

Digitale Entzerrung historischer Messbilder

MATTHIAS HEMMLEB, Berlin

Zusammenfassung: Die photogrammetrische Auswertung historischer Bilder bietet die Möglichkeit, maßstäbliche Informationen zerstörter oder veränderter Bauwerke zu gewinnen. Digitale Bildentzerrungen dienen dabei als Grundlage für die Planerstellung und ermöglichen den Vergleich historischer und aktueller Ansichten des Objekts. Eine Besonderheit bei der Entzerrung historischer Messbilder besteht darin, dass häufig keine oder nur unzulängliche Referenzinformationen vorhanden sind. Die Verbindung von Bildverarbeitungs-Algorithmen mit photogrammetrischen Methoden und Ansätzen der analytischen Geometrie des Raumes bietet verschiedene Lösungsmöglichkeiten des Problems. Wegen ihrer hohen geometrischen und fotografischen Qualität nehmen die Messbilder aus dem MEYDENBAUER-Archiv eine Sonderrolle bei der photogrammetrischen Auswertung historischer Bilder ein. Neben der Bereitstellung von Plänen und Maßangaben tragen entzerrte Messbilder auch zur dreidimensionalen Visualisierung zerstörter historischer Bausubstanz bei.

Summary: *Digital Rectification of Historical Metric Images.* Photogrammetric evaluation of historical images offers the possibility to obtain true-scale information about destroyed or changed buildings. Digitally rectified images serve as basis for map production and give the possibility to compare historical and present-day views of the object. A special feature concerning the rectification of historical metric images consists of having no or insufficient reference information. The combination of digital image processing algorithms, photogrammetric methods, and approaches of analytical spatial geometry offers various solutions of the problem. Because of their high geometric and photographic quality the metric images from the MEYDENBAUER Archive play a special role concerning the photogrammetric evaluation of historical images. Besides providing maps and measurements the rectified metric images can contribute to three-dimensional visualization of destroyed historical monuments.

1 Einleitung

Historische Bilder sind heute oftmals die einzigen Unterlagen von Gebäuden und Denkmälern, die im Laufe der Zeit zerstört oder verändert wurden. Photogrammetrische Methoden ermöglichen die Auswertung des vorhandenen Bildmaterials und die Erstellung von Plänen der Fassaden und des Grundrisses. Da in zahlreichen Fällen ebene oder einfach gekrümmte Fassaden oder Fassadenteile auszuwerten sind, bietet sich die digitale Entzerrung der vorhandenen Bilder an, welche dann als Grundlage für die Planerstellung dienen. Die erreichbare Genauigkeit ist von zahlreichen Faktoren abhängig, insbesondere aber von der foto-

grafischen Qualität der Bilder und dem Grad der verfügbaren Referenzinformationen.

Ist das Gebäude oder ein Teil davon noch vorhanden, so kann der Maßstabsbezug durch nachträglich gemessene Passpunkte hergestellt werden. Ist das nicht der Fall, hängt eine maßstabstreue Auswertung davon ab, ob noch Kalibrierungsdaten der Kamera vorhanden sind oder Informationen über den Aufnahmestandpunkt vorliegen. Wurden bei der Aufnahme zusätzliche Bedingungen eingehalten, lassen diese unter bestimmten Bedingungen eine maßhaltige Auswertung zu. Das ist beispielsweise bei zahlreichen Aufnahmen des MEYDENBAUER-schen Messbildarchivs der Fall. Wenn genügend Bilder in ausreichender Qualität vor-

liegen, dann kann die Rekonstruktion der Aufnahmesituation auch mit Hilfe einer Bündelausgleichung vorgenommen werden. Der Erfolg einer photogrammetrischen Auswertung hängt insbesondere davon ab, mit welcher geometrischen Konstellation die Bilder vom betreffenden Objekt vorliegen und ob die vorhandenen Bilder mit ein und derselben Kamera aufgenommen wurden. Unter Umständen können zusätzliche geometrische Bedingungen am Objekt zu einer Lösung des Problems beitragen. Diese Ansätze können entweder in die digitale Bildentzerrung integriert werden oder sie dienen der Bestimmung von Passinformationen vor der eigentlichen Entzerrung.

Soweit von den betreffenden Gebäuden Messbilder vorliegen, sollten diese wegen ihrer hohen Qualität und ihrer photogrammetrischen Eigenschaften gegenüber anderen Aufnahmen vorgezogen werden. Eine besondere Rolle bei der photogrammetrischen Auswertung spielen die historischen Messbilder aus dem Messbildarchiv beim Brandenburgischen Landesamt für Denkmalpflege. Daher soll zunächst kurz auf dieses Archiv eingegangen werden.

2 Albrecht Meydenbauer und das Messbildarchiv

ALBRECHT MEYDENBAUER (1834–1921) gilt als der Begründer der Architekturphotogrammetrie (SCHWIDEFSKY 1971, GRIMM

1977, GRIMM 1985, MEYER 1985). Neben seinen Überlegungen zum Messprinzip durch die Umkehrung des Strahlengangs bei fotografischen Aufnahmen konstruierte er auch selbst geeignete Messkameras. Sein wichtigstes Ziel war aber die Begründung eines Deutschen Denkmälerarchivs, in dem das kulturelle Erbe mit Messbildern dokumentiert und archiviert ist und für eine photogrammetrische Auswertung bereit steht (MEYER 1993). Diesem Ziel kam er 1885 mit der Gründung der „*Königlich Preussischen Messbildanstalt*“ in Berlin einen deutlichen Schritt näher. Ein nationales Denkmälerarchiv existiert dagegen bis heute nicht.

Nach einer wechselvollen Geschichte befinden sich heute noch rund 20.000 großformatige Glasplatten mit Messbildern als Kernstück des MEYDENBAUER'schen Messbildarchivs im Besitz des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege (BURKHARDT 1958, BÜTTNER 1972, KOPPE 1996). Die Bilder mit einer Größe bis zu 40 × 40 cm wurden von der Gründung der Messbildanstalt 1885 an bis in die 30er Jahre des vorigen Jahrhunderts mit hochwertigen, für diesen Zweck erbauten Messkameras unter Berücksichtigung einer speziellen Aufnahmekonfiguration aufgenommen. Der größte Teil der Sammlung umfasst Baudenkmäler aus dem Raum Berlin-Brandenburg. Es gibt aber auch zahlreiche Aufnahmen von architektonischen Sehenswürdig-



Abb. 1: Rathaus Naumburg, Reproduktion von einem 1906 aufgenommenen Messbild im MEYDENBAUER-Archiv.



Abb. 2: Rathaus Naumburg, Detail aus des historischen Messbild der Abb. 1.

keiten in ganz Deutschland (s. Abb. 1 und 2) und teilweise auch im Ausland.

Leider sind im Zweiten Weltkrieg sämtliche Unterlagen zu den Kameras sowie auch die verwendeten Kameras selbst verloren gegangen. Daher existieren zu den Aufnahmen keine Kalibrierungsdaten, obwohl es sich um Messbilder handelt. Als Referenzinformation für die Auswertung verwendete MEYDENBAUER keine Passpunkte, sondern Passstrecken, welche jedoch zusammen mit den anderen Unterlagen abhanden gekommen sind. Diese Umstände, die eine photogrammetrische Auswertung erheblich erschweren, führen dazu, dass entweder die Kameras nachträglich aus den Bildern kalibriert werden müssen, oder dass für eine photogrammetrische Bearbeitung Verfahren ausgewählt werden, die eine Kalibrierung berücksichtigen oder nicht benötigen.

Vor einiger Zeit wurden Untersuchungen zu einer nachträglichen Kalibrierung der MEYDENBAUER-Kameras durchgeführt (LI 1996). Es zeigte sich, dass keine generellen Aussagen zu den Daten der inneren Orientierung der Kameras möglich sind. Ursache dafür ist der häufig wechselnde Einsatz und die ständige Weiterentwicklung der Kameras durch Meydenbauer. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Kameras für den Transport zerlegt wurden und daher keine stabile innere Geometrie besaßen. Im Rahmen der Untersuchungen konnte aber gezeigt werden, dass sich mit Hilfe einer photogrammetrischen Bündelausgleichung Parameter der inneren Orientierung bestimmen lassen, die bei weiteren Auswertungen verwendet werden können. Daneben ließen sich Gruppen von Kameras ermitteln, welche teilweise anhand der abgebildeten Rahmenmerkmale wiedererkennbar sind, so dass zumindest Näherungswerte für spätere Auswertungen zur Verfügung stehen.

In vielen Anwendungsfällen ist es am einfachsten, ein photogrammetrisches Verfahren auszuwählen, bei dem die innere Orientierung nicht benötigt wird. Falls am Gebäude noch Passpunktmessungen möglich sind, kann daher eine digitale projektive Entzerrung der Messbilder angewandt werden. Die Vorgehensweise wird kurz im fol-

genden Kapitel erläutert. Für die Entzerrung von Messbildern von Bauwerken, die nicht mehr vorhanden sind, werden im darauffolgenden Kapitel verschiedene Auswertansätze vorgestellt, die zum Teil die speziellen Aufnahmebedingungen MEYDENBAUERS berücksichtigen.

3 Digitale Entzerrung und Abwicklung von Bildern vorhandener Bauwerke

Ist ein aufgenommenes Gebäude erhalten, werden geodätische Passinformationen auf der noch vorhandenen Fassade gemessen und anschließend dazu verwendet, das Messbild geometrisch und maßstabsgerecht zu entzerren. Dabei ist darauf zu achten, dass die Passpunkte sowohl im historischen Bild als auch am Objekt gut identifizierbar sind und sich der Lage nach im Laufe der Zeit nicht verändert haben.

Vor der Entzerrung müssen die betreffenden Bilder zunächst digitalisiert werden. Stehen die Originalvorlagen zur Verfügung, können sie mit einem kalibrierten Flachbettscanner erfasst werden. Für das Scannen von Filmmaterial ist eine Durchlichtoption erforderlich. Übersteigt die Bildgröße den Scanbereich, ist zuvor eine Reproduktion des Originals anzufertigen. Das ist beispielsweise bei den Bildern des MEYDENBAUER'schen Messbildarchivs der Fall. In Ausnahmefällen erfolgt die Belichtung einer Kontaktkopie vom Original, welche dann mit einem hochwertigen Luftbildscanner digitalisiert werden kann. Beim Scannen ist darauf zu achten, dass die Geräteauflösung dem gewünschten Maßstab der Entzerrung entspricht. Als Beispiel sind in Tab. 1 Scannerauflösung und maximaler Entzerrungsmaßstab für eine Reproduktion des Messbilds vom Naumburger Rathaus angegeben.

Tab. 1: Beispiel für Scannerauflösung und maximalen Entzerrungsmaßstab.

Scanner-Auflösung [dpi]	300	600	1200
Bildgröße [MB]	5	20	80
Entzerrungsmaßstab (maximal)	1 : 200	1 : 100	1 : 50



Abb. 3: Rathaus Naumburg, entzerrtes historisches Messbild (Originalmaßstab 1 : 50).



Abb. 4: Rathaus Naumburg, entzerrtes Messbild aus dem Jahre 1994.

Die Werte für die Bildgröße beziehen sich auf Vorlagen im Format $19\text{ cm} \times 19\text{ cm}$. Die Angaben für den maximalen Bildmaßstab gehen von einer abgebildeten Fassadenlänge von rund 40 m bei einer Auflösung des entzerrten Bildes von 300 dpi aus.

Zur Bearbeitung eignet sich photogrammetrische Software, welche die digitale Bildentzerrung auf Basis einer projektiven Transformation zulässt. Für die hier vorgestellten Beispiele wurde das Programm metigo-2D – eine Entwicklung der fokus GmbH Leipzig – eingesetzt. Da mehr als vier Passpunkte zur Verfügung standen, erfolgte die Berechnung der Koeffizienten mit einer Ausgleichung und statistischer Auswertung. Diese Vorgehensweise ist gerade bei der Entzerrung historischer Messbilder von großer Bedeutung, da mit Hilfe der statistischen Kenngrößen (normierte Verbesserung, Redundanz und die vermutliche Größe eines groben Fehlers) Fehler bei der Passpunktidentifizierung aufgedeckt werden können. Auf diese Weise wird es möglich, Passpunktfehler zu erkennen und zu eliminieren, die durch geringfügige bauliche Veränderungen (beispielsweise bei einer Sanierung des Bauwerks) bedingt sind.

Die Ergebnisse der digitalen Entzerrung – geometrisch entzerrte Messbilder (Abb. 3) oder bei größeren Objekten maßstäbliche Bildpläne – werden je nach Bedarf gedruckt oder ausbelichtet und stehen damit für weitere Arbeiten in Fotoqualität zur Verfü-

gung. Mit geeigneter Software lassen sich Abmessungen der Fassade und architektonischer Details im gewünschten Maßstab entnehmen. Auf der Basis des entzerrten Messbilds können aber auch Pläne in Form von Strichzeichnungen erstellt werden, die dann für eine Archivierung, Restaurierung oder Rekonstruktion bereitstehen. Mit der Entzerrung eines aktuellen Messbilds (Abb. 4) lassen sich durch Überlagerung außerdem bauliche Veränderungen feststellen und maßstäblich dokumentieren. Ein Beispiel für die Entzerrung und Überlagerung historischer Messbilder mit dem aktuellen Zustand zeigt die Abb. 5. Für die Dokumentation und Planung der Rekonstruktion der Muschelgrotte im Potsdamer Neuen Garten wurden eine historische Ansicht, der Zustand vor Beginn der Sicherungsmaßnahmen, sowie die aktuellen Phasen der Arbeiten maßstäblich dokumentiert. Weitere Informationen zu den durchgeführten Arbeiten, insbesondere auch zur Verwendung historischen Bildmaterials für die Restaurierung des Potsdamer Marmorpalais im Neuen Garten, finden sich in HEMMLEB & SIEDLER (2000).

Wenn die Bezugsfläche für das abgebildete Objekt eine einfach gekrümmte Fläche ist, kann es mit einer Abwicklung erfasst werden. Als Referenz stehen dafür Zylinder und Kegel zur Verfügung. Daneben können auch Flächen mit wechselnden Krümmungsradien als Bezugsfläche dienen, indem die

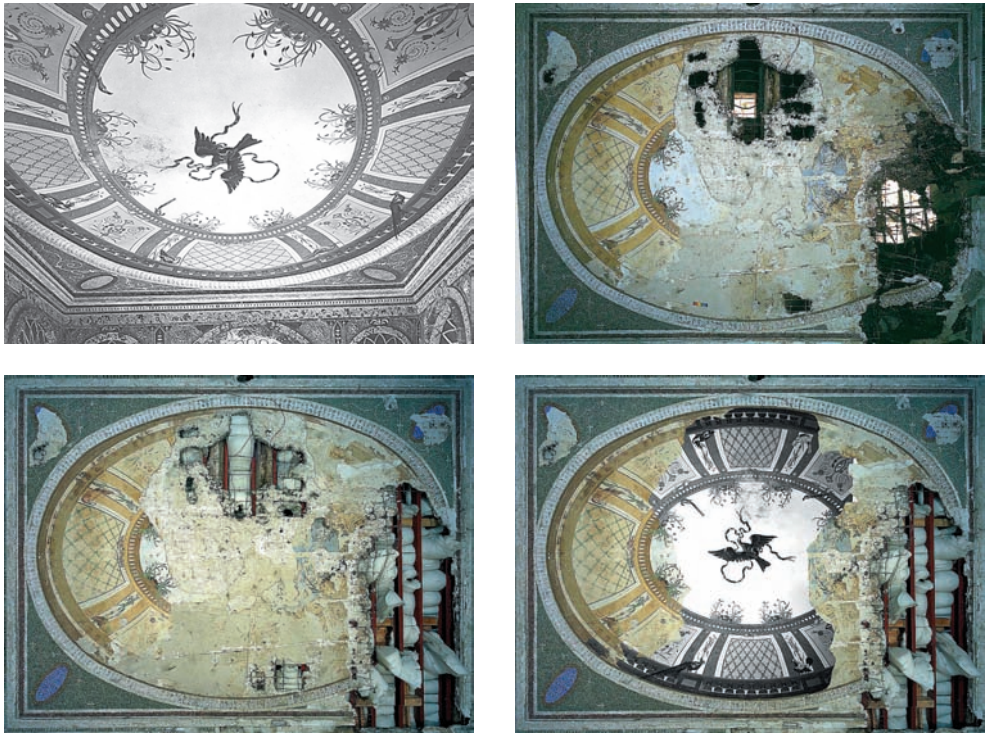


Abb. 5: Muschelgrotte im Neuen Garten Potsdam, Bildentzerrungen (Originalmaßstab 1 : 20). Links oben: Ausschnitt aus einem historischen Meßbild des MEYDENBAUER-Archivs (1912). Rechts oben: Zustand vor Beginn der Deckenschließung (1995). Links unten: Zustand nach den Sicherungsarbeiten (1998). Rechts unten: Zustand 1998 mit Hinterlegung der ursprünglichen Deckenmalerei aus dem historischen Meßbild.

Schnittlinie mit der Senkrechten zu dieser Fläche durch ein beliebiges Polygon festgelegt wird. In allen Fällen wird eine parametrische Entzerrung verwendet, welche die Bestimmung der Orientierungsparameter der verwendeten Bilder voraussetzt. Da zusätzlich die Objektgeometrie bestimmt werden muss, ist eine detaillierte und sorgfältige Passpunktmessung notwendig. Typische Anwendungsbeispiele sind die Abwicklung von Gewölben sowie die Erfassung der Innen- und Außenwände von Türmen und Apsiden. Zusätzlich kann ein vertikales Profil bei der Abwicklung berücksichtigt werden. Je nach Anwendungsfall ist dabei zwischen einer geschlossenen Darstellung oder einer maßstäblichen Abbildung auszuwählen. Handelt es sich um doppelt gekrümmte Flächen, können diese entweder durch eine

Orthoprojektion erfasst werden (ein Beispiel dazu befindet sich in HEMMLEB et al. 2001) oder man kann sie mit Hilfe einer Kartenprojektion in die Ebene abbilden. Ein typischer Anwendungsfall dafür ist beispielsweise die Abbildung von Globen (HEMMLEB & SUTHAU 1999).

Auch historische Bilder können mit den aufgezählten Techniken zu Bildplänen abgewickelt werden. Ein Beispiel dafür ist die Abwicklung der Westapsis der Stiftskirche St. Cyriakus in Gernrode unter Verwendung eines historischen Messbildes von MEYDENBAUER (Abb. 6a). Wegen der Verdeckung der seitlichen Teile der Wandmalereien durch die Orgelemporen wurde nur der Mittelteil exemplarisch abgewickelt. Zuvor erfolgte die Aufnahme und Abwicklung der Westapsis im heutigen Zustand (siehe auch HEMM-



Abb. 6: Westapsis der Stiftskirche St. Cyriakus in Gernrode (Harz). Links oben: Reproduktion vom historischen Messbild aus dem MEYDENBAUER-Archiv (1906). Rechts oben: Abwicklung des Mittelteils des historischen Messbilds (Originalmaßstab 1 : 20). Rechts unten: Überlagerung von historischem und aktuellem Zustand (Detail).



LEB & SIEDLER 1999). Die dazu durchgeführten Passpunktmessungen fanden auch bei der Abwicklung des historischen Messbilds Verwendung. Für restauratorische Zwecke erfolgte auch hier die maßstäbliche Überlagerung von historischem und aktuellem Zustand, welche in Abb. 6, rechts unten) angedeutet ist.

Um den hohen Qualitätsanforderungen bei der Entzerrung historischer Messbilder Rechnung zu tragen, sollten ausschließlich qualitativ hochwertige Algorithmen für das Bildresampling ausgewählt werden. In den vorgestellten Beispielen wurde ein bikubischer Interpolationsansatz ausgewählt, da dieser trotz der benötigten hohen Rechnerleistung die besten Ergebnisse liefert. Dadurch lassen sich in Verbindung mit einer hohen Scanauflösung entzerrte Messbilder

berechnen, die auch bei großen Maßstäben eine ausreichende Detailauflösung aufweisen.

4 Digitale Bildentzerrung bei zerstörten Bauwerken

Weltweit sind viele Bauwerke durch Kriegseinwirkungen zerstört worden oder durch mangelnden Schutz und fehlende Sanierungsmaßnahmen verfallen. Das trifft auch auf einen nicht unerheblichen Teil der von MEYDENBAUER aufgenommenen Bauwerke zu. Sollen in diesem Fall maßstäbliche Informationen bis hin zu vollständigen Fassadenplänen mittels photogrammetrischer Techniken gewonnen werden, ist zunächst zu prüfen, ob noch Passpunktkoordinaten aus alten Messungen vorliegen oder aus his-

torischen Plänen abgegriffen werden können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich Fehler des Planmaterials unmittelbar auf die Genauigkeit der Entzerrung auswirken. Ein Beispiel für die Entzerrung auf der Basis von historischen Unterlagen ist die zerstörte Schinkelsche Bauakademie in Berlin. Mit Hilfe der bekannten Achsmaße wurden die Hauptebenen des Gebäudes entzerrt und dienten als Grundlage für die Erstellung von Fassadenplänen. Die enge Kooperation zwischen dem beauftragten Architekturbüro, der fokus GmbH Leipzig als photogrammetrischem Dienstleister und dem Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie der Technischen Universität Berlin war die Voraussetzung für das Gelingen der Arbeiten. Mittlerweile ist die Nordostecke der Bauakademie auf der Basis der abgeleiteten Pläne mit klassischen Handwerksmethoden wieder originalgetreu aufgebaut worden.

Eine weitere Möglichkeit zur Beschaffung der Passpunktkoordinaten ergibt sich, wenn mehrere historische Aufnahmen des Bauwerks vorliegen. Dann können im günstigsten Fall die Aufnahmen in einem Bildverband orientiert und Koordinaten von Einzelpunkten bestimmt werden. Eine solche Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung ist aber relativ aufwändig und nur bei einer ausreichenden Bildanzahl und geeigneter Aufnahmekonfiguration erfolgreich einsetzbar. Ein Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass sowohl zerstörte als auch noch vorhandene Fernziele (z. B. andere Gebäude oder Kirchtürme) entweder als Pass- oder als Verknüpfungspunkte in die Bündelgleichung eingehen können. Aktuelles Beispiel für diese Vorgehensweise ist die Rekonstruktion der Fassaden des Berliner Stadtschlösses. Die Fassadenpläne basieren auf digitalen Bildplänen im Maßstab 1 : 25. Für die Bildentzerrung wurden Passpunkte mit Hilfe einer Bündelgleichung berechnet. Neben den Fassadenplänen können aus den Ergebnissen der Bündelgleichung auch Stützpunkte für Profile abgeleitet werden. Bisher wurde nur ein kleiner Teil der Nordfassade des Stadtschlösses mit Fassadenplänen und Vertikalschnitten ausgewertet, welche aber exemplarisch das Potenzial

einer derartigen Vorgehensweise zeigen (STUHLEMMER 2000, WIEDEMANN et al. 2000, WIEDEMANN 2001).

Gelingt es, das historische Bildmaterial im Verband zu orientieren, besteht außerdem die Möglichkeit, Bilder mit Hilfe ihrer aus der Bündelgleichung bekannten Orientierungsdaten parametrisch zu entzerren. Dazu ist lediglich die Entzerrungsebene am Objekt zu definieren. Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass die Passpunkte für die Bildorientierung nicht in der Entzerrungsebene liegen müssen. Daneben bietet sich auch die Möglichkeit, Maßinformationen unebener Objekte abzuleiten. So ist es durch die Auswahl und Festlegung deutlich sichtbarer Schnittebenen möglich, lichte Maße (z. B. Höhen oder Ausdehnungen) figürlichen Schmucks zu bestimmen. Das Verfahren ist eine Alternative zur Punktbestimmung aus der Bündelgleichung, da Objektdetails aufgrund der häufig vorhandenen schlechten fotografischen Qualität der Bilder oftmals nicht ausreichend in mehreren Bildern zu identifizieren sind. Anwendungsbeispiele für dieses Verfahren sind die Ableitung von Maßinformationen der Figur des Pegasus im Innenhof des Schloss Belvedere in Potsdam und der Kuppelfigur des Fortunaportals des zerstörten Potsdamer Stadtschlösses durch die fokus GmbH Leipzig.

Da jedoch häufig nur ein einzelnes Messbild eines Bauwerks vorliegt, ist zu untersuchen, welche Auswertemethoden in diesem Fall möglich sind. MEYDENBAUER nahm seine Bilder in einer bestimmten Konfiguration auf, die eine Auswertung nach einer von ihm aufgestellten Vorschrift ermöglichte. Um diese Regeln für die Entzerrung eines MEYDENBAUER'schen Messbilds zu verwenden, sind zunächst die geometrischen Bedingungen zu untersuchen, welche sich durch die Einhaltung der speziellen Aufnahmekonfiguration nach MEYDENBAUER ergeben. MEYDENBAUER ging bei den meisten seiner Aufnahmen nach folgenden Regeln vor:

1. Die Aufnahme wird mit einer horizontalen Kamera durchgeführt, d. h. Kantung und Neigung der Aufnahme sind Null.

2. Das Gebäude wird über Eck aufgenommen.
3. Statt der Neigung der Kamera wird eine Objektverschiebung verwendet, um auch höhere Bauwerke erfassen zu können.

Für eine grafische Einbildauswertung nutzte MEYDENBAUER außerdem einige geometrische Bedingungen aus, denen zahlreiche Bauwerke unterliegen:

4. Das Gebäude besitzt im Grundriss rechtwinklige Ecken.
5. Am Gebäude sind senkrechte und waagerechte Gebäudekanten vorhanden.

Unter diesen Voraussetzungen hat MEYDENBAUER Auswertevorschriften abgeleitet, die eine grafische Auswertung einer Fassade aus nur einem Bild erlauben (MEYDENBAUER

1912). Dazu wurden aber die Kamerakonstante und die Aufnahmeentfernung von der Messbildanstalt vorgegeben. Während sich die Kamerakonstante sowohl näherungsweise nach MEYDENBAUER als auch genauer mit anderen Verfahren aus dem Bild bestimmen lässt (ETHROG 1984, NOVAK 1986), ist die Kenntnis der Aufnahmeentfernung Voraussetzung für eine maßstabstreue Entzerrung. Weil uns diese Angabe heute nicht mehr vorliegt, muss statt dessen eine horizontale und eine vertikale Strecke am Bauwerk bekannt sein. Die konstruktiven Anweisungen, die MEYDENBAUER für eine grafische Auswertung gibt, können dann ohne weiteres mit den Mitteln der analytischen Geometrie für konkrete Berechnungen verwendet werden, welche die Grundlage für eine digitale Bildentzerrung bilden.

Mit diesem Ansatz wurde ein historisches Messbild aus dem MEYDENBAUER-Archiv exemplarisch entzerrt. Dabei handelt es sich um das zerstörte Gebäude der Kommandantur in Berlin, Unter den Linden 1 (Abb. 7). Als Eingabedaten werden lediglich die Maße einer horizontalen und einer vertikalen Strecke benötigt. Für die Berechnung der Bildgeometrie sind jeweils zwei Paar horizontale und vertikale Objektkanten im Bild auszuwählen und zu messen. Nach der Berechnung der wesentlichen geometrischen Elemente des Bilds (Bildhorizont und Hauptsenkrechte, Kontrolle der



Abb. 7: Kommandantur in Berlin, historisches Messbild aus dem MEYDENBAUER-Archiv (1911).



Abb. 8: Kommandantur in Berlin, entzerrtes Messbild (Originalmaßstab 1 : 50).

Neigung u.a.) kann die Transformation der Bildkoordinaten gemäß dem MEYDENBAUERSchen Ansatz erfolgen. Wie auch bei der projektiven Entzerrung wird ein indirekter Entzerrungsansatz verwendet.

In dem verwendeten Beispiel konnte eine waagerechte Strecke aus alten Aufmaßunterlagen entnommen werden. Da keine Höhen vorhanden waren, wurde zunächst eine vertikale Strecke willkürlich festgelegt. Das Ergebnis der Entzerrung war damit längs der Fassade bereits maßstabstreu, jedoch nicht in der Höhe. Aus Symmetriebedingungen architektonischer Details wurde anschließend ein Korrekturfaktor für die Höhe berechnet. Damit konnte aus dem historischen Messbild ein geometrisch korrekter und maßstabstreu entzerrter Bildplan erzeugt werden (Abb. 8), der als Grundlage für Rekonstruktionszeichnungen diente (siehe STUHLEMMER 2000). Die Genauigkeit hängt dabei von den gegebenen Werten für die horizontale und vertikale Strecke ab. Im Beispiel entspricht also die Lagegenauigkeit der Genauigkeit der Angaben aus dem historischen Aufmaß, die Höhengenaugigkeit hängt von der Korrektheit der Symmetrieverhältnisse der verwendeten Fassadenstrukturen ab.

Als Alternative zu dem hier vorgestellten Ansatz, welcher sich stark an der Vorgehensweise MEYDENBAUERS orientiert, kann auch eine strenge projektive Transformation mit vier Passpunkten, welche ein fiktives Objektrechteck bilden, für die geometrische Entzerrung des Bildes verwendet werden. Die Maßstabsinformation muss in diesem Fall ebenfalls in Form einer horizontalen und einer vertikalen Passstrecke vorliegen, anhand derer das Bild in den gewünschten Maßstab skaliert werden kann. Gegenüber der Bildentzerrung nach dem MEYDENBAUER'schen Ansatz besitzt diese Methode allerdings den Nachteil, dass nicht mehrere Fluchtlinien bei der Berechnung berücksichtigt werden können und keinerlei Kontrollmöglichkeiten (z. B. in Form der Bildkonstanten, der Bildneigung und anderer geometrischer Bildelemente) vorliegen.

Daneben gibt es aber noch weitere Möglichkeiten für die Entzerrung von histori-

schen Bildern: Durch die Ersetzung der Passpunktkoordinaten durch Passlinien in den Formeln der projektiven Transformation, lassen sich allgemeinere Ansätze für die Entzerrung ebener Objekte herleiten. Dabei können entweder ebenso Fluchtlinien und eine vertikale und eine horizontale Passstrecke verwendet werden (REGENSBURGER 1990) oder es werden Passpunkte mit Passstrecken beliebig kombiniert. Die vollständige Eliminierung der Passpunkte ist theoretisch bei der Verwendung von mindestens acht Passstrecken möglich (FINSTERWALDER 1991) und daher für die Entzerrung von Aufnahmen zerstörter Bauwerke nicht praktikabel. Neuere Ansätze gehen von zusätzlichen a-priori-Informationen über die Eigenschaften des abgebildeten Objekts aus. Dazu zählen vor allem Linearität, Parallelität und Orthogonalität innerhalb der Bauwerksstruktur. Einen Teil davon hatte erstaunlicherweise MEYDENBAUER bereits 1912 verwendet. Ein allgemeiner Ansatz wird in BRÄUER-BURCHARDT & VOSS (1999) vorgestellt: Nach der automatischen Detektion der Fluchtlinien werden zunächst die Fluchtpunkte bestimmt. Daraus lassen sich Hauptpunkt und Bildkonstante ermitteln. Die eigentliche Entzerrung basiert auf einer Hauptpunkt-Transformation. Eine andere Herangehensweise ist die in diesem Heft beschriebene Erweiterung eines Bündelansatzes um Bedingungen, welche sich aus den oben genannten Objektinformationen ergeben (VAN DEN HEUVEL 2001).

5 Verwendung entzerrter Messbilder für die 3D-Visualisierung

Entzerrte historische Bilder können dazu beitragen, den ursprünglichen Zustand historischer Bauwerke dreidimensional zu visualisieren. Voraussetzung für eine 3D-Visualisierung ist die Erstellung eines 3D-CAD-Modells des betreffenden Bauwerks, welches sich aus denjenigen Fassadenebenen zusammensetzt, die als Bezugsebenen für die einzelnen Entzerrungen dienen (Abb. 9 und 10). Die darauf projizierten Entzerrungen ermöglichen eine fotorealistische Ansicht des Objekts. Je detaillierter da-

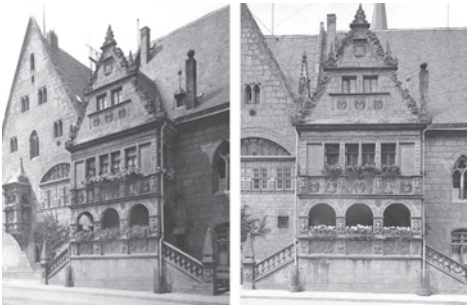


Abb. 9: Zwei historische Bilder des Rathauses in Halberstadt (1896 und 1912).



Abb. 10: 3D-Fotomodell der Ratslaube des Rathauses in Halberstadt.

bei das 3D-Fotomodell ist, um so realistischer erscheint die daraus abgeleitete Visualisierung; im gleichen Maße steigt aber auch der Aufwand bei der Bearbeitung. Die CAD-Daten basieren entweder auf den Ergebnissen einer Bündelausgleichung, oder sie werden anhand von historischen Planunterlagen konstruiert. Als Datenstruktur verwendet man am einfachsten VRML, wel-

ches neben seiner Übersichtlichkeit den Vorteil bietet, dass das 3D-Modell jederzeit mit einem entsprechenden Betrachter dreidimensional von beliebigen Richtungen aus betrachtet werden kann. Für eine Visualisierung des historischen Zustands in heutiger Umgebung können Ansichten des Photomodells für ausgewählte Aufnahmen der Örtlichkeit berechnet und in diese eingefügt werden. Diese Vorgehensweise setzt aber immer die relativ aufwändige Konstruktion eines 3D-Modells voraus.

Ein einfacherer Weg für die Visualisierung zerstörter Gebäudeteile oder ganzer Bauwerke in der heutigen Umgebung führt über die Bestimmung der Orientierungsparameter des verwendeten historischen Bildes. Dazu wird – soweit möglich – der Aufnahmestandpunkt und die Brennweite der Kamera photogrammetrisch ermittelt. Nach der Aufnahme der aktuellen Situation vom selben Standpunkt ist das Einfügen der historischen Bauwerksansicht in das Bild des heutigen Umfelds auf einfache Weise möglich (Abb. 11).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Historische Messbilder lassen sich auf vielfältige Weise für photogrammetrische Auswertungen verwenden. Digitale Bildentzerrungen bieten dabei eine relativ einfache Möglichkeit, maßstäbliche Informationen für die weitere Bearbeitung bereitzustellen. Ist das betreffende Bauwerk zerstört und sind keine Unterlagen zu den Orientierungsdaten der Kamera vorhanden, ist trotzdem oft eine Entzerrung möglich. Insbesondere durch die Verwendung von Methoden aus der Digitalen Bildverarbeitung steht eine Vielfalt von unterschiedlichen Varianten für die Bildauswertung zur Verfügung. Kernpunkt aller Verfahren ist die Verbindung von Bildverarbeitungsalgorithmen mit photogrammetrischen Methoden und Ansätzen der analytischen Geometrie des Raumes, welche letztendlich schon die Grundlage für die Auswertevorschriften MEYDENBAUERS bildeten.

Oft ist aber auch eine zweistufige Vorgehensweise von Vorteil. Hierbei werden zu-



Abb. 11: Visualisierung der zerstörten Kommandantur in Berlin in heutiger Umgebung.

nächst dreidimensionale Objektinformationen mit Hilfe einer Bündelausgleichung abgeleitet. Diese dienen anschließend als Referenz für die Bildentzerrung. Wegen der starken Parametrisierung der Bündelausgleichung im Falle der Verwendung historischer Messbilder ist es in jedem Fall ratsam, sowohl Bedingungen im Objektraum, als auch hinsichtlich der Aufnahmeconfiguration einzuführen, um die Berechnung zu stabilisieren. Mit verbesserten Ansätzen werden hierbei in nächster Zeit noch genauere Ergebnisse zu erwarten sein.

Vorteilhaft ist auf jeden Fall die hohe geometrische und fotografische Qualität der MEYDENBAUER'schen Messbilder, die sich in Abhängigkeit von der Genauigkeit der vorhandenen Referenzinformationen bzw. der Exaktheit der getroffenen Annahmen zu Aufnahme- oder Objektsituation in entzerrte Messbilder und darauf basierende Fassadenpläne übertragen lässt.

Danksagung

Der Verfasser dankt Herrn Prof. Dr.-Ing. JÖRG ALBERTZ und Herrn ALBERT WIEDEMANN (Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie der TU Berlin) für ihre viel-

fältigen Anregungen und zahlreiche fachliche Diskussionen, insbesondere aber für die gute Zusammenarbeit bei den gemeinsam bearbeiteten Projekten. Besonderer Dank gilt auch Herrn REINER KOPPE, Leiter des Messbildarchivs beim Brandenburgischen Landesamt für Denkmalpflege, für seine hilfreichen Hinweise und die große Hilfsbereitschaft bei der Sichtung und Nutzung der historischen Messbilder. Zuletzt sei den Mitarbeitern der fokus GmbH Leipzig gedankt, insbesondere Herrn GUNNAR SIEDLER und Herrn GISBERT SACHER. Ohne ihre Sachkenntnis und die technologische und wirtschaftliche Basis wären sowohl die aufgeführten Entwicklungsarbeiten als auch die Bearbeitung der hier vorgestellten Objekte nicht möglich gewesen. Alle hier vorgestellten Bildbeispiele stammen aus bearbeiteten Projekten der fokus GmbH Leipzig.

Literatur

BRÄUER-BURCHARDT, CH. & VOSS, K., 1999: Monokulare Rekonstruktion unter Orthogonalitätsvoraussetzungen. – 21. DAGM Symposium Mustererkennung, Springer Verlag, Berlin: 197–204.

- BÜTTNER, H., 1972: Die Bestände des MEYDENBAUERSchen Denkmälerarchivs und ihr Schicksal im und nach dem zweiten Weltkrieg. – *Vermessungstechnik*, **20** (3): 87–90.
- BURKHARDT, R., 1958: Welchen Weg nahm das MEYDENBAUERSche Denkmälerarchiv? – *Bildmessung und Luftbildwesen*, **26** (4): 119–122.
- ETHROG, U., 1984: Non-metric camera calibration and photo orientation using parallel and perpendicular lines of the photographed objects. – *Photogrammetria*, **39**: 13–22.
- FINSTERWALDER, R., 1991: Zur Verwendung von Paßlinien bei photogrammetrischen Aufgaben. – *Zeitschrift für Vermessungswesen*, **1991** (2): 60–66.
- GRIMM, A., 1977: 120 Jahre Photogrammetrie in Deutschland. – *Abhandlungen und Berichte des Deutschen Museums*, **45** (2), 72 S.
- GRIMM, A., 1985: Albrecht MEYDENBAUER – ein Leben für die Photogrammetrie und Denkmalpflege. – *Wissenschaftlich-technische Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*, Berlin: 13–21.
- HEMMELEB, M. & SUTHAU, A., 1999: Digital Mapping of Spherical Surfaces for the Investigation of Historical Globes. – *Third Turkish-German Joint Geodaetic Days*, Istanbul: 387–394.
- HEMMELEB, M. & SIEDLER, G., 1999: Abwicklung der Westapsis der Stiftskirche St. Cyriakus in Gernrode. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, **1999** (4): 287–288 und Titelbild.
- HEMMELEB, M. & SIEDLER, G., 2000: Photogrammetrische Arbeiten für die Restaurierung des Marmorpalais im Neuen Garten in Potsdam. – *Vermessung Brandenburg*, **5** (2): 12–19.
- HEMMELEB, M., SIEDLER, G. & SACHER, G., 2001: Digitale Bildentzerrungen und -abwicklungen für die Anwendung in Denkmalpflege, Bauforschung und Restaurierung. – *Von Handaufmaß bis High Tech*, Interdisziplinäres Kolloquium, TU Cottbus, 23.–26. Februar 2000: 74–82.
- KOPPE, R., 1996: Zur Geschichte und zum gegenwärtigen Stand des Meßbildarchivs. – In: ALBERTZ, J. & WIEDEMANN, A. (Hrsg.): *Architekturphotogrammetrie gestern – heute – morgen*: 41–57, TU Berlin.
- LI, C., 1996: Nachträgliche Kalibrierung der historischen MEYDENBAUER-Kameras. – In: ALBERTZ, J. & WIEDEMANN, A. (Hrsg.): *Architekturphotogrammetrie gestern – heute – morgen*: 63–77, TU Berlin.
- MEYDENBAUER, A., 1912: *Handbuch der Meßbildkunst*. – 1. Aufl., 245 S., Verlag Wilhelm Knapp, Halle.
- MEYER, R., 1985: ALBRECHT MEYDENBAUER – Baukunst in historischen Fotografien. – 1. Aufl., 260 S., Fotokinoverlag, Leipzig.
- MEYER, R., 1993: *Das Denkmäler-Archiv und seine Herstellung durch das Meßbild-Verfahren*. Denkschrift von ALBRECHT MEYDENBAUER 1896. Mit Vorwort und Kommentar von RUDOLF MEYER 1992. – 1. Aufl., 16 S., Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Berlin.
- NOVAK, K., 1986: *Orientierung von Amateuraufnahmen ohne Paßpunkte*. – Dissertation, TU Wien.
- REGENSBURGER, K., 1990: *Photogrammetrie – Anwendungen in Wissenschaft und Technik*. – 1. Aufl., 228 S., Verlag für Bauwesen, Berlin: 130.
- SCHWIDEFSKY, K., 1971: ALBRECHT MEYDENBAUER – Initiator der Photogrammetrie in Deutschland. – *Bildmessung und Luftbildwesen*, **39** (5): 183–189.
- STUHLEMMER, 2000: *Rekonstruktion durch Präzision*. – In: Boddien, W. v. & Engel, H. (Hrsg.): *Die Berliner Schlossdebatte – Pro und Contra*. – 1. Aufl., 149 S., Berlin Verlag A. Spitz: 25–35.
- VAN DEN HEUVEL, F., 2001: *Object Reconstruction from a Single Architectural Image Taken with an Uncalibrated Camera*. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, **2001** (4): 247–260.
- WIEDEMANN, A., HEMMELEB, M., ALBERTZ, J., 2000: *Reconstruction of historical buildings based on images from the MEYDENBAUER archives*. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII, B5/2: 887–893, Amsterdam.
- WIEDEMANN, A., 2001: *Photogrammetrische Rekonstruktion zerstörter Bauten aus historischen Photographien*. – *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*, Band 9, Berlin (im Druck).

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. MATTHIAS HEMMELEB
fokus GmbH Leipzig
Gustav-Adolf-Str. 12
D-04105 Leipzig
Tel.: 0341-2178460
Fax: 0341-2178470
e-Mail: Hemmleb@fokus-GmbH-Leipzig.de
Internet: <http://www.fokus-GmbH-Leipzig.de>

Manuskript eingegangen: Mai 2001

Angenommen: Mai 2001