

# Vom physischen Stadtmodell zum interaktiven 3D-GIS – Anforderungen und Lösungsansätze am Beispiel der historischen Stadt Solothurn

STEPHAN NEBIKER, ANDREAS BARMETTLER & BEAT FISCHER, Muttenz, Schweiz;  
ERICH WEBER, Solothurn, Schweiz

**Keywords:** 3D City Model, 3D Reconstruction, 3D GIS, Historical GIS, Google Earth

**Summary:** *From Historical City Models to Interactive 3D GIS – Requirements and Approaches Using the Example of the City of Solothurn.* This paper focuses on the establishment of historic 3D GIS based on the 3D reconstruction of physical historic city models. The studies are based on a hand-painted historic 3D model of the city of Solothurn in the year 1830. In the paper we investigate and compare the suitability of different 3D measuring techniques for reconstructing the geometry and texture of the original model. We then discuss the additional requirements but also the benefits of consequently using a 3D GIS technology throughout the project. This also applies to the semi-automatic texturing process and to the proposed collocation-based transformation approach for the irregular distortions which are typical for such historic models. An interactive 3D model of Solothurn 1830 illustrates the potential but also the demand for further investigations on the way to a comprehensive historical 3D GIS.

**Zusammenfassung:** Dieser Beitrag untersucht die Möglichkeiten zur effizienten 3D-Rekonstruktion historischer städtischer Szenarien und zum Aufbau eines historischen 3D-GIS auf der Basis physikalischer 3D-Modelle am Beispiel eines handbemalten Modells der Stadt Solothurn im Jahre 1830. Zur Rekonstruktion der Geometrie und Textur werden verschiedene 3D-Messverfahren eingesetzt und miteinander verglichen. Es wird gezeigt, dass der möglichst frühzeitige und durchgängige Einsatz einer 3D-GIS-Technologie zwar etliche Zusatzanforderungen stellt, aber gleichzeitig große Vorteile bietet. Dies gilt auch für die vorgestellten Verfahren zur semi-automatischen Texturierung des Modells und für die vorgeschlagenen Lösungsansätze zur geometrischen Entzerrung des historischen Stadtmodells mittels eines modernen Filterungs- und Kollokationsansatzes. Ein interaktives 3D-Modell der historischen Stadt Solothurn im Jahre 1830 in Google Earth illustriert die Möglichkeiten und den Weiterentwicklungsbedarf auf dem Weg zum umfassenden historischen 3D-GIS.

---

## 1 Einleitung

Bei der aktuellen breiten Begeisterung für dreidimensionale Landschafts- und Stadtmodelle in Google Earth wird oft vergessen, dass die analogen Vorläufer dieser 3D-Modelle, wie zum Beispiel das Urschweizer Relief von Franz Ludwig Pfyffer von Wyhen von 1786 (NIEDERÖST 2005), eine Jahrhunderte alte Tradition haben. Gestern wie heute befinden sich diese 3D-Modelle im Spannungsfeld zwischen faszinierendem Kunstwerk und wertvollem Hilfsmittel für Planungen, Entscheidungen und wissenschaftliche Untersuchungen.

Der Großteil digitaler 3D-Rekonstruktionen von Kulturdenkmälern und historischen städtischen Szenarien beruht auf einer im weitesten Sinne bild-basierten Abtastung und Rekonstruktion noch existierender Objekte und Fragmente und auf einer darauf aufbauenden CAD-basierten Konstruktion nicht mehr existierender Teile. Zur automatisierten Rekonstruktion der Geometrie und Textur real existierender Objekte existiert eine Vielzahl ausgezeichneter Untersuchungen und Publikationen. Stellvertretend seien hier die Publikationen von (REMONDINO & EL-HAKIM 2006) zur photogrammetrischen 3D-Rekonstruktion,

von (POLLEFEYS et al. 2000) und (AKBARZADEH et al. 2006) zur 3D-Rekonstruktion aus Bildsequenzen und Videos sowie von (VOSSELMAN & DIJKMAN 2001) und (TEO et al. 2006) zur Extraktion aus Laserscanningdaten erwähnt. Zwar lässt sich die Erfassung und Rekonstruktion der 3D-Geometrie und Textur *existierender Objekte* mit den oben aufgeführten Ansätzen sehr schön automatisieren; bei der Rekonstruktion ganzer historischer städtischer 3D-Szenarien und ganzer Kulturdenkmäler stellt jedoch die (Re-)Konstruktion *nicht mehr existierender Objekte* oft das eigentliche Problem dar. Diese Modellierung geschieht meist in interdisziplinären Teams aus Geoinformationsspezialisten, Archäologinnen und Historikern und ist häufig ein langwieriger Prozess mit laufend korrigierten und verbesserten Hypothesen, der nur in Teilen automatisierbar ist.

Die Verwendung existierender physikalischer 3D-Stadtmodelle zur Rekonstruktion historischer städtischer Szenarien bietet hier eine Reihe von Vorteilen. Dazu gehören ein oft einheitlicher Detaillierungsgrad, ein homogenes Erscheinungsbild mit sorgfältig gemalten Texturen und möglicherweise ein historisches Gelände. Der mit Blick auf eine zeitgerechte Realisierung vollständiger städtischer Szenarien wohl wichtigste Vorteil ergibt sich aus der Tatsache, dass die verwendeten historischen 3D-Modelle oft über Jahrzehnte ausgestellt und benutzt wurden und dass dadurch die zugrundeliegenden Hypothesen von den meisten Beteiligten zumindest als Ausgangsbasis akzeptiert werden.

Dieser Beitrag dokumentiert die 3D-Rekonstruktion, welche von der Geomatik-Ab-

schlussklasse 2008 der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) durchgeführt worden war, sowie eine Reihe von darauf aufbauenden Untersuchungen. Mit dieser 3D-Rekonstruktion sollte einerseits die Basis für ein historisches 3D-Geoinformationssystem gelegt werden. Andererseits sollten die Resultate über den virtuellen Globus Google Earth der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Damit reiht sich das Projekt in die langjährige Projektinitiative ‚3D Cultural Heritage‘ des Instituts Vermessung und Geoinformation der FHNW ein ([www.fhnw.ch/habg/ivgi/forschung/3dheritage](http://www.fhnw.ch/habg/ivgi/forschung/3dheritage)), welche den Aufbau eines interaktiven 3D-Archivs wertvoller Kulturdenkmäler zum Ziel hat.

## 2 Die Stadt Solothurn und das historische Stadtmodell

Solothurn hat sein spätmittelalterlich-frühneuzeitliches Stadtbild bis heute erstaunlich gut bewahren können. Die Niederlegung der massiven barocken Befestigungswerke zwischen 1835 und 1905 war der bedeutendste städtebauliche Eingriff im Bereich der Altstadt. Von der neuzeitlichen Stadtentwicklung, die mit dem Anschluss Solothurns ans Bahnnetz 1857 einsetzte, blieb die Innenstadt weitgehend unberührt. Die Eingriffe ins Stadtbild beschränkten sich im späten 19. und im 20. Jahrhundert auf einzelne Neubauten, den Einbau von Schaufenstern, die Neugestaltung von Fassaden und die Auskernung einiger Altbauten. Die Altstadt von Solothurn ist deshalb eine wertvolle historische Quelle geblieben.



**Abb. 1:** Das Originalmodell von Solothurn um 1830 in der Übersicht.



**Abb. 2:** Das Originalmodell im Detail.

Das historische Stadtmodell zeigt die Stadt Solothurn ums Jahr 1830, kurz vor Beginn der Entfestigung. Das Modell wurde 1921 von Architekt Hans Langmack in Zürich im Auftrag des ehemaligen Verkehrs- und Verschönerungsvereins der Stadt Solothurn erstellt. Die Basis bildeten unter anderem vier Stadtpläne (1822, 1825, 1827, 1828), ein Skizzenbuch (1825–1827) und eine Vogelschau (1833), alle von Kartograph Johann Baptist Altermatt (SCHUBIGER 1994). Die Planaufnahmen und Skizzen von Altermatt zeichnen sich durch ihre herausragende Qualität, Genauigkeit und Detailtreue aus, die in unzähligen Bauuntersuchungen von der Kantonalen Denkmalpflege überprüft werden konnten. Eine systematische Fotokampagne ergänzte zwischen 1918 und 1920 die historischen Quellen. Das Modell wurde aus Karton gefertigt, weist handgemalte Gebäude- und Geländetexturen auf (Abb. 1 und 2) und ist in seiner Art typisch für die Entstehungsperiode, vergleiche auch historisches Stadtmodell von Zürich um 1800, ebenfalls von Hans Langmack (STADT ZÜRICH 2009). Das historische Modell von Solothurn hat einen Maßstab von circa 1 : 500, misst 2 m × 2,5 m und enthält circa 900 Gebäude. Das Modell ist im Museum Blumenstein, dem historischen Museum der Stadt Solothurn, ausgestellt.

Das 3D-Modell der Stadt Solothurn um 1830 bietet eine hervorragende Basis für die Erstellung eines historischen 3D-GIS. Die Datenbasis ist in Solothurn für den Zeitraum zwischen 1800 und 1850 äußerst breit. Im Staatsarchiv Solothurn liegen die originalen Erfassungsbögen der Volkszählungen von 1808, 1829, 1836 und 1850. Sie geben Auskunft über Alter, Geschlecht, Zivilstand, Verwandtschaftsbeziehungen, Beruf, Herkunft, Besitzverhältnisse und den sozialen Status sämtlicher Einwohner. Dazu kommen die Liegenschaftswerte, die seit 1818 von der Brandassekuranz erfasst wurden. Verknüpft mit diesen Daten, wird das historische 3D-GIS von Solothurn erstmals die räumliche Darstellung und Analyse der wirtschaftlichen und soziodemographischen Topographie einer vorindustriellen Kleinstadt in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts erlauben.

### 3 Datenerfassung und -verarbeitung

Für die Erfassung der 3D-Geometrie und der Texturinformation des historischen Modells einerseits und für Genauigkeitsuntersuchungen andererseits wurde eine Kombination der folgenden Messverfahren und -systeme eingesetzt: 1. *Präzisions-Handscanner* (Leica T-SCAN), 2. *Nahbereichsphotogrammetrie* und 3. *Videogrammetrie* (mit einer HD-Videokamera) zur experimentellen 3D-Rekonstruktion und zur Erstellung von Videomontagen beispielsweise für historische Hypothesen (wird in diesem Beitrag nicht weiter behandelt). Sämtliche Messungen wurden von Geomatik-Studierenden im Frühsommer 2008 über einen Zeitraum von zwei Wochen durchgeführt.

#### 3.1 Nahbereichsscanning

Im vorliegenden Projekt wurde unseres Wissens erstmals ein Hochpräzisions-Handscanner T-SCAN der Firma Leica Geosystems zur Erfassung eines historischen Stadtmodells eingesetzt. Das System kombiniert eine hohe Genauigkeit mit einer sehr hohen Punktdichte und einer sehr flexiblen Scannerführung und erfordert wenig bis keine künstlichen Passpunkte im Modell. Abgesehen vom hohen Beschaffungspreis bringt dieses Industriemesssystem somit ideale Voraussetzungen mit für die hochgenaue Rekonstruktion historischer Stadtmodelle und anderer kleinräumiger Kulturgüter.



Abb. 3: T-SCAN Laserscanner.



**Abb. 4:** Scannen des Stadtmodells mit T-SCAN.

Das T-SCAN-System besteht aus einem Laser Tracker (siehe Abb. 3, Hintergrund), der hochpräzise vertikale und horizontale Winkelcodierer für Winkelmessungen mit einem hoch präzisen Absolutdistanzmesser kombiniert. Dieser wird ergänzt durch einen frei geführten Handscanner (siehe Abb. 3, Vordergrund), welcher die Abtastung von Oberflächen aus fast beliebigen Materialien ermöglicht, ohne Zielmarken oder Puder zu erfordern. Die wichtigsten Merkmale des T-SCAN-Systems sind: eine Aufnahmezeit der Distanzmessung von 10 kHz, eine Genauigkeit der Punktmessung von  $\pm 30 \mu\text{m}$ , eine Punktdichte von 0,14–1,96 mm bei einem Sensorgewicht (inklusive Griff) von 1200 g.

Wie Abb. 4 zeigt, stellten die maximale Aufnahmedistanz von nur 16 cm in Kombination mit der sehr delikaten Natur und der be-



**Abb. 5:** Digitales Oberflächenmodell.

trächtlichen Ausdehnung des Modells große Anforderungen an das Erfassungsteam. Das Resultat des Scanvorgangs ist eine Punktwolke von ca. 80 Mio. Punkten mit einer mittleren Dichte von 10 Punkten/ $\text{mm}^2$  und einer Punktgenauigkeit von 0,1–0,2 mm in X-, Y- und Z-Richtung. Wegen des instabilen Holzbodens des Museums wurden damit die Werte aus der Herstellerspezifikation bei weitem nicht erreicht. Die erzielte Genauigkeit ist jedoch um eine Größenordnung besser als die zu erwartende Modellbaugenauigkeit. Abb. 5 zeigt das aus der Punktwolke abgeleitete digitale Oberflächenmodell.

### 3.2 Photogrammetrische Aufnahmen und Auswertungen

Mit den photogrammetrischen Aufnahmen wurden mehrere Ziele verfolgt: die Generierung eines Orthophoto-Mosaiks, die Auswertung von 3D-Objekten, die Gewinnung von Gebäudetexturen und die Erfassung und Nachbearbeitung des Geländemodells. Besondere Herausforderungen boten die limitierte Raumhöhe, die homogene Ausleuchtung des Modells sowie die Gewährleistung einer optimalen Tiefenschärfe in der konvergenten Aufnahmeconfiguration. Die Aufnahmen wurden mit einer digitalen Spiegelreflexkamera Nikon D200 mit 10 Megapixeln und einer Objektivbrennweite von 28 mm durchgeführt (siehe Abb. 6). Da im Modell keine Passpunktmarken angebracht werden durften, erfolgte die Signalisierung mit im Modell verteilten Steck-



**Abb. 6:** Bildaufnahmen Nahbereichsphotogrammetrie

nadeln (Kopfdurchmesser circa 3 mm), deren Position vorgängig mit dem Laserscanner bestimmt worden waren.

Auf Grund der unterschiedlichen Anforderungen wurden die Aufnahmen in zwei unterschiedlichen Messkampagnen durchgeführt:

- *Konvergente Aufnahmeconfiguration:* Diese Bildaufnahmen erfolgten mit dem Ziel der interaktiven 3D-Objektrekonstruktion und der Erfassung der Fassaden für die teilautomatische Texturierung. Die insgesamt 104 Bilder wurden gebietsweise in acht Teilblöcke (siehe Abb. 8) unterteilt, was die zeitgleiche Orientierung und interaktive Auswertung durch mehrere Teams erlaubte. Für die Bildorientierung wurde die Software iWitness ([www.iwitnessphoto.com](http://www.iwitnessphoto.com)), für die 3D-Auswertung der Dachlandschaften die Kombination von PHIDIAS ([www.phocad.de](http://www.phocad.de)) mit dem MicroStation CAD eingesetzt. Der Entscheid für eine interaktive Dachauswertung und eine automatische Gebäudemodellgenerierung im 3D-GIS war auf Grund der sehr komplexen Dachlandschaft der Altstadt, der hohen Anforderungen an den Detaillierungsgrad und wegen des Fehlens zuverlässiger Grundrissdaten gefällt worden.
- *Nadiraufnahmen / Simulation Luftbildaufnahmen:* Ziel dieser Aufnahmen waren stereoskopische Auswertungen (zum Beispiel der Wehranlage) und die Orthophotogenerierung. Sie wurden mit folgenden Parametern durchgeführt: Bildmaßstab 1 : 70 (Aufnahmehöhe 2,0 m), Längs- und Querüberdeckung 60%, zwei Streifen à sechs Bilder und zehn Vollpasspunkte. Die Bündelblock-

orientierung sowie die Auswertung erfolgten mit der Luftbildphotogrammetriesoftware LPS ([www.erdas.com](http://www.erdas.com)).

### 3.3 Genauigkeitsanalyse

Die folgenden Analysen sollen eine Beurteilung der geometrischen Genauigkeit der eingesetzten Mess- und Auswerteverfahren sowie der 3D-Rekonstruktion ermöglichen. Geometrische Fehler des Originalmodells und mögliche Transformationsansätze werden im Abschnitt 6 behandelt.

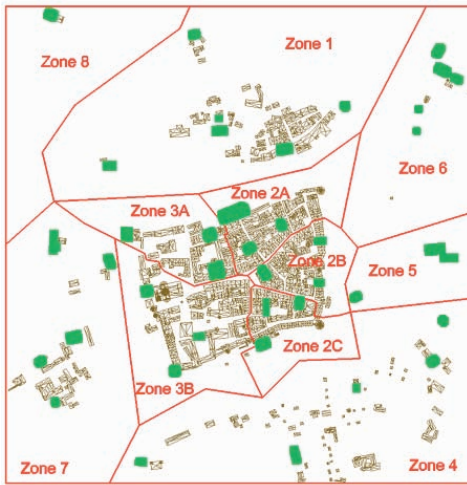
Die erzielten a posteriori Genauigkeiten der *einzelnen Mess- und Auswerteverfahren* sind in Tab. 1 aufgeführt. Im Fall der Laserscanning-Daten beruhen die Angaben auf dem Vergleich zweier unabhängiger Scans, im Fall der photogrammetrischen Aufnahmen (PG Nadir und PG konvergent) auf den Widersprüchen beziehungsweise Restklaffungen in den mittels Laserscanning bestimmten Passpunkten (PP).

Die Ergebnisse in Tab. 1 illustrieren die hohe 3D-Punktgenauigkeit des Laserscanners, welche trotz schwieriger Umgebungsbedingungen etwa um Faktor 3 besser ist als diejenige aus der photogrammetrischen Punktbestimmung. Diese hohe Genauigkeit des Laserscanners interessiert hier vor allem aus wissenschaftlicher Sicht und als Referenz für weitere Untersuchungen. Die praktischen Genauigkeitsanforderungen werden auch durch die beiden photogrammetrischen Einsatzszenarien erfüllt.

Zusätzlich zur oben aufgeführten Genauigkeit aus den Punktmessungen der photogram-

**Tab. 1:** Genauigkeiten der Punktbestimmung aus Quadratmitteln der Widersprüche (RMS) in den Passpunkten.

Messverfahren	$s_x, s_y, s_z$	Bemerkungen
Laserscanning	$s_{x,y,z} = 0,12 \text{ mm}$	Basis: Transformationsfehler zweier unabhängiger Scans
PG Nadir	$s_{x,y} = 0,15 \text{ mm}$ $s_z = 0,47 \text{ mm}$	Mittlerer Fehler Gewichtseinheit: $\sigma_0 = 0,31 \text{ Pixel} = 1,9 \mu\text{m}$ ( $m_b = \text{circa } 70$ ); mittlerer Fehler aus Widersprüchen in Passpunkten: $m_x = 0,17 \text{ mm}$ , $m_y = 0,14 \text{ mm}$ , $m_z = 0,47 \text{ mm}$ (8 PP)
PG konvergent	$s_{x,y,z} = 0,3-0,6 \text{ mm}$	Mittelwerte aus acht Bündelblöcken: Mittlerer Fehler Gewichtseinheit: $\sigma_0 = 0,7-1,5 \text{ Pixel} = 4,3-9,2 \mu\text{m}$ ( $\sigma m_b = \text{circa } 60$ ); mittlerer Fehler aus Widersprüchen in Passpunkten: $m_{x,y,z} = 0,25-0,56 \text{ mm}$ (6-7 PP pro Block)

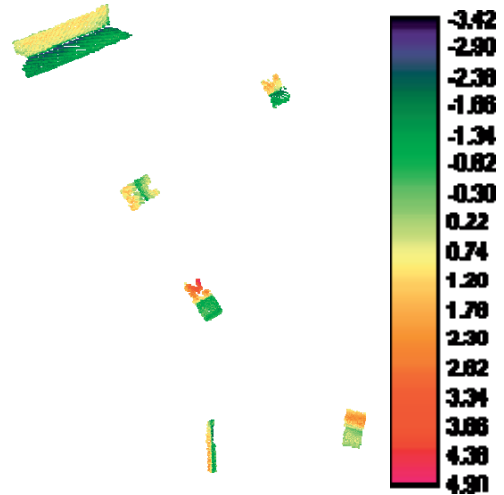


**Abb. 7:** Acht photogrammetrische Teilblöcke und grün markierte Vergleichsflächen.

metrischen Bildorientierung wurde auch die Genauigkeit des ausgewerteten 3D-Modells untersucht. Dazu wurden über das Projektgebiet verteilte Vergleichsflächen ausgewählt (vgl. grüne Flächen in Abb. 7 und einzelne Fläche in Abb. 8). Die mittlere vertikale Abweichung eines 3D-Punktes von den zugehörigen photogrammetrisch ausgewerteten Dachflächen beträgt 0,8–1,3 mm, was – unter der vereinfachten Annahme fehlerfreier Laserscanning-Daten – einem mittleren vertikalen Modellrekonstruktionsfehler von 0,4–0,7 m in der Realwelt entspricht. Darin enthalten sind Fehleranteile, die durch Generalisierungen bei der photogrammetrischen Auswertung verursacht wurden. Die Rekonstruktionsgenauigkeit im Submeterbereich ist vergleichbar mit der Rekonstruktionsgenauigkeit realer Stadtmodelle und ist um Faktoren besser als die Genauigkeit des ursprünglichen Modellbaus mit seinen vielen Unsicherheiten (Abschätzung Gebäudehöhen etc.).

#### 4 Aufbau 3D-GIS mit integrierter 3D-Rekonstruktion

Wird der Aufbau eines historischen 3D-Geoinformationssystems angestrebt, lohnt sich der möglichst frühe Einbezug einer geeigneten 3D-GIS-Technologie. Im vorliegenden Fall



**Abb. 8:** Testfläche mit Differenzen Dachlandschaft vs. 3D-Punktwolke (in [mm]).

wurde das 3D-GIS DILAS (Digital Landscape Server; NEBIKER 2003a) eingesetzt, eine instituteigene Forschungs- und Entwicklungsplattform, die bei verschiedenen Städten im produktiven Einsatz steht. DILAS ist eine vollständig DBMS-basierte 3D-GIS-Technologie mit einem objektorientierten Datenmodell zur Verwaltung von 3D-Objekten und Objekttexturen. Das System bietet einen umfassenden Support für 3D-Stadtmodelle – inklusive Gelände- und Oberflächenmodelle sowie Orthophotos. DILAS ermöglicht eine flexible, regelbasierte Konstruktion unterschiedlicher 3D-Gebäudemodelltypen aus Kombinationen von Gebäudegrundrissen, 3D-Punktwolken, thematischen Daten und/oder 3D-Dachgeometrien. Seit kurzem bietet DILAS auch einen CityGML-Export. Frühere Untersuchungen zum Einsatz von 3D-GIS-Technologien in der Rekonstruktion und Dokumentation von Kulturdenkmälern finden sich in (NEBIKER 2003b und WÜST et al. 2004).

Das Datenmodell des historischen 3D-GIS von Solothurn wurde in dieser ersten Phase bewusst einfach gehalten und konzentriert sich auf die wichtigsten Objektmerkmale, welche die geplanten späteren Modellerweiterungen um historische Daten (zum Beispiel soziodemographische Daten zu den einzelnen Gebäuden) gewährleisten. Auf Grund der vollständigen DBMS-Integration von DILAS

sind solche Modelländerungen über SQL relativ einfach möglich. Das aktuelle Datenmodell erlaubt eine Unterscheidung nach Gebäudetypen (zum Beispiel Kirche, Wohnhaus, etc.) und enthält als wichtigstes Element einen eindeutigen Objektidentifikator für jedes Gebäude, welcher vom beteiligten Historiker auf Grund historischer Katasterdaten bestimmt wurde. Das Basismodell ermöglicht auch die bereits geplante Einführung einer einfachen applikations-basierten temporalen Erweiterung wie sie in (OOSTEROM 2000) beschrieben wird.

Nach einer auf XML-Regeln basierenden Übernahme der photogrammetrisch erfassten Dachlandschaften in DILAS und der anschließenden Objektstrukturierung mit Hilfe der historischen Katasterdaten wurden die Gebäudemodelle in DILAS automatisch generiert. Dabei wurden die Begrenzungen der Dachflächen mit dem Geländemodell aus den Laserscanningdaten verschnitten.

## 5 Semi-automatische Texturierung des 3D-Modells

Eine der größten Herausforderungen bei der Rekonstruktion historischer städtischer Szenarien ist die Texturierung der Gebäude, welche sich im Spannungsfeld zwischen mög-

lichst großer Realitätstreue und kartographischer Abstraktion bewegt. Entsprechend breit ist das Spektrum der Lösungsansätze. Handbemalte historische 3D-Modelle können als frühe 3D-Karten betrachtet werden, mit einer oft hohen künstlerischen graphischen Qualität, die im vorliegenden Fall ins digitale Modell übertragen werden sollte. Durch eine Übernahme der Originaltexturen erhält die digitale Stadt ein modellhaftes Erscheinungsbild mit einer durchaus erwünschten kartographischen Abstraktion, welche den vielen Unsicherheiten und Hypothesen eines historischen Modells gerecht wird. Zudem wirken die ‚handgefertigten‘ abstrahierten Texturen lebendiger als die oft verwendeten generischen, künstlichen Texturen mit ihrem eher leblosen und repetitiven Charakter.

Sollen größere städtische Szenarien mit mehreren Hundert 3D-Objekten mit photographischen Originaltexturen versehen werden, so ist eine weitgehende Automatisierung unabdingbar. Im Falle von Solothurn 1830 wurde die institutseigene Virtual Globe Technologie «i3D» (IVGI 2009a) um eine automatische Texturierungsfunktion erweitert. Basierend auf den Bilddaten, Orientierungs- und Verzeichnungsparametern aus der photogrammetrischen Auswertung und den 3D-Objektgeometrien aus dem 3D-GIS führt i3D eine objektweise Texturzuweisung durch, und baut



Abb. 9: Solothurn 1830 in Google Earth (Ansicht aus Süden mit Jura im Hintergrund).

anschließend pro Objekt einen Texturatlas auf. Mit Ausnahme der optimalen Bildwahl, die auf Grund der vielen Verdeckungen im Modell noch manuell vorgenommen werden muss, verläuft der Texturierungsprozess in i3D automatisch. Am Schluss des Prozesses kann das texturierte 3D-Modell im COLLADA-Format ([www.collada.org](http://www.collada.org)) aus i3D exportiert und in jeden COLLADA-fähigen Viewer (z. B. Google Earth oder Cinema4D) importiert werden, wobei zur definitiven Georeferenzierung je nach geodätischem Modell des Viewers zusätzliche Transformationen erforderlich sind (z. B. bei Google Earth).

Abb. 9 zeigt die texturierte 3D-Rekonstruktion von „Solothurn 1830“ in Google Earth. Der Link zur 3D-Szene sowie ein Beitrag des Schweizer Fernsehens über die Entstehung des 3D-Modells sind auf der Homepage des Instituts Vermessung und Geoinformation zu finden (IVGI 2009b).

## 6 Verzerrungsanalysen und Transformationsansätze

Physikalische Stadtmodelle sind aus praktischen Gründen oft aus Teilblöcken bzw. Platten zusammengesetzt, was unweigerlich zu Unstetigkeiten an den Plattenrändern führt. Demgegenüber weisen traditionelle (amtliche) Vermessungen innerhalb eines einzelnen Siedlungsgebiets deutlich geringere Inhomogenitäten auf. Somit ist die Entzerrungs- und Transformationsproblematik bei einer Rekon-

struktion aus physikalischen Modellen deutlich anspruchsvoller als bei Rekonstruktionen auf der Basis realer Fragmente, die in traditionelle geodätische Bezugssysteme eingebunden sind.

Als Referenzdaten für die Verzerrungsanalyse im historischen Stadtmodell Solothurn standen aktuelle amtliche Vermessungsdaten der Stadt Solothurn zur Verfügung. Als Passpunkte wurden die Ecken von Gebäuden gewählt, die bereits 1830 vorhanden waren und deren aktuelle Koordinaten mit einer Lagegenauigkeit von besser als 10 cm bekannt sind. Insgesamt standen so 195 über das ganze Gebiet verteilte Punkte zur Verfügung.

Eine erste Analyse mittels ebener Helmerttransformation bestätigte die Größenordnung der systematischen Restfehler im Modell, welche bei einer Überlagerung des aktuellen 3D-Modells mit der heutigen Situation in Google Earth sichtbar werden. Der maximale Restfehler eines Punktes nach der Helmerttransformation beträgt 2,7 cm im Modell beziehungsweise 13,2 m in der Realwelt, was einer Verschiebung um mehr als eine Hausbreite entspricht.

Die folgende Analyse der Verzerrung des analogen Stadtmodells wurde mit *semiparametrischer Regression* (Kollokation und Filterung) durchgeführt. Dabei wurden aus 195 Passpunkten die Komponenten des Modells

Landeskoordinaten  
= helmerttransformierte Modellkoordinaten  
+ Signal + Rauschen

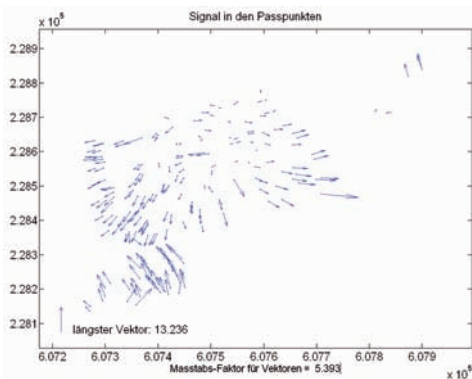


Abb. 10: Signalvektoren in den 195 Passpunkten, Einheit [m].

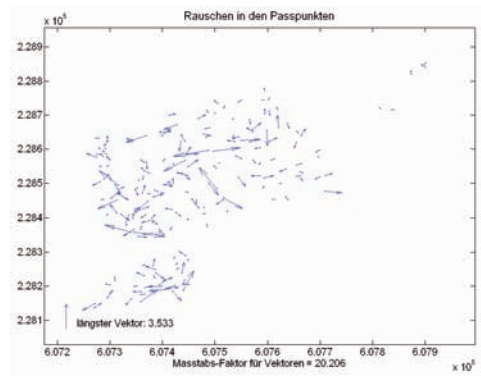
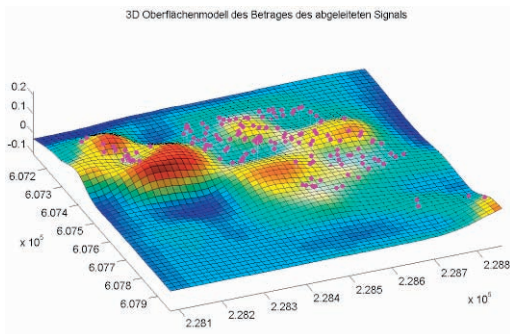


Abb. 11: Rauschvektoren in den 195 Passpunkten, Einheit [m].

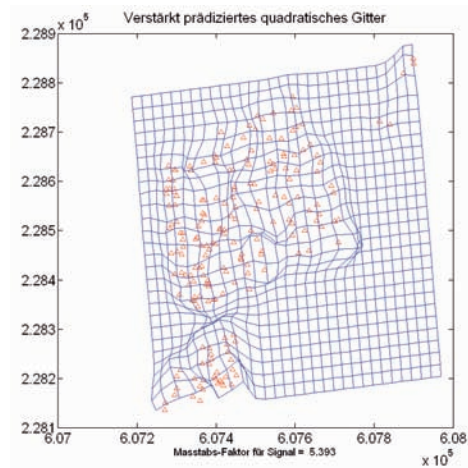




**Abb. 12:** 3D-Oberfläche des Betrages des abgeleiteten Signals

mit Regularisierung durch verallgemeinerte Kreuzvalidierung (GCV) geschätzt. Das Signal beschreibt die systematischen Verzerrungen des Modells, das Rauschen die zufälligen Abweichungen. Einzelheiten des Verfahrens finden sich in (FISCHER & BRÜHLMANN 2006 und GREEN & SILVERMAN 1994). In mehreren Diplomarbeiten wurde das Verfahren an der FHNW als Matlab-Programm implementiert. Abb. 10 zeigt die Signalvektoren mit einer maximalen Länge von 13,24 m. Die Rauschvektoren (Abb. 11) streuen zufällig zweidimensional normalverteilt und weisen keinen systematischen Anteil auf. Im Modell stehen die Häuser der Altstadt etwas zu eng zusammen, und der kleine Stadtteil südlich des Aare-Flusses liegt zu weit südlich. Die Aare zwischen den beidufrigen Stadtteilen ist im Modell etwas zu breit geraten.

Mit diesem Ansatz wird das ganze durch die Passpunkte gegebene Gebiet (das heißt deren konvexe Hülle) gesamthaft ausgewertet. Die Untersuchung der Änderung des Signals erlaubt die Feststellung der Schollen oder Regionen ähnlicher systematischer Verzerrungen der Punkte des Stadtmodells. Als Änderung nehmen wir den Betrag der Ableitung des Signals, dargestellt als Funktion des Ortes in Abb. 12. Die markanteste Schollengrenze liegt im Gebiet der Aare zwischen den beidufrigen Stadtteilen. Diese beiden Stadtteile stellen die zwei maßgebenden Schollen dar und



**Abb. 13:** Transformiertes quadratisches Gitter, Verzerrungen verstärkt

lassen sich in diesem Fall durch je eine Helmerttransformation gut transformieren.

In den bisherigen Untersuchungen zur Transformation analoger Modelle herrschen maschenweise Transformationsansätze (zum Beispiel affin, bilinear oder projektiv) vor (NIEDERÖST 2005). Ein Nachteil dieser Ansätze ist die direkte Abhängigkeit von Fehlern in den Stützpunktkoordinaten der Dreiecks- oder Vierecksmaschen. Der Vorteil der semiparametrischen Regression besteht darin, dass ein durch Passpunkte gegebenes Gebiet gesamthaft mit einem Modell beschrieben wird. Dabei können die systematischen Abweichungen von einer Helmerttransformation detektiert werden, was erst eine Ermittlung der Schollen der Transformation über die Signaländerung erlaubt. Der vorliegende Ansatz stellt somit ein gutes Werkzeug zur zuverlässigen Festlegung der einzelnen Maschen (siehe Abb. 13) für eine anschließende maschenweise Transformation zur Verfügung.

## 7 Fazit und Ausblick

Im Beitrag wurden Verfahren und Lösungsansätze zur effizienten und realitätsgetreuen 3D-Rekonstruktion städtischer 3D-Szenarien auf der Basis historischer Stadtmodelle vorgestellt und diskutiert. Damit konnte das historische

Solothurn um 1830 digitalisiert und als Basisdatensatz in ein historisches 3D-GIS integriert sowie als attraktive interaktive 3D-Szene publiziert werden.

Der erstmals für diese Art von Anwendung eingesetzte T-SCAN Handscanner hat sich auf Grund der hohen Genauigkeit, Punktdichte und Homogenität der erzeugten 3D-Punktwolke und der flexiblen Scannerführung sehr bewährt. Interessant wären weiterführende Untersuchungen mit den erwähnten automatischen Gebäude-Extraktionsansätzen auf Punktwolkenbasis und ein Vergleich mit der vorliegenden photogrammetrischen Gebäudeauswertung. Das photogrammetrische Messverfahren ist für die Gewinnung von Texturdaten nach wie vor unabdingbar. Es liefert vergleichbar gute Genauigkeiten und könnte auch als alleiniges Messverfahren eingesetzt werden.

Der Einsatz einer 3D-GIS-Technologie wie DILAS hat sich bewährt. So bietet die konsequente objektweise Strukturierung des 3D-Stadtmodells Vorteile, von der Datenmodellierung und der Verknüpfung mit bestehenden historischen Daten über die automatische Texturierung und die Organisation von Texturatlanten bis hin zur optimierten Aufbereitung großer, streamingfähiger 3D-Szenen. Die Übernahme der handgemalten Originaltextur konnte mit dem teilautomatisierten Verfahren erfolgreich durchgeführt werden und hat damit auch grafisch ein modellnahes Resultat geliefert.

Die vorgestellte Verzerrungsanalyse des Originalmodells hat den Bedarf nach modernen Transformationsansätzen im Umgang mit historischen Stadtmodellen aufgezeigt. Der Lösungsansatz auf Basis der semiparametrischen Regression wird weiter verfolgt und sowohl für die Entzerrung des historischen Orthophotos als auch für die Entzerrung des 3D-Stadtmodells direkt im 3D-GIS implementiert. Als Grundlage für zukünftige interdisziplinäre wissenschaftliche Untersuchungen soll das Datenmodell des historischen 3D-GIS Solothurn schrittweise um temporale Funktionalität und historische Daten erweitert werden.

## Dank

Wir bedanken uns bei den folgenden Personen und Institutionen: Michael Baumgartner, MfB Geoconsulting GmbH für die Initiative zum Projekt, Leica Geosystems AG für die Zurverfügungstellung eines T-SCAN-Systems, Stefan Blank, Amt für Denkmalpflege und Archäologie des Kantons Solothurn und Roland Blaser, Wissenschaftsjournalist für die filmische Dokumentation des Projekts.

## Literatur

- AKBARZADEH, A., FRAHM, J.-M., MORDOHAJ, P., CLIPP, B., ENGELS, C., GALLUP, D., MERRELL, P., PHELPS, M., SINHA, S., TALTON, B., WANG, L., YANG, Q., STEWENIUS, H., YANG, R., WELCH, G., TOWLES, H., NISTÉR, D. & POLLEFEYS, M., 2006: Towards Urban 3D Reconstruction from Video. – Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT'06): 1–8.
- FISCHER, B. & BRÜHLMANN, P., 2006: On the Application of Nonparametric Regression Methods to Geodetic Data. – XXIII FIG Congress, Munich, Germany.
- GREEN, P.J. & SILVERMAN, B.W., 1994: Nonparametric regression and generalized linear models a roughness penalty approach. – Chapman & Hall, London **IX**: 182 Seiten.
- IVGI, 2009a: i3D Virtual Globe Technologie. – <http://www.fhnw.ch/habg/ivgi/forschung/i3d>. Seitenzugriff: 28. 1. 2009.
- IVGI, 2009b: Solothurn 1830 in Google Earth. – <http://www.fhnw.ch/habg/ivgi/studienarbeiten/solothurn3d>. Seitenzugriff: 28. 1. 2009.
- NEBIKER, S., 2003a: DILAS – The Digital Landscape Server for the Generation and Management of Large 3D City Models. – Photogrammetric Week ,03. Wichmann, Heidelberg: 227–236.
- NEBIKER, S., 2003b: Support for visualisation and animation in a scalable 3D GIS environment – motivation, concepts and implementation. – International Workshop on Visualisation and Animation of Reality-based 3D Models. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 34 (5/W10): auf CD.
- NIEDERÖST, J., 2005: Das Relief der Urschweiz von Franz Ludwig Pfyffer (1716–1802) 3D-Rekonstruktion, Analyse und Interpretation. – Institute of Geodesy and Photogrammetry Swiss Federal Institute of Technology ETH, Zürich: 211 Seiten.

- OOSTEROM, P.V., 2000: Time in cadastral maps. – In: Time in GIS issues in spatio-temporal modeling. – NCG Nederlandse Commissie voor Geodesie, Delft: 36–45.
- POLLEFEYS, M., KOCH, R., VERGAUWEN, M. & VAN GOOL, L., 2000: Automated reconstruction of 3D scenes from sequences of images. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **55** (4): 251–267.
- REMONDINO, F. & EL-HAKIM, S., 2006: Image-based 3D Modelling: A Review. – The Photogrammetric Record **21** (115): 269–291.
- SCHUBIGER, B., 1994: Die Stadt Solothurn I mit einer Einleitung zum Kanton Solothurn Geschichtlicher Ueberblick, Stadtanlage und -entwicklung, Befestigung, Wasserversorgung und Brunnen, Denkmäler, Brücken und Verkehrsbauten. – Wiese Verlag, Basel **XX**: 342 Seiten.
- Stadt Zürich, 2009: Zürich um 1800 – Historisches Stadtmodell, <http://www.stadt-zuerich.ch.Seitenzugriff>: 28. 1. 2009.
- TEO, T.-A., RAU, J.-Y., CHEN, L.-C., LIU, J.-K. & HSU, W.-C. 2006: Reconstruction of Complex Buildings using LIDAR and 2D Maps. – Innovations in 3D Geo Information Systems: 345–354.
- VOSSelman, G. & DIJKMAN, S., 2001: 3D Building Model Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing **34** (3/W4): 37–43.
- WÜST, T., NEBIKER, S. & LANDOLT, R., 2004: Applying the 3D GIS DILAS to Archaeology and Cultural Heritage Projects. – Requirements and First Results. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **35** (B5): 407–412.

## Adressen der Autoren:

Prof. Dr. Stephan Nebiker, Dipl.-Ing. Andreas Barmettler & Prof. Dr. Beat Fischer, Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik, Institut Vermessung und Geo-information, CH-4132 Muttenz, Tel.: +41-61-467 43 36, e-mail: [stephan.nebiker@fhnw.ch](mailto:stephan.nebiker@fhnw.ch), [andreas.barmettler@fhnw.ch](mailto:andreas.barmettler@fhnw.ch), [beat.fischer@fhnw.ch](mailto:beat.fischer@fhnw.ch)

Dr. phil. ERICH WEBER. Museum Blumenstein – Historisches Museum der Stadt Solothurn, CH-4500 Solothurn, Tel.: +41-32-622 54 70, e-mail: [erich.weber@egs.so.ch](mailto:erich.weber@egs.so.ch)

Manuskript eingereicht: Februar 2009

Angenommen: Februar 2009