

# DAS DIGITALE MODELL ZWISCHEN VISUELLER UND TATSÄCHLICHER QUALITÄT ÜBERLEGUNGEN ZUR PHOTOGRAMMETRIE ALS WERKZEUG IN DER ARCHITEKTURFORSCHUNG

JÜRGEN GIESE

Forschungen zu materiellem Kulturgut wie etwa Architektur, Skulptur, Malerei oder auch Erzeugnissen des Kunsthandwerks können heutzutage zahlreiche Techniken der dreidimensionalen, überwiegend automatisierten und rein digitalen Objekterfassung nutzen. Diese Verfahren erlauben es, vermittelt Bildverbänden, dreidimensionalen Punktwolken (Abb. 1), Orthophotos (Abb. 2) und Oberflächennetzen Modelle zu generieren, die einen so hohen Informationsgehalt besitzen können, dass sie oft auch als digitale Zwillinge der realen Objekte bezeichnet werden.<sup>1</sup> Hier soll dieser Begriff allerdings nicht verwendet werden, denn selbst die detailliertesten Erfassungen bleiben Modellierungen, die nicht alle Eigenschaften des Originals beinhalten.

Gleichwohl stellen digitale Modelle realer Objekte ein mächtiges Forschungswerkzeug dar, denn sie enthalten nicht nur genau die Informationen, für deren Ermittlung sie angefertigt wurden, sondern sie liefern weitaus mehr. Das „reiche“ digitale Modell kann – im Gegensatz zu stark selektiven Erfassungen etwa durch Beschreibungen, Photos und Zeichnungen – stets aufs Neue befragt werden und liefert Antworten auch auf solche Fragen, die zum Zeitpunkt seiner Erstellung noch nicht gestellt wurden. So verwundert es nicht, dass die Nutzung digitaler Modelle für Fragestellungen innerhalb der Kulturwissenschaften weit verbreitet ist.

Innerhalb des Faches Kunstgeschichte an der Universität Bamberg war der Jubilar der erste, der deren Möglichkeiten für seine Forschungen zur mittelalterlichen Architektur genutzt hat.<sup>2</sup> Diesem Schwerpunkt folgend liegt der Fokus dieses Beitrages auf der Erfassung von Architektur, auch wenn die diskutierten Verfahren keineswegs darauf beschränkt sind. Die gezeigten Beispiele sind überwiegend Forschungskampagnen des Jubilars entnommen, an denen der Autor teilzunehmen die Gelegenheit hatte.

1 Zur genauen Definition der verschiedenen Aufmaßprodukte s. Jürgen Giese, Im Dschungel der Aufmaßprodukte. Ergebnisformen der Bauvermessung gezielt auswählen, ausschreiben und nutzen, in: *Bauforschung in der Denkmalpflege. Qualitätsstandards und Wissensdistribution*, hrsg. v. Stefan Breitling und Jürgen Giese, Bamberg 2018, S. 143–161.

2 Stephan Albrecht und Stefan Breitling, Die Querhausportale der Kathedrale in Paris. Architektur und Skulptur, in: *Die Querhausportale der Kathedrale Notre-Dame in Paris*, hrsg. v. Stephan Albrecht, Stefan Breitling und Rainer Drewello, Petersberg 2021, S. 8–63.



Abb. 1: Mantes,  
Kathedrale Notre-Dame,  
Auferstehungsportal. 3D-Punktwolke





Abb. 2: Mantes,  
Kathedrale Notre-Dame,  
Auferstehungsportal.  
Orthophoto mit  
Auflösung 1 mm / Pixel

0 5 m



Von den heute zur Verfügung stehenden Verfahren zur Herstellung digitaler Modelle besitzen insbesondere die unter dem Oberbegriff „Photogrammetrie“ versammelten Techniken ein enormes Potential gerade für die Kulturwissenschaften. Dies liegt an zwei Stärken: Die photogrammetrischen Verfahren können Ergebnisse von hoher Zuverlässigkeit und Detaillierung liefern – und gleichzeitig sind sie heutzutage mit so geringem apparativen Aufwand und so unkompliziert einzusetzen, wie es vor 15 Jahren noch undenkbar war.

Ein Blick in die Geschichte der Photogrammetrie soll helfen, den heute erreichten Stand einzuordnen: Die Nutzung von Photographien zur Gewinnung geometrischer Daten dreidimensionaler Objekte ist so alt wie die Photographie selbst und innerhalb der geodätischen Wissenschaften seit langem etabliert. Der Einsatz für die Architekturdokumentation war von Beginn an integraler Bestandteil des Faches, denn einer der Pioniere der Photogrammetrie, Albrecht Meydenbauer, nutzte die von ihm ab 1867 maßgeblich mit entwickelten Verfahren bereits überwiegend zur Erfassung von Architektur.<sup>3</sup>

Unter den verschiedenen photogrammetrischen Verfahren war das der Stereophotogrammetrie noch bis vor wenigen Jahren das am universellsten einsetzbare Werkzeug.<sup>4</sup> Bei diesem Verfahren werden jeweils Bildpaare von dem Aufnahmeobjekt angefertigt und anschließend in speziellen Auswertegeräten dafür verwendet, eine stereoskopische, d. h. räumliche Betrachtung der Bildpaare zu ermöglichen. Der Auswerter bewegt eine Messmarke durch den virtuellen 3D-Raum und fährt damit die auszuwertenden Strukturen nach, so dass im Ergebnis eine Strichzeichnung vorliegt. Voraussetzung dafür ist zum einen, dass Position und Ausrichtung beider Bilder zueinander und in Relation zum Objekt bekannt sind, man spricht von der sog. äußeren Orientierung der Messbilder. Die Herstellung der äußeren Orientierung erfolgt anhand von wenigen, in jeweils beiden Bildern klar definierten Punkten, von denen einige wiederum über bekannte Koordinaten im Objektraum verfügen müssen. Zusätzlich muss für jede verwendete Kamera deren innere Orientierung bekannt sein, die mit Hilfe einer aufwendigen Kalibrierung vorab zu bestimmen ist. Mit Hilfe der Stereophotogrammetrie können amorphe Strukturen genauso vermessen werden wie durch klare Konturen gekennzeichnete Objekte. Sie ist damit selbst für komplizierte Architekturen gut einsetzbar, in denen architektonische neben skulpturalen Formen auftreten.

Das Verfahren erfordert allerdings einen hohen apparativen Aufwand und für jeden Projektschritt einschließlich der Auswertung gut eingearbeitete, in der Regel als Geodäten ausgebildete Spezialisten. Der erfolgreiche Einsatz etwa in der Architekturforschung ist stets auf eine enge Zusammenarbeit zwischen dem wissenschaftlichen Nutzer der Auswertung und dem vor allem technisch ausgebildeten Hersteller der Auswertung angewiesen, um zeichnerische Fehlinterpretationen zu vermeiden. Wissenschaftlich hochwertige stereophotogrammetrische Auswertungen entstehen daher überwiegend dort, wo Ingenieure und Kulturwissenschaftler eng kooperieren.<sup>5</sup>

3 Albrecht Grimm, Albrecht Meydenbauer. Bauingenieur – Fotograf – Photogrammeter, in: *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation* 89 (2021), S. 371–389.

4 Einführend beispielsweise Albert Wiedemann, *Handbuch Bauwerksvermessung. Geodäsie, Photogrammetrie, Laserscanning*, Basel 2004, S. 179 und S. 225–234.

5 Für eine erfolgreiche Zusammenarbeit s. beispielsweise Wulf Schirmer, *Castel del Monte*, Mainz 2000. Zu den inhaltlichen Schwächen vieler photogrammetrischer Auswertungen s. Manfred Schuller, *Building Archaeology (Monuments and Sites 7)*, München 2002, S. 15–20.



Abb. 3: Bamberg, Dom St. Peter und St. Georg, Südwand des Mittelschiffes, Kapitellzone Joch 2. Oben: Entzerrtes Bild, nur die Wandfläche ist messtechnisch auswertbar. Unten: Orthophoto. Alle dargestellten Oberflächen sind auswertbar.

Eine erste Möglichkeit, den apparativen und personellen Aufwand zu verringern, erlaubte die Entwicklung der Mehrbildphotogrammetrie seit den späten 1980er Jahren.<sup>6</sup> Dieses Verfahren ist nicht mehr auf die Herstellung von Stereobildpaaren angewiesen, sondern generiert aus einer Vielzahl von Bildern einen im Objektraum orientierten Bildverband. Das Verfahren ermöglichte erstmals die Nutzung von Kameras, die preiswerter und universeller einsetzbar waren als die für die Stereophotogrammetrie benötigten Modelle. Auch die Arbeit vor Ort benötigte weniger Expertise, und für die Auswertung schließlich wurden keine speziellen Auswertegeräte benötigt, sondern handelsübliche Computer. Dadurch war das Verfahren zum einen kostengünstig, und zum anderen konnten erstmals alle Projektschritte in die Hände des wissenschaftlichen Nutzers gelegt werden. Ein großer Nachteil des Verfahrens liegt allerdings in der lediglich monoskopischen Messung, die zwar die Auswertung eindeutig definierter Punkte ermöglicht, nicht aber die Auswertung amorpher Strukturen wie etwa Bauskulptur. An der Universität Bamberg wurde das Verfahren seit 1988 für die Vermessung des Regensburger Domes durch die Professur für Bau- und Baugeschichte eingesetzt. Es war das erste an dieser Universität etablierte photogrammetrische Verfahren überhaupt.<sup>7</sup> Noch einfacher zu verwenden als die Mehrbildphotogrammetrie ist die Einbildentzerrung.<sup>8</sup> Bei diesem Verfahren wird die jeder Photographie zugrundeliegende zentralprojektive Abbildung in eine orthogonale Projektion umgebildet. Die orthogonale Projektion ist jedoch nur für eine oder mehrere vom Nutzer definierte Objektebenen geometrisch korrekt. Objektteile, die aus den definierten Ebenen herausragen oder gegenüber diesen zurückspringen, werden nicht orthogonal korrekt abgebildet und entziehen sich damit einer messtechnischen Auswertung (Abb. 3 oben). Das Verfahren ist für Objekte, die sich in Ebenen zerlegen lassen, gut geeignet, nicht jedoch für amorphe oder mit Bauornamentik versehene Objekte. Die Vorteile dieses Verfahrens sind, dass jede handelsübliche Kamera verwendet werden kann, dass die Technik nach kurzer Einarbeitung beherrschbar ist und dass das Endprodukt ein weitestgehend automatisch erzeugtes und heutzutage auf jedem mobilen Computer in Echtzeit erstellbares, entzerrtes Messbild ist. Gegenüber den Strichzeichnungen, die in den beiden anderen Verfahren das Endprodukt darstellen,

enthält das Messbild eine Fülle zusätzlicher Informationen, die zudem nicht durch die interpretierende Brille eines Auswerters gefiltert sind. Diese Vorteile wiegen gegenüber den Nachteilen so schwer, dass das Verfahren gerade für Fassaden, Böden, Wände und Decken, aber auch archäologische Profile und Plana in großem Umfang eingesetzt wurde und teilweise heute noch wird. Die digitale Einbildentzerrung wurde ab 2001 durch den Autor an der Universität Bamberg eingeführt und löste die Mehrbildphotogrammetrie ab.

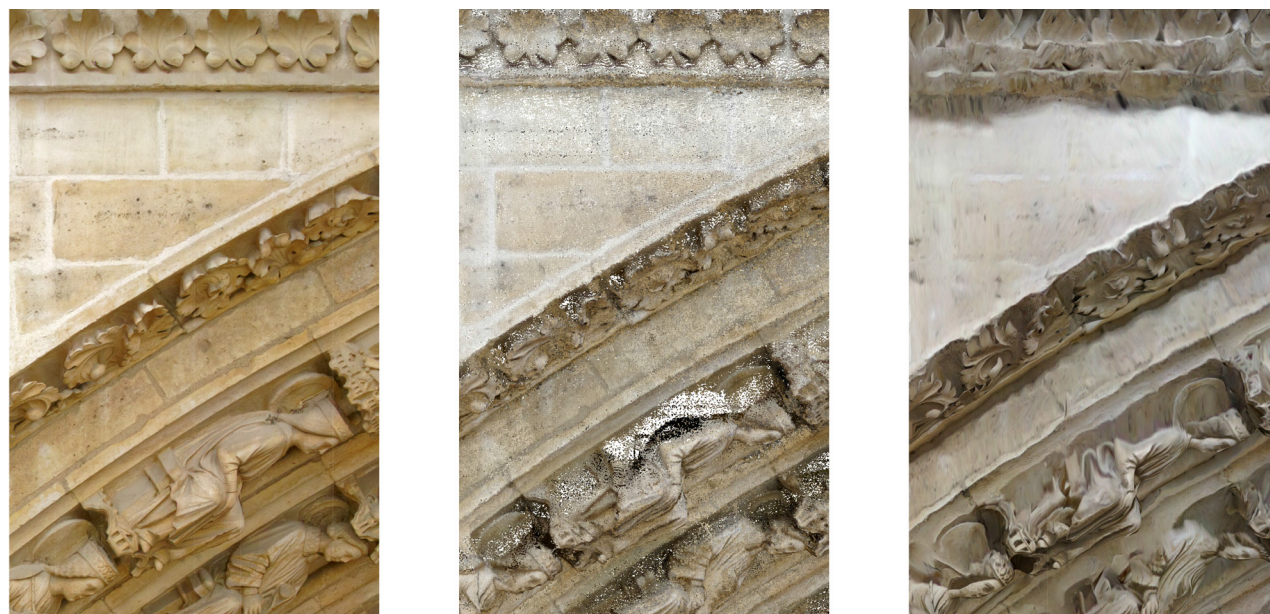
Das jüngste Kind der photogrammetrischen Familie und zugleich Schwerpunkt in diesem Beitrag ist das „Structure from Motion“ oder kurz „SfM“ genannte Verfahren. Grundlage dieses Verfahrens sind Algorithmen zur vollautomatischen Extraktion von Texturmerkmalen aus Bildern. In Kombination mit statistischen Testverfahren werden dadurch in verschiedenen Bildern abgebildete Objektpunkte als identisch erkannt, obwohl sie in den analysierten Bildern bezogen auf Position, Beleuchtung, Farbe, Größe und Winkel unterschiedlich abgebildet sind. Durch das automatisierte Verfahren wird eine so große Zahl homologer Punkte pro Bild bestimmt, dass sowohl die äußere als auch die innere Orientierung aller Bilder eines Bildverbandes mit hoher Genauigkeit berechnet werden kann. Anschließend gestatten es die Techniken der Computer Vision ferner, aus sämtlichen in den Bildern vorhandenen Bildpunkten eine 3D-Punktwolke hoher Dichte zu erzeugen (Abb. 1, Abb. 4 Mitte), wobei dieselben Gesetze angewendet werden, die auch schon grundlegend für die Stereo- und Mehrbildphotogrammetrie waren. Die Punktwolken wiederum können durch weitere Rechenschritte der Herstellung von Orthophotos (Abb. 2, Abb. 4 links) oder texturierten 3D-Modellen dienen. Die Verknüpfung der Modelle mit der Wirklichkeit geschieht – wie immer in der Photogrammetrie – über vor Ort einzumessende Passpunkte.

6 Einführend beispielsweise Wiedemann 2004, wie Anm. 4, S. 180 und S. 234–239.

7 Manfred Schuller, Vermessung und Bauaufnahme, in: Der Dom zu Regensburg 3, hrsg. v. Achim Hubel und Manfred Schuller, Regensburg 2016, S. 637.

8 Vgl. Wiedemann 2004, wie Anm. 4, S. 178 und S. 206–224.

Abb. 4: Paris, Kathedrale Notre-Dame, Weltgerichtsportal. Auswirkungen der Kamerapositionen auf die Zuverlässigkeit des 3D-Modells am Beispiel eines 14 m über Grund liegenden Portalausschnittes. Links: Orthophoto mit 1 mm Auflösung pro Pixel unter Nutzung planparallel aufgenommener Photos. Mitte: 3D-Punktwolke nur unter Nutzung von bodennah aufgenommenen Photos. Rechts: dieselbe Datengrundlage wie Mitte, jedoch als Orthophoto berechnet.



Die wesentlichen Vorteile des Verfahrens, das der Verfasser 2014 an der Universität Bamberg eingeführt hat, gegenüber allen anderen photogrammetrischen Techniken sind:

- Objekte sehr variabler Größenordnung und beliebiger Struktur lassen sich mit einem gleich bleibenden Verfahren und prinzipiell auch gleich bleibender Ausrüstung erfassen. Grenzen sind dem Verfahren lediglich bei sehr glatten oder spiegelnden Oberflächen gesetzt.
- benötigt werden nur handelsübliche Kameras, Objektive und Computer
- die für kulturwissenschaftliche Forschungen interessantesten Produkte, also 3D-Punktwolke (Abb. 1) und Orthophoto (Abb. 2)<sup>9</sup>, werden innerhalb eines einzigen Arbeitsprozesses und auf Basis gleich bleibender Daten erzeugt
- Genauigkeit und Auflösung lassen sich nahezu beliebig steuern, innerhalb eines Projektes frei variieren und werden nicht durch die vorhandene Geräteausrüstung vorgegeben

Ganz wesentlich zum Erfolg des Verfahrens und damit auch zu seiner weiten Verbreitung in den Kulturwissenschaften beigetragen haben kommerzielle Hersteller, die mittlerweile sehr leistungsfähige Auswertesoftware anbieten. Dem Nutzer wird dabei meist ein weitestgehend automatisierter Arbeitsprozess angeboten, mit dessen Hilfe fast ohne Vorkenntnisse und fachliche Expertise visuell ansprechende Ergebnisse zu erzielen sind. Damit steht erstmals in der Geschichte der Photogrammetrie ein Werkzeug zur Verfügung, das für nahezu alle Fälle innerhalb der Kulturwissenschaften einsetzbar und gleichzeitig so einfach zu handhaben ist, dass die personelle Einheit von Hersteller und wissenschaftlichem Nutzer der generierten Modelle problemlos zu erreichen ist.

Allerdings ist damit ein Paradigmenwechsel vollzogen, dessen Konsequenzen gravierend sind: Der hohe Grad der Automatisierung der SfM-Software wird mit der Beschränkung erkauft, dass deren interne Abläufe für den Laien undurchschaubar sind. Doch genau dieser Laie trägt zugleich die Verantwortung für die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der in der „black box“ generierten Modelle. Während bei den älteren photogrammetrischen Verfahren diese Verantwortung noch in der Hand des technischen Spezialisten lag, ist sie nun in die Hände des wissenschaftlichen Nutzers übergegangen, der zugleich ein ureigenes Interesse daran hat, die Qualitäten wie auch die Limitierungen der von ihm erstellten Modelle genau zu kennen. Die Nutzung digitaler Modelle für den wissenschaftlichen Erkenntnisprozess verlagert große Teile objektorientierter Untersuchungen in den virtuellen Raum, die Zuverlässigkeit der darin gewonnenen Forschungsergebnisse wird unmittelbar abhängig von der Zuverlässigkeit der darin befindlichen Modelle. Doch wie lässt sich deren Zuverlässigkeit bestimmen? Welche Qualitäts- und Validierungskriterien für SfM-Modelle können formuliert werden, die in der praktischen Arbeit leicht nachvollziehbar und zugleich dafür verwendbar sind, einen mit SfM-Modellen erzielten wissenschaftlichen Erkenntnisprozess transparent nachzuweisen? Einige Vorschläge dafür sollen im Folgenden gemacht werden.

Für jeden Unerfahrenen steht am Beginn des ersten SfM-Projektes die Aneignung fachlicher Expertise. Aufgrund der noch jungen und dynamischen Entwicklung des Verfahrens existiert momentan jedoch noch kein systematisches Handbuch, das alle im Bereich der Kulturwissenschaften sowohl für Datenerfassung als auch -auswertung denkbaren und notwendigen Arbeitsschritte verständlich und zugleich in ausreichender Tiefe erläutern würde. Eine praxisnah und wissenschaftlich zugleich geschriebene Einführung hat Historic England herausgegeben,<sup>10</sup> konkrete Arbeitsweisen gerade für den Auswerteprozess werden dagegen fast ausschließlich in Online-Medien dargestellt. Gute Tutorials hat beispielsweise das „Bonn Center for Digital Humanities“ aufgezeichnet, noch weiter in die Tiefe geht Toby Dogwiler von der Missouri State University.<sup>11</sup>

Der wichtigste Grundsatz für die Arbeit mit dem SfM-Verfahren ist, dass sorgfältige Arbeit vor Ort gepaart mit geeigneter Auswertung fast immer zu sehr guten Ergebnissen führt, umgekehrt aber selbst die sorgfältigste Auswertung aus minderwertigen Eingangsdaten keine hervorragenden Ergebnisse zaubern kann.<sup>12</sup> Wichtig für die Arbeit vor Ort ist zunächst, dass die für das Verfahren notwendigen Photostandorte eingenommen werden können. Die Bewegung der Kamera sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung und ihre ungefähr planparallele Position zu allen zu modellierenden Objektoberflächen ist unumgänglich. Je genauer die durch die Bewegung der Kamera abgedeckten Flächen in ihrer Ausdehnung den Objektoberflächen entsprechen, desto zuverlässiger werden die Ergebnisse. Die durch die Kamerastandorte beeinflusste Zuverlässigkeit lässt sich oft bereits rein optisch erkennen. Zur Verdeutlichung dieses Effektes wurde in Abb. 4 ein Ausschnitt des Weltgerichtsportals der Kathedrale Notre-Dame in Paris zunächst mit Hilfe aller vor Ort angefertigten Aufnahmen (Abb. 4 links) und ein zweites Mal – um des Experimentes willen – nur unter Nutzung der ausschließlich aus tiefer Position hergestellten Aufnahmen berechnet (Abb. 4 mitte und rechts). Das zweite Beispiel zeigt, wie mit zunehmender Höhe die Bildinformation immer geringer und damit unzuverlässiger wird und im besten Falle zu einem lückenhaften (Abb. 4 mitte) und im schlechten Fall zu einem fehlerhaften Modell (Abb. 4 rechts) führt.

<sup>9</sup> Vgl. Giese 2018, wie Anm. 1.

<sup>10</sup> Photogrammetric Applications for Cultural Heritage, hrsg. v. Historic England, Swindon 2017. Die Handreichungen von Historic England werden in regelmäßigen Abständen aktualisiert und neu aufgelegt. Für grundlegende, aber weniger praxisorientierte Darstellungen s. Günter Pomaska, Bildbasierte 3D-Modellierung. Vom digitalen Bild bis zum 3D-Druck, Berlin 2016, S. 123–161; Thomas Luhmann, Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen – Methoden – Beispiele, 4. Auflage Berlin 2018, S. 539–540.

<sup>11</sup> [www.youtube.com](http://www.youtube.com) s. v. Playlist unter dem Titel „Einführung in 3D“ und Playlist „Lightning GIS“. Ebenda existieren noch zahlreiche weitere Anleitungen, die jedoch nach den Erfahrungen des Verf. weniger in die Tiefe gehen als die beiden genannten, obwohl sie punktuell durchaus hilfreiche Hinweise liefern.

<sup>12</sup> Historic England 2017, wie Anm. 10, S. 19.



Um bei Fassaden die vertikale Bewegung zu ermöglichen, wird oft nach einer Drohnenbefliegung gerufen, doch für Erfassungen bis ca. 20 m Höhe leisten auch handgeführte oder durch ein Dreibein stabilisierte Einbein-Stativ sehr gute Dienste (Abb. 5 und 6).<sup>13</sup> Im Gegensatz zu Drohnen können sie von jedermann nach einer kurzen Einweisung bedient, stets mit einer hochwertigen Kamera bestückt und selbst in beengten räumlichen Verhältnissen – auch in Innenräumen – gefahrlos eingesetzt werden.

Weiterhin entscheidend für alle Verfahren der Photogrammetrie ist, dass die Grundregeln der Photographie beachtet werden.<sup>14</sup> Nur aus solchen Bildern lassen sich gute Ergebnisse berechnen, die die Objekte gleichmäßig scharf und ausgeleuchtet wiedergeben. Als optimale Beleuchtung dient diffuses Licht, das im Außenraum durch die Wahl der passenden Wetterlage erzielt wird. Dieselben Bedingungen im Innenraum zu erzeugen, kann aber Probleme bereiten, wo eventuell sogar direktes, durch Fenster einfallendes Gegenlicht zu kompensieren ist. Leistungsstarke, per Funk ausgelöste Blitzanlagen können hier die meisten Probleme besser lösen als Dauerlicht. Besonders gleichmäßiges und von allen Seiten auftreffendes Licht liefert in Innenräumen das indirekte Blitzen, bei dem Oberflächen als Reflektoren benutzt werden, die dem zu erfassenden Objekt gegenüberliegen (Abb. 7). Geeignetes Licht lässt sich aber auch mit Diffusor-Schirmen erzeugen, die auf die Blitzköpfe gesetzt werden (Abb. 8). Für die professionelle Farberfassung und eine differenzierte Belichtungssteuerung ist ferner der Weißabgleich mittels Graukarte und das Abspeichern und Entwickeln der Bilddaten im Rohformat sehr hilfreich.

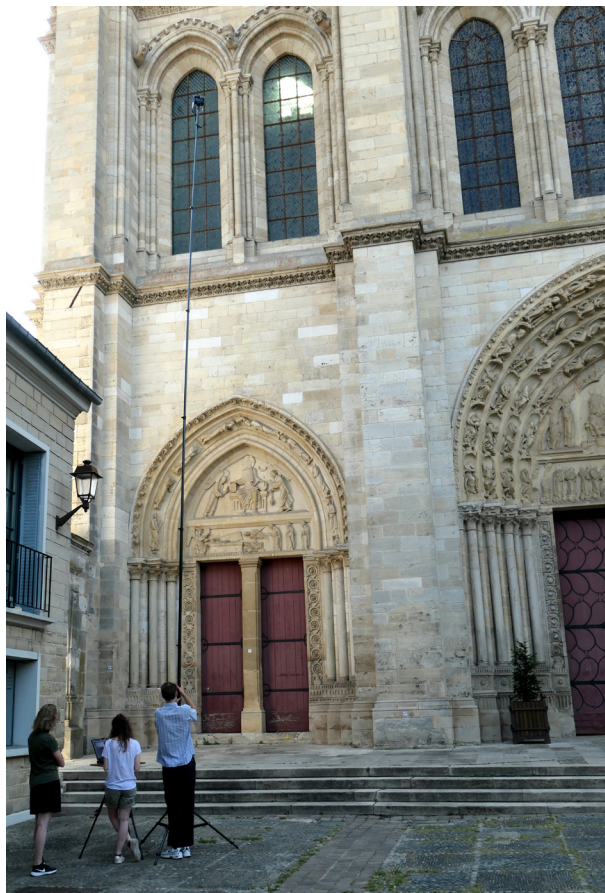


Abb. 5: Mantes, Kathedrale Notre-Dame. Einsatz eines stationären Hochstatives bis 14 m Auszugshöhe



Abb. 6: Bamberg, Obere Karolinenstr. 6. Einsatz eines handgeführten Hochstatives bis 8 m Auszugshöhe

Bevor die Aufnahmen vor Ort beginnen, ist die Frage der Genauigkeiten zu klären, mit denen das zu erfassende Objekt modelliert werden soll. Zu unterscheiden ist dabei einerseits die Auflösung, d. h. der Detailreichtum der Erfassung und andererseits die Genauigkeit, mit der das Modell skaliert und ausgerichtet werden soll. Beides sind entscheidende Kriterien für die Nutzbarkeit von SfM-Modellen.

<sup>13</sup> Weniger geeignet sind Hubsteiger, wenn deren Bauart eine exakte vertikale oder horizontale Bewegung erschwert.

<sup>14</sup> Insgesamt zu den photographischen Regeln im SfM-Verfahren s. Pomaska 2016, wie Anm. 10, S. 165; Historic England 2017, wie Anm. 10, S. 19–26.



Welche Auflösung für die jeweilige Anwendung benötigt wird, kann mit unterschiedlichen Ansätzen ermittelt werden. Ein sinnvoller Ansatz ist es, die Größe des kleinsten Objektelementes zu definieren, das im Modell noch sicher identifiziert werden soll. Die Auflösung erhält man dann, indem diese Größe mindestens durch drei geteilt wird. Sollen beispielsweise Natursteinfugen von 3 bis 5 mm Breite noch eindeutig erkennbar sein, sollte eine Auflösung von ca. 1 mm angestrebt werden. Haarrisse von 1 mm Breite kann man dagegen erst ab einer Auflösung von ca. 0,3 mm / Pixel zuverlässig identifizieren.<sup>15</sup> Ein zweiter Ansatz ist es, den Zielmaßstab beispielsweise für ein Orthophoto oder eine aus dem SfM-Modell durch Auswertung gewonnene Strichzeichnung festzulegen: In einem Zielmaßstab von beispielsweise 1:20 / 1:25 sind zwei Objektkanten mit 5 mm Abstand mit Mühe bereits differenzierbar – also auch darstellbar. Um diese Kanten im Modell noch sicher als getrennt wahrzunehmen, müssen beiden Kanten und der Zwischenraum jeweils durch mindestens 1 Pixel, besser etwas mehr, repräsentiert sein. Wiederum ergibt sich eine notwendige Auflösung von ca. 1 mm pro Pixel. Bei einem kleineren Zielmaßstab wie etwa 1:50, in dem getrennte Kanten erst ab ca. 1 cm Abstand darstellbar sind, verringert sich die Auflösung entsprechend auf ca. 2 mm / Pixel. Nach Festlegung der Auflösung ergibt sich in Kombination mit dem in der Kamera verbauten Sensor die maximal auf einem Photo abzubildende Objektfläche. Der Aufnahmeabstand wird dann am einfachsten empirisch so bestimmt, dass diese Fläche in keinem Bild überschritten wird.

Ist die maximal zulässige Objektfläche pro Bild definiert, ergibt sich dadurch auch der durchschnittliche horizontale und vertikale Abstand zwischen zwei benachbarten Photos. Üblicherweise werden als Überlappung zwischen zwei Photos im SfM-Verfahren 60-80% empfohlen, in der Praxis lassen sich 75% besonders leicht einhalten, denn dann beträgt beispielsweise die horizontale Schrittweite zwischen zwei Photos ein Viertel der in der Horizontalen abgebildeten Objektstrecke.

Es ist zu betonen, dass diese Überlegungen lediglich Näherungswerte liefern, die aber vor Ort hilfreich sind, um die optimale Zahl von Photos zu ermitteln: Denn zu wenige oder aus zu weitem Abstand aufgenommene Photos liefern u. U. wissenschaftlich unbrauchbare Ergebnisse; und zu viele zu eng gesetzte Photos können auch moderne Computer an ihre Leistungsgrenzen bringen, so dass im Ernstfall überhaupt kein Ergebnis erzielt wird.<sup>16</sup>

<sup>15</sup> Giese 2018, wie Anm. 1, S. 146 f. Ähnlich auch Luhmann 2018, wie Anm. 10, S. 616, der eine Repräsentation durch drei Pixel jedoch nur als Untergrenze für das sichere visuelle Erkennen eines Objektes angibt.

<sup>16</sup> Weitere Hinweise für die Anordnung der Photos liefert besonders das Handbuch zur Software „ContextCapture“ ([https://communities.bentley.com/products/3d/imaging\\_and\\_point\\_cloud\\_software/m/mediagallery/271352](https://communities.bentley.com/products/3d/imaging_and_point_cloud_software/m/mediagallery/271352) [02.08.2022]).



Abb. 7: Freiberg, Dom St. Marien, Goldene Pforte. Ausleuchtung innerhalb des Schutzbaus durch vier Blitzanlagen. Als Reflektionsflächen für eine diffuse Lichtverteilung dienen Boden und Decke



Gerade bei SfM-gestützten Objekterfassungen mit möglichst geringem Geräteaufwand stellt die Einmessung der Passpunkte oftmals die größte Hürde dar. Für Objekte geringer Ausdehnung nutzt man dafür am besten Maßstäbe, die Teil des SfM-Modells werden. Diese Maßstäbe sollten sowohl mindestens eine Ebene aufspannen als auch nicht kleiner als das zu erfassende Objekt sein. Als Beispiel wird hier die Erfassung eines antiken Kapitellfragmentes aus dem kleinasiatischen Alexandria Troas gezeigt (Abb. 9). Damit ist der für alle Modellierungen geltende Grundsatz erfüllt, dass die Passpunkte das zu modellierende Objekt umfassen und nicht nur einen Teil davon abdecken. Für Passpunktmessungen an größeren Objekten wie etwa Fassaden verwendet man üblicherweise einen Tachymeter mit reflektorloser Distanzmessung. Stehen ein solches Gerät oder die für seine Bedienung unumgänglichen Fachkenntnisse nicht zur Verfügung, kann man sich auch mit Maßband, Nivelliergliedermaßstab und Kreuzlinienlaser behelfen. Dieser Lasertyp projiziert drei rechtwinklig zueinander stehende Ebenen in den Raum, anhand derer durch reine Streckenmessungen mit Maßband oder Gliedermaßstab dreidimensionale Koordinaten ermittelt werden können.<sup>17</sup>

In keinem Fall sollte aufgrund gerätetechnischer Schwierigkeiten darauf verzichtet werden, auch möglichst hoch liegende Passpunkte innerhalb des zu modellierenden Objektbereiches einzumessen. Ohne derartige Punkte lässt sich beispielsweise die Ausrichtung einer Fassade bezüglich der Vertikalen nicht zuverlässig bestimmen. Für reine Bodenaufnahmen, z. B. die eines Mosaikbodens, ist auch die Einmessung der Passpunkte nur mit Maßband und einer langen Wasserwaage möglich. Die sinnvolle Verteilung der eingemessenen Passpunkte im Objektraum ist ein Qualitätsmerkmal von SfM-Modellen.

17 Zum Messprinzip s. annäherungsweise Tobias Busen, Miriam Knechtel, Clemens Knobling, Elke Nagel, Manfred Schuller und Birte Todt, Bauaufnahme, Münster 2015, S. 37. Durch das räumlich sichtbare Koordinatensystem ist das Messprinzip aber auch ohne Vorkenntnisse gut zu verstehen. Die zumeist rot emittierenden Laser sind vorwiegend im Innenraum einsetzbar, mittlerweile sind aber auch Geräte mit grünen Laserlinien verfügbar, die für das menschliche Auge auch im Außenraum gut erkennbar sind.



Abb. 8: Kloster Dayr Anba Hadra bei Assuan (Ägypten). SfM-Photographie im Innenraum mit zwei Blitzanlagen mit Diffusor-Schirmen für gleichmäßige Ausleuchtung





Abb. 9: Alexandria Troas (Westtürkei), Zwölfeckbau, Fragment eines korinthischen Kapitells. Maßstab und Ausrichtung des SfM-Modells werden durch drei auf einem Stahlwinkel fixierte Passpunkte definiert.

Für die Erzeugung der 3D-Punktwolken aus den Photos stellen die modernen Softwarepakete dem Anwender einen weitestgehend automatisierten Arbeitsablauf zur Verfügung. Es existieren meistens jedoch auch Werkzeuge zur Optimierung und Validierung der Ergebnisse, deren Nutzung dem Anwender allerdings nicht aufgedrängt wird. Ein wichtiges Werkzeug davon ist es, die von der Software vorgeschlagenen Punkte zur Verknüpfung der Bilder nach definierten Qualitätskriterien zu filtern und den Bildverband dadurch in einem iterativen Prozess zu optimieren. Zu diesem Optimierungsverfahren seien hier nur die Stichworte Rekonstruktionsunsicherheit, Projektionsgenauigkeit und Reprojektionsfehler genannt<sup>18</sup>. Ob diese innerhalb des Rechenprozesses überhaupt vom Anwender beachtet wurden und welche Werte hierfür bei der Bildorientierung erreicht wurden, ist ein direkter Indikator für die Qualität der später daraus berechneten 3D-Punktwolke. 3D-Punktwolken, die nicht nach dem automatisierten sondern nach einem durch den Anwender optimierten Verfahren berechnet wurden, zeigen in der Regel ein geringeres Rauschen und eine in den Details kantenschärfere Abbildung, die beispielsweise bei der Auswertung von Architekturprofilen größere Sicherheit gibt und das Übersehen feiner Details unwahrscheinlicher macht (Abb. 10).

Als letztes Qualitätskriterium seien hier die für jeden Passpunkt ermittelten Fehler genannt. Diese werden einerseits in Bildpixeln angegeben und sollten idealerweise für signalisierte, also durch Zielmarken präzise gekennzeichnete Passpunkte, deren Einmessung in den Bildern die Software automatisch vornimmt, im Subpixelbereich liegen. Bei natürlichen Passpunkten, die vor Ort notgedrungen weniger scharf definiert sind und auf den Bildern zudem händisch eingemessen werden müssen, muss man dagegen oft einen leicht über einem Pixel liegenden Fehler akzeptieren. Besonders augenfällig wird dieser Fehler nach Einführung der realen Koordinaten für die Passpunkte, die dem ganzen Modell seine Skalierung und Ausrichtung geben. Der Passpunktfehler wird dann in realen Maßeinheiten angegeben und überschreitet idealerweise in keinem Fall die Größe des kleinsten im beabsichtigten Zielmaßstab noch darstellbaren Objektes, also beispielsweise 5 mm im Maßstab 1:20 / 1:25.<sup>19</sup> Die Passpunktfehler stellen einen weiteren, besonders einfach nachvollziehbaren Indikator für die Zuverlässigkeit eines SfM-Modells dar.

<sup>18</sup> Für eine nähere Vorstellung der Optimierung s. die Hinweise von T. Dogwiler (s. o. Anm. 11).

<sup>19</sup> Bei der Beurteilung dieses Fehlers ist jedoch zu beachten, dass darin sowohl der Passpunktfehler innerhalb des Bildverbandes als auch die Genauigkeit der Einmessung vor Ort einfließen.





MIT DEM  
SfM-VERFAHREN WURDE  
DEN  
KULTURWISSENSCHAFTEN  
EIN ZWAR  
HOCHKOMPLEXES,  
ABER AUFGRUND VON  
AUTOMATISIERUNG  
OHNE GROSSE HÜRDEN  
EINSETZBARES  
DOKUMENTATIONSSYSTEM  
FÜR DREIDIMENSIONALE  
OBJEKTE  
AN DIE HAND GEGEBEN.

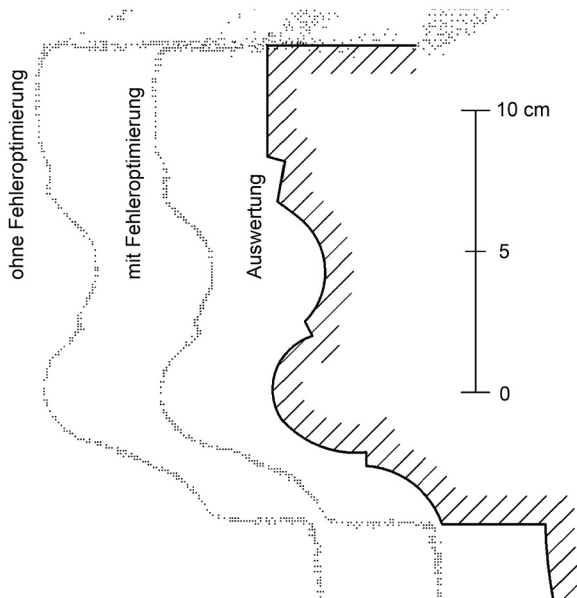


Abb. 10: Mantes, Kathedrale Notre-Dame, Auferstehungsportal, Kapitellzone. Vergleich der Kantenschärfe einer 3D-Punktwolke ohne und mit vorausgehender Fehleroptimierung in der SfM-Berechnung. Details des Kapitellprofils wären ohne Optimierung nicht korrekt ausgewertet oder sogar übersehen worden

Mit dem SfM-Verfahren wurde den Kulturwissenschaften ein zwar hochkomplexes, aber aufgrund der Automatisierung ohne große Hürden einsetzbares Dokumentationssystem für dreidimensionale Objekte an die Hand gegeben. Sofern die Zuverlässigkeit der damit durchgeführten Erfassungen sichergestellt und im Sinne der wissenschaftlichen Transparenz auch dokumentiert wird – einige Möglichkeiten dazu wurden hier aufgezeigt – kann das SfM-Verfahren praktisch alle Forschungsfelder der objektorientierten Kulturwissenschaften bereichern. Die in diesem Verfahren erreichte Kombination von minimalem Aufwand bei gleichzeitig hoher Qualität ist im Vergleich zu anderen dreidimensionalen Erfassungstechniken einzigartig. Forschungen am digitalen Modell lassen sich dadurch leicht realisieren und somit – auch unabhängig von aufwendigen Finanzierungen – auf eine breite Basis stellen. Und in den Fällen, wo ausreichend Forschungsgelder akquiriert wurden, müssen diese nicht zu einem großen Teil für die technische Erfassung aufgewendet werden, sondern können dort eingesetzt werden, wo sie wirklich gebraucht werden: Für die wissenschaftliche Auswertung und Interpretation der untersuchten Objekte.