

# Kombination und Vergleich von digitaler Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning für Architektur- anwendungen

THOMAS P. KERSTEN <sup>1</sup>

*Dieser Beitrag beschreibt zwei Projekte der HafenCity Universität Hamburg, in denen zwei historische Gebäude durch digitale Architekturphotogrammetrie und terrestrisches Laserscanning erfasst und als 3D CAD-Gebäudevolumenmodell erstellt wurden. Dabei wurden einmal beide Verfahren zur Erfassung und Modellierung der Kirche in Raduhn (Landkreis Parchim in Mecklenburg-Vorpommern) im Vergleich eingesetzt, während zum anderen das Duderstädter Westerturmensemble (Landkreis Göttingen in Niedersachsen) durch kombinierten Einsatz beider Verfahren rekonstruiert wurde. Für beide Projekte wurden die digitale Spiegelreflexkamera Fujifilm FinePix S2 Pro und der terrestrische Laserscanner Mensi GS100 eingesetzt. Die erforderlichen Arbeitsschritte von der Datenerfassung bis zur Visualisierung werden beschrieben und die erreichte Genauigkeit und der jeweilige Arbeitsaufwand werden dargestellt.*

## 1 Einleitung

Für die 3D-Erfassung von Gebäuden stellt das terrestrische Laserscanning heute zunehmend eine echte alternative oder ergänzende Messmethode zur tachymetrischen Aufnahme oder zur digitalen Architekturphotogrammetrie dar. Dafür stehen je nach Anforderung hinsichtlich Genauigkeit, Reichweite, Detailreichtum und Messgeschwindigkeit verschiedene Laserscanner als Kamera- oder Panorama-View Scanner auf dem Markt zur Verfügung. Die Auswertung von tachymetrischen oder photogrammetrischen Daten zu 3D-Gebäudemodellen ist heute eine bewährte Methode. Die photogrammetrische Erfassung und 3D-Modellierung von historischen Gebäuden z.B. mit der Software PICTRAN wurde in Publikationen der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (seit 1.1.2006 gehört das Department Geomatik zur neu gegründeten HafenCity Universität Hamburg) beschrieben: KERSTEN und ACEVEDO PARDO 2002 und KERSTEN ET AL. 2003. Eine Software-Lösung für die kombinierte Auswertung von Laserscanner- und Bilddaten mit dem Programm PHIDIAS der Firma PHOCAD, Aachen wird in BECKER und SCHWERMANN (2005) vorgestellt.

In diesem Beitrag werden die beiden Aufnahme- und Auswerteverfahren digitale Architekturphotogrammetrie und terrestrisches 3D-Laserscanning einmal kombiniert und einmal vergleichend betrachtet. In dem Projekt Westerturmensemble Duderstadt wurden beide Verfahren in der Software PHIDIAS kombiniert eingesetzt, während im Projekt Kirche Raduhn beide Verfahren bei der Aufnahme und Objektrekonstruktion miteinander verglichen wurden. Die für die Auswertung und Modellierung notwendigen Arbeitsschritte werden mit Angaben über die Genauigkeit aufgezeigt, die Ergebnisse der virtuellen Objekte werden präsentiert und entsprechende Schlussfolgerungen werden aus Kombination und Vergleich beider Verfahren gezogen.

---

<sup>1</sup> HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik, Hebebrandstr. 1, 22297 Hamburg, e-mail: Thomas.Kersten@hcu-hamburg.de

## 2 Die Aufnahmeobjekte - Kirche in Raduhn und Duderstädter Westerturmensemble

Die Kirche (Abb. 1) befindet sich in dem kleinen Dorf Raduhn im Landkreis Parchim (Mecklenburg Vorpommern). Das Dorf wurde erstmals in einer Heiratsurkunde vom 23. November 1264 erwähnt, jedoch existieren keine weiteren Unterlagen über die Errichtung der Kirche. In den Jahren 1857 bis 1859 wurde die „alte Kirche“ unter Großherzog Friedrich Franz II komplett im neugotischen Stil umgebaut, der sich heute in den zahlreiche Spitzbögen der Fenster und Türen widerspiegelt. Die Mischung aus den zum Grossteil noch vorhandenen Felswänden und den Ziegelsteinen ist Zeitzeuge dieser gravierenden Umbaumaßnahme. An der Nord- und Ostfassade sind im Mauerwerk Bögen und zugemauerte Fenster als weitere Anzeichen einer ehemals erweiterten Kirche vorhanden. Das Gebäude umfasst einen Grundriss von ca. 7 x 8 Meter und eine Firshöhe von etwa 15 Meter. Der Turm an der Westseite erreicht eine Höhe von 24 Meter. Heute befindet sich um die Kirche herum eine große Wiese, begrenzt durch eine ein Meter niedrige Trockenmauer.

Der Westerturm ist das Wahrzeichen der Stadt Duderstadt (Landkreis Göttingen) im südlichen Niedersachsen. Der Duderstädter Westerturm (ca. 35 m x 8 m x 52 m, siehe Abb. 1) ist der letzte, vollständig erhaltene Turm der mittelalterlichen Stadtbefestigung, der bereits am 16. Oktober 1343 als Niedertor erstmals urkundlich erwähnt wurde. Nach einem Brand im Frühjahr 1424 wurde der Westerturm vernichtet, aber kurze Zeit später als Steinbau wieder aufgebaut, wobei erst 1505 die Dachkonstruktion vollendet wurde, welche durch ihre spätere und gleichmäßige Drehung den Turm zum Wahrzeichen der Stadt machte. Wegen gravierender Schäden an der Holzkonstruktion des Daches wurde im Jahre 2002 eine grundlegende Sanierung des Turmes durchgeführt. Im Zuge dieser Sanierung wurde auch die Stadtmauer im alten Bachmann'schen Haus freigelegt und die Struktur der alten Hausfassade durch eine Glaskonstruktion ersetzt. Das so restaurierte Ensemble wurde am 12.08.2004 feierlich eingeweiht und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.



Abb. 1: Kirche Raduhn (links) und Duderstädter Westerturmensemble, Front- (Mitte), Hinteransicht (rechts)

## 3 Die Aufnahmesysteme

Die Aufnahme der beiden Gebäude erfolgte mit einer handelsüblichen digitalen Spiegelreflexkamera Fujifilm FinePix S2 Pro und dem terrestrischen Laserscanning-System Mensi GS100. Die S2 besitzt einen CCD-Chip mit einer Sensorfläche von 23,3 mm x 15,6 mm, die eine maximale interpolierte Auflösung von 4256 x 2848 Pixel bietet, was einer Filegröße von

ca. 35 MB pro Bild in TIFF bedeutet. In dieser Auflösung können 28 Bilder auf einer Compact Flash Karte mit 1 GB Speicherkapazität gespeichert werden. Die Kamera wurde mit Nikkor-Objektiven mit der Brennweite 14 mm und 28 mm eingesetzt.

Das Trimble 3D-Laserscanning-System GS100 wird von Mensi S.A. in Frankreich hergestellt und besteht aus Messinstrument mit Zubehör und entsprechender Erfassungs- und Auswertesoftware. Die Streckenmessung erfolgt nach dem Impulslaufzeitverfahren mit einem grünen Laser mit 532 nm Wellenlänge. Die Genauigkeit der Einzelstrecke beträgt 6 mm. Die optimale Messentfernung des GS100 wird mit 2 – 100m angegeben. Durch die bestmögliche Winkelauflösung von  $0,0018^\circ$  lässt sich in 100m Entfernung eine Gitterweite von 3 x 3 mm realisieren. Der Panorama-View Scanner ( $360^\circ$  horizontal,  $60^\circ$  vertikal) kann bis zu 5000 Punkte in der Sekunde messen, wobei ein Laserpunkt in 50m Entfernung 3mm groß abgebildet wird. Weitere technische Angaben und Abbildungen vom System sind in HÖNNIGER & KERSTEN (2005) aufgeführt. Die vollständigen technischen Daten sind unter MENSI (2004) zu finden.

## **4 Photogrammetrische Objektaufnahme und Laserscanning**

Die Objektaufnahmen erfolgten in folgenden Arbeitsschritten: Passpunktsignalisierung für die photogrammetrische Aufnahme und für das Laserscanning, geodätische 3D-Netzmessung und Passpunktbestimmung mit LEICA-Tachymetern, photogrammetrische Aufnahme und Laserscanning. Die Aufnahme der Kirche Raduhn erfolgte innerhalb eines Tages am 21. April 2004, während das Westerturmensemble im Februar 2005 an drei Tagen aufgenommen wurde.

Als photogrammetrische Passpunkte dienten 45 Signale ( $\varnothing$  25 mm) für die Kirche Raduhn und 49 Signale ( $\varnothing$  50 mm) für den Westerturm, die am Objekt verteilt angebracht wurden. Aufgrund der Höhe des Westerturmes wurde eine fahrbare Drehleiter mit einer maximalen Arbeitshöhe von 28 m (Abb. 2) für die Passpunktsignalisierung und für zusätzliche Aufnahmen mit der Kamera eingesetzt. Zur Verknüpfung und Georeferenzierung der Laserscanning-Punktwolken wurden beim Westerturm neun grüne Mensi-Targets und jeweils sechs Kugeln an der Turmwand und auf den Tachymeterstandpunkten verwendet, während bei der Kirche Kugeln auf den acht um die Kirche verteilten 3D-Netzpunkten platziert wurden. Beim Westerturm bestand das 3D-Netz wegen der Gebäudeanordnung und der Einbindung des Innenbereiches des Turmes und des Museums aus vier Teilnetzen mit insgesamt 12 Standpunkten, von denen die Passpunkte für Photogrammetrie und Laserscanning gemessen wurden. In einer Ausgleichung mit der Software PANDA (GeoTec, Laatzen) wurden die Netz- und Passpunkte mit einer Standardabweichung von besser als 1,5 mm (Westerturm) bzw. 3 mm (Kirche Raduhn) bestimmt. Der Außen- und Innenbereich des Westerturmensembles wurde mit insgesamt 137 Bildern (mit maximaler Auflösung, 5 GB Bilddaten) aufgenommen, davon wurden für die spätere Auswertung und Kamerakalibrierung lediglich 58 Bilder verwendet. Dagegen konnte die Kirche Raduhn mit insgesamt 60 photogrammetrischen Aufnahmen (Auflösung jeweils 3040x2016 Pixel) mit einem Nikkor 14mm-Objektiv aus Augenhöhe aufgenommen werden, von denen später 51 Aufnahmen für die Auswertung verwendet wurden.

Mit dem Laserscanner GS100 wurden beide Objekte von fünf (Kirche) bzw. zehn Scannerstandpunkten (Westerturm) in einer Rasterweite von 20 mm bzw. 93 mm auf 10 m gescannt. Objektdetails wie Fenster oder Turmfigur wurden mit einer höheren Auflösung von 5 mm auf 10 m gescannt. Die Steuerung des Scanners erfolgte mit der Software PointScape, wobei die Selektion der Scanbereiche durch das Video-Framing erfolgte. Die jeweils sichtbaren Targets und Kugeln (angebracht an Turmwand und auf den Tachymeterstandpunkten) wurden für die

spätere Verknüpfung und Georeferenzierung der Scans separat von jedem Standpunkt gescannt und durch die Software als Passpunkte erkannt. Beim Scannen der Westerturmspitze stellte sich heraus, dass das schwarze Schieferdach das grüne Laserlicht kaum reflektierte, so dass dieses Gebäudeteil später allein durch die Photogrammetrie rekonstruiert werden musste. Für die Kirche wurden 12 Millionen Punkte erfasst, was einer Datenmenge von ca. 230 MB entspricht.



Abb. 2: Scanner und Kugel als Passpunkt vor der Kirche Raduhn (links), Drehleitereinsatz für Passpunktsignalisierung und photogrammetrische Aufnahme (Mitte), sowie Laserscannerstandpunkt beim Westerturm (rechts)

## 5 Datenauswertung

### 5.1. Registrierung und Geo-Referenzierung der Punktwolken

Für eine manuelle Registrierung und Geo-Referenzierung der Scans kam die Software Real-Works Survey 4.2 der Firma Mensi zum Einsatz. Jede Scannerstation wurde über drei bis sieben Targets und Kugeln mit den anderen verknüpft, wobei die Genauigkeit für die Registrierung der Punktwolken bei beiden Projekten zwischen 4 mm (Minimum) und 8 mm (Maximalwert) bei der jeweiligen Station lag. Die Geo-Referenzierung der gesamten Westerturm-Punktwolke erfolgte über 23 Passpunkte (6 Kugeln auf Netzpunkte, 9 Targets und 8 Kugeln an der Turmwand) mit einem RMS von 8,8 mm an den Passpunkten, was für die Objektrekonstruktion bei weitem ausreichte. Für die Punktwolke der Kirche erfolgte die Geo-Referenzierung dagegen in 3Dipsos mit einem RMS von 5,2 mm.

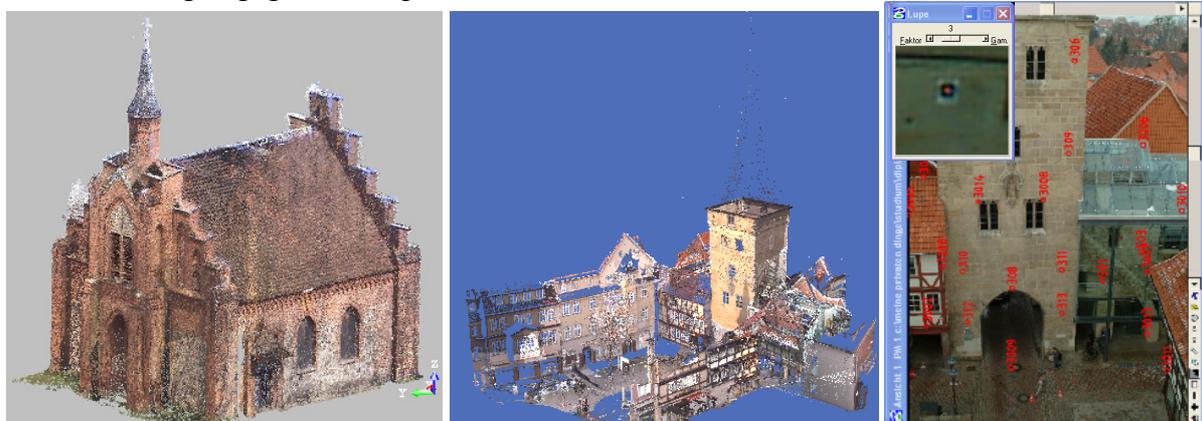


Abb. 3: Gesamte registrierte Punktwolke der Kirche Raduhn (links) und des Westerturmensembles (Mitte); Bild vom Westerturm mit Bildpunktmessungen (rechts)

Anschließend wurde die jeweilige gesamte Punktwolke (Abb. 3) noch bereinigt, in dem überflüssige Punkte, die nicht zu dem Objekt gehörten, gelöscht wurden. Für die Objektrekonstruktion wurden die auszuwertenden Bereiche in der Punktwolke segmentiert und als ASCII-File exportiert, um in PHIDIAS bzw. AutoCAD verarbeitet werden zu können.

## 5.2. Bildorientierung und Kamerakalibrierung

Vor der eigentlichen 3D-Auswertung erfolgten die Bildorientierung und Kamerakalibrierung. Dafür wurden 51 ausgewählte, digitale Bilder der Kirche Raduhn in einem Bildverband durch Bildpunktmessungen mit der Software PhotoModeler (Firma EOS Inc.) verknüpft und orientiert. Die Orientierung der 58 ausgewählten, digitalen Bilder des Westerturms erfolgte durch Bildpunktmessungen mit dem Programm PHIDIAS der Firma PHOCAD, Aachen. Abb. 3 (rechts) zeigt exemplarisch in einer rotierten Darstellung gemessene Bildpunkte und die Messung eines Passpunktes. Bei beiden Bildverbänden ist eine stabile Bildverknüpfung und eine zuverlässige Punktbestimmung gewährleistet, da im Durchschnitt 19 (Kirche) bzw. 12 Bildpunkte pro Bild (Westerturm) und jeder Objektpunkt durchschnittlich in 8 bzw. 6 Bildern gemessen wurden. Die Bildorientierungen wurden simultan mit der Kamerakalibrierung in beiden Softwarepaketen durch eine Bündelblockausgleichung bestimmt. Durch die Kalibrierung der Kamera wurden u.a. systematische Fehler durch die hohe Objektivverzeichnung in der weiteren Auswertung kompensiert. Alle Bildpunkte konnten mit einer Bildmessgenauigkeit von  $s_{xy} = 3,0 \mu\text{m}$  (Kirche) bzw.  $4,8 \mu\text{m}$  (Westerturm) gemessen werden, was einer Genauigkeit von besser als einem halben bzw. einem Pixel entspricht. Die Standardabweichungen für die Objektpunktkoordinaten lagen in beiden Projekten bei 2 mm für die signalisierten Punkte und besser als 1 cm für alle natürlichen Punkte. Diese Ergebnisse bestätigen das hohe Genauigkeitspotenzial der digitalen SLR-Kameras für Anwendungen in der Architekturphotogrammetrie, das auch in anderen Projekten erreicht wurde (KERSTEN und ACEVEDO PARDO 2002 und KERSTEN ET AL. 2003).

## 5.3. Objektrekonstruktion durch getrennte Auswertung

Um das Potenzial der photogrammetrischen und der Laserscanning-Daten für eine 3D-Auswertung und Objektrekonstruktion der Kirche mit einander vergleichen zu können, wurden die orientierten Bildern in PhotoModeler und die segmentierten Punktwolken in 3Dipsos separat ausgewertet.

In PhotoModeler wurden die erforderlichen Objektpunkte in mindestens drei Bildern mit einer Standardabweichung von besser als 10 mm gemessen, wobei identische Objekte, wie z.B. Fenster oder Stuckbänder nur einmal detailliert gemessen und später als CAD-Kopie über einen gemessenen Einfügepunkt im CAD platziert wurden. Zur Erstellung des 3D-Volumenmodells wurden die Daten über ein DXF-File in AutoCAD importiert. Für ein übersichtliches Arbeiten mit AutoCAD wurden die unterschiedlichen Hauptelemente, wie Fassaden, Fenster, Pfeiler, Turm, Haupt- und Nebeneingang jeweils in separaten Dateien modelliert. Kleinere Objekte und Details, wie z.B. Dächer, Muster und Kreuze wurden direkt in den jeweiligen Dateien der zugehörigen Elemente konstruiert. Die einzelnen modellierten Objekte wurden anschließend zu einem gesamten Volumenmodell zusammengesetzt. Die Abb. 4 zeigt die Erstellung eines Fensters aus digitalen Bildern und ein Fensterdetail im Vergleich zu Laserscannerdaten. In Abb. 5 ist das detaillierte 3D-Modell (links), das aus photogrammetrischen Daten generiert wurde, dargestellt.

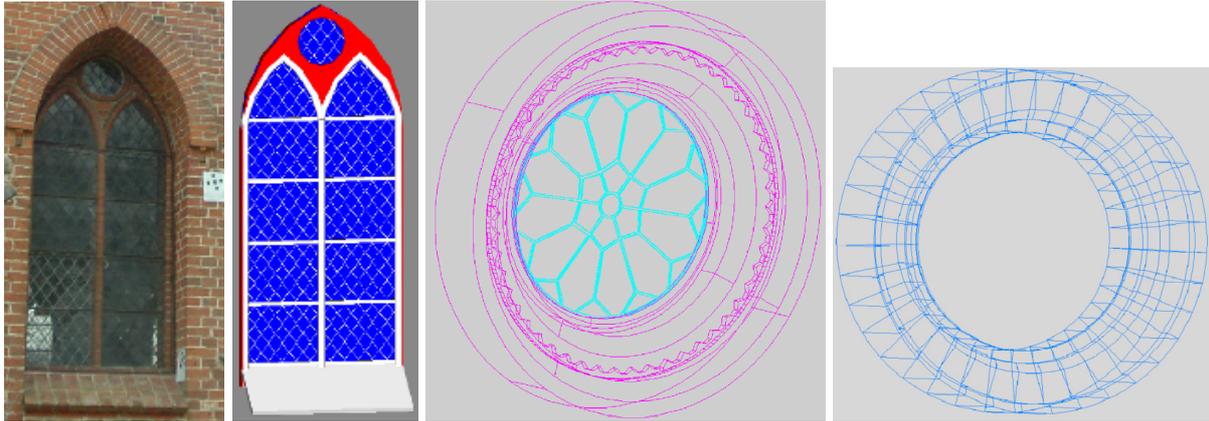


Abb. 4: Fenster der Kirche Raduhn als Bild und als Modell (links) und Fensterdetail aus digitalen Bildern und aus Laserscannerdaten erstellt (rechts)

Auf Grund der geometrischen Struktur des Gebäudes erfolgte die Modellierung der Punktwolken in 3Dipsos überwiegend über Best-fit-Funktionen, d.h. die meisten Geometrielemente wurden über eine Approximation einer Ebene erzeugt. Dabei wurde in der segmentierten Punktwolke einer Fassade eine ausgleichende Ebene ohne Rahmenbedingungen gerechnet. Diese geometrischen Elemente wurden anschließend mit anderen Ebenen verschnitten. So konnten die Fassaden, die Dachelemente, die Pfeiler und Giebel generiert werden. Für die Seitenlaibung der Fenster wurden ausgleichende Ebenen rechtwinklig zu einer weiteren Ebene und für die Fensterwölbungen wurden ausgleichende Zylinder gerechnet. Die Verzierungen wurden mit dem geometrischen Element Torus modelliert, dessen Achse als Bedingung parallel zu einer weiteren Achse verläuft. Zur Erstellung des 3D-Volumenmodells wurden die modellierten Daten über ein DXF-File zu AutoCAD transferiert.

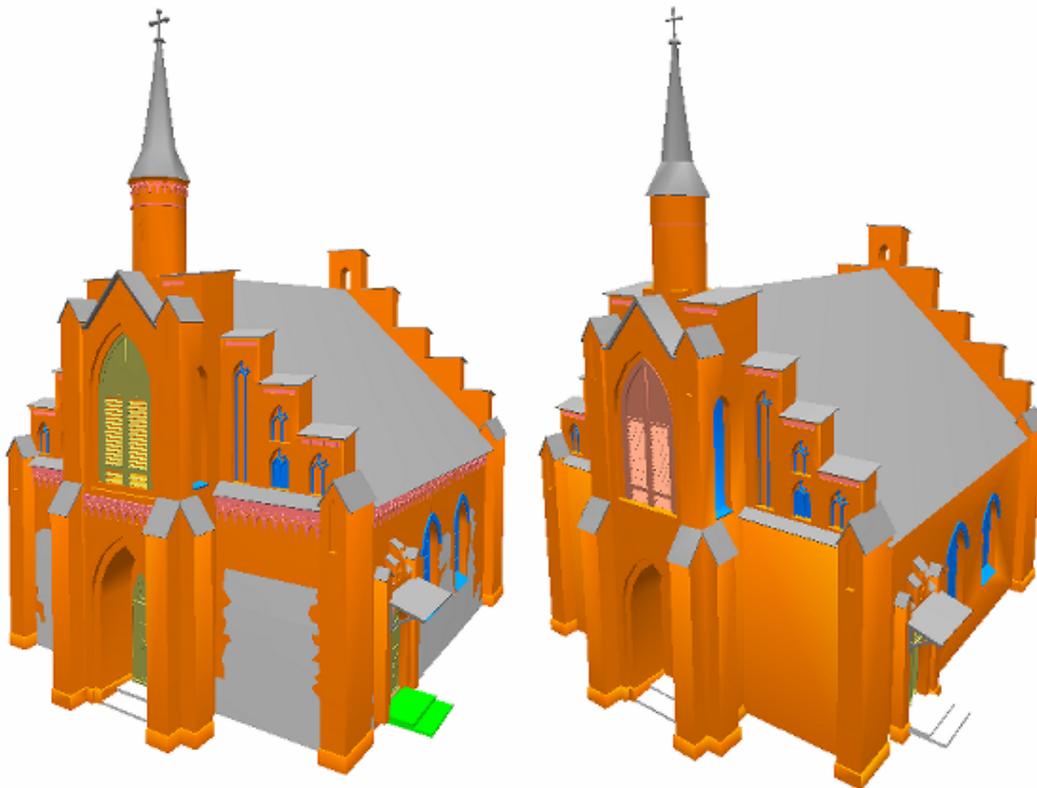


Abb. 5: Schattiertes Volumenmodell der Kirche Raduhn aus digitalen Bildern (links) und aus Laserscannerdaten erstellt (rechts)

Abb. 5 zeigt links das detaillierte, schattierte 3D-Volumenmodell der Kirche Raduhn, das aus digitalen Bildern erstellt wurde, im Vergleich zu dem Modell, das aus Laserscannerdaten (rechts) generiert wurde. Beide Modelle weisen Abweichungen zu tachymetrischen Kontrollmessungen von maximal 20 mm auf, wobei die Differenzen zwischen Photogrammetrie und Laserscanning auch in dieser Größe liegen. Bei diesen Streckenvergleichen haben jedoch die Punktidentifizierung und die Generalisierungen bei der Objektrekonstruktion auch einen Einfluss auf die Genauigkeit. Eine detaillierte Beschreibung der vergleichenden Rekonstruktion der Kirche Raduhn ist in HOFFMANN (2005) zusammengefasst.

## 5.4. Objektrekonstruktion durch kombinierte Auswertung

Die Objektrekonstruktion des Westerturmens ensembles wurde mit dem photogrammetrischen Auswertesystem PHIDIAS, das als eine Anwendung auf das CAD-System MicroStation aufgesetzt ist, durchgeführt. Durch die Kombination dieser Programme können die ermittelten Daten aus PHIDIAS direkt in MicroStation angezeigt und weiter bearbeitet werden. Zur photogrammetrischen Auswertung stehen acht Ansichtsfenster zur Verfügung, wobei hier aber maximal drei Bilder geladen wurden und dabei nur ein Bild zum Zeichnen im Vollbildmodus dargestellt wurde. Für eine präzise Punktmessung kann eine skalierbare Lupe geöffnet und der so ausgewählte Bereich vergrößert dargestellt werden. Die im ASCII-Format eingelesenen Punktwolken werden in ein internes Binärformat umgewandelt, um jedes weitere Einlesen dieser Daten zu beschleunigen und die Dateigröße zu verkleinern.

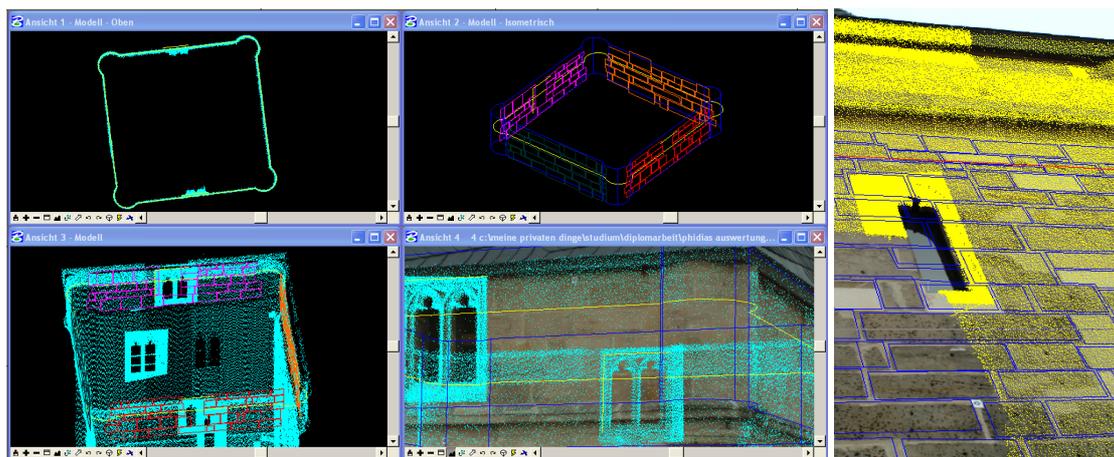


Abb. 6: Darstellung der Punktwolke in Kombination mit Bilddaten (links), Monoplotting der Steine im Bild und in der Punktwolke (rechts)

Das Monoplotting in PHIDIAS wird durch die Kombination von Bild- und Laserscanningdaten möglich. Dazu werden die Punktwolke und das dazugehörige Bild gleichzeitig am Bildschirm dargestellt (siehe Abb. 6 rechts). In einem ersten Schritt wird die Zeichnungsebene festgelegt, wobei darauf zu achten ist, dass die Koordinatenachsen rechtwinkelig auf der Gebäudeseite liegen, um eine spätere Einzelsteinauswertung zu vereinfachen. Die nötige Tiefeninformation wird nach Ebenenfestlegung aus der Punktwolke erhalten. Für die Einzelsteinauswertung wird die Punktwolke dann „ausgeblendet“. Das Zeichnen der Einzelsteine erfolgte für die volumenhafte 3D-Auswertung als „geschlossene Polygone“. Die Einzelsteine wurden bis über die eigentlichen Kanten des Gebäudes sowie über die Fenster und Durchfahrten gezeichnet, um nach der Auswertung aller Gebäudeseiten die exakten Ecken und Kanten im CAD-Programm durch Schnitt zu bestimmen. Sämtliche Einzelsteine wurden anschließend auf die eigentliche Wandstärke, die durch Handaufmass mit einer Stärke von bis zu 1,55 m ermittelt wurde, in einen 3D-Volumenkörper extrudiert.

Ein weiterer Schritt stellte die Konstruktion der abgerundeten Elemente im oberen Bereich des Turmes dar. Hierfür wurden alle vorbereiteten Punktwolken geladen und in einer Draufsicht angezeigt (siehe Abb. 6), so dass daraus eine Polylinie gezeichnet werden konnte, die zur weiteren Verarbeitung in AutoCAD übertragen wurde. Die Turmspitze wurde wegen der schlechten Laserreflexion am schwarzen Schiefer aus photogrammetrischen Messungen (Vorwärtsschnitt in mindestens drei Bildern) konstruiert. Wegen der schlecht zu identifizierenden Punkte am Schieferdach der Turmspitze konnten diese Objektpunktkoordinaten nur mit einer Standardabweichung von besser als 3 cm bestimmt werden. Das Ergebnis der Turmspitzenrekonstruktion ist in der Abb. 7 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der Rekonstruktion des Westerturmensembles ist in BIEBERMANN & SCHNEIDER (2005) zusammengefasst.

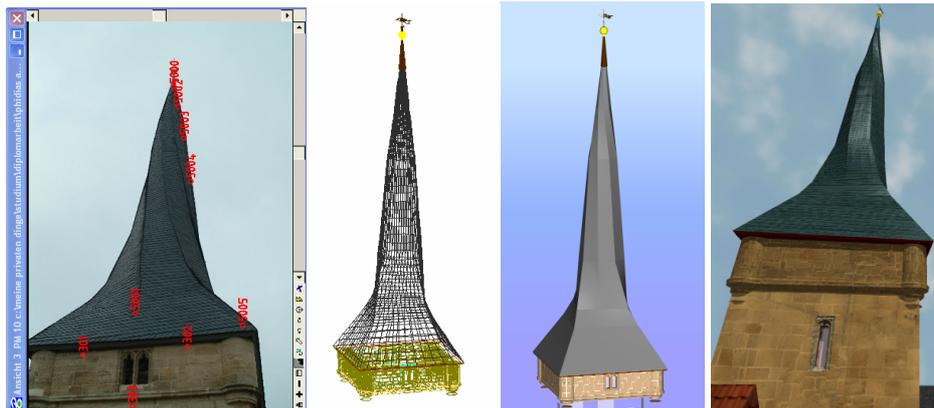


Abb. 7: Rekonstruktion der Turmspitze aus photogrammetrischen Bildpunktmessungen (links); Darstellung als Drahtmodell (2.v.l.), als schattiertes Modell in AutoCAD und als gerendertes Modell in Highlight Pro (rechts)

## 5.5. Visualisierung

Für die Visualisierung des Westerturms wurde die umgebende Topographie (Strassen, Wege, Pflasterübergänge, Schilder, Laternen, Abfalleimer und Wasserlauf) und die angrenzenden Gebäude (generalisiert) durch eine tachymetrische Aufnahme mit dem Leica TCRP 1105+ aufgenommen. Ergänzt wurden diese Aufnahmen durch ein detailliertes Handaufmass von einigen Objekten wie Laternen und Schildern.

Die Visualisierung beider Objekte erfolgte mit verschiedenen Programmen: AutoCAD, AECViz von TORNADO Technologies Inc., Kanada, 3D Studio VIZ und Highlight Pro. In AutoCAD wurde das 3D-Volumenmodell mit entsprechenden Texturen für die jeweiligen Objektteile gerendert, um so eine Qualitätskontrolle der modellierten Daten zu erhalten und um daraus perspektivische Ansichten im BMP-Format zu erstellen. Eine interaktive Animation wurde jeweils mit AECViz erstellt, in dem das gesamte DWG-File (Kirche: 12 MB, Turm: 132 MB) in ein 3 bzw. 5 MB großes ausführbares Programm (EXE-File) umgewandelt wurde, das der Betrachter interaktiv aus allen Perspektiven anschauen und auch begehen kann. In Highlight Pro wurde jeweils eine Videosequenz mit einer Länge von 53 (Kirche) und 161 Sekunden (Turm) in einer Auflösung von 640 x 480 Pixel als kodierte MPEG-File (30 bzw. 57 MB) erstellt (siehe Abb. 8), während mit 3D Studio ein virtueller Rundgang durch und im Westerturm als Film (3:31 min, AVI, 727 MB) erstellt wurde. Die Visualisierungen des Westerturmensembles stehen dem Interessierten an einem Computer-Terminal in dem Turmcafe zur Verfügung.



Abb. 8 : Visualisierungen der Kirche Raduhn (links) und des Westerturmensembles (rechts) mit Highlight Pro

## 6 Zeit- und Kostenmanagement

Der Arbeitsaufwand für die gesamte Projektbearbeitung Westerturmensemble betrug 623 Arbeitsstunden, der je nach Tätigkeit mit entsprechenden aktuellen Stundenansätzen für Messgehilfe, Techniker und Ingenieur theoretische Gesamtkosten von ca. € 35000 für das Projekt verursachte. In Abb. 9 ist der prozentuale Arbeitsaufwand der einzelnen Arbeitsschritte dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass 52% der gesamten Arbeitszeit mit CAD-Bearbeitung und Visualisierung aufgewendet wurden. In der Zeit für Visualisierung sind nur die Arbeiten mit AutoCAD und AECViz enthalten, da die Videosequenzen später erstellt wurden.

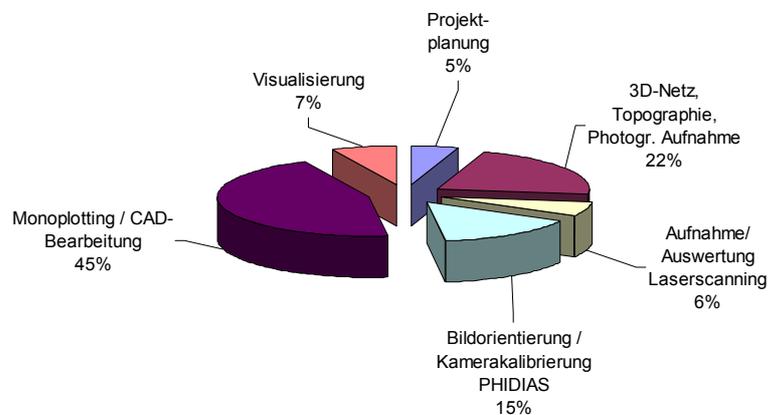


Abb. 9 : Prozentualer Arbeitsaufwand im Projekt Duderstädter Westerturmensemble

Im Projekt Kirche Raduhn wurden folgende Arbeitsstunden benötigt: Laserscanning 161 h (Objektaufnahme 6 h, 3Dipsos 91 h, AutoCAD 63 h) und Photogrammetrie 251 h (Objektaufnahme 2 h, PhotoModeler 144 h, AutoCAD 105 h). Daraus ergeben sich ohne die erforderliche 3D-Netzmessung und Passpunktbestimmung folgende Projektkosten: € 7000 (Laserscanning) und € 10000 (Photogrammetrie). Die höheren Kosten bei der Photogrammetrie sind durch den höheren Detaillierungsgrad zu begründen. Optimierungspotenzial für solche Projekte liegen bei der Objektaufnahme in der Anzahl der verwendeten Passpunkte, in der geodätischen Passpunktbestimmung, in der Reduktion des Laserscanningaufwandes auf wichtige Objektteile, bei der CAD-Bearbeitung durch zunehmende Erfahrung und durch Weglassen von Details.

## 7 Fazit und Ausblick

Die Kirche Raduhn und das Duderstädter Westerturmensemble wurden durch digitale Architekturphotogrammetrie und terrestrisches Laserscanning erfolgreich als virtuelles 3D-Volumenmodell rekonstruiert. Die eingesetzten Technologien (Instrumente und Software) ermöglichten eine detaillierte und exakte Rekonstruktion der Objekte mit einer Genauigkeit von 1-2 cm. Die kombinierte Auswertung der photogrammetrischen und der Laserscanning-Daten mit PHIDIAS erwies sich als sehr effizient, da eine direkte CAD-Anbindung für die weitere Modellierung vorhanden war. In dem Projekt Kirche Raduhn konnte durch die photogrammetrische Auswertung der Bilder ein detaillierteres Modell als aus den Punktwolken erstellt werden, doch der Arbeitsaufwand war dafür deutlich höher. Mit einer höheren Auflösung beim Laserscanning könnte auch aus den Punktwolken ein detailliertes Modell generiert werden, jedoch auf Kosten eines höheren Zeitaufwandes bei der Datenerfassung und bei der Auswertung. Für Anwendungen in der Architektur (z.B. Bauwerkserfassung) lohnt es sich, den Laserscanner bei einer steingerechten Auswertung oder bei der Erfassung von Objektdetails wie Skulpturen und Ornamente in Kombination mit der Photogrammetrie einzusetzen, wenn man die Objekte mit einer sehr hohen Punktdichte erfassen kann. Diese Objektdetails kann man dann über einfache Schnitte im CAD leicht modellieren. Dennoch bleiben auch in Zukunft eine manuelle Punktmessung und CAD-Bearbeitung ein erheblicher Kostenfaktor für solch detaillierte 3D-Modelle. Die kombinierte Erfassung und Auswertung setzt außerdem hohe Investitionskosten für das Laserscanning-System (ca. € 120000) voraus. Dagegen ist ein Photogrammetrie-System (Kamera und PC/Software) mit ca. € 7000 ein Low-Cost-System.

## 8 Literaturverzeichnis

- BECKER, R., SCHWERMANN, R. (2005). Bestandserfassung durch kombinierte Auswertung von Laserscanner- und Bilddaten. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 134-141.
- BIEBERMANN, M., SCHNEIDER, M. (2005). 3D-Erfassung und Modellierung des Duderstädter Westerturmensembles durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und terrestrischem Laserscanning. Unveröffentlichte Diplomarbeit, HafenCity Universität Hamburg, Juni.
- HOFFMANN, R. (2005). Vergleichende Untersuchung bei der 3D-Erfassung und Modellierung der Kirche von Raduhn durch digitale Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning. Unveröffentlichte Diplomarbeit, HafenCity Universität Hamburg, Juni.
- HÖNNIGER, C., KERSTEN, TH. (2005). Topographische Aufnahme der sächsischen Ringwallanlage Willenscharen mit dem 3D-Laserscanning-System Mensi GS100. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 224-231.
- KERSTEN, TH., ACEVEDO PARDO, C. (2002). 3-D Objektaufnahme von historischen Gebäuden durch digitale Architekturphotogrammetrie für Visualisierungsaufgaben und für Facility Management. Photogrammetrie und Laserscanning, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 42-56.
- KERSTEN, TH., EILMUS, B., LINDSTAEDT, M., ACEVEDO PARDO, C. (2003). 3D-Erfassung und Visualisierung des Celler Schlosses durch digitale Architekturphotogrammetrie. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 213-222.
- MENSI (2004). GS 100 3D laser scanner. <http://www.mensi.com/website2002/gs100.asp>