

Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges "Geographical Information Science & Systems"
(UNIGIS MSc) am Zentrum für Geoinformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

"Aufbau eines historischen 3D-Stadtmodells zu Explorations- und Analysezwecken"

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Claudia Schenk

U1420, UNIGIS MSc Jahrgang 2009

Zur Erlangung des Grades

"Master of Science (Geographical Information Science & Systems) - MSc (GIS)"

Gutachter:

Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Reykjavík, 01.08.2011

Danksagung

In erster Linie möchte ich dem UNIGIS-Team, insbesondere Julia Moser und Prof. Josef Strobl, für die herausragende Koordinations- und Beratungsarbeit während des gesamten UNIGIS-Studiums danken. Mein besonderer Dank gilt Benjamin Hagedorn vom Fachbereich Computergrafische Systeme am Hasso-Plattner-Institut in Potsdam (HPI) für die unermüdliche Unterstützung und fachlich höchst kompetente Beratung während der gesamten Bearbeitungszeit der Masterarbeit. Prof. Dr. Jürgen Döllner (HPI) danke ich für die wertvollen fachlichen Hinweise und die Bereitstellung wichtiger Ressourcen, ohne die eine praktische Durchführung der Arbeit nur in begrenztem Maße möglich gewesen wäre. Dem gesamten Team des Fachbereichs Computergrafische Systeme am HPI möchte ich für das Interesse an dieser Arbeit und die nützlichen Anregungen und praktischen Tipps danken.

Ein weiterer Dank geht an Dr. Lutz Ross für die fachliche Beratung und Bereitstellung von Daten. Für die fachkundige und zügige Bearbeitung von Anfragen im Zuge der Datenakquise danke ich Herrn Hallfarth und Herrn Schütze von der Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg sowie insbesondere Frau Mikoleietz vom Brandenburgischen Landesamt für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseum in Wünsdorf.

Ein herzlicher Dank geht an Frau Ingrid Bathe für die äusserst wertvolle Beihilfe und Beratung bei der Aufarbeitung historischer Objektinformationen im Untersuchungsgebiet.

Mein grösster Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, ohne deren moralische Unterstützung, Motivation und Verständnis die Durchführung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Zum Schluss möchte ich allen danken, die mich aufgrund ihres großen Interesses am Thema dieser Arbeit motiviert haben, eine langjährige Idee zu konkretisieren und mit der vorliegenden Arbeit praktisch umzusetzen.

Erklärung der eigenständigen Abfassung der Arbeit

Ich versichere, diese Masterarbeit ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat.

Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.

Reykjavík, den 01.08.2011

A handwritten signature in black ink that reads "Claudia Schenk". The script is cursive and fluid.

Claudia Schenk

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Erzeugung eines historischen 3D-Stadtmodells auf Grundlage von Archivmaterial zu Explorations- und Analysezwecken. Als Untersuchungsgebiet dient dabei die im Zweiten Weltkrieg zerstörte historische Stadtmitte Potsdams, die ehemalige Residenz der Preußischen Könige. Unter Einsatz von Methoden und Werkzeugen der Geoinformatik wird in dieser Arbeit eine Möglichkeit vorgestellt, historische stadtraumbezogene Informationen aufzubereiten und in ein 3D-Stadtmodell zu integrieren und zu visualisieren. Das vorgestellte Lösungskonzept beinhaltet neben der Rekonstruktion historischer Objekte auch die Erfassung, Verwaltung und Speicherung thematischer und temporaler Objektinformationen. Auf Grundlage der zur Verfügung stehenden historischen Basisdaten werden Gebäudemodelle in verschiedenen Detaillierungsgraden sowie thematische Fachlayer wie historische Nutzungsflächen und Vegetationsbedeckung erzeugt. Für eine realitätsgetreue Visualisierung der historischen Stadtmitte werden exemplarisch ausgewählte Gebäudemodelle unter Verwendung von historischen Fassadenfotografien texturiert. Nach Zusammenführung der einzelnen Modellkomponenten mit den Gebäudemodellen werden die resultierenden Ergebnisse als 3D-Gesamtmodell visualisiert und dessen Einsatz für Analysezwecke getestet. Um einem großen Nutzerkreis die Exploration des Modells zu ermöglichen, erfolgt die Bereitstellung der Gebäudemodelle über den virtuellen Globus Google Earth. Für einen Austausch der Daten mit Drittanwendern wird desweiteren ein Lösungsansatz untersucht, um die erzeugten Modelldaten unter Beibehalt ihrer objektbezogenen Eigenschaften in das CityGML-Austauschformat zu überführen. Abschließend werden die eingesetzten Verarbeitungsmethoden bezüglich Effizienz und Einsatzfähigkeit für ähnliche Fragestellungen evaluiert sowie ein Ausblick auf mögliche Einsatzbereiche und zukünftige Entwicklungen gegeben.

Abstract

The objective of this Master Thesis is the digital reconstruction of historic urban phenomena for exploration and analysis purposes. Taking the historic city center of Potsdam – the residence of the former Prussian Kings – as an example, this thesis employs geographic information science and systems as well as 3D data modeling tools to create a historical 3D City Model based on archival data. This approach introduces a method to capture, store, manage and visualize historical information. To provide the resulting city model for different spatial and thematic application tasks, thematic and temporal information is stored along with geometric data. The completed city model incorporates building models showing different levels of detail, as well as specific thematic layers, such as historic land use and

vegetation layers. To maximize the realistic image of the historic urban space, selected building façades are visualized using photorealistic rendering methods. The model data is tested by thematic, spatial and temporal analyses and imported into Google Earth to facilitate visual exploration. Subsequently, an approach is developed to convert model data into the CityGML exchange format. Finally, the work flow and the results of this work are summarized and evaluated in terms of efficiency and generic utilization.

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	i
TABELLENVERZEICHNIS	iv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
1.3 Das Untersuchungsgebiet	2
1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit	4
1.5 Literatureinsatz und Informationsbezug	5
2 Historische 3D-Stadtmodelle	7
2.1 Grundlagen zu historischen Stadtmodellen	7
2.1.1 Definition und Aufbau	7
2.1.2 Funktion und Anwendung	8
2.1.3 Charakteristiken historischer Daten	10
2.1.4 Methoden der Datenerfassung, -aufbereitung und –bereitstellung	11
2.1.5 Aktuelle Beispiele	13
2.2 3D-Stadtmodelle und die vierte Dimension	14
2.2.1 Temporale Daten	15
2.2.2 Die Zeitformen „Gültigkeitsdauer“ und „Transaktionszeit“	16
2.2.3 Temporale Datenmodelle	17
2.2.4 Möglichkeiten der Speicherung temporaler Dimensionen	19
2.2.5 Ansatz zur Speicherung temporaler Objekteigenschaften in historischen Stadtmodellen	20
2.3 Historische Stadtmodelle und CityGML	22
2.3.1 CityGML – Austauschformat und Datenstandard für 3D-Stadtmodelle	23
2.3.2 Standardkonforme Modellierung historischer Stadtmodelle	25
2.3.3 Einhaltung von Modellierungsvorschriften	26
2.3.4 Integration historischer Informationen in CityGML	26
3 Konzeption eines Historischen 3D-Stadtmodells für Potsdam	29
3.1 Besonderheiten des Untersuchungsgebiets	29
3.1.1 Kulturhistorische Bedeutung und geschichtliche Entwicklung	30
3.1.2 „Integriertes Leitbautenkonzept“ - Wiederbelebung der Potsdamer Mitte ...	32
3.2 Definition der Anforderungen	33

3.2.1	Anforderungskatalog	34
3.2.2	Verwaltung temporaler Daten	37
3.2.3	Dokumentation von Metadaten	39
3.2.4	Umgang mit Datenlücken und Unsicherheiten	40
4	Vorbereitende Arbeitsschritte	41
4.1	Datenakquise und Analyse der Basisdaten	41
4.1.1	Notwendige Basisinformationen	41
4.1.2	Beschaffung der Basisdaten	43
4.1.3	Eigenschaften des Datenmaterials	44
4.2	Methoden und Werkzeuge	48
4.2.1	Festlegung der Verarbeitungsmethoden	48
4.2.2	Erstellen eines Attributschemas	49
4.2.3	Arbeitsablauf	50
4.2.4	Verwendete Softwarekomponenten	52
4.3	Georeferenzierung der Basisdaten	54
4.3.1	Festlegung des Bezugssystems	54
4.3.2	Koregistrierung	56
4.3.3	Erreichte Genauigkeiten	58
5	Erzeugung des 3D-Stadtmodells	62
5.1	Erstellung eines historischen LOD1-Blockmodells	62
5.1.1	Erfassung der Gebäudeumrisse	62
5.1.2	Zuweisung der Traufhöhen	65
5.2	Zuweisung von gebäudespezifischen Attributen	67
5.2.1	Quellen und Verlässlichkeit der Informationen	67
5.2.2	Temporaler Bezug objektbezogener Eigenschaften	69
5.2.3	Attributive Dokumentation von Datenlücken	70
5.3	Detailrekonstruktion der Gebäudemodelle	70
5.3.1	Test zur automatisierten Dachformgestaltung	71
5.3.2	Formataustausch zwischen ArcGIS 10 und Google Sketchup 8	72
5.3.3	Modifizierung der LOD1-Gebäudemodelle in Google Sketchup 8 und Re-Import nach ArcScene	75
5.3.4	Schematischer Arbeitsprozessablauf und Bearbeitungshinweise	76
5.4	Erfassung von Umweltinformationen	78
5.4.1	Klassifizierung der Umweltflächen und standardisierte Attributierung	78
5.4.2	Flächennutzung	79

5.4.3	Transport	80
5.4.4	Vegetation	81
5.4.5	Gewässer	82
5.4.6	Erreichte geometrische und semantische Genauigkeiten	83
5.5	Erzeugung eines historischen Geländemodells	83
5.5.1	Ausgangsbasis und Notwendigkeit einer Modifizierung	84
5.5.2	Angewandte Methoden zur Anpassung an die historischen Gegebenheiten	85
6	Visualisierung, Analyse und Bereitstellung	87
6.1	Visualisierung des Modells	87
6.1.1	Gebäudetexturierung mittels historischer Fassadenbilder	88
6.1.2	Integration von LOD3-Gebäudemodellen	90
6.1.3	Integration von Stadtmöbeln und Detailobjekten	92
6.1.4	Zusammenführung der Modellkomponenten	94
6.2	Analyse des historischen 3D-Stadtmodells	96
6.2.1	Analytische Fragestellungen zur historischen Stadtsituation	96
6.2.2	Überprüfung der Analysefähigkeit anhand ausgewählter Beispiele	97
6.3	Austauschformate und Bereitstellung des Modells	100
6.3.1	Nutzung des Modells in Google Earth	101
6.3.2	Überführung der Gebäudemodelle nach CityGML	104
7	Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick	107
7.1	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	107
7.2	Ausblick	110
	Literatur- und Quellenverzeichnis	112

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1 Ausdehnung des Untersuchungsgebiets	3
Abb. 1.2 Struktureller Aufbau der Masterarbeit	4
Abb. 2.1 Eigenschaften historischer Basisdaten und deren Einflussfaktoren	10
Abb. 2.2 Digitale Erfassung eines physischen Modells der Stadt Solothurn	12
Abb. 2.3 Historische 3D-Stadtmodelle	13
Abb. 2.4 Merkmalsausprägungen eines Geobjekts im Laufe seiner Lebensdauer	15
Abb. 2.5 Beispiel für die Speicherung historischer Eigenschaften	16
Abb. 2.6 Mögliche Zeitpunkte innerhalb eines Verarbeitungsprozesses	17
Abb. 2.7 Kategorisierung temporaler Datenmodelle	18
Abb. 2.8 Speicherung von <i>Gültigkeitsdauer</i> und <i>Transaktionszeit</i>	19
Abb. 2.9 Verknüpfung temporaler Eigenschaften mit einem Objekt	21
Abb. 2.10 Klassenhierarchie in CityGML	24
Abb. 2.11 Die verschiedenen Detaillierungsgrade gemäß CityGML	25
Abb. 3.1 Der Alte Markt 1911 und 2009	31
Abb. 3.2 Wiedererrichtung des Fortunaportals	32
Abb. 3.3 Luftbildaufnahme des Alten Marktes	33
Abb. 3.4 Konzeptionelles Schema zur Speicherung temporaler Objekteigenschaften	38
Abb. 4.1 Schematische Darstellung des Arbeitsprozessablaufs	51
Abb. 4.2 Neuordnungskonzept der Potsdamer Mitte	55
Abb. 4.3 Verteilung Kontrollpunkte zur Referenzierung des historischen Luftbilds	59
Abb. 4.4 Historisches Luftbild nach der Transformation	60
Abb. 4.5 Ergebnis der Georeferenzierung der historischen Karten	60
Abb. 5.1 Aktueller Gebäudebestand des digitalen Liegenschaftskatasters	63
Abb. 5.2 Vorlagen zur Rekonstruktion der Gebäudegrundrisse	63
Abb. 5.3 Quelldaten zur Rekonstruktion des historischen Gebäudebestands	64
Abb. 5.4 Digitale Rekonstruktion des historischen Baubestands	65
Abb. 5.5 Vergleich der Traufhöhen aus der ALK und hist. Aufrisszeichnungen	65
Abb. 5.6 Ermittlung der Traufhöhen in historischen Aufnahmen	66
Abb. 5.7 Angabe des Höhenattributes in ArcScene zur Extrusion der Gebäudeumrisse ...	66

Abb. 5.8 In Arcscene automatisch erzeugtes Blockmodell	67
Abb. 5.9 Gewinnung thematischer Informationen anhand von Bildinterpretation.....	69
Abb. 5.10 Widersprüchliche Aussagen in den Quelldaten	69
Abb. 5.11 Zuweisung des Dachtyps durch Attributkodierung im LandXPlorer	72
Abb. 5.12 Ergebnis der automatischen Generierung von Dachformen	72
Abb. 5.13 Ein Gebäudemodell im ESRI-Multipatch-Format	74
Abb. 5.14 Auszug aus der Liste der in ArcGIS erzeugten COLLADA-Dateien	74
Abb. 5.15 Koordinatenachsenausrichtung in Google Sketchup	75
Abb. 5.16 Ausmodellerte Gebäudedetails eines LOD2-Gebäudemodells.....	76
Abb. 5.17 Einfügen des LOD2-Modell in ArcGIS	76
Abb. 5.18 Workflow-Diagramm LOD1 zu LOD2 oder höher	77
Abb. 5.19 Durch Luftbildinterpretation identifizierbare Nutzungsflächen.....	79
Abb. 5.20 Nutzungsflächen klassifiziert nach Objektartengruppen.....	79
Abb. 5.21 Funktionsflächen klassifiziert nach Objektarten	79
Abb. 5.22 Funktionsflächen klassifiziert nach ziviler Nutzung.....	80
Abb. 5.23 Klassifizierung von Transportflächen.....	81
Abb. 5.24 Identifizierung von Vegetationsobjekten	82
Abb. 5.25 Rekonstruktion des historischen Gewässernetzes	83
Abb. 5.26 Differenzen zwischen Höhenmodell und historischem Gewässernetz	84
Abb. 5.27 Ausschnitt aus dem GSV Stadtplan	85
Abb. 5.28 Modifizierung des Höhenmodells	86
Abb. 5.29 Angepasstes Höhenmodell an die historischen Gegebenheiten	86
Abb. 6.1 Gebäudeensemble am Alten Markt.....	88
Abb. 6.2 Fassadenmessbild eines historischen Gebäudes	88
Abb. 6.3 Importieren eines Fassadenbildes als Textur in Google Sketchup	89
Abb. 6.4 Transformationswerkzeuge zur Texturierung von Modelloberflächen.....	89
Abb. 6.5 Verwaltung der Fassadentextur in der Texturbibliothek von Google Sketchup ...	90
Abb. 6.6 Synthetische Dachtextur eines historischen Gebäudes	90
Abb. 6.7 Existierende 3D-Modelle historischer Bestandsbauten um den Alten Markt	91
Abb. 6.8 Das Stadtschloss zu Potsdam als 3D-Sketchup-Modell	92

Abb. 6.9 Integration der LOD3-Modelle in das Historische Stadtmodell	92
Abb. 6.10 Architektonische Detailobjekte im Untersuchungsgebiet	93
Abb. 6.11 3D-Modelle von Detailobjekten für die Integration in das 3D-Stadtmodell	93
Abb. 6.12 Integration von Stadtmöbeln und Detailobjekten in das 3D-Stadtmodell	94
Abb. 6.13 3D-Symbolbibliothek in ArcScene	94
Abb. 6.14 Synthetische Texturen für Transportflächen	95
Abb. 6.15 Visualisierung des 3D-Stadtmodells in ArcScene	95
Abb. 6.16 Visualisierung des Analyseergebnisses zu Fragestellung a)	98
Abb. 6.17 Visualisierung des Analyseergebnisses aus Fragestellung b)	98
Abb. 6.18 Vergleich historischer und aktueller Bebauung (gelb)	99
Abb. 6.19 Klassifizierung von historischen Funktionsflächen	99
Abb. 6.20 Ergebnis der Berechnung von Funktionsflächenanteilen	99
Abb. 6.21 Temporale Analyse mittels Zeitregler in ArcScene	100
Abb. 6.22 Visualisierung des LOD1-Blockmodells in Google Earth	101
Abb. 6.23 Georeferenzierung der COLLADA-Gebäudemodelle in Google Sketchup	102
Abb. 6.24 Ansichten der LOD2-Gebäudemodelle in Google Earth	103
Abb. 6.25 CityGML-Exportfunktion des LandXplorers	104
Abb. 6.26 Auszug aus der CityGML-Datei des LOD1-Modells	105
Abb. 6.27 Hinzufügen von objektspezifischen in Google Sketchup	106

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1a und 2.1b Übersicht über digitale historische Stadtmodelle	13
Tab. 2.2 Mögliche Klassifizierung sowie Kodierung generischer Attribute	28
Tab. 3.1 Anforderungskatalog an das historische Stadtmodell	36
Tab. 4.1 Bestimmung notwendiger Basisinformationen zur Erfassung der Modellkomponenten	42
Tab. 4.2 Maximal zulässiger Maßstab historischer Karten für die Einhaltung von geometrischen Genauigkeiten bei der Objekterfassung	43
Tab. 4.3 Eigenschaften der Basisdaten	45
Tab. 4.4 Eigenschaften der Referenz- und Kontrolldaten	47
Tab. 4.5 Methoden der Basisdatenerfassung und –verwaltung	48
Tab. 4.6 Gebäudespezifisches Attributschema für das Untersuchungsgebiet	50
Tab. 4.7 Softwareeinsatz während des Arbeitsprozesses	54
Tab. 4.8 Projektionsparameter ETRS89	55
Tab. 4.9 Gesamtlagefehler aller Basismaterialien nach der Georeferenzierung	60
Tab. 5.1 Verlässlichkeitsgrad gebäudespezifischer Attribute	68
Tab. 5.2 Quelldaten und Verlässlichkeitsgrad der historischen Informationen	68
Tab. 5.3 Unterschiede zwischen den Detaillierungsgraden LOD1 und LOD2	71
Tab. 5.4 Unterschiedliche Dachtypenkodierung in CityGML und LandXPlorer	71
Tab. 5.5 Bearbeitungshinweise beim Modifizieren von Gebäudegeometrien in Google Sketchup	78
Tab. 5.6 Genauigkeitsdefinitionen der thematischen Umweltlayer	83
Tab. 6.1 Objekt- und raumspezifische Fragestellungen an das 3D-Modell	97

1 EINLEITUNG

„Es ist schwierig, sich heute in diesen teilweise gesichtslosen und überformten Stadträumen das historisch gewachsene und durchkomponierte damalige Stadtgefüge räumlich vorzustellen.“ [Wacker et al., 2002, S. 13]

1.1 Motivation

Bisher werden 3D-Stadtmodelle hauptsächlich für die Analyse momentaner Zustände oder zukunftsorientierter Entwicklungen eingesetzt, wobei die aktuelle Situation als Basis herangezogen wird. Historische Entwicklungen, die das aktuelle Stadtbild unter Umständen nachhaltig geprägt haben, können mit diesen 3D-Stadtmodellen oftmals nicht nachvollzogen werden. Historische Daten werden in Archiven zu großer Zahl sorgsam archiviert und verwaltet, jedoch selten einem großen Personenkreis zugänglich gemacht. Der Informationsgehalt dieser Daten ist für Fachdisziplinen wie Geo- und Geschichtswissenschaften, Baugeschichte, Stadt- und Raumentwicklung sowie Archäologie von unschätzbarem Wert. Motiviert ist die vorliegende Arbeit durch die Fragestellung, ob und in welcher Weise Methoden und Werkzeuge der Geoinformatik eingesetzt werden können, um historische stadtraumbezogene Daten aufzubereiten und in ein 3D-Stadtmodell zu integrieren, zu verwalten und zu visualisieren.

Diese Arbeit soll dazu beitragen, das Potential historischer Daten für den Einsatz in unterschiedlichen fachspezifischen Anwendungen und in Bezug auf raum-zeitliche Fragestellungen und Untersuchungen in urbanen Räumen zu erkennen und einen Weg aufzeigen, wie diese Daten für einen breiten öffentlichen Nutzen bereitgestellt werden können.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Aufgabe der vorliegenden Arbeit sind die Konzeption und die Umsetzung eines historischen 3D-Stadtmodells auf Grundlage und am Beispiel von Archivdaten der Stadt Potsdam. Anhand dieses 3D-Stadtmodells soll aufgezeigt werden, wie der vielfältige Informationsreichtum historischer Archivmaterialien genutzt werden kann, um ein historisches Stadtgefüge zu rekonstruieren, historisch relevante Informationen zu integrieren und anhand dieses Modells stadträumliche Entwicklungen sowohl visuell als auch analytisch nachzuvollziehen.

Im Einzelnen stellen sich dabei folgende Teilaufgaben:

- Erzeugung historischer Gebäudemodelle verschiedener Genauigkeit (LOD1 und LOD2) sowie fotorealistische Fassadentexturierung ausgewählter Gebäude,
- Modellierung von historischer Umwelt, Stadtmöbeln und baulichen Detailobjekten,
- Zusammenführung und Visualisierung der Modellkomponenten zu Explorationszwecken mit Hilfe einer geeigneten 3D-Visualisierungssoftware,
- Überführung des Modells in einen Webviewer (Google Earth),
- Bereitstellung des Modells im CityGML-Format.

Im Besonderen soll die Arbeit folgende Fragen zu beantworten helfen:

- Welcher Mehrwert kann einem 3D-Stadtmodell durch die Integration historischer Informationen zugeführt werden? Wie und wem kann dieser Mehrwert Nutzen bringen?
- Welche Verarbeitungsschritte und Methoden in Bezug auf Datenverarbeitung und –verwaltung sind notwendig, um zu einem der Aufgabenstellung entsprechenden Ergebnis zu kommen?
- Welche Genauigkeiten können durch diese Methoden erreicht werden?
- Wie weit eignen sich die untersuchten Methoden für einen Einsatz für ähnliche Projekte und Fragestellungen und wie effizient sind sie?

1.3 Das Untersuchungsgebiet

Potsdam steht aufgrund seiner Geschichte als ehemalige Residenzstadt Preußens und heutige Landeshauptstadt Brandenburgs im Blickpunkt des öffentlichen Interesses. Aufgrund seiner in Europa einzigartigen Schloss- und Parkanlagenkomposition gehört die Potsdamer Kulturlandschaft seit 1990 zum UNESCO-Weltkulturerbe. Weltbekannte Baumeister sowie Garten- und Landschaftsarchitekten haben mit Bauwerken und Grünanlagen das Potsdamer Stadtbild sowie die landschaftliche Umgebung nachhaltig geprägt. Die geschichtlichen Ereignisse des 20. Jahrhunderts haben die Stadt jedoch stark verändert: In den letzten Tagen des 2. Weltkriegs wurde das Stadtzentrum während eines Bombenangriffs stark beschädigt, in den Nachkriegsjahren und während der DDR-Regierungszeit fanden tiefgreifende funktionale, baustrukturelle und stadtplanerische Veränderungen statt, so dass von dem ehemals repräsentativen Stadtbild nur noch wenige Teile erhalten sind. In den letzten Jahren ist aufgrund des Wunsches der Bevölkerung zur Wiederbelebung der Potsdamer Mitte ein Bebauungskonzept entstanden, welches die teilweise Rekonstruktion historischer Gebäude vorsieht. Dabei steht auch die zentrale Frage im Mittelpunkt, in welcher Form diese Gebäude genutzt werden können, um den aktuellen

Funktionalitäten der Stadt und Bedürfnissen der Bevölkerung gerecht zu werden. Ein erster Meilenstein bei der Realisierung des Konzepts ist die Errichtung eines neuen Landtagsgebäudes auf den Mauern des ehemaligen Stadtschlusses, die mit der Grundsteinlegung am 17.02.2011 eingeleitet wurde. Dabei liefert die historische Schlossfassade das Vorbild zur architektonischen Ausgestaltung des Neubaus.

In diesem Zusammenhang ist Potsdam ein geeignetes Testgebiet für die beschriebene Aufgabe, nicht zuletzt wegen des starken Interesses der Bevölkerung, das historische Aussehen ihrer Stadt wiederzuentdecken. Zudem wurde Potsdam im Laufe der Zeit aufgrund ihres Status als „Stadt der Könige“ in unterschiedlichster Form dokumentiert. Diese zum Teil hochpräzisen und somit historisch äusserst bedeutsamen und wertvollen Dokumente werden in verschiedenen Institutionen sorgsam archiviert und verwaltet und bieten aufgrund ihres hohen Informationsgehalts und ihrer Heterogenität eine hervorragende Grundlage für den Zweck dieser Arbeit.

Als endgültiges Untersuchungsgebiet wurde das Areal um den Alten Markt, welcher nördlich an das Hauptportal des ehemaligen Stadtschlusses angrenzt und dessen architektonische Gestaltung durch eindrucksvolle historische Repräsentativbauten gekennzeichnet war, sowie das Gebiet beidseitig entlang der Breiten Strasse als ehemalige Hauptachse, die bis zum historischen Neustädter Tor reichte, definiert. Der Verlauf des ehemaligen Stadtkanals bildet dabei die nördliche Grenze (Abb. 1.1).



Abb. 1.1 Ausdehnung des Untersuchungsgebiets.

Innerhalb dieses Gebietes fanden in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts erhebliche städtebauliche Veränderungen statt. Die zukünftige Gestaltung der Potsdamer Mitte konzentriert sich nun auf das Gebiet um den Alten Markt und die angrenzende Bebauung.

1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit

Die Arbeit unterteilt sich nach der Einleitung in Kapitel 1 in sechs aufeinander aufbauende Kapitel (Abb. 1.2).

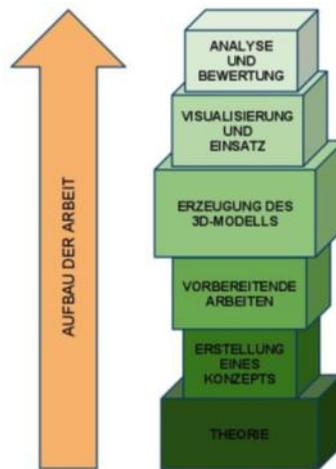


Abb. 1.2 Struktureller Aufbau der Masterarbeit.

Kapitel 2 stellt notwendige theoretische Betrachtungen zum Aufbau und zur Verwaltung historischer Stadtmodelle sowie zur Speicherung des Phänomens „Zeit“ durch die Verwaltung temporaler Daten an. Die Erkenntnisse aus diesen Betrachtungen bilden die Grundlage für die Konzeption eines historischen Stadtmodells für Potsdam in Kapitel 3. Kapitel 4 beschreibt die vorbereitenden Arbeiten zur Erzeugung des historischen 3D-Stadtmodells. Diese beinhalten die Akquise und die Analyse des historischen Basismaterials sowie – darauf aufbauend – die Festlegung der Verarbeitungsschritte sowie der Datenverwaltungs- und Datenhaltungsmethoden. Auch die Überführung der Basismaterialien in eine digitale Form gehört zu den vorbereitenden Arbeitsschritten. Kapitel 5 geht ausführlich auf die Erzeugung der einzelnen historischen Stadtmodellkomponenten auf Grundlage der historischen Vorlagen und unter Einsatz der zuvor festgelegten Methoden ein. In Kapitel 6 werden diese einzelnen Komponenten zu einem Gesamtmodell zusammengeführt und entsprechend der Aufgabenstellung visualisiert. Anhand von attributiven Abfragen wird der Einsatz des Modells als Informationswerkzeug überprüft und die Daten durch Einsatz von Austauschformaten in Google Earth der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Für einen interoperablen Austausch soll überprüft werden, inwiefern eine automatisierte Überführung des Modells nach CityGML möglich ist und welche Voraussetzungen dafür geschaffen

werden müssen. In Kapitel 7 wird eine Evaluation der Ergebnisse vorgenommen und Aussagen über die Effizienz der in der Arbeit angewendeten Methoden getroffen. Abschliessend werden Schlussfolgerungen aus der Arbeit gezogen sowie ein Ausblick für mögliche weitere Entwicklungen im Bezug auf Integration und Anwendung historischer Informationen in 3D-Stadtmodelle gegeben.

1.5 Literatureinsatz und Informationsbezug

Theoretische Betrachtungen zu historischen Stadtmodellen sind in der Literatur selten zu finden. Dies liegt einerseits daran, dass es sich hierbei um eine Sonderform von 3D-Stadtmodellen handelt, andererseits an der Tatsache, dass sich aufgrund der heterogenen Datengrundlagen keine Allgemeingültigkeiten zu Aufbau und Inhalt für Historische Stadtmodelle formulieren lassen. Verfügbare Literatur zum Thema behandelt fast ausschließlich die Analyse verfügbarer Basisdaten für ein spezielles Untersuchungsgebiet bzw. die praktische Implementierung eines historischen 3D-Modells auf Grundlage dieser Daten.

Aus diesen Gründen wurden für theoretische Betrachtungen zum Thema grundlegende Erkenntnisse und Definitionen zu 3D-Stadtmodellen herangezogen; insbesondere die Arbeit von ALBERT et al. (2004) liefert hier die theoretische Basis. Die Erweiterung von 3D-Stadtmodellen um die historische Komponente führt zu einer intensiven Auseinandersetzung mit der Verwaltung von temporalen Daten. RENOLEN (1999) und STEINER (1998) wurden in diesem Zusammenhang eingehend studiert. Einen wichtigen theoretischen Ansatz zur Speicherung und Verwaltung zeiträumlicher Datenmodelle untersuchen ZIPF (2001) und KRÜGER (2001) in ihrer Literatur. Für theoretische Überlegungen zur Integration und Speicherung historischer Informationen in CityGML wurde Bezug auf den Fachbeitrag von KOLBE (2009) sowie den CityGML Encoding Standard (GRÖGER et al., 2008) genommen.

Bei der Konzeption eines historischen Stadtmodells für Potsdam war es nötig, Projekte mit ähnlichen Aufgabenstellungen zu studieren und sich mit den unterschiedlichen Vorgehensweisen vertraut zu machen. Dabei lieferten die Fachbeiträge von RIEKE-ZAPP et al. (2009), NEBIKER et al. (2009) und HENZE et al. (2009) wichtige Erkenntnisse, nicht zuletzt zu Schwierigkeiten und Herausforderungen im Bezug auf die Verarbeitung und Nutzung historischer Basisdaten zur Erstellung eines historischen 3D-Stadtmodells.

Da es sich bei der vorliegenden Masterarbeit um eine interdisziplinäre Arbeit handelt, wurde ein breit gefächertes Spektrum an Randthemenliteratur sowohl für theoretische als auch für praxisorientierte Recherche herangezogen. Zu nennen wären in diesem Zusammenhang die

Arbeiten von HAAKE & GRÜNREICH (1994), welche sich intensiv mit Konzepten zur Visualisierung von Geodaten auseinandersetzen, sowie von KRAUS (2004) zum Thema Photogrammetrie.

Für die praktische Durchführung wurden desweiteren softwarespezifische Hilfsdokumente und verschiedene Anwenderforen genutzt.

2 HISTORISCHE 3D-STADTMODELLE

Vor der praktischen Durchführung ist es notwendig, sich mit grundlegenden Erkenntnissen zum Thema 3D-Stadtmodelle sowie der Verwaltung und Repräsentation historischer Informationen in Stadtmodellen auseinanderzusetzen. Nach einem Überblick über den allgemeinen Aufbau von 3D-Stadtmodellen wird in einem Unterkapitel auf die spezifischen Eigenschaften von historischen Basisdaten und deren Einfluss auf die Güte eines resultierenden historischen 3D-Stadtmodells eingegangen. Die zeitliche Dimension spielt bei der Integration historischer Informationen in ein 3D-Stadtmodell eine signifikante Rolle, so dass diesem Thema ein gesondertes Unterkapitel gewidmet ist. Aufbauend auf theoretischen Betrachtungen zu Eigenschaften und Verhalten temporaler Daten werden Möglichkeiten beschrieben, wie temporale Daten in Stadtmodellen gespeichert und verwaltet werden können. In einem weiteren Unterkapitel wird auf die Grundlagen des für 3D-Stadtmodelle häufig verwendete Standardaustauschformat CityGML eingegangen. Abschliessend wird eine Lösung zur Integration historischer Informationen in das CityGML-Anwendungsschema aufgezeigt, mit deren Hilfe ein Informationsverlust wertvoller temporaler Fachinformationen gewährleistet werden kann.

2.1 Grundlagen zu historischen Stadtmodellen

In diesem Abschnitt werden Aufbau und Einsatz historischer Stadtmodelle erläutert. Desweiteren werden Eigenschaften und Besonderheiten von Basismaterialien historischer Herkunft herausgestellt, da diese die Datengrundlage für historische Modelle bilden. Aus den unterschiedlichen Charakteristiken der verwendeten Basisdaten ergeben sich die jeweiligen Methoden der Datenverarbeitung und des Aufbaus eines historischen Stadtmodells. Es werden unterschiedliche Erfassungsmethoden zusammengefasst und verschiedene praktische, aktuelle Beispiele aufgezeigt.

2.1.1 Definition und Aufbau

Im Folgenden wird der Unterschied zwischen herkömmlichen und historischen 3D-Stadtmodellen erläutert. Die allgemeine Definition für 3D-Stadtmodelle lautet gemäss des Fraunhofer-Verbundes (IuK) (www11):

„3D-Stadtmodelle beschreiben die Form der Erdoberfläche einschließlich aller Aufbauten in digitaler Form und ermöglichen die virtuelle Darstellung existierender oder geplanter Gebäude und Gebäudekomplexe.“

Diese Definition beschreibt den grundlegenden Aufbau eines 3D-Stadtmodells: Es handelt sich um die digitale Rekonstruktion eines realen Stadtgefüges mit all seinen Komponenten

zum aktuellen Zeitpunkt, wobei die Integration eventueller zukünftiger Stadtgestaltung mit einbezogen wird. Ein 3D-Stadtmodell ist also ein „Standbild“ einer Stadtsituation zu einem definierten Zeitpunkt. Für historische 3D-Stadtmodelle liegt dieser Zeitpunkt in der Vergangenheit und beinhaltet auch heute nicht mehr existierende Objekte. Mit ihrer Hilfe wird eine historische Stadtsituation dokumentiert und „konserviert“. Basierend auf historischen Datengrundlagen wird rekonstruiert, was heute nicht mehr existiert und unwiderruflich verloren gegangen ist.

Unabhängig vom historischen Darstellungszeitpunkt orientiert sich der Aufbau eines historischen Stadtmodells grundsätzlich an den allgemeinen Komponenten von 3D-Stadtmodellen. Diese umfassen folgende Elemente (Albert et al., 2004 sowie eigene Zusammenstellung):

- Dreidimensionale Beschreibung der Geländeform (Geländemodell),
- Gebäude (einschliesslich Dauchaufbauten) und andere bauliche Objekte,
- Charakteristische und zweckgebundene städtische Gegenstände und Objekte (Stadtmöbel),
- Topografische Gegebenheiten (Vegetation, Gewässer, Verkehrsnetz),
- Texturierung des Geländes,
- Texturierung der baulichen Objekte,
- Jegliche weitere spezifischen Formen und Elemente zur Beschreibung der Stadtszenerie.

Während aktuelle 3D-Stadtmodelle mithilfe moderner Technologien zur Erfassung, Prozessierung und Zusammenführung aktueller Grunddaten ein detailliertes und zuverlässiges Abbild der Realität gewährleisten können, ist der Inhalt historischer Stadtmodelle von der Qualität der zur Verfügung stehenden historischen Materialien abhängig. Aufgrund einer oftmals in Herkunft und Alter sehr heterogenen Datengrundlage ist es schwierig, ein wahrheitsgetreues Abbild zu rekonstruieren. Historische Stadtmodelle sind deshalb nicht frei von Interpretationen, welche hauptsächlich bei Unsicherheiten oder Informationslücken nötig sind, um ein flächendeckendes Modell samt all seiner Komponenten zu erzeugen.

2.1.2 Funktion und Anwendung

Eine Stadt ist ein dynamisches Gefüge, welches sich über einen langen Zeitraum hinweg entwickelt hat (ALEXANDER, 1965). Historische Funktionalitäten und Ereignisse – seien sie politischer, gesellschaftlicher oder wirtschaftlicher Art – prägen das heutige Stadtbild. Jede Stadt ist daher ein einzigartiges, funktionell komplexes Gefüge mit speziellen

Charakteristiken, welches durch seine individuelle Geschichte geformt wurde. Viele historische Stadtkerne wurden im Laufe der Zeit durch menschliche Eingriffe oder natürliche Katastrophen unwiderruflich zerstört. In der Geoinformatik und zahlreichen anderen akademischen Disziplinen ist deshalb die Auswertung historischer Daten ein wesentlicher Teil der angewandten Forschung, um die Entwicklung einer Stadt nachzuvollziehen (RIEKE-ZAPP, 2009).

Anhand von Archivdaten und unter Beihilfe von Experten werden nicht mehr existierende historische Stadtszenarien digital rekonstruiert und in virtuelle 3D-Modelle überführt. Durch die Bereitstellung mittels Webviewer im Internet werden diese Modelle der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Neben der rein visuellen Darstellung ermöglicht die Erzeugung von realitätstreuen virtuellen 3D-Modellen auch eine langfristige digitale Konservierung von historischen Bauten und Stätten. Diese Modelle können so als Basis für archäologische oder bauhistorische Untersuchungen, als moderne Planungsgrundlage für Sanierungen oder zur Präsentation in der Öffentlichkeit, bspw. in Museen, dienen [www7]. Auch für die Analyse urbaner Transformationsprozesse und des funktionellen Wandels im Laufe der Zeit können historische 3D-Stadtmodelle eingesetzt werden [siehe dazu www8]. Ebenso lassen sie sich als pädagogisches Hilfsmittel zur Demonstration und Dokumentation historischer Lebensräume, diachronaler Entwicklungen und für virtuelle „Zeitreisen“ einsetzen, da sie durch ihre hohe visuelle Aussagekraft einen assoziativen Bezug zur Vergangenheit herstellen (vgl. TRAPP et al., 2010).

In den letzten Jahren hat sich ein zusätzliches Aufgabenfeld entwickelt. Eine besondere Stellung nehmen im Kontext von Stadtentwicklungsplanungen solche Stadträume ein, die im Laufe des Zweiten Weltkrieges stark beschädigt oder sogar vollständig zerstört wurden. Der natürliche Entwicklungsprozess eines Stadtgefüges wurde dadurch massiv gestört, der Wiederaufbau beinhaltete oft ein völlig neues, der Zeit und den entstandenen Bedürfnissen angepasstes Konzept mit überwiegend funktionell geprägtem Charakter und Baustil. In der Bevölkerung ist jedoch ein großes Interesse vorhanden, das charakteristische, historisch gewachsene Stadtbild wiederzuentdecken. Auch in der Stadtplanung entsprechen neueste Entwicklungskonzepte dem Wunsch, das ehemalige repräsentative Antlitz einer Stadt durch Rekonstruktion historischer Fassaden nachzuahmen und dabei neue Funktionalitäten zu integrieren. Beispiele für die Umsetzung solcher Konzepte – entweder als Gesamtkomposition oder anhand einzelner Gebäude – sind in Potsdam [www1], Dresden [www9] und Berlin [www10] zu finden.

2.1.3 Charakteristiken historischer Basisdaten

Historische Basisdaten unterscheiden sich aufgrund ihrer Entstehung und Herkunft prägnant in ihren formalen und inhaltlichen Eigenschaften. Es kann sich dabei um historische Karten und Pläne, Panoramadarstellungen, Gemälde und Veduten, physische Holz- oder Kunststoffmodelle bis hin zu Fotografien, historischen Luftbildern oder terrestrische photogrammetrische Aufnahmen handeln. Auch textliche Beschreibungen, archäologische Ausgrabungen und historische Messdaten können Grundlage für die Rekonstruktion sein und Informationen zur semantischen und thematischen Beschreibung eines Objekts liefern.

Die Eigenschaften jeder Datengrundlage bestimmen auch die Zuverlässigkeit des Inhalts. Während bspw. anhand fotografischer und photogrammetrischer Aufnahmen neben der geometrischen auch eine bildhafte und interpretationsfreie Erfassung von Objekten möglich ist, ist die Verwendung von historischem Karten- und Bildmaterial nicht frei von Interpretation. Historische Karten und Pläne haben oftmals einen thematischen Bezug und bilden Objekte in generalisierter Form ab. Panoramen und Gemälde zeigen zugunsten romantischer Bildkompositionen nicht unbedingt ein genaues Abbild der Umgebung und müssen daher hinsichtlich ihres Wahrheitsgehalts hinterfragt werden (HENZE et al., 2009).

Das Ergebnis einer jeden Datenverarbeitung ist aus diesem Grund immer nur so gut wie es die Qualität der Datengrundlage erlaubt. Deshalb ist es notwendig, dass jeder historische Datenbestand vor Projektbeginn auf seine Verwendbarkeit entsprechend der Aufgabenstellung geprüft wird. Verschiedene Faktoren haben Einfluss auf die Qualität, die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit des Datenmaterials. Abb. 2.1 zeigt schematisch eine Auswahl wichtiger Eigenschaftskriterien, die einen signifikanten Einfluss auf die Qualität der Daten haben können. Diese Faktoren müssen in Betracht gezogen werden, wenn es um die Frage geht, ob und in welchem Grad die historischen Daten den gestellten Anforderungen an die Qualität des Endergebnisses entsprechen.

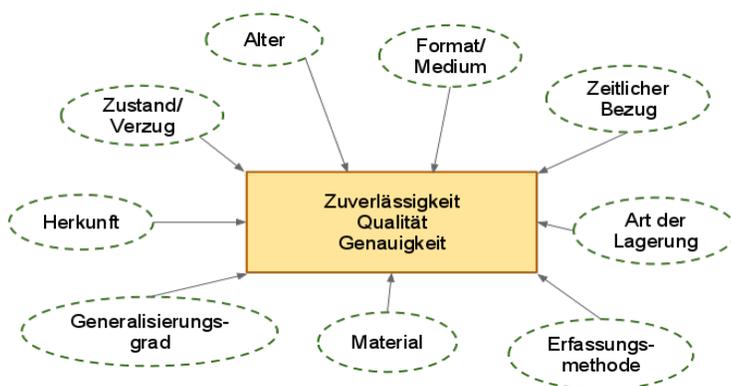


Abb. 2.1 Einflussfaktoren, welche die Eigenschaften historischer Basisdaten bestimmen.

Anhand dieser Faktoren lässt sich schon vor der Bearbeitung abschätzen, mit welcher geometrischen und inhaltlichen Präzision der Daten zu rechnen ist. Zusätzlich lässt sich durch eine Klassifizierung der Basisdaten erkennen, welche Methoden und Arbeitsschritte in den Prozess der Datenverarbeitung eingesetzt werden müssen, um einen effizienten Workflow zu entwickeln.

2.1.4 Methoden der Datenerfassung, -aufbereitung und -bereitstellung

Während die Erfassung von 3D-Geoobjekten mittlerweile größtenteils automatisiert erfolgt, stellt die Rekonstruktion nicht mehr existierender Objekte ein großes Problem dar. Bei der Erzeugung komplexer historischer 3D-Stadtszenarien und Kulturdenkmäler wird die Modellierung der Objekte oftmals in Zusammenarbeit interdisziplinärer Teams aus Geoinformatikern, Archäologen und Historikern durchgeführt. Der Prozess ist oft langwierig und einer steten Modifizierung und Verbesserung unterzogen und deshalb nur teilweise automatisierbar (NEBIKER et al., 2009).

Da die verschiedenen Modellkomponenten nur selten aus einer einzelnen historischen Quelle extrahiert werden können, ist die Kombination heterogener Basisdaten erforderlich, welche unterschiedliche Verarbeitungsmethoden verlangen. Dabei kann je nach Zustand und Informationsgehalt der Ausgangsdaten ein hohes Maß an Kombinationsgabe erforderlich sein, um aus vielen verschiedenen „möglichen Realitäten“ einen dem Bezugszeitpunkt entsprechenden, repräsentativen Zustand zu modellieren (TRAPP, 2010).

Mit Hilfe neuester Technik und Methoden sowie leistungsfähiger Software zur Daten- und Bildverarbeitung ist es heute möglich, historische Materialien in eine digitale Form zu übertragen und präzise auszuwerten, um sie für die Erfassung und Rekonstruktion von Geometrien und Sachinformation aufzubereiten. Unter Einsatz von Geoinformationssystemen und 3D-Modellierungssoftware werden die Daten verarbeitet, verwaltet und zusammengefügt.

Eine gängige Methode der Erfassung und Modellierung historischer Stadtansichten ist die Aufnahme von Informationen aus einem physischen Modell und deren Übertragung in ein digitales Modell. Dabei werden unter Einsatz terrestrischer Laserscanner die Modelle abgetastet und aus den resultierenden Punktwolken Gebäudehöhen und Objektgeometrien (Dachformen, Grundrisse) abgeleitet (vgl. JEDRZEJAS et al., 2008; NEBIKER et al., 2009) (Abb. 2.2). Nahbereichsphotogrammetrie erlaubt zusätzlich die Generierung eines Orthophotomosaiks zur Erfassung historischer Geländehöhen, Objektpositionen, Texturen und Topografie.

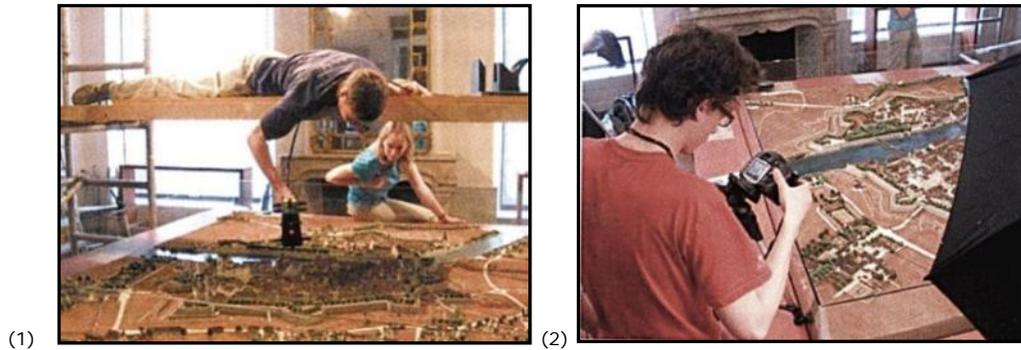


Abb. 2.2 Digitale Erfassung eines physischen Modells der Stadt Solothurn. (1) Terrestrisches Scanverfahren (T-Scan-System); (2) Nahbereichsphotogrammetrie. (Bildquelle: NEBIKER et al., 2009)

Auch aus historischen Luftaufnahmen können unter Nutzung photogrammetrischer Auswerteverfahren Gebäude und Texturen abgeleitet und verarbeitet werden, wenn die ursprünglichen Aufnahmeparameter wie innere und äussere Orientierung und/oder der Kameratyp bekannt sind. Oftmals stehen diese Informationen nicht zur Verfügung, auch handelt es sich dabei um Einzelaufnahmen oder Mehrbilder mit ungenügender Überlappung, so dass für eine Rekonstruktion der 3D-Objektgeometrien Zwischenschritte und zusätzliches Aufklärungsmaterial wie Schräg- und Panoramabilder oder historisches Kartenmaterial hinzugezogen werden müssen. Beispiele für auf diese Weise rekonstruierte Stadtmodelle sind in HENZE et al. (2009) für die Stadt Baalbek im Libanon und in STEIDLER & GOOS (2010) für die Stadt Rotterdam zu finden. Eine Georeferenzierung der erzeugten Modellkomponenten kann anschliessend aufgrund fehlender Lageinformationen oder veralteter Bezugssysteme (bspw. in historischen Karten) oftmals nur über Koregistrierung anhand aktueller Referenzdaten erfolgen.

Die digitale Rekonstruktion von 3D-Objekten kann in einer photogrammetrischen Auswertungssoftware (bspw. Leica Cyclone, ERDAS Imagine/LPS) oder in einem 3D-Modellierungsprogramm (bspw. Autodesk 3ds Max, Google Sketchup) vollzogen werden, welche eine hoch präzise Ausmodellierung von 3D-Geometrien unterstützen. 3D-Modellierungssoftware bietet zudem Werkzeuge zur Texturierung von 3D-Objekten an, dabei werden sowohl synthetische (Flächen)Symbole für eine prototypische Texturierung als auch gängige Bildformate (bspw. jpg, tiff, gif, png) für eine spezifische und realistische Texturierung unterstützt und verwaltet.

Um die entstandenen Modelle der Öffentlichkeit zugänglich zu machen und für Explorationszwecke zur Verfügung zu stellen, werden die Modelldaten anhand expliziter Austauschformate (bspw. VRML, KML, GML) in Webviewern eingebunden und stehen somit zur freien Navigation zur Verfügung. Abb. 2.3 zeigt einige aktuelle Beispiele von 3D-Stadtmodellen, die auf Grundlage der beschriebenen Verfahren erzeugt wurden.

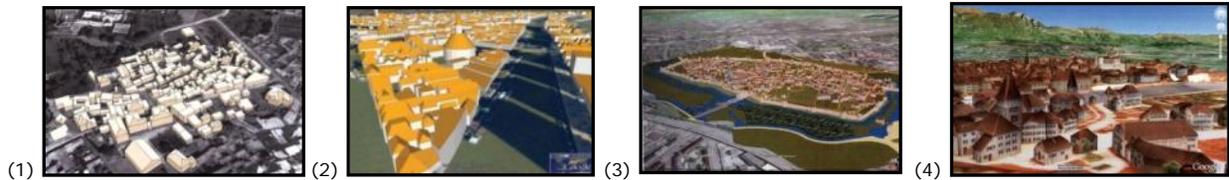


Abb. 2.3 Historische 3D-Stadtmodelle. (1) Baalbek um 1936; (2) Rotterdam 1943; (3) Duisburg um 1566; (4) Solothurn um 1830. (Quellen: (1) HENZE et al., 2009; (2) STEIDLER&GOOS, 2010; (3) JEDRZEJAS, 2008; (4) NEBIKER et al., 2009)

Da die Rekonstruktion historischer Stadtmodelle einen großen zeitlichen Aufwand bedeutet, der sowohl die Auswertung historischer Materialien als auch die Integration von Erkenntnissen aus jahrelanger Forschung in fachübergreifenden Disziplinen beinhaltet, sind diese Modelle in der ersten Phase der Erstellung oftmals auf eine rein geometrisch-texturierte Darstellung beschränkt. Semantische und objektspezifische Sachinformationen werden – solange sie überhaupt zur Verfügung stehen und erfassbar sind – oftmals erst in einer zweiten Arbeitsphase verarbeitet und in das Modell integriert.

2.1.5 Aktuelle Beispiele

Die Tabellen 2.1 und 2.2 geben eine exemplarische Übersicht über digitale historische Stadtmodelle, wie sie in den letzten Jahren sowohl durch die in Kapitel 2.1.4 beschriebenen Methoden als auch durch andere spezifische Verarbeitungsverfahren erzeugt wurden, und durch welche Eigenschaften diese Modelle geprägt sind.

Tab. 2.1a Übersicht über digitale historische Stadtmodelle und deren Charakteristiken (Stand 2011-03)

Stadt	Basisjahr	Ausgangsdaten	Erfassungsmethoden	LOD*	Integration von Sachdaten
Solothurn	1830	Physisches Stadtmodell	Terrestr. Laserscan, Nahbereichsphotogrammetrie	2-3	geplant
Baalbek/LB	1936	Hist. Luftbilder und Panoramen, hist. Karten, Fotografien, Messbilder	Photogrammetrische Auswertung, Digitalisierung	2	ja
Köln	vor 2000 J.	Arch. Ausgrabungen, schriftl. Belege, ...	Digitalisierung	1-3	ja
Duisburg	1566	Physisches Stadtmodell	Terrestr. Laserscan, Nahbereichsphotogrammetrie	2-3	geplant
Rotterdam/NL	1943	Hist. Luftbilder	Photogrammetrische Auswertung, Digitalisierung	2	geplant
Wiburg/FI	1939	Hist. Karten, Fassadenzeichnungen, Fotografien, Videos	Digitalisierung	3	ja

Tab. 2.1b (Fortführung) Übersicht über digitale historische Stadtmodelle und deren Charakteristiken

Stadt	Texturierung	Bereitstellung durch	Anwendung	Quelle
Solothurn	Spezifisch, aus Modell abgeleitet	Google Earth	Historisches 3D-GIS	NEBIKER et al. (2009)
Baalbek/LB	keine	LandXPlorer CityGML Viewer	Historisches 3D-GIS	HENZE et al. (2009)
Köln	Spezifisch/generisch	Flash widget	Edutainment	MAASS et al. (2008)
Duisburg	Spezifisch, aus Modell abgeleitet	Google Earth	Historisches 3D-GIS	JEDRZEJAS (2008)
Rotterdam/NL	Generisch/photorealistisch	Google Earth	Edutainment	STEIDLER&GOOS (2010)
Wiburg/FI	Spezifisch	Webpage	Edutainment	[www12]

Anhand der unterschiedlichen Charakteristiken lässt sich erkennen, wie vielfältig die Ausgangslage sein kann, aus der historische Stadtmodelle entstehen. Entsprechend der Vorlage und dem Basismaterial werden unterschiedliche Methoden zur Erfassung der Daten und Modellierung der 3D-Objekte angewendet. Es wird jedoch ersichtlich, dass bei allen Modellen ein hoher Detaillierungsgrad angestrebt wird, um ein möglichst realistisches Abbild zu konstruieren. Ebenso ist die Integration und Verwaltung von objektspezifischen Sachdaten eine Hauptkomponente, um die Modelle für analytische Fragestellungen zur Verfügung zu stellen und ihnen somit einen Mehrwert zu verleihen. Dies spiegelt sich auch in den Anwendungsgebieten wieder: das Ziel ist, durch Zusammenführung von möglichst realitätsnaher, ansprechender Visualisierung, spezifischen Sach- und Fachinformationen sowie Explorationsmöglichkeiten ein flexibles, anschauliches und inhaltlich reichhaltiges Stadtinformationssystem zu entwickeln, das den Interessen von Laien und Experten gerecht wird und somit einen möglichst großen Benutzerkreis anspricht.

2.2 3D-Stadtmodelle und die vierte Dimension

Jedes Geoobjekt besteht aus den Komponenten Geometrie, Topologie, Thematik und Zeit. Bisher können Geoinformationssysteme nicht alle Aspekte gleichermaßen gut abbilden, besonders die Verwaltung und Speicherung der zeitlichen Komponente wird oftmals vernachlässigt, in dem sie als konstant angenommen oder gar nicht berücksichtigt wird (ZIPF & KRÜGER, 2001).

Dies gilt auch für viele 3D-Stadtmodelle, welche ein Stadtbild nur zu einem konkreten Zeitpunkt widerspiegeln. Der Zustand der dargestellten Situation ist dabei vom Aufnahmezeitpunkt der Basisdaten abhängig, welche zur Erzeugung des Modells zur Verfügung stehen. Eine gängige Methode, Veränderungen zu registrieren und zu speichern,

ist die Aktualisierung des verfügbaren Stadtmodells, wobei der alte Zustand von Objekten durch einen neuen ersetzt wird. Dabei gehen die Informationen über den vorangegangenen Zustand verloren.

Diese Art der Datenhaltung ist ungeeignet, wenn man die geschichtliche Entwicklung einer Stadt und den Ablauf urbaner Prozesse nachvollziehen will. Um Veränderungen von Objekten analysieren zu können, muss eine andere Form der Datenverwaltung erfolgen.

Die folgenden Unterabschnitte gehen auf die grundsätzlichen Unterschiede zwischen temporalen und nicht-temporalen Daten ein und zeigen auf, wie temporale Objekteigenschaften verwaltet werden können. Desweiteren werden unterschiedliche temporale Datenmodelle vorgestellt, deren Implementierungsform direkt auf Stadtmodelle übertragbar sind. Abschliessend werden unterschiedliche Ansätze zur Verwaltung zeitvariabler Eigenschaften in Stadtmodellen und deren Vor- und Nachteile aufgezeigt.

2.2.1 Temporale Daten

Temporale Daten unterscheiden sich von nicht-temporalen Daten in dem wichtigen Punkt, dass sich ihre Ausprägungen nicht konstant verhalten, sondern im Laufe der Zeit ändern. Ein temporales Objekt besitzt somit nicht nur eine, sondern verschiedene Merkmalsausprägungen im Laufe seiner Lebensdauer. Zeit ist ein kontinuierliches Phänomen und kann abstrakt in einem Koordinatensystem als Achse t dargestellt werden. Werden Eigenschaften eines Objekts als zweite Achse a in diesem Koordinatensystem definiert, ergibt sich ein Koordinatensystem, welches die Veränderungen von Merkmalsausprägungen eines Objekts in Abhängigkeit von der Zeit beschreibt (Abb. 2.4). Dabei kann die Änderung stufenweise bzw. konstant, kontinuierlich oder diskret verlaufen (RENOLEN, 1999; STEINER, 1998):

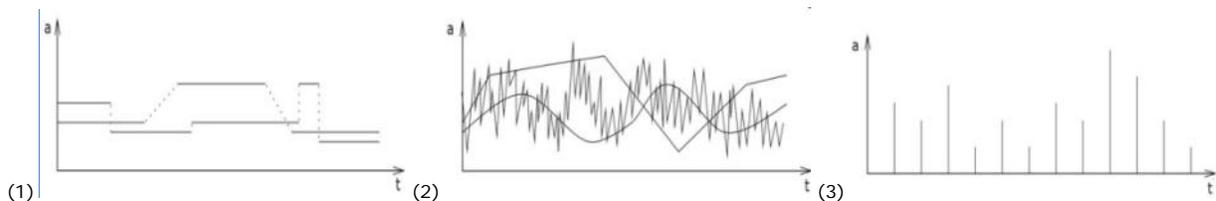


Abb. 2.4 Merkmalsausprägungen (a) eines Geobjekts im Laufe seiner Lebensdauer (t) bei (1) konstantem, (2) kontinuierlichem, (3) diskretem Verhalten. (Quelle: RENOLEN, 1999)

Die gängigste Form der Verwaltung von temporalen Eigenschaften erfolgt in Form von diskreten Daten. Dabei werden Eigenschaften zu definierten Zeitpunkten gespeichert, wobei es zwischen dem Vorgänger- bzw. Nachfolgezeitpunkt keine weiteren Eigenschaftsbeschreibungen gibt.

Die kleinste zu speichernde Zeiteinheit, welche keiner weiteren Unterteilung unterliegt, wird *Chronos* genannt. Jedes *Chronos* ist ein Punkt auf der Zeitachse t , die Abstände zwischen den jeweiligen Punkten beschreiben die temporale Auflösung (*Granularität*) eines Datenmodells (STEINER, 1998).

Für die Speicherung von temporalen Eigenschaften muss anhand der Ausprägung der Daten, des Verwendungszwecks und der Fragestellung exakt festgelegt werden, mit welcher *Granularität* die Daten zu verwalten sind. Dabei werden alle Objekteigenschaften als zeitliches Ereignis auf ein bestimmtes *Chronos* festgelegt (Abb. 2.5). Für ein Stadtmodell, welches historische Informationen integrieren und verarbeiten soll, sind Zeiteinheiten interessant, welche sich sinnvoll verwalten und leicht analysieren lassen, bspw. Jahres- oder Dekadenabstände.

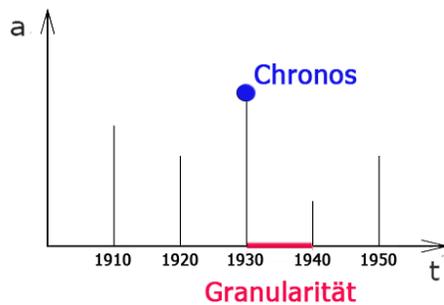


Abb.2.5 Beispiel für die temporale Auflösung (*Granularität*) und definierte Zeiteinheiten (*Chronos*) für die Speicherung historischer Eigenschaften.

2.2.2 Die Zeitformen „Gültigkeitsdauer“ und „Transaktionszeit“

Zeit ist ein multidimensionales Phänomen, wenn es um die Verwaltung und Speicherung von Informationen in einer Datenbank geht (RENOLEN, 1999). Dabei gibt es Zeitpunkte, in denen (oftmals in einem iterativen Prozess)

- ein Sachverhalt entschieden,
- dieser Sachverhalt in die Realität umgesetzt,
- der Sachverhalt vermerkt und erfasst und
- in eine Datenbank übertragen,
- neue Sachverhalte abgeleitet und
- visualisiert

werden. Abb. 2.6 zeigt eine schematische Darstellung dieser unterschiedlichen Zeitpunkte (T_n), die bei dem Entwicklungszyklus eines Objektes (bspw. bei der Planung eines Gebäudes) relevant sein können.

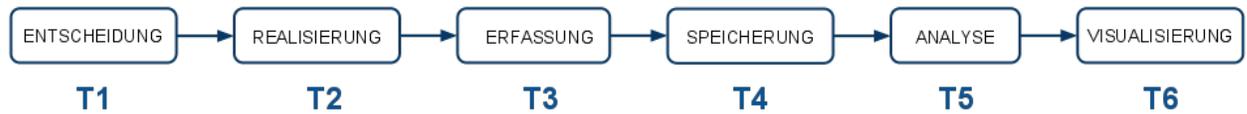


Abb. 2.6 Mögliche Zeitpunkte innerhalb eines Bearbeitungsprozesses.

In der Literatur wird vereinfachend zwischen zwei relevanten Dimensionen unterschieden, welche in einer Datenbank gesondert verwaltet werden müssen: *Gültigkeitsdauer* (engl. *valid time* bzw. *event time*) und *Abwicklungs- bzw. Transaktionszeit* (engl. *transaction time*) eines Sachverhalts (RENOLEN, 1999; McBRIEN et al., 1992).

Die *Gültigkeitsdauer* beschreibt den Zeitpunkt bzw. Zeitraum, in dem ein Sachverhalt in der Realität existiert, also als „wahr“ betrachtet werden kann. Geht man von einem Gebäude als Sachverhalt aus, so kann die „Lebensspanne“ dieses Gebäudes als *Gültigkeitsdauer* dieses Gebäudes bezeichnet werden, welche vom Baujahr bis zum Abrissjahr reicht. Diese Information wird durch den Bearbeiter in die Datenbank eingetragen und kann jederzeit aktualisiert oder modifiziert werden.

Die *Transaktionszeit* bezieht sich auf den Zeitpunkt, an dem ein Sachverhalt in die Datenbank überführt, gespeichert und verwaltet wird. Im Beispiel eines Gebäudes reicht die *Transaktionszeit* von der Erfassung der Gebäudegeometrien in einem GIS bis zu seiner Löschung aus der Datenbank. Diese Zeitinformationen werden vom System gespeichert und können vom Anwender nicht modifiziert werden.

Gültigkeitsdauer und *Transaktionszeit* eines Objekts sind diejenigen temporalen Informationen, die speziell verwaltet werden. Mit Hilfe der *Transaktionszeit* lassen sich die Zeitpunkte von Datenmanipulationen und –updates abfragen, die *Gültigkeitsdauer* hingegen gibt Auskunft über Änderungen von Eigenschaften eines Objekts.

Alle anderen in Abb. 2.6 aufgeführten temporalen Informationen können in der Datenbank mit Hilfe von nutzerdefinierten Attributen erfasst und verwaltet werden.

2.2.3 Temporale Datenmodelle

Wenn es um die Verwaltung temporaler Informationen geht, so können 3D-Stadtmodelle je nach Anwendung und Anforderung verschieden aufgebaut sein. Die verschiedenen Datenmodelle werden nach ihrer Fähigkeit unterschieden, die im Kapitel 2.2.2 beschriebenen Zeitdimensionen *Gültigkeitsdauer* und *Transaktionszeit* zu speichern. Es ergeben sich daraus vier verschiedene temporale Modelle: *Snapshot-Modell* (Augenblicksmodell), *Historisches Modell*, *Transaktionsmodell* und *Bitemporales Modell*.

Abb. 2.7 zeigt, welche Zeitdimensionen von dem jeweiligen temporalen Modell unterstützt werden.

	Gültigkeitsdauer	Transaktionszeit
Snapshot-Modell		
Transaktionsmodell		●
Historisches Modell	●	
Bitemporales Modell	●	●

Abb. 2.7 Kategorisierung temporaler Datenmodelle.

Das in der Literatur am häufigsten erwähnte temporale Datenmodell ist das *Snapshot-Modell*. Hierbei wird der Zustand eines urbanen Gefüges als Augenblicksaufnahme gespeichert, wobei bei Speicherung mehrerer Modelle jede Aufnahme je einen Zeitpunkt wiedergibt. Objekte in diesem Modell enthalten dabei keine Zeitangabe – der Gültigkeitszeitraum der Daten wird ausschliesslich extern gespeichert (bspw. in Metadaten oder in Verbindung mit dem Modellnamen). Zeitliche Veränderungen können nur durch den Vergleich einzelner *Snapshot-Modelle* nachvollzogen werden (YIN, 2010). Dabei kann es sich um regelmäßige und unregelmäßige Zeitabstände handeln, welche in dieser Weise modelliert werden. Veränderungen werden nur durch unterschiedliche geometrische bzw. thematische Ausprägungen der Daten nachvollzogen, denn die einzelnen *Snapshot-Modelle* berücksichtigen keine temporalen Eigenschaften in der Datenbank. Der Nachteil dieses Modelltyps liegt in der häufigen Datenredundanz, da innerhalb zweier *Snapshot-Modelle* ein großer Prozentsatz an identischen Objekten geführt werden. Ein weiterer Nachteil ist, dass der Informationsgehalt immer nur auf den jeweiligen abgebildeten Zeitpunkt beschränkt ist und zwischenzeitliche Ereignisse nicht erfassbar sind.

Das *Transaktionsmodell* zeichnet die Zeitpunkte von Modifikationen an einem Modell auf. Die Speicherung der vorgenommenen Aktivitäten erfolgt über die Einführung eines Transaktionsattributs in der Datenbank. Dieses Attribut mit dem Datentyp DATE/TIME speichert die Zeitpunkte jeglicher Veränderungen, die am Datenmodell vollzogen werden, ab. Die Speicherung erfolgt dabei automatisch vom System, der Bearbeiter hat keinen Einfluss auf die *Transaktionszeit* (vgl. Kapitel 2.2.2). Da der vorherige Zustand eines Eintrags immer erhalten bleibt und keine Daten physisch gelöscht werden, kann der Entwicklungsprozess eines Modells nachvollzogen werden: Es kann ermittelt werden, wann welches Objekt hinzugefügt, verändert oder gelöscht wurde. Der Nachteil dieses Modells liegt darin, dass keine Informationen über den tatsächlichen Geltungszeitraum von Daten abgespeichert werden. Es wird davon ausgegangen, dass es sich immer um den aktuellsten

Zustand handelt. Der tatsächliche Zustand des Modells lässt sich über den Aktualisierungsprozess in der Datenbank nachvollziehen und ist von der Frequenz der Aktualisierung abhängig.

Das *Historische Modell* speichert den temporalen Gültigkeitsbereich eines Objekts bezogen auf die Realität ab. Dies geschieht über die Implementierung von Attributen in der Datenbank, wobei der Eintrag der Zeitwerte vom Bearbeiter vorgenommen wird (vgl. Kapitel 2.2.2). Über die eingetragenen Werte lässt sich nachvollziehen, wann ein Zustand in der Realität als gültig bzw. „wahr“ angenommen werden kann. Somit können bspw. sowohl die Lebensdauer eines Objekts als auch dessen temporale Eigenschaften verwaltet werden. Der Aufwand der Datenverwaltung eines *Historischen Modells* ist geringfügig höher als beim *Transaktionsmodell*, bietet dafür aber bessere Analysemöglichkeiten in Bezug auf Entwicklungsprozesse von Objekten.

Das fortgeschrittenste Modell in Bezug auf die Datenverwaltung ist das *Bitemporale Modell*, da es die Speichermöglichkeiten von *Transaktionsmodell* und *Historischem Datenmodell* kombiniert. Es werden also sowohl die *Gültigkeitsdauer* von Objekten und deren Eigenschaften als auch der *Transaktionszeitpunkt* der Datenmodifikationen verwaltet.

In Abb. 2.8 werden die Unterschiede in der Verwaltung temporaler Informationen in den einzelnen Datenmodellen grafisch dargestellt.

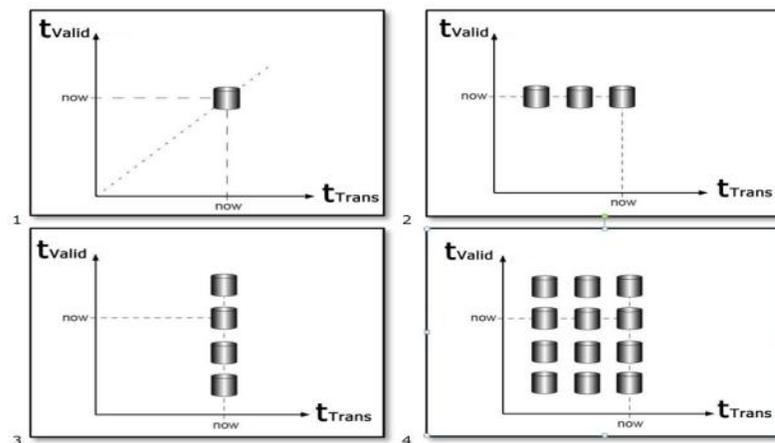


Abb. 2.8 Speicherung von *Gültigkeitsdauer* (t_{valid}) und *Transaktionszeit* (t_{Trans}) in temporalen Modellen. (1) *Snapshot-Modell*, (2) *Transaktionsmodell*, (3) *Historisches Modell*, (4) *Bitemporales Modell*. (Quelle: STEINER, 1998)

2.2.4 Möglichkeiten der Speicherung temporaler Dimensionen

In temporalen Datenmodellen - ausgenommen dem *Snapshot-Modell* – werden zeitvariable Informationen als Dateneinheiten gespeichert, welche mit einer Zeitprägung bzw. einem

Zeitstempel (engl. *timestamp*) versehen werden und Auskunft über *Gültigkeitsdauer* und/oder *Transaktionszeit* geben. Wenn Zeitstempel in einer Datenbank verwendet werden, sollten schon bei der konzeptionellen Modellierung der Datenbank zwei wichtige Punkte definiert werden:

- Temporalen Auflösung (*Granularität*) der Daten
- Art der verwendeten Speicherung (= Zeitprägung).

Beides hängt von der Charakteristik der darzustellenden Daten, dem Anwendungsfall und dem Zweck des Modells ab.

Eine gängige Art der Zeitprägung ist die *Tupelprägung* in Relationalen Datenbanken. Anhand von Datentupeln wird für jede in der Datenbank enthaltene Relation ein gültiger Zeitwert eingetragen. Im Falle eines historischen Stadtmodells wird anhand eines in der Datenbank definierten Attributs vom Datentyp DATE/TIME die *Gültigkeitsdauer* eines Sachverhalts gespeichert, bspw. die Lebensdauer eines Gebäudes oder der Zeitraum, in dem das Gebäude eine bestimmte Funktion hat oder hatte. Die *Gültigkeitsdauer* kann dabei ein Zeitpunkt oder ein Zeitintervall sein, abhängig von der jeweiligen Objekteigenschaft.

Für RDBMS, die auch nicht-atomare Werte verarbeiten, gibt es auch andere Möglichkeiten der Zeitprägung, bspw. die Einführung von *Zeiträumen* oder die *Attributprägung*, bei der die *Gültigkeitsdauer* einer Objekteigenschaft in Verbindung mit dem jeweiligen Attribut gespeichert wird. In der vorliegenden Arbeit soll auf diese Art der Zeitprägungen nicht genauer eingegangen werden, da sie in gängigen RDBMS nicht angewendet werden. Ausführliche Darstellungen sind bei STEINER (1998) und RENOLEN (1999) zu finden.

2.2.5 Ansatz zur Speicherung temporaler Objekteigenschaften in historischen Stadtmodellen

Gebäude und andere städtische Objekte zeichnen sich neben ihrer Lebensdauer auch durch thematische Eigenschaften aus, die sich im Laufe der Zeit verändern. Ein historisches Stadtmodell verwaltet zusätzlich zu den objektspezifischen Eigenschaften auch die jeweilige *Gültigkeitsdauer* dieser Eigenschaften durch die Einführung von Zeitstempeln (vgl. Kapitel 2.2.4).

Die Verwaltung von Zeitstempeln in der Objekttablette bedingt, dass die *Gültigkeitsdauer* für die gesamte Relation und somit für alle in dieser Relation gespeicherten Eigenschaften gilt. Das bedeutet, dass in dieser Relation nur ein veränderliches Eigenschaftsattribut präsent sein darf. Sobald mehrere zeitvariable Eigenschaften für ein und dasselbe Objekt gelten, müssen diese Eigenschaften in separate Tabellen ausgelagert werden. Dabei gilt es, für

jede veränderliche Eigenschaft eine eigene Tabelle zu führen und für jede mögliche gültige Kombination aus Objekttablette und Eigenschaftstabelle die jeweils gültige Zeitangabe zu speichern. Über eine Verbindungstabelle (*JOIN*) können Objekttablette und Eigenschaftstabelle zusammengeführt werden, um so die Eigenschaften an die Geometrien des Objekts zu binden (Abb. 2.9).

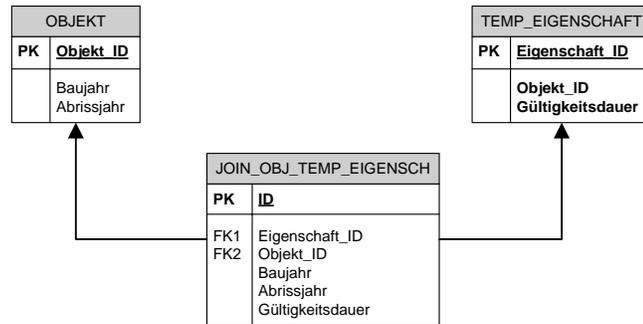


Abb. 2.9 Verknüpfung (*JOIN*) von Objekttablette und Eigenschaftstabelle verbinden temporale Eigenschaften mit dem Objekt.

Für die praktische Umsetzung eines solchen Schemas zur Speicherung temporaler Eigenschaften von Gebäuden und anderen Objekten in einem historischen 3D-Stadtmodell könnten folgende Implementierungsregeln Hilfestellung bieten (eigene Aufstellung):

- Sämtliche Objektgeometrien werden in einer Objekttablette geführt und erhalten sowohl eine gültige Lebensdauer (Baujahr/Abrissjahr) als auch gebäudespezifische Attribute, die keiner zeitlichen Veränderung unterworfen sind.
- Zusätzlich sollten in der Objekttablette Daten gespeichert werden, die das Gebäude – neben einem eindeutigen Identifikator (ID) – identifizieren (bspw. aktuelle Adresse). Dies vereinfacht sowohl den Zugriff als auch die assoziative Zuordnung bei Abfragen. Unterliegen Adressangaben zusätzlich einer zeitlichen Veränderung, so muss eine eigene Tabelle erzeugt werden, welche die jeweilige *Gültigkeitsdauer* über Attribute für jedes Datentupel verwaltet.
- Eigenschaften mit eigener Lebensdauer (bspw. Bewohner) und Eigenschaften ohne eigene Lebensdauer (bspw. Funktion) werden in externe Tabellen ausgelagert, wenn sie eine temporale Beziehung zum Objekt haben. In diesen Tabellen werden die jeweiligen *Gültigkeitsdauern* über Attribute für jedes Datentupel verwaltet.
- Eigenschaften, welche eine eigene Lebensdauer bzw. einen Gültigkeitszeitraum besitzen, jedoch keine temporale Beziehung zum Objekt haben, werden mitsamt ihrer Lebensdauer in externen Tabellen verwaltet. Diese entspricht dem Gültigkeitszeitraum für das Objekt. Ein Beispiel für solch eine Eigenschaft wäre ein historisches Ereignis.

Der Nachteil der Zeitprägung von Datentupeln liegt in der hohen Datenredundanz, wenn für ein Objekt bestimmte Eigenschaften zu unterschiedlichen Zeiten existiert haben. Nachteilig ist ausserdem, dass die zeitlichen Informationen zu den Objekteigenschaften über die gesamte Datenbank verteilt liegen. Man nennt dieses Phänomen auch *vertikale Anomalie* zeitlicher Informationen (STEINER, 1998).

Der Vorteil von Tupelprägung ist die übersichtliche und leicht zu handhabende Verwaltungsstruktur temporaler Daten, welche ohne großen Aufwand implementiert werden kann. Datenmanipulation und –aktualisierung können schnell und ohne Einarbeitungszeit durchgeführt werden. Ebenso sind analytische Fragestellungen durch den Einsatz gängiger Abfragesprachen wie SQL leicht umsetzbar.

Um sich im Vorfeld der Implementierung einer Datenbank einen Überblick zu verschaffen, in welcher temporalen Relation die zu speichernden Attribute zu den Objekten stehen und ob diese Attribute selbst einer Lebensdauer unterliegen, schlagen [McBRIAN et al., 1992] die Erstellung eines *Entity-Relationship-Time-Diagramms* (ERT) für das jeweilige Datenmodell vor. Diese Art der konzeptionellen Modellierung führt die grafische Darstellung temporaler Eigenschaften von Beziehungen, Entitätsklassen und Eigenschaften ein und erlaubt die Differenzierung zwischen direkten und indirekten temporalen Beziehungen. Ein ERT kann somit als hilfreiches Modellierungswerkzeug bei der Planung und Projektvorbereitung eingesetzt werden.

ZIPF & KRÜGER (2001) stellen einen weiteren Ansatz zur Verwaltung historischer Informationen in temporalen 3D-Stadtmodellen durch die Einführung eines objektorientierten (OO) Datenmodells vor. Dieses zeigt sich durch den Aufbau von Strukturhierarchien und sich vererbender Eigenschaften sowohl in der Verwaltung von Geometrien, Topologien und Eigenschaften sehr leistungsfähig. Auch die Speicherung temporaler Daten geschieht dabei in weit flexiblerem Maße als beim Einsatz relationaler Datenbanken. Beispielsweise ist die Speicherung unterschiedlicher Zeitstrukturen – wie die Unterscheidung zwischen bestimmten und unbestimmten Zeiträumen und die Verwaltung sich verzweigender und/oder überlappender Zeiträume – möglich. Dadurch könnten sich sogar „Alternative Realitäten“ (ZIPF & KRÜGER, 2001) modellieren lassen (bspw. historische Planungsvorhaben, welche nicht realisiert wurden).

2.3 Historische Stadtmodelle und CityGML

In diesem Abschnitt wird auf das für die Repräsentation und den Austausch verbreitete Standardformat CityGML eingegangen und erläutert, welche Vorteile eine standard-konforme Datenmodellierung gemäss CityGML für historische Stadtmodelle bietet. Des-

weiteren wird diskutiert, in welchem Maße historische Informationen durch das CityGML-Anwendungsschema verwaltet werden und wie dieses Schema für die Repräsentation der historischen Komponente von Stadtmodellen erweitert werden könnte.

2.3.1 CityGML – Austauschformat und Datenstandard für 3D-Stadtmodelle

Aufgrund der unterschiedlichen Erfassungsmethoden und den verschiedenen Systemen zur Erzeugung der Modelle liegen Modelldaten in jeweils anwendungsspezifischen Formaten vor. Die Nutzung der Daten in anderen Applikationen und Systemen ist mit einem großen Aufwand verbunden. Für den Austausch von 3D-Geodaten und deren Visualisierung wurden deshalb Austauschformate entwickelt, die eine standardisierte Beschreibung von 3D-Daten garantieren.

Bisher werden die meisten 3D-Stadtmodelle als rein geometrische oder grafische Modelle ausgetauscht. Für Visualisierungsanwendungen ist dies ausreichend. Sollen die Modelle jedoch für Analysefunktionen und erweiterte thematische Abfragen zur Verfügung stehen, sollten neben dem grafischen Erscheinungsbild auch objektbezogene Sachinformationen, semantische Aspekte und Topologien berücksichtigt werden (KADA, 2007).

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde von der Special Interest Group 3D (SIG 3D) der Initiative Geodateninfrastruktur Nordrhein-Westfalen (GDI NRW) das Austauschformat CityGML entwickelt. Die Interessengemeinschaft besteht aus Mitgliedern der Industrie, öffentlicher Verwaltung und Forschung und beschäftigt sich mit der Entwicklung und Nutzung interoperabler 3D-Stadtmodelle. CityGML wurde 2008 durch das Open Geospatial Consortium (OGC) als internationaler Standard anerkannt und wird seitdem als Modell und Format für die Speicherung und den Austausch von regionalen 3D-Stadt- und Landschaftsmodellen.

Das Datenmodell von CityGML basiert auf den ISO-Standard-Serie 191xx für Geografische Informationen und ist als GML-Anwendungsschema der Geography Markup Language (GML3) realisiert, die wiederum auf der Extensible Markup Language (XML) aufsetzt. Im CityGML-Datenmodell werden Klassen und Relationen für die Abbildung urbaner dreidimensionaler Geoobjekte mit Blick auf die konsistente und einheitliche Definition ihrer Geometrie, Topologie, Erscheinung und Semantik definiert (KOLBE, 2009). Zentrale Komponenten des CityGML-Modells Gelände, Gebäude, Vegetation, Gewässer und Verkehr – die Bestandteile eines jeden 3D-Stadtmodells. In hierarchischer Struktur werden diese als einzelne Objektklassen verwaltet und zu einer übergeordneten Klasse „City Objekt“ zusammengefasst, aus der sich das Stadtmodell zusammensetzt (Abb. 2.10).

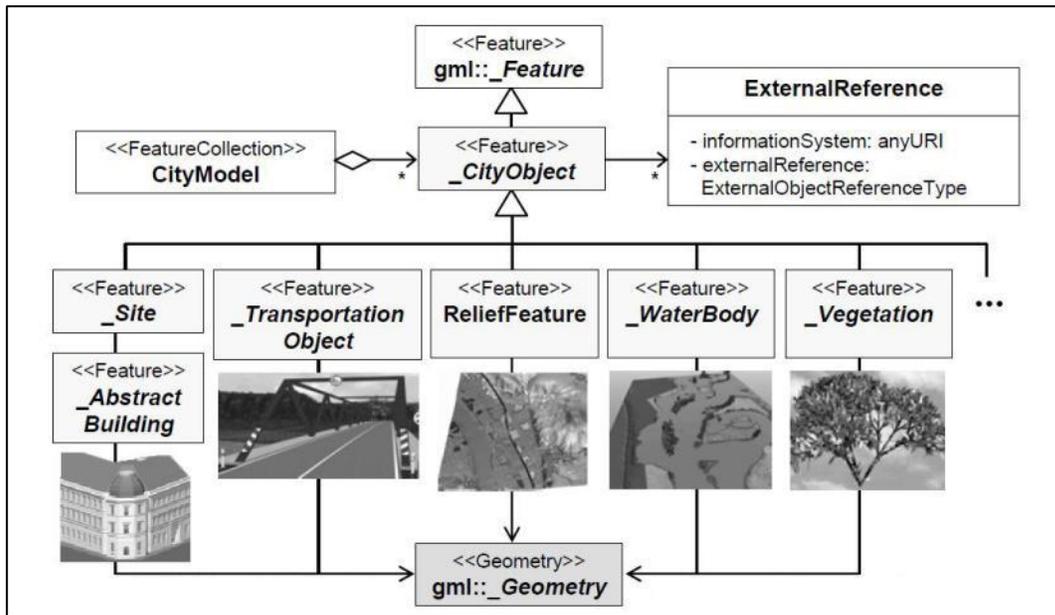


Abb. 2.10 Klassenhierarchie in CityGML. (Quelle: KOLBE, 2009)

Innerhalb der Objektklassen können den einzelnen Objekten thematische Informationen in Form von generischen Attributen zugewiesen werden (für Gebäude bspw. Funktion, Klasse, Anzahl der Stockwerke), auch wird die Verwaltung von Bestandteilhierarchien unterstützt (bspw. Balkon gehört zu Gebäude XY).

Von besonderer Bedeutung ist das Generalisierungskonzept von 3D-Stadtmodellen in CityGML (Abb. 2.11). Die Einführung von unterschiedlichen Detaillierungsgraden (*Level of Detail, LOD*) klassifiziert ein Modell anhand von verschiedenen Kriterien und Qualitätsmaßen. Bei einem interoperablen Austausch von Modellen kann anhand des angegebenen Detaillierungsgrads sofort erfasst werden, welche Genauigkeit von den Daten erwartet werden kann. Je nach Verwendungszweck und der Beschaffenheit der Ausgangsdaten wird der Detaillierungsgrad eines Modells dabei meist schon in der Projektplanungsphase festgelegt.

Level of Detail	Beschreibung	Absolute Genauigkeit in m (Lage/Höhe)	Mindestgröße der Grundfläche in m	Beispiel
LOD 0	Regionalmodell, Höhenmodell 2.5D mit thematischer Rasterdatenüberlagerung (bspw. Luftbild, Flächennutzung)	nicht definiert	nicht definiert	
LOD 1	Blockmodell, Gebäude ohne Dachstrukturen und Texturen, wichtige Stadtmöbel und Vegetationsobjekte, Vegetationsbedeckung $\geq 50\text{m} \times 50\text{m}$	$\geq 5/\geq 5$	6 x 6	
LOD 2	Gebäudemodelle mit generischer Dachform und -ausrichtung, Fassadentextur, prototypische Stadtmöbel und Vegetationsobjekte > 6m, Flächenbewuchs $\geq 5\text{m} \times 5\text{m}$	2/2	4 x 4	
LOD 3	Architekturmodell (ausen), ausdifferenziertes Erscheinungsbild mit reeller Dachform, Anbauten, Wandöffnungen, spezifische Stadtmöbel und Vegetationsobjekte > 2m, Flächenbewuchs < LOD2	0.5/0.5	2 x 2	
LOD 4	Architekturmodell (innen), Dachüberhänge, Innenausstattung, Wandöffnungen, spezifische Stadtmöbel und Vegetationsobjekte, Flächenbewuchs < LOD2	0.2/0.2	keine	

Abb. 2.11 Die verschiedenen Detaillierungsgrade (*Level of Detail*) in CityGML und deren Genauigkeitsanforderungen. (Quelle: GRÖGER, 2008)

2.3.2 Standardkonforme Modellierung historischer Stadtmodelle

Für Aufbau und Datenverwaltung sowie für Publikation und Austausch historischer 3D-Stadtmodelle ist eine Datenmodellierung in Anlehnung an das CityGML-Anwendungsschema von großem Vorteil. Durch eine CityGML-konforme Modellierung können diese historischen Modelle in andere Fachanwendungen integriert werden, ebenso ist die Erweiterung des Modells durch externe Datensätze möglich. Durch einen einheitlichen Datenaufbau ergibt sich außerdem die Möglichkeit, aktuelle Stadtmodelle um die historische Komponente zu erweitern.

Für einen Datenaustausch bedeutet eine konforme Objektklassifizierung, dass Vergleichsanalysen zwischen historischem und aktuellem Stadtraum durchgeführt werden können. Durch definierte Standardattribute bietet CityGML die Möglichkeit, Objektinformationen im

Modell zu speichern. Zum Beispiel wird mit den Attributen „yearOfConstruction“ (Baujahr) und „yearOfDemolition“ (Abrissjahr) Aufschluss über die Lebensdauer eines Objekts gewonnen. Liegt das Abrissjahr vor dem heutigen Datum, ist ersichtlich, dass sich Objektinformationen wie Nutzung und Funktion sowie geometrische Eigenschaften auf ein nicht mehr existierendes Gebäude beziehen. Somit ist gewährleistet, dass objektrelevante Informationen nicht projektabhängig in eigens erstellten Attributen vorliegen, sondern vom externen Nutzer direkt verstanden und verwertet werden können.

2.3.3 Einhaltung von Modellierungsvorschriften

Viele der in den letzten Jahren erstellten historischen Stadtmodelle orientieren sich an den in CityGML festgelegten Detaillierungsvorschriften (vgl. Tab. 2.1 und 2.2). Diese sind jedoch nicht immer einzuhalten, denn Erfassungsmethode und Zuverlässigkeit des Ausgangsmaterials bestimmen die Qualität des Modells (vgl. Kapitel 2.1.3 und 2.1.4). Dabei kann es bspw. bei der Lagegenauigkeiten von Objekten oder beim Grad der Ausmodellierung der Gebäude zu Abweichungen innerhalb eines Modells kommen. Eine strikte Einhaltung der Standardvorschriften ist deshalb oftmals schwierig. Da die CityGML-Spezifikation nach normativen und unverbindlichen Vorgaben unterscheidet, sind absolute Genauigkeiten für Lage und Höhe eines Gebäudes nicht bindend, was einen Vorteil für die Integrität von historischen Modellen darstellt. Die einzelnen Komponenten innerhalb eines LOD sind hingegen vorgeschrieben, so kann bspw. ein Blockmodell keine Fassadentexturierung enthalten. Diese Vorschriften müssen auch bei der Überführung historischer Modelle in das CityGML-Format beachtet werden.

Während bei der Erstellung eines aktuellen Stadtmodells der Detaillierungsgrad je nach Anwendungsbedarf und Ressourcenverfügbarkeit schon in der Projektplanung festgelegt wird, kann dieser im Falle von historischen Modellen oftmals erst nach der Erzeugung definiert werden, denn die Qualität eines historischen Modells lässt sich nur anhand von Referenzmaterialien bestimmen. Semantische und thematische Genauigkeiten sind aus diesem Grund oftmals nicht eindeutig bestimmbar, da sie – immer abhängig vom Ausgangsmaterial – große Unsicherheiten enthalten können. Zum Beispiel wird versucht, Daten- und Informationslücken durch Annahmen oder Schätzungen zu schliessen, um einen homogenen Datensatz zu erstellen, so dass die semantische Genauigkeit eines historischen Modells oftmals wesentlich geringer ausfällt als die geometrische Genauigkeit.

2.3.4 Integration historischer Informationen in CityGML

Die von CityGML vorgesehenen Standardattribute reichen für die Dokumentation der historischen Entwicklung eines Gebäudes nicht aus. Zum Beispiel sind städtebauliche

Veränderungen nicht nur durch veränderte Funktionalitäten oder spezifische Bedarfs-situationen bedingt. Auch politische oder ideologische Entwicklungen prägen ein Stadtbild nachhaltig. Zum Beispiel haben gesellschaftliche, kulturelle und politische Ereignisse einen räumlichen Bezug, da sie an einem bestimmten Ort stattfinden oder stattgefunden haben: Staatsverträge werden in Gebäuden geschlossen, Republiken von dem Balkon eines Gebäudes ausgerufen, berühmte Persönlichkeiten sind in einem Haus geboren oder haben sich für eine bestimmte Zeit dort aufgehalten und ihre Werke vollbracht. Auch diese Informationen gehören zur Charakteristik eines Gebäudes und definieren dessen historische Bedeutung. Ebenso kann die Art der Zerstörung eines Gebäudes Aufschluss über geschichtliche Ereignisse geben, die sich in einer Stadt zugetragen und das Stadtbild geprägt haben. Die Möglichkeit, historische Ereignisse anhand von Gebäudegeometrien räumlich zu verankern und zu visualisieren, ist deshalb ein effektiver Weg, Geschichte räumlich zu visualisieren.

Während in einem projektbezogenen, lokal verwalteten historischen Stadtmodell spezifische historische Informationen in einer Datenbank gespeichert werden können, ist die Informationsübertragung bei einem späteren Datenaustausch problematisch. Ist die Entscheidung gefallen, CityGML als Modellierungsstandard und Austauschformat zu nutzen, stößt man sehr schnell an die Grenzen, diese gespeicherten historischen Informationen zu übertragen. Bisher sieht das CityGML-Format keine Standardattribute vor, über die weitergehende historische Informationen verwaltet werden können.

CityGML unterstützt jedoch die Erweiterung durch Einführung generischer Objekte und Attribute, die im Datenstandard nicht abgebildet und für spezifische Anwendungsgebiete notwendig sind. Dies ist besonders für die Speicherung historisch relevanter Informationen von Interesse.

In Tabelle 2.2 werden generische Attribute vorgestellt, die über die Historie eines Objekts Aufschluss geben können (eigene Zusammenstellung).

Tab. 2.2 Mögliche Klassifizierung sowie Kodierung generischer Attribute mit historischem Bezug

Merkmal	Beschreibung	Kodierung	T	Rt
Event	Politisches, gesellschaftliches oder kulturelles Ereignis	100 = politisch, 200 = gesellschaftlich, 300 = kulturell, 400 = sonstige	x	
Resident	Einwohner, Mieter, Gast. Beschränkung auf historisch bedeutende Persönlichkeiten.	keine		x
Owner	Hausbesitzer	keine		x
demolitionClass	Zerstörungsart	1000 = klimatisch, 2000 = geophysikalisch, 3000 = humanisch, 4000 = sonstige, 9999 = nicht spezifiziert		x
demolitionType	Zerstörungstyp	0 = sonstige, 1 = Unwetter, 2= Überschwemmung, 3 = Lawine/Erdbeben, 4 = Erdbeben, 5 = Vulkanismus, 6 = Brand, 7 = Flurbereinigung, 8 = Vandalismus, [...], 9999 = nicht spezifiziert		
demolitionDegree	Zerstörungsgrad	1 = leicht beschädigt, 2 = stark beschädigt, 3 = beschädigt und wiederhergestellt, 4 = beschädigt und abgerissen, 5 = zerstört		
Protection	geschütztes Gebäude	1000 = denkmalgeschützt, 2000 = Kulturerbe, [...]		x

T Temporale Eigenschaft
Rt Temporale Beziehung zum Objekt

Die Integration dieser Attribute in den CityGML-Standard wäre eine Möglichkeit, geschichtlich relevante Informationen zu Objekten zu speichern und diese auch bei einem Datenaustausch mitzuführen.

Eine andere Möglichkeit der Erweiterung des Standards um eine historische Komponente wäre die Definition einer Application Domain Extension (ADE), in der neue, themenspezifische Klassen definiert und in das Schema integriert werden. Die Implementierung einer ADE „Historie“ wäre hier eine Alternative zur Definition von generischen Attributen.

3 KONZEPTION EINES HISTORISCHEN 3D-STADTMODELLS FÜR POTSDAM

In diesem Kapitel werden die im Kapitel 2 herausgestellten theoretischen Grundlagen und Ansätze als Informationsgrundlage für die Konzeption zur Erstellung eines historischen 3D-Stadtmodells für Potsdam herangezogen.

Im ersten Teil dieses Kapitels wird auf die Besonderheiten und Charakteristiken des Untersuchungsgebiets eingegangen. Nach einem kurzen Abriss über die geschichtlichen Ereignisse, die das Stadtbild im Laufe der Jahrhunderte geprägt haben, wird im Kapitel 3.1.2 das Planungskonzept für die Neugestaltung der Potsdamer Innenstadt erläutert und beschrieben, welchen Einfluss dieses Konzept auf das jetzige Stadtbild haben wird.

Das Kapitel 3.2 definiert Funktion, Nutzen und Zielgruppe für das Modell und legt die daraus folgenden Anforderungen an das zu erzeugende Modell fest. Diese werden anhand eines Anforderungskatalogs und eines Anwendungsmodells hervorgehoben.

Aufgrund der unterschiedlichen Basisdaten, auf denen das Modell aufbaut, ist eine Verwaltung von Metadaten notwendig, nicht nur um die Informationsquellen zu verwalten, sondern auch um Qualität und Zuverlässigkeit des Modells bei Datenaustausch zu beschreiben. Das Kapitel 3.3.1 geht auf Möglichkeiten zur effektiven und nachhaltigen Metadatenverwaltung für das historische Stadtmodell Potsdam ein.

Basierend auf den theoretischen Grundsätzen zur Verwaltung temporaler Daten (siehe Kapitel 2.3) wird im Kapitel 3.3.2 ein Konzept zur Integration und Speicherung zeitbezogener Informationen für das Untersuchungsgebiet erstellt, welches als Grundlage für die praktische Umsetzung dient.

Aufgrund der Verwendung von Archivmaterial können Informationslücken und -unsicherheiten nicht ausgeschlossen werden. Die Entscheidung, in welcher Form mit diesen Herausforderungen umzugehen ist, wird in Kapitel 3.3.3 erläutert.

3.1 Besonderheiten des Untersuchungsgebiets

Jede Stadt ist durch ihre Geschichte geprägt. Funktionalitäten und historische Ereignisse, aber auch die Lebensweise der Bewohner verleihen jeder Stadt ihr heutiges Aussehen. Will man Entwicklungsprozesse eines städtischen Raums verstehen, muss man sich deshalb auch mit seinen speziellen Begebenheiten vertraut machen. Bei der Erzeugung eines historischen Stadtmodells ist die Beschäftigung mit der Stadtgeschichte eine unausweichliche Aufgabe. Da die Informationen, auf denen das Stadtmodell aufbaut, zum großen Teil aus historischen Quellen stammen, muss der Bearbeiter in der Lage sein,

historische Abbildungen zu interpretieren und in einen logischen Zusammenhang zu bringen. Dies gilt insbesondere für die Verwendung von historischen Luftbildern zur Objektinterpretation und -klassifizierung.

3.1.1 Kulturhistorische Bedeutung und geschichtliche Entwicklung

Potsdam ist für seine außergewöhnliche Kulturlandschaft bekannt. 1990 wurde großen Bereichen Potsdams von der UNESCO der Weltkulturerbe-Status verliehen, 1999 erfolgte die Aufnahme weiterer Teile in die Liste des Weltkulturerbes. Die Besonderheit der landschaftlichen und baulichen Gestaltung der Potsdamer Kulturlandschaft geht auf die Ambitionen der Preußischen Könige im 18. und 19. Jahrhundert zurück, die während ihrer Regierungszeit eine planmäßige Erweiterung und Umgestaltung der Residenzstadt mit ihren königlichen Schlössern und Gärten veranlassten. Dadurch entstand eine einzigartige Gesamtkomposition, welche in Europa in dieser Form kein zweites Mal zu finden ist.

Die Geschichte Potsdams geht bis ins Mittelalter zurück, als Slawenstämme eine Burganlage an der Havel errichteten. Ein Aufschwung wurde erst mehrere Jahrhunderte später eingeleitet, als der Große Kurfürst Friedrich Wilhelm die Stadt zu einer zweiten Residenz neben Berlin ausbaute. In dieser Zeit begann der Bau des Stadtschlusses auf dem Gebiet der ehemaligen Burganlage. Unter dem „Soldatenkönig“ Friedrich Wilhelm I. entwickelte sich Potsdam zu einer Garnisonstadt, im Zuge dessen kam es zu einem großen Bevölkerungszuwachs, der den Bau neuer Stadtteile erforderte. Friedrich II. der Große – Sohn Friedrich Wilhelms I. – entschied sich, Potsdam auch in seinem Erscheinungsbild zur Residenzstadt zu machen und veranlasste ausgiebige architektonische Umgestaltungen an Straßen und Plätzen sowie eine weitere Begrünung der Innenstadt. Der Alte Markt wurde komplett neu gestaltet, Bürgerhäuser erhielten Barockfassaden und Potsdam bekam sein charakteristisches Aussehen. Friedrich II. veranlasste auch die Umgestaltung der umliegenden Parkanlagen und den Bau neuer Schlösser (Schloss Sanssouci, Neues Palais). Auch die Nachfolger Friedrich II. trugen zur Verschönerung Potsdams und seiner Umgebung durch den Bau weiterer Repräsentativgebäude und Grünanlagen bei. Nach dem Ende des Ersten Weltkriegs verlor Potsdam den Status als Residenzstadt, seitdem kam es bis zum Ende des Zweiten Weltkriegs zu keinen prägnanten architektonischen Veränderungen im Stadtgebiet.

Potsdam blieb während des 2. Weltkrieges verschont. In der Nacht vom 14. April 1945 — kurz vor Ende des Krieges — wurde die Stadt jedoch von britischen Streitkräften bombardiert. In dieser Nacht wurden innerhalb von 20 Minuten eine Vielzahl der historischen Gebäude schwer beschädigt oder vollständig zerstört, darunter das gesamte

Ensemble des Alten Marktes (Abb. 3.1.(1)) mit seinen historischen Bauten aus der friderizianischen Zeit. Das Stadtschloss sowie die Garnisonkirche und der Lange Stall erhielten Bombentreffer und brannten aus. Beim Einzug der sowjetischen Streitkräfte Ende April 1945 wurden weitere Gebäude durch Artilleriebeschuss stark beschädigt.

In den Nachkriegsjahren und unter Führung der DDR-Regierung sollte ein Neuaufbau der zerstörten Stadt entstehen. Die Architektur sollte zum Einen den neuen Funktionalitäten und Bedürfnissen der Bevölkerung gerecht werden, zum Anderen waren jegliche Erinnerungen an die preußische Geschichte ungern gesehen.

In dieser Zeit wurden die Ruinen des Stadtschlusses, der Garnisonkirche sowie historische Wohn- und Repräsentativbauten abgetragen oder fielen der Flurbereinigung zum Opfer. Stattdessen entstanden Bauten nach sozialistischem Vorbild, auch wurden viele Straßennamen geändert. Der 1722 ausgebaute Stadtkanal wurde 1965 trockengelegt und zugeschüttet und entlang seines historischen Verlaufs eine Hauptverkehrsstraße gebaut .

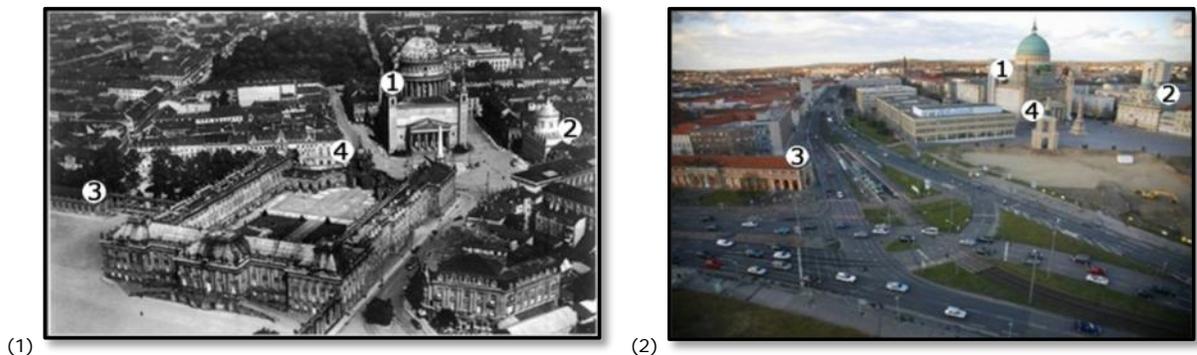


Abb. 3.1 Der Alte Markt (1) 1911 und (2) 2009. Historischer Altbestand: 1 St. Nikolaikirche, 2 Altes Rathaus, 3 Marstall, 4 Fortunaportal, Eingangstor des Potsdamer Stadtschlusses (2001 wiedererrichtet). (Bildquelle: Bundesbildarchiv)

An historischen Standorten wurden Neubauten wie das Rechenzentrum auf dem ehemaligen Standort der Garnisonkirche, das Interhotel auf dem Gelände des Lustgartens sowie die Fachhochschule westlich der Nikolaikirche errichtet (Abb. 3.1(2)).

3.1.2 „Integriertes Leitbautenkonzept“ - Wiederbelebung der Potsdamer Mitte

Die historische Mitte Potsdams hat mit der Zerstörung im Zweiten Weltkrieg und der Umgestaltung in den Nachkriegsjahren ihr ehemals charakteristisches Aussehen verloren. Das Stadtzentrum ist heute durch eine Mischbauweise aus vereinzelt erhaltenen historischen Gebäuden und sozialistischen Funktionsbauten geprägt. In den letzten Jahrzehnten ist der Wunsch gewachsen, die gesichtslose und architektonisch inhomogene

Stadtmitte wiederzubeleben und ihr damit die Bedeutung als kulturelles und multifunktionales Zentrum zurückzugeben. Mit diesem Ziel wurden seit 1990 durch die Stadtverordnetenversammlung Grundsätze zur Gestaltung der Potsdamer Mitte beschlossen [www13]. Ein Kernpunkt ist dabei die Wiederannäherung an den historischen Stadtgrund- und -aufriß. Der 2006 gefasste Beschluss, das Stadtschloss an seinem ehemaligen Standort als Neubau in historisierender Gestalt wieder zu errichten und unter neuer Funktion als Landtagsgebäude zu nutzen, ist ein wichtiger Meilenstein im Zuge dieser Entwicklung (Abb. 3.2).



Abb. 3.2 (1) Wiedererrichtung des Fortunaportals als Eingang des ehemaligen Stadtschlusses an seinem historischen Standort (2007). (2) Schauffassade des Landtags-Neubaus nach historischem Vorbild (2011). (Bildquelle: [www61])

Am 1. September 2010 wurde das „Integrierte Leitbautenkonzept Potsdamer Mitte“ beschlossen, welches Rahmenbedingungen zur Nutzung und Gestaltung der Gebäude, zur Parzellierung der Grundstücke und zur Neugestaltung der Verkehrssituation festlegt. Die städtebauliche Erneuerung soll auf Grundlage des Beschlusses der Stadtverordnetenversammlung vom 24.10.1990 als „*behutsame Wiederannäherung an den charakteristischen, historisch gewachsenen Stadtgrund und -aufriß*“ (www13) erfolgen. Damit ist als Vorbild für die Um- und Neugestaltung der Straßenräume und Platzfolgen jener historische Stadtgrundriss gemeint, wie er bis 1945 bestanden hat (www1). Das Konzept definiert die baulichen und funktionellen Vorgaben zur Wiederbelebung des Alten Marktes nach vier verschiedenen Gestaltungskategorien (www14):

1. Leitfunktion: Erhaltung und Sanierung bestehender historischer Gebäude
2. Leitbau: Rekonstruktion der Gebäude nach historischem Vorbild
3. Leitfassade: Rekonstruktion der historischen Fassade
4. Leitlinien: Festlegung von Gestaltungsanforderungen.

Mit diesen Richtlinien orientiert sich die Gestaltung des Alten Marktes an den historischen Vorbildern, wobei die funktionelle Nutzung den aktuell bestehenden Bedürfnissen angepasst ist. In den kommenden 5-10 Jahren soll ein Stadtquartier mit überwiegend wohnlicher

Nutzung aber auch Dienstleistungs- und Gewerbefunktion (Gastronomie, Einzelhandel, Büro- und Hotelgewerbe) entstehen.

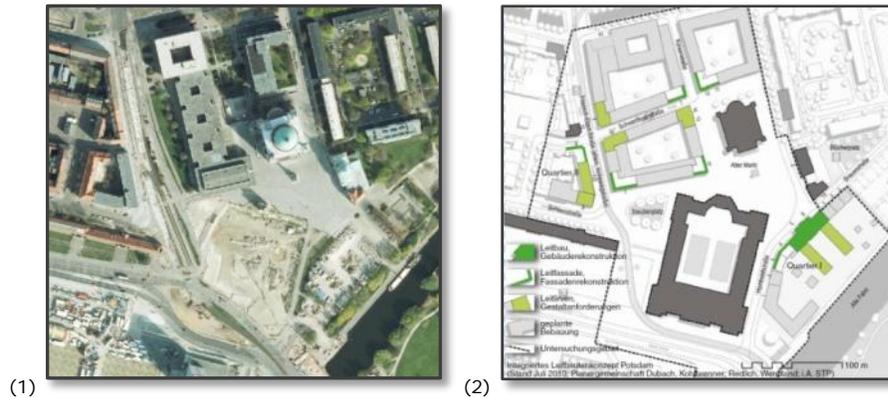


Abb. 3.3 (1) Luftbildaufnahme des Alten Marktes, 2009. (2) Leitbautenkonzept für die Umgestaltung des Alten Marktes und der umliegenden Bebauung. (Bildquelle: (1) Geobasisinformation Brandenburg; (2) [www14])

Eine Konkretisierung der Leitlinien für das Bebauungskonzept ist weiterhin in Arbeit, wobei grundsätzlich der historische Straßenverlauf und die historischen Baufluchten der Blockrandbebauung berücksichtigt werden (Abb. 3.3). Neubauten sollen dabei in Einklang mit der sie umgebenden architektonischen Bauweise gebracht werden [www14].

3.2 Definition der Anforderungen

Als multifunktionales 3D-Stadtmodell soll das mit dieser Arbeit zu entwickelnde historische 3D-Stadtmodell die Grundlage für ein historisches Informationssystem der Stadt Potsdam bilden, welches als Visualisierungs- und Analysewerkzeug für verschiedene Anwendungen eingesetzt werden kann. Die Funktionen des Modells unterteilen sich dabei in zwei Hauptkriterien:

1. Analyse des historischen Potsdamer Stadtraums basierend auf einem Blockmodell und thematischen Flächenlayern.
2. Visuelle Repräsentation des historischen Stadtbildes vor dessen Zerstörung 1945 als virtuelle 3D-Umgebung, basierend auf einem LOD2-Modell.

Das Blockmodell ist aufgrund seines generalisierten geometrischen Aufbaus für den performanten Einsatz von Analysefunktionen – bspw. in einem 3D-GIS – geeignet. Um dies zu gewährleisten, werden neben den Geometrien auch historisch und baugeschichtlich relevante Informationen als Attribute zu den einzelnen Objekten gespeichert. Der Gültigkeitszeitraum der jeweiligen Informationen wird dabei mitgeführt und ebenfalls attributiv verwaltet. Zusätzlich werden thematische Flächenlayer erzeugt, durch die historische Umweltinformationen abgeleitet werden können.

Aufbauend auf dem Blockmodell wird anhand eines exemplarischen Ausschnitts (Alter Markt, Gebäudeensemble um die Nikolaikirche und das Stadtschloss) ein LOD2-Modell für den Visualisierungseinsatz erstellt, um das städtebauliche Gesamtensemble der historischen Potsdamer Innenstadt virtuell zu repräsentieren. Realisiert wird dies durch die Rekonstruktion der Gebäude in ihrer spezifischen Gestalt, eine fotorealistische Texturierung der historischen Fassaden sowie der Integration von Vegetationsobjekten, Stadtmöbeln und die Repräsentation von Oberflächenbedeckung.

Als virtuelles Modell soll es anschliessend zu Explorationszwecken in einem Web-Browser mit Navigationsfunktionen (bspw. Google Earth) bereitgestellt werden, so dass sich ein Betrachter im Modell frei bewegen kann und sich in die historische Welt hineinversetzt fühlt.

Um Datenaustausch und Interoperabilität zu gewährleisten, soll das Stadtmodell CityGML-konform aufgebaut werden. Dazu gehören sowohl die Einhaltung von Genauigkeitsvorschriften für die einzelnen Detaillierungsgrade als auch das Speichern von Standardattributen. Historische Objektinformationen, die von Standardattributen nicht abgedeckt werden, sind als generische Attribute zu speichern. Durch die standardkonforme Modellierung kann das Modell in andere Anwendungen als Erweiterung integriert werden, bspw. in das aktuell bestehende Stadtmodell der Stadt Potsdam.

Das historische 3D-Modell soll für spätere Modifizierungen und Erweiterungen der geometrischen, attributiven und thematischen Daten zur Verfügung stehen. Zu diesem Zweck ist eine Datenaufbereitung und Datenspeicherung in gängigen Formaten notwendig.

3.2.1 Anforderungskatalog

Anhand der Aufgabenstellung und der Funktionsbeschreibung für das Modell ergeben sich in Hinblick auf Modellinhalte, anzustrebende Genauigkeit sowie Datenhaltung und –verwaltung Bedingungen, die schon bei der Projektkonzeption berücksichtigt werden müssen. Da die Erstellung eines historischen Stadtmodells immer abhängig von der Verfügbarkeit und der Qualität der Grundlagendaten ist, sind allgemeingültige Festlegungen nicht möglich. Die Anforderungen an die Modelldaten werden durch einen individuell erstellten Anforderungskatalog speziell auf jedes Modell zugeschnitten. Nicht zuletzt spielen bei der Definition der Anforderungen die zur Verfügung stehenden Ressourcen eine wichtige Rolle.

Richtlinien, die für den Aufbau des historischen Modells für Potsdam festgelegt wurden, sind in Tab. 3.1 zusammengefasst. Anhand dieser Aufstellung lassen sich weitere Überlegungen für die Modellkonzeption ableiten. Besonders für die Verwaltung temporaler Eigenschaften müssen konkrete Vorüberlegungen getroffen werden, wie diese effektiv zu verwalten sind

(s. Kapitel 3.2.3). Auch für die Metadatendokumentation (Kapitel 3.2.4) sollte festgelegt werden, welche Inhalte von besonderer Relevanz sind und wie diese gespeichert und zur Verfügung gestellt werden können. Aufgrund der historischen Datengrundlage muss mit Unsicherheiten bei der Erfassung von Sachinformationen gerechnet und überlegt werden, wie im Falle von Datenlücken und Ungewissheiten zu verfahren ist (Kapitel 3.2.5).

Tab. 3.1 Anforderungskatalog an das historische Stadtmodell

Anforderung	Spezifizierung
1 Thematische Modellinhalte	
<ul style="list-style-type: none"> ◦ Historische Stadtsituation in virtueller Umgebung ◦ Historische 2D-Fachdatenlayer als ◦ Rasterdaten 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Historisches DHM, 3D-Gebäudemodelle in verschiedenen Detaillierungsgraden (s. 2); Stadtmobilar, Einzelobjekte (landmarks), Vegetationsobjekte ⇒ Flächennutzung, Gewässer, Vegetation, Transport ⇒ georeferenzierte historische Karten
2 Sachinformationen	
<ul style="list-style-type: none"> ◦ Gebäudespezifische Eigenschaften ◦ Eigenschaften der Umwelt ◦ Eigenschaften von Stadtmöbeln, Einzel- und Vegetationsobjekten 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Klasse, Nutzung, Baujahr/Abrissjahr, Anzahl der Stockwerke, Dachform; weitere relevante Attribute auf Grundlage hist. Materialien ⇒ Klasse, Funktion, Nutzung; weitere relevante Attribute auf Grundlage ⇒ Klasse, Funktion
3 Detaillierungsgrad	
<ul style="list-style-type: none"> ◦ LOD1, gemäss CityGML ◦ LOD2, gemäss CityGML 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Blockmodell der Gebäude für das gesamte Untersuchungsgebiet ⇒ Gebäudemodelle mit Dachaufbauten und spezifische Fassadenanbauten sowie Fassadentexturierung für das Gebiet um den Alten Markt
4 Datenverwaltung	
<ul style="list-style-type: none"> ◦ Gewährleistung von Modifizierung, Aktualisierung und Fortführung von Geometrien/Sachdaten ◦ Standardisierte und spezifische Attributkodierung ◦ Speicherung der Gültigkeitsdauer temporaler Objekteigenschaften ◦ effiziente Verwaltung und Speicherung georeferenzierter Rasterdaten ◦ Dokumentation von Metadaten 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ gängige Datenformate ⇒ CityGML-konform und individuelles Attributschema ⇒ Zeitstempel (Tupelprägung) ⇒ Rasterkatalog als Datencontainer ⇒ Metadatenkatalog
5 Visualisierung	
<ul style="list-style-type: none"> ◦ LOD1: Blockmodell mit thematischer Rasterdaten und 2D-Fachdatenlayer für analytische Visualisierung ◦ LOD2: realistisches Erscheinungsbild für explorativen Einsatz 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ synthetische Texturierung von 2D-Flächen, prototypische 3D-Symbole für wichtige Vegetations- und Einzelobjekte ⇒ photorealistische Texturierung von Gebäuden und Landmarks auf Grundlage hist. Fotografien; prototypische Texturierung von Stadtmöbeln, Vegetations- und Einzelobjekten; spezifische Texturierung von Umweltflächen
6 Bereitstellung	
<ul style="list-style-type: none"> ◦ offene Visualisierung und Explorationsmöglichkeit für Dritte ◦ Bereitstellung für Drittanwender 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Darstellung in webbasierten 3D-Viewer (bspw. Google Earth) ⇒ Interoperables Austauschformat (CityGML)

3.2.2 Verwaltung temporaler Daten

Schon bei der Konzeptionsplanung zur digitalen Rekonstruktion der Potsdamer Innenstadt ist es nötig, sich mit der Problematik der Speicherung des Zeitbezugs thematischer Gebäudeinformationen auseinanderzusetzen. Zwei grundlegende Anforderungen sprechen gegen die Erzeugung eines reinen *Snapshot*-Datenmodells:

- Gewährleistung der Modifizier- und Erweiterbarkeit des Datenmodells: Es soll kein definierter zeitlicher Zustand rekonstruiert, sondern Veränderungen von Eigenschaften innerhalb der Datenbank verwaltet werden.
- Speicherung thematischer Attribute: Aufgrund heterogener Datenquellen muss mit unterschiedlichen Zeitbezüge für die jeweiligen Eigenschaften gerechnet werden.

Diese Anforderungen verlangen die Implementierung eines *Historischen Datenmodells*, welches über die *Gültigkeitsdauer* von Eigenschaften durch Einführung von Zeitprägungen in der Datenbank Auskunft gibt (vgl. Kapitel 2.3.3). Um die Erweiterbarkeit zu gewährleisten, sollten sämtliche zeitabhängige Eigenschaften in externen Tabellen verwaltet werden (vgl. Kapitel 2.2.5).

Für das Untersuchungsgebiet könnten dabei folgende temporale Eigenschaften relevant sein:

- Gebäudekategorie (Klasse)
- Gebäudefunktion
- Adresse (Strassennamen und Hausnummern verändern sich nach 1949)
- Denkmalschutz (wann wurde das Gebäude unter Denkmalschutz gestellt)
- Bewohner (bspw. wann regierte Friedrich Wilhelm I. im Stadtschloss)
- Zerstörung (wann wurde das Gebäude wie stark beschädigt und durch welchen Einfluss)

Eine Möglichkeit der Speicherung dieser Eigenschaften, für die jeweils eine eigene Entitätsklasse gebildet werden muss, wird in Abb. 3.4 als UML-Diagramm dargestellt.

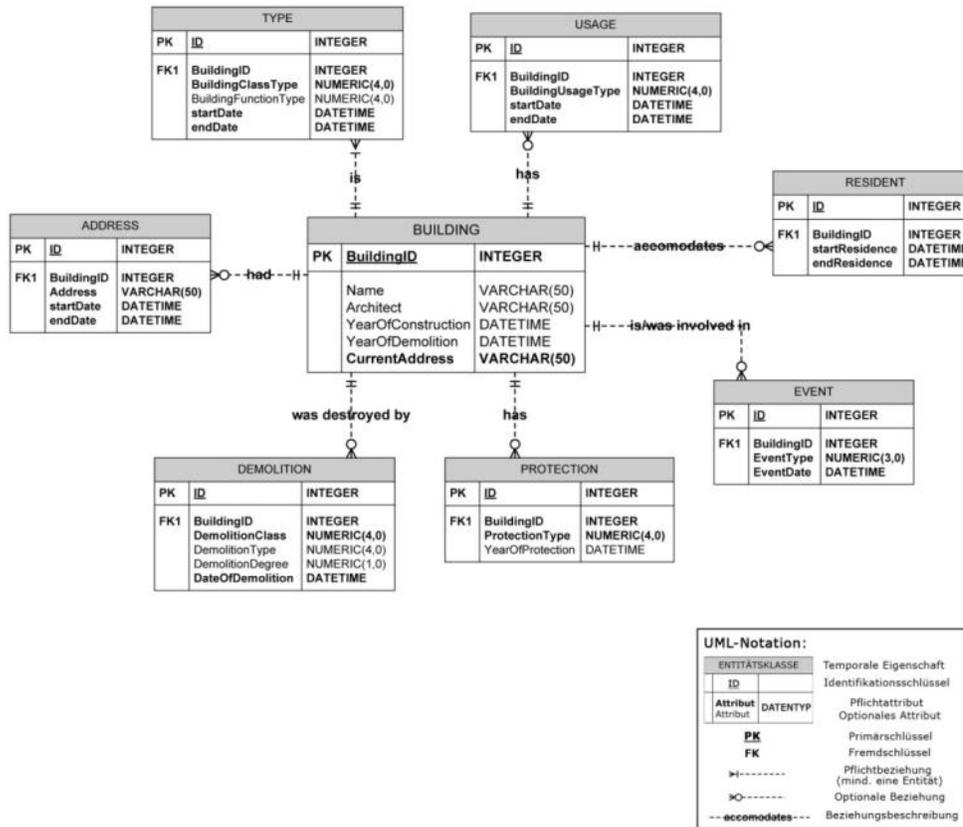


Abb. 3.4 Konzeptionelles Schema zur Speicherung temporaler Objekteigenschaften für Potsdam.

Zu jeder Eigenschaft wird der Gültigkeitszeitraum als Zeitstempel in einem Attribut mit Datentyp DATE/TIME verwaltet. Eigenschaftsmerkmale werden entsprechend der CityGML-Standardattributierung (bspw. BuildingClassType, BuildingUsageType) bzw. der in Tab. 2.3 vorgeschlagenen generischen Attributdefinition gespeichert. Die Eigenschaftsmerkmale der jeweiligen Entitätsklasse sind je nach Bedeutung obligatorisch oder optional zu speichern. Während einige temporale Eigenschaften für alle Gebäude gelten (bspw. TYPE), sind andere Eigenschaften nur für bestimmte Gebäude relevant (bspw. DEMOLITION).

Die Nachteile der Datenredundanz und vertikalen Anomalie (vgl. Kapitel 2.2.5) lassen sich bei diesem Aufbau nicht verhindern, können aber zugunsten der leicht zu handhabenden und einfach strukturierten Datenverwaltung in Kauf genommen werden. Dies ist ein wichtiger Punkt bei der Fortführung, um eine Datennachhaltigkeit zu gewährleisten. Ebenso lassen sich anhand dieser Datenstruktur Eigenschaftsanalysen mittels Abfragesprachen relativ einfach durchführen.

Dieses Modell gilt als theoretische Lösung für die Implementierung eines temporalen Datenmodells für Potsdam. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird aufgrund der begrenzten

verfügbaren Informationen auf eine vereinfachte Datenverwaltung zurückgegriffen, welche in einer einzelnen Objekttable alle thematischen Informationen verwaltet (s. Kapitel 4.2.2).

3.2.3 Dokumentation von Metadaten

Die Speicherung von Metainformationen ist aufgrund der spezifischen Entstehungsgeschichte des Modells und der Einmaligkeit der Daten unerlässlich. Bei der Verwendung des Modells durch Dritte kommt es zu einem erheblichen Werteverlust, wenn nicht nachvollzogen werden kann, welche Inhalte das Modell bietet und auf welcher Basis und zu welchem Zweck die Daten erstellt wurden. Um Problemen bei einem Datenaustausch oder der Weiterführung des Datenmodells entgegenzuwirken sowie einen zweckgemäßen Einsatz zu gewährleisten, müssen deshalb alle die Daten betreffenden Informationen in Form eines Metadatenkatalogs zur Verfügung gestellt werden. Dieser gibt Auskunft über Art, Verfügbarkeit und Qualität der Daten und sollte mindestens folgende semantischen Informationen beinhalten:

- Allgemeine Angaben über den Datensatz:
Dateninhalt (LOD), Räumliche Ausdehnung, Zeitpunkt der Erstellung, Name des Bearbeiters, zeitlicher und räumlicher Bezug, Anzahl der Objekte, Modellkomponenten, Datenformat
- Genauigkeitsangaben:
Positionsgenauigkeit in Lage/Höhe (Genauigkeit von 3D-Koordinaten), semantische Genauigkeit, Vollständigkeit, Zuverlässigkeit/Korrektheit der Attribute, Temporale Konformität, Logische Konsistenz
- Attributschema
- Hinweise auf Primär- und Sekundärquellen.

Für den Zweck dieser Arbeit würde eine tabellarische Metadatenverwaltung in Form eines Textdokuments genügen. Bei Publikation und der Bereitstellung im Internet bspw. durch einen *Web Feature Service (WFS)* innerhalb einer *3D-SDI (Spatial Data Infrastructure)* reicht diese Verwaltungsmethode nicht aus. In diesem Fall wäre die Metadatenverwaltung durch ein geeignetes Portal oder ein *Metainformationssystem (MIS)* gemäss dem ISO19115 Metadatenstandard für Geografische Informationen sinnvoll, über das ein potentieller Nutzer anhand normierter Metadatenattribute sofort erkennen kann, ob die Daten für ihn relevant sind. Der Zugriff auf das *MIS* kann dann über eine *Catalog-Service-Schnittstelle (CS-W)* realisiert werden. Dabei sind die Inhalte des ISO19115-Standards hauptsächlich auf 2D-Daten ausgerichtet, eine Erweiterung des Standards für die

Metadatenbeschreibung von 3D-Stadtmodellen ist Gegenstand aktueller Untersuchungen und wird in Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen (vgl. DIETZE et al., 2007).

3.2.4 Umgang mit Datenlücken und Unsicherheiten

Bei der Verwendung historischer Grundlagen als Datenbasis muss mit Datenunsicherheiten und fehlenden Informationen gerechnet werden. Können diese Unsicherheiten durch Hinzuziehen von Vergleichsmaterial oder die Konsultation von Fachleuten nicht behoben werden, muss eine Dokumentation der Unsicherheiten erfolgen, um den Nutzer darauf hinzuweisen, dass es sich um Informationslücken handelt. Während Metadaten Auskunft über allgemeine, den gesamten Datensatz betreffende Informationen über Verlässlichkeiten und Genauigkeiten geben, müssen konkrete Fälle von Datenlücken direkt im Datensatz dokumentiert werden.

Fehlen bspw. Informationen zu bestimmten Gebäudeeigenschaften, so sollten diese durch spezielle Attributwerte in der Datenbank dokumentiert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass eindeutig nachvollziehbar ist, welche Daten noch nicht erhoben wurden oder sich im Bearbeitungsprozess befinden (bspw. Leereintrag „NULL“) und für welche Daten keine Informationen zur Verfügung stehen (bspw. „9999“). Anhand dieser Unterscheidung kann jederzeit nachvollzogen werden, für welche spezifischen Gebäude Daten fehlen.

Da das historische Modell texturiert werden soll, kann es passieren, dass für bestimmte Objekte keine Texturierungsvorlagen verfügbar sind. Um das homogene Gesamtbild nicht durch Texturierungslücken zu stören, sollten diese möglichst durch synthetische Texturen geschlossen werden. Dabei muss konkret beim Bearbeitungsprozess abgeschätzt werden, welche Methode und Vorlage sich am besten eignet und das visuelle Empfinden des Betrachters am wenigsten stört.

Während Lückenschliessung durch Interpretation oder das Einbinden nicht-originaler Daten für den Visualisierungszweck durchaus vertretbar ist, sollte bei der Attributverwaltung darauf verzichtet werden, da sie den Wahrheitsgehalt der Daten verfälschen. Thematische Abfrageergebnisse würden unzuverlässige Ergebnisse liefern, die wiederum die Verwendung des Modells als Analysewerkzeug und damit dessen Einsatz bei fachspezifischen Fragestellungen einschränken. Unsicherheiten und Lücken in der Datenbank sollten deshalb durch Attributkodierung dokumentiert werden.

4 VORBEREITENDE ARBEITSSCHRITTE

Vor der praktischen Umsetzung sind einige vorbereitende Arbeiten erforderlich. Ein erster Schritt ist die Datenrecherche. Diese wurde vor Beginn der Modellkonzeption durchgeführt, um sich einen Überblick zu verschaffen, welche Daten existieren und inwieweit eine praktische Durchführung überhaupt möglich ist. Nachdem in Erfahrung gebracht wurde, ob diese Daten verfügbar sind (einige historische Materialien werden aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit der Öffentlichkeit nicht oder nur unter hohem Kostenaufwand zur Verfügung gestellt), folgen Datenakquise und Datenanalyse; diese sind in Kapitel 4.1 beschrieben. Im Kapitel 4.2 werden die Methoden aufgeführt, mit welchen die konkrete Umsetzung der Aufgabenstellung erfolgen soll. Die Methoden sind abhängig von den Eigenschaften der Basisdaten und den zur Verfügung stehenden Werkzeugen bzw. Softwarekomponenten.

Ein weiterer vorbereitender Arbeitsschritt ist die Überführung des analogen Kartenmaterials in eine digitale Form sowie dessen Georeferenzierung in einem einheitlichen Referenzsystem, um eine einheitliche räumliche Basis für die heterogenen Quellen zu garantieren. In Kapitel 4.3 werden das für die Modelldaten definierte Bezugssystem beschrieben sowie die angewendeten Georeferenzierungsmethoden und die erreichten Genauigkeiten aufgeführt.

4.1 Datenakquise und Analyse der Basisdaten

Für die in Kapitel 3.1 definierten Modellkomponenten müssen geeignete Basisdaten beschafft werden, aus denen die einzelnen Komponenten rekonstruiert und die historischen Informationen extrahiert werden können. Vor der Datenbeschaffung sollte ein Anforderungskatalog erstellt werden, der die notwendigen Informationen auflistet, um entsprechende Daten zu akquirieren. Dieser Katalog definiert ebenso die Qualitätsansprüche, die an das Basismaterial gestellt werden, um den Anforderungen an das Modell gerecht zu werden. Sind die notwendigen Daten zusammengetragen, kann anhand der verzeichneten Materialeigenschaften – wie Format, Zustand und Inhalt – einerseits bestimmt werden, welche Verarbeitungsschritte notwendig sind, um die Basisdaten für die Datengewinnung aufzubereiten. Andererseits wird ersichtlich, welche thematischen Informationen aus der jeweiligen Quelle erfasst werden können, die dann als Attribute zu den einzelnen Objekten gespeichert werden.

4.1.1 Notwendige Basisinformationen

Um eine gezielte Datenakquise durchzuführen, ist eine Auflistung der benötigten Grundlageninformationen hilfreich, aus denen die einzelnen Modellkomponenten entsprechend der

Definition für 3D-Stadtmodelle (s. Kapitel 2.1.1) und dem Anforderungskatalog für das historische 3D-Stadtmodell Potsdam (Tab. 3.1) erfasst werden. Anhand dieser Auflistung wird gewährleistet, dass bei der Datenbeschaffung alle notwendigen Informationen berücksichtigt werden. Andererseits hilft diese Liste, nicht mehr Material als nötig anzusammeln:

Tab. 4.1 Bestimmung der notwendigen Basisinformationen zur Erfassung der Modellkomponenten

Modellkomponenten für das historische 3D-Stadtmodell Potsdam	Notwendige Informationen und Daten zur Rekonstruktion
- Blockmodelle der Gebäude (LOD1)	- Gebäudegrundrisse mit Traufhöhen
- Ausdifferenzierte Gebäudemodelle (LOD2) mit Dachaufbauten und wesentlichen gebäudespezifischen Merkmalen	- Gebäudegrundrisse, Dachform, Firsthöhe, Anbauten
- Texturierung der Gebäude und Umwelt	- Fassadenfotografien, andere Fototexturen, synthetische 2D- und 3D-Texturen
- Stadtmöbel, repräsentative Einzelobjekte, Landmarks	- Standort, Klassifizierung, konkretes Erscheinungsbild
- Umweltinformationen	- Flächennutzung, Hydrologie, Transport, Vegetation, Geländemodell
- Objektspezifische Attribute	- Objektklasse, -nutzung, -funktion, sonstige sachbezogene Informationen
- Temporale objektspezifische Informationen	- „Lebensdauer“ eines Objekts (Baujahr, Abrissjahr), Gültigkeitszeitpunkt thematischer Informationen

Der angestrebte Detaillierungsgrad der Gebäudemodelle (LOD1, LOD2) bestimmt dabei die Genauigkeitsansprüche an die Basisdaten. Daten, die aufgrund ihres Generalisierungsgrades bzw. Maßstabs die geforderten Genauigkeiten nicht einhalten, sind für den Zweck der Arbeit nur bedingt geeignet. Dies gilt insbesondere für historisches Kartenmaterial, dessen Genauigkeit unter anderem von folgenden vier Faktoren abhängt (HAAKE & GRÜNREICH, 1994):

- der geodätischen Grundlage,
- der Genauigkeit der Einzelerfassung (bspw. durch Vermessung),
- dem Grad der Generalisierung,
- den technischen Vorgängen bei der Kartenproduktion.

Die geometrische Lagegenauigkeit von Grundrissangaben wird dabei im Durchschnitt mit etwa $\pm 0,25$ mm angegeben. Um den geforderten Genauigkeitsansprüchen gemäß CityGML gerecht zu werden, kann der maximale Kartenmaßstab für die Erfassung der Objekte

(bspw. Gebäudegrundrisse) darum wie in Tabelle 4.2 aufgeführt festgelegt werden. Anhand dieser Anforderungsdefinitionen kann eine gezielte Datenrecherche erfolgen.

Tab. 4.2 Maximal zulässiger Maßstab historischer Karten für die Einhaltung von geometrischen Genauigkeiten bei der Objekterfassung

	LOD1	LOD2
Geforderte Punktgenauigkeit (Lage/Höhe)*	5/5m	2/2m
Geometrische Lagegenauigkeit $\pm 0,25$ mm	5m = 0,25mm	2m = 0,25mm
Maximaler Kartenmaßstab	1:20000	1:8000

* gemäß CityGML (vgl. Kapitel 2.3.1)

4.1.2 Beschaffung der Basisdaten

In verschiedenen Institutionen und Archiven sowohl im Land Brandenburg als auch bundesweit wurden anhand der Anforderungsliste in Tab. 4.1 historische Materialien recherchiert und zusammengetragen. Der Prozess der Datenakquise erstreckte sich über mehrere Monate, da die Daten teilweise vor Ort gesichtet und auf ihre Eignung geprüft werden mussten. Sämtliche Basisdaten lagen in der zuständigen Verwaltungsstelle in analoger Form vor. Nach der Sondierungsphase folgte ein Antrag auf Vervielfältigung der Materialien; bis zur Aushändigung der Daten vergingen dann teilweise mehrere Wochen. Die Aushändigung erfolgte entweder als Papierkopie; in einem einzigen Fall konnten die Daten als Rasterdatei übermittelt werden. Überwiegend handelte es sich bei den Materialien um Originalexemplare.

Neben kartografischen und photogrammetrischen Materialien, welche für die Rekonstruktion der historischen Objektgeometrien benötigt wurden, beinhaltete die Datenrecherche das Auffinden und Zusammentragen von Basisdaten, die sowohl die historische Stadtsituation als Gesamtdarstellung abbilden als auch Sachinformationen zu den Objekten beinhalten. Dazu zählten u. a. Fachliteratur, Bildbände und Sachtexte sowie historische Ansichten und Gemäldeabbildungen (s. Quellverzeichnis Basisdaten). Diese waren teilweise nur über Antiquariate erhältlich, dementsprechend gestaltete sich der Recherche- und Kostenaufwand. Ebenso waren das Internet und verschiedene themenspezifische Webseiten (bspw. Architekturforen) hilfreiche Informationsquellen.

Einen besonderen Stellenwert nahmen dabei Gemarkungskarten (historische Liegenschaftskarten) aus dem Jahr 1878/79 ein, welche als Originaldrucke in einziger Ausführung bei der Stadtverwaltung Potsdam, Fachbereich Kataster und Vermessung (<http://www.potsdam.de/cms/ziel/27314/DE/?c=41935&typ=11,10,70&list=J&limit=J&topic=41935&btotol=J>), archiviert werden. Das Brandenburgische Landesamt für Denkmal-

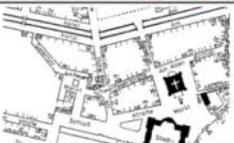
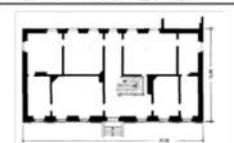
pflege und Archäologisches Landesmuseum (BLDAM, <http://www.bldam-brandenburg.de>) in Wünsdorf konserviert und archiviert terrestrische, photogrammetrische Aufnahmen („Messbilder“) aus den Anfängen des 20. Jh. auf Glasplatten. Die Recherche nach historischen Luftbildern führte in die Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg in Potsdam (<http://www.geobasis-bb.de/>), in der militärische Aufklärungsflugbilder aus dem Zweiten Weltkrieg verwaltet werden. Dort findet man u. a. Luftbildaufnahmen, welche die Stadt Potsdam wenige Stunden vor und nach der Bombardierung dokumentieren. Der GSV Städteatlas Verlag in Altenbeken (<http://stadtgeschichte.de/index.php?action=imp>) spezialisiert sich auf den Vertrieb von historischen Stadtplänen, welche die Stadtgeschichte deutscher Städte von der Gründung bis zur Neuzeit dokumentieren.

Da es innerhalb des Untersuchungsgebiets noch Altbestand an historischen Gebäuden gibt, sollten diese nicht neu konstruiert, sondern aus vorhandenen Daten extrahiert und in das Modell eingebunden werden. Weiterhin wurden aktuelle Datensätze für die Georeferenzierung der historischen Daten sowie für Qualitätsüberprüfungen benötigt. Diese Daten wurden von unterschiedlichen Einrichtungen (Hasso-Plattner-Institut Potsdam, Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, Technische Universität Berlin, Stadtverwaltung Potsdam) für den Zweck der Arbeit kostenlos zur Verfügung gestellt.

4.1.3 Eigenschaften des Datenmaterials

Tabelle 4.3 zeigt die für die praktische Durchführung zur Verfügung stehenden historischen Materialien, deren Charakteristiken sowie deren Informationsgehalte und einen beispielhaften Ausschnitt.

Tab. 4.3 Eigenschaften der Basisdaten

Bezeichnung	Bezugsjahr	Maßstab/ Boden- auflösung	Bezugsquelle	Trägermaterial des Originals/ Format	Qualität der Kopie	Ableitbare Informationen	Ausschnitt
Gemarkungskarte	1878/79	1:625	Stadtverwaltung Potsdam	Papier	schlecht	Gebäudeumrisse, Gebäudeaufteilung, Liegenschaftsgrenzen	
Stadtplan	1878/79	1:2.500	GSV Städteatlas Verlag Altenbeken	Papier	sehr gut	Gebäudeumrisse, zeitbezogene Gebäudenutzung	
Urkarte	1911	1:2.500	Stadtverwaltung Potsdam	Papier	schlecht	Eigennamen	
Zerstörungskarte	um 1960	ca. 1:5.000	Stadtverwaltung Potsdam	Cromalin	mässig	Zerstörungsgrad pro Gebäude	
Schadenplan	1945	ca. 1:10.000	[Qu5]	Papier	sehr gut	Zerstörungsgrad pro Gebäude	
Adressplan	1945	ca. 1:10.000	[Qu5]	Papier	sehr gut	Strassennamen, Hausnummern vor 1945	
Architektur- zeichnungen	1850-1900	1:250 - 1:500	[Qu3], [Qu5]	Papier	sehr gut	Gebäudegrundrisse, - aufrisse	
Messbilder	1911/1912	individuell	Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum	Glas	mässig	Fassadentexturen, Traufhöhe, historische Gebäudenutzung	
Fassadenfotografien	1911-1940	individuell	Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum, [Qu5]	Papier	gut	Fassadentexturen, Traufhöhe, historische Gebäudenutzung	
Sonstige Abbildungen	1900-1945	kein(e)	[Qu2], [Qu3], [Qu4], [Qu5], [Qu6], [Qu7]	Papier	gut	Stadtmobilar, Vegetation	
Historisches Luftbild	1944	1:9.000	Landes- und Geobasisinformation Brandenburg	TIFF	gut bis sehr gut	Gebäudeumrisse, Dachformen, Transportsystem, Vegetation, Gewässernetz	

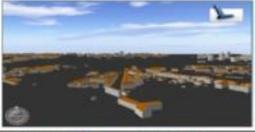
Für ein besseres Verständnis der Datensituation werden im Folgenden die Materialien und deren Besonderheiten kurz erläutert.

- Gemarkungskarte 1878/79:
Historische, großmaßstäbige Flurkarten (1:625), entstanden durch vermessungstechnische Verfahren. Enthalten Gebäudeumrisse, Flurgrenzen und Straßennamen. Starke alters- und lagerungsbedingte Abnutzungserscheinung: Papier gewellt, beschrieben, vergilbt und eingerissen. 9 Kartenblätter umfassen das Untersuchungsgebiet. Keine Koordinaten. Erhalten als Fotokopie (A1).
- GSV Stadtplan 1878/79:
Farbdruck (1:2500). Zeigt historische Stadtsituation, basierend auf den Gemarkungskarten. Enthält Gebäudeumrisse, Flurgrenzen, Gewässernetz, Vegetation sowie öffentliche Gebäude und Eigennamen. Sehr gute Qualität. Keine Koordinaten. Erhalten als originaler Neudruck (ca. A1).
- Urkarte 1911:
Original historische Liegenschaftskarte (1:2500). Aufnahmeverfahren unbekannt. Enthält Gebäudeumrisse, Flurgrenzen, Flurstücksnummern, Eigennamen und Gewässer. Starke alters- und lagerungsbedingte Abnutzungserscheinung: Papier gewellt, beschrieben, vergilbt und eingerissen. 2 Kartenblätter. Keine Koordinaten. Erhalten als Fotokopie (A2).
- Zerstörungskarte 1960:
Wahrscheinlich Cromalinkopie (ca. 1:5000). Herkunft unbekannt. Enthält Stadtsituation um 1960 sowie handschriftlich vermerkten Zerstörungsgrad pro Gebäude. Bereich in der Innenstadt durch Beschriftung schlecht erkennbar. Enthält Gitternetz, aber keine Koordinaten. Erhalten als Fotokopie (ca. A2).
- Schadenplan 1945:
Abbildung in [Qu5]. Enthält Zerstörungsgrad nach der Bombardierung 1945 pro Gebäude.
- Adressplan vor 1945:
Abbildung in [Qu5]. Enthält Straßennamen und Hausnummern vor 1945.
- Architekturzeichnungen:
Abbildungen in [Qu3] und [Qu5]. Enthalten Gebäudegrundrisse und Aufrisse im Maßstab 1:250 bis 1:500 auf Grundlage von historischen Bauakten (Acta Specialia, <http://www.potsdam.de/cms/beitrag/10003742/27314/>).
- Messbilder 1910/1911:
Originalaufnahmen auf Glasplatten. Photogrammetrische Bauaufnahme für Dokumentationszwecke in der Denkmalpflege. Zeigen historische Gebäudefassaden

- aus unterschiedlichen Perspektiven. Innere und äußere Orientierung nicht bekannt. Erhalten als Kontaktabzüge (13x13cm²).
- Fassadenfotografien (1911-1940):
Fotografische Abbildungen aus diversen Quellen. Herkunft oftmals unbekannt. Maßstab variiert. Erhalten als Kontaktabzüge (9x13cm²).
 - Sonstige Abbildungen (1900-1945):
Abbildungen aus diversen Quellen. Herkunft oftmals unbekannt. Enthalten historische Panoramaansichten und Straßenzüge.
 - Historisches Luftbild (19.04.1944):
Militärische Einzelluftbildaufnahme (ca. 1:9000). Aufgenommen von britischen Alliierten zu Aufklärungszwecken. Sehr guter Kontrast, gute Qualität. Filmmaterial, Bodenauflösung, innere und äussere Orientierung nicht bekannt. Stadtzentrum liegt ungefähr in der Bildmitte, geringe Parallaxe innerhalb des Untersuchungsgebiets. Vegetation noch unbelaubt. Schlagschatten lassen Aufnahmezeitpunkt am frühen Vormittag vermuten. Erhalten als nicht georeferenzierte Rasterdatei im TIFF-Format mit 1200 dpi Scanauflösung.

Tabelle 4.4 gibt einen Überblick über den zur Verfügung gestellten aktuellen Datenbestand sowie frei verfügbare Daten zu Zwecken der Kontrolle und Qualitätsprüfung.

Tab. 4.4 Eigenschaften der Referenz- und Kontrolldaten

Bezeichnung	Bezugsjahr	Maßstab/ Boden- auflösung	Bezugsquelle	Trägermaterial des Originals/ Format	Ableitbare Informationen	Ausschnitt
Digitales Höhenmodell	2007	3m ²	Hasso-Plattner-Institut Potsdam	ESRI Grid	aktuelle Geländehöhen	
3D Stadtmodell	2007	kein(e)	Hasso-Plattner-Institut Potsdam	GML, 3DS	aktuelle Gebäudemodelle LOD3	
Digitale ALK	2007	abhängig vom Erfassungs- maßstab	Hasso-Plattner-Institut Potsdam	Shapefile	aktuelle Gebäudeumrisse, Traufhöhen	
Digitales Orthophoto	2009	1:27.800	Landes- und Geobasisinformation Brandenburg	JPG	aktuelle topografische Situation	
LOD3-Modelle	2010	1:1	Google Sketchup 3D Warehouse, Hasso-Plattner-Institut Potsdam	SKP, GML	ausdifferenzierte, texturierte 3D-Modelle ausgewählter historischer Bauten	

Aus der Übersicht wird deutlich, dass eine Vielzahl an informationsreichen Ausgangsmaterialien vorlag, anhand derer sowohl eine geometrische Rekonstruktion der Stadtobjekte als auch die Identifizierung und anschließende Integration von Sachinformationen möglich sein sollte.

4.2 Methoden und Werkzeuge

In diesem Abschnitt werden die in der praktischen Umsetzung angewandten Methoden der Datenverarbeitung erläutert und auf die zur Verfügung stehenden Softwareressourcen eingegangen. Es folgt eine kurze Beschreibung der Eigenschaften und Funktionen der jeweiligen Software und eine Übersicht darüber, bei welchem Verarbeitungsschritt welche Softwarekomponente während des Arbeitsprozesses zum Einsatz kam.

4.2.1 Festlegung der Verarbeitungsmethoden

Anhand der Eigenschaften und des Informationsgehalts des Ausgangsmaterials lassen sich die notwendigen Verarbeitungsschritte und die Art der Datenverwaltung spezifizieren, welche in Tabelle 4.5 dargestellt werden.

Tab. 4.5 Methoden der Basisdatenerfassung und -verwaltung für das historische 3D-Stadtmodell Potsdam

	Objekt-geometrien	Objekt-eigenschaften	Höhen-information	Gültigkeitsdauer der Objekteigenschaften	Texturen
Erfassungsmethode	Digitalisierung	Interpretation der Basisdaten	Interpretation der Basisdaten	abgeleitet aus Aufnahmezeitpunkt der Basisdaten	Scan
Datenpräsentation	Vektor	Attribut	Attribut	Attribut	Raster
Speicherformat	shp	dbf	dbf	dbf	jpg, tiff, png

- Erfassung und Verwaltung der Objektgeometrien:
Da für die fotografischen Aufnahmen (Messbilder, historisches Luftbild) die Aufnahmeparameter (innere und äussere Orientierung) nicht bekannt sind, kann keine photogrammetrische Auswertung durchgeführt werden. Ebenso liegt das Luftbild nur als Einzelaufnahme vor, so dass keine Stereoauswertung möglich ist, um die Gebäudehöhen und –geometrien zu erfassen. Demnach müssen die Objektgeometrien durch alternative Methoden, z. B. Digitalisierung, rekonstruiert werden. Dazu dienen sowohl das Kartenmaterial als auch das historische Luftbild.
- Erfassung und Verwaltung von Objekteigenschaften:
Die Objekteigenschaften lassen sich durch Interpretation oder Übertragung aus den verschiedenen Quellen ableiten. Diese gelten dabei immer nur für den jeweiligen Zeitpunkt der Aufnahme. Da es sich bei den Sachdaten zwar um temporale Eigen-

schaften handelt, eine zeitliche Veränderung aber anhand der vorliegenden Materialien nicht nachvollziehbar ist, können diese Eigenschaften als Objektattribute direkt in der Datenbasis gespeichert werden.

- Verwalten der Gültigkeitsdauer:
Gleiches gilt für den Gültigkeitszeitraum, der als zusätzliches Attribut verwaltet werden kann (bspw. „VALID“). Diese Methode sollte allerdings nur als temporäre Zwischenlösung im Rahmen dieser Arbeit angesehen werden. Bei einer Weiterführung der Daten wird eine Implementierung gemäß Kapitel 3.2.2 empfohlen.
- Erfassung und Verwaltung von Texturen:
Messbilder und andere fotografische Abbildungen lassen sich für die Texturierung der Gebäudefassaden und zur Interpretation von Objekteigenschaften (bspw. Straßenbelag, Dachform, Anzahl der Stockwerke, Nutzung) heranziehen. Um die Abbildungen als Texturen verwenden zu können, müssen sie zuvor digital aufbereitet werden (Scan, Bildbearbeitung).

4.2.2 Erstellen eines Attributschemas

Die Objekteigenschaften sollen den Objektgeometrien gleich bei deren Erfassung als Sachattribute zugewiesen werden. Abhängig von der Verfügbarkeit der Informationen wurden entsprechend der CityGML-Implementierungsvorschrift Standardattribute übernommen und die Kodierung gemäß der Vorschrift vorgenommen (vgl. Tabelle 4.6). Da CityGML für den Austausch und die Beschreibung aktueller Stadtmodelle entwickelt wurde, sind im Standard keine Attribute für die Speicherung historisch relevanter Informationen vorgesehen (vgl. Kapitel 2.3.4). Aus diesem Grund wurden zusätzlich zu den Standardattributen generische Attribute definiert, die für das Untersuchungsgebiet eine Rolle spielen. Dabei werden auch Attributwerte für Datenlücken und –unsicherheiten (vgl. Kapitel 4) berücksichtigt. Tabelle 4.6 gibt eine Übersicht über die im Modell gespeicherten Attribute sowie die Kodierung der jeweiligen Werte.

Tab. 4.6 Gebäudespezifisches Attributschema für das Untersuchungsgebiet

Gebäudespezifische Eigenschaften	Attributname	Kodierung
BuildingClassType*	Klasse	CityGML C.1 Code "Building"
BuildingFunctionType*	Funktion	CityGML C.1 Code "Building"
RoofType*	typDach	CityGML C.1 Code "RoofTypeType"
measuredHeight*	zTrauf	Zahl in m, gerundet auf 0.25 Meter
storeysAboveGround*	oStockw	Anzahl der oberirdischen Stockwerke
yearOfConstruction	jahrBau	Jahreszahl
yearOfDemolition	jahrAbr	Jahreszahl
<i>Strassenname*</i>	strName	Name
<i>Hausnummer*</i>	gebNr	Nummer
<i>Name des Gebäudes*</i>	gebName	Name, Rufname
<i>Name des Architekten</i>	Architekt	Nachname
<i>Zerstörungsgrad 14.4.1945</i>	gradZerst	0 = erhalten, 1 = beschädigt und wiederhergestellt, 2 = beschädigt und abgerissen, 3 = vernichtet
<i>Rekonstruktionsrichtlinien</i>	Richtl	0 = Wiederaufbau nicht geplant, 1 = Leitbau, 2 = Leitfassade, 3 = Leitlinien als Gestaltungsvorhaben
<i>Kategorisierung Gebäudeteil*</i>	gebTeil	a = Hauptgebäude, b = Nebengebäude, c = Sonstige, dem Hauptgebäude zugehörige Gebäude, zz = nicht definiert
<i>Gültigkeitszeitpunkt der Attribute</i>	validAtt	Jahreszahl, 9999 = nicht bekannt

* Zeitvariables Attribut

CityGML Standardattribut: standardisierte Kodierung

Generisches Attribut: spezifische Kodierung

4.2.3 Arbeitsablauf

Durch Festlegung der Verarbeitungsmethoden sowie der Form der Datenhaltung und –verwaltung kann der vollständige Prozessablauf zur Erstellung des Modells definiert werden.

In Abbildung. 4.1 werden anhand eines UML-Ablaufdiagramms die einzelnen Arbeitsschritte zur Datenverarbeitung sowie die jeweiligen Modellkomponenten dargestellt, die als Produkte beim Verarbeitungsprozess entstehen.

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte kurz erläutert.

Vor Beginn der Arbeit müssen alle analog vorliegenden Karten, welche zur geometrischen Erfassung notwendig sein können, gescannt und anschließend über eine geeignete Georeferenzierungsmethode (Kapitel 4.3) in ein einheitliches Koordinatensystem gebracht werden, um anschließend die Digitalisierung der Objekte durchführen zu können. Digitalisiert werden sowohl die Gebäudeumrisse als auch alle Objekte, die die Umwelt (wie Vegetation, Transport, Gewässer und Nutzungsflächen) beschreiben. Dazu gehören auch Stadtmöbel und Einzelobjekte wie Denkmäler und Straßenlaternen. Aus den Basismaterialien werden jene Sachinformationen extrahiert, die als Attribute den Objekten zugewiesen werden sollen. Zuvor ist die Erstellung eines Attributschemas notwendig, welches die Attribute der jeweiligen Objektklasse definiert. Das Attributschema enthält auch die Kodierung der Attributwerte.

Für die Erstellung eines Blockmodells ist die Traufhöhe pro Gebäude wichtig, diese wird aus Fassadenabbildungen (Gebäudeaufrisse, Fotografien) gewonnen und den Gebäudegrundrissen zugewiesen. Aus diesen Informationen ist die Erzeugung eines Blockmodells durch Extrusion der Grundrisse um den gebäudespezifischen Höhenwert möglich.

Für die Feindetaillierung der Gebäude zu einem LOD2-Modell sind Informationen wie Dachform, evtl. individuelle Firsthöhe und prägnante Fassadenanbauten notwendig. Für die Visualisierung der Modellkomponenten werden die Messbilder als Fassadentextur verwendet, die Texturierung der Umweltobjekte und Stadtmöbel erfolgt entweder durch synthetische oder prototypische fotorealistische Texturen.

Um für die einzelnen Modellkomponenten eine Höhenbasis zu schaffen, soll das aktuelle Höhenmodell an die historischen Gegebenheiten angepasst werden.

Das fertige Stadtmodell integriert neben den rekonstruierten Komponenten auch aus unterschiedlichen Quellen (s. Tab. 4.4) zur Verfügung gestellte LOD3-Modelle, die für bestehende historische Altbestandsbauten existieren.

4.2.4 Verwendete Softwarekomponenten

Für die Verarbeitung der Daten standen unterschiedliche Softwarekomponenten zur Verfügung. Im Folgenden werden die Merkmale und Funktionen einer jeden Software kurz beschrieben.

- ESRI ArcGIS 10:

Die Desktop-GI-Softwarekomponenten der ESRI-Produktreihe werden für die Erfassung, Verwaltung, Analyse und Visualisierung von Geodaten in vielen öffentlichen und privaten Einrichtungen genutzt. Die Daten werden im Quasi-Standardformat Shape gespeichert und verwaltet; über eine direkte dbf-Anbindung als dBase-Format an die Objektgeometrien ist außerdem eine komfortable Sachdatenhaltung möglich. Sowohl für attributive als auch für räumliche Analysen von Geodaten stehen eine Vielzahl von Werkzeugen zur Verfügung; ebenso wird der Export in unterschiedliche Dateiformate unterstützt, u. a. nach CityGML. ArcGIS bietet neben den Modulen ArcMap und ArcCatalog zur Datenerfassung und –verwaltung mit ArcGlobe/ArcScene auch ein leistungsstarkes Werkzeug zur Visualisierung und Exploration von 3D-Geodaten.

- Adobe Photoshop CS2 Version 9.0.2:

Photoshop ist die bekannteste und mächtigste Software zur professionellen Bildbearbeitung und wird deshalb besonders für die Veredelung von (nicht räumlichen) Rasterdaten eingesetzt. Mit Hilfe von Photoshop lassen sich historische Fotografien für die Verwendung als Textur digital aufbereiten, ebenso bietet die Software umfangreiche Funktionen zur Erzeugung und Verarbeitung synthetischer Texturen.

- Google Sketchup 8:

Ist eine im Internet frei verfügbare Software zur Modellierung und Texturierung von 3D-Objekten. Über eine leicht bedienbare Benutzeroberfläche können komplexe 3D-Modelle erzeugt und in andere 3D-Beschreibungsformate (COLLADA, 3ds, KML) exportiert werden. Sketchup unterstützt geografische Koordinaten und bietet über das kml-Format den direkten Zugang zu Google Earth, so dass die erzeugten 3D-Modelle im virtuellen Globus zur Betrachtung und Exploration zur Verfügung gestellt werden können.

- Autodesk LandXPlorer Studio Professional 2009:

Ist besonders zur Visualisierung von 3D-Stadt- und Landschaftsmodellen geeignet und bietet eine Vielzahl von Import-/Export- und Konvertierungsmöglichkeiten. Dabei verarbeitet der LandXPlorer auch CityGML-Dateien und bietet den Export von Daten in das CityGML-Format an. Die Software unterstützt das Echtzeit-Rendering und gewährleistet dadurch eine performante Verarbeitung und Darstellung der Daten. Es werden sowohl Vektor- als auch Rasterdaten verarbeitet. Für die

Visualisierung von 3D-Stadtmodellen stehen unterschiedliche Effekte wie jahreszeitabhängige Beleuchtung zur Verfügung. LandXPlorer bietet auch zahlreiche Funktionen zur freien Navigation durch den Benutzer an.

- Google Earth Version 5.2.1:

Virtueller Globus zur Visualisierung und Exploration von Raster-, Vektor- und 3D-Daten. Die Daten werden im globalen geodätischen System WGS84 angezeigt und setzen auf ein flächendeckendes Höhenmodell mit 90m-Auflösung auf, welches aus SRTM-Daten (*Shuttle Radar Topography Mission*) gewonnen wird. Über das KML-Format (*Keyhole Markup Language*) können nutzer-eigene Daten eingelesen und gespeichert werden. Ebenso ist die Integration von georeferenzierten Fotos sowie der Eintrag von semantischen Informationen möglich. Zur Exploration stehen dem Benutzer außerdem eine Vielzahl von Werkzeugen zur Verfügung.

Tabelle 4.7 zeigt eine Übersicht über die im Rahmen der Arbeit verwendeten Softwarekomponenten sowie die einzelnen Einsatzbereiche im Zuge dieser Arbeit.

Tab. 4.7 Softwareeinsatz während des Arbeitsprozesses

Software	Einsatz
ESRI ArcCatalog	Datenverwaltung
ESRI ArcMap	Georeferenzierung der Rasterdaten, Digitalisierung, Attributierung, 2D- und Rasterdatenverarbeitung und -zusammenführung
ESRI ArcScene	Extrusion, 2D- und 3D-Datenzusammenführung, 3D-Visualisierung und -Exploration, attributive Analyse, Formatkonvertierung
Adobe Photoshop CS2	Bildbearbeitung, Erstellung von synthetischen Texturen
Google Sketchup 8	3D-Gebäudemodellierung, Fassadentexturierung, Formatkonvertierung nach CityGML
Autodesk LandXPlorer	3D- und 2D-Datenzusammenführung, -Visualisierung und -Exploration, Formatkonvertierung nach CityGML
Google Earth	3D-Datenvisualisierung, Exploration

4.3 Georeferenzierung der Basisdaten

4.3.1 Festlegung des Bezugssystems

Für die Erfassung der jeweiligen Stadtmodellkomponenten ist es wichtig, dass alle dafür benötigten Basisdaten mit demselben Raumbezug vorliegen. Für Brandenburg gilt im Kataster- und Vermessungswesen das Bezugssystem ETRS89. Um die Verwendbarkeit mit externen Datensätzen wie das aktuelle 3D-Stadtmodell oder Fachlayer zu garantieren, müssen die Datenkomponenten des Stadtmodells in das ETRS89-System überführt werden. Dies geschieht über eine Georeferenzierung anhand identischer Objektpunkte, die dem aktuellen Datenbestand (vgl. Tab. 4.4) entnommen werden können.

Das ETRS89-Bezugssystem für den Bereich Potsdam ist in Tab. 4.8 definiert:

Tab. 4.8 Projektionsparameter ETRS89

Projektion	UTM
Zone	33/7
Datum	ETRS89
EPSG-Code	25833
Referenzellipsoid	GRS80
False Easting (FE)	3500000.0
False Northing (FN)	0.0
Mittelmeridian (MM)	15.0
Skalierungsfaktor am MM	0.9996
Breitengrad des Koordinatenursprungs	0.0
Koordinateneinheit	Meter

Im Folgenden werden die zu georeferenzierenden Daten als Basislayer, die aktuellen Daten als Referenz- oder Kontroll-Layer bezeichnet. Für den Vorgang der Überführung ins ETRS89-System müssen sowohl im Kontroll- als auch Basislayer übereinstimmende Objekte identifiziert werden. Dies sind jegliche historische, noch existierende Gebäude sowie andere statische Objekte und Formationen, die den städtischen Wandel in den letzten Jahrhunderten überlebt haben. Zur Identifizierung des Gebäudealtbestands wurde der Plan für das Neuordnungskonzept der Potsdamer Mitte herangezogen:

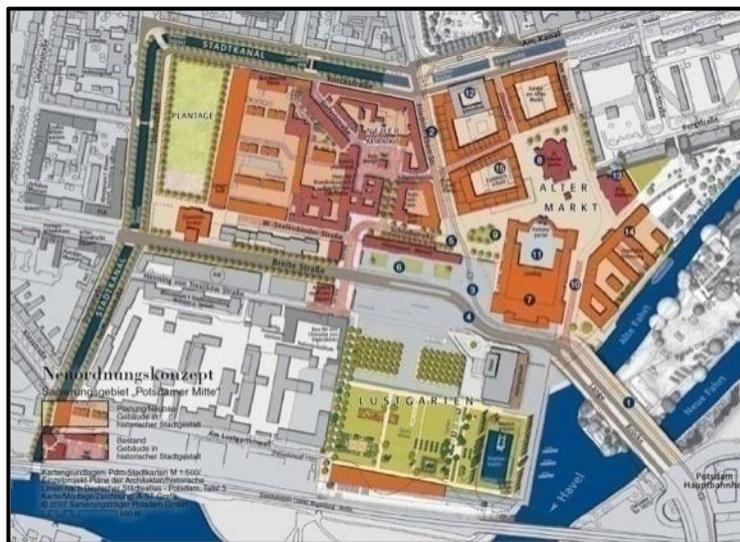


Abb. 4.2 Neuordnungskonzept der Potsdamer Mitte, der Altbestand historischer Gebäude ist violett dargestellt. (Quelle: [www14])

Anhand dieser Informationen lassen sich idente Objektpunkte (Kontrollpunkte) definieren, die für die Überführung in das ETRS89-System herangezogen werden.

Vor der Georeferenzierung müssen sämtliche analog vorliegenden Basisdaten durch einen Scanvorgang in ein digitales Format übertragen werden. Mit einer Scanauflösung von 300 dpi wurden die historischen Karten in ein Rasterformat umgewandelt. Das historische

Luftbild wurde vom Datenlieferanten im TIFF-Format zur Verfügung gestellt (1200 dpi Scanauflösung).

4.3.2 Koregistrierung

Die Georeferenzierung der Basisdaten wird in ArcGIS Version 10.0 durchgeführt. Aufgrund seines hohen Informationsgehalts wurde in einem ersten Schritt das historische Luftbild georeferenziert. Die Georeferenzierung erfolgt dabei ausschließlich über nicht-parametrische Referenzierungsmethoden anhand von Kontrollpunkten, da die Aufnahmeparameter der inneren und äußeren Orientierung (abgesehen vom Aufnahmemaßstab) nicht bekannt sind. Diese Art der Referenzierung wird auch Koregistrierung genannt.

Als Kontroll-Layer für die Koregistrierung des Luftbilds dient das Digitale Orthophoto (DOP) aus dem Jahr 2009. Alle anderen Referenzlayer sind aus dem DOP abgeleitete Produkte, so dass bei diesen mit einem höheren Lagefehler gerechnet werden muss. Das DOP stellt deshalb für diese Arbeit das am besten geeignete Ausgangsbild dar, auf das das historische Luftbild anhand von Kontrollpunkten abgestimmt wird.

Die Koregistrierung des Luftbilds wird anhand einer Affintransformation vollzogen. Dabei werden die Koordinaten im Luftbild durch lineare Umbildungsvorgänge (Rotation, Skalierung) und einer Translation (Verschiebung) vom Ursprungskoordinatensystem in das Zielkoordinatensystem übertragen, wobei die relativen Beziehungen der Punkte zueinander erhalten bleiben (Wahrung der Kollinearität, Parallelität und Teilverhältnisse). Für die affine Koordinatentransformation gilt folgende Gleichung (Kraus, 2004):

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{10} \\ a_{20} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad X = a_0 + A * x$$

XY: Zielkoordinaten (X); xy = Ursprungskoordinaten (x)

a_{10} , a_{20} : zwei Translationen; a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} = Rotation, Skalierung (A)

Die Affintransformation wird durch mindestens drei Kontrollpunkte definiert, allerdings führen mehr Kontrollpunkte zu einem besseren Ergebnis. Diese sollten gleichmäßig über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt liegen.

Da Kontrollpunkte nur an historischen Objekten, welche noch existent sind, gesetzt werden können, konnte eine gleichmäßige Verteilung nicht streng eingehalten werden. Für ein bestmögliches Ergebnis wurde deshalb zuerst eine Vielzahl von identifizierbaren Punkten – meist Gebäudeecken – aufgenommen. Diese wurden teilweise auch außerhalb des Unter-

suchungsgebiets gewählt, um eine möglichst gleichmäßige Verteilung zu gewährleisten, wenn idente Objektpunkte für die Kontrollpunktzuweisung innerhalb des Gebiets nicht gefunden werden konnten. Vor der Koordinatentransformation werden diese zugewiesenen Kontrollpunkte mit ihren XY-Koordinaten sowie der zu erwartende Lagefehler in Metern pro Kontrollpunkt in einer *link*-Tabelle aufgelistet. Hier können diejenigen Kontrollpunkte, deren Lagefehler einen vordefinierten Maximalwert überschreitet, aus der Liste entfernt und somit von der Berechnung ausgeschlossen werden.

Dieser Maximalwert ist von den Genauigkeitsbeschreibungen, welche an das Modell gestellt sind, und von der geometrischen Auflösung des zu entzerrenden Bildmaterials abhängig. Der Lagefehler sollte nicht mehr als 1 Bodenpixelauflösung betragen. Um diese zu bestimmen, ist das Auflösungsvermögen des Luftbilds heranzuziehen.

Das Auflösungsvermögen des historischen Luftbilds ist von der Aufnahmeoptik, dem Aufnahmemaßstab und der Scanauflösung abhängig. Bezüglich der Aufnahmeoptik können keine Angaben gemacht werden, da hierzu keine Informationen vorliegen. Dennoch kann in etwa geschätzt werden, welche Bodenpixelauflösung für das Luftbild angenommen werden kann. Für das Luftbild sind folgende Informationen gegeben:

- Scanauflösung: 1200 dpi
- Aufnahmemaßstab: 1:9000

Die Bodenpixelauflösung kann demnach annähernd bestimmt werden:

$$\text{Bodenpixelauflösung in cm} = \text{Maßstabszahl} * \left(\frac{1 \text{ cm}}{\text{Scanauflösung in cm}} \right)$$

Aus dieser Formel ergibt sich für die Bodenauflösung des historischen Luftbilds folgender Wert:

$$\text{Bodenpixelauflösung in cm} = 9000 * \left(\frac{1 \text{ cm}}{1200/2.54} \right)$$

$$\text{Bodenpixelauflösung in cm} = 19.05$$

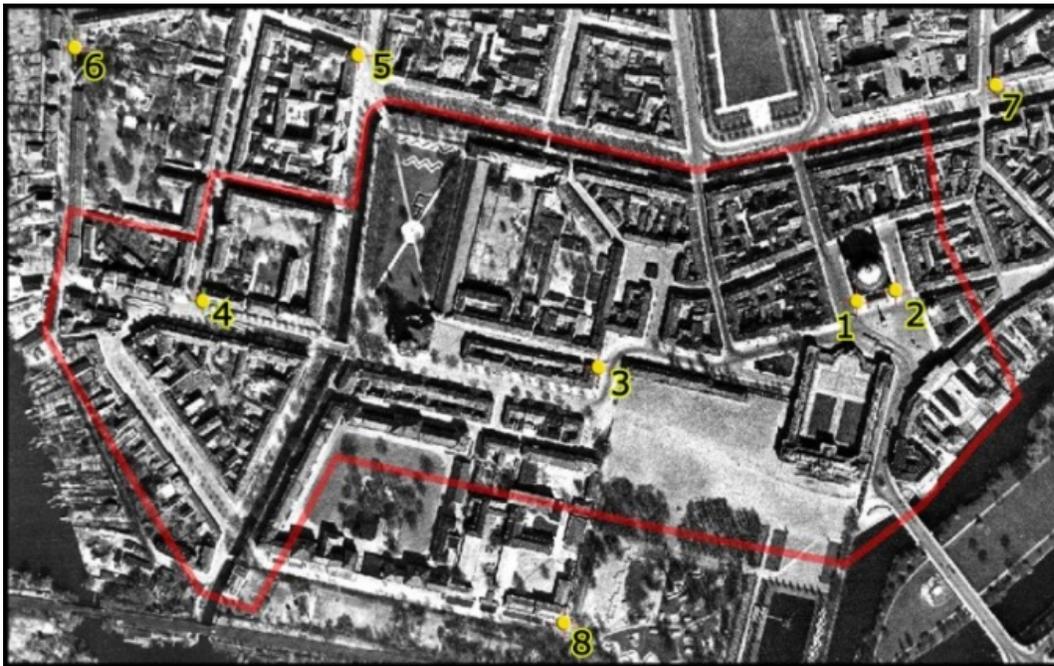
Die geometrische Auflösung wird zusätzlich durch die Eigenschaften des verwendeten Filmmaterials bestimmt. Auch darüber gibt es keine Informationen, deshalb ist der errechnete Wert nur eine Annäherung. Informationen zum Filmmaterial liegen nicht vor, deshalb wurde die Auflösung des Bildes auf 50 cm/Pixel aufgerundet, um eventuelle Ungenauigkeiten mit einzubeziehen. Die absoluten Positionsgenauigkeiten für X,Y/Z-

Koordinaten für Gebäudemodelle in LOD2 sind in CityGML mit 2m/2m angegeben, die Bodenpixelauflösung liegt demnach ausreichend unter diesem Grenzwert.

4.3.3 Erreichte Genauigkeiten

Da die Bildqualität des Luftbilds aufgrund von Lagerungs- und Alterserscheinungen zum Teil unbefriedigend ist, muss mit Schwierigkeiten bei der Identifizierung und Ungenauigkeiten beim Setzen von Kontrollpunkten gerechnet werden. Deshalb wurde ein Lagefehler-Maximalwert bei der Georeferenzierung des Luftbilds mit 2 Bodenpixel (entspricht 1 Meter) als akzeptabel bestimmt. Demzufolge wurden in der *link*-Tabelle diejenigen Kontrollpunkte aus der Liste entfernt, deren approximierter Lagefehler mehr als einen Meter betrug. Dabei wurde weiterhin auf eine gleichmäßig räumliche Verteilung der verbliebenen Kontrollpunkte geachtet. Um die gewünschte Lagegenauigkeit einhalten zu können, verblieben für die Transformation des historischen Luftbilds in das Zielkoordinatensystem schließlich 8 Kontrollpunkte (Abb. 4.3(1)).

Beim automatischen Transformationsvorgang wird der Lageverzug der Kontrollpunkte bezogen auf die Referenzpunkte im Kontrolldatensatz möglichst gering gehalten. Der durchschnittliche Lagefehler aller Kontrollpunkte wird als Mittlerer Quadratischer Fehler (*Root Mean Square Error, RMSE*) oder Standardabweichung bezeichnet und als *link*-Tabelle ausgegeben (Abb. 4.3(2)).



(1)

(2)

Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual
1	4.010631	2.682191	3368053.552583	5806859.173001	0.17875
2	4.191588	2.729107	3368094.461904	5806871.384739	0.09528
3	2.805444	2.419731	3367780.278553	5806790.292756	0.13854
4	0.998115	2.781960	3367363.327914	5806861.254128	0.73495
5	1.763611	3.883263	3367528.635393	5807119.784444	0.07953
6	0.455154	3.964029	3367229.219774	5807128.914734	0.47961
7	4.697319	3.659889	3368201.131485	5807089.500316	0.23238
8	2.603537	1.256026	3367745.384373	5806520.790270	0.29133

Auto Adjust Transformation: 1st Order Polynomial (Affine)
 Total RMS Error: 0,34921
 Load... Save... Restore From Dataset OK

Abb. 4.3 (1) Verteilung der 8 Kontrollpunkte zur Referenzierung des historischen Luftbilds. (2) Auflistung der XY-Koordinaten der Kontrollpunkte und berechneter Lagefehler pro Punkt (*link*-Tabelle).

Das Georeferenzierungstool in ArcGIS bietet neben der affinen Transformation auch andere Transformationsgleichungen an, welche aber für das historische Luftbild keine Verbesserung hinsichtlich des Lagefehlers brachten.

Da aufgrund der Stadtsituation im historischen Luftbild mehr Kontrollpunkte identifizierbar sind, wird dieses nun als Kontroll-Layer genutzt, um weitere Basiskarten zu entzerren. Für die historischen Karten kann beim Transformationsprozess mit einem größeren Lagefehler gerechnet werden. Dieser entsteht durch die Akkumulation des *RMS*-Fehlers des Kontroll-Layers, der geometrischen Lagegenauigkeit von Karten (± 0.25 mm, vgl. HAAKE & GRÜNREICH, 1997) und dem eigentlichen *RMS*-Fehler nach der Transformation und kann annähernd wie folgt bestimmt werden (eigene Zusammenstellung):

$$\sigma_{\text{Akk}} = \sqrt{(\sigma_{\text{K}}^2 + \sigma_{\text{B}}^2 + \sigma_{\text{Geom}}^2)}$$

σ_{Akk} : Akkumulierter Lagefehler

σ_{K} : *RMS*-Fehler des Kontroll-Layers

σ_{B} : *RMS*-Fehler des Basismaterials

σ_{Geom} : Geometrische Lagegenauigkeit des Kartenmaterials (0.00025m*Maßstabszahl)

Tabelle 4.9 gibt eine Übersicht über die Lagefehler der referenzierten historischen Karten.

Tab. 4.9 Gesamtlagefehler σ_{Akk} aller Basismaterialien nach der Georeferenzierung

Basismaterial	Maßstab	Kontroll-Layer	σ_{Geom} in m	Anzahl der CP ¹	σ_{K} in m	σ_{Akk} in m (aufgerundet)
Historisches Luftbild	1:9000	DOP	-	8	0.34921	0.4³
Gemarkungskarten ²	1:625	HisL	0.15625	25	1.33794	1.4
GSV Stadtplan	1:2500	HisL	0.625	28	0.97516	1.2
Zerstörungskarte 1945	1:5000	HisL	1.25	20	1.90275	2.3

¹CP = Kontrollpunkte (Control Points), ²mosaikiert aus 9 Einzelkarten, ³ für das historische Luftbild setzt sich σ_{Akk} aus dem RMS-Fehler des DOP (ca. 0.2m) und dem eigenen RMS-Fehler zusammen.

Eine Verbesserung der Lagegenauigkeit des Kartenmaterials könnte durch Teiltransformationen erreicht werden, bei der die Karten in kleinere Bereiche aufgeteilt und diese dann getrennt über eine Affintransformation umgebildet werden. Anschließend wäre wieder ein Zusammenfügen zu einer Gesamtkarte durch Mosaiking möglich. Dadurch wäre ein Ausgleich der durch den starken Papierverzug entstandenen Qualitätsmängel denkbar. Dies erforderte eine präzise und zeitaufwändige Vorgehensweise und ist für eine digitale Verwaltung der Karten sicherlich eine lohnenswerte Überlegung. Im Rahmen der Arbeit wird auf diesen Verarbeitungsschritt verzichtet. Abb. 4.4 und 4.5 zeigen das Ergebnis der Georeferenzierung des historischen Luftbilds sowie weiterer historischer Karten.



Abb. 4.4 Historisches Luftbild nach der Transformation in das ETRS89-Referenzsystem (Ausschnitt). Zur visuellen Überprüfung der Lagegenauigkeit dient der ALK-Datensatz. Bestehende historische Gebäude sind rot gekennzeichnet.



(1)



(2)



(3)

Abb. 4.5 Ergebnis der Georeferenzierung der historischen Karten (Ausschnitte). Visueller Vergleich anhand des georeferenzierten historischen Luftbilds. Bereiche mit guter Lagequalität sind blau, Differenzen sind rot gekennzeichnet. (1) Mosaik der Gemarkungskarten (2) GSV Stadtplan (3) Zerstörungskarte.

Während die Übereinstimmung der Karten mit dem Luftbild an einigen Stellen als sehr gut bezeichnet werden kann, treten in anderen Bereichen große Divergenzen in der Lage auf. Diese sind hauptsächlich auf die schlechte Qualität des Materials (Papierverzug) als auch auf Ungenauigkeiten bei der Kartenherstellung (Kapitel 4.1.1) zurückzuführen. Aufgrund dieser Eigenschaften wird entschieden, für die Rekonstruktion der Objekte durch Digitalisierung das historische Luftbild als Basis und das historische Kartenmaterial für Informations- und Kontrollzwecke zu verwenden, wenn es in bestimmten Bereichen zu Interpretationsschwierigkeiten im Luftbild kommen sollte.

5 ERZEUGUNG DES 3D-STADTMODELLS

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Methoden und Werkzeuge zur Erzeugung der einzelnen Komponenten eines historischen 3D-Stadtmodells für Potsdam auf Grundlage der historischen Basisdaten. Ein erster Schritt ist dabei die Erstellung und Visualisierung eines Blockmodells im Detaillierungsgrad 1 (LOD1). Für analytische Zwecke werden die zu den Geometrien korrespondierenden historischen Objektinformationen erfasst und gespeichert. Das Blockmodell liefert die Basis für die Ausdifferenzierung der Gebäudegeometrien zu einem Detaillierungsgrad 2 (LOD2). Als weitere Modelldaten werden die historischen Umweltinformationen erfasst und attribuiert. Räumliche Basis für die einzelnen Modellkomponenten bietet ein Höhenmodell, welches an die historischen Gegebenheiten angepasst werden muss.

5.1 Erstellung eines historischen LOD1-Blockmodells

Das historische Blockmodell bildet die geometrische Grundlage für sämtliche Gebäudemodelle in höheren Detaillierungsgraden, daher wird schon bei dessen Erzeugung mit der höchstmöglich erfassbaren Lagegenauigkeit gearbeitet. Auf Grundlage der georeferenzierten historischen Karten und des historischen Luftbilds sowie durch Einbeziehung von Referenzmaterial bei Unsicherheiten werden die einzelnen Gebäudeumrisse an ihrem historischen Standort erfasst.

5.1.1 Erfassung der Gebäudeumrisse

Für die Erzeugung eines Blockmodells sind in erster Linie die Gebäudeumrisse der noch existierenden Altbestandsbauten notwendig. Eine Vielzahl der einstigen Gebäude haben die Zerstörung im 2. Weltkrieg und in den folgenden Jahrzehnten überstanden oder wurden wieder aufgebaut. Die Umrisse jener Gebäude können aus dem aktuellen Datenbestand der Stadt Potsdam gewonnen und müssen nicht rekonstruiert werden. Diese Vorgehensweise gewährleistet eine homogene Integration historischer Gebäudemodelle in das aktuell bestehende Stadtmodell. Grundlage für den aktuellen Modellbestand ist das Amtliche Liegenschaftskataster der Stadt Potsdam (s. Abb. 5.1).



Abb. 5.1 Aktueller Gebäudebestand des digitalen Liegenschaftskatasters. Historisches Luftbild dient dem Vergleich zum historischen Gebäudebestand.

Die nicht mehr existierenden Gebäudeumrisse müssen aus historischem Basismaterial extrahiert werden. Vorzugsweise wurde dafür das historische Luftbild als Grundlage benutzt, da dies den geringsten Lagefehler nach der Georeferenzierung aufwies (s. Tab. 4.9). Anhand des Adressplans (Abb. 5.2.(3)) von 1945 wurde die Aufteilung der Gebäude nachvollzogen.

Aufgrund der monochromen Auflösung des Luftbildes kam es insbesondere bei durchgängiger Dachbedeckung aufgrund zu ähnlicher Grauwertstufen zu Interpretationsschwierigkeiten der Gebäudedimensionen. In diesen Fällen wurden georeferenzierte, historische Kartenvorlagen (Gemarkungskarten, GSV Stadtplan) als Referenz benutzt, auch wenn sie aufgrund des starken Lageverzugs keine repräsentative Datenquelle für die Rekonstruktion der Gebäudeumrisse sind. Ausserdem enthalten diese Karten Liegenschaften aus dem Jahr 1878/79, seit dem wurden jedoch vereinzelt Gebäude in mehrere Liegenschaften aufgeteilt. Die Grenzen dieser Gebäudeabschnitte sind demnach aus den Karten nicht erfassbar. Abb. 5.2(1-3) veranschaulicht diese Problematik anhand eines Ausschnitts.

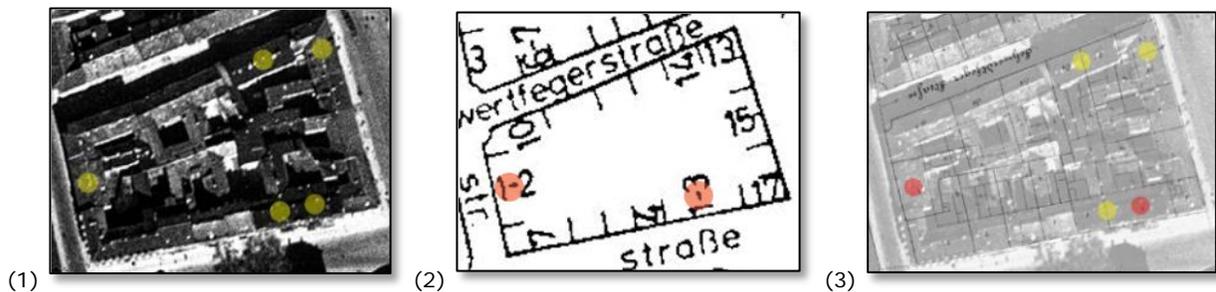


Abb. 5.2 Vorlagen zur Rekonstruktion der Gebäudegrundrisse.

Abb. 5.2(1) zeigt das historische Luftbild. Gelb gekennzeichnet sind die Stellen, an denen aufgrund ähnlicher Dachbedeckung keine Häusergrenzen erkennbar sind. In Abb. 5.2(2) ist

der Plan der historischen Gebäudeadressen um 1945 abgebildet. Rot gekennzeichnet sind hier jene Gebäude, die in mehrere Liegenschaften ohne gekennzeichnete Abgrenzungen aufgeteilt sind. Ab. 5.2(3) stellt das mit der historischen Gemarkungskarte überlagerte historische Luftbild dar. Einige der aufgrund der in Abb. 5.2(1) markierten Unsicherheiten liessen sich anhand der Gemarkungskarte aufheben (diese Stellen sind gelb markiert). Allerdings sind Liegenschaftsteilungen, wie sie in Abb. 5.2(2) abgebildet sind, auch hier nicht erkennbar (rot markiert). In diesem Fall wurde versucht, anhand historischer Grundrisszeichnungen, Fotografien, Panoramaaufnahmen etc. die einzelnen Gebäudeabschnitte zu identifizieren (vgl. Abb. 5.3). Für jene Gebäude, zu denen sämtliche Informationen fehlten, mussten Mutmaßungen getroffen werden. Da das zu erstellende Modell keinen Anspruch auf architektonisch präzise geometrische Genauigkeit legt, sondern vielmehr als Informationswerkzeug dienen soll, werden diese Ungenauigkeiten in Kauf genommen. Aufgrund der vielzähligen Grundlagen- und Referenzdaten wird trotz dieser Unzulänglichkeiten davon ausgegangen, dass der absolute geometrische Lageverzug der erstellten Gebäudeumrisse 2 Meter nicht überschreitet.

Abb. 5.3 gibt einen Überblick über die für die Rekonstruktion der Gebäudeumrisse genutzten Datenquellen.

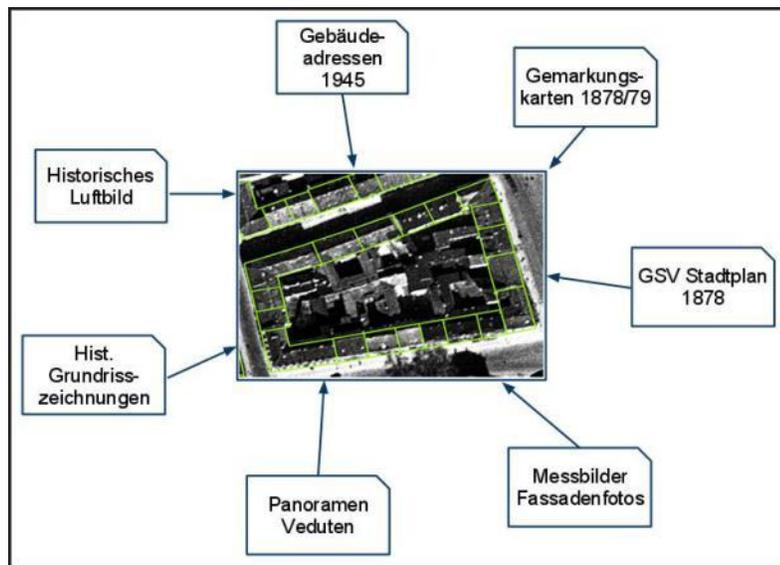


Abb. 5.3 Quelldaten zur Rekonstruktion des historischen Gebäudebestands.

In Abb. 5.4 lässt sich der Anteil der erhaltenen Gebäude im Untersuchungsgebiet erkennen. Von den im Untersuchungsgebiet 246 rekonstruierten Altbestandgebäuden aus der Jahrhundertwende existieren heute noch 81 (33%), 165 (67%) sind vollständig zerstört.

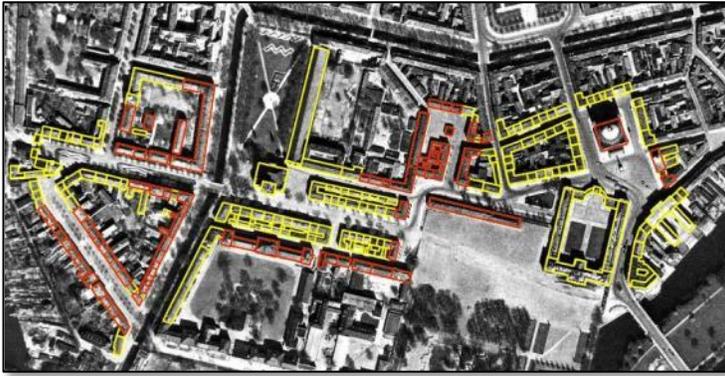


Abb. 5.4 Digitale Rekonstruktion des historischen Baubestands. Erhaltene Gebäude sind rot, zerstörte Gebäude gelb gekennzeichnet.

5.1.2 Zuweisung der Traufhöhen

Die Gebäudeumrisse wurden nun als Grundlage für die Erzeugung eines Blockmodells verwendet. Dabei werden die Grundrisse anhand eines spezifischen Höhenwerts extrudiert. Da die Extrusion automatisch erfolgen soll, sind zu diesem Zweck die Traufhöhen als Höhenattribut zu jeder Gebäudegrundfläche zu speichern.

Die Traufhöhe der Gebäude wurde dabei – ähnlich wie bei der Erzeugung der Grundrisse – aus Referenzdaten gewonnen. Traufhöhen existierender Gebäude sind der ALK und dem aktuellen digitalen Stadtmodell entnommen, wobei hier Unstimmigkeiten auffielen. Ein Vergleich mit historischen Gebäudeaufnissen und den in der ALK gespeicherten Höhenangaben zeigten eine prägnante Differenz auf (vgl. Abb. 5.5).



Abb. 5.5 Traufhöhen aus der ALK (links) weichen von maßstäblichen Aurlisszeichnungen (rechts) ab. Beispiel: „Haus der Landstände“, Breite Strasse 9.

Das in der ALK gespeicherte Höhenattribut „Ave_Traufh“ enthält mehrere Dezimalstellen. Die Herkunft der Höhenwerte in der ALK konnte nicht nachgewiesen werden – es wird angenommen, dass es sich hierbei um photogrammetrisch erfasste Gebäudehöhen, welche anscheinend den Mittelwert aus Trauf- und Firsthöhe speichern, handelt. Aufgrund der offensichtlich generisch überhöhten Traufhöhen in der ALK wurden diese mit ≈ 1.5 Metern Differenz auf die im Untersuchungsgebiet existierenden Gebäudeumrisse übertragen.

Für zerstörte Gebäude wurden historische Aufrisszeichnungen, Messbilder und Fassadenfotos herangezogen, um die Traufhöhen zu ermitteln. Fehlende Höheninformationen konnten über Abmessungen von Fassadenachsen aus historischen Fotografien erfasst werden, solange diese ein Gebäude mit einer bekannten Traufhöhe enthielten (Abb. 5.6).



Abb. 5.6 Ermittlung der Traufhöhen in historischen Aufnahmen anhand einer bekannten Achsenlänge. (Quelle: Bundesbildarchiv)

Mit dieser Methode konnte ein Großteil der Traufhöhen nicht mehr existierender Gebäude ermittelt werden, wobei der Ungenauigkeitsfaktor mit ≈ 1 Meter angenommen wird. So wie auch bei der Rekonstruktion der Gebäudeumrisse wurden die Traufhöhen bei gänzlich fehlenden Informationen geschätzt. In diesem Fall herrscht eine größere Ungenauigkeit – diese muss allerdings immer in Kauf genommen werden, wenn man mit lückenhaften Daten arbeitet.

Anhand der nun als Höhenattribut gespeicherten Traufhöhe können nun die Gebäudeumrisse unter Verwendung von ArcGIS 10 automatisch extrudiert und das Blockmodell erstellt werden. Das Modul ArcScene bietet für diesen Zweck eine einfach zu bedienende Benutzeroberfläche (Abb. 5.7).

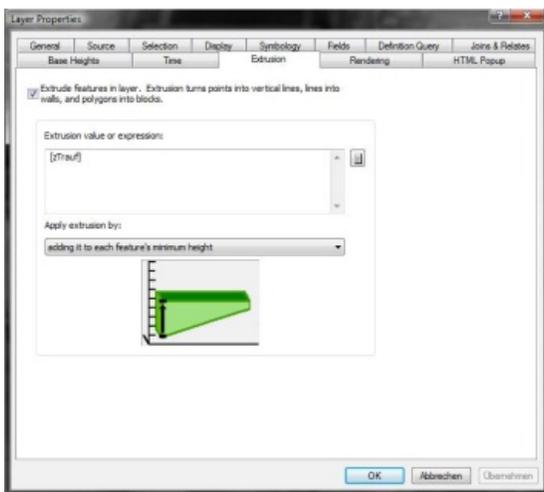


Abb. 5.7 Angabe des Höhenattributes in ArcScene zur Extrusion der Gebäudeumrisse.

In ArcScene wird eine nutzergesteuerte Visualisierung und Exploration des extrudierten Modells unterstützt. Abb. 5.8 zeigt einen beispielhaften Ausschnitt des Ergebnisses.



Abb. 5.8 In ArcScene automatisch erzeugtes Blockmodell des historischen Gebäudebestands im Untersuchungsgebiet.

5.2 Zuweisung von gebäudespezifischen Attributen

Durch die Anreicherung des 3D-Stadtmodells um thematische Sachinformationen entsteht aus dem hauptsächlich darstellungsorientierten LOD1-Modell ein Informationssystem, welches zusätzlich zu der Frage „Wo?“ auch die Fragen „Was?“, „Wann?“ oder „Wie?“ beantworten kann. Zu diesem Zweck werden den einzelnen Objekten Sachinformationen in Form von Attributen zugewiesen.

Für die Attributierung der Gebäude im Untersuchungsgebiet ergaben sich folgende Überlegungen:

- Aus welchen Quellen können die thematischen Informationen gewonnen werden und wie verlässlich sind diese Quellen?
- Auf welchen Zeitpunkt beziehen sich die Informationen und in welcher Form werden sie gespeichert?
- Wie werden Datenlücken behandelt?

Die Auseinandersetzung mit diesen Fragestellungen führte zu den Ergebnissen, welche in dem folgenden Abschnitt erläutert werden.

5.2.1 Quellen und Verlässlichkeit der Informationen

Für die Informationsgewinnung standen verschiedene Quelldaten mit unterschiedlichem zeitlichen Bezug zur Verfügung (vgl. Tab. 4.3). Während bei den meisten Quellen von einem hohen Verlässlichkeitsgrad ausgegangen werden kann, konnten andere Informationen nur durch Mutmaßungen gewonnen werden und sind deshalb von der Qualität und dem Vorlageformat des Materials und der Interpretationsfähigkeit abhängig.

Zum Zweck der Nachvollziehbarkeit des Wahrheitsgehalts bzw. der Verlässlichkeit von thematischen Informationen im Modell wurde deshalb eine eigene Kategorisierung erstellt (Tab. 5.1).

Tab. 5.1 Verlässlichkeitsgrad gebäudespezifischer Attribute

Kategorie	Wahrheits- gehalt in %	Verlässlich- keitsgrad
1	≤ 50	gering
2	51-80	mittel
3	≥ 80	hoch

Tabelle 5.2 zeigt eine Auflistung der in Kapitel 4.2.2 definierten thematischen Attribute für das Untersuchungsgebiet, die Quellen, aus denen die Informationen extrahiert wurden sowie den Verlässlichkeitsgrad der Informationen. Diese Informationen müssen in einem Metadatendokument verwaltet werden, denn sie sind bei einer Verwendung des Modells durch Drittnutzer von großer Bedeutung, da sie Aufschluss über die Qualität der Daten geben.

Tab. 5.2 Quelldaten und Verlässlichkeitsgrad der ermittelten historischen Informationen

Attributname	Quelle der Information	Verlässlichkeit der Informationen*
Klasse	[Qu1], GSV Stadtplan, Fotografien	1
Funktion	[Qu1], GSV Stadtplan, Fotografien	1
typDach	Historisches Luftbild, Aufrisszeichnungen, Fotografien, Veduten	3
zTrauf	ALK, Aufrisse, Fotografien	2
oStockw	Fotografien	3
jahrBau	[Qu5]	3
jahrAbr	[Qu5], Zerstörungskarte 1945	3
strName	[Qu5], GSV Stadtplan	3
gebNr	[Qu5]	3
gebName	[Qu5], [Qu1]	3
Architekt	[Qu5]	3
gradZerst	[Qu5], Zerstörungskarte 1945	2
Richtl	[Qu8]	3
gebTeil	Historisches Luftbild, Gemarkungskarte 1878/79	2
validAtt	abhängig vom Aufnahmezeitpunkt der jeweiligen Quelle	3

* 1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch

Auffallend ist die vergleichsweise geringe Verlässlichkeit der Attribute „Klasse“ und „Funktion“ – diese Attributwerte konnten nur anhand von schriftlichen Nachweisen, durch thematische Einfärbung im GSV Stadtplan (bspw. „öffentliche Gebäude“) oder durch Bildinterpretation ermittelt werden (Abb. 5.9).

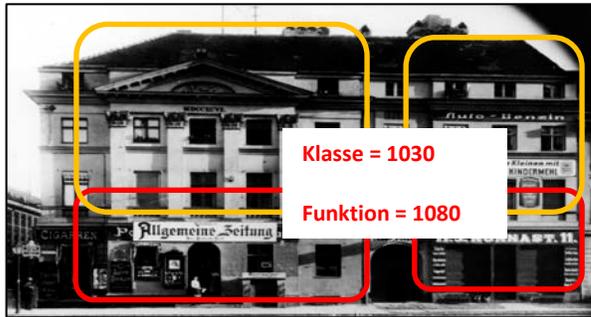


Abb. 5.9 Informationsgewinnung anhand von Bildinterpretation. Historische Fotografien dienen zur Klassifizierung der Gebäudefunktion und -nutzung. Gebäude im Bild: Am Alten Markt 12, 11 (um 1910). (Quelle: BLDAM)

Für die Zuweisung des Zerstörungsgrades (Attribut „gradZerst“) wurden zwei Informationsquellen herangezogen. Zum einen handelt es sich um die sogenannte „Zerstörungskarte“ mit ungewisser Herkunft (Nutzungsrecht Stadtverwaltung Potsdam), zum anderen um einen Schadenplan aus [Qu5] (vgl. Tab. 4.3).

Die Informationen in den Quellen widersprechen sich teilweise in ihren Aussagen (vgl. Abb. 5.10). Dabei ist es denkbar, dass sich der Zerstörungsgrad auf verschiedene Zeiträume bezieht (1960 bzw. 1945). Es konnte demnach nicht mit Bestimmtheit festgelegt werden, welche der Aussagen richtig ist. Aus diesem Grund ist die Verlässlichkeit für das Attribut „gradZerst“ mit 2 (mittel) angegeben (vgl. Tab. 5.1).

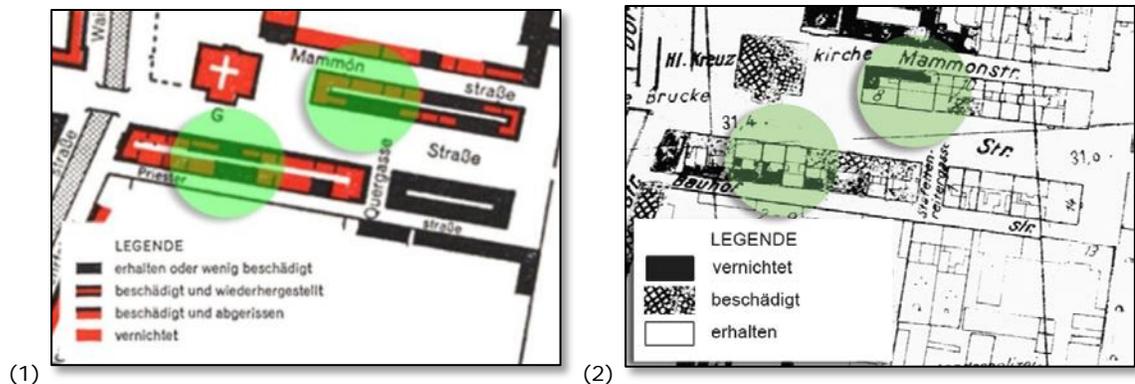


Abb. 5.10 Widersprüchliche Aussagen in den Quelldaten (grün markiert). (1) Schadenplan 1945 [Qu5], (2) Zerstörungskarte um 1960 (Quelle: Stadtverwaltung Potsdam).

5.2.2 Temporaler Bezug objektbezogener Eigenschaften

Wie in Kapitel 4.2.1 erläutert, sind viele der historischen Eigenschaften eines Objekts auf einen Gültigkeitszeitraum bezogen, welcher als solcher den Daten zugeordnet werden

muss, solange es sich nicht um ein *Snapshot-Modell* handelt. *Snapshot-Modelle* spiegeln eine Situation wieder, die nur zu einem ganz bestimmten Zeitpunkt in der Realität existiert oder existiert hat (vgl. Kapitel 2.2.3). Im Falle des erstellten Modells trifft dies nicht zu, da die gespeicherten Informationen zu unterschiedlichen Zeitpunkten ihre Gültigkeit besitzen. Dies liegt an den unterschiedlichen Quelldaten, aus denen die Information gewonnen wurden.

Insbesondere bei fotografischem Bildmaterial entspricht der Gültigkeitszeitpunkt der Informationen dem jeweiligen Aufnahmezeitpunkt. Da ohne grössere Recherche keine Möglichkeit besteht, die reale *Gültigkeitsdauer* dieser aus Bildern gewonnenen Informationen zu bestimmen, kann diese nur für das jeweilige Aufnahme- bzw. Abbildungsdatum als „wahr“ bzw. „real existierend“ betrachtet werden. Für jedes Objekt ist das Gültigkeitsdatum der Attributwerte deshalb in der Spalte „validAtt“ als Jahreszahl (Jahr der Aufnahme) festgehalten. Die Gebäudegeometrien besitzen ebenfalls eine *Gültigkeitsdauer*, welche durch ihre Lebensdauer bestimmt wird. Diese wird über das „Baujahr“ (Attribut „jahrBau“) und Abrissjahr (Attribut „jahrAbr“) festgelegt.

5.2.3 Attributive Dokumentation von Datenlücken

Informationen sind nur so genau wie die ihnen zu Grunde liegenden Quellen. Insbesondere bei historischen Quellen lassen sich Datenlücken nicht ausschliessen. Ein Freilassen der Attributfelder könnte als „noch nicht befüllt“ interpretiert werden, deshalb sollten Freifelder (NULL) vermieden werden. Stattdessen wurden Werte eingeführt, die auf ein Fehlen von Information hinweisen. Je nach Datentyp des Attributs sind diese Felder mit „9999“ (Datentyp „numeric“) oder „unbekannt“ (Datentyp „character“) befüllt. Der Wert „0“ für das Abrissjahr („jahrAbr“) bedeutet, dass das entsprechende Gebäude weiterhin existiert.

5.3 Detailrekonstruktion der Gebäudemodelle

Um den Gebäuden einen höheren Erkennungswert zu verleihen, das Stadtmodell visuell attraktiver zu gestalten und die Orientierungsmöglichkeit des Betrachters im Modell zu erhöhen, soll den Gebäudemodellen ein repräsentativeres Aussehen verliehen werden. Dazu wird auf Grundlage des Blockmodells LOD1 durch Ausdifferenzierung der Gebäudegeometrien ein Gebäudemodell LOD2 erzeugt. Tab.5.3 zeigt die prägnanten Unterschiede zwischen einem LOD1-Modell und einem LOD2-Modell gemäss der CityGML-Implementierungsvorschrift im Untersuchungsgebiet.

Tab. 5.3 Unterschiede zwischen den Detaillierungsgraden LOD1 und LOD2 für 3D-Stadtmodelle

	LOD1	LOD2
Bezeichnung	Blockmodell ("Klötzchenmodell")	Ausdifferenziertes Gebäudemodell
3D-Modellierung	Extrudierte Gebäudegrundrisse	3D-Repräsentation der Gebäudehülle
Dachform	keine	Differenzierte Dachform
Gebäudehöhe	Traufe	Dachfirst
Fassadentextur	keine	optional

Die folgenden Abschnitte gehen darauf ein, welche Vorüberlegungen für diesen Schritt getroffen wurden, mit welchen Methoden und auf Basis welcher Informationen eine detaillierte Rekonstruktion der Gebäudemodelle nach LOD2 für das Untersuchungsgebiet möglich ist.

5.3.1 Test zur automatisierten Dachformgestaltung

Eine erste Untersuchung bestand darin, ob eine automatisierte Erzeugung von Dachformen pro Gebäude anhand einer Dachtypkodierung möglich ist. Der LandXPlorer bietet die Möglichkeit an, prototypische Dachformen mit einheitlicher Firsthöhe zu generieren. Da sich die Kodierungen im LandXPlorer und in CityGML unterscheiden und keine Möglichkeit gefunden wurde, die Kodierung anzugleichen, musste für diesen Zweck eine Neukodierung pro Gebäude als temporäres Attribut eingeführt werden (Tab. 5.4).

Tab. 5.4 Unterschiedliche Dachtypenkodierung in CityGML und LandXPlorer der Dachformen im Untersuchungsgebiet

Dachtyp	Typcode CityGML	Typcode LandXplorer	Beispiel
Flachdach	1000	4000	
Pultdach	1010	1200	
Satteldach	1030	2000	
Walmdach	1040	3000	
Mansardendach	1060	2100	
Kuppeldach	1090	nicht definiert	

(Bildquelle: <http://www.dachgutachter.com/dkdach.php>, <http://library.housemaster.com/imagelib.asp>)

Die Typkodierung kann im LandXPlorer beim Import von Gebäudeumrissen (bspw. als Shapefile) angegeben werden; diese wird dann benutzt, um den Blockmodellen die jeweilige Dachform automatisiert zuzuordnen (Abb. 5.11).

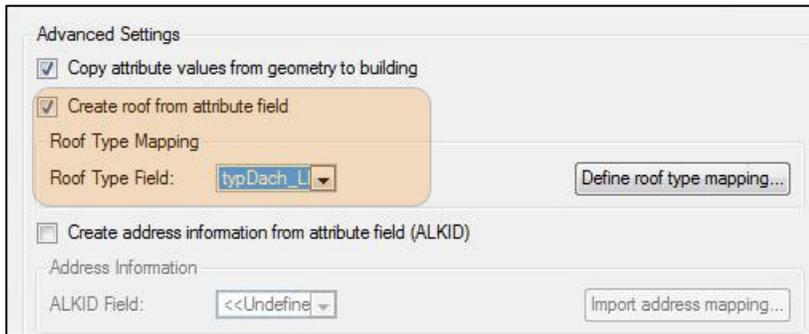


Abb. 5.11 Zuweisung des Dachtyps durch Attributkodierung im LandXPlorer.

Das Ergebnis war leider nicht zufriedenstellend. Bei der Automatisierung traten zwei gravierende Probleme auf, welche in Abb. 5.12 dargestellt werden:

- Die Dachneigung richtete sich grundsätzlich an der längeren Achse des Gebäudes aus, was bei manchen Gebäuden zu einer Drehung des Daches um 90° führte.
- Für komplexere Gebäudeformen (bspw. L-Form) wurde kein Dach generiert.

Aufgrund dieser Schwierigkeiten bei der automatischen Dachrekonstruktion wurde entschieden, dass die automatische Generierung der Dachformen für den Zweck des Detailmodells nicht einsetzbar und die Modellierung der Dachformen händisch vorzunehmen ist.

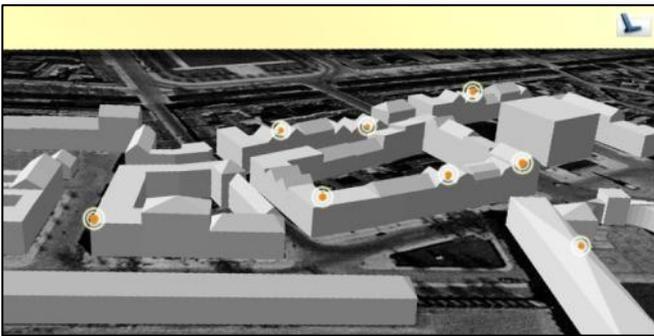


Abb. 5.12 Ergebnis der automatischen Generierung von Dachformen im LandXPlorer zeigte verschiedene Fehler auf (markiert).

Dies sollte im selben Arbeitsschritt wie die Detailrekonstruktion der Gebäudehüllen durchgeführt werden, welche in den folgenden Kapiteln beschrieben wird.

5.3.2 Formataustausch zwischen ArcGIS 10 und Google Sketchup 8

Die Modifizierung der Gebäudehüllen muss im 3D-Modell geschehen. ArcGIS ist keine 3D-Modellierungssoftware und bietet demnach nicht die entsprechenden Werkzeuge für diese

Aufgabe. Das Konzept der Arbeit umfasst einen möglichst geringen Einsatz unterschiedlicher Softwareprodukte, um den Arbeitsablauf so effizient wie möglich zu gestalten. Für die geometrische Ausdifferenzierung der 3D-Gebäudemodelle wurde demnach eine Modellierungssoftware gesucht, welche die Modelle aus ArcGIS einliest und auch wieder in ein ArcGIS-kompatibles Format exportiert. Dabei sind folgende Bedingungen zu erfüllen:

- Erhalt der geometrischen und topologischen Objekteigenschaften
- Erhalt von Objektattributen (ID, generische Attribute)
- Erhalt des räumlichen Bezugs (Koordinatenintegrität)

Für die Erzeugung und Verwaltung von 3D-Objekten stehen mittlerweile verschiedene Modellierungssoftware zur Verfügung. Aufgrund der o. g. Anforderungen muss allerdings eine Software eingesetzt werden, die auch Geobjekte verwalten kann oder zumindest Datenformate verarbeitet, welche Geodaten beschreiben können.

Unter den zur Auswahl stehenden Softwarekomponenten kamen die Produkte 3D-Studio Max der Firma AutoDesk und Sketchup der Firma Google in Frage. Google Sketchup bietet den großen Vorteil, dass es für den Privatgebrauch zum kostenlosen Download im Internet zur Verfügung steht und somit von jedermann privat genutzt werden kann (<http://www.google.com/intl/de/sketchup/>). Ein weiterer Vorteil ist die leicht verständliche Benutzeroberfläche, so dass schon nach kurzer Einarbeitungszeit effizient modelliert werden kann. Im Internet stehen eine Vielzahl von Lernvideos und frei verfügbaren Tutorials zur Verfügung, so dass auch ungeübte Nutzer einen schnellen Einblick in die Bedienweise der Software Google Sketchup erhalten.

Für den gemeinsamen Austausch von 3D-Objektmodellen zwischen ArcGIS und Sketchup ist das COLLADA-Datenformat geeignet. COLLADA (*Collaborative Design Activity*) Dateien sind XML-Beschreibungen von 3D-Objekten und werden von den gängigen 3D-Modellierungs- und Visualisierungssoftware unterstützt. Dabei werden nicht nur die Geometrien beschrieben, sondern auch assoziierende Texturen definiert und zusammen mit dem COLLADA-Modell gespeichert. Dies ist besonders im Hinblick auf die spätere Fassadentexturierung von Interesse.

Bevor ein Gebäudemodell als COLLADA-Datei gespeichert werden kann, muss dieses in ArcGIS in ein Multipatch-Format umgewandelt werden. Multipatch ist ein speziell von ESRI entwickelter Datenstandard, der die äussere Erscheinung eines 3D-Objektes über die Repräsentation seiner Objekthülle definiert (Boundary Representation, B-Rep) (ESRI, 2008). Dabei werden komplexe 3D-Geometrien als simple Einzelflächen abgespeichert und

die eine Objekthülle beschreibenden Einzelflächen in einem Multipatch-„Container“ verwaltet. Durch diesen Aufbau können auch sehr komplexe Geometrien mittels Multipatch verarbeitet werden. Über einen Ankerpunkt, welcher die Position eines Objektes definiert, werden auch anhand der referenzierten Objekt-ID alle assoziierenden Attribute gespeichert. Abb. 5.13 zeigt ein Beispiel eines Gebäudemodells im Multipatch-Format. Erkennbar sind die die Gebäudegeometrie beschreibenden Einzelflächen sowie der Ankerpunkt, über den die Position des Gebäudes sowie dessen Identifikation definiert sind.

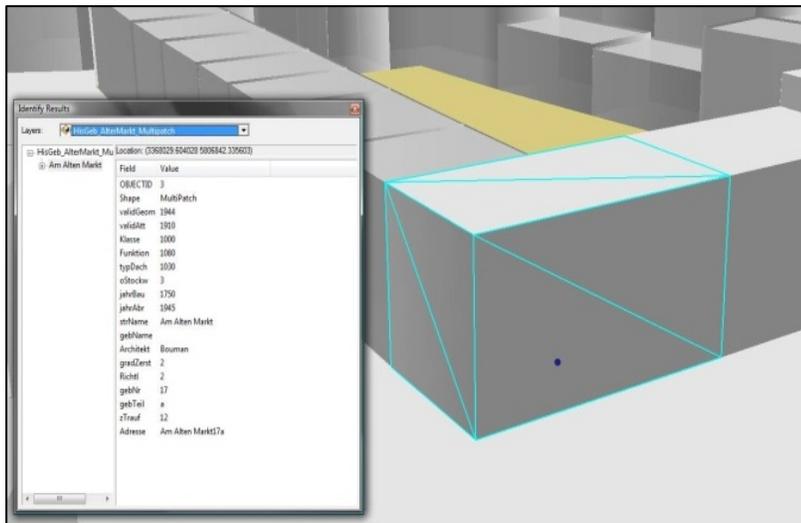


Abb. 5.13 Ein Gebäudemodell im ESRI-Multipatch-Format mit assoziierenden Objektinformationen.

Der Multipatch-Standard (ESRI) beschreibt neben den Objektgeometrien auch Darstellungsmerkmale wie Textur, Farbe und Transparenz eines Objekts, weshalb sich dieses Format besonders für die Darstellung thematischer Objektdetails eignet. ArcGIS hat mit Multipatch die Möglichkeit geschaffen, komplexe 3D-Objekte visuell attraktiv darzustellen und dadurch auf dem Gebiet der 3D-Visualisierung einen großen Fortschritt erzielt.

Multipatch-Objekte lassen sich in ArcGIS in ein COLLADA-Format umwandeln. Für jedes geschlossene 3D-Objekt (Multipatch-Container) wird ein COLLADA-File (sowie ein assoziierender KML-File) erzeugt – die Gebäude liegen somit als Einzeldateien im COLLADA-Format vor. Bei der Umwandlung nach COLLADA wird dem User die Möglichkeit gegeben, die zu erzeugenden Dateien mit einem Attribut-Präfix zu versehen, um eine spätere Identifizierung zu erleichtern (Abb. 5.14). Ohne diese Einstellung werden die COLLADA-Dateien vom System durchnummeriert.

Im Testfall wurden die Gebäudedateien mit dem Adress-Präfix versehen, wobei beachtet werden musste, dass der Dateiname keine Sonderzeichen enthält, da der Import der Datei

in Sketchup sonst mit einer Fehlermeldung abgebrochen wird (Fehlermeldungen gab es im Testfall bei allen Dateien, die ein „ß“ enthielten, bspw. „Humboldtstraße“).

<input type="checkbox"/>	HisGeb_AlterMarkt_Multipatch_Am_Alten_Markt6a.dae	1/29/2011 12:44 PM	DAE-Datei	867 KB
<input type="checkbox"/>	HisGeb_AlterMarkt_Multipatch_Am_Alten_Markt7a.dae	1/29/2011 12:46 PM	DAE-Datei	653 KB
<input type="checkbox"/>	HisGeb_AlterMarkt_Multipatch_Am_Alten_Markt8a.dae	2/2/2011 12:50 PM	DAE-Datei	230 KB
<input type="checkbox"/>	HisGeb_AlterMarkt_Multipatch_Am_Alten_Markt9a.dae	2/2/2011 1:14 PM	DAE-Datei	235 KB
<input type="checkbox"/>	HisGeb_AlterMarkt_Multipatch_Am_Alten_Markt10a.dae	1/29/2011 11:21 PM	DAE-Datei	272 KB

Abb. 5.14 Auszug aus der Liste der in ArcGIS erzeugten COLLADA-Dateien

5.3.3 Modifizierung der LOD1-Gebäudemodelle in Google Sketchup 8 und Re-Import nach ArcScene

In Sketchup können die im COLLADA-Format vorliegenden 3D-Gebäudemodelle nun importiert und bearbeitet werden. Es muss dabei auf die Ausrichtung der Gebäude im Sketchup-internen Koordinatensystem geachtet werden, um die tatsächliche Ausrichtung im realen Raum beizubehalten. Gerade bei annähernd quadratischen Objekten ist die Ausrichtung uneindeutig. Bevor die Geometrien in Sketchup endgültig verändert werden, sollte anhand der in Sketchup integrierten Koordinatenachsen Klarheit geschaffen werden, dass die richtige Gebäudeseite modelliert wird (Abb. 5.15). Dazu sollte in der Originaldatei die Ausrichtung der Gebäude vorsichtshalber überprüft werden.

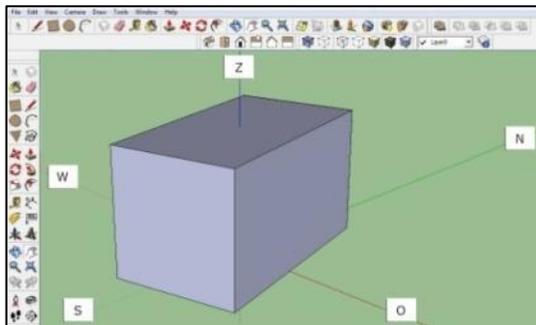


Abb. 5.15 Koordinatenachsenorientierung und Benutzeroberfläche in Google Sketchup nach Import eines originalen COLLADA-Gebäudemodells.

Anhand einer Vielzahl unterschiedlicher Modifizierungstools kann die Geometrie des ursprünglichen Modells schnell und effektiv bearbeitet werden. Dabei dienen Messbilder, sonstige Fassadenfotografien und Aufrisszeichnungen als Quellen zur Verfeinerung der Fassadendetails.

Da es in der Potsdamer Architektur aufgrund des speziellen Baustils keine einheitliche Dachfirsthöhe gibt, wurden die Zuweisung der Firsthöhen textliche Beschreibungen aus bauwissenschaftlicher Literatur herangezogen ([Qu5]). Beispielsweise kann laut dieser Quelle für Satteldächer von zwischen 1740 und 1880 erbauten Gebäuden angenommen werden, dass die Firsthöhe der halben Hausbreite entspricht [Qu5, S. 278, 282].

Der absolute Fehler bei der Ermittlung der Firsthöhen liegt bei 1 bis 2 Metern. Bei der Detailrekonstruktion erhalten die Gebäudemodelle ausdifferenzierte Dachformen entsprechend den Dachtypkodierungen der Objekte (Attribut „typDach“), welche anhand des historischen Luftbilds und anderen historischen Fotomaterialien für jedes Gebäude festgelegt wurden (Abb. 5.16).

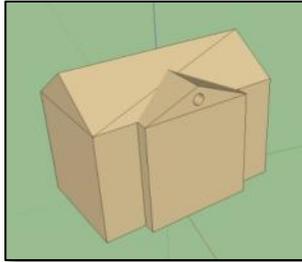


Abb. 5.1 Prägnante Gebäudedetails wie Dachform, Anbauten und Fassadenvorsprünge nach Bearbeitung in Google Sketchup.

Das modifizierte Gebäudemodell wird als COLLADA-Datei aus Sketchup über die Funktion *File - Export -> 3D-Modell* exportiert. Die Geometrie des ursprünglichen in ArcScene vorhandenen LOD1-Modells wird durch das neue – nun LOD2-Modell – über die Funktion *3D-Editor -> Replace with Model* ersetzt und als neues Multipatch-Feature abgespeichert, wobei die Attribute des Originals erhalten bleiben (vgl. Abb. 5.17).

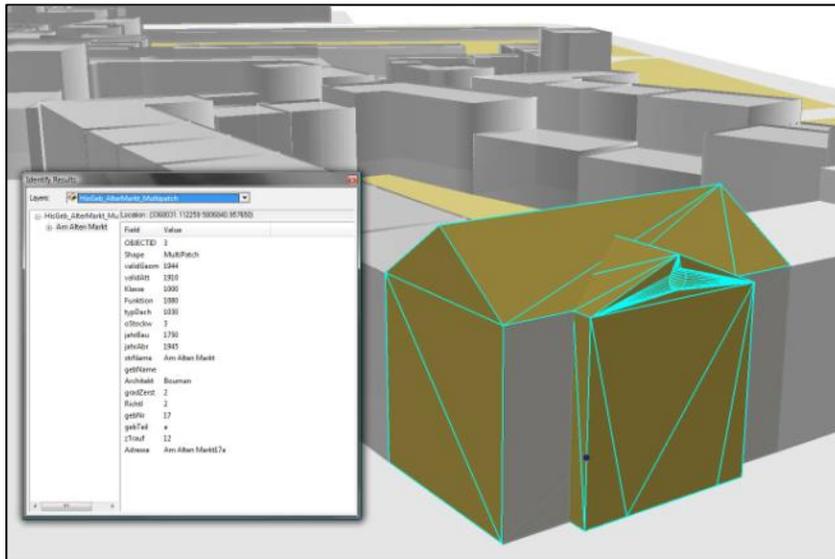


Abb. 5.17 Austausch des ursprünglichen Blockmodells (Abb. 5.13) durch das detaillierte LOD2-Modell in ArcGIS.

5.3.4 Schematischer Arbeitsprozessablauf und Bearbeitungshinweise

Abbildung 5.18 zeigt schematisch den Arbeitsablauf für die Erstellung eines Gebäudemodells mit einer Detaillierungsgrad LOD2 oder höher aus einem LOD1-Blockmodell unter Einsatz von ArcGIS 10 und Google Sketchup 8.

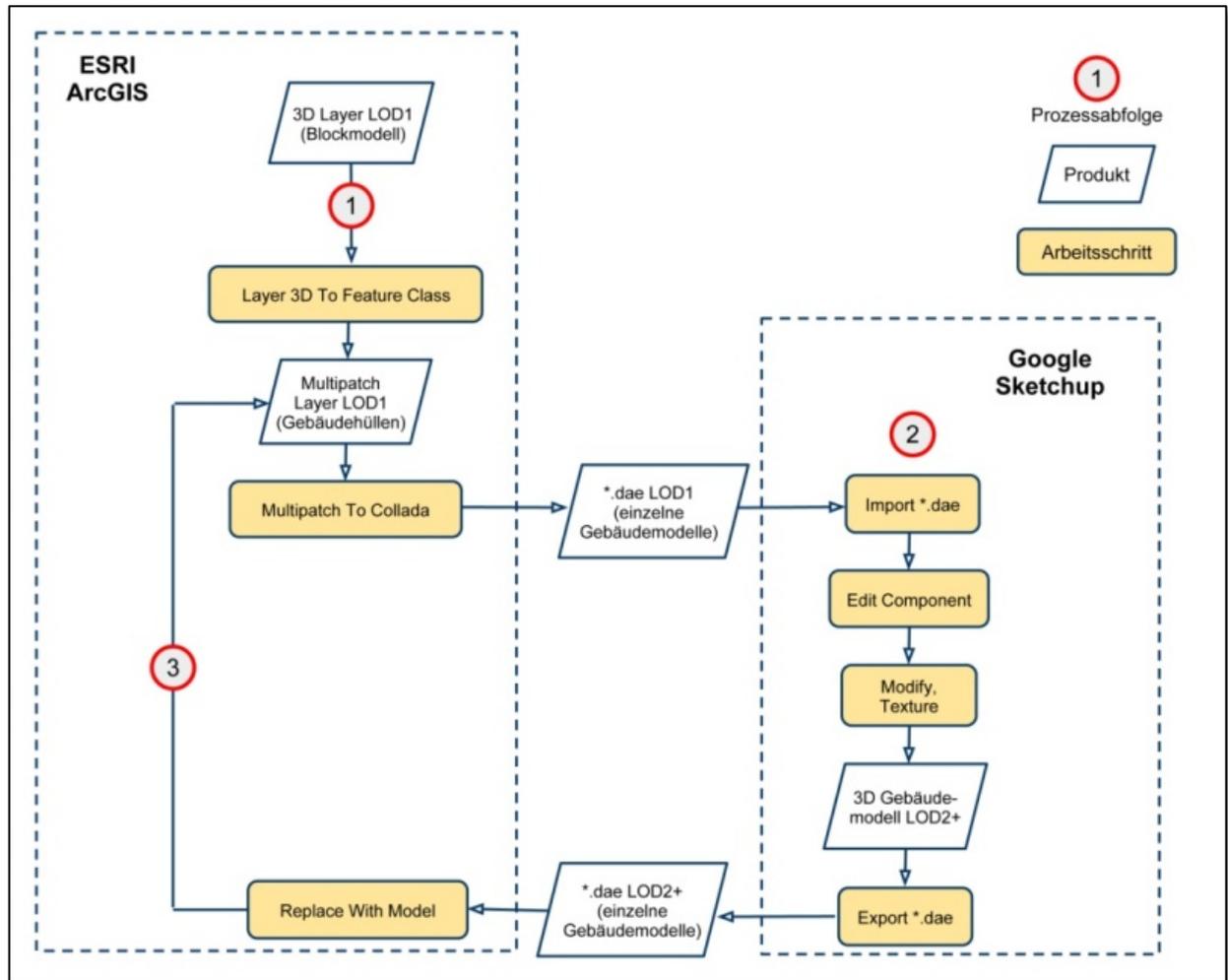
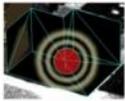


Abb. 5.18 Workflow-Diagramm LOD1 zu LOD2 und höher.

Bei der Modifizierungsarbeit sind jedoch einige Unzulänglichkeiten aufgetreten. Besonders die Veränderung der Grundrissmaße in Google Sketchup kann zu Topologie-Problemen zwischen angrenzenden Gebäuden führen. Auch führen nicht-orthogonale Gebäudegeometrien (bspw. „schiefe“ Hauswände, resultierend aus der Extrusion nicht rechtwinkliger Grundrissen) zu Komplikationen in der Nachbearbeitung in Google Sketchup. Tabelle 5.5 beschreibt während der Arbeit identifizierte Fehlerquellen und mögliche Lösungsvorschläge um eine korrekte Funktionsweise während des Datenaustauschs zu gewährleisten.

Tab. 5.5 Bearbeitungshinweise beim Modifizieren von Gebäudegeometrien in Google Sketchup.

Problematik	Auswirkung	Beispiel	Lösungsvorschlag
In Sketchup: Modifizierung der Grundrissgeometrie eines Gebäudemodells führt zu Fehlern in der Topologie angrenzender Gebäude in ArcGIS	In ArcGIS: Veränderte topologische Eigenschaften (Überschneidungen, Lücken) zwischen benachbarten Gebäuden		In ArcGIS: Modifizierung in der original Feature Datei unter Beibehalt der topol. Eigenschaften. Neues Multipatch Feature erstellen, welches in ArcScene durch Copy und Paste in den Multipatch Gesamtlayer eingefügt werden kann
In Sketchup: "Schiefe" Gebäudegeometrien können zu Schwierigkeiten bei der Detailmodellierung in Sketchup führen	In Sketchup: Dachformationen, Fassadenvorsprünge und andere Gebäudedetails lassen sich nicht als simple geschlossene Flächen modellieren		In Sketchup: Modellierung von geschlossenen Teilflächen und gruppieren der Einzelelemente zu einer Elementgruppe (<i>Make Component</i>).
In Sketchup: Nicht texturierte Flächen führen zu Darstellungsfehlern in ArcGIS	In ArcScene: Flächen erscheinen transparent.		In Sketchup: Hinzufügen einer opaquen Flächentexturierung mit dem <i>Paint Bucket</i> -Werkzeug

5.4 Erfassung von Umweltinformationen

Für die Rekonstruktion eines räumlich geschlossenen urbanen Gefüges ist neben der Erfassung der Gebäude auch das Einbinden von Umweltinformationen von großer Bedeutung, da diese das Stadtbild maßgeblich prägen. Die Dokumentation von Veränderungen umweltspezifischer Charakteristiken ist ein wichtiges Mittel zur Stadtentwicklungsanalyse. Eine Teilaufgabe dieser Arbeit war es deshalb, anhand des Testgebiets zu untersuchen, inwiefern umweltbezogene Informationen aus den vorliegenden Basisdaten erfasst und mit welcher geometrischen und semantischen Genauigkeit diese bestimmt werden können.

5.4.1 Klassifizierung der Umweltflächen und standardisierte Attributierung

Zu den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Umweltinformationen zählen die Themen Flächennutzung (5.4.2), Transport (5.4.3), Vegetation (5.4.4) und Gewässer (5.4.5). Die Objekte innerhalb eines spezifischen Themas werden entsprechend des CityGML Encoding Standard kodiert [www5]. Die Klassifizierung der einzelnen Objekte beruht auf den Objektartendefinitionen des AAA-Fachschemakatalogs [www4]. Diese Definitionen sind Voraussetzung für eine korrekte Kodierung der einzelnen Objekte. Die Flächengröße ist dabei an die Generalisierungsvorgaben aus dem CityGML Standard angelehnt, für thematische Flächen ist diese mit $>50*50\text{m}$ (LOD1) bzw. $>5*5\text{m}$ (LOD2) angegeben [www5]. Dabei soll die Dokumentation entsprechend des Einsatzes für den höchstmöglichen Detaillierungsgrad erfolgen. Für geringere Genauigkeitsansprüche können die Daten in Folge generalisiert werden.

5.4.2 Flächennutzung

Die historische Flächennutzung wird gemäß der im CityGML Encoding Standard unter C.3 („Land Use“) aufgeführten Kodierungslisten klassifiziert. Dabei werden in diesem Layer alle



im Standard aufgelisteten Objektartengruppen (CityGML: *LandUseClassType*) aufgenommen. Das historische Luftbild wird dabei als Grundlage für die Identifizierung der Objektflächen durch Bildinterpretation herangezogen (Abb. 5.19). Der hohe Kontrast im Luftbild hilft dabei, die Flächen-
grenzen geometrisch abzugrenzen.

Abb. 5.19 Durch Luftbildinterpretation identifizierbare Nutzungsflächen.

Das Ergebnis der Interpretation liefert einen homogenen Flächennutzungslayer (Abb. 5.20).



Abb. 5.20 Nutzungsflächen klassifiziert nach Objektartengruppen gemäss CityGML Kodierungsstandard (www5).

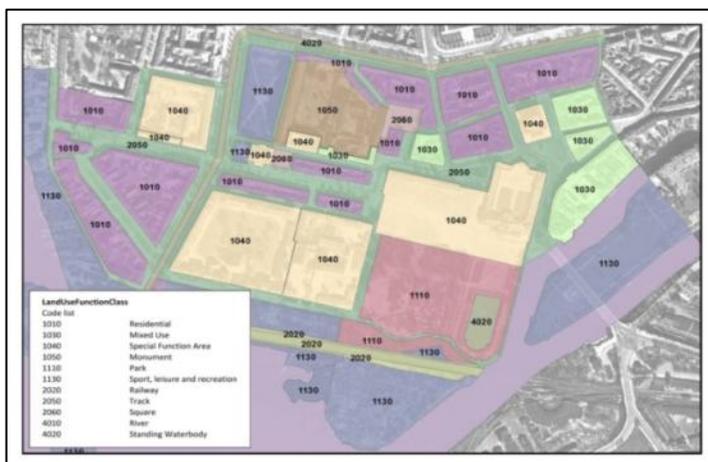


Abb. 5.21 Funktionsflächen klassifiziert nach Objektarten gemäss CityGML Kodierungsstandard (www5).

Neben der Einteilung in übergeordnete Objektgruppen wurde eine Differenzierung nach Funktionsflächen ((CityGML: *LandUseFunctionType*) anhand weiterer verfügbarer Basisdaten (bspw. Textbeschreibungen, historische Fotografien) sowie schon verarbeiteter Datensätze (bspw. Attribut "Funktion" aus dem Gebäudedatensatz) vorgenommen (Abb. 5.21). Zusätzlich wurde auch die Nutzung durch die Öffentlichkeit (CityGML: *LandUseUsageType*) bestimmt (Abb. 5.22). Anhand der Funktionsflächen lassen sich diese Informationen ableiten.



Abb. 5.22 Funktionsflächen klassifiziert nach ziviler Nutzung gemäss CityGML Kodierungsstandard (www5).

5.4.3 Transport

Anhand der Aufteilung der Nutzungsklassen lassen sich sämtliche Flächen, die dem Transport zugeordnet sind, erfassen. Eine differenzierte Unterteilung der Transportflächenarten geschieht mittels Anlegen eines eigenen thematischen Layers „Transport“. Transportbezogene Objekte werden dabei entweder durch lineare Elemente oder durch die Beschreibung ihrer dreidimensionalen Ausprägung (bspw. Flächen) definiert [www5]. Durch Luftbildinterpretation unter Hinzunahme von Fotomaterial für den Informationsabgleich konnten alle Transportflächen erfasst und CityGML-konform klassifiziert und kodiert werden.

Erfasst wurden exemplarisch für einen Ausschnitt sowohl linienhafte Objekte (Strassenbahngleise) als auch flächenhafte Objekte (Abb. 5.23.(1)). Die semantische Differenzierung der Objekte setzt sich aus folgenden Eigenschaften zusammen: Übergeordnete Verkehrsfunktionsklasse (CityGML: *AuxiliaryFunctionType*), Transportwegfunktion (CityGML: *TrafficFunctionType*), Nutzung durch Vehikel (CityGML: *TrafficUsageType*) und Oberflächenbelag (CityGML: *TrafficSurfaceMaterialType*) (Abb. 5.23(2)). CityGML berücksichtigt außerdem die Art der Nutzung (CityGML: *TransportationComplexClass*) sowie eine Verkehrswege-Hierarchie (CityGML: *TransportationComplexFunction*); diese Aus-

differenzierung wurde aufgrund von fehlenden Informationen bei der praktischen Durchführung nicht übernommen.

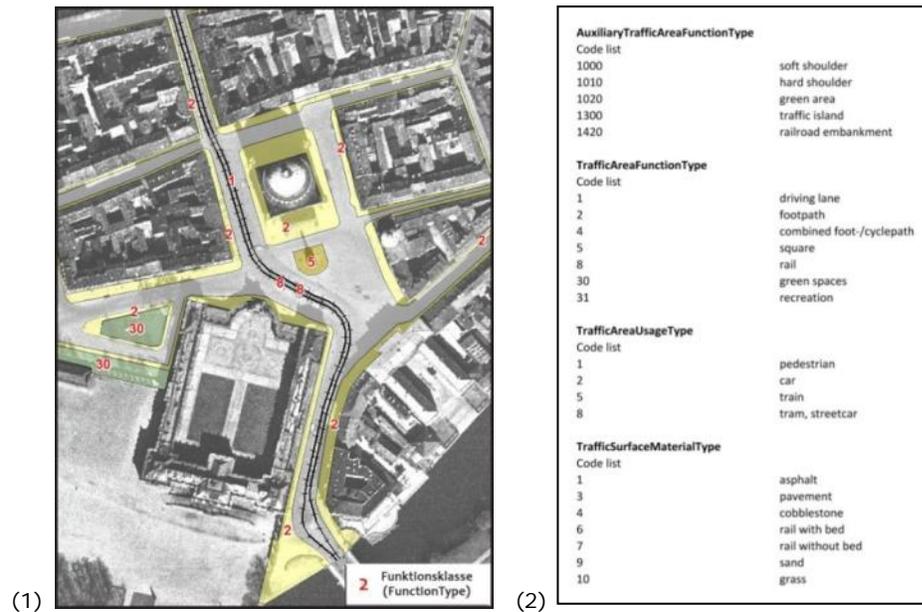


Abb. 5.23 (1) Die thematische Klasse „Transport“ enthält lineare und flächenhafte Elemente (Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet). (2) Attributkodierung der innerhalb des Untersuchungsgebiets relevanten Flächenobjekte nach CityGML Kodierungsstandard (www5).

5.4.4 Vegetation

Das historische Potsdam war durch ein „einzigartiges Grünsystem“ geprägt [Qu7]; sowohl Park- und Grünanlagen als auch Einzelvegetation (Alleen, vereinzelte Bäume oder Baumgruppen) waren auch im Stadtzentrum nach raumgestalterischen Gesichtspunkten angelegt. Dieser grüne Charakter sollte anhand eines Vegetationslayers nachvollzogen und visualisiert werden. Vegetationsflächen mit einer Größe von mehr als fünf mal fünf Metern (vgl. [www5]) wurden als flächenhafte Objekte abgespeichert, Einzelvegetation als Punktlayer (Abb. 5.24). Das historische Luftbild bildete eine gute Grundlage zur Erfassung der Informationen: Der Aufnahmezeitpunkt ist April, die Bäume sind deshalb noch fast unbelaubt und lassen somit eine eindeutige Lagebestimmung zu. Zusätzlich lassen sich die Baumtypen ausgezeichnet nach Laub- und Nadelbaum unterscheiden. Nadelbäume (Koniferen) sind nur vereinzelt vertreten und deshalb vernachlässigt und nicht im Flächenlayer berücksichtigt. Die Baumgröße wurde ebenfalls klassifiziert (≤ 6 m und > 6 m, vgl. dazu [www5]), konnte allerdings nur annähernd aus Schattenwurf und durch optischen Vergleich identifiziert werden. Die Differenzierung von Baumgröße und Baumart wurde hauptsächlich im Hinblick auf die spätere Visualisierung vorgenommen, bei der prototypische Texturen eingesetzt werden sollen.

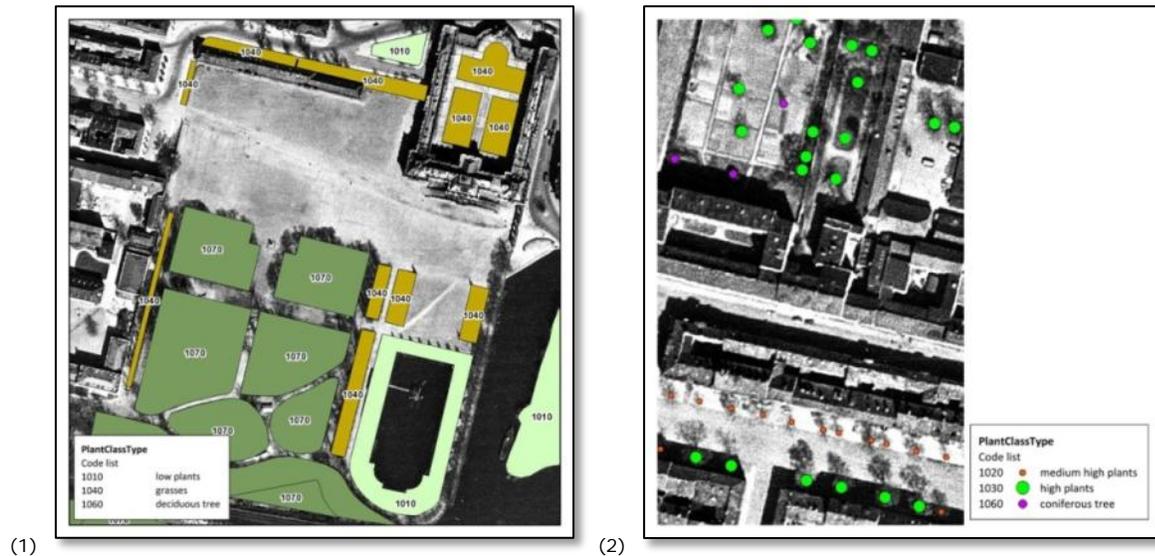


Abb. 5.24 Identifizierung und standardkonforme Klassifizierung [www5] der Vegetation als (1) flächenhafte Objekte und (2) Einzelobjekte.

5.4.5 Gewässer

Der Layer „Gewässer“ enthält alle hydrologischen Objekte differenziert nach Klasse, Funktion und Nutzung (Abb. 5.25). In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden einschneidende Veränderungen an den Wasserstrassen vorgenommen. Der Stadtkanal, welcher 1673 angelegt wurde und seitdem als Entwässerungsgraben und ab 1722 nach baulichen Veränderungen auch als Transportweg diente, wurde 1965 zugeschüttet [www6]. Seit 1999 wird er teilweise rekonstruiert. Aufgrund der veränderten Verkehrsführung und Infrastruktur ist allerdings ein vollständiger Wiederaufbau mit historischem Verlauf nicht möglich. Auch die Uferlinie der Havel hat sich seit dem Aufnahmezeitpunkt des Luftbildes ebenfalls an mehreren Stellen gravierend verändert.

Daran zeigt sich, dass die Rekonstruktion des historischen Gewässernetzes ein wichtiges thematisches Kriterium zur Dokumentation von umweltspezifischen Veränderungen eines städtischen Raums ist.

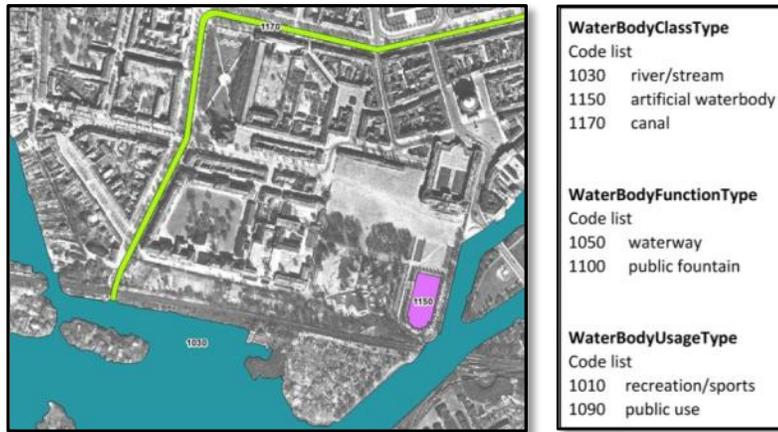


Abb. 5.25 Rekonstruktion des Gewässernetzes anhand des historischen Luftbildes sowie Kodierung der Objekte gemäss CityGML [www5].

5.4.6 Erreichte geometrische und semantische Genauigkeiten

So wie bei der Attributierung der Gebäudeeigenschaften erfolgte auch die Zuweisung der Attribute für die Umweltlayer zumeist durch Bildinterpretation oder anhand der historischen Kartenmaterialien. Dadurch ergaben sich Unsicherheiten sowohl bei der Identifizierung der Flächengeometrien als auch der Bestimmung der thematischen Semantik, insbesondere nicht-visueller Eigenschaften wie der Flächennutzung. Um die Zuverlässigkeit der Daten nachvollziehen zu können, ist deshalb die Dokumentation der erreichten Genauigkeiten von großer Bedeutung (Tab. 5.6).

Tab. 5.6 Genauigkeitsdefinitionen der thematischen Umweltlayer

Layer	Geometrische Genauigkeit in m ²	Semantische Genauigkeit in %
Flächennutzung	2-5	70-80
Transport	0.5-1	90-100
Vegetation	2-5	70-80
Gewässer	1-2	100

Jegliche Genauigkeitsnachweise sollten im Metadatendokument verwaltet werden.

5.5 Erzeugung eines historischen Geländemodells

Für die Platzierung eines Stadtmodells auf der Erdoberfläche ist neben dem horizontalen Raumbezug auch die richtige Höhenlage wichtig. Zu diesem Zweck werden digitale Höhenmodelle (DEM) als Basis genutzt, auf denen die Daten „aufgesetzt“ werden. Für die vertikale Anpassung des Stadtmodells für Potsdam stand ein Höhenmodell zur Verfügung, welches 2007 aus Laserscandaten ermittelt wurde und im ASCII-Format vorlag. Die Bodenauflösung des Modells beträgt 3x3m².

5.5.1 Ausgangsbasis und Notwendigkeit einer Modifizierung

Für eine realitätsgetreue Rekonstruktion der Stadtsituation sollte das Höhenmodell den historischen Gegebenheiten entsprechen. Aufgrund des Kriegszustands und der Kriegsfolgen, ebenso durch die erheblichen baustrukturellen Veränderungen in der Nachkriegszeit und während der DDR-Regierung (Aufschüttungen und Einebnungen zur Flurbereinigung und Neuerrichtung von Gebäudekomplexen, Trockenlegung und Einebnung des Stadtkanals, Abtragungen und Ausbauten im Uferbereich) hat sich die Geländeoberfläche in dem letzten Jahrhundert erheblich verändert. Abbildung 5.26 (2) zeigt, welche logischen Fehler bei der Zusammenführung der historischen Modellkomponenten mit dem aktuellen DEM auffielen.

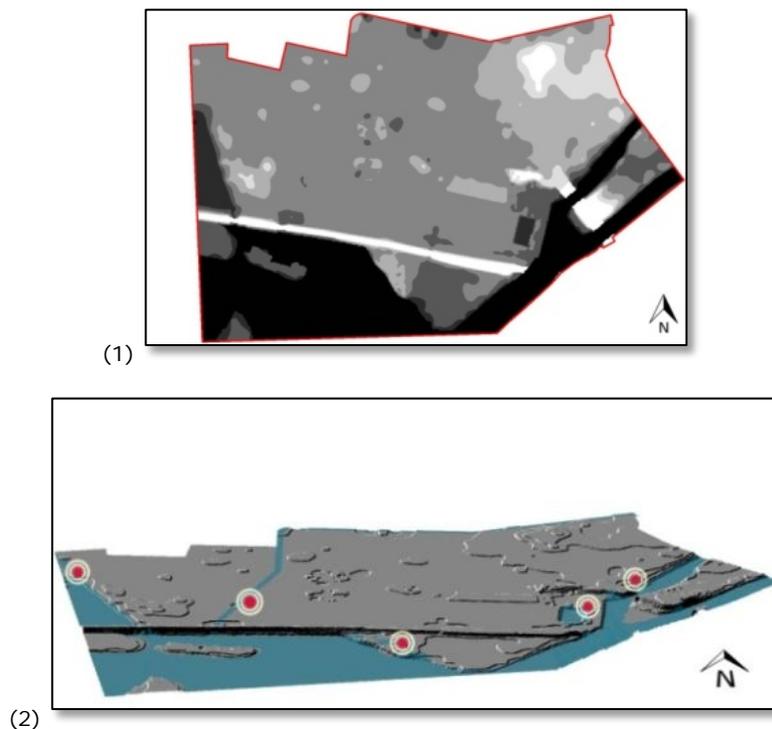


Abb. 5.26 (1) Aktuelles DEM als Höhenraster. (2) Aktuelle Geländeoberfläche (dargestellt als *Hillshade*) korrespondiert nicht mit dem historischen Gewässernetz (Differenzen sind rot markiert).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollte das aktuelle Höhenmodell an die historische Geländeoberflächensituation angepasst werden. Für eine vollständige Erfassung des historischen Geländes fehlten allerdings verlässliche Grunddaten. Nur eine der zur Verfügung stehenden historischen Karten enthielt Höhenlinien, diese waren nur bruchstückhaft vorhanden, was wahrscheinlich auf einen Fehler in der Maskierungstechnik während des Herstellungsprozesses zurückzuführen ist (s. Abb. 5.27).

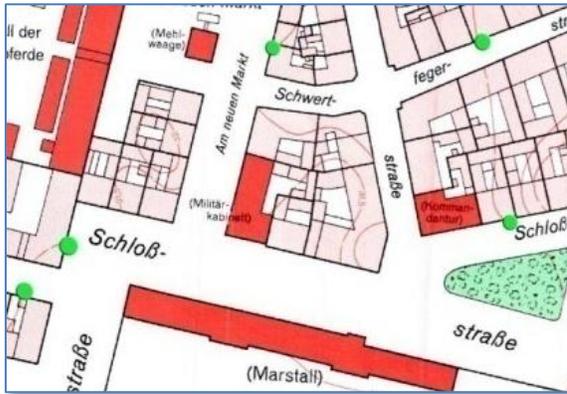
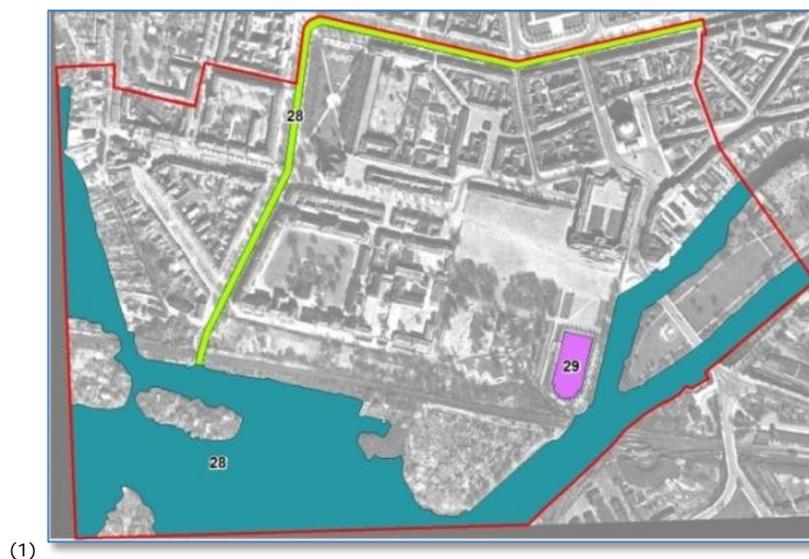


Abb. 5.27 Ausschnitt aus dem GSV Stadtplan. Grün markiert sind die unterbrochenen Höhenlinien exemplarisch markiert.

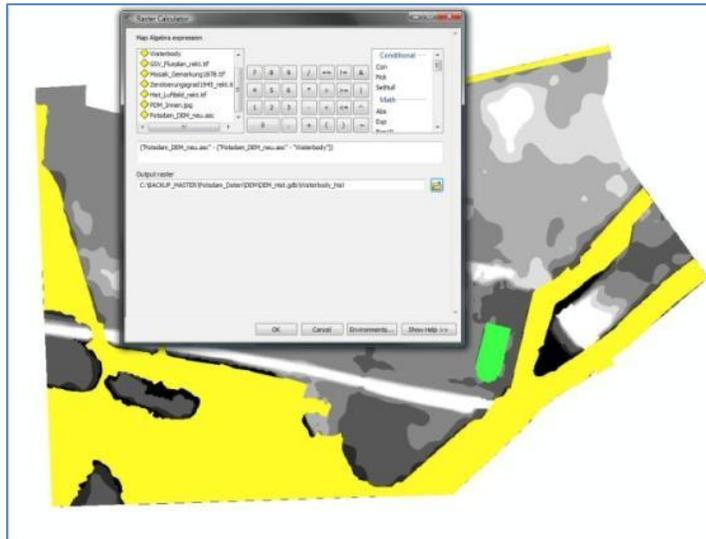
Demnach musste eine andere Lösung gefunden werden, um die historischen Höheninformation abzuleiten. Im folgenden Kapitel wird aufgezeigt, mit welchen Methoden die Informationen übertragen werden konnten.

5.5.2 Angewandte Methoden zur Anpassung an die historischen Gegebenheiten

Eine Alternative bestand darin, das aktuelle Höhenmodell weitestmöglich mit Hilfe der vorliegenden Daten zu modifizieren. Dies konnte nur an jenen Stellen geschehen, an denen Informationen über die historische Geländehöhe ableitbar sind, bspw. anhand der Gewässeroberfläche. Für den Stadtkanal und die Havelfläche wurde die Gewässeroberfläche entsprechend der Höhenangaben aus dem aktuellen DEM mit 28 m über Normal Null (NN) als Z-Wert festgelegt. Das Neptunbecken im Schlosspark erhielt als Z-Wert eine Höhe von 29 Metern über NN. Anhand dieser Angaben kann das Höhenmodell über eine Neuberechnung der Rasterwerte (Abb. 5.28.(2)) an den Uferrändern editiert und die Geländehöhe in diesen Bereichen den historischen Verhältnissen angepasst werden.



(1)

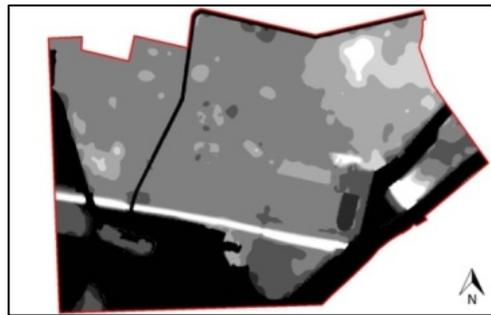


(2)

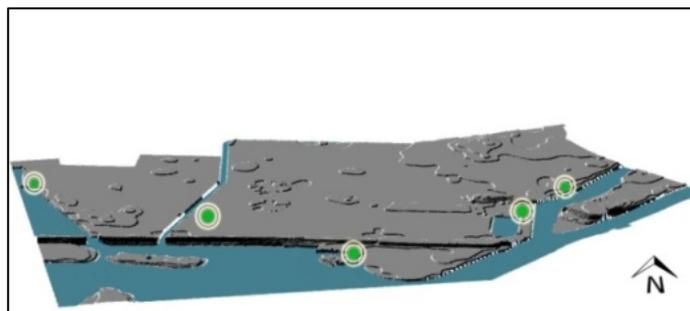
Abb. 5.28 (1) Zuweisung einer Gewässerstandshöhe für Fließ- und Stehgewässer. (2) Neuberechnung der Höhenwerte im aktuellen Höhenmodell anhand der Gewässerstandshöhe.

Für ein verbessertes Ergebnis wäre noch die Einführung von Bruchkanten entlang der Kanalmauer und der Uferbegrenzung möglich. Auf diese detaillierte Verarbeitung wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch verzichtet.

Abb. 5.29 zeigt das Ergebnis der Modifizierung des Oberflächenmodells basierend auf den historischen Wasserflächen.



(1)



(2)

Abb. 5.29 (1) Im Gewässerbereich angepasstes DEM nach Neuberechnung der Höhenwerte als Rasterdarstellung. (2) Ehemalige Differenzen (grün markiert) sind nun behoben (Darstellung als *Hillshade*).

6 VISUALISIERUNG, ANALYSE UND BEREITSTELLUNG

Nach Erzeugung der einzelnen Modellkomponenten in den vorangegangenen Arbeitsschritten werden diese zu einem Gesamtmodell zusammengefügt und unter Nutzung fotorealisticcher und synthetischer Texturen visualisiert. Die dazu angewendeten Methoden und Werkzeuge sowie die konkrete Umsetzung werden in Abschnitt 6.1 erläutert.

Anhand der dokumentierten und in der Objekttabelle verwalteten Objekteigenschaften lassen sich durch gängige Abfragesprachen attributive Analysen am Modell durchführen, die Aufschluss über unterschiedliche Fragestellungen zu historischen Stadtsituationen geben. Dabei werden sowohl Eigenschaften von Gebäuden als auch der Umwelt einbezogen. Abschnitt 6.2 zeigt exemplarisch Ergebnisse und Potential des Modells für analytische Fragestellungen auf.

Abschnitt 6.3 zeigt die Bereitstellung des Modells durch Export der Modellkomponenten in das KML-Format, durch das die Darstellung der Daten in Google Earth ermöglicht wird. Dabei werden neben der Vorgehensweise auch Defizite erläutert, die bei der Übertragung der Daten auffallen. Weiterhin wird untersucht, inwieweit einzelne Komponenten des historischen 3D-Stadtmodells im CityGML-Format bereitgestellt werden können. Dabei werden Schwierigkeiten bei der Transformation nach CityGML sowie mögliche Lösungen aufgezeigt.

6.1 Visualisierung des Modells

Für die Visualisierung des Modells soll eine Texturierung der einzelnen Modellkomponenten erfolgen, damit ein annähernd realistisches Abbild der historischen Stadtgestalt erzeugt wird und der Wiedererkennungseffekt beim Betrachter erhöht wird. Zu diesem Zweck wird hauptsächlich auf fotorealisticche Texturen wie Messbilder oder andere Fotomaterialien zurückgegriffen, soweit diese zur Verfügung standen. Neben der Texturierung der Gebäudefassaden wird auch eine Texturierung der Umwelt (Verkehrswege, Vegetation) durchgeführt. Für die Texturierung von Flächen werden synthetische Texturen verwendet, die teilweise individuell erstellt und dem historischen Aussehen entsprechend angepasst wurden. Um den Realitätsgrad zu erhöhen, werden zusätzlich Stadtmöbel und charakteristische Zierbauwerke (Kollonaden, Obelisk) in das Stadtmodell integriert; diese standen als 3DS-Modelle zur Verfügung (s. Tab. 4.4).

Die Umsetzung der Visualisierung wird exemplarisch für das Gebiet um den Alten Markt dargestellt (Abb. 6.1). Dieser bildet einen historischen Kern der Stadt und ist aufgrund seiner Bebauungsstruktur als geschlossenes Ensemble von Repräsentativbauten für diesen Zweck besonders geeignet. Alle texturierten Modellkomponenten innerhalb dieses Gebiets werden in ArcScene zusammengefügt und visualisiert.



Abb. 6.1 Gebäudeensemble am Alten Markt (rot gekennzeichnet), für das eine fotorealistische Fassadentexturierung des LOD2-Modells durchgeführt wird.

6.1.1 Gebäudetexturierung mittels historischer Fassadenbilder

Für die Texturierung der Gebäude um den Alten Markt wurden ausschließlich historische Messbilder genutzt. Diese wurden vom Brandenburgischen Landesamt für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseum (<http://www.bldam-brandenburg.de/>) anhand von Originalen vervielfältigt und für den Zweck der Arbeit durch das Hasso-Plattner-Institut zur Verfügung gestellt. Nach der Digitalisierung (Scan) lagen die Bilder im jpg-Format mit einer Pixelauflösung von 300 dpi vor. Aufgrund der unterschiedlichen Qualität der Abzüge mussten die Fotografien größtenteils digital nachbearbeitet werden. Dazu wurde die Software Adobe Photoshop CS2 eingesetzt. Besondere Bearbeitungen in Bezug auf Helligkeit/Kontrast, Ausgleichung der Grauwertverteilung und verschiedene Filterungsmethoden waren nötig. Abbildung 6.2 zeigt die Qualität der Vorlagen durch einen Vergleich eines unbearbeiteten und eines bearbeiteten Bildes.



Abb. 6.2 Fassadenmessbild eines Gebäudes (Humboldtstrasse 4). (1) vor der Bildbearbeitung und (2) nach der Bildbearbeitung in Photoshop CS2. Das Histogramm gibt Auskunft über die Grauwertverteilung in den Bildern.

Für die praktische Umsetzung der Texturierung kam Google Sketchup 8 zum Einsatz. Google Sketchup bietet neben einer Vielzahl von Standardtexturen, die in einer internen Texturenbibliothek zur Verfügung stehen, auch die Möglichkeit, eigene Texturen zu erstellen und zu verwalten. Über die Möglichkeit, unterschiedliche Bildformate wie jpg, png und gif zu laden, lässt sich schon nach Import eines Bildes entscheiden, ob dieses als eigenständiges Element verwaltet werden soll, ob es als Textur dient oder als Basis zur Erstellung eines 3D-Modells genutzt wird. Im Falle der Fassadentexturierung wird die

Option „Use as texture“ markiert und das Fassadenbild einer zuvor ausgewählten Seitenfläche des Modells zugewiesen (Abb.6.3).

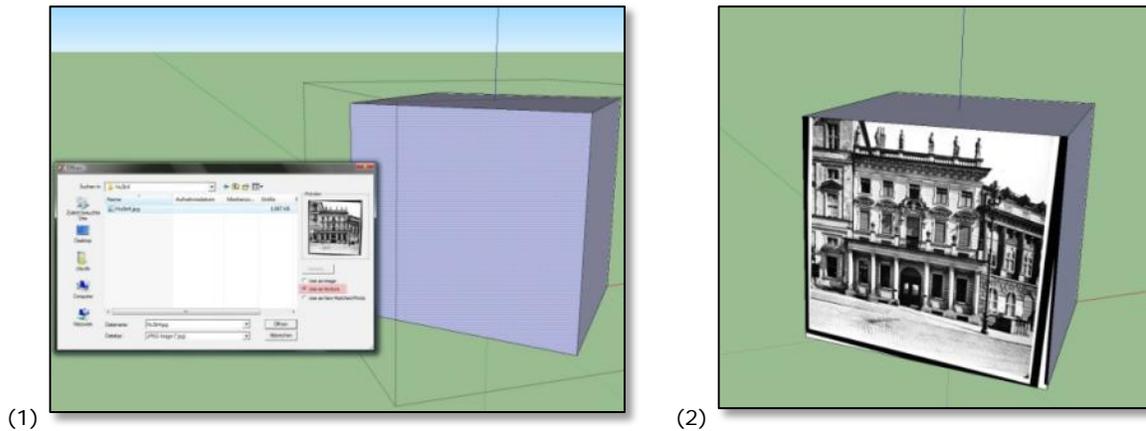


Abb. 6.3 (1) Importieren eines Fassadenbildes als Textur (rot markiert). (2) Das Bild wird automatisch auf die zuvor markierte Frontfläche eines Gebäudemodells gelegt.

Nach Zuweisung der Textur können durch verschiedene Transformationsmöglichkeiten perspektivische Verzerrungen im Bild grob ausgeglichen und die Textur an die richtige Position gebracht werden (Abb. 6.4).

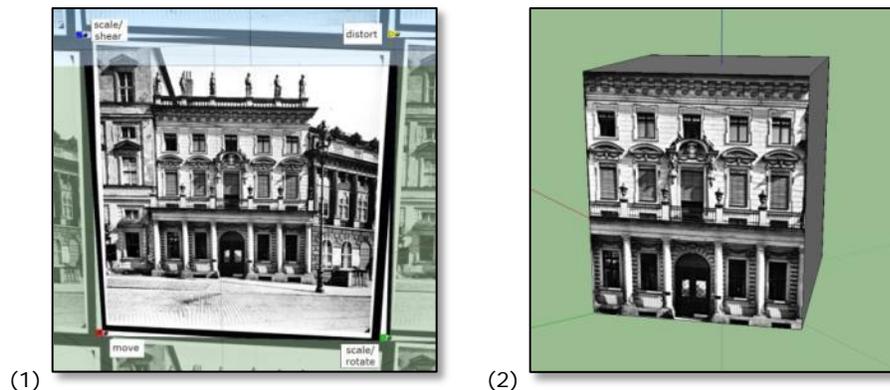


Abb. 6.4 (1) Transformationswerkzeuge in Google Sketchup zur Ausrichtung der Textur an der Modelloberfläche. (2) An der Modelloberfläche orientierte, entzerrte Fassadentextur nach der Transformation.

Durch Anbringung der Textur an die Modellfläche lassen sich die Geometrien (Verhältnis Höhe/Breite) eines Gebäudes nochmals überprüfen. Fallen hier Unstimmigkeiten auf, so müssen entsprechende Modifizierungen am Modell vorgenommen werden. Eine Aktualisierung der Gebäudehöhe kann vereinfacht in Sketchup erfolgen, muss aber in der Attributtabelle des Gebäudes (Höhenattribut) im Modell berücksichtigt werden. Eine Modifizierung des Gebäudegrundrisses kann allerdings nicht ohne Weiteres in Sketchup vollzogen werden, da beim späteren Austausch des Modells in der Originaldatei (vgl. Kapitel 5.3.3) Lücken oder Überlappungen zu angrenzenden Gebäuden entstehen. So müssen bspw. Veränderungen an der Gebäudebreite in der Originaldatei der Gebäudegrundrisse

(shp-Datei) vorgenommen werden, um die topologischen Eigenschaften zwischen angrenzenden Gebäuden zu erhalten (vgl. Tab. 5.5).

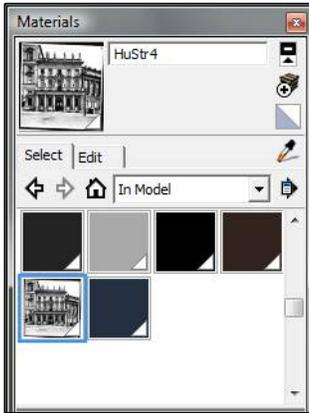


Abb. 6.5 Verwaltung der Fassadentextur des Gebäude-modells aus Abb. 6.4 in der Texturbibliothek von Google Sketchup.

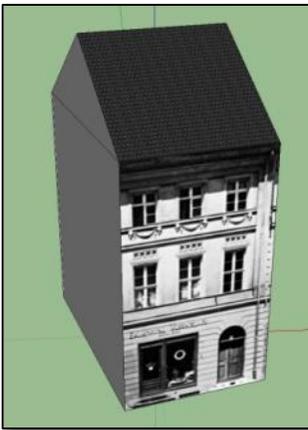


Abb. 6.6 Dachtexturierung eines historischen Gebäudes mittels synthetischer Textur.

Sobald ein Gebäudemodell eine neue Textur erhalten hat, wird diese in der Texturbibliothek gespeichert und verwaltet (Abb. 6.5). Dort kann sie jederzeit verändert oder gelöscht werden.

Für das Testgebiet ist ausschließlich eine Texturierung der Straßenfassade möglich, da die Aufnahmen zu Dokumentationszwecken größtenteils von der Frontfassade eines Gebäudes gemacht wurden. Die Seitenflügel eines Gebäudes wurden in den meisten Fällen nicht dokumentiert, sodass Informationen zu deren Gestalt fehlen. Weiterhin ist die Nutzung der Fassadenphotos für die Texturierung der Gebäudedächer nicht sinnvoll, da diese Bereiche im Bild aufgrund der Aufnahmeperspektive stark verzerrt sind.

Die Dachtexturierung erfolgt daher mittels synthetischer Texturen. Google Sketchup bietet für Dachbedeckung eine Vielzahl unterschiedlicher Texturen an. Durch eine individuelle Modifizierung von Struktur und Farbe kann ein annähernd realistisches Aussehen erzeugt werden (Abb. 6.6).

Nach der Texturierung kann das Gebäudemodell als COLLADA-Modell aus Google Sketchup exportiert und in ArcScene importiert werden (vgl. Kapitel 5.3.3 und Abb. 5.18).

6.1.2 Integration von LOD3-Gebäudemodellen

Um den Alten Markt herum gibt es noch Altbestand an historischen Gebäuden, von denen LOD3-Modelle im 3ds-Format vorlagen (Abb. 6.6). Diese im Rahmen des REFINA-Projekts (<http://www.refina-info.de/>) erstellten Modelle wurden vom Hasso-Plattner-Institut in Potsdam für die Durchführung der Masterarbeit zur Verfügung gestellt. Da diese Gebäude in ihrer historischen Gestalt erhalten geblieben sind und durch photogrammetrische Auswertung anhand von Luftbildern und Laserscanaufnahmen rekonstruiert wurden,

eigneten sich die Modelle sowohl aufgrund der Genauigkeit als auch der visuellen Darstellung für die Integration in das historische Stadtmodell.



Abb. 6.7 Existierende 3D-Modelle historischer Bestandsbauten um den Alten Markt. (1) Nikolaikirche, (2) Altes Rathaus (links) und Knobelsdorff-Haus (rechts) mit dem Verbindungs-Neubau.

Diese Modelle mussten für die Einbindung in das historische Stadtmodell in Google Sketchup auf ihre Originalgröße skaliert werden, da sie in 3ds-internen Maßen vorlagen. Anhand einer der Achsenlängen wurden die Modelle auf die realen Proportionen vergrößert. Damit sie sich optisch in das Gesamtmodell (mit den aus den monochromen Messbildern gewonnen Fassadentexturen) einfügen, wurden sämtliche Modell-Texturen aus dem Farb- in einen Graustufen-Modus umgewandelt. Die Farbtransformation wurde in Photoshop vorgenommen, da Photoshop die Verarbeitung von Stapeldateien ermöglicht. Dazu wurde in Photoshop eine *Batch*-Datei erstellt, die alle Farbinformationen der Texturen in einem Durchlaufprozess transformierte. Da die Texturen für jedes Gebäudemodell in einem eigenen Ordner verwaltet werden, kann der Transformationsauftrag für diesen Ordner aufgegeben werden. Die erzeugten Texturen sollten visuell geprüft werden, da die ursprünglichen Bilder, aus denen die Texturen erzeugt werden, sehr unterschiedliche Kontraste aufweisen können. Eventuell muss im Nachhinein eine manuelle Kontrastanpassung für einzelne Texturen erfolgen. Ebenso müssen Inhalte, die das historische Erscheinungsbild stören würden (bspw. Reklameplakate an der Rathausfront) manuell retuschiert werden. Beim erneuten Laden des Modells in Google Sketchup wird nun auf die monochromen Texturen zugegriffen und das Modell erscheint in Graustufen.

Diese 3D-Objekte wurden nach der Bearbeitung in Google Sketchup als COLLADA-Dateien exportiert, um sie für die Integration in das historische Stadtmodell über ArcScene nach bekanntem Ablaufschema (vgl. Abb. 5.18) zur Verfügung zu stellen.

Für das Stadtschloss konnte aus dem Google 3D-Warehouse (<http://sketchup.google.com/3dwarehouse/>) ein schon vorhandenes LOD3-Modell genutzt werden (Abb. 6.7). In der Google 3D-Galerie kann nach beliebigen 3D-Modellen gesucht und diese als Google Sketchup-Datei (.skp) kostenlos heruntergeladen werden. Danach lassen sich die Modelle individuell bearbeiten, in andere Formate exportieren und in verschiedene Applikationen einbinden. Ebenso ist es möglich, selbst erstellte Modelle in die Galerie zu laden und

anderen Nutzern zur Verfügung zu stellen. Somit wird ein kostenloser Austausch von zum Teil hoch detaillierten 3D-Modellen unterstützt.



Abb. 6.8 Das Stadtschloss zu Potsdam als 3D-Sketchup-Modell, verfügbar im Google 3D-Warehouse. (Quelle: <http://sketchup.google.com/3dwarehouse/details?mid=60251d99119ae28c629a1570c228a478&prevstart=0>)

Auch die Texturen des Stadtschlusses wurden in Graustufen umgewandelt. Dabei war zum Teil eine erhebliche manuelle Nachbearbeitung der Einzeltexturen nötig, da der visuelle Eindruck durch die automatische Transformation erheblich gestört war: Einige Texturen erschienen zu hell, andere zu dunkel. Durch die zahlreichen Bearbeitungswerkzeuge in Photoshop (Kontrast- und Helligkeitsregulierung, Filtrierungsoptionen, Manipulation des Grauwertebereichs) konnte letztendlich ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht werden.

Nach Export in das COLLADA-Format wurden die LOD3-Modelle ebenfalls in ArcScene eingebunden und visualisiert. Das historische Stadtmodell enthält somit sowohl rekonstruierte, nicht mehr existierende Gebäudemodelle im LOD2 als auch Modelle von Altbestandsbauten im LOD3 (Abb. 6.8).



Abb. 6.9 Integration der LOD3-Modelle der Nikolaikirche (links), des Alten Rathauses (im Hintergrund) und des Stadtschlusses (rechts) in das Historische Stadtmodell.

6.1.3 Integration von Stadtmöbeln und Detailobjekten

Das Stadtbild um den Alten Markt ist neben der Anordnung von Gebäuden mit Barockfassaden auch durch einige besondere Detailbauten – wie die Kollonadengänge südlich und westlich des Schlosses sowie einen Marmorobelisken vor der Nikolaikirche – geprägt (Abb. 6.9). Auch waren die Straßen von Laternen gesäumt - diese trugen zum historischen Antlitz der Stadtmitte bei.

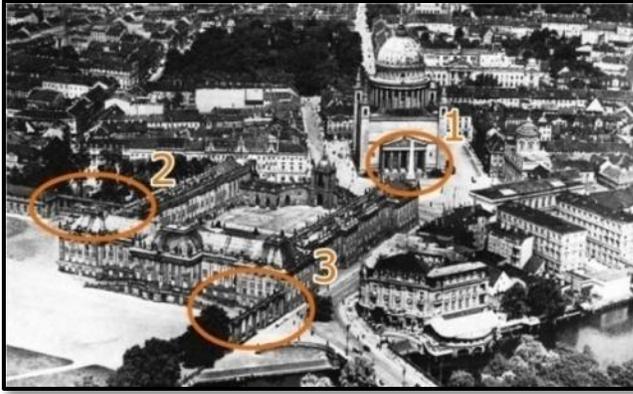


Abb. 6.10 Architektonische Detailobjekte im Untersuchungsgebiet.

In Abb. 6.9 sind der Marmorobelisk vor der Nikolaikirche (1), die Säulenkolonaden als Verbindung zwischen Marstall und Stadtschloss (2) und die Säulenkolonaden südlich des Stadtschlusses als Eingang zum Schlosspark (3) markiert. Diese baulichen Details sollten ebenfalls in das 3D-Modell integriert werden, weil sie das Stadtbild ebenso geprägt haben wie andere städtebauliche oder Vegetationsobjekte.

Auch wenn sie für die funktionelle Stadtstruktur keine besondere Bedeutung hatten, so haben sie doch einen Wiedererkennungswert und werten die virtuelle Umgebung auf.

Für den südlichen Kollonadengang des Schlosses sowie den Marmorobelisken – beides Objekte, die den Krieg „überlebt“ haben und somit zum historischen Altbestand im heutigen Potsdam gehören – lagen aus dem REFINA-Projekt texturierte 3D-Modelle im 3ds-Format (s. Kapitel 6.1.2) vor (Abb. 6.10). Diese Modelle wurden mit dem im Kapitel 6.1.2 beschriebenen Farbumwandlungsvorgang in Photoshop mit monochromen Texturen versehen. Für die Straßenlaternen konnte wiederum auf das Google 3D-Warehouse zurückgegriffen werden: Hier lag ein sehr geeignetes 3D-Modell einer Laterne vor (Abb. 6.10(3)).



Abb. 6.11 3D-Modelle von Detailobjekten für die Integration in das Stadtmodell. (1) Südliche Schlosskollonaden, (2) Marmorobelisk, (3) Ausmodelliertes, voll texturiertes 3D-Modell einer historischen Strassenlaterne, verfügbar im Google 3D-Warehouse.

So wie die 3D-Gebäudemodelle können auch jegliche weitere 3D-Objekte in Sketchup als COLLADA-Datei exportiert und in ArcScene importiert werden. Für die räumliche Platzierung in ArcScene müssen die Standorte der Objekte im historischen Luftbild und – im Falle der Straßenlaternen, die im Luftbild nicht eindeutig zu erkennen sind – über historisches Fotomaterial identifiziert werden und ein Ankerpunkt digitalisiert werden. Auch wurden

thematische Attribute für die Objektbeschreibung hinzugefügt. Das Ergebnis der Integration der Detailobjekte ist in Abb. 6.11 dargestellt.

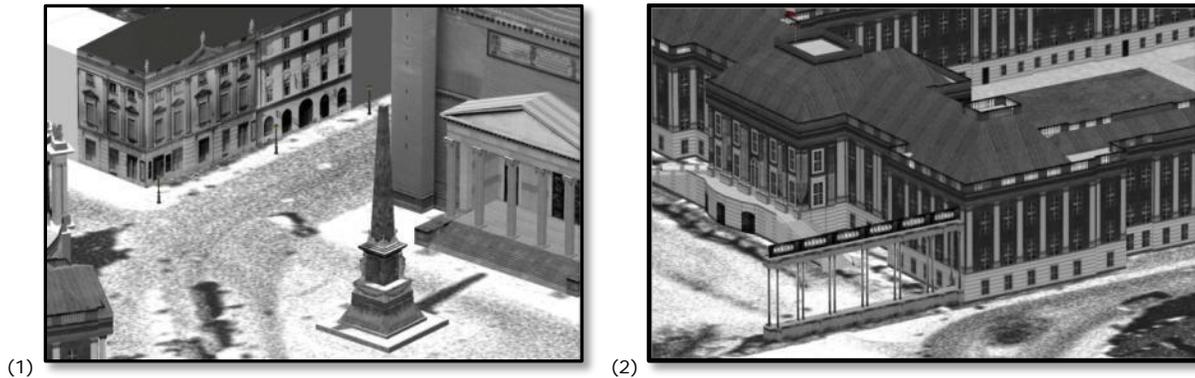


Abb. 6.12 Integration von Stadtmöbeln und Detailobjekten in das 3D-Modell. (1) Straßenlaternen und Marmorobelisk, (2) Südliche Schlosskollonaden.

6.1.4 Zusammenführung der Modellkomponenten

Für die Visualisierung des LOD2-Gesamtmodells werden die einzelnen Modellkomponenten in ArcScene zusammengeführt. Um eine möglichst konsistente, einheitliche und realitätsgetreue Darstellung zu erhalten, muss neben den Gebäuden auch das Umgebungsmodell texturrell gestaltet werden.

ArcScene bietet für die Texturierung eine reichliche Auswahl an generischen 2D- und 3D-Texturen an. Für die 3D-Symbolisierung von punktuellen Objekten (bspw. Vegetationsobjekte und Stadtmöbel) können die jeweiligen Symboleigenschaften jeweils individuell eingestellt und den Darstellungsbedürfnissen angepasst werden (Abb. 6.12). Ausserdem können selbst erstellte 3D-Symbole in die Symbolbibliothek eingeladen und verwendet werden.

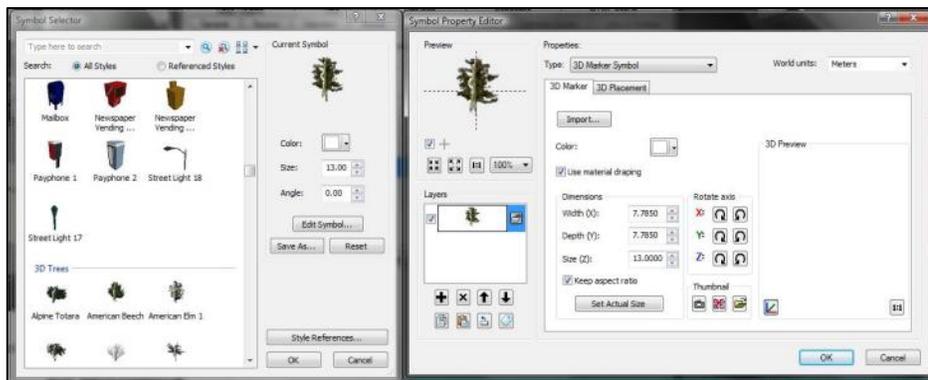


Abb. 6.13 3D-Symbolbibliothek in ArcScene.

Die Texturierung von Flächen kann ebenfalls anhand generischer oder eigens erstellter Texturen geschehen. Für die Erweiterung der Texturbibliothek von ArcScene werden gängige Bildformate wie jpg, png und bmp unterstützt. Für die Texturierung der erzeugten Verkehrsflächen aus dem Transport-Layer wurden eigene Texturen für Asphalt, Bürgersteigbelag und Kopfsteinpflaster erzeugt und in die Symbolbibliothek integriert (Abb. 6.13).



Abb. 6.14 Für die Texturierung der Verkehrsflächen eigens erstellte Texturen aufgrund von Fotomaterial. Von links nach rechts: Sand, Kopfsteinpflaster, Gehweg.

Anhand der Klassifizierung in den einzelnen Objektlayers kann eine differenzierte Symbolisierung bzw. Texturierung der einzelnen Umweltlayer vorgenommen werden.

Nach Zuweisung der Texturen für die jeweiligen Objekte kann das Modell als Gesamtkomposition in ArcScene exploriert werden (Abb. 6.15).



Abb. 6.15 Visualisierung des historischen 3D-Stadtmodells in ArcScene (Blickrichtung aus NO).

6.2 Analyse des historischen 3D-Stadtmodells

Die Analysefähigkeit des historischen 3D-Stadtmodells ist neben dem Einsatz für Explorations- und Visualisierungszwecke ein wichtiges Qualitätskriterium für das historische 3D-Stadtmodell. Das Modell bietet durch die Speicherung attributiver Sach- und Zeitinformationen und die Einhaltung topologischer Konsistenz in den Geometrien die Möglichkeit, sowohl objekt- und raumspezifische als auch temporale Fragestellungen für deskriptive und vergleichende Analysen des städtischen Raums zu beantworten.

In diesem Abschnitt werden verschiedene wichtige Fragestellungen zur historischen Stadtgestalt Potsdams aufgegriffen und aufgezeigt, ob und wie diese mit Hilfe des Modells beantwortet werden können. Dazu werden ausgewählte Analysen verschiedenen Typs durchgeführt und deren Ergebnisse beispielhaft visualisiert.

6.2.1 Analytische Fragestellungen zur historischen Stadtsituation

Fragestellungen im Bezug auf die historische Potsdamer Stadtgestalt betreffen sowohl einzelne Bauwerke als auch den Stadtraum als Ganzes. Anhand attributiver Analysen lassen sich Ergebnisse auf Grundlage der Objekteigenschaften und mit Hilfe gängiger Abfragesprachen (bspw. SQL) an der Objekttablette erzielen. Durch die Kombination mehrerer Eigenschaftsattribute in einer Abfrageanweisung lassen sich dabei interessante Ergebnisse zur historischen Entwicklung des Innenstadtraum erzielen (s. Abb. 6.16 ff). Sollen komplexe räumliche sowie temporale Abfragen durchgeführt werden, so stehen innerhalb unterschiedlicher GIS-Software verschiedene Funktionsalgorithmen zur Verfügung.

Für einen analytischen Einsatz eignet sich das LOD1-Blockmodell aufgrund seiner einfacheren Struktur aus Performance-Gründen besser als das komplexere LOD2-Modell mit seinen Texturen. Aufgrund der topologischen Konsistenz der Modellkomponenten ist das Stadtmodell auch für die Analyse räumlicher Fragestellungen geeignet. Beispielsweise lassen sich diverse städtebauliche und raumgestalterische Informationen mit Hilfe des Modells ableiten; Kapitel 6.2.2 zeigt dazu Beispiele.

Die Grundlage für temporale Analysen ist durch die Speicherung der Lebensdauer (Baujahr/Abrissjahr) einzelner Objekte geschaffen. Anhand dieser Informationen lassen sich u. a. Bauabschnitte im Untersuchungsraum nachvollziehen. CARVALHO et al. (2009) präsentieren in diesem Zusammenhang verschiedene Möglichkeiten, temporale Aspekte in 3D-Stadtmodellen interaktiv zu visualisieren.

Tab. 6.1 zeigt exemplarisch einige Fragestellungen auf, zu deren Beantwortung das Modell aufgrund der Speicherung objektspezifischer Eigenschaftsmerkmale beitragen kann.

Tab. 6.1 Objekt- und raumspezifische Fragestellungen, die mit Hilfe des Modells beantwortet werden können.

Analytische Fragestellung	Einschränkungen/Bedingungen
Objektspezifisch	
Historische Nutzung	Für Gebäude: keine Differenzierung nach Etagen
Baujahr	
Jahr des Abrisses/der Zerstörung	
Zerstörungsgrad 14.04.1945	
Richtlinien für Wiederaufbau	
Von welchem Architekt entworfen	
Historische Adresse	
Dachtyp	
Raumspezifisch	
Nutzungsanteil/-verteilung	
Versiegelungsgrad	
Anteil der Grünflächen	
Bebauungsdichte (GFZ*)	In Verbindung mit hist. Grundstücksgrenzen
Durchschnittl. Bebauungshöhe	
Bebauungsvergleich hist./aktuell	
Baumentwicklung	Erweiterung des Modells um zusätzl. temporale Eigenschaften (vgl. Abb. 3.4)
Historische Sichtachsen	

* Geschossflächenzahl

6.2.2 Überprüfung der Analysefähigkeit anhand ausgewählter Beispiele

Um den praktischen Einsatz des Modells für Analysezwecke zu prüfen, sollen einige der in Tab. 6.1 aufgeführten theoretischen Fragestellungen auf die Daten angewendet und die resultierenden Ergebnisse visualisiert werden. Abgesehen von der informativen Aussagefähigkeit von Analyseergebnissen können diese auch eine Qualitätsprüfung des Modells unterstützen. Unter anderem lassen sich durch die Visualisierung der Ergebnisse Unstimmigkeiten in den Daten, z.B. fehlende oder fehlerhafte Daten, aufdecken.

Im Folgenden werden exemplarisch einige Analysebeispiele aufgeführt. Dabei wurden sowohl stadtraumbezogene Entwicklungsprozesse als auch raumanalytische Fragen berücksichtigt.

- Kombinierte attributive Abfragen

a) Fragestellung: Welche Gebäude, die während der Regierungszeit Friedrich II. erbaut wurden, sind in der Angriffsnacht vom 14.04.1945 stark beschädigt bzw. völlig zerstört worden? (Abb. 6.16)

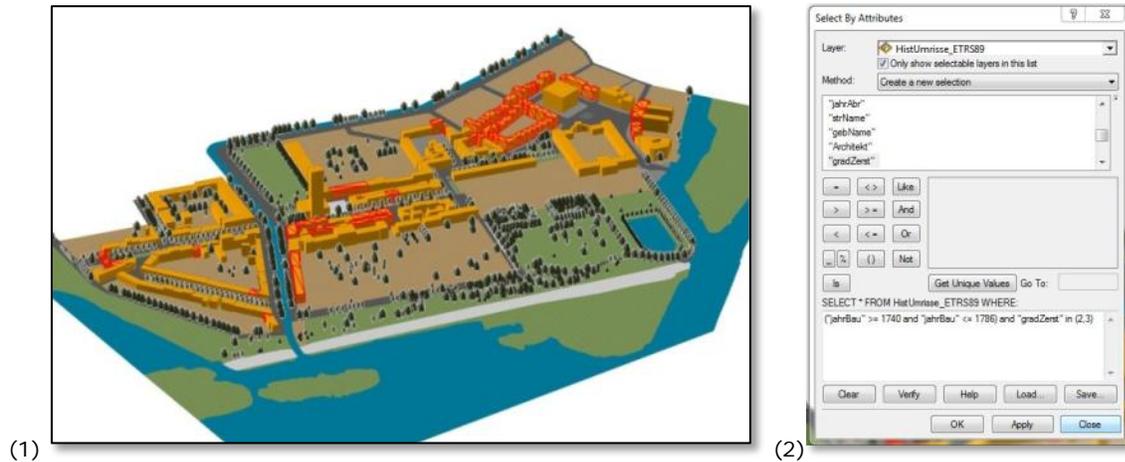


Abb. 6.16 (1) Visualisierung des Analyseergebnisses zu Fragestellung a) (betroffene Gebäude sind rot gekennzeichnet). (2) SQL-Statement der Abfrage.

b) Fragestellung: Welche Gebäude, die in der Angriffsnacht vom 14.04.1945 nur leicht beschädigt wurden oder verschont geblieben sind, wurden in den Jahren der DDR-Regierung abgerissen? (Abb. 6.17)

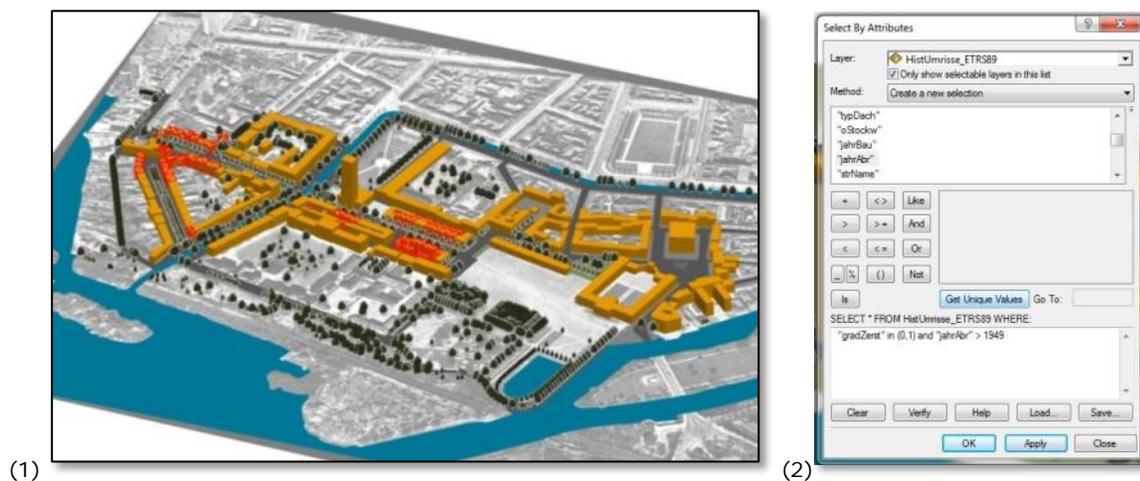


Abb. 6.17 (1) Visualisierung des Analyseergebnisses aus Fragestellung b) (betroffene Gebäude sind rot gekennzeichnet). (2) SQL-Statement der Abfrage.

- Räumliche Abfragen

c) Vergleich der historischen (vor 1945) und aktuellen Stadtbebauung (2009):



Abb. 6.18 Vergleich historischer (violett) und aktueller Bebauung (gelb) (Quelle: Digitale ALK, HPI).

b) Historische Funktionsflächenverteilung im Untersuchungsgebiet (Jahr 1944):

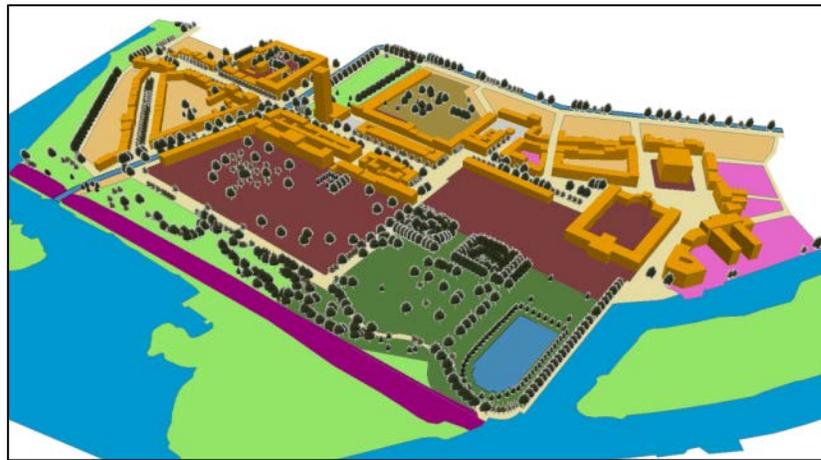


Abb. 6.19 Klassifizierung des Flächennutzungs-Layers nach historischen Funktionsflächen.

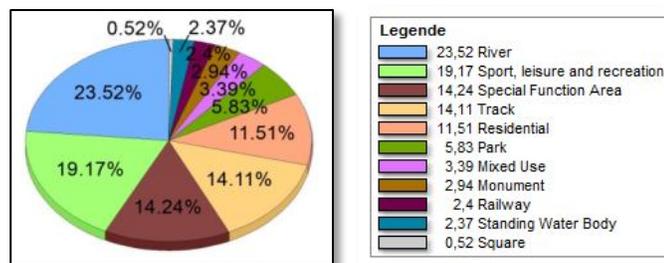


Abb. 6.20 Ergebnis der Berechnung von historischen Funktionsflächenanteilen.

- Temporale Abfragen

e) Fragestellung: Wie hat sich die Bebauung im Untersuchungsgebiet im Laufe der Jahrhunderte verändert?

ArcScene bietet für die Analyse von temporalen Daten ein Zeitregler-Werkzeug an (Time Slider). Mit Hilfe dieses Werkzeugs wurden die Veränderungen des Gebäudebestands in Potsdam über einen definierten Zeitraum hinweg visualisiert. Anhand des Bau- und Abrissjahres eines Gebäudes wird dessen Lebensspanne in der Zeitreihe definiert. Die Abbildungen 6.22 (1) bis (5) zeigen Standbildsequenzen aus der Zeitreihenanimation in ArcScene.

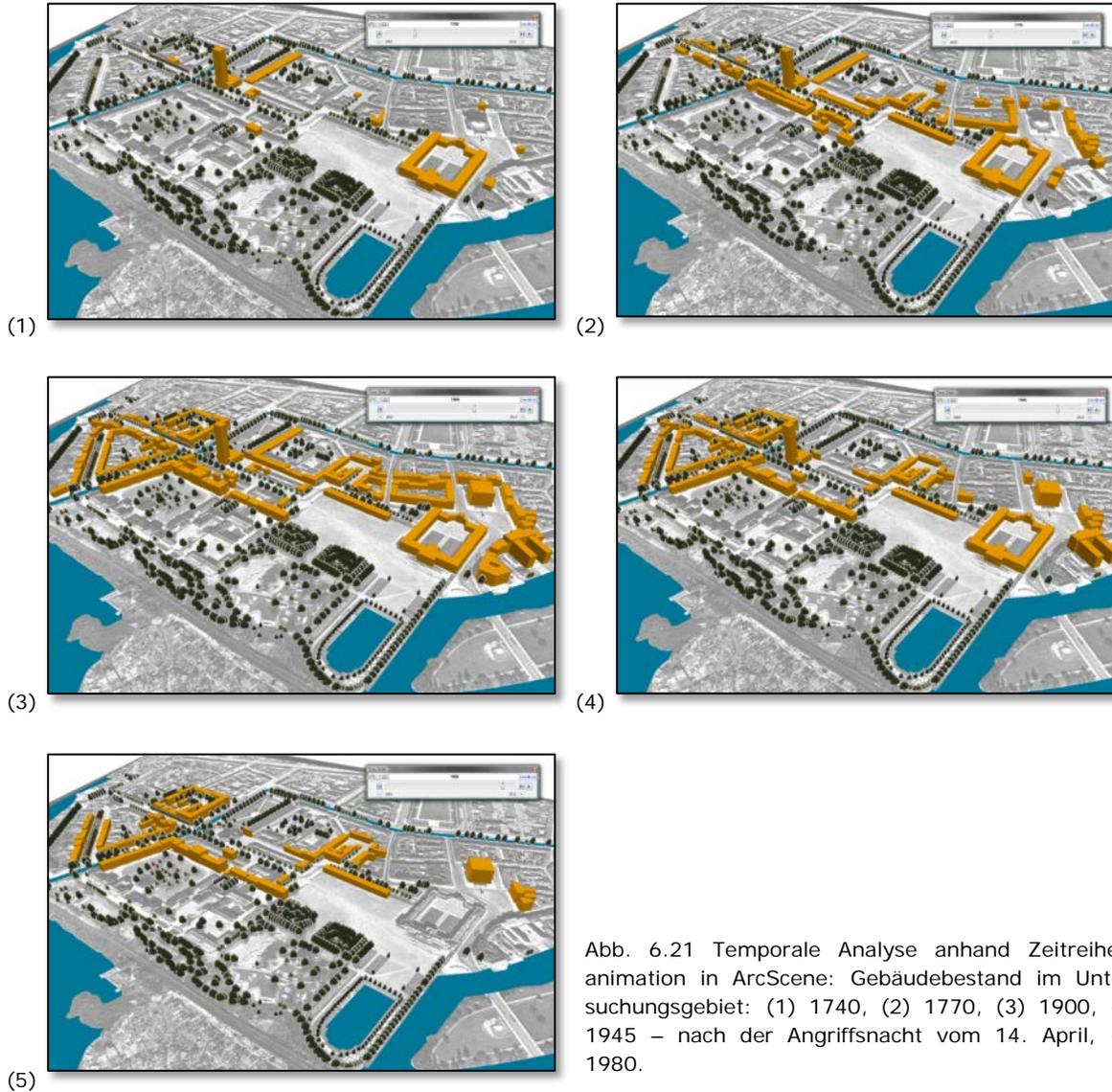


Abb. 6.21 Temporale Analyse anhand Zeitreihenanimation in ArcScene: Gebäudebestand im Untersuchungsgebiet: (1) 1740, (2) 1770, (3) 1900, (4) 1945 – nach der Angriffsnacht vom 14. April, (5) 1980.

Die Animation kann darüber hinaus als Videosequenz im AVI-Format exportiert werden.

6.3 Austauschformate und Bereitstellung des Modells

Die Überführung der Daten nach Google Earth ermöglicht eine benutzerdefinierte Navigation und Exploration des Modells auf dem virtuellen Globus. Das Konvertieren von Geodaten in das von Google Earth verwendete KML-Format (*Keyhole Markup Language*)

wird mittlerweile von vielen GI-Systemen und 3D-Modellierungssoftware unterstützt. Auf diesem Weg können Raster-, Vektor- und 3D-Daten auf einfache Weise visualisiert und einem breiten Benutzerkreis zugänglich gemacht werden.

Für einen Austausch und die Weiterverwendung der Modelldaten durch Drittbenutzer wurde versucht, einen effizienten Weg zur Konvertierung in das CityGML-Format (vgl. Kapitel 2.3) zu finden. Der Anspruch liegt dabei bei der verlustfreien Überführung der Geometrien, Semantik sowie der standardisierten und generischen Attribute in den Daten. Zu diesem Zweck wird die Konvertierung anhand der LOD1-Blockmodelle sowie exemplarisch an einem LOD2-Gebäudemodell vorgenommen.

6.3.1 Nutzung des Modells in Google Earth

ArcGIS 10 bietet über das Funktionswerkzeug „Layer to KML“ (*ArcToolbox – Conversion Tools – To KML*) ein komfortables Tool, um 2D- und 3D-Layer in das KML-Format zu konvertieren und dabei assoziierte Objektinformationen beizubehalten. Diese können dann in Google Earth visualisiert werden (Abb. 6.22(1)). Der Ausschnitt zeigt den historischen Gewässer-Layer sowie die LOD1-Gebäudemodelle, aufgesetzt auf das Google Earth Geländemodell und ein aktuelles Satellitenbild. Zusätzlich werden temporale Attribute identifiziert: Google Earth bietet beim Laden der KML-Datei einen interaktiven Zeitregler an, über den Start- und Endpunkt der Daten sowohl separat als auch kombiniert durch Ein- und Ausblenden der Objekte visualisiert werden (Abb. 6.23(2)).

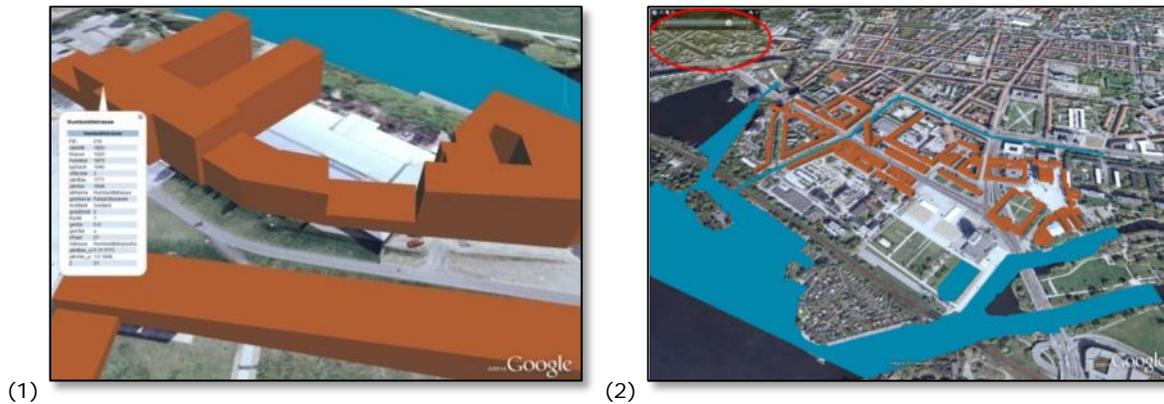
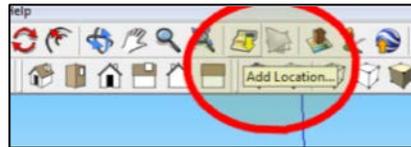


Abb. 6.22 Visualisierung des LOD1-Blockmodells der historischen Gebäude in Google Earth.

Vor der Datentransformation in ArcGIS muss darauf geachtet werden, dass die Objektdaten als 3D-Layer abgespeichert werden, so dass die relativen Höheninformationen der Gebäude erkannt und bei der Umwandlung nach KML mitgeführt werden. Die KML-Daten werden auf das Google Earth interne Höhenmodell aufgesetzt, dabei ist darauf zu achten, dass für die Gebäudemodelle die absoluten Gebäudehöhen (Basishöhe über NN) in ArcGIS gespeichert

sind. Diese können über die Option *Properties – Base Heights* definiert werden. Für die Untersuchungsdaten wurde eine konstante Basishöhe von 32 Meter über NN definiert. Für eine exakte Anpassung gibt es über zusätzliche ArcGIS-Tools, welche kostenlos aus dem Internet geladen werden können (<http://www.ian-ko.com/>), die Möglichkeit, für jedes Gebäude die Basishöhe seines Flächenschwerpunkts anhand des Höhenmodells berechnen zu lassen und diese Höhe als Attribut zu den Daten mitzuführen. Dieser Schritt wurde im Rahmen der Arbeit nicht durchgeführt.

Die Übertragung der texturierten LOD2-Modelle nach Google Earth lässt sich mit Hilfe von ArcGIS nicht automatisieren. Die ausdifferenzierten Gebäudemodelle liegen als Einzelmodelle im COLLADA-Format vor und werden über assoziierte Multipatch-Ankerpunkt georeferenziert (s. Kapitel 5.3.2). In der COLLADA-Datei selbst ist demnach kein Raumbezug gespeichert. Die Umwandlung der COLLADA-Dateien erfolgt über Google Sketchup, wobei die Einzelmodelle in Sketchup eingelesen und über die Option *Add Location* in der Funktionsleiste anhand eines Satellitenbild-Ausschnitts aus Google Earth (dieser enthält den räumlichen Bezug in geografischen Koordinaten) grob georeferenziert werden (Abb. 6.23).



(1)



(2)

Abb. 6.23 Georeferenzierung der COLLADA-Gebäudemodelle in Google Sketchup: (1) Import eines Satellitenbildausschnitts des Untersuchungsgebiets aus Google Earth; (2) Referenzierung der Modelle anhand des Satellitenbildes.

Eine Höhenanpassung an das Geländemodell in Google Earth erfolgt in Google Sketchup, wobei eine manuelle Nachbearbeitung notwendig ist. Gerade bei Gebäuden mit großer Ausdehnung (bspw. beim Schloss) oder zusammenhängenden Häuserreihen kann es passieren, dass einige Gebäude aufgrund des Höhenunterschieds im Gelände in das Modell eintauchen bzw. darüber schweben. Im Falle des Schlosses war zusätzlich ein Kippen des Modells notwendig, damit es auf der aktuellen Google Earth-Oberfläche aufsetzt. Über die Funktion *Export – 3D-Model* können die Einzelmodelle als KML-Dateien abgespeichert und dann in Google Earth importiert werden, wo sie von einem Betrachter exploriert werden können (Abb. 6.24).



Abb. 6.24 Verschiedene Ansichten der texturierten LOD2-Gebäudemodelle in Google Earth, kombiniert mit einem aktuellen Satellitenbild.

Im Gegensatz zum LOD1-Modell, welches direkt aus ArcGIS nach KML konvertiert wurde, werden mit den LOD2-Modellen im COLLADA-Format keine Objektattribute abgespeichert und sind damit auch in Google Earth nicht verfügbar. Demnach eignen sich die so abgeleiteten LOD2-Modelle in Google Earth nur für die Präsentation bzw. Visualisierung der Gebäude.

Für die Visualisierung in Google Earth wurden zusätzlich zu den Gebäudemodellen das historische Gewässernetz und das historische Luftbild in das KML-Format transformiert.

6.3.2 Überführung der Gebäudemodelle nach CityGML

Für einen Austausch mit anderen Anwendern wird versucht, die Modelldaten verlustfrei in das CityGML-Format zu überführen. Geometrie, Semantik, Texturierung und Attribute der Objekte sollen beim Konvertierungsprozess möglichst erhalten bleiben. Für diesen Zweck werden nur die Gebäudemodelle in beiden LODs herangezogen. Für die Konvertierung von georeferenzierten Gebäudemodellen bietet der LandXPLorer ein Funktionswerkzeug an (Abb. 6.25). Die resultierende CityGML-Datei enthält sowohl alle generischen Attribute und deren Wertausprägungen sowie die standardisierten Attribute, welche allerdings ohne Wertausprägung bleiben (Abb. 6.26).

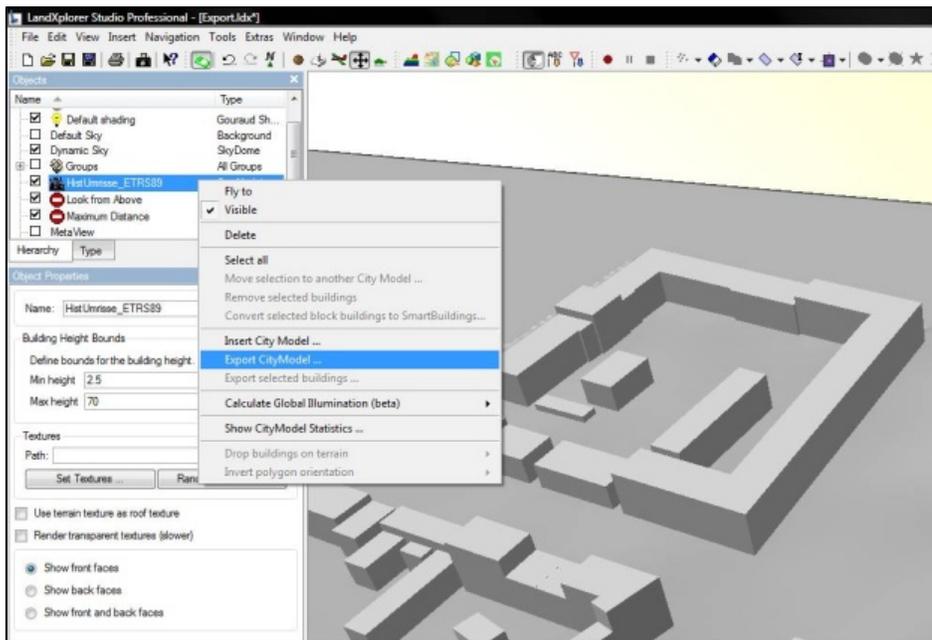


Abb. 6.25 CityGML-Exportfunktion des LandXPLorers.

Im LandXPLorer wird ein automatisiertes Befüllen der standardisierten Attribute auf Grundlage generischer Attribute nicht angeboten. Im Zuge der Untersuchung wurde auch versucht, die generischen Attribute entsprechend den standardisierten Attributen zu benennen (ArcGIS akzeptiert allerdings keine Attributnamen, die mehr als 12 Zeichen umfassen), jedoch wurde auch hier keine automatische Befüllung bei der Konvertierung nach CityGML erreicht. Das Befüllen der Standardattribute in der CityGML-Datei muss im Nachhinein entweder manuell oder mit Hilfe eines speziell zu erstellenden Skripts erfolgen. Für kleine Modelle mit wenigen Objekten würde sich die manuelle Ergänzung anbieten, bei umfangreicheren Modellen ist Nutzung eines Skriptes effizienter. Desweiteren ist erkennbar, dass bei der Konvertierung der Datentyp „DATE/TIME“ ignoriert und als „INTEGER“-Datentyp identifiziert wird (s. Abb. 6.26, „jahrBau_yy“).

```

40154 <core:cityObjectMember>
40155 <bldg:Building>
40156 <gen:intAttribute name="validAtt">
40157 <gen:value>1910</gen:value>
40158 </gen:intAttribute>
40159 <gen:intAttribute name="Klasse">
40160 <gen:value>1000</gen:value>
40161 </gen:intAttribute>
40162 <gen:intAttribute name="Funktion">
40163 <gen:value>1000</gen:value>
40164 </gen:intAttribute>
40165 <gen:intAttribute name="typDach">
40166 <gen:value>1030</gen:value>
40167 </gen:intAttribute>
40168 <gen:intAttribute name="oStockw">
40169 <gen:value>2</gen:value>
40170 </gen:intAttribute>
40171 <gen:intAttribute name="jahrBau">
40172 <gen:value>1776</gen:value>
40173 </gen:intAttribute>
40174 <gen:intAttribute name="jahrAbr">
40175 <gen:value>1945</gen:value>
40176 </gen:intAttribute>
40177 <gen:stringAttribute name="strName">
40178 <gen:stringAttribute name="gebName">
40179 <gen:stringAttribute name="Architekt">
40180 <gen:value>unbekannt</gen:value>
40181 </gen:stringAttribute>
40182 <gen:intAttribute name="gradZerst">
40183 <gen:value>3</gen:value>
40184 </gen:intAttribute>
40185 <gen:intAttribute name="Richtl">
40186 <gen:stringAttribute name="gebNr">
40187 <gen:stringAttribute name="gebTeil">
40188 <gen:doubleAttribute name="zTrauf">
40189 <gen:value>10</gen:value>
40190 </gen:doubleAttribute>
40191 <gen:stringAttribute name="Adresse">
40192 <gen:value>Mamonstrasse5a</gen:value>
40193 </gen:stringAttribute>
40194 <gen:stringAttribute name="jahrBau_yy">
40195 <gen:value>1776/11/10</gen:value>
40196 </gen:stringAttribute>
40197 <gen:stringAttribute name="jahrAbr_yy">
40198 <gen:value>1945/04/28</gen:value>
40199 </gen:stringAttribute>
40200 <gen:doubleAttribute name="Z">
40201 <gen:stringAttribute name="yearOfConstruction">
40202 <gen:value>1</gen:value></bldg:yearOfConstruction>
40203 <bldg:measuredHeight uom="m">0</bldg:measuredHeight>
40204 <bldg:storesAboveGround>
40205 <bldg:storesBelowGround>
40206 <bldg:lodMultiSurface>
40207 </bldg:lodMultiSurface>
40208 </bldg:Building>
40209 </core:cityObjectMember>
40210 <core:cityObjectMember>
40211 <bldg:Building>

```

Abb. 6.26 Auszug aus der CityGML-Datei des LOD1-Modells. Auflistung der generischen Attribute mit Attributwerten sowie der nicht befüllten standardisierten Attribute (rot gekennzeichnet).

Eine weitere Möglichkeit, die Daten nach CityGML zu konvertieren, bietet ArcGIS 10 mit den *Interoperability Tools* an. Diese Werkzeuge sind unter Windows Vista allerdings nicht voll funktionsfähig, so dass dieser Konvertierungsweg auf dem zur Verfügung stehenden Arbeitsrechner nicht ausgeführt werden konnte.

Für die Konvertierung der LOD2-Modelle nach CityGML musste ein anderer Weg eingeschlagen werden, da die texturierten COLLADA-Dateien in den LandXPlorer nicht eingelesen werden können. Die Fachhochschule Gelsenkirchen hat mit der CityGML-Toolchain einige funktionsfähige Werkzeuge zur Aufbereitung, Verteilung und Visualisierung von 3D-Stadtmodellen entwickelt [www15].

Unter anderem steht ein Plugin zum Download zur Verfügung, mit dessen Hilfe 3D-Modelle aus Google Sketchup nach CityGML konvertiert werden können. Dieses Tool wurde nach Installation (Installationsanleitung steht auf [www15] zur Verfügung) an einem ausgewählten texturierten LOD2-Gebäudemodell getestet. Dazu werden als erstes die für den Export nach Google Earth georeferenzierte COLLADA-Modelle in Sketchup aufgerufen und das entsprechende Gebäude selektiert. Über den Rechtsklick gelangt man in das *Attribute – Edit – Menü*, über das sowohl standardisierte als auch generische Attribute definiert werden können.

Sollen CityGML-standardisierte Attribute definiert werden, öffnet sich unter *Add Attribute* ein Pull-Down-Menü, welches die in der CityGML-Spezifikation aufgeführten Attribute enthält (s. GRÖGER et al., 2008). Hier können nun die entsprechenden Attribute ausgewählt und mit Werten befüllt werden (Abb. 6.27).

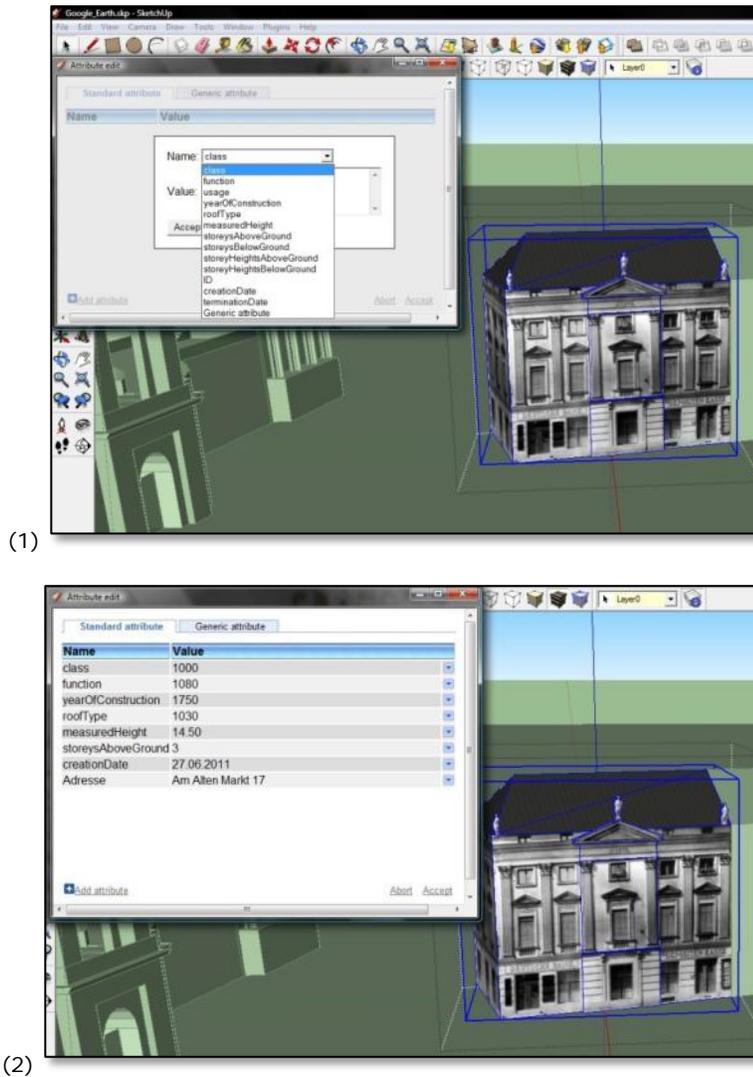


Abb. 6.27 Hinzufügen von standardisierten und generischen Attributen mit Hilfe des CityGML-Plugin in Google Sketchup. (1) Auswahl standardisierter CityGML-Attribute mittels Pull-Down-Menü; (2) Befüllen der Standardattribute mit den objektspezifischen Attributwerten.

Der Export des Modells geschieht ebenfalls über das Plugin. Als Exportoptionen können der gewünschte *Level-of-Detail* sowie die Nutzung des *Appearance*-Modells (inklusive Texturexport) festgelegt werden. Entsprechend dieser Einstellungen wird das Modell in das CityGML-Format übertragen.

Bei dem Versuch, das ausgewählte Modell zu exportieren, kam es zu unerklärlichen Schwierigkeiten. Die resultierende XML-Datei enthielt keine der definierten Attribute, ebenso schlug die räumliche Platzierung beim Laden der XML-Datei sowohl in den LandXPlorer als auch in Google Sketchup fehl. Im Rahmen dieser Arbeit konnten die Ursache für dieses Fehlverhalten und eine entsprechende Lösung nicht gefunden werden.

7 ZUSAMMENFASSUNG, DISKUSSION UND AUSBLICK

7.1 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Anhand der vorliegenden Arbeit wurde aufgezeigt, dass die Erstellung eines historischen 3D-Stadtmodells auf der Grundlage historischer Basis- und Archivmaterial möglich ist, solange die Ausgangsdaten alle dafür notwendigen Informationen enthalten. Anhand von analogen Karten konnten durch geeignete Datenverarbeitungsmethoden historische Objektstandorte und –dimensionen identifiziert und rekonstruiert werden. Die geometrische und semantische Genauigkeit der erfassten Objekte hängt dabei wesentlich von den Eigenschaften der historischen Materialien wie Erfassungsmaßstab, Generalisierungsgrad, inhaltlicher Zuverlässigkeit sowie Beschaffenheit und Zustand des Datenträgers und der geometrische Auflösung (bei historischem Bildmaterial) ab.

Durch Datentransformationsprozesse wie Scan und Georeferenzierung anhand vorliegender Referenzdaten war es möglich, die geometrische Datengrundlage für die Erfassung nicht mehr existierender Bau- und Umweltobjekte zu schaffen. Für die Rekonstruktion der Objektgeometrien wurde anhand eines Vergleichsverfahrens auf Basis von hochauflösenden und geometrisch verlässlichen, aktuellen Referenzdaten die optimale Datenquelle ermittelt (im vorliegenden Fall handelte es sich um ein historisches Aufklärungsflugbild der Alliierten Streitkräfte aus dem Jahr 1944). Die Rekonstruktion der Gebäudeumrisse erfolgte durch Digitalisierung des georeferenzierten historischen Luftbilds in ArcMap; dabei konnten die Gebäudeumrisse mit einer absoluten Lagegenauigkeit von ± 1 Meter erfasst werden. Die Traufhöhen der Gebäude wurden aus historischen Gebäudeaufzissen sowie Fassadenbildern und sonstigen Fotografien gewonnen und als Attribut in der Objekttablette gespeichert. Anhand der Gebäudeumrisse und der Höheninformation war es möglich, unter Einsatz des Moduls ArcScene automatisiert ein historisches Gebäudeblockmodell zu erzeugen.

Der hohe Informationsgehalt des historischen Luftbildes ließ neben der Rekonstruktion der Gebäudestandorte auch die Bestimmung weiterer Umweltobjektstandorte sowie thematischer Fachlayer (Nutzungsflächen, Gewässer, Transport, Vegetation) zu. Durch Luftbildinterpretation und unter Hinzunahme weiterer historischer Datenquellen konnten die einzelnen thematischen Flächen klassifiziert werden. Mit Hilfe fotografischer Abbildungen, textlicher Beschreibungen und historischer Aufzeichnungen war die Erfassung thematischer und temporaler Gebäudeinformationen möglich. Die Klassifizierung der objektspezifischen Informationen in Anlehnung an die CityGML-Implementierungsvorschrift sowie den AAA-Objektartenkatalog hat sich bei der Speicherung der thematischen Sachinformationen – sowohl für die thematischen Fachlayer als auch die Gebäude – als sehr effizient erwiesen.

Für die Verwaltung von Sach- und Zeitattributen wurde aus unterschiedlichen theoretischen Datenmodellen ein *Historisches Datenmodell* gewählt, welches die Speicherung einer zeitlichen *Gültigkeitsdauer* zu jeder vorhandenen Objekteigenschaft unterstützt. Anhand dieses Datenmodells lässt sich die Zeit-Dimension in das Stadtmodell integrieren und den Daten ein wichtiger Mehrwert zuführen, der es erlaubt, Entwicklungs- und Veränderungsprozesse zu visualisieren und zu analysieren. Als Gültigkeitszeitraum für Gebäude wurde deren Lebensdauer mit Bau- und Abrissjahr definiert, Sachinformationen erhielten als Gültigkeitszeitpunkt einen Zeitstempel in der Attributtabelle. Dieser gibt den Aufnahmezeitpunkt der jeweiligen Datenquelle wieder, aus der die Informationen gezogen wurden.

Die Detailrekonstruktion ausgewählter Gebäude zur Erstellung eines LOD2-Gebäudemodells ließ sich unproblematisch in Google Sketchup 8 vollziehen. Neben der schnell zu erlernenden Handhabung der Modellierungswerkzeuge sowie der Verwaltung von synthetischen Texturen bietet Google Sketchup Möglichkeiten zur Verwaltung von benutzereigenem Bildmaterial. Für die fotorealistische Texturierung der LOD2-Gebäudefassaden in Google Sketchup eigneten sich historische Messbilder, die zuvor durch Bildbearbeitungsprozesse qualitativ verbessert wurden. Basierend auf historischen Messbildern war die Erzeugung realistischer Fassadentexturen und Gebäudemodelle möglich, welche als COLLADA-Format nach ArcScene exportiert und in das Stadtmodell integriert werden konnten. Zusätzlich zu den erzeugten Detailmodellen wurden existierende LOD3-Modelle historischer, noch bestehender Gebäude in das Stadtmodell integriert, nachdem deren Fassadentexturen an den Stil der umliegenden Gebäudemodelle angepasst wurde. Das Stadtschloss stand als Google Sketchup-Modell im 3D Warehouse, der offenen Modellbibliothek von Google, zur Verfügung und konnte in ähnlicher Weise wie die LOD3-Modelle in das Stadtmodell integriert werden.

Der Datenaustausch zwischen ArcScene Version 10 und Google Sketchup 8 ist dabei sehr effizient. ArcGIS bietet mit dem Multipatch-Datenformat die Brücke zwischen GIS und 3D-Modellierungssoftware. Aufgrund dieser Schnittstelle lassen sich hochdetaillierte und geometrisch komplexe 3D-Modelle in einem Geoinformationssystem wie ArcGIS verankern und attributieren. ArcScene 10 bietet mit seiner im Gegensatz zu älteren Versionen verbesserten 3D-Visualisierungsumgebung ein machtvolles Werkzeug für die Visualisierung, Exploration und Analyse von 3D-Stadtmodellen.

Die Überführung des LOD1-Blockmodells nach Google Earth über das KML-Format konnte automatisiert in ArcGIS mit Hilfe der Toolbox-Werkzeuge geschehen. Es musste jedoch darauf geachtet werden, dass die extrudierten 3D-Objekte (bspw. Blockmodelle) als 3D-

Layer abgespeichert werden und eine reelle Basishöhe zugewiesen bekommen, da sie sonst beim Laden in Google Earth über dem internen Höhenmodell schweben oder darin versinken. Google Earth erkennt beim Laden der KML-Datei neben den gespeicherten Objektattributen auch temporale Datentypen und bietet auf deren Grundlage die Visualisierung von Zeitreihen an. So konnten für das LOD1-Datenmodell aufgrund der gespeicherten Lebensdauer die einzelnen Objekte per interaktiver Zeitleiste ein- oder ausgeblendet werden.

Der Export der texturierten LOD2-Modelle nach KML konnte nicht über ArcScene vollzogen werden. Für die Erzeugung von KML-Dateien wurden deshalb die einzelnen COLLADA-Modelle in Sketchup georeferenziert und danach in Google Earth eingeladen. Vor dem Export musste jedoch manuell die Basishöhe für jeden zusammenhängenden Gebäudeblock angepasst werden, oftmals war hier eine mehrfache Nachkorrektur nötig.

Die Überführung in das CityGML-Format unter Beibehalt der gespeicherten Sachinformationen war nur für das LOD1-Blockmodell und unter Verwendung des LandXplorers möglich. Der Export der detaillierten LOD2-Modelle aus Google Sketchup unter Einsatz des CityGML-Plugin brachte leider kein zufriedenstellendes Ergebnis. Hier muss eine intensivere Fehlerursachenforschung betrieben werden, die allerdings im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt werden konnte.

Im Laufe der Arbeit hat sich gezeigt, dass bei der Verarbeitung historischer Daten immer mit Informationslücken oder widersprüchlichen Aussagen zwischen verschiedenen historischen Grundlagen gerechnet werden muss, so dass es für die Erzeugung eines homogenen Datensatzes oft nicht ausbleibt, Mutmaßungen anzustellen. Diese Unsicherheiten müssen in Kauf genommen werden, sollten aber für die Weitergabe und/oder bei Verwendung der Daten durch Dritte unbedingt dokumentiert und den Daten beigefügt werden, bspw. in Form von Metadaten.

Schwierigkeiten im gesamten Arbeitsablauf lassen sich hauptsächlich auf technische oder softwarebedingte Unzulänglichkeiten zurückführen. Ein großes Hindernis ist die teilweise Inkompatibilität von ArcGIS 10 – Funktionswerkzeugen und dem Betriebssystem Windows Vista. Beispielsweise konnten die Interoperability-Tools von ArcGIS 10, welche eine Überführung von Datenlayern nach GML unterstützen, nicht angewendet werden. Ebenso war der Export von 3D-Layern nach KML fehlerhaft: Sämtliche 3D-Objekte wurden in Google Earth nur als 2D-Objekte angezeigt. Diese Schwierigkeiten haben zu Zeitverzögerungen im Arbeitsablauf, zeitintensiver Fehlersuche und Suche nach Alternativlösungen geführt. Andere, weniger schwerwiegende Probleme traten bei dem Versuch auf, aus einer Fülle von heterogenen Ausgangsdaten einen homogenen,

geometrisch und thematisch zusammenhängenden Datensatz zu erstellen. Hier konnten aber anhand von subjektiven Entscheidungen Lösungen gefunden werden, die der Aufgabenstellung als Ganzes gerecht wurden, auch wenn dabei o. g. Unsicherheiten in Kauf genommen werden mussten.

Für den gesamten Arbeitsprozess lässt sich feststellen, dass die angewendeten Methoden unter den gegebenen Bedingungen und zum jetzigen Standpunkt der technischen Entwicklung einen effizienten Weg darstellen, historische Daten aufzubereiten und in ein 3D-Stadtmodell zu integrieren. Die Rekonstruktion historischer, nicht mehr existierender Stadtensembles ist grundsätzlich mit einem hohen Arbeitsaufwand verbunden, der sich nur schwer automatisieren lässt. Je nach Eigenschaften und Qualität des historischen Grundlagenmaterials müssen für jedes Projekt individuelle Lösungsansätze gefunden werden, die eine effiziente Arbeitsweise gewährleisten. Aufgrund spezifischer Ausgangssituationen und Unsicherheiten lässt sich deshalb kein generischer Arbeitsablauf definieren. Die Beschaffenheit der Ausgangsdaten, die Anforderungen an das zu erstellende Modell sowie die vorhandenen Ressourcen bestimmen die Methoden, mit welchen ein historisches 3D-Stadtmodell erzeugt werden kann.

7.2 Ausblick

Historische Materialien werden auch in Zukunft eine wichtige Informationsquelle für die Analyse von Entwicklungsprozessen in urbanen Räumen darstellen. Am Beispiel der Städte Potsdam, Berlin und Dresden lässt sich erkennen, wie stark das historisch geprägte Stadtbild Einfluss auf zukünftige Planungsvorhaben hat. Momentan ist auch in anderen deutschen Städten wie Berlin und Dresden die Tendenz erkennbar, historische, nicht mehr existierende Bauwerke wieder zu rekonstruieren und damit dem zukünftigen Stadtbild seine historische Note wiederzugeben. Insbesondere Städte, die einer großräumigen Zerstörung unterlagen, können mit Hilfe eines historischen 3D-Stadtmodells das ehemalige Stadtbild digital wieder aufleben lassen. Desweiteren können diese historischen Modelle als Planungsgrundlage und –werkzeug für eventuelle Wiederaufbauvorhaben dienen.

Die Integration und Verwaltung temporaler Daten wird in diesem Zusammenhang eine immer größere Rolle spielen. Dabei muss jeweils abgewogen werden, welches raumzeitliche Datenmodell für die Verwaltung von temporalen 3D-Stadtmodellen und für die jeweilige Aufgabenstellung geeignet ist.

Wie auch im theoretischen Teil der vorliegenden Arbeit angesprochen, wäre die Erweiterung des CityGML-Datenstandards um eine zeitliche/historische Komponente höchst interessant; umgesetzt werden könnte dies z.B. als Erweiterung von CityGML um eine ADE „History“.

Die Aufgabe wäre hier die Definition neuer, historisch relevanter Objekte (*Features*) bzw. die Erweiterung bestehender Objekte um historische Eigenschaften (*Properties*).

Für das Potsdamer Modell ist eine räumliche, thematische und temporale Erweiterung denkbar. Das Modell könnte bspw. auf das gesamte Stadtgebiet ausgeweitet werden und es ließen sich weitere historisch interessante Objektinformationen einfügen, z.B. über mit einem Gebäude verbundene historische Ereignisse oder zeitgeschichtlich wichtige Personen. Ebenso ließen sich weitere Zeiträume durch die Speicherung von Geometrien mit assoziierter Lebensdauer (Bau- und Abrissjahr) integrieren, von den Anfängen der Besiedlung bzw. Stadtgründung bis hin zu zukünftig geplanten Baumaßnahmen (wie dem Landtagsgebäude auf dem ehemaligen Schlossgelände und weiteren Leitbauten). Dadurch wäre eine Zeitreihenanalyse möglich, die sich über den gesamten Lebenszyklus der Stadt erstreckt. Neben den Gebäuden, die während der DDR-Regierungszeit erbaut wurden, könnten auch „Alternative Realitäten“ – also historische Bauvorhaben, die nicht realisiert wurden – integriert werden.

Anzunehmen ist in Zukunft eine noch bessere Interoperabilität zwischen GIS und 3D-Modellierungssystemen, so dass hochdetaillierte 3D-Modelle mit Objektinformationen verknüpft und effizient zur Verfügung gestellt werden können.

Eine Möglichkeit, historische 3D-Stadtmodelle wie das Potsdamer Modell zu verbreiten und zugänglich zu machen, ist die Veröffentlichung über ein Web-Portal, in denen sich weitere historische Informationen mit den 3D-Objekten verknüpfen lassen, bspw. historische Fotografien und Ansichten, textliche Beschreibungen oder auch historische Ton- und Videosequenzen oder archäologische Fundstücke. Dabei können Archivmaterialien nicht nur als Informationsquelle genutzt und einem breiten Anwenderkreis zugänglich gemacht werden, sondern auch digital archiviert werden. Diese Art der Datenveröffentlichung kann neben reinen Informations- und Lehrzwecken auch im Edutainmentbereich eingesetzt werden. Auch für Museen und Ausstellungen ist diese Art der Informationspräsentation interessant.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- ALBERT, J.; BUDDENDICK, C.; HANNOK, U.; HERTING, U.; NELLESSEN, K.; PETZOLD, B.; RIDDERT, I.; SCHUBERT, J.; WANZKE, H. (2004): 3D-Stadtmodelle – Eine Orientierungshilfe. <[http://www.bochum.de/C12571A3001D56CE/vwContentByKey/W27DL9RW860BOLDDE/\\$FILE/3d_stadtmodelle_feb.pdf](http://www.bochum.de/C12571A3001D56CE/vwContentByKey/W27DL9RW860BOLDDE/$FILE/3d_stadtmodelle_feb.pdf)> (Zugriff: 2011-01-03)
- ALEXANDER, CH. (1965): A city is not tree. In: Architectural Forum, 122 (1), S. 58-61 und (2) S. 58-62. <http://chrisgagern.de/Media/A_City_is_not_a_tree.pdf> (Zugriff: 2011-03-18)
- CARVALHO, A., COSTA, E., FRANCHIN, W., DE SOUSA, A., RIBEIRO, C. (2009): Interactive Temporal Focus+Context Visualization of Spatio-Temporal Urban Data Models. <http://www.geovisualisierung.net/geoviz_hamburg/papers/10_3_Carvalho_Slides.pdf> (Zugriff: 2010-11-14)
- DIETZE, L.; NONN, U.; ZIPF, A. (2007): Metadata for 3D City Models. Analysis of the Applicability of the ISO 19115 Standard and Possibilities for further Amendments. <http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/agile07/3D-Metadata_agile07.un.az.id.pdf> (Zugriff: 2010-12-15)
- ESRI (2008): The Multipatch Geometry Type. <<http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/multipatch-geometry-type.pdf>> (Zugriff: 2011-01-09)
- GRÖGER, G.; KOLBE, T. H.; DREES, R.; KOHLHAAS, A.; MÜLLER, H.; KNOSPE, F.; GRUBER, U.; KRAUSE, U. (2004): Das interoperable 3D-Stadtmodell der SIG 3D der GDI NRW. Version 2. <http://www.ikg.uni-bonn.de/fileadmin/sig3d/pdf/Handout_04_05_10.pdf> (Zugriff: 2010-1-02)
- GRÖGER, G.; KOLBE, T. H.; CZERWINSKI, A.; NAGEL, C. (2008): OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. Document OGC 08-007r1. Open Geospatial Consortium Inc. <http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=28802>
- HAAKE, G. & GRÜNREICH, D. (1994): Kartographie. 7. Auflage. Berlin, New York: Walter de Gruyter.
- HENZE, F.; LEHMANN, H.; BRUSCHKE, B. (2009): Nutzung historischer Pläne und Bilder für die Stadtforschung in Baalbek/Libanon. In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation. Heft 3. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- JEDRZEJAS, T. (2008): Aufbau historischer städtischer 3D-Szenarien für eine Nutzung unter Google Earth, basierend auf Daten von terrestrischem Laserscanning, Photo-grammetrie und Archivinformationen. <http://www.hochschulebochum.de/fileadmin/media/fb_v/labore/photogrammetrie/Absolventen/Diplomarbeit-Jedrzejjas.pdf> (Zugriff: 2010-10-20)
- KADA, M. (2007): Zur maßstabsabhängigen Erzeugung von 3D-Stadtmodellen. Dissertation. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IFP), Stuttgart.
- KOLBE, T. H. (2009): Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. In: 3D Geo-Information Sciences. Kapitel 2, S. 15-31. Seoul, Korea: Springer.
- KRAUS, K. (2004): Photogrammetrie. Band 1. Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG.
- MAASS, S; TRAPP, M.; KYPRIANDIS, J. E.; DÖLLNER, J.; EICHHORN, M.; POKORSKI, R.; BÄUERLEIN, J.; v. HEBERG, H. (2008): Techniques for the Interactive Exploration of High-Detail 3D Building Reconstruction Using The Example Of Roman Cologne". Proceedings of 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia VSMM. October 2008, Limassol, Zypern.
- McBRIAN, P., SELTVEIT, A. H., WANGLER, B. (1992): An Entity-Relationship Model Extended To Describe Historical Information. Conference on Information Systems and Management of Data (CISMOD) 1992, S. 244-260, 21.-23.07.1992, Bangalore, India.

- NEBIKER, S.; BARMETTLER, A. & FISCHER, B. (2009): Vom physischen Stadtmodell zum interaktiven 3D-GIS – Anforderungen und Lösungsansätze am Beispiel der historischen Stadt Solothurn. In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation. Heft 3. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- RENOLEN, A. (1999): Concepts and Methods for Modelling Temporal and Spatiotemporal Information. Dissertation, NTNU, Norway.
- RIEKE-ZAPP, D.; ROSENBAUER, R. & RUTHISHAUSER, S. (2009): Historic Maps and Imagery for Modern Scientific Applications. In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation. Heft 3. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- STEIDLER, F. & GOOS, J. (2010): Historical Rotterdam. In: Geoinformatics. Heft 6. Emmeloord: CMedia. <<http://fluidbook.webtraders.nl/geoinformatics/06-2010/#56>> (Zugriff: 2010-12-02)
- STEINER, A. (1998): A Generalisation Approach to Temporal Data Models and their Implementations. Dissertation, ETH Zürich, Swiss.
- TRAPP, M. (2010): Colonia 3D. Real-time Roman Cologne. 14. Internationale Konferenz für Animation, Effekte, Games und digitale Medien. Präsentation. Stuttgart, 2009. <http://www.matthias-trapp.de/misc/fmx_colonia3d_final.pdf> (Zugriff: 2010-05-06)
- TRAPP, M.; SEMMO, A.; POKORSKI, R.; HERRMANN, C. D.; DÖLLNER, J.; EICHHORN, M.; HEINZELMANN, M. (2010): Communication of Digital Cultural Heritage in Public Spaces by the Example of Roman Cologne. Proceedings of 3rd EuroMed Conference, (M. Ioannides, ed.), Lecture Notes in Computer Science (LNCS), S. 262-276, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- WACKER, J.; THIEDE, O. & LANDESHAUPTSSTADT POTSDAM (Hrsg.) (2002): Grün in Potsdam. Berlin: Havel-Spree-Verlag.
- YIN, L. (2010): Cities in Space and Time: A Spatial-Temporal Visualization Model of Urban Environments. <<http://www.chinaplanning.org/Conferences/4thIACP/ppt/Liyin.pdf>> (Zugriff: 2010-12-03)
- ZIPF, A. (2001): Spatio-Temporal Data Modelling for "4D"-Databases. <http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:beBTqH9Q7hYJ:citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download%3Fdoi%3D10.1.1.68.7728%26rep%3Drep1%26type%3Dpdf+zipf+Spatio-temporal+4D&hl=is&gl=is&pid=bl&srcid=ADGEESiWa9a-NvrZ6F-wAzCEa-NYXuwJF_XZNHtdelINDoZ8TYbfw15m0ilwD8ZKNtTnbpwT_E48sqkZNUltmSrPjLkS5S8V0yblvEQ_e_w4exCFU3_-BK_SbyeKJOrFO9EuMRm_9XXwJ&sig=AHIEtbO0t3g4qX005IRmgdvCsApQ5Tkobg> (Zugriff: 2011-01-07)
- ZIPF, A. & KRÜGER, S. (2001): Ein objektorientierter Datenbank-Framework für temporale 3D-Geodaten. AGIT 2001, Symposium für Angewandte Geographische Informationsverarbeitung, 04.-06.06.2001, Salzburg. Austria.

Internetquellen

- [www1] <www.potsdamer-mitte.de> (Letzter Zugriff: 2011-03-21)
- [www2] <www.planergemeinschaft.eu> (Letzter Zugriff: 2011-01-13)
- [www3] <www.wikipedia.de> (Letzter Zugriff: 2011-03-15)
- [www4] <www.adv-online.de> (Letzter Zugriff: 2010-12-11)
- [www5] <www.opengeospatial.org/standards/citygml> (Letzter Zugriff: 2011-04-03)
- [www6] <www.wikipedia.org> (Letzter Zugriff: 2011-03-28)
- [www7] <www.fhnw.ch/habg/ivgi/forschung/3d-cultural-heritage> (Letzter Zugriff: 2011-02-02)

- [www8] www.colonia3d.de (Letzter Zugriff: 2011-02-04)
- [www9] www.neumarkt-dresden.de (Letzter Zugriff: 2011-02-16)
- [www10] www.berliner-schloss.de/de/Rekonstruktionen.htm (Letzter Zugriff: 2011-02-19)
- [www11] www.iuk.fraunhofer.de/index2.html?Dok_ID=82&Sp=1&MID=768 (Letzter Zugriff: 2011-03-15)
- [www12] www.virtuaaliviipuri.tamk.fi/ (Letzter Zugriff: 2011-04-10)
- [www13] www.potsdam.de/cms/beitrag/10032426/482044 (Letzter Zugriff: 2011-04-21)
- [www14] www.potsdam.de/cms/dokumente/10062525_996323/009f5707/Potsdamer-Mitte-2010.pdf (Letzter Zugriff: 2011-02-03)

Quellverzeichnis der Basisdaten

- [Qu1] RAT DER STADT POTSDAM (1987): 1000 Jahre Potsdam. Blätter aus der Stadtgeschichte. Potsdam: Märkische Volksstimme.
- [Qu2] SCHNEIDER, R. (2005): Potsdam. Photographiert um 1900. Berlin: Nicolai
- [Qu3] MIELKE, F. (1991): Potsdamer Baukunst. Das klassische Potsdam. Berlin: Propyläen.
- [Qu4] BAUR, M. & MIELKE, F. (1963): Potsdam wie es war. Berlin: Rembrandt.
- [Qu5] MIELKE, F. & BINDING, G. (Hrsg.) (1972): Das Bürgerhaus in Potsdam. Das Deutsche Bürgerhaus. Band XV. Tübingen: Ernst Wasmuth.
- [Qu6] SCHULTE, D. & KNITTER, H. (1981): Potsdam im Bild der Geschichte. Teil I - Von den Anfängen bis zum Jahre 1945. Potsdam: Bezirksmuseum.
- [Qu7] WACKER, J., THIEDE, O. & LANDESHAUPTSTADT POTSDAM (Hrsg.) (2002): Grün in Potsdam. Berlin: Havel-Spree-Verlag.
- [Qu8] LANDESHAUPTSTADT POTSDAM, DER OBERBÜRGERMEISTER (Hrsg.) (2011): Potsdamer Mitte.