



Historisches 4D-Stadtmodell der Freien und Hansestadt Hamburg – Automatisierte Generierung und Darstellung innerhalb der Google Earth Engine

FRIEDRICH KELLER, JÉRÔME SÄNGER, THOMAS KERSTEN & JOCHEN SCHIEWE, HAMBURG

Keywords: 4D, CAD, Modellierung, Punktwolke, Stadtmodell, Streifenprojektion, Visualisierung

Summary: *Historical 4D City Model of the Free and Hanseatic City of Hamburg – Automated Generation and Presentation within the Google Earth Engine.* Current 3D city models are already world-wide available for many cities. However, the production of historical city models is still in the beginning, i. e. so far only for a small number of cities a historical city model has already been developed. In this contribution a procedure is presented, that combines different data sources in order to derive individual 3D city models of different time epochs by the example of the Free and Hanseatic City of Hamburg. A wooden model of the city from the year 1644 and an official map from 1859 have been used as a basis for the generation of the 4D city model of Hamburg. The model at a scale of approx. 1:1000 was scanned in 3D by the fringe projection system ATOS I from GOM. From the produced point cloud buildings were generated automatically in an adjustment using the roof points, whereby over 80% of the simple buildings were recognized and generated in 3D with the assistance of the building ground plans, which were derived from the point cloud. However, more complex buildings such as churches had to be still modelled manually. In the second part of the work the building ground plans were digitized from the map of 1859, which were combined afterwards with height information from plans, photos, designs and paintings for 3D modelling. The two generated city models were geo-referenced using some church ground plans, which changed only little through the centuries. From these two epochs further epochs (1200, 1400, 1589 and 1700) were derived using different historical bird's-eye views (isometric views) of the city. For the visualization of the 4D city model in Google Earth a program was developed using the Google Earth Application Programming Interface, which allows the navigation in the 4D city model with its six epochs and the representation of meta data (e. g. emergence, description, history, etc.) for individual objects.

Zusammenfassung: Aktuelle 3D-Stadtmodelle gibt es weltweit bereits von vielen Städten. Jedoch steht die Erstellung von digitalen historischen Stadtmodellen noch in ihren Anfängen, d.h. bisher gibt es nur vereinzelt Städte, für die ein historisches Stadtmodell erstellt wurde. In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, bei dem unterschiedliche Datenquellen miteinander verknüpft werden, um daraus einzelne Stadtmodelle verschiedener Zeitpunkte (Epochen) am Beispiel der Freien und Hansestadt Hamburg abzuleiten. Als Grundlage für das Hamburger 4D-Stadtmodell wurden ein Holzmodell der Stadt, das das Jahr 1644 zeigt, und eine amtliche Karte von 1859 ausgewählt. Das Modell im Maßstab von ca. 1:1000 wurde durch ein Streifenprojektionssystem ATOS I von GOM 3D erfasst. Aus der mit ATOS erzeugten Punktwolke wurden die Gebäudemodelle über die Dachpunkte in einer Ausgleichung automatisch generiert, wobei mithilfe der aus der Punktwolke abgeleiteten Grundrisse über 80% der einfachen Gebäudemodelle erkannt und in 3D erstellt wurden. Allerdings mussten komplexere Gebäude wie Kirchen noch manuell modelliert werden. Im zweiten Teil der Arbeit wurden aus der Karte von 1859 die Gebäudegrundrisse digitalisiert, die im Anschluss daran zur 3D-Modellierung mit Höheninformationen aus Plänen, Fotos, Zeichnungen und Gemälden verknüpft wurden. Die beiden generierten Stadtmodelle wurden dann über einige Kirchgrundrisse, die sich im Laufe der Jahrhunderte wenig verändert haben, georeferenziert. Aus diesen beiden Epochen wurden aus verschiedenen historischen Vogelperspektiven (Isometrische Ansichten) die Objekte weiterer Zeitpunkte (1200, 1400, 1589 und 1700) abgeleitet. Zur Visualisierung des 4D-Stadtmodells in Google Earth wurde mithilfe des Google Earth Application Programming Interfaces ein Programm entwickelt, das die Navigation durch das 4D-Stadtmodell mit seinen sechs Epochen und die Darstellung von Metadaten (z. B. Entstehung, Beschreibung, Geschichte, usw.) zu den einzelnen Objekten ermöglicht.

1 Einleitung

Aktuelle 3D-Stadtmodelle sind derzeit wissenschaftlich und gesellschaftlich ein viel diskutiertes Thema. So haben sich unterschiedliche Nutzerkreise wie Stadtplaner, Architekten, Denkmalpfleger, Umweltfachleute, Mobilfunkfachleute, Sicherheitskräfte, große Internet-Anbieter und Hersteller von Navigationsgeräten des Themas in den letzten Jahren angenommen. So hat sich die dreidimensionale Darstellung von Geodaten insbesondere von Stadtmodellen als ein Trend im Internet entwickelt.

Dabei stellen digitale historische Stadtmodelle, die dem Betrachter einen Einblick in die Vergangenheit der Stadt vermitteln sollen, ein weitgehend neues Betätigungsfeld dar. Anders als bei aktuellen Modellen können historische Stadtmodelle nicht mit modernen Messverfahren wie Airborne Laserscanning oder Luftbildphotogrammetrie erfasst werden, sondern werden meist aus einem breit gefächerten Spektrum von Daten wie Karten, Photographien, Lithographien, Gemälden oder Holzmodellen in Museen abgeleitet. Hierzu müssen meist andere Aufnahmemethoden im Nahbereich eingesetzt werden.

Um ein historisches Stadtmodell von Hamburg zu erstellen, wurden verschiedene Aufnahmemethoden, der jeweiligen Quelle entsprechend, ausgewählt und eingesetzt. Als Ausgangsbasis für das zu erstellende 4D-Modell dienten zwei Zeitpunkte. So ist im Hamburgmuseum ein Holzmodell mit ca. 5000 Gebäuden der heutigen Innenstadt ausgestellt, das Hamburg im Jahr 1644 zeigt und 1936 im

Maßstab ca. 1:1000 gefertigt wurde (Abb. 1 links). Als zweite Datenquelle wurde eine Karte von 1859 im Maßstab von 1:4000 verwendet (Abb. 1 rechts), die eine der ersten amtlichen Vermessungen und Kartierungen der Stadt darstellt.

Ähnliche Arbeiten wurden bereits für die Städte Duisburg, Solothurn (Schweiz), Prag (Tschechien) und Toul (Frankreich) durchgeführt. Von der mittelalterlichen Stadt Duisburg wurden aus drei Holzmodellen im Maßstab 1:500 virtuelle Modelle der Jahre 1000, 1200 und 1566 (ca. 800 Gebäude) erstellt (JEDZEJAS & PRZYBILLA 2009). Dafür bildeten Punktwolken des terrestrischen Laserscanners IMAGER 5006 die Grundlage, um aus automatisiert abgeleiteten Dachformen, Gebäudehöhen und -grundrissen sowie Orthophotos die Gebäudeobjekte zu konstruieren. Die virtuellen Modelle wurden anschließend für eine Präsentation in Google Earth aufbereitet. Das historische Modell der Stadt Solothurn von 1830 (Maßstab ca. 1:500, ca. 900 Gebäude) wurde mit verschiedenen 3D-Messverfahren (Präzisions-Handscanner Leica T-Scan, digitale Spiegelreflexkamera Nikon D200 und einer HD-Videokamera) im Vergleich aufgenommen (NEBIKER et al. 2009), um die städtische 3D-Szenarien zu rekonstruieren, zu texturieren und in einem 3D-GIS zu integrieren. Für die Aufnahme des historischen Prager Stadtmodell aus Papier (Maßstab 1:480), erstellt in den Jahren 1826–1839, wurde ein Roboter entwickelt, der das gesamte Stadtmodell mit einer Fläche von 3,5 m × 6 m innerhalb von zwei Monaten mit einer digitalen Kamera (4K-Auflösung) durch ca. 300.000



Abb. 1: Grundlagedaten für die Generierung des Hamburger 4D-Stadtmodells: Holzmodell des Jahres 1644 im Hamburgmuseum (links) und Karte der Hamburger Innenstadt von 1859 (rechts).

Fotos berührungsfrei aufnehmen (SEDLACEK & ZARA 2009). Das komplexe Modell enthält auf 60 Teilstücken 2000 Gebäude und 7000 weitere Objekte wie Schuppen, Mauern, Statuen und Bäume. Aus den Bildern wurden Punktwolken generiert, die nach Segmentierung der Boden- und Gebäudepunkte durch Voronoi Triangulation vermascht und als texturierte Polygone dargestellt wurden. Dagegen stellt die Erfassung des kleineren Holz- und Papiermodells der Stadt Toul (nahe Nancy in Frankreich) von 1840–1860 einen geringeren Aufwand dar, da auf einer Fläche von $2,3\text{ m} \times 2,2\text{ m}$ nur ca. 900 Gebäude durch Fotos und Laserscanning aufgenommen werden mussten. Dazu wurden in PhotoModeler Dachpunkte gemessen, aus denen anschließend automatisch 3D-Gebäude erstellt wurden, während das Gelände aus Laserscanningdaten modelliert wurde (CHEVRIER et al. 2010).

Im Vergleich zu den anderen oben beschriebenen Modellen stellt das historische Holzmodell von Hamburg mit dem kleineren Maßstab von ca. 1:1000 eine besondere Herausforderung bei der Datenerfassung und -modellierung dar. Im Gegensatz zu den drei Epochen des Duisburger Stadtmodells wurden für das historische Hamburg in 4D die verschiedenen Zeitepochen aus weiteren Datenquellen wie Karte und Ansichten abgeleitet.

2 Datenerfassung

Bei den zwei ausgewählten Datenquellen (Holzmodell und Karte) wurden unterschiedliche Erfassungsmethoden eingesetzt.

2.1 Aufnahme des Holzmodells

Für das Holzmodell standen zunächst drei Aufnahmesysteme an der HCU Hamburg zur Auswahl: terrestrischer Laserscanner Z+F IMAGER 5006i, Streifenprojektionssystem (ATOS I 2M) der Firma GOM und digitale Spiegelreflexkameras. Die Vor- und Nachteile bildbasierter Aufnahmesysteme sind in (REMONDINO & EL-HAKIM 2007) und (LUHMANN 2010) beschrieben worden, während rangebasierte Messsysteme in (LUHMANN 2010) vorgestellt werden. Für die Aufnahme des Holzmodells im Museum ist vorab das terrestrische Laserscanning mit dem IMAGER 5006i getestet worden, da diese Aufnahmemethode bei einem vergleichbaren Projekt für die Stadt Duisburg gute Ergebnisse geliefert hatte (JEDZEJAS & PRZYBILLA 2009). Allerdings stellte sich in Untersuchungen heraus, dass das Rauschen in der Punktwolke der aufgenommenen Testdaten für eine Modellierung des Hamburger Modells im Maßstab 1:1000 zu groß ist.

Daher wurde aufgrund der technischen Spezifikationen und erfolgreicher Testaufnahmen das Messsystem ATOS I 2M für die Aufnahme des Holzmodells eingesetzt (Abb. 2). Das System besteht aus zwei Kameras (2×2 Megapixel-Kamera) und einem Projektor, mit dem ein Messbereich von 55×44 bis $500 \times 400\text{ mm}^2$ mit 2 Millionen Punkten und einem Punktabstand von $0,04\text{--}0,31\text{ mm}$ aufgenommen werden kann. Die Genauigkeit des Messsystems beträgt ungefähr $40\text{ }\mu\text{m}$, was für die Aufgabenstellung mehr als ausreicht. Das stabile Säulenstativ und der lange Ausleger erlauben eine flexible und optimale Auf-



Abb. 2: Aufnahme des Holzmodells im Hamburgmuseum mit dem Streifenprojektionssystem ATOS I: Messsystem über dem Modell (links) und Aufnahme Fenster mit Streifenmuster im Messbereich (rechts).

nahme des auf zwei Platten (Ost- und Westteil) montierten Holzmodells (Gesamtfläche $2,8 \times 2,8 \text{ m}^2$) mit einer teilweise engen Bebauung in der Hamburger Innenstadt.

Nach der Systemkalibrierung wurden an einem Arbeitstag insgesamt 431 Aufnahmen gemacht, was insgesamt zu einem Datenvolumen von 821 Mio. Punkten geführt hat. Eine lückenlose Aufnahme wurde durch Überdeckung der einzelnen Scans gewährleistet, wobei die Scans über im Modell angebrachte Zielzeichen verknüpft wurden (Abb. 4 rechts). Die jeweiligen Aufnahmen wurden gleich nach der Messung über Passpunkte in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert und anschließend feinausgerichtet und vermascht. Die automatisch vom Aufnahmeprogramm erstellte Dreiecksvermaschung führte zu einer Reduktion auf 41,7 Mio. Dreiecksknotenpunkte (4,1 GByte), die für die weitere Verarbeitung genutzt wurden, in dem die Knotenpunkte der Dreiecke als „Punktwolke“ exportiert wurden.

2.2 Digitalisierung der amtlichen Karte

Die Gebäudegrundrisse wurden manuell in der mit 300 dpi gescannten amtlichen Karte von 1859 (Maßstab 1:4000, Format $94,3 \times 60,6 \text{ cm}^2$, 11.138×7.164 Pixel) digitalisiert. Da die Karte nur genaue Lageinformationen enthält, mussten die Gebäudehöhen aus verfügbaren Fassadenplänen, Photographien oder Gemälden abgeleitet werden, indem über einfache Verhältnisbildung von der Länge der Gebäudegrundseite auf die Gebäudehöhe geschlossen wurde. In Bereichen ohne eindeutige Informationen wurden die Höhen der Gebäude geschätzt und an die umliegenden Gebäude entsprechend angepasst. Für eine weitere Verfeinerung des virtuellen Modells mussten zusätzliche Informationen über Gebäudehöhen aus dem Staatsarchiv oder dem Denkmalschutzamt in Hamburg herausgesucht werden. Die Zuordnung dieser Informationen zu den entsprechenden Gebäuden stellt allerdings einen erheblichen manuellen Aufwand dar. Die 3D-Modellierung der digitalisierten Gebäudegrundrisse ist in Abschnitt 4.2 beschrieben.

3 Automatisierte Gebäudeextraktion

Um die mit dem Streifenprojektionssystem erzeugte Punktwolke weiterverarbeiten und daraus Gebäudemodelle extrahieren zu können, wurde ein C#-Programm entwickelt, mit dessen Hilfe die Punktwolke automatisiert prozessiert werden konnte.

3.1 Datenfilterung

Da die Software zunächst für Laserscannerdaten entwickelt wurde, kann der eigentlichen Gebäudeextraktion eine Filterung der Daten vorgeschaltet werden. Dafür wird in der XY-Ebene der Punktwolke ein einfaches Raster mit einstellbarer Größe (z. B. 1 mm) erzeugt, für das dann in jeder Rasterzelle eine maximale Höhe berechnet wird, nachdem Ausreißer eliminiert sind. Dieses iterative Verfahren wird auf das gesamte Raster angewendet, so dass in der gefilterten Punktwolke alle Gebäudewandpunkte eliminiert werden und nur noch Boden- und Dachpunkte enthalten sind. Dieses Verfahren wird auch ausführlich in (JEDRZEJAS 2008) beschrieben. Bei den Daten der Streifenprojektion war jedoch eine derartige Filterung nicht erforderlich, da die Punktwolke wegen der vorher erfolgten Dreiecksvermaschung bereits bereinigt war. Trotzdem wurde diese Filterfunktion in der selbst entwickelten Software belassen, um bei anderen Modellen auch Laserscannerdaten verarbeiten zu können.

3.2 Generierung der Gebäudegrundrisse

Um eine vollständige automatische Gebäudemodellierung aus einer Punktwolke heraus zu realisieren, ist es nötig, auch den Grundriss erfassen zu können. Diese Funktion sollte in die Software implementiert werden. Dazu wurden zunächst vorher aufgenommene Testdaten des Laserscanners prozessiert. Es wurde ein Schnitt ungefähr in Traufhöhe der Gebäude durch die Punktwolke gelegt. Dieser Schnitt wurde dann in die XY-Ebene orthogonal projiziert und in ein Bild überführt. In dem binä-



Abb. 3: Testdatensatz vom IMAGER 5006i: Punktwolke (links), Orthogonal-Projektion der Punktwolke als Bild (Mitte), Gebäudepunkte als Ergebnis der ersten Filterung (rechts).



Abb. 4: Digitalisierte Grundrisse (schwarz) mit der überlagerten Punktwolke (blau) (links), Darstellung der dichten und komplexen Bebauung in der Nadiraufnahme eines Ausschnittes des Hamburger Holzmodells von 1644 mit signalisierten Punkten für die Verknüpfung der einzelnen Scans (rechts).

ren Bild sind alle gescannten Punkte schwarz dargestellt, der Rest weiß (Abb. 3).

Anschließend sollten zwei verschiedene Bildverarbeitungsalgorithmen zur Geradenerkennung eingesetzt werden, da die Wandpunkte der Gebäude unterhalb des Schnitts als gepunktete Gerade dargestellt werden. Als Ergebnis der Filterung des Bildes mit einer Filtermatrix erhält man ein bereinigtes Binärbild der Gebäudegrundrisse als gepunktete Kanten (Abb. 3 rechts), wodurch z. B. ein Canny-Operator (CANNY 1986) zur Kantenextraktion nicht mehr erforderlich war. Zur eigentlichen Geradenerkennung wurde dann eine Hough-Transformation (HOUGH 1962) getestet. Allerdings traten bei der Rücktransformation aus dem Hough-Raum ins Bild große Probleme auf, da die einzelnen Pixel nicht richtig als Kante identifizierbar waren. Im Hough-Raum bildeten sich Cluster gleicher Werte und nicht wie üblich Cluster mit einem klaren Maximum, die bei der Rücktransformation zu einer Art Geradenschar führen. Aus diesem Grund konnte dieser Programmteil nicht in einen

operationellen Zustand gebracht werden. In den Punktwolken des später anstatt des Laser-scanners eingesetzten Streifenprojektionssystems sind aufgrund ihrer Struktur (Dreiecks-knotenpunkte) sehr wenig Wandpunkte vorhanden. Dies führt im Algorithmus dazu, dass gar keine Geraden mehr erkannt werden können, da diese nur noch aus wenigen Einzel-punkten bestehen. Automatische Verfahren der Bildverarbeitung zur Erstellung der Grundrisse führten trotz intensiver Tests und Untersuchungen mit diesem Datensatz nicht zum Erfolg (KELLER & SÄNGER 2010). Punkt-basierte Verfahren im 3D-Raum zur automatischen Generierung der Grundrisse wurden noch nicht getestet.

Um nun Grundrisse der Gebäude trotzdem zügig zu erhalten, wurde die Punktwolke manuell ausgewertet und digitalisiert (Abb. 4 links). Dabei wurden die „Grundrisse“ in der Gebäudetraufhöhe durch Horizontalschnitte in der Punktwolke ermittelt, da bei der engstehenden Bebauung sonst keine Digitalisierung möglich gewesen wäre. Im Vergleich zu aktu-

ellen Stadtmodellen ist dieser Schritt leider notwendig, da man nicht auf vorhandene Katasterdaten zurückgreifen kann, um die Grundrisse zu erhalten.

3.3 Automatische Generierung der Gebäude

Da die Grundrisse zur Datenprozessierung in Traufhöhe festgelegt wurden, konnten so zur Trennung von Dach- und Wandpunkten alle tiefer liegenden Punkte der Wände einfach eliminiert werden. Mit den Grundrissen wurden dann aus der Punktwolke die zum jeweiligen Haus gehörenden Punkte über ein Point-in-Polygon Verfahren selektiert. Zur Geschwindigkeitssteigerung wurde der Grundriss auf der kurzen Seite halbiert, so dass nur eine Dachseite analysiert werden musste. In diese ausgewählten Punkte wurde mithilfe einer iterativen Ausgleichung eine Ebene gelegt. Um ein symmetrisches Dach zu erhalten, wurde die Ebene auf die andere Dachseite gespiegelt berechnet. Abschließend sind dann Trauf- und Firsthöhe über die Ebene berechnet worden, um die anderen Fassadenelemente (Wände und Giebel) zu konstruieren. Bei dieser Art der automatischen Berechnung von Gebäudemodellen wurden aufgrund der Modellbeschaffenheit zwei wesentliche Annahmen getroffen: das Holzmodell besteht nur aus Gebäuden mit Satteldächern und jedes Gebäude hat nur vier Grundseiten. Mit diesen Annahmen wurden die Gebäude in der selbst entwickelten Software automatisch konstruiert.

Als ein weiterer Automatisierungsschritt innerhalb der Software wurde die Generierung von komplexen Dachformen und Grundrissen mit mehr als vier Seiten diskutiert. Hierzu wurde ein Verfahren, das auch schon in (JANSA & STANEK 2003) beschrieben wurde, implementiert. In diesem Verfahren wird in die selektierte Gebäudepunktwolke eine Vielzahl von kleinen Ebenen gelegt. Die Parameter der Ebenen werden in einen Parameterraum übertragen, in dem große Flächen dann einen Cluster bilden, da diese durch viele kleine, aber parametrisch gleiche Ebenen ausgedrückt werden können. Zur Analyse und Erkennung der Cluster können verschiedene Verfahren eingesetzt werden.

Ein Clusteranalyseverfahren, das geeignet für diese Aufgabenstellung erschien, ist die Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique (ISODATA) (DUDA & HART 1973). Dies ist ein anspruchsvoller und ausgereifter Algorithmus, der es erlaubt, die Anzahl der Clusterzentren automatisch während der Iteration zu ermitteln. Dies geschieht, indem ähnliche Cluster verschmolzen und Cluster mit großer Variation gesplittet werden. Nach der Erkennung kann aus den Clustern die jeweilige Ebene zurückgerechnet werden. Abschließend werden diese Ebenen verschnitten und mit den Originalpunkten begrenzt, so dass sich eine beliebige Dachform erstellen lässt. Erste Tests mit dieser selbst programmierten Software verliefen vielversprechend und werden derzeit weiter entwickelt, so dass die Software flexibler wird. Alle Gebäudemodelle wurden allerdings in der Software mit der einfachen



Abb. 5: Ergebnisse der Modellierungssoftware nach zwei Iterationen für Block 5 (Ostteil); Grün: $NV < 3.3$, Gelb: $NV > 3$; 3, Rot: Dachneigung auf 0 gesetzt.

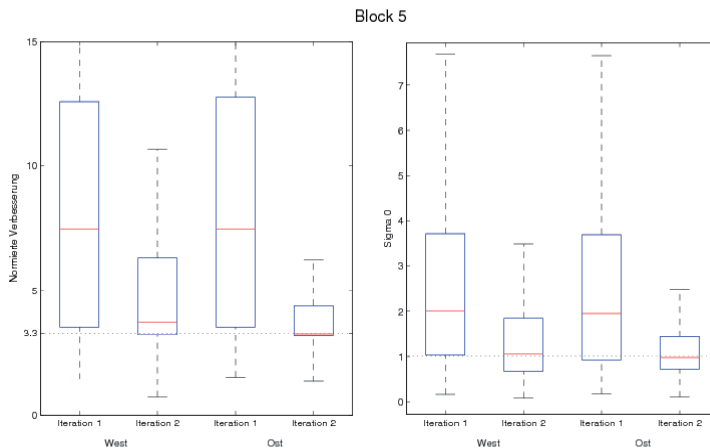


Abb. 6: Box-Whiskerplot für die Normierte Verbesserung NV (links) und für Sigma 0 (rechts) der Blöcke Ost 5 und West 5.

Variante berechnet, die sich nachher aber leicht durch komplexere bzw. detailliertere ersetzen lassen. Abb. 5 zeigt exemplarisch eine Visualisierung des Berechnungsergebnisses der Modellierungssoftware für Block 5, bei der grüne Gebäudemodelle als „korrekt“ (kleiner als der Schwellwert für die Normierte Verbesserung $NV < 3,3$), gelbe mit „Berechnung über den Schwellwert ($NV > 3,3$)“ und rote Gebäude mit „Berechnung fehlgeschlagen => Dachneigung = NULL“ gekennzeichnet wurden. Aus der Software wurden automatisch DXF-Dateien erzeugt, die dann weiter bearbeitet werden konnten.

Zur Kontrolle wurden die während der Berechnung generierten Daten protokolliert, um im Anschluss daran eine Aussage zur Qualität machen zu können. In der Modellierungssoftware können folgende Parameter vor der Berechnung eingestellt werden: a) normierte Verbesserung ($NV = 3,3$) als Abbruchkriterium für die Ausgleichung, b) Sigma NULL a priori (Iteration 1 = 0,5 mm, Iteration 2 = 1 mm) und c) Prozentzahl der maximal zu eliminierenden Punkte in der Ausgleichung (20%). Es werden so lange Punkte bei der Ausgleichung eliminiert, bis keiner mehr den festgelegten Wert für die Normierte Verbesserung überschreitet oder der Schwellwert 20% erreicht wurde.

Exemplarisch sind in Abb. 6 die Ergebnisse des Blocks 5 (Ost- und Westteil) dargestellt,

da dies der größte Block ist. Die Untersuchungen wurden allerdings an allen 20 Blöcken vorgenommen. Es ist ersichtlich, dass sich die Berechnungsergebnisse durch die Änderung des Sigma NULL a priori von 0,5 mm auf 1 mm signifikant verbessert haben. Zusätzlich wurde als Ergebnis protokolliert, dass eine Dachhälfte im Westteil durchschnittlich 960 Punkte und im Ostteil 370 Punkte enthält. Diese Angabe spiegelt die Dichte und die Bebauung des Modells wieder, d.h. im Westteil befinden sich eher weitläufige Häuserblöcke, während im Ostteil der Innenstadt zwischen den Fleeten eine recht dichte Bauweise vorzufinden ist (siehe auch Abb. 4 rechts). Insgesamt benötigte die Software rund 17 Stunden für die Berechnung aller 20 Blöcke und lieferte insgesamt 5437 Gebäude.

Das generierte CAD-Modell wurde abschließend zur Qualitätskontrolle mit der Punktwolke verglichen. In dem Block 5 vom Ostteil des Modells wurden von 1536 Gebäuden nur 115 (7,5%) fehlerhaft berechnet. Für die fehlerhaft berechneten Gebäude wurde zur eindeutigen Kennzeichnung automatisch ein Flachdach erzeugt, das später in manueller Arbeit angepasst bzw. korrigiert wurde. 1257 Gebäude (74,3%) weisen Abweichungen in den Dächern im Bereich zwischen $-0,5$ mm und $+0,5$ mm auf, während 279 Gebäude (18,2%) Abweichungen im kritischen Bereich von -2 mm bis $+2$ mm haben.

4 Modellierung

Die Modellierung beschäftigt sich mit der Generierung von 3D-CAD-Objekten für den Aufbau des historischen 4D-Stadtmodells. Um aus den aufbereiteten Daten vom Streifenprojektionssystem und aus der Karte 3D-Stadtmodelle zu generieren, sind weitere Arbeitsschritte erforderlich.

4.1 Modellierung des Holzmodells

Der Großteil der Gebäude konnte wie schon in Abschnitt 3 beschrieben mit der eigens dafür entwickelten Modellierungssoftware automatisch erstellt werden. Komplexere Gebäude wie z. B. die Kirchen lassen sich allerdings nicht automatisch durch die Software generieren, so dass manuelle Modellierungsarbeit erforderlich war. In dem Programm AutoCAD mit dem Plug-in CloudWorx wurden in der Punktwolke durch Polylinien Grundrisse und Profile erzeugt, aus denen Flächen und Volumenkörper gebildet wurden. Die Körper konnten über boolesche Operatoren (Verschneiden, Summieren, Differenzbildung) miteinander kombiniert werden. Da diese 3D-Modellierung in Punktwolken im Bereich des terrestrischen Laserscannings heute Standard ist, werden hier nicht die einzelnen manuellen Arbeitsschritte beschrieben, sondern es wird auf Literatur mit entsprechenden praktischen Beispielen der HCU Hamburg verwiesen (z. B.

KERSTEN et al. 2006, KERSTEN 2007, KERSTEN et al. 2008). In Abb. 7 ist beispielhaft die Modellierung der Kirche St. Katharinen dargestellt. Ein anschließender 3D-Vergleich von CAD-Modell und Punktwolke hat eine durchschnittliche Abweichung von 0,2 mm ergeben.

Digitales Geländemodell

Aus den Daten des Streifenprojektionssystems wurde nach den Gebäudemodellen auch ein digitales Geländemodell (DGM) abgeleitet. Aufgrund der hohen Datenmenge, der benötigten Rechnerkapazität und der Erfahrung im Bereich Airborne Laserscanning wurde das DGM beim Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung Hamburg (LGV) erstellt, in dem Geländepunkte, Vegetation und Gebäude in der Punktwolke mit der Software TerraModeler der Firma TerraSolid klassifiziert wurden (AXELSSON 1999). Zur DGM-Berechnung wird in der Software ein Raster über das Gebiet gelegt, wobei die Rasterzellen flächenmäßig größer sein müssen als das größte Gebäude. In allen Rasterzellen wird der tiefste Punkt ermittelt, mit denen dann das Geländemodell trianguliert wird. Anschließend werden alle anderen Punkte mit Abstands- und Winkelkriterien überprüft, ob sie auf dem Gelände liegen. Punkte, die diese Kriterien erfüllen, werden zum Gelände hinzugefügt. Dann beginnt eine neue Triangulation, dieser iterative Prozess wird solange fortgeführt, bis er konvergiert. Mit allen Punkten, die als Ge-

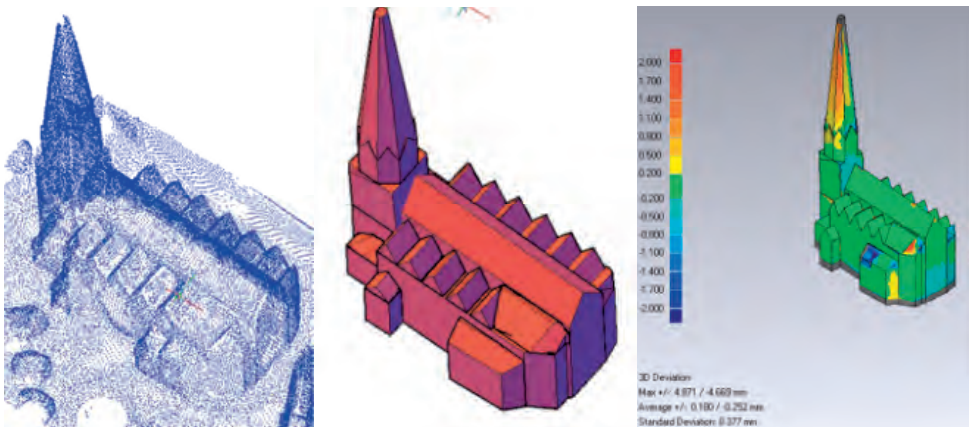


Abb. 7: Der Weg von der Punktwolke über die Modellierung bis zur Kontrolle: Punktwolke (links), CAD-Modell (Mitte) und 3D-Vergleich von CAD und Punktwolke (rechts).

lände klassifiziert werden können, wird abschließend die Geländeoberfläche trianguliert.

Georeferenzierung

Ein großes Problem bei den hier generierten Daten war die Georeferenzierung (Transformation in ein gemeinsames Koordinatensystem), da aus der Zeit von 1644 logischerweise keine Vermessungsdaten existieren. Um das Modell, das mit einem ungefähren Maßstab von 1:1000 vorliegt, zu referenzieren, wurden zunächst die beiden Modellteile zueinander ausgerichtet. Dies erfolgte über manuell gemessene Punkte am Modell sowie an der Unterkonstruktion. Es wurde ein Koordinatensystem mit der 3-2-1 Ausrichtung für eine Platte definiert, ein Punkt auf der Platte, zwei Punkte entlang einer Kante der Unterkonstruktion, sowie drei Punkte in der dargestellten Wasserebene. Die zweite Platte wurde dann mit drei Translationen und drei Drehungen entsprechend in dieses Koordinatensystem transformiert. Die Nahtstelle wurde dann optisch auf Unstetigkeiten hin überprüft, vor allem die Straßen und die Flote, die über die Nahtstelle hinweg verlaufen. Im Folgenden wurden dann verschiedene Gebäude auf ihre Tauglichkeit als Passpunkt untersucht. Gebäude als Passpunkte zu benutzen, macht natürlich nur Sinn, wenn sie sich über die Jahrhunderte gar nicht oder nur wenig verändert haben. Obwohl solch ein Kriterium meistens Kirchen erfüllten, gab es dennoch große Schwierigkeiten, geeignete Objekte zu finden. So wurde das Hamburger Wahrzeichen, die St. Michaelis Kirche, auch Michel genannt, erst 1647 gebaut und befindet sich daher nicht im Holzmodell. Die Kirche St. Nicolai wurde zwar schon im 13. Jahrhundert errichtet, leider „wanderte“ die Kirche nach dem Großen Brand 1842 ein kleines Stück südöstlich. 1943 wurde sie dann bis auf den Turm komplett zerstört und nicht wieder aufgebaut. Das dritte Beispiel stellt die Kirche St. Katharinen dar, die bereits im Jahr 1256 erwähnt wurde und die trotz An- und Umbauten seit 1644 bis heute ihre charakteristische Form bewahrt hat, so dass Gebäudeecken als Passpunkte eindeutig identifiziert werden konnten. Insgesamt wurden sechs Passpunkte mit UTM-Koordinaten

über das damalige Stadtgebiet verteilt für die 2D-Helmert-Transformation gefunden. Zur Berechnung der Transformation wurde das Ausgleichsprogramm Panda genutzt. Die Restklaffen an den Passpunkten bewegen sich dabei im Bereich von -4 bis $+6$ m im Rechtswert sowie -1 bis $+2$ m im Hochwert. Dabei stellte sich überraschenderweise heraus, dass das Holzmodell mit einem Maßstab von 1:1250 doch etwas kleiner ist, als bisher bekannt war. Somit stand nun das modellierte und in das UTM-System (WGS84) georeferenzierte Gesamtmodell zur Weiterverarbeitung und Präsentation zur Verfügung.

4.2 Modellierung der digitalisierten Grundrisse aus der Karte

Die Vermessungsarbeiten für die verwendete amtliche Kartenausgabe wurden von 1855 bis 1859 durchgeführt. Die Georeferenzierung der Karte erfolgte durch 2D-Helmert-Transformation von acht Passpunkten (Kirchen und Brücken) in der Software GEOgraf. Die maximalen Klaffen in den Passpunkten lagen bei 0,901 m im Rechtswert und bei 0,456 m im Hochwert. Anschließend erfolgte die manuelle Digitalisierung der Grundrisse aus der Karte mit AutoCAD Map 3D und die Höhenermittlung und Erzeugung der Volumenkörper aus Plänen und Fotos. Die unterschiedlichen Grundlagedaten für die Gebäudehöhen stellen eine heterogene Datenqualität dar, die in Abb. 8 illustriert ist: Grün = Höhe aus Fassadenaufmaß, Gelb = Bilddaten, Rot = Abschätzung/Alte Karten.

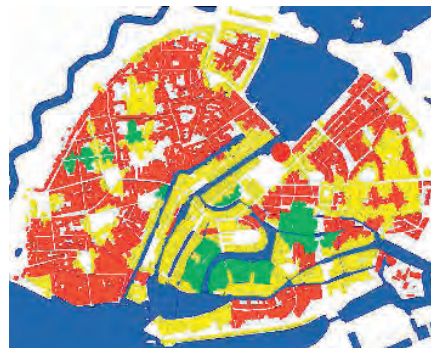


Abb. 8: Übersicht der Gebäudehöhenqualität: Grün = Fassadenaufmaß, Gelb = Bilddaten, Rot = Abschätzung/Alte Karten.

nungen), Gelb = Höhen aus Fotos abgeschätzt und Rot = keine Informationen, Gebäudehöhe aus umliegenden Gebäuden abgeschätzt und entsprechend angepasst. Somit stellen die Höheninformationen in Grün die genauesten und in Rot die unsichersten Quellen dar. Für alle gelb markierten Blöcke lagen eine unterschiedliche Anzahl von Fotos aus einer oder mehreren perspektivischen Ansichten vor. Da es zu zeitaufwändig war, für jedes einzelne

Gebäude eine Höhe abzuleiten, erfolgte die Gebäudehöhenanpassung als Generalisierung blockweise. Dieser Mangel kann allerdings in zukünftigen Arbeiten korrigiert werden, da alle Modelle in der Datenbank einfach und flexibel austauschbar sind. Es ist also möglich, dass in naher Zukunft die gesamte Stadtfläche, die in Abb. 8 dargestellt ist, ihren Status von Rot auf Gelb bzw. Grün wechselt.

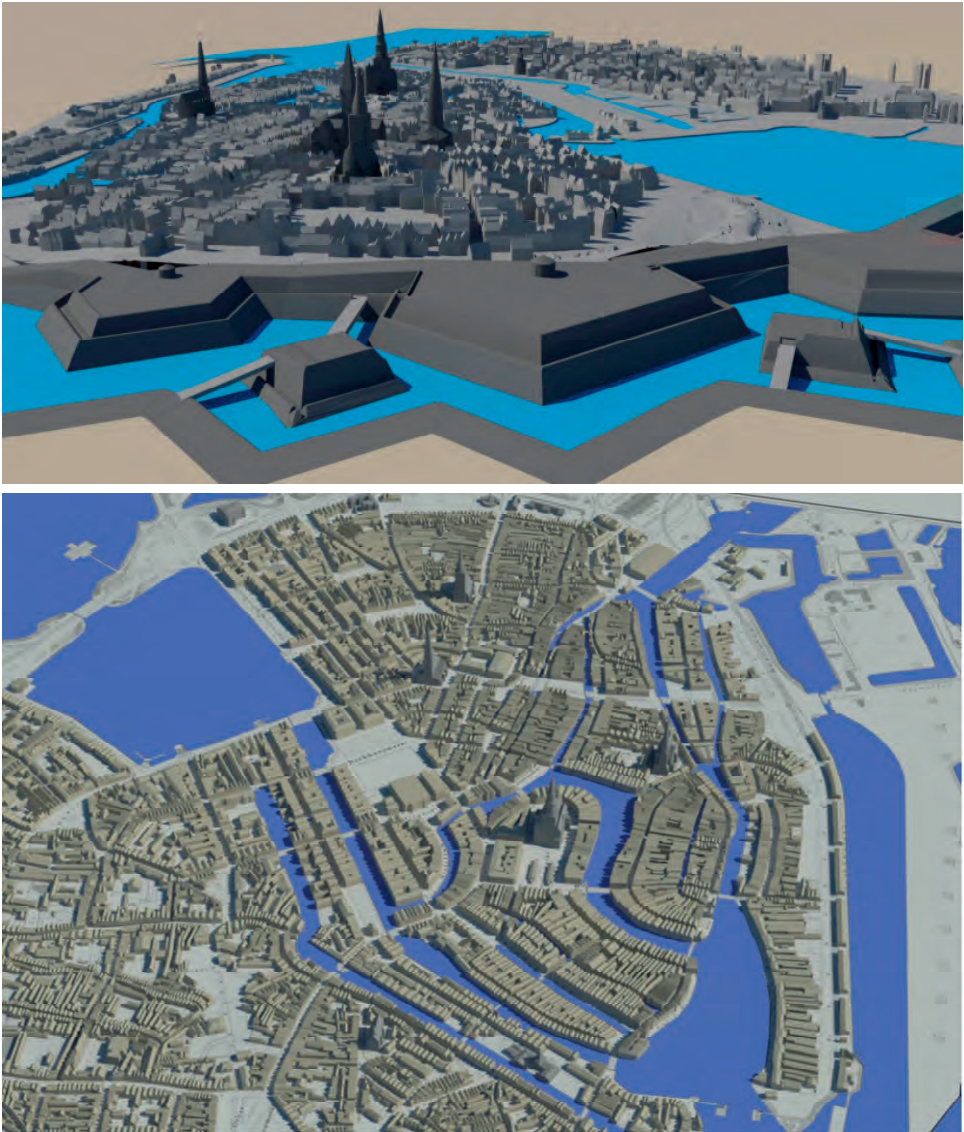


Abb. 9: Ausschnitte des 3D-Stadtmodells der Freien und Hansestadt Hamburg aus dem Jahr 1644 (oben) und 1859 (unten).

Die in der Karte an Straßenkreuzungen ein- getragenen Höhenkoten wurden ebenfalls digi- talisiert, um daraus später ein DGM berech- nen zu können. Insgesamt wurden 345 Höhen- punkte über ein Gebiet von 490 ha ermittelt. Alle Höhen sind auf einen alten Elblutmesser bezogen. Derzeit gibt es noch keine Verknüp- fung zu heute üblichen Höhensystemen, dies soll aber noch realisiert werden.

4.3 Datenexporte

Nachdem alle Modellteile vom Holzmodell und von der Karte modelliert, kontrolliert und georeferenziert vorlagen, wurden diese block- weise in das Standardformat KML/KMZ von Google übertragen, da der digitale Globus von Google als Präsentationsplattform dienen sollte. Die Abb. 9 zeigt die erstellten 3D-Stadtmo- delle von Hamburg aus den Jahren 1644 und 1859.

5 Visualisierung

Im letzten Schritt erfolgte die Zusammenstel- lung der beiden beschriebenen Ausgangs- sowie weiterer Stadtmodelle zu einer Zeitserie. Dieses 4D-Modell wurde auf Basis des virtu- ellen Globus „Google Earth“ in einem eigenen Browser mit Datenbankanbindung visualisiert und erlaubt somit weitere Analysen.

Neben den beschriebenen Ausgangsmode- len wurden weitere Epochen aus historischen Karten und isometrischen Ansichten interpo- liert. Insbesondere eignen sich isometrische Ansichten für eine Interpolation früherer Epo- chen, da bei diesen Darstellungen leicht Infor- mationen über die Anzahl der Gebäude und deren Lage entnommen werden können. Für die erste Epoche im 4D-Stadtmodell wurde die isometrische Ansicht um 1200 ausgewählt, da diese eine der ersten Darstellungen von Hamburg ist, die eine Aussage über die An- zahl der Gebäude zulässt. Es folgt ein Modell auf Basis einer Karte von 1400. Zu diesem Zeitpunkt war der Grundriss der Stadt vollendet und sollte 200 Jahre Bestand haben. Für die dritte Epoche diente die isometrische An- sicht Hamburgs von 1589, da diese Hamburg vor dem Bau der Wallanlagen zeigt. Das Mo- dell von 1644 als vierte Epoche präsentiert Hamburg als stärkste Festung Deutschlands. Die isometrische Ansicht 1700 stellt die fünfte und das Modell von 1859 illustriert die sechste Epoche des 4D-Stadtmodells. Abb. 10 fasst die Zuordnung der Modelle und wichtige his- torische Ereignisse zusammen.

Für die Extrapolation der Epochen von 1200 bis 1589 diente das Modell von 1644, während die Epoche 1700 auf der oben beschriebenen Kartengrundlage erstellt wurde. Aus den iso- metrischen Ansichten wurde die Existenz von Straßen und Häuserblocks den verschiedenen Epochen zugeordnet, so dass daraus die 3D-

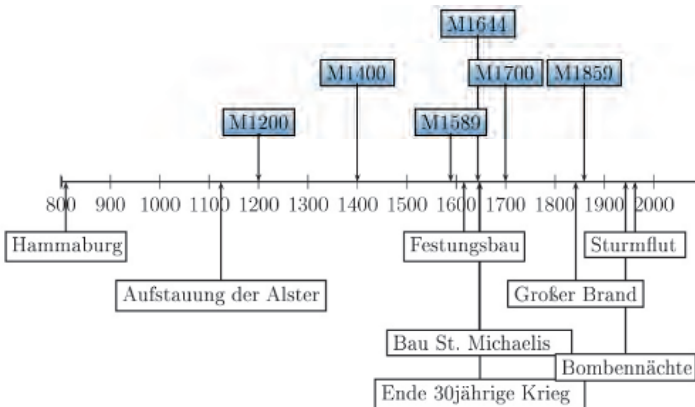


Abb. 10: Zeitschiene der verschiedenen Modellzeitpunkte im Bezug zu historischen Ereignissen der Freien und Hansestadt Hamburg.

Stadtmodelle der vorherigen zeitlichen Epochen abgeleitet werden konnten. Auf diese Weise bekamen alle Häuserblocks einen Zeitstempel, der in eine Datenbank eingetragen wurde. In Abb. 11 ist jeweils ein Ausschnitt

der 3D-Stadtmodelle aus den Jahren 1200, 1400, 1589 und 1700 dargestellt.

Die technische Einbindung des 4D-Stadtmodells in Google Earth (Abb. 12) wurde mithilfe eines selbst entwickelten Programms re-

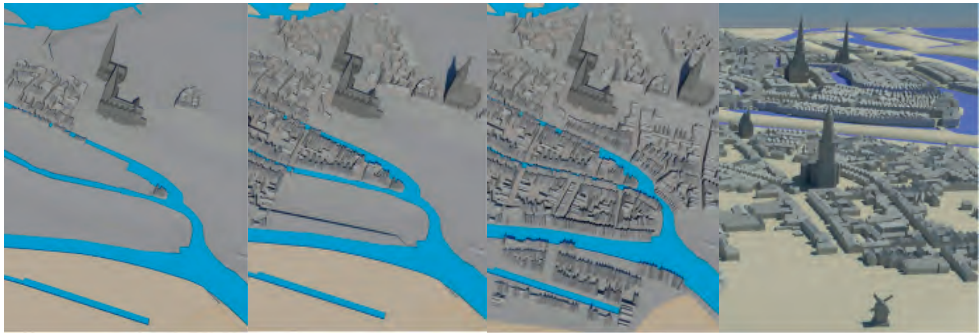


Abb. 11: Ausschnitt des 3D-Stadtmodells der Freien und Hansestadt Hamburg der Jahre 1200, 1400, 1589 und 1700 (v.l.n.r.).

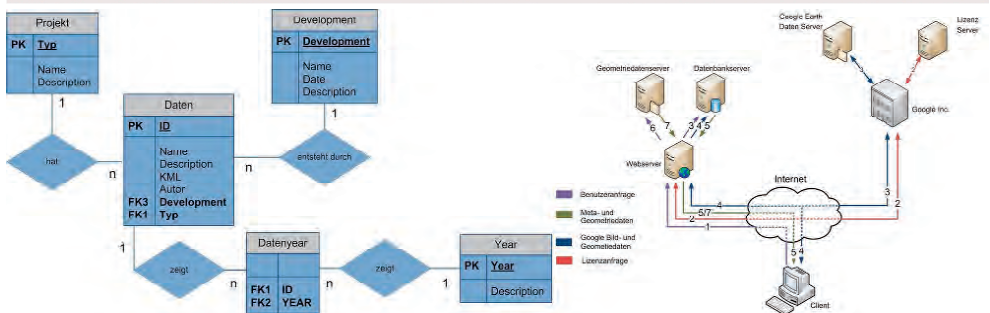
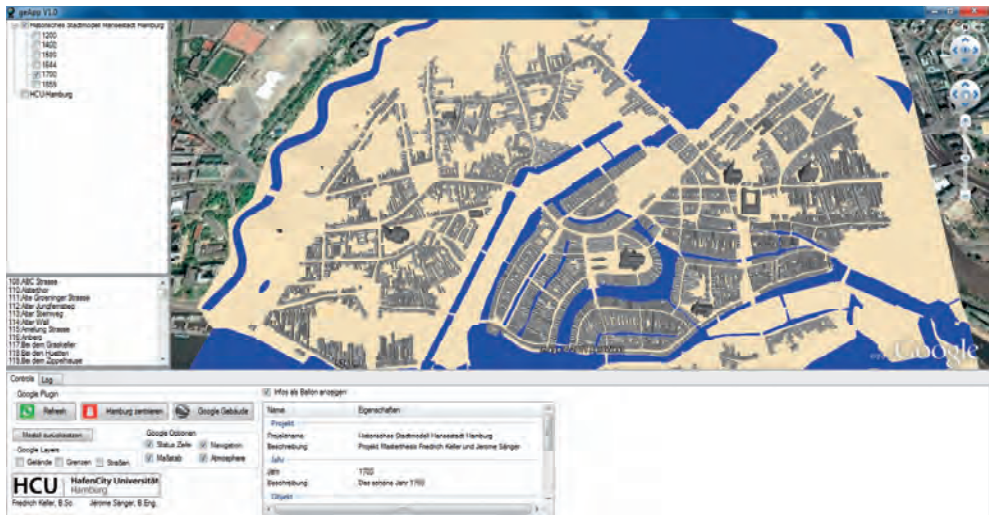


Abb. 12: Aufbau der Darstellungssoftware mit dem Datenbank- und Netzwerkkonzept.

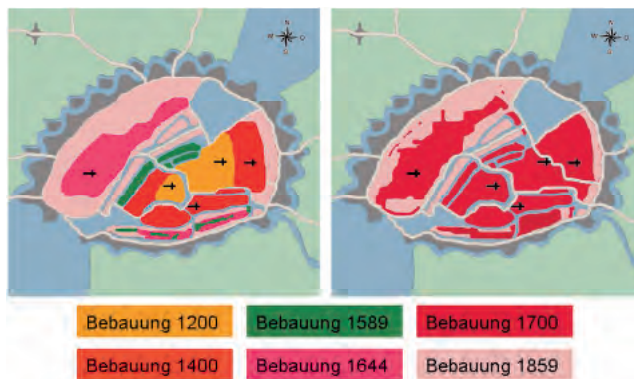


Abb. 13: Entwicklung der bebauten Flächen Hamburgs als Vergleich von 1200 bis 1644 (links) und 1700 bis 1859 (rechts) mit Symbolen der Hamburger Hauptkirchen.

alisiert, das ein Application Programming Interface nutzt und das die Navigation durch das 4D-Stadtmodell mit seinen sechs Epochen sowie die Darstellung von Metadaten (z. B. Entstehung, Beschreibung, Geschichte) zu den einzelnen Objekten ermöglicht. Dabei ist die Modellarchitektur so angelegt, dass jeder Straßenzug bzw. jedes Gebäude nur einmal existiert. Die Gebäudemodelle der verschiedenen Zeitpunkte werden durch das Abrufen der zugehörigen Gebäude zusammengesetzt und dargestellt. Dies wird derzeit noch softwaretechnisch gelöst, die Datenbankstruktur wird aber dahingehend angepasst, dass diese Zuordnung effizienter wird. Für den Zugriff auf das 4D-Modell wurde eine Netzwerkarchitektur geschaffen, die auf einem Client-Server-Modell beruht. Dabei stehen mehrere Server zur Verfügung, die unterschiedliche Datenquellen bereithalten, die bei Bedarf mit Hilfe von SQL-Befehlen auf den Client-Rechner zur Darstellung übertragen werden können.

Mit dieser Konfiguration ist es nun möglich, verschiedene Epochen des historischen Stadtmodells zu visualisieren und multi-temporale Analysen durchzuführen. Beispielsweise zeigt Abb. 13 die flächenmäßige Ausbreitung der Bebauung Hamburgs zwischen 1200 bis 1644 bzw. von 1700 bis 1859.

6 Fazit & Ausblick

In diesem Beitrag ist der Aufbau eines historischen 4D-Stadtmodells der Freien und Hansestadt Hamburg beschrieben worden, in dem aus verschiedenen Datenquellen mit unterschiedlicher Qualität 3D-Stadtmodelle für sechs Zeitepochen abgeleitet wurden. Die Zeitreihe stellt die Entwicklung der Stadt Hamburg bis in das 19. Jahrhundert und in einer möglichen Verbindung mit dem aktuellen 3D-Stadtmodell sogar bis in das 21. Jahrhundert dar. Trotz des hohen Automationsgrades bei der Generierung der Gebäude aus der Punktwolke des Holzmodells mussten wichtige Arbeitsschritte wie die Digitalisierung der Grundrisse, die Modellierung der komplexen Gebäude und die Digitalisierung und Modellierung der Gebäude aus der Karte manuell durchgeführt werden. Daraus ergab sich ein gesamter Projektaufwand von insgesamt 800 Stunden, was bei einem Stundenlohn von € 50 für einen Ingenieur insgesamt einem Projektvolumen von € 40,000 entspricht. Die prozentuale Aufteilung der eingesetzten Arbeitszeit ist in Abb. 14 dargestellt. Sie zeigt, dass fast 50% der Zeit für Digitalisierung und Modellierung benötigt wurde. Im Bereich Digitalisierung liegt sehr großes Optimierungs- bzw. Verbesserungspotential für die Erstellung solcher historischer Stadtmodelle, wenn die Digitalisierung von Grundrissen in Punktwolkenbildern und Karten automatisch erfolgt (NEBIKER & CAROSIO 1994). Die Programmierung bzw. Softwareentwicklung nahm ca.

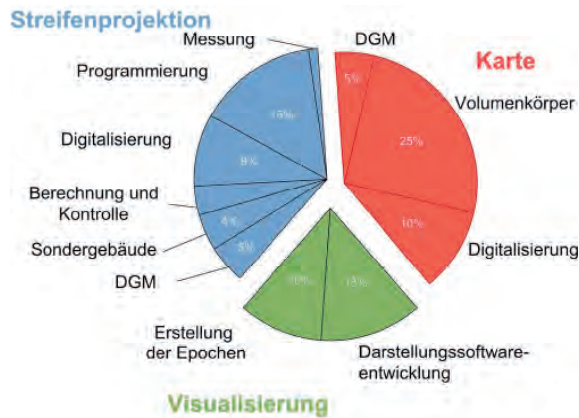


Abb. 14: Zusammenstellung der eingesetzten Arbeitszeit.

30% der Zeit in Anspruch, was bei einem weiteren ähnlichen Projekt deutlich reduziert werden könnte, da dann lediglich Anpassungen der bestehenden Software erfolgen müssten.

Das vorliegende historische 4D-Stadtmodell der Freien und Hansestadt Hamburg stellt nun eine hochinteressante Datengrundlage für viele verschiedene Anwendungen (in der Stadtplanung, Architektur und Geschichte) dar und verspricht, ein enormes Entwicklungspotenzial für ergänzende und vertiefende Arbeiten zu haben. Neben einer Verfeinerung der 3D-Modelle durch detailliertere Gebäude aus Informationen vom Denkmalschutzamt und vom Staatsarchiv könnten weitere Zeitpunkte aus dem 19. und 20. Jahrhundert hinzugefügt werden. So scheinen gerade als wichtige Meilensteine der Hamburger Geschichte der große Brand von 1842, das Groß-Hamburg-Gesetz von 1937 und die Zeit nach der großen Zerstörung durch die Bombenangriffe im Mai 1945 sehr interessant zu sein. Zur Erhöhung der Attraktivität der Modelle könnten die Gebäude mit (synthetischen) Texturen und die Umgebung mit Vegetation versehen werden. Für das Museum kommt zunehmend multimediale Kommunikation durch virtuelle Rundgänge in der mittelalterlichen Stadt in Form von Videos oder durch interaktive Begehung in Betracht. In Zukunft könnten solche historischen digitalen Modelle eine wesentliche Grundlage für benutzergesteuerte Erkundungen historischer Szenen in 3D und

somit aus Museen vielleicht gar nicht mehr wegzudenken sein.

Aus wissenschaftlicher Sicht könnten diese Modelle mit anderen Daten, wie zum Beispiel (historischen) Einwohnerverzeichnissen, verknüpft werden, um neue visuelle oder rechnerische Analysen zu ermöglichen. Zudem wäre der Vergleich des heutigen Stadtmodells mit den historischen Modellen sehr interessant, um die Entwicklung und die Veränderungen der Stadt zu visualisieren.

Literatur

- AXELSSON, P., 1999: Processing of laser scanner data – algorithms and applications. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **54** (2–3): 138–147.
- CANNY, J., 1986: A Computational Approach to Edge Detection. – *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **8**: 679–698.
- CHEVRIER, C., JACQUOT, K. & PERRIN, J.P., 2010: 3D Modelling of a Town Scale Model. – *EuroMed2010, 3rd International Conference dedicated on Digital Heritage, Short Papers*: 99–107; Archaeolingua, Budapest, Ungarn.
- DUDA, R.O. & HART, P., 1973: *Pattern Classification and Scene Analysis*. – Wiley, New York, USA.
- HOUGH, P.V.C., 1962: Method and means for recognizing complex patterns. – U.S. Patent 3.069.654.
- JANSA, J. & STANEK, H., 2003: Ableitung von Stadtmodellen aus Laser-Scanner-Daten, Grundrissplänen und photographischen Aufnahmen. – *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation* **91** (4): 262–270.

- JEDRZEJAS, T., 2008: Aufbau historischer städtischer 3D-Szenarien für eine Nutzung unter Google Earth, basierend auf Daten von terrestrischem Laserscanning, Photogrammetrie und Archivinformationen. – Diplomarbeit, Hochschule Bochum, Fachbereich Vermessung und Geoinformatik.
- JEDRZEJAS, T. & PRZYBILLA, H.-J., 2009: Aufbau historischer 3D-Szenarien am Beispiel der mittelalterlichen Stadt Duisburg. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG) **3/2009**: 195–204.
- KELLER, F. & SÄNGER, J., 2010: Automatisierte Generierung von historischen 4D-Stadtmodellen für die Darstellung innerhalb der Google Earth Engine am Beispiel der Freien und Hansestadt Hamburg. – Unveröffentlichte Masterarbeit im Masterstudiengang Geomatik der HafenCity Universität Hamburg.
- KERSTEN, TH., 2007: Virtual Reality Model of the Northern Sluice of the Ancient Dam in Marib/ Yemen by Combination of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Archaeological Applications. – International Journal of Architectural Computing, Special Focus on Cultural Heritage Multiscience **05** (02): 339–354.
- KERSTEN, TH., BIEBERMANN, M. & SCHNEIDER, M., 2006: 3D-Erfassung und Modellierung des Duderstädter Westerturmenssembles durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und terrestrischem Laserscanning. – Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik: 254–263; Wichmann, Heidelberg.
- KERSTEN, TH., STERNBERG, H., MECHELKE, K. & LINDSTAEDT, M., 2008: Datenfluss im terrestrischen Laserscanning – Von der Datenerfassung bis zur Visualisierung. – Terrestrisches Laserscanning (TLS2008), Schriftenreihe des DVW, Band **54**: 31–56; Wißner, Augsburg.
- LUHMANN, T., 2010: Nahbereichsphotogrammetrie. – Grundlagen – Methoden – Anwendungen. – 3. Auflage; Wichmann Verlag.
- NEBIKER, S. & CAROSIO, A., 1994: Automatic Extraction and Structuring of Objects from Scanned Topographical Maps. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing **30** (1): 180–187.
- NEBIKER, S., BARMETTLER, A., FISCHER, B. & WEBER, E., 2009: Vom physikalischen Stadtmodell zum historischen 3D-GIS – Anforderungen und Lösungsansätze am Beispiel des historischen Solothurns. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG) **3/2009**: 205–219.
- REMONDINO, F. & EL-HAKIM, S., 2006: Image-based 3D Modelling: a Review. – The Photogrammetric Record **21** (115): 269–291.
- SEDLACEK, D. & ZARA, J., 2009: Graph Cut Based Point-Cloud Segmentation for Polygonal Reconstruction. – Lecture Notes in Computer Science **5876**: 218–227; Springer.

Adressen der Autoren:

Friedrich Keller, Thomas P. Kersten und Jochen Schiewe, HafenCity Universität Hamburg, Hebebrandstraße 1, D-22297 Hamburg, Tel.: +49-40-42827-5391, Fax: +49-40-42827-5399, e-mail: Friedrich.Keller, Thomas.Kersten, Jochen.Schiewe@hcu-hamburg.de

Jérôme Sänger, Hospitalstraße 8, D-06536 Bennungen, e-mail: jerome.saenger@t-online.de

Manuskript eingereicht: Januar 2011
Angenommen: März 2011