurements within the maintenance process of the cadastre. On the other hand the roofs of buildings which were built after the LiDAR flight and which were not measured terrestrially yet, are captured by means of picture-based digital surface-models derived from image-matching of oriented aerial photographs (DSM from image matching). Requirements of INSPIRE for data exchange and implementation will be described.

Schlüsselwörter: 3D-Gebäudemodell, LiDAR, LoD2, CityGML, ImageMatching, INSPIRE

1 Einleitung

Aufgrund der föderalen Struktur Deutschlands ist das Vermessungswesen Aufgabe der Bundesländer. Daher bedarf es für deutschlandweite Projekte stets der Zustimmung und Mitwirkungsbereitschaft der Bundesländer. Hierzu zählt auch die Verabschiedung eines gemeinsamen Standards zur Erfassung eines deutschlandweiten 3D-Gebäudemodells. Im Jahr 2012 hat die AdV¹ einen Produktstandard für ein 3D-Gebäudemodell beschlossen. Demnach werden Gebäudegrundrisse grundsätzlich der amtlichen digitalen Liegenschaftskarte entnommen und die Gebäude einheitlich mit einem Flachdach in der sogenannten ersten Detaillierungsstufe (Level of Detail 1 – LoD1) als Klötzchen dargestellt. Seit Mitte 2013 wird erstmalig ein zentraler LoD1-Datenbestand an der Zentralen Stelle Hauskoordinaten und Hausumringe (ZSHH) aufgebaut. Der Datenaustausch zwischen den Ländern und der ZSHH erfolgt über ein Datenaustauschformat unter Verwendung eines deutschlandweit einheitlichen Profils der AdV auf der Basis des City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standards des OpenGIS® und der OGC²-Spezifikation CityGML 1.0.0.

Dieses AdV-CityGML-Profil sieht auch die Abgabe von Gebäuden mit standardisierten Dachformen als Gebäudemodelle der zweiten Detaillierungsstufe (LoD2) mit optionalen Fototexturen vor. Der Automationsgrad der Erkennung von Dachformen und die Höhengenaugigkeit der automatischen Dachrekonstruktion sind zum einen abhängig vom Grad der Generalisierung der Dächer hin zu den Standarddachformen und zum anderen von der Erfassungsgrundlage. Werden zur Erfassung LiDAR-Daten (Light Detection And Ranging) aus dem Airborne Laser Scanning verwendet, dann ist die Dichte der Punktwolke maßgeblich. Bei Verwendung von orientierten Luftbildern bestimmt vorrangig die Genauigkeit der Orientierungselemente und die eingesetzte Methode der Punktzuordnung, wie z. B. der Semi-Global Matching Algorithmus (Halla 2011), die Qualität der Lage- und Höhengenaugigkeit. Die Verwendung der Gebäudegrundrisse vereinfacht die Rekonstruktion des 3D-Gebäudemodells mit LiDAR-Daten und Luftbildern (Vosselman 2002, Rotensteiner and Briese 2003).

1 AdV: Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, www.adv-online.de

2 OGC: Open Geospatial Consortium

Unabhängig von der eingesetzten Erfassungsmethode und des zugrunde gelegten Datenbestandes ist spätestens nach Abschluss der Ersterfassung eines 3D-Gebäudemodells eine Fortführung sicherzustellen. Dies erfordert ein umfassendes Konzept, das in Bayern von der Ersterfassung über die Datenhaltung bis hin zur Fortführung in einen Workflow umgesetzt werden muss.

2 Das Konzept der Erstableitung

Für Bayern stehen seit 2012 landesweit LiDAR-Daten mit einer Punktdichte zwischen 1 und 4 Punkten/m² zur Verfügung, aus denen sowohl ein hochgenaues Digitales Geländemodell (DGM) als auch ein genaues Oberflächenmodell (DOM) berechnet werden kann. Das DGM stellt die natürliche Erdoberfläche ohne Bewuchs und Gebäude dar, wohingegen das DOM die Erdoberfläche mit allen darauf befindlichen Objekten (Bewuchs, Bebauung) repräsentiert. Aktuell steht das DGM in der kleinsten Gitterweite von 1 m für ca. 90 % der Landesfläche von Bayern zur Verfügung. Die Flächendeckung wird bis Mitte 2014 erreicht.

In Verbindung mit den Gebäudegrundrissen aus dem amtlichen Liegenschaftskataster eignen sich LiDAR-Daten in idealer Weise zur Ersterfassung eines 3D-Gebäudemodells (Vosselman 2001, Schilcher et al. 1998, 1999). Die Verschneidung von Gebäudegrundrissen mit dem DGM liefert die Fußpunkte der Gebäude. Das DOM dient als Datengrundlage zur Dacherkennung.

Im Folgenden wird die Aufgabe beschrieben und ein Lösungsansatz gegeben, wie aus LiDAR-Daten Dächer automatisch erkannt werden können. Anschließend wird auf die in Bayern realisierte Umsetzung zur Ersterfassung des landesweiten 3D-Gebäudemodells eingegangen.

2.1 Problembeschreibung

Bei Verwendung beliebig verteilter Punktwolken zur Ableitung von 3D-Gebäudemodellen besteht die Schwierigkeit in der Interpretation von einfachen und unstrukturierten Höheninformationen und der anschließenden Modellierung der komplexen Vektorgeometrien. Unabhängig davon, ob die Punktwolken regelmäßig oder unregelmäßig angeordnet sind, beschränkt sich der Informationsgehalt der Daten auf die Lage und Höhe. Weitreichendere Strukturen fehlen. Werden die Punktwolken jedoch in Verbindung mit Gebäudegrundrissen gebracht (Abb. 1), wie sie beispielsweise im amtlichen Liegenschaftskataster vielfach sehr aktuell vorliegen, so erhalten die Punktwolken bereits eine erste semantische und räumliche Zuordnung.

Die Zuordnung des Gebäudegrundrisses entspricht einer Selektion auf relevante Punkte der Punktwolke. Die Höheninformationen der selektierten Punkte können nun

als Repräsentanten der Dächer interpretiert werden. Erste Dachstrukturen wie Firstlinien lassen sich durch eine Delaunay Triangulation bereits plastisch visualisieren. Es fehlt jedoch eine entsprechende geometrische Zuordnung als vektorielle Flächen.

Ein mögliches Verfahren der automatischen Dachrekonstruktion geht wie folgt vor: Jeder Dreiecksfläche, die aus den relevanten Punkten durch eine höhenabhän-

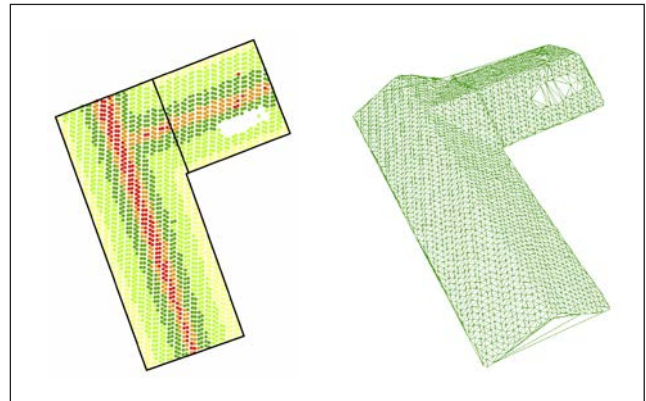


Abb. 1: Höhenodierte Laserdaten innerhalb eines Gebäudegrundrisses (links), Delaunay Triangulation (rechts)

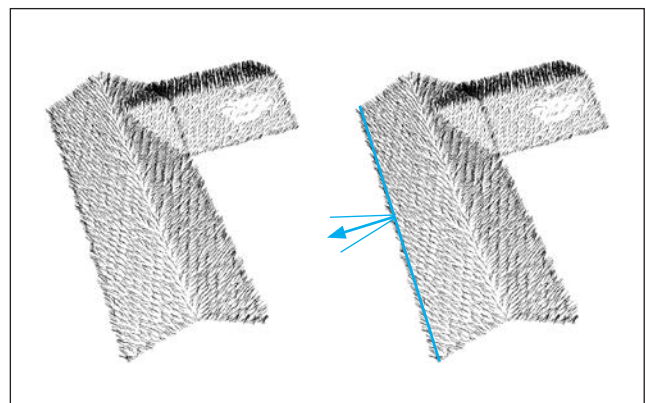


Abb. 2: Flächennormalen zur Delaunay Triangulation (links), Prüfung der Orthogonalität einer Flächennormale in Bezug auf eine Gebäudeseite (rechts)

gige (2,5-dimensionale) Delaunay Triangulation berechnet wurde, wird eine auf die Länge normierte Flächennormale zugeordnet.

Anschließend wird analysiert, zu welcher Seite des Gebäudegrundrisses jede Flächennormale gehört. Wie in Abb. 2 dargestellt, wird eine beliebige Flächennormale herausgegriffen. Die Flächennormale kann aufgrund ihrer Neigung in die xy-Ebene projiziert und ein entsprechender Richtungswinkel in der xy-Ebene berechnet werden. Unter Beachtung eines im Uhrzeigersinn verlaufenden Gebäudegrundrisses wird als erstes Kriterium geprüft, ob der Richtungswinkel, der in die Ebene projizierten Flächennormale, rechtwinklig zur Gebäudeseite liegt. Eine gewisse Varianz zwischen den Richtungswinkeln wird berücksichtigt. Als zweites und nachgeschaltetes Kriterium wird der minimale orthogonale Abstand des Aufpunktes der Flächennormale in der xy-Ebene zu einer der

Gebäudeseiten ermittelt. Auf diese Art und Weise wird in der Regel jede Flächennormale genau einer Seite des Gebäudegrundrisses zugeordnet. Flächennormalen, die keiner Seite zugeordnet werden können, beispielsweise wegen des streuenden Reflexionsverhaltens des Laserstrahls, bleiben bei den weiteren Berechnungen unberücksichtigt. Dieses Vorgehen entspricht einer Klassifikation der Flächennormalen je Gebäudeseite, wobei die Anzahl der

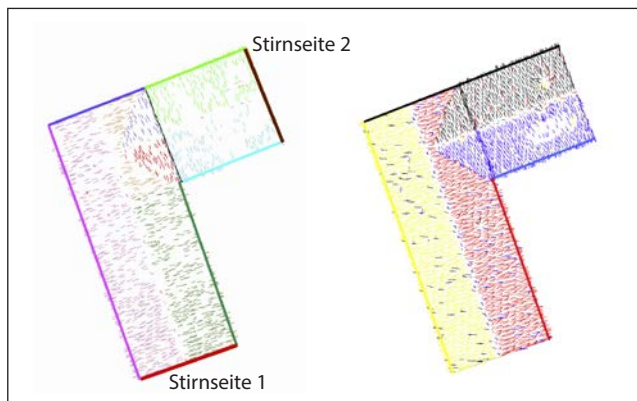


Abb. 3: Klassifikation der Flächennormalen zu jeweils einer Gebäudeseite (links), Reduzierung der Klassen auf die prägenden Gebäudeseiten (rechts)

Klassen durch die Anzahl der den Gebäudegrundriss beschreibenden Linien festgesetzt ist. Wie das linke Bild der Abb. 3 zeigt, wurden die Flächennormalen für die acht Linien des Gebäudegrundrisses in acht farblich unterschiedliche Klassen unterteilt – wobei eine der Seiten wegen der kurzen Länge kaum zu erkennen ist. Dies entspricht häufig der Realität im Liegenschaftskataster.

Im Hinblick auf eine realistische Dachrekonstruktion ist eine Reduktion dieser acht Klassen erforderlich. Bestünde der Gebäudegrundriss aus weiteren Unterbrechungen, dann gäbe es folglich entsprechend viele Klassen. Jeder Gebäudebrechpunkt in der Linie erzeugt eine weitere Klasse. Aus Abb. 1 konnten wir bereits erkennen, dass die vermutete Dachstruktur aus zwei ineinander verlaufenden Satteldächern besteht – also aus vier Flächen. Es gilt daher, die Klassenanzahl durch eine geeignete Auswahl zu reduzieren. Als Entscheidungskriterium zur Klassenreduktion dient die Anzahl der Flächennormalen in einer Klasse bzw. das Unterschreiten eines gewissen Schwellenwertes. Eine Klasse kann beispielsweise gelöscht werden, wenn ihr nicht ausreichend viele Flächennormalen zugeordnet werden können.

Zusätzlich sollte bei der Klasseneinteilung vorausgesetzt werden, dass der maximale Abstand einer Flächennormale zu einer Gebäudeseite nicht größer sein darf als die kürzeste Seitenlänge der beiden anliegenden Seiten. Im Beispiel der Abb. 3 links entfallen die Stirnseiten der Satteldächer mit der dunkelroten und der braunen Klasse.

Gemeinsame Linienabschnitte sollten zusammengefasst werden bzw. Punkte, die auf einer Linie liegen, müssen gelöscht werden. In Abb. 3 links werden die hellgrüne und die blaue Linie zu einer gemeinsamen schwarzen

Linie (Abb. 3 rechts) zusammengefasst und der schwarzen Klasse zugeordnet.

Eine weitere Klassenreduktion kann vorgenommen werden, indem eine Zuordnung der Flächennormalen zu den Gebäudegrundrisslinien über die eigentliche Gebäudeseite hinaus zugelassen wird. Somit können beispielsweise in Abb. 3 die olivfarbenen und hellbraunen Normalen zur roten Klasse sowie die roten und hellblauen

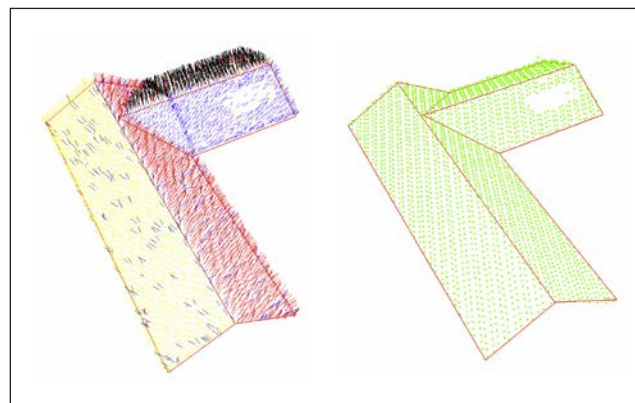


Abb. 4: Schnittlinien je farbcodierter Klasse (links), Überlagerung der Flächen mit den Laserpunkten (rechts)

Normalen zu einer dunkelblauen Klasse zusammengefasst werden. Am Ende erhalten wir vier farbcodierte Klassen.

Nach erfolgter Reduktion der Klassen werden je Klasse sämtliche Flächennormalen arithmetisch gemittelt. Mit Hilfe der mathematischen Methoden aus der konstruktiven Geometrie lassen sich die Schnittlinien der Flächennormalen jeweils zueinander berechnen. Die Firstlinien ergeben sich aus den Schnittlinien zwischen den Satteldächern. Die Trauflinien bzw. Traufhöhen ergeben sich durch Verschneidung der durch die Flächennormalen repräsentierten Flächen der Dächer und Wände der Gebäude. Das Resultat ist ein automatisiert abgeleitetes Vektormodell, bestehend aus vier Flächen. In Abb. 4 sind die klassifizierten und farbcodierten Flächennormalen (links) dargestellt bzw. der Punktauftrag der Laserpunkte (rechts) über das Vektormodell gelegt.

2.2 Halbautomatisierte Umsetzung der Ersterfassung

Nachdem einerseits bayernweit LiDAR-Daten zur Verfügung stehen und ein landesweites bDOM aus Matching sich erst noch im Aufbau befindet, sowie andererseits die LiDAR-Daten qualitativ sehr gut für die Dachrekonstruktion geeignet sind, gilt es, aus einer bestehenden Laserpunktwolke das 3D-Gebäudemodell abzuleiten. Die programmtechnische Umsetzung der oben beschriebenen Problemstellung der automatisierten Dacherkennung ist vielfach in den bereits am Markt befindlichen Softwarepaketen zur Ableitung von 3D-Gebäudemodellen unterschiedlich gelöst worden.

Der mit der Software »Building-Reconstruction« realisierte Lösungsansatz zur Ableitung von 3D-Gebäude-

modellen im LoD2 der Fa. virtualcitySYSTEMS (VCS) führt zuerst eine Grundrisszerlegung in ein oder mehreren einzelnen Zellen durch und approximiert dann vollständige Standarddachformen für jede Zelle. Durch Zusammenfassung der Zellen entstehen geeignete Bauteile, denen jeweils eine Standarddachform zugeordnet wird. Ein Gebäude besteht damit aus einen oder mehreren Bauteilen. Die Standarddachform mit der geringsten Abweichung zu den LiDAR-Daten wird als plausibel angenommen. Die Dachflächen dieser Dachform werden anschließend symmetrisch bestmöglich an die vorhandenen LiDAR-Daten angepasst.

Die Einhaltung der in Bayern geforderten Grundrisstreue der 3D-Gebäudemodelle gegenüber dem Gebäudebestand des amtlichen Liegenschaftskatasters ist in der eingesetzten Software realisiert. Damit ist sichergestellt, dass bei der Erfassung des landesweiten 3D-Gebäudemodells kein zusätzlicher Datenbestand zum Liegenschaftskataster aufgebaut wird. Vielmehr bietet die Einhaltung der Grundrisstreue die Möglichkeit, das Liegenschaftskataster zu einem späteren Zeitpunkt in einfacher Form vollständig in die dritte Dimension zu überführen.

Mit der eingesetzten Software stehen dem Operateur zwei Bearbeitungsfenster zur Verfügung. In einer 2D-Ansicht wird das Digitale Orthophoto (DOP) oder ein farbkodiertes Relief des Digitalen Oberflächenmodells (DOM) mit den Grundrissen aus dem amtlichen Liegenschaftskataster überlagert (Abb. 5 links) und farblich markiert. In blau sind diejenigen Gebäude dargestellt, deren Dächer von der Software automatisch erkannt wurden und nach visueller Prüfung keine weitere Nachbearbeitung notwendig ist. In Grün sind die vom Operateur bereits nachbearbeiteten Gebäude dargestellt. In Gelb wird das aktuell in Bearbeitung befindliche Gebäude markiert. Für dieses Gebäude werden im rechten Bearbeitungsfenster in einer 3D-Ansicht (Abb. 5 rechts) die Punktwolke der LiDAR-Daten sowie das DGM als Punktauftrag hinzugeladen. Mit wenigen Bearbeitungsschritten passt der Operateur anhand einer Auswahlliste von standardisierten Dachformen die Dachstruktur des jeweiligen Gebäudes generalisiert an die Laserpunkte an. Das Ergebnis jedes Bearbeitungsschrittes wird unmittelbar in der 3D-Ansicht dargestellt.



Abb. 5: DOP mit Gebäudegrundrissen (links) und korrespondierende Laserpunktvolke eines zu bearbeitenden Gebäudes in Gelb (rechts)

Der Automationsgrad der Dacherkennung kann durch die Nachbearbeitungsquote ausgedrückt werden. Sie ist im Wesentlichen abhängig von der Dichte und Art der Bebauung. In moderneren Städten liegt die Nachbearbeitungsquote beispielsweise bei nur ca. 15 %. Dennoch wird in der Anfangsphase der 3D-Gebäudeerfassung jedes Gebäude vom Bearbeiter kontrolliert. Je höher der Anteil von engbebauten historischen Gebäuden ist, desto geringer ist die automatisierte Erkennung der Dächer. Die Nachbearbeitungsquote kann hierbei zwischen 20 % und 40 % liegen.

Die Punktdichte der Laserdaten beeinflusst ebenfalls die Nachbearbeitungsquote. So ergab sich in Neubausiedlungen mit einer typisch deutschen Reihenhaussiedlung bei einer Punktdichte von ca. 0,7 Punkten/m² eine Nachbearbeitungsquote von ca. 25 % bis 30 %, während bei Verwendung von ca. 4,8 Punkten/m² die Quote auf 16 % fiel.

Die bundesweite Erstellung eines 3D-Gebäudemodells im LoD2 ist innerhalb der AdV noch nicht zeitlich festgelegt, es wurden aber von den AdV-Arbeitskreisen Geotopographie und Liegenschaftskataster sowie der Projektgruppe »3D-Gebäudemodelle« Modellierungsbeispiele für die 3D-Gebäudemodelle in LoD2 zusammengestellt, um ein bundesweit einheitliches 3D-Gebäudemodell zu gewährleisten. Ähnlich dem Vorgehen bei der kartographischen Generalisierung werden im LoD2 keine Details der Dachlandschaft, wie z.B. Gauben, Dachaufbauten, Loggien und Balkone modelliert. Bei den Standarddachformen soll eine Höhengengenauigkeit von 1 m eingehalten werden. In Ausnahmefällen ist auch eine größere Abweichung zulässig. Die Modellierung eines eigenen Bauteils ist erst ab einer Grundfläche des Bauteils von mindestens 10 m² erforderlich.

Bei einer landesweiten Erstellung eines 3D-Gebäudemodells im LoD2 ist eine konsequente Vereinfachung der Dachformen ohne grundlegenden Verlust der geometrischen und semantischen Genauigkeit unerlässlich.

2.3 Zentrale Speicherung

Die Datenhaltung erfolgt bereits zentral auf einer relationalen Datenbank unter Verwendung der Open Source Datenbanklösung »3D City Database (3DCityDB)« der TU Berlin. Über ein Datenbankschema (Profil) haben Nutzer die Möglichkeit, ein CityGML konformes Datenmodell in der Datenbank anzulegen. Das allgemeine CityGML Profil wurde von der AdV für die deutschlandweit einheitliche Erfassung von 3D-Gebäudemodellen weiter spezialisiert. Die nach diesen Spezialisierungen im AdV-CityGML-Profil erzeugten 3D-Gebäudemodelle können über einen Java-basierten Importer und Exporter in der Datenbank gespeichert und in den Visualisierungsformaten KML und COLLADA ausgespielt werden. Zusätzlich wird in Bayern eine FME Workbench eingesetzt, um den Nutzern weitere Datenauspielungen in den Formaten 3D Shape, dxf, 3ds und SketchUp anbieten zu können.

Nachdem CityGML ein internationaler Standard des OGC ist und einige Softwarefirmen im Bereich des Geoinformationsmarktes Produkte und Schnittstellen implementieren, ist eine langjährige Nachhaltigkeit dieser Schnittstelle zu erwarten.

3 Das Fortführungskonzept

3.1 Berechnung des zeitlichen Lückenschlusses

Die in Bayern aus den Airborne Laser Scanning Befliegungen gewonnenen landesweiten LiDAR-Daten liegen in einzelnen Gebieten bis zu sieben Jahre zurück. Für die gesamte Landesfläche von Bayern werden Digitale Luftbilder in einem 3-Jahreszyklus erfasst. Beflogen wird im beliebigen Zustand von Mai bis August.

Die Bodenpixelgröße der Luftbilder beträgt etwa 0,2 m. Ein aus den orientierten Luftbildern berechnetes bDOM soll in Bayern ebenfalls für die Erfassung des 3D-Gebäudemodells verwendet werden.

Unter dem Begriff zeitlicher Lückenschluss wird die Nacherfassung von Gebäuden verstanden, für die zum Zeitpunkt der Ersterfassung aus der automatischen Gebäuderekonstruktion mit LiDAR-Daten zwar die Grundrisse aus dem Liegenschaftskataster vorlagen, jedoch keine Höheninformationen aus LiDAR-Daten vorhanden waren. Da die Grundrisse aus dem Liegenschaftskataster in der Regel eine höhere Aktualität haben als die LiDAR-Daten, sind Neubauten, die nach der LiDAR-Befliegung neu errichtet wurden, vom zeitlichen Lückenschluss betroffen. Gebäude, für die zwar Höhen aus LiDAR-Daten vorlagen, aber zum Zeitpunkt der Ersterfassung keine Grundrisse im Liegenschaftskataster vorhanden waren, wurden nicht erfasst.

Um die Aktualitätslücke der bis zu sieben Jahre alten LiDAR-Daten im Rahmen der Erfassung des 3D-Gebäudemodells zu schließen, wird mit Hilfe der Bildkorrelation (Image Matching) ein bDOM aus den Luftbildern der Bayernbefliegung abgeleitet (Abb. 6). Die Bayernbefliegung wird derzeit mit einer Überdeckung von 75 % in Längsrichtung sowie 35 % in Querrichtung flächendeckend durchgeführt.

Während aktuelle LiDAR-Befliegungen in Bayern mit einer Punktdichte von 4 Punkten/m² durchgeführt werden, kann mit Image Matching, aufgrund der Bodenpixelgröße der Bayernbefliegung von 0,2 m eine deutlich höhere Punktdichte von bis zu 25 Punkte/m² erzielt werden. Aktuell wird die Software MATCH-T DSM der Fa. Inpho und die Surface Reconstruction (SuRe) des Institutes für Photogrammetrie (ifp) der Uni Stuttgart verwendet und für einige Gebiete Bayerns ein bDOM auf der Grundlage der aktuellen Bayernbefliegung berechnet (Stolz 2013).

Die Unterschiede zwischen den im Jahr 2007 prozessierten LiDAR-Daten und der im Jahr 2012 durchgeführten Bayernbefliegung lassen sich in einem Differenz-

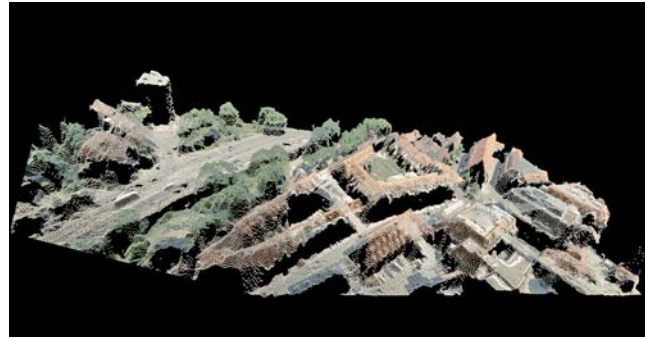


Abb. 6: Farbkodierte Punktwolke aus Image Matching

DOM in einfacher Weise darstellen. Sämtliche zwischen den Jahren 2012 und 2007 liegenden Veränderungen der Höhe, wie das Wachstum der Vegetation, die Errichtung und der Abriss von Gebäuden oder das Ausheben von Baugruben und Erdarbeiten, lassen sich durch eine geeignete Farbskala visualisieren.

Die Situation für die Fortführung des 3D-Gebäudemodells im Rahmen des zeitlichen Lückenschlusses stellt sich wie folgt dar: In dem in Abb. 7 dargestellten Differenz-DOM ist innerhalb des markierten Kreises eine größere Gebäudeveränderung identifiziert. Mit Blick auf die Farbskala wird deutlich, dass es sich hier aufgrund der negativen (roten) Höhenveränderung um einen Gebäude-neubau handeln muss. Es handelt sich hier um die Errichtung eines neuen Einkaufszentrums im Jahr 2009, wie der Vergleich der beiden Luftbilder aus den Jahren 2003 und 2012 zeigt (Abb. 8).

Zum Zeitpunkt der Ersterfassung standen ein DOP aus dem Jahr 2009, LiDAR-Daten aus dem Jahr 2007 und der zum Erfassungszeitpunkt 2012 aktuelle Grundriss

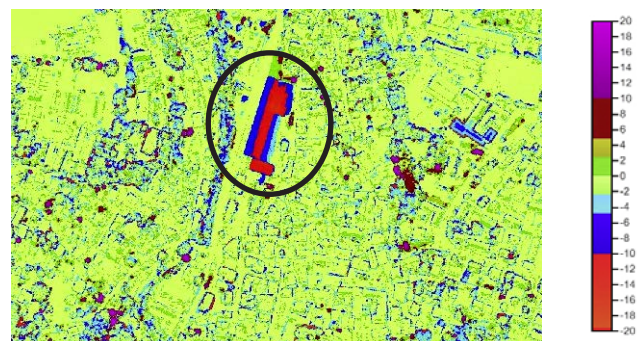


Abb. 7: Differenz-DOM zwischen Laserscanning und Matching – Neubauten werden rot, Abrisse violett dargestellt



Abb. 8: Bau eines Einkaufszentrums

aus dem Liegenschaftskataster zur Verfügung. Im Rahmen der im Abschnitt 2.2 erläuterten Ersterfassung hat der Operateur die aktuellste Information, nämlich den im Liegenschaftskataster gespeicherten Gebäudegrundriss, anzuhalten, um die Grundrisstreue sicherzustellen. Wegen fehlender Höheninformationen in den LiDAR-Daten wird das Gebäude mit einer grundflächenabhängigen Standardhöhe von 9 m erfasst (Abb. 9).

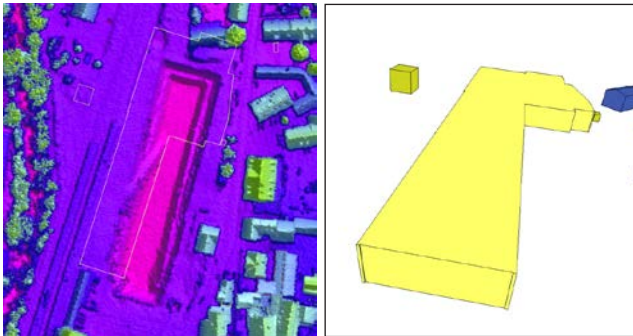


Abb. 9: Festsetzung einer Standardhöhe wegen fehlender LiDAR-Daten für einen Neubau

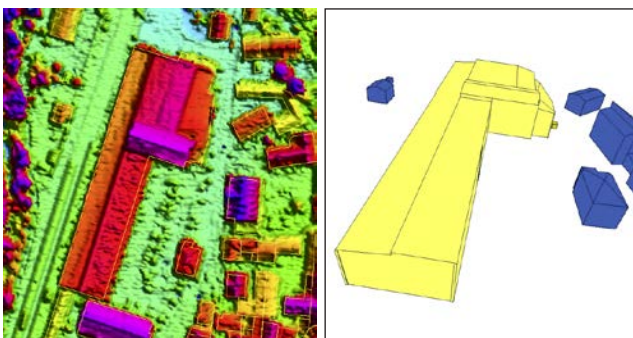


Abb. 10: Detaillierte Erfassung der Dachstrukturen mit aktuellen bDOM aus orientierten Luftbildern der Bayernbefliegung

Die Festsetzung des Gebäudes mit einer Standardhöhe hat zur Folge, dass dieses Gebäude nachbearbeitet werden muss, sobald das aus der Bayernbefliegung generierte bDOM zur Verfügung steht. Derartige Gebäude sind Kandidaten des zeitlichen Lückenschlusses, um die Dächer nicht in einer aufwendigen terrestrischen Vermessung neu aufnehmen zu müssen. Für die nachzubearbeitenden Gebäude ist anstelle der LiDAR-Daten das aus Image Matching abgeleitete regelmäßige bDOM in der Erfassungssoftware »Building Reconstruction« der Fa. VCS zu verwenden. Bei der erneuten Prozessierung ein und desselben Gebäudegrundrisses ergibt sich nun ein Gebäude mit einer aktuellen detailgetreuen Dachstruktur (Abb. 10).

Das vorgestellte Verfahren des zeitlichen Lückenschlusses erlaubt auch Gebäude, die nach der LiDAR-Befliegung errichtet wurden, nachzuerfassen und die Ersterfassung des 3D-Gebäudemodells von Bayern zu einem bestimmten Stichtag abzuschließen.

3.2 Aktualisierung im Rahmen der Fortführung des Liegenschaftskatasters

Derzeit ist in Deutschland das amtliche Liegenschaftskataster zweidimensional. Bei Bedarf können einige Informationen zur dritten Dimension attributiv geführt werden. So können bereits heute gebäudeprägende Punkte als »besondere Gebäudepunkte« mit Höhenangaben sowie Informationen zur jeweiligen Dachform zu einer bestimmten Grundrissfläche im Liegenschaftskataster gespeichert werden. Enthält ein Gebäude mehrere Dachformen können diese mittels Bauteilbildung unterteilt werden (Aringer 2011).

Das Liegenschaftskataster enthält in Bayern derzeit noch keine solchen 3D-Informationen. Nachdem die standardisierten Dächer der 3D-Gebäudemodelle im Rahmen der halbautomatisierten Ersterfassung abgeleitet wurden, können die besonderen Gebäudepunkte (First- und Traufpunkte sowie die First- und Bauteillinien) in das zweidimensionale Liegenschaftskataster übernommen werden. Damit entsteht ein Mehrwert für das Liegenschaftskataster.

Sollen diese Informationen zur Fortführung verwendet werden, besteht die Herausforderung darin, dass die Daten nun umgekehrt von der zweiten Dimension eindeutig in die dritte Dimension überführbar sein müssen. Sind mehrere Dachformen pro Gebäudegrundriss vorhanden, bedient man sich des Prinzips der Unterteilung von Gebäuden in Bauteile.

In Abb. 11 sind Gebäude mit unterschiedlichen Dachformen mittels einer roten Trennlinie in Bauteile unterteilt. Blaue Linien hingegen repräsentieren Firstlinien von Dächern. Die roten Punkte repräsentieren First- oder Traufpunkte, die im Liegenschaftskataster als »besondere Gebäudepunkte« mit einer relativen Höhenangabe geführt werden. Gemeinsam mit den Firstlinien und den Trennlinien der Bauteile ist damit eine eindeutige Rekonstruktion der Dachgeometrie aus den zweidimensionalen Daten des Liegenschaftskatasters möglich, die programmtechnisch in Bayern noch umzusetzen ist.

Nach Abschluss der Ersterfassung und des Lückenschlusses wird das 3D-Gebäudemodell in Bayern kontinuierlich im Rahmen der amtlichen Fortführung des Liegenschaftskatasters aktualisiert. Dann werden weder

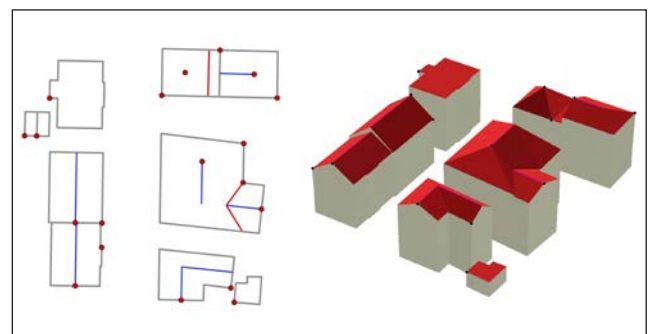


Abb. 11: Vom Bauteilgrundriss (links) zum 3D-Modell (rechts)

LiDAR-Daten noch ein bDOM erforderlich sein. Stattdessen werden im Rahmen der katastrertechnischen Gebäudeeinmessung die Dachformen terrestrisch aufgenommen (Abb. 12). Liegen mehrere Dachformen über den gesamten Gebäudegrundriss vor, so wird die Dachform durch Bauteile unterteilt. Ebenso werden die zu einer Dachform gehörigen Firstlinien sowie Höhen zu ausgewählten »besonderen« Gebäudepunkten (First- und Traufpunkten)

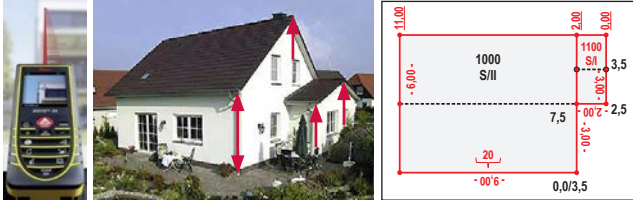


Abb. 12: Katastrertechnische Gebäudeeinmessung

bestimmt. Mit Hilfe dieser Informationen lässt sich anschließend die dreidimensionale Gebäudehülle rekonstruieren und damit das 3D-Gebäudemodell fortführen.

4 Datenaustausch und Datenumsetzung

4.1 Datenbereitstellung und zentrale Datenabgabe

Einige Bundesländer haben die Erfassung ihrer 3D-Gebäudemodelle in der ersten Detaillierungsstufe (LoD1) in dem jeweiligen amtlichen Landeskoordinatensystem abgeschlossen. Einige befinden sich bereits im Aufbau der zweiten Detaillierungsstufe – dem LoD2. Seit Mitte 2013 kann das LoD1 an die Zentrale Stelle Hauskoordinaten und Hausumringe (ZSHH) abgegeben werden auf der Grundlage des Koordinatenreferenzsystems ETRS89 bezogen auf das Ellipsoid GRS80 und der verebneten UTM Koordinaten-Projektion in Verbindung mit dem Deutschen Höhensystem DHHN92 mit Normalhöhen. Im Laufe des Jahres 2014 wird deutschlandweit flächendeckend ein 3D-Gebäudebestand in LoD1 auf Basis des AdV-CityGML-Profiles bei der ZSHH vorliegen, der jährlich aktualisiert wird. Einige Bundesländer, so auch Bayern, werden ihre Daten transformieren müssen.

Zur Überprüfung (Validierung) der 3D-Gebäudemodelle wurde von der ZSHH ein Leitfaden herausgegeben, mit dessen Hilfe die Länder ihre LoD1-Daten im Format CityGML hinsichtlich der Konformität zum Anwendungsschema der AdV überprüfen können. Dies hilft allen Beteiligten, die LoD1-Daten in einem ersten Schritt auf semantische Konformität zu prüfen. Weitreichendere Prüfkriterien, wie die Überprüfung geometrischer Bedingungen, wären darüber hinaus wünschenswert. Erste Ansätze zur Prüfung CitGML-basierter Stadtmodelle liefert beispielsweise die Validierungssoftware CityDoctor der Hochschule für Technik in Stuttgart.

4.2 Anforderungen aus INSPIRE

Die Datenbereitstellung der 3D-Gebäudemodelle der Länder muss mittelfristig den Anforderungen einer europäischen Geodateninfrastruktur entsprechen, wie es die Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE-Richtlinie) vor-



Abb. 13: 3D-Gebäudemodell von Schloss Neuschwanstein verschnitten mit dem DGM

sieht, sowie deren Umsetzung für Bundesbehörden durch ein Bundesgesetz und auf der Ebene der Länder durch die jeweiligen Landesgesetze (von Janowsky et al. 2010). Die Präsentation von 3D-Gebäudemodellen ist nicht losgelöst vom Digitalen Geländemodell und seiner Repräsentation im Raum (vgl. Abb. 13). Damit ergeben sich drei thematische Bezüge zur INSPIRE-Richtlinie. Diese sind die Themen *Koordinatenreferenzsysteme* im Anhang I, *Höhe* im Anhang II und *Gebäude* im Anhang III der Richtlinie.

Für die Bereitstellung der Geodaten der Behörden ist ein schrittweises Vorgehen vorgesehen, das der Grundregel folgt: Grundlagendaten vor Fachdaten, aktuelle Daten vor Altdatenbeständen. Die INSPIRE-Richtlinie enthält Fristen für die INSPIRE-konforme Datenbereitstellung, die sich auf den Erlass der Durchführungsbestimmungen zur Interoperabilität beziehen. Sie enthält aber keine Datenspezifikationen zu den einzelnen Themen. Für eine INSPIRE-konforme Datenbereitstellung gelten zusätzliche Verordnungen, die genauere Informationen über die Art und den Umfang der inhaltlichen Ausgestaltung, z. B. durch Festlegungen von Objekttypen und Pflicht-Attributen, für die Geodaten-Themen geben. Ferner gibt es zu jedem Geodaten-Thema Datenspezifikationen (die »Technical Guidance«). Sie sind rechtlich nicht bindend und enthalten u. a. vollständige Datenmodelle und technische Details.

Am 28.12.2010 trat die Verordnung (EU) Nr. 1089/2010 zur Durchführung der INSPIRE-Richtlinie hinsichtlich der Interoperabilität von Geodatenätzen und -diensten in Kraft. Gemäß dieser Verordnung sind bis zum 23.11.2012 neu erhobene bzw. weitgehend umstrukturierte Geodatenätze und bis zum 23.11.2017 alle übrigen Geodaten-

sätze zu den Themen des Anhangs I INSPIRE-konform bereitzustellen.

Die INSPIRE-Datenspezifikationen (Technical Guidelines) zu den Themen *Höhe* des Anhangs II und *Gebäude* des Anhangs III sind derzeit noch in Bearbeitung. Relevant sind die Dokumente »D2.8.II.1 Data Spezifikation on Elevation« und »D2.8.III.2 Data Spezifikation on Buildings« jeweils vom 04.02.2013. Geplant ist, dass die Spezifika-

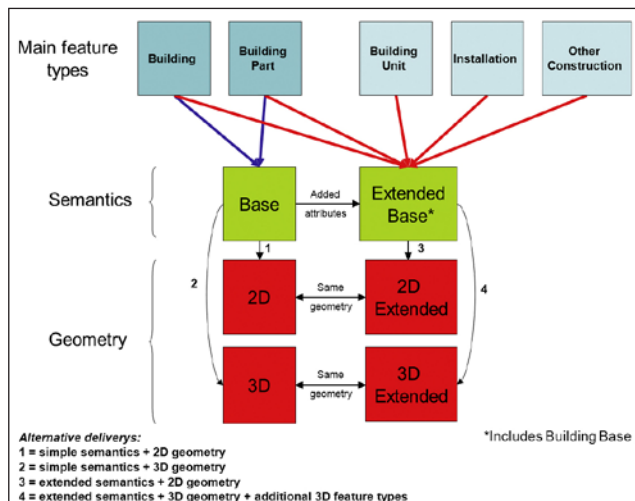


Abb. 14: Modellierung des Themas Gebäude in der INSPIRE-Datenspezifikation für Gebäude aus der Datenspezifikation für Gebäude (D2.8.III.2)

tionen noch im Oktober 2013 verabschiedet werden. Neu erhobene oder aktualisierte Daten der Anhänge II und III wären dann laut Richtlinie bis 2015 und alle anderen bis 2020 bereitzustellen.

Die Abb. 14 veranschaulicht die Systematik der Modellierungsmöglichkeiten des Themas Gebäude. Sowohl in der zweidimensionalen als auch in der dreidimensionalen Repräsentation werden Gebäude (Hausumringe) und Gebäudemodelle nach semantischen und geometrischen Informationen unterschieden. Es werden bereits auf der Sachdatenebene Gebäude und Gebäudeteile unterschieden. Jeder geometrischen Ausprägung eines Gebäudes werden stets semantische Informationen zugordnet. Sowohl der Kern an semantischen als auch der Kern der geometrischen Informationen lassen sich erweitern. Beispielsweise werden die in der AdV unterschiedenen Standarddachformen als Dachtyp außerhalb des Kernbereichs in der erweiterten semantischen Information gespeichert. Erweiterungen der Komplexität sind möglich.

In Bezug auf die Präsentation von 3D-Gebäudemodellen werden vielfach Digitale Geländemodelle in Form eines Gitters zugrunde gelegt. Die INSPIRE-Datenspezifikation »Elevation« enthält verschiedene Anwendungsschemen zu Höhenmodellen, wie dem DGM-Gitter (ElevationGridCoverage), und eine Auswahl an zulässigen Referenzsystemen. Für die interoperable Bereitstellung der 3D-Gebäudemodelle im Jahr 2020 können, entsprechend der INSPIRE-Richtlinie »Gebäude«, zweidimensionale Koordinaten mit einer entsprechenden Höhenangabe

verwendet werden, z.B. unter Bezug auf das Bezugssystem ETRS89 auf dem Ellipsoid GRS80 und der verebneten Transversale Mercator Koordinaten-Projektion in Verbindung mit dem europäischen Höhensystem EVRS (European Vertical Reference System).

Der deutschlandweit flächendeckende 3D-Gebäudebestand im LoD1 der ZSHH müsste bereits bis zum Jahr 2020, entsprechend der INSPIRE-Anforderungen, interoperabel bereitgestellt werden. Die Länder werden daher ein Transformationskonzept etablieren müssen, um die bereits erfassten 3D-Gebäudemodelle in die für INSPIRE erforderlichen Koordinatensysteme zu transformieren.

Neben der geodätischen Aufgabe der Transformation ist zusätzlich das AdV-Schema des LoD1 und zukünftig des LoD2 in ein INSPIRE-konformes Schema abzubilden und die aus der INSPIRE-Datenspezifikation für Gebäude resultierenden Besonderheiten durch eine CityGML-Erweiterung für INSPIRE umzusetzen (Gröger et al. 2013).

5 Anwendungen

Die Verfügbarkeit von 3D-Gebäudemodellen war in den letzten Jahren meist auf größere Städte begrenzt. Die landesweite Erstellung eines 3D-Gebäudemodells im LoD2 ermöglicht auch in Kleinstädten und im ländlichen Raum neue Anwendungen.

3D-Gebäudemodelle können für vielfältige Planungszwecke genutzt werden, um realitätsnah geplante Bauvorhaben und Planungsalternativen in einfacher Form zu präsentieren, z.B. in Bauausschusssitzungen oder für den Bürger im Rahmen der Bürgerbeteiligung.

So wird gerade der ländliche Raum zukünftig die Auswirkungen der Energiewende vermehrt zu tragen haben. Infrastrukturmaßnahmen, wie z.B. der Bau von Hochspannungsleitungen und Windkraftanlagen, lassen sich durch Kombination von 3D-Gebäudemodellen, Digitalen Geländemodellen, Digitalen Orthophotos und soweit vorhanden dreidimensionalen Landschaftsmodellen verständlich und geometrisch exakt darstellen (Abb. 15). Im Zuge der Bürgerbeteiligung liefern 3D-Visualisierungen einen wichtigen Beitrag zur Aufklärung und Information der betroffenen Bürger.

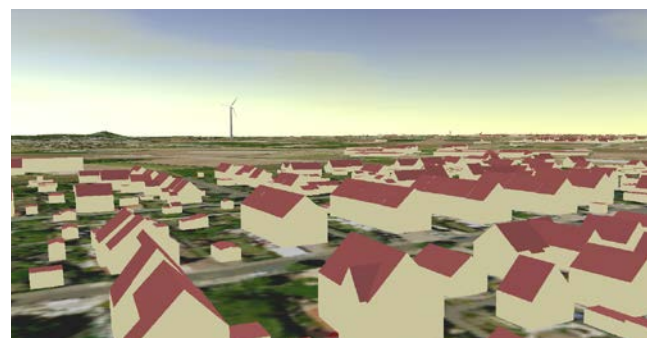


Abb. 15: 3D-Gebäudemodell LoD2 mit Integration einer geplanten Windkraftanlage

Die 3D-Gebäudemodelle wirken durch ihre einheitliche Farbgebung mit den roten Dächern und den braunen Fassaden sehr nüchtern und synthetisch. Um mögliche Mehrwerte von 3D-Gebäudemodellen aufzeigen zu können, wurde durch die Bayerische Vermessungsverwaltung in einem Pilotprojekt eine zusätzliche Schrägluftbefliegung der Fassaden und Dächer der Gebäude beauftragt. Das amtliche 3D-Gebäudemodell für die Stadt Tirschen-

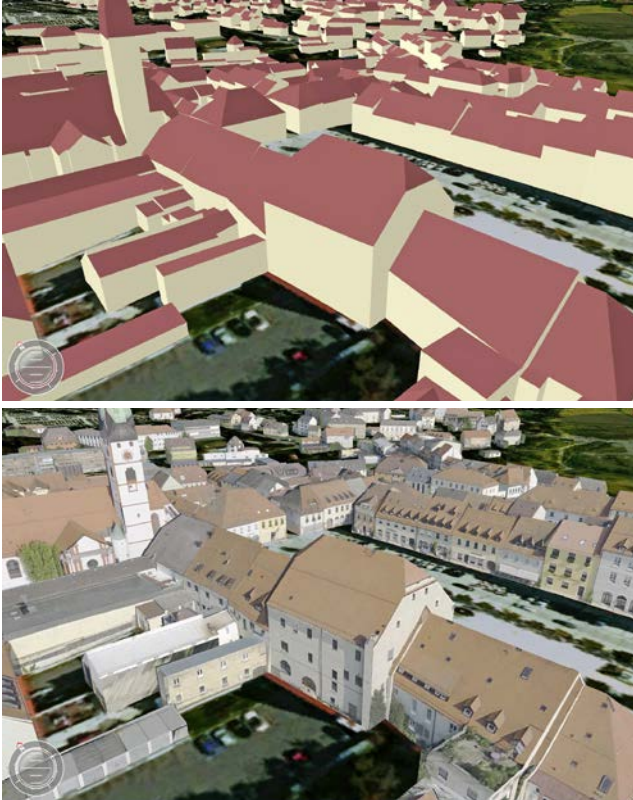


Abb. 16: 3D-Gebäudemodell mit standardisierten Dächern (oben) und Texturen (unten)

reuth wurde beispielhaft automatisch mit photorealistischen Texturen versehen. Das Ergebnis ist ein sehr realitätsgetreues 3D-Gebäudemodell einer Stadt (Abb. 16).

Zusätzlich wurde für die Stadt Tirschenreuth ein Gestaltungsplan der Landesgartenschau 2013 in das bestehende und bereits texturierte 3D-Gebäudemodell ergänzt, um mit einem aktuellen Bezug die Neugierde von Entscheidungsträgern und Bürgern für innovative Projekte zu wecken und Mehrwerte von 3D-Gebäudemodellen aufzuzeigen (Abb. 17). Eine darüber hinausgehende Möglichkeit der Datenpräsentation stellen 3D-Druckmodelle dar, die in einfacher Weise und sehr wirtschaftlich aus den digitalen 3D-Gebäudemodellen erstellt werden können (Abb. 18).

Im Zuge der Erschließung erneuerbarer Energien werden vor allem Photovoltaik zur Stromerzeugung und Solarthermie zur Gewinnung von Warmwasser genutzt. Gerade bei Photovoltaikanlagen auf Dachflächen ist die Ausrichtung, die Dachneigung, die Größe der Anlage und mögliche Verschattungen ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit. 3D-Gebäudemodelle im LoD2 sind eine



Abb. 17: 3D-Gebäudemodell mit Gestaltungsplan einer Gartenschau



Abb. 18: Visualisierung als 3D-Druckmodell

ideale Datengrundlage für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen, um geeignete Dachflächen darzustellen und das daraus mögliche Energiegewinnungspotenzial zu berechnen (Abb. 19).

Ein großer Anteil des Energieverbrauchs in Deutschland entfällt auf das Heizen von Gebäuden. Zur Erstellung von Wärmebedarfskarten liefern 3D-Gebäudemodelle Informationen zum beheizten Gebäudevolumen und können mit weiteren semantischen Informationen, wie z.B. Baujahr und Nutzung, zur Analyse von Sanierungsszenarien verwendet werden.

Im Bereich von Katastrophenschutz und Katastrophenprävention sind 3D-Geodaten, wie z.B. das DGM im Bereich des Hochwasserschutzes, bereits seit vielen Jahren



Abb. 19: Visualisierung einer Solarpotenzialanalyse

im Einsatz. Die 3D-Gebäudemodelle ermöglichen eine weitere Ausbaustufe bei Simulationen, Visualisierungen und semantischen Abfragen.

So verwendet die Rückversicherung Munich RE bereits das 3D-Gebäudemodell im LoD1 für die Identifizierung und Schadensberechnung von verschiedenen Hochwasserszenarien (Simon 2012). Für die Umsetzung der europäischen Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie werden Hochwassergefahrenkarten erstellt, wofür 3D-Gebäudemodelle einen wichtigen zusätzlichen Nutzen liefern.

In einem aktuellen Projekt erstellt die Bayerische Vermessungsverwaltung ein LoD2-Modell der Stadt Passau, die vom letzten Hochwasser im Juni 2013 stark betroffen war.

Um eine nachhaltige Nutzung bei allen Anwendungen sicherzustellen, ist eine Fortführung der 3D-Gebäudemodelle unerlässlich.

6 Fazit

Das vorgestellte Verfahren zum Aufbau eines landesweiten 3D-Gebäudemodells reicht von der Ersterfassung bis hin zur angestrebten tagesaktuellen Fortführung. Die Praxis hat bereits gezeigt, dass mit der eingesetzten Software eine grundrisstreue Ableitung und Bearbeitung von 3D-Gebäudemodellen auf Basis von beliebigen Punktwolken (LiDAR und Matching) gute Ergebnisse liefert. Die Verwendung standardisierter Dachformen hilft, die Generalisierung der Dächer vorzunehmen und in einer angemessenen Zeit ein 3D-Gebäudemodell flächendeckend zu erfassen. Die Nachbearbeitungsquote liegt zwischen ca. 15 % und ca. 50 % und ist abhängig von der Bebauungsdichte, der Schwierigkeit des Bearbeitungsgebietes und der Qualität der Laserpunkte.

Aufgrund der Bodenauflösung der Luftbilder von etwa 0,2 m können Punktwolken aus Matching in einer Auflösung bis höchstens 25 Punkte/m² erzeugt werden. Wegen der hohen Datenmenge ist für die Praxis jedoch eine Reduktion der Punktdichte auf 4 Punkten/m² sinnvoll. Schlussendlich ermöglicht die Erstellung eines landesweiten 3D-Gebäudemodells durch die erneute Sichtung und Bearbeitung der Daten eine Qualitätsverbesserung des amtlichen Liegenschaftskatasters.

Literatur

- Aringer, K., Hümmel, F.: Die dritte Dimension im Kataster – Aufbau eines landesweiten Gebäudemodells am Beispiel Bayerns, Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv), Heft 4, S. 210–218, 2011.
- Gröger, G., Kutzner, T., Kolbe, T.H.: A CityGML-Based encoding for the INSPIRE Data Specification on Buildings, 26. June, INSPIRE Conference 2013, Florence Italy, 2013.
- Haala, N.: Multiray Photogrammetry and Dense Image Matching, Photogrammetric Week 2011, Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, pp. 185–195, 2011.
- Rottensteiner, F., Sohn, G., Jung, J., Gerke, M., Baillard, C., Benitez, S. and Breitkopf, U.: The ISPRS Benchmark on Urban Object Classification and 3D Building Reconstruction, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume 1-3, XXII ISPRS Congress, 25.08.–01.09., Melbourne, Australia, 2012.
- Rottensteiner, F., Briese, Ch.: Automatic generation of building models from lidar data and the integration of aerial images. In: International Archives of Photogrammetry, Remote, 2003.
- Sensing and Spatial Information Sciences, Dresden, Germany, Vol. XXIV, Part 3/W13, pp. 174–180.
- Schilcher, M., Guo, Z., Klaus, M., Roschlaub, R.: Semi Automatic Derivation of 3D-City-Models from existing 2D-Geoinformationsystems, Spatial Information Science and Technology SIST, 13.–16. Dezember, Wuhan, China, 1998.
- Schilcher, M., Guo, Z., Klaus, M., Roschlaub, R.: Aufbau von 3D-Stadtmodellen auf der Basis von 2D-GIS, Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), Nr. 3, S. 157–170, 1999.
- Schilcher, M., Roschlaub, R.: Fortführung und Wiederverwendbarkeit von 3D-Stadtmodellen durch Kombination von GIS und Photogrammetrie, Festschrift aus Anlass des 60. Geburtstags von H. Ebner, TU München, S. 267–281, 1999.
- Simon, M.: Risikomodellierung auf Basis eines 3D-Gebäudemodells – Kooperationsprojekt zwischen der Munich Re und der LMU München, Mitteilungen des DVW Bayern, Heft 3, S. 225–232, 2012.
- Stolz, M.: Digitale Oberflächenmodelle aus Bildkorrelation, Mitteilungen des DVW Bayern, Heft 2, S. 139–150, 2013.
- von Janowsky, D., Ludwig, R., Roschlaub, R., Streuff, H.: Geodateninfrastrukturrecht in Bund und Ländern, Kommunal- und Schulbuchverlag, Wiesbaden, 2010.
- Vosselman, G.: Fusion of laser scanning data, maps and aerial photographs for building reconstruction, IEEE International Geoscience and Remote Sensing, Symposium, 24–28 June, Toronto, Canada, on CD-ROM, pp. 85–88, 2002.

Anschrift der Autoren

Dr.-Ing. Klement Aringer
 Dipl.-Ing. Josef Dorsch
 Dr.-Ing. Robert Roschlaub
 Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern
 Alexandrastraße 4, 80538 München
 klement.aringer@lvg.bayern.de
 josef.dorsch@lvg.bayern.de
 robert.roschlaub@lvg.bayern.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.