

Photogrammetrie 4.0

Zur Integration von Photogrammetrie, Computer Vision, Computer Graphik und Serious Gaming

Dieter Fritsch



1. Einleitung

Die Entwicklung der Photogrammetrie geht in das Mittelalter zurück. Bedeutende Maler wie Albrecht Dürer nutzten bereits die Perspektivbildgeometrie zur perfekten Bildgestaltung. Erst mit der Erfindung der Photographie wurde sie für Messzwecke eingesetzt (ab 1850). Die folgende Klassifizierung hilft bei einer Einteilung der Photogrammetrie nach verschiedenen Entwicklungsstufen bzw. Paradigmenwechseln:

- analoge Photogrammetrie (1500 bis 1970) – Photogrammetrie 1.0
- analytische Photogrammetrie (1950 bis 2000) – Photogrammetrie 2.0
- digitale Photogrammetrie (1980 bis jetzt) - Photogrammetrie 3.0
- integrierte Photogrammetrie (ab 2010 und zukünftig) – Photogrammetrie 4.0

Die Grundlage für diese Bezeichnung wird in Anlehnung an die Industrie 4.0 (Robotik-Industrie) gegeben, in der intelligente und digital vernetzte Systeme eine selbstorganisierte Ableitung von Produkten schaffen sollen. Leider kann der Fachbereich der Photogrammetrie nicht auf so große Fördermittel wie bei der Industrie 4.0 zurückgreifen, jedoch liegt es im Selbstverständnis einer kleinen und feinen ingenieurwissenschaftlichen Disziplin, sich den Anforderungen der Gesellschaft und ihrer Produkte anzupassen. Abb. 1 gibt die Vernetzung und Integration der Photogrammetrie mit verschiedenen Nachbardisziplinen beispielhaft wieder. Dabei fehlen noch

weitere Bereiche wie die Fernerkundung, Satellitengeodäsie, Ingenieurgeodäsie und Kartographie, die auch noch alle mehr oder weniger mit der Photogrammetrie in Relation stehen.

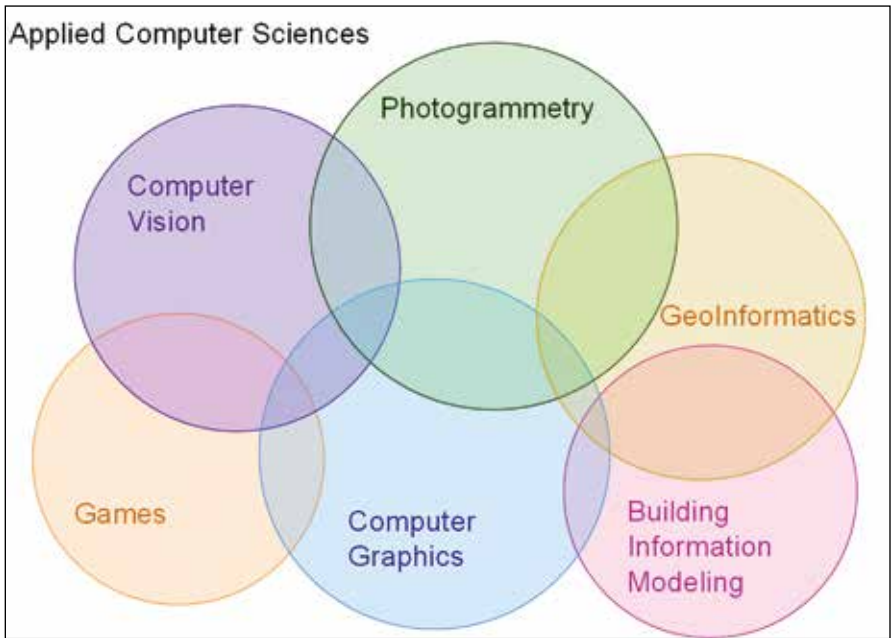


Abb. 1: Vernetzung der Photogrammetrie in Bereichen der Angewandten Informatik

Wie bereits einleitend erwähnt, wussten die großen Maler des Mittelalters die Bedeutung der Perspektivbildgeometrie für ihre Bildgestaltung einzusetzen. Ein eindrucksvolles Beispiel dafür ist „Der Feldhase“ von Albrecht Dürer, ein Aquarell gemalt um 1502 (siehe Abb. 2).



Im Folgenden soll kurz auf die geschichtliche Entwicklung der Photogrammetrie eingegangen werden: Mit Albrecht Dürer (um 1500) begann die Rekonstruktion der Perspektive, die mit den Beiträgen von Girard Desargues etwa 100 Jahre später analytisch als „Projektive Geometrie“ ausgearbeitet wurde. Der Mathematiker Johann Heinrich Lambert brachte 1759 seinen Beitrag zur „Freien Perspektive“ heraus. Damit gab es bereits hinreichende mathematische Grundlagen für die Photogrammetrie – es fehlte noch das chemisch oder physikalisch zu erzeugende Bild – die Photographie. Der Erfinder Louis Daguerre demonstrierte 1839 mit der ersten Straßenaufnahme von Paris sein Verfahren zur erfolgreichen Belichtung einer Silber-Emulsion und damit erste Bilder (auch von Personen) (siehe Abb. 3). Damit waren nun die Voraussetzungen für eine erfolgreiche 3D-Objektrekonstruktion aus Bildern gegeben, die auch prompt 1858 von dem französischen Offizier und Wissenschaftler Aimé Laussedat verfolgt wurde. Er setzte Drachen als Plattform für die Gewinnung von Luftbildern ein und entwickelte einen ersten Phototheodoliten, um aus Bildern Karten für militärische Anwendungen zu erzeugen.



Abb. 3: Erstes Straßenphoto in Paris (Louis Daguerre, 1839)

◀ Abb. 2: (a) Rekonstruktion der Perspektive im Mittelalter
(b) „Der Feldhase“ von Albrecht Dürer

Der deutsche Bauingenieur Albrecht Meydenbauer (1834-1921) interessierte sich für den Einsatz der Photogrammetrie zur Rekonstruktion von Bauten und Baudenkmalern (sakrale Bauten) und publizierte am 6.12.1867 im Wochenblatt des Architektenvereins zu Berlin erstmals den Begriff „Photogrammetrie“. Vor diesem Zeitpunkt gab es viele andere Bezeichnungen: „Planchette Photographique“ (Chevallier), „Ikonometrie, Metrophotographie“ (Laussedat), „Photometrographie, Messbildkunst“ (Meydenbauer), "Photographometrie" (Porro) und „Photographische Goniometrie, Phototopographie" (Pujo/Fourcade).

Welches mathematische Modell nutzt die Photogrammetrie?

Wie einleitend angedeutet nutzt die Photogrammetrie das mathematische Modell der Zentralprojektion. Dabei handelt es sich um eine Abbildung vom 3D-Objektraum in den 2D-Bildraum und umgekehrt (Gl. 1). Ohne weiter auf die Ableitung einzugehen, sollen zunächst die Abbildungsgleichungen (Kollinearitätsgleichungen) der Photogrammetrie (Gl. 2) sowie der Computer Vision (Gl. 3) vorgestellt werden:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + m_X R(\omega, \varphi, \kappa) \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ \pm f \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x &= x_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= y_0 - f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & x_0 \\ 0 & f & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} R^T \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_0 \\ 0 & 1 & 0 & -Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

mit x_0 , y_0 und f , den Kalibrationsparametern der „inneren Orientierung“ – hinzu kommen noch Verzeichnungsterme (Abbildungsfehler), auf die später einzugehen ist. Die innere Orientierung beinhaltet die exakte Bildgeometrie innerhalb der Kamera, während die „äußere Orientierung“ die Lage der Kamera in Bezug zu einem kartesischen Koordinatensystem darstellt. Dabei handelt es sich um die Kameraposition X_0 , Y_0 und Z_0 sowie deren Blickrichtungen ω , φ und κ , deren Richtungskosinusse in den Koeffizienten der R-Matrix versteckt sind. Dabei ist festzustellen, das Gl. (2) und Gl. (3) identisch sind. Während die Kollinearitätsgleichungen der Photogrammetrie nichtlineare Beziehungen darstellen (perspektive Bildgeometrie), die für lineare Gleichungslösungen linearisiert werden müssen, handelt es sich bei Gl. (3) um eine Darstellung in der projektiven Geometrie, die von Haus aus linear ist.

2. Die Analoge Photogrammetrie – Photogrammetrie 1.0

Wie einleitend erwähnt, nutzte Laussedat bereits 1858 Drachen als Plattformen, um Luftbilder für Kartierungszwecke einzusetzen. Diese erste Pionierleistung wurde weiter vertieft und es erfolgten in den 1880er Jahren erste Luftbildaufnahmen von deutschen Städten. Neben Drachen und Ballonen wurden Zeppeline und später Flugzeuge eingesetzt (siehe Abb. 4 und 5).

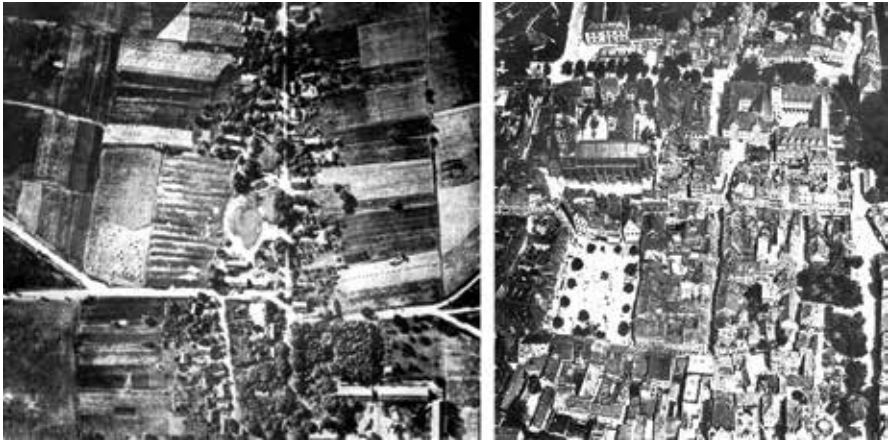


Abb. 4: (a) Luftbild Zehdenick/Berlin, 1887

(b) Jena, vom Ballon aufgenommen, 1909

Durch die Entwicklung des Flugwesens entwickelte sich ab 1915 die Luftbildphotogrammetrie als vermessungstechnisches Verfahren, um für große Gebiete der Erdoberfläche Karten zu erstellen. Ganz sicherlich haben auch militärische Überlegungen die Entwicklung des Flugzeugbaus wesentlich beeinflusst, hinzu kommen noch strategische Überlegungen zur Erzeugung von aktuellem Kartenmaterial.

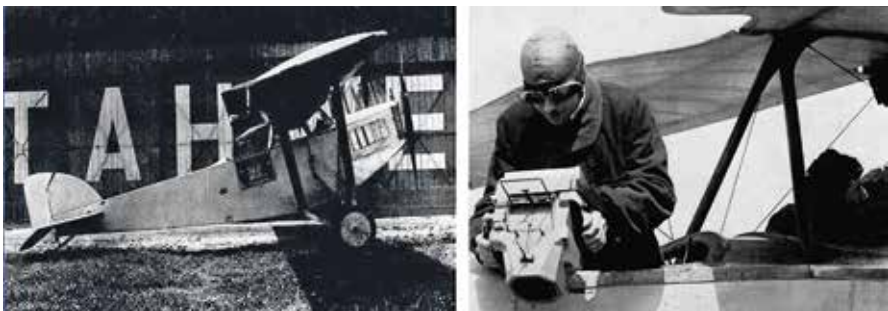


Abb. 5: (a) Flugzeug, 1923

(b) Fliegerhandkamera, Format 13x18 cm, 1926

Die 1930er Jahre waren die Zeit der Expeditionen. Bislang unbekannte Regionen wie z. B. Grönland und China wurden großflächig durch Bildflüge erfasst. Damit etablierte sich die Luftbildphotogrammetrie zum wichtigsten Aufnahmeverfahren zur Herstellung von topographischen Karten. Die Aufnahme- und Auswertetechnik konnte zunehmend verbessert werden.

Luftbildkarten als entzerrte Luftbilder (Einbildphotogrammetrie) konnten sich ebenso durchsetzen wie die exakte Zweibildauswertung der analogen Stereophotogrammetrie. Gerätetechnisch bedingte dies Meisterleistungen der optisch-mechanischen Rekonstruktion. Hier ist als Gerätehersteller vor allen Dingen die Fa. Carl Zeiss, Jena anzuführen, die nach dem 2. Weltkrieg nach Oberkochen umsiedelte und in Konkurrenz mit dem in der damaligen DDR verbliebenen Konsortium treten musste. Die Abb. 6 und 7 verdeutlichen exemplarisch das seinerzeit eingesetzte photogrammetrische Instrumentarium. Einen guten Überblick über die Entwicklungen im Hause Zeiss, Oberkochen, gibt Hobbie (2010).

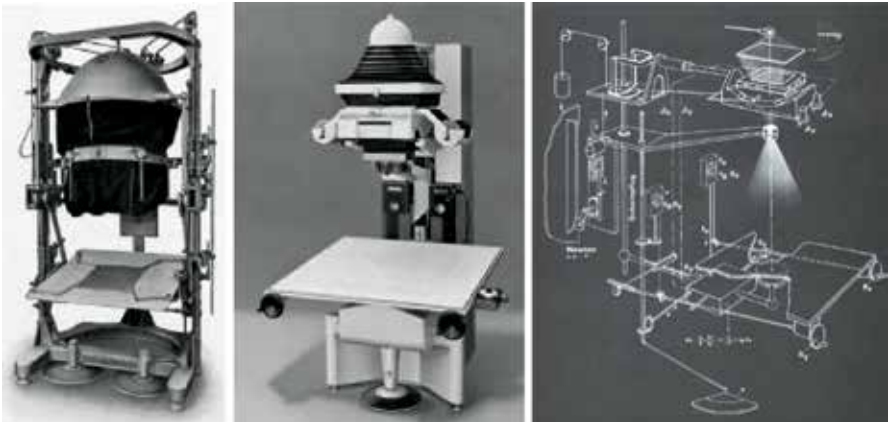


Abb. 6: (a) SEG I, 1937 (b) SEG V, 1972

(c) Schematischer Aufbau SEG V
© Hobbie, 2010

In Abb. 6 sind exemplarisch zwei Selbstfokussierende Entzerrungsgeräte (SEG) von Carl Zeiss wiedergegeben – der Autor durfte als Student der Uni Bonn Auswertungen am SEG V durchführen. Die Wirkungsweise der Geräte war genial einfach: Das Luftbild wurde auf den Bildträger gelegt und dann durch translatorische und rotatorische Bewegungen des Geräts auf eine Orthogonalprojektion gebracht, die dann belichtet wurde. Das Ergebnis war eine entzerrte Luftbildkarte.

Für Jahrzehnte war die Stereoauswertung der analogen Photogrammetrie das Standardverfahren für die topographische Kartengenerierung. Dabei wurde ein Stereobildpaar in die beiden Bildträger des Stereoauswertegeräts (siehe Abb. 7) eingelegt und optisch-mechanisch ein künstliches 3D-Modell erzeugt, welches durch ein stereoskopisches Betrachtungssystem in 3D betrachtet und durch 3D-Messmarken ausgewertet werden konnte. Die Bewegungen des Operateurs im 3D-Modell wurden auf einen Zeichentisch übertragen und damit Inhalte einer topographischen Karte erzeugt. Die Rohauswertung wurde dann später kartographisch nachbearbeitet.

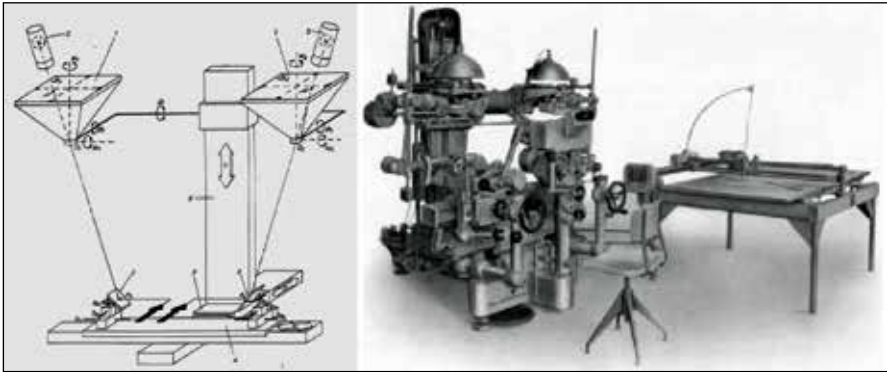


Abb. 7: (a) Subjektiv-optische Projektion, Carl Pulfrich, 1918 (b) Stereoplanigraph C5, 1937 ©Hobbie, 2010

Mit Beginn der 1970er Jahre zeichnet sich der Übergang von der analogen zur analytischen Photogrammetrie ab. Dies war ein erster Paradigmenwechsel in der Photogrammetrie!

3. Die Analytische Photogrammetrie – Photogrammetrie 2.0

Mit der Erfindung und kontinuierlichen Weiterentwicklung von Computern seit den 1940er Jahren konnte auch die rechnerische Auswertung der Gl. 1-3 Eingang in den photogrammetrischen Alltag finden. Hier sind die Arbeiten von D. C. Brown in den 1950er Jahren an erster Stelle aufzuführen, der die Kollinearitätsgleichungen Gl. (2) linearisierte und eine rechnerische Lösung herbeigeführt hat. Er war seinerzeit Assistent von H. H. Schmid, dem Projektleiter einer weltumfassenden photogrammetrischen Triangulation, die in den 1960er Jahren ausgeführt wurde. Brown hat sich nach seiner Assistentenzeit als selbständiger Unternehmer in Melbourne (Florida) niedergelassen und viele Beiträge zur analytischen Photogrammetrie wie auch zur Kamerakalibration geliefert.

Ausgehend von den Kollinearitätsgleichungen Gl. (2) können diese um zusätzliche Kalibrationsterme Δx , Δy erweitert werden – man spricht in diesem Zusammenhang von „Selbstkalibration“.

$$\begin{aligned} x &= x_0 - f \frac{r_{11}(X-X_0)+r_{21}(Y-Y_0)+r_{31}(Z-Z_0)}{r_{12}(X-X_0)+r_{22}(Y-Y_0)+r_{32}(Z-Z_0)} + \Delta x + \varepsilon \\ y &= y_0 - f \frac{r_{12}(X-X_0)+r_{22}(Y-Y_0)+r_{32}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0)+r_{23}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} + \Delta y + \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

Die mit den filmbasierten Luftbildkameras (siehe Abb. 8) erfassten großen Bildverbände werden daher seit den 1960er Jahren analytisch durch eine Bündelblockausgleichung ausgewertet. Darunter versteht man eine kombinierte Auswertetechnik, die auf der Basis der Bild-Objektraumbeziehung (Kollinearität) Gl. (2) und Gl. (4) durch Einbeziehung von Kontrollpunkten im Objektraum homologe Bildpunkte in den Objektraum vorwärts einschneiden kann, bei gleichzeitiger Rekonstruktion der Lage und Orientierung der Aufnahmegeometrie. Ausgehend von der Linearisierung von Gl. (4) stellen dabei die unbekanntes Objektkoordinaten X_i, Y_i, Z_i der im Objektraum einzuschneidenden Punkte P_i ($i=1,2, \dots, n$) neben den Parametern der inneren Orientierung x_0, y_0, f sowie der äußeren Orientierung $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varnothing, K$ (für m Bilder also $6m$) unbekanntes Parameter dar, die durch ein überbestimmtes lineares Gleichungssystem berechnet werden. Da es viel, viel mehr Bildmessungen gibt als unbekanntes Parameter, nutzt man hier die von C. F. Gauss entwickelte Methode der kleinsten Quadrate und gleicht die Verbesserungsquadrate der Verbesserungen der einzelnen Bildkoordinatenmessungen aus. Da mit dieser Methode die ursprünglichen Aufnahmemstrahlenbündel für den gesamten Block von Aufnahmen durch „Ausgleichung“ rekonstruiert werden, spricht man von „Bündelblockausgleichung“.

Die Kameraentwicklungen der 1950er und 1960er Jahre haben robuste System hervorgebracht, die im Bildformat 23x23 cm aufgezeichnet haben - sehr zum Leidwesen der Hersteller, weil sie über Jahrzehnte eingesetzt werden konnten. Die analogen Luftbildkameras wurden bis 2010 in der Praxis eingesetzt. Sie zeichneten sich aus durch eine hochwertige Optik, den großformatigen Film mit einem Bildwanderungsausgleich, und der automatischen Auslösung der Kamera, gesteuert durch Flugmanagementsysteme (siehe Abb. 8).



Abb. 8: Analoge Luftbildkameras

(a) Wild RC 30 (Hexagon)

(b) Reihenmesskammer
Zeiss, Oberkochen

(c) Luftbildmesskammer
Zeiss, Jena

Die 1970er Jahre waren geprägt von umfangreichen photogrammetrischen Softwareentwicklungen für die analytische Behandlung der Bildverbände und des Technologietransfers. Dabei spielte die Selbstkalibration der filmbasierten Bildaufzeichnung eine tragende Rolle, um die Genauigkeiten der photogrammetrischen Punktbestimmung zu verbessern. Parallel dazu erfolgte die Entwicklung von Software zur Erzeugung von Digitalen Geländemodellen.

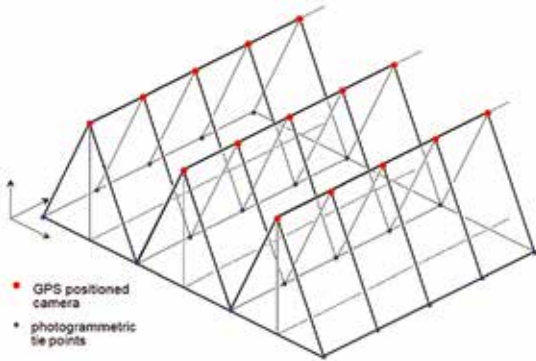


Abb. 9: (a) Bildflug, 1990

(b) Aerotriangulation ohne Passpunkte

© Ackermann, 1995

Mit der Verfügbarkeit von DGPS (ab 1980) konnte eine Flugführung in dm-Genauigkeit die Positionen der Kamera während der Bildaufzeichnung erstmalig einmessen (siehe Abb. 9a). Damit waren die Weichen gestellt, die zeit- und kostenaufwendige Passpunktbestimmung zu minimieren (siehe Abb. 9b). Unter „Aerotriangulation“ versteht man dabei die Punktbestimmung im Objektraum mit Hilfe von Luftbildern.

Stellvertretend für die Auswertegeräte sollen lediglich der von Zeiss 1960 eingeführte Präzisions-Stereokomparator (PSK) zur präzisen Ausmessung der Bildkoordinaten sowie das analytische Auswertegerät Zeiss Planicom P2 vorgestellt werden, welches durch einen Mini-Computer gesteuert wurde und die topographische Auswertung erlaubte (siehe Abb. 10). An beiden Geräten hat der Autor umfangreiche Auswertungen vorgenommen.

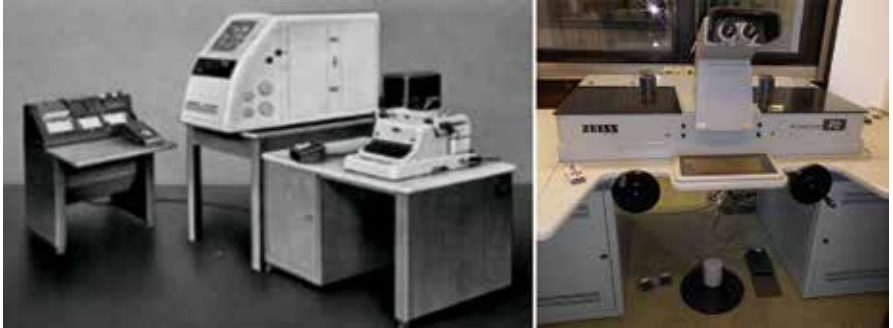


Abb. 10: (a) PSK, Zeiss, 1960

(b) Planicom, Zeiss, 1982

©Hobbie, 2010

Seit Beginn der 1980er Jahre zeichnete sich eine Umstellung der filmbasierten Bildaufzeichnung auf digitale Sensoren (CCD, CMOS) ab. Diese wurden anfänglich jedoch nur für den photogrammetrischen Nahbereich untersucht und pilotweise eingesetzt. Es wurde bereits 1988 auf dem Kongress der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (IGPF, engl. ISPRS: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) in Kyoto, Japan, ein rein digitales Auswertegerät als Prototyp vorgestellt: der DSP1 von Kern, Aarau, Schweiz.

Um jedoch weiterhin auch mit filmbasierten Aufnahmen eine analytische Auswertung zu ermöglichen, gab es seit Beginn der 1990er Jahre Filmscanner, die das filmbasierte Luftbild in ein digitales Bild transformierten, welches dann am Computermonitor betrachtet und weiteren Auswertungen (Entzerrung, Bildzuordnung, topographische Karte) zugeführt werden konnte. Auf dem Kongress der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung in Amsterdam (2000) wurde erstmals ein digitales Luftbildkamerasystem der Öffentlichkeit vorgestellt: das ADS 40 von Leica Geosystems, Heerbrugg, Schweiz. Damit wurde ein weiterer Paradigmenwechsel für einen gänzlich digitalen Workflow eingeleitet und die Ära der analytischen Photogrammetrie beendet.

4. Die Digitale Photogrammetrie – Photogrammetrie 3.0

Mit der Übernahme des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart 1992 konnte sich der Autor in viele Entwicklungen im Bereich der digitalen Photogrammetrie einbringen. Zunächst wurde er Co-Investigator des Deutschen Weltraumprojekts MOMS02/D2, welches als Dreizeilensystem für die digitale panchromatische Bildaufzeichnung entwickelt wurde, von einem der Pioniere in der deutschen Photogrammetrie: Otto Hofmann. Daneben gab es vier CCD-Zeilen für die multispektrale Bildaufnahme. Basierend auf den Erfahrungen des erfolgreichen zehntägigen Bildflugs auf dem SpaceShuttle (STS 55) im Frühjahr 1993 konnte sich das Stuttgarter Photogrammetrie-Institut Know-how im Bereich der geometrischen Rekonstruktion der Flugbahn wie auch der Oberflächenrekonstruktion aneignen. Ein ganz wichtiges Pilotprojekt war daher die Abnahme und Funktionsprüfung der „Digital Photogrammetric Assembly (DPA)“, eines digitalen Luftbildkamerasystems der Bundeswehr. Hierzu wurde 1995 das Testgebiet „Vaihingen/Enz“ eingerichtet (siehe Abb. 11).



Abb. 11: Testgebiet Vaihingen/Enz (gepflegt durch das Institut für Photogrammetrie, Univ. Stuttgart)

Über dieses Testgebiet hinweg wurde die DPA viermal geflogen und die Daten ausgewertet. Die endgültige Präsentation der Ergebnisse erfolgte im Frühjahr 1999 mit der Empfehlung, das System nicht weiterzuentwickeln, sondern auf die Markteinführung von digitalen Luftbildkamerasystemen zu warten, was dann auch auf dem

ISPRS-Kongress 2000 erfolgte. Danach konnten gleich mehrere digitale Luftbildsensoren der Öffentlichkeit präsentiert werden – Abb. 12 stellt eine Auswahl dar.



Abb. 12: Digitale Luftbildkamerasysteme, ab 2000

Mit der DPA begann eine sehr erfolgreiche Zertifizierung durch das Stuttgarter Institut von filmbasierten und digitalen Luftbildkameras, über dem Testgebiet Vaihingen/Enz. Die Selbstkalibration wurde gründlich aufgearbeitet und zwei neue Korrekturpolynome für die Bildverzeichnung und Restfehler Δx , Δy vorgeschlagen: Legendre und Fourier Polynome. Es konnte aufgezeigt werden, dass solche Korrekturpolynome auf dem Satz von Weierstrass beruhen (Fritsch, 2015). Für $M=N=5$ (Grad des Legendre-Polynoms) ergeben sich insgesamt 66 zusätzliche Parameter, die alle in einem Bündelausgleich zu schätzen sind – für $M=N=4$ reduziert sich die Anzahl auf 34. Nutzt man Fourier Polynome für diesen Zweck, so kann man sich sogar auf 16 Parameter beschränken. Es hat sich gezeigt, dass die neuen Parametersätze (nach Legendre und Fourier) die besseren Ergebnisse für digitale Luftbildkamerasysteme einbringen. Aus diesem Grund sei auch an dieser Stelle die Verwendung von diesen Parametersätzen allen empfohlen, die sich mit der Postkalibration von komplexen Kamerasystemen als auch von Laser Scannern auseinandersetzen müssen.

Schon lange vor der Bereitstellung von Systemen zur digitalen photogrammetrischen Datenerfassung aus dem Flugzeug gab es die digitale Bildaufzeichnung in der

Fernerkundung, vom Satelliten aus. Diese begann 1972 mit dem Landsat-Programm. Die Fernerkundung setzte sich ursprünglich mit der semantischen Interpretation von Bilddaten auseinander. Dies änderte sich schlagartig mit dem Start des Ikonos-Satelliten am 24. September 1999, mit dem auch ein Paradigmenwechsel in der Fernerkundung eingeleitet wurde: die hochaufgelöste optische Fernerkundung mit 1m Bodenauflösung und besser. Die Faszination der hochaufgelösten Fernerkundung hat bis heute nichts eingebüßt, im Gegenteil, mittlerweile gibt es den WorldView-3 Satelliten mit einer Bodenauflösung (Ground Sampling Distance, GSD) von 0,3 m.

Der Übergang zur vollständig digitalen Auswertung photogrammetrischer Bilder an digitalen Arbeitsstationen fand in der Zeit 1990 – 2005 statt. Die digitale Photogrammetrie – Photogrammetrie 3.0 - ist heute der Standard – diese zeichnet sich durch einen komplett digitalen Datenfluss aus (siehe Abb. 13).

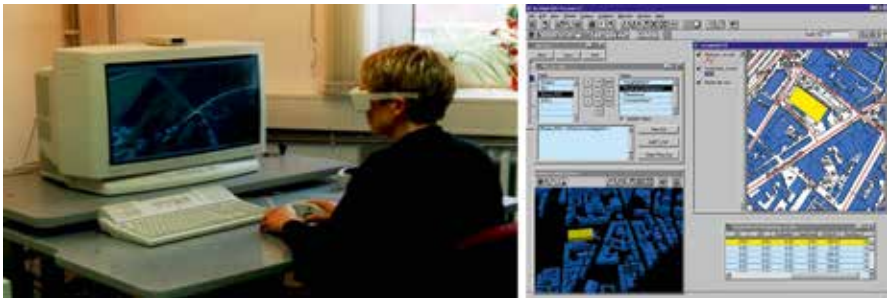


Abb. 13: (a) Digitale Stereo-Workstation, 1997 (b) 3D-Gebäudemodellierung, 1997

Gegen Mitte der 1980er Jahre zeichnete sich eine neue Technologie zur hochaufgelösten Geländedatenerfassung ab: Das Laser-Scanning. Erst als Laser Profiler, mit Beginn der 1990er Jahre bereits als Laser Scanner angeboten, versteht man darunter die Laufzeitmessung von Laserimpulsen (Time-of-Flight Verfahren) bzw. die Entfernungsmessung aus Phasenverschiebungen. Laser Scanner können im Flugzeug, im Helikopter, auf einer Drohne und auch terrestrisch (statisch und mobil) eingesetzt werden. Die Berechnung der 3D-Punktkoordinaten erfordert zusätzliche Kenntnis der Position und Orientierung des Sensors. Im Flugbetrieb helfen dabei die Kombination von GNSS (DGPS) und Inertial-Navigation (INS) (siehe Abb. 14).

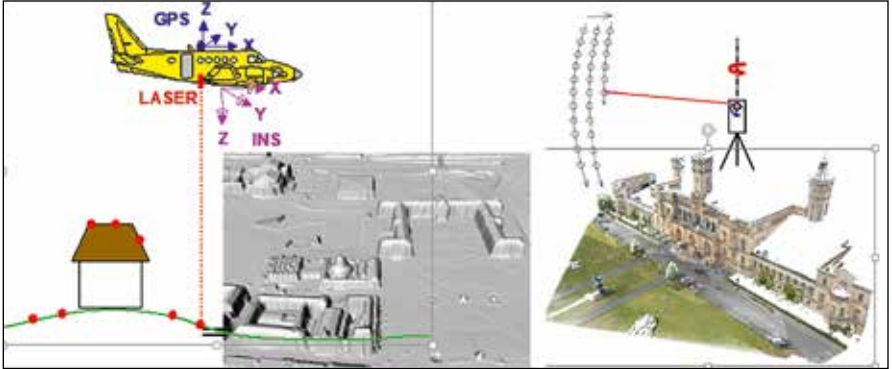


Abb. 14: (a) Laser Scanning aus der Luft

(b) Terrestrisches Laser Scanning

Das Laser Scanning bot von Beginn an hohe räumliche Auflösungen bei gleichbleibend hoher Genauigkeit. So konnte man mit Punktgenauigkeiten im XY -Bereich von 2-3 dm rechnen, in der Höhe sogar 1 dm – die räumliche Auflösung lag bei 4-10 Punkte pro m^2 , abhängig von der Flughöhe. Damit stand eine ideale Datenerfassungsmethode für hochaufgelöste digitale Oberflächenmodelle in Form von Punktwolken zur Verfügung.

In Stuttgart begannen wir bereits 1993 mit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für den Bereich des Laser Scanning: erst entwickelten wir robuste Lösungen für die 3D-Punkteinschaltung mittels integriertem DGPS/INS und konzentrierten uns dann auf die automatische Rekonstruktion von 3D-Stadtmodellen (Beispiele siehe Abb. 15).



Abb. 15: 3D-Stadtmodelle

(a) Karlsruhe, 1997

(b) Stuttgart, 1998

(c) Heidelberg, 1999

Ein erster Durchbruch wurde mit der Dissertation C. Brenner, 2000 gegeben, in der die Grundrisse der Gebäude als Vorinformation für eine Verschneidung der aufrechten Wände mit dem Oberflächenmodell dienten - die Dachlandschaft jedes Gebäudes wurde approximativ errechnet. Damit war der Grundstein für eine vollständig automatische Rekonstruktion der Gebäudesilhouette aus Punktwolken gelegt – das Stuttgarter Institut war damit führend in diesem Bereich (siehe Abb. 16). Andere Institute waren damit beschäftigt, Workflows für manuelle und halbautomatische Gebäudeerkennung zu entwickeln und der Praxis vorzuschlagen.



Abb. 16: (a) Laserflug Stuttgart, 1997 (b) Vollautomatische 3D-Rekonstruktion, 1998

Die Gebäudetextur für die Dachlandschaften konnte automatisch aus den Luftbildern entnommen werden: Bei bekannter äußerer Orientierung des entsprechenden Luftbildes kann das 3D-Polygon eines Gebäudes mittels Gl. (2) in das Luftbild projiziert werden und man findet die passende Bildtextur. Für die Fassadentexturierung waren terrestrisch erfasste Photos notwendig, die nach einer Entzerrung auf das entsprechende Polygon projiziert werden. Neben den zuvor erwähnten Beispielen Karlsruhe, Stuttgart und Heidelberg wurde für Wien ein Testgebiet ausgewählt, welches ebenso komplett in 3D rekonstruiert wurde. Die 3D-Stadtrekonstruktion blieb bis zum Ausscheiden des Autors am Institut ein Thema - zehn Jahre später wurde vom Institut das Stadtgebiet von Berlin komplett aus Laser Scanning und Schrägluftbildern rekonstruiert. Hier mussten für etwa 900 km² ca. 474.000 Gebäude vollautomatisch ermittelt werden. Die hierzu notwendige Methode von M. Kada (2007) benutzte ebenso Grundrisse, unterschied sich jedoch wesentlich von dem zuvor genannten Verfahren.

Eine Renaissance in der digitalen Photogrammetrie zeichnete sich mit Beginn des neuen Jahrtausends ab. Im Bereich Computer Vision ist die Bündelblockausgleichung der Photogrammetrie durch das sogenannte „Structure-from-Motion (SfM)“ umgesetzt worden, bei gleichzeitigem Angebot von OpenSource Software, wie z. B. VisualSfM, bundler, etc. Das Ergebnis sind dünnbesetzte Punktwolken im Objektraum. Ein zweiter, wesentlicher Meilenstein ist die Einführung und Weiterentwicklung des Semi-Global Matching – ein Verfahren der dichten Bildzuordnung und entwickelt

durch H. Hirschmueller (2005), bei dem homologe Bildelemente Pixel für Pixel in den Objektraum vorwärts eingeschnitten werden können. Bildhaft ist das Verfahren mit der Abb. 17 wiedergegeben: (1) Finde korrespondierende Pixel in Bildern von verschiedenen Ansichten (2) Speichere das Parallaxenbild (Disparität) und (3) Generiere durch Vowärtseinschneiden eine dichte Punktwolke. Bei diesem Verfahren können alle überlappenden Pixel zur Bestimmung von x,y,z -Koordinaten eines Punktes beitragen – ein großer Gewinn!

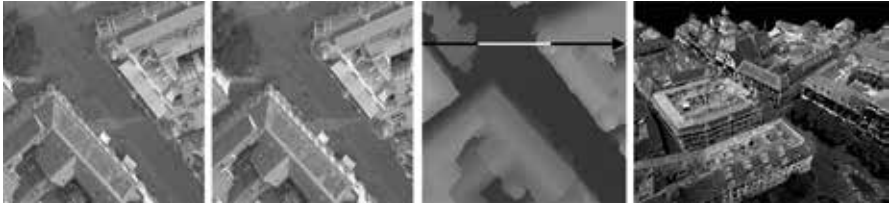


Abb. 17: (a) linkes Bild (b) rechtes Bild (c) Parallaxenbild (d) 3D-Punktwolke

Daraus ergeben sich hochaufgelöste Oberflächenmodelle, die mit der Bildtextur eingefärbt werden. Mittlerweile haben die großen IT-Anbieter wie z. B. Google, Apple und Microsoft diese Entwicklungen aufgegriffen und vermarkten diese Oberflächenmodelle als 3D-Stadtmodelle – es sind jedoch immer noch „dumme“ Punktwolken.

Am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart wurde in den Jahren 2010-2013 eine eigene Software SURE zur Erzeugung von dichten Punktwolken entwickelt, die seit 2014 durch das Start-up nFrames, Stuttgart erfolgreich vermarktet wird (siehe Abb. 18). Auch wenn die eingefärbten Punktwolken sehr beeindruckend sind, müssen diese in 3D Virtual Reality Modelle der Computer Graphik überführt werden.



Abb. 18: 3D-Punktwolke des Schloss Gottesaue (erzeugt mit SURE)

Am Stuttgarter Institut wurden in den letzten zehn Jahren viele Projekte bearbeitet, die sich mit der Renaissance der Photogrammetrie auseinandergesetzt haben. Neben der Stadt- und Landschaftsrekonstruktion sollen nachfolgend weitere zwei Projekte näher beschrieben werden, die sich ebenso mit Punktwolken als Endprodukt zufrieden gaben.

In einer Zusammenarbeit zwischen der Universität Leipzig, der German University in Cairo (GUC) und der Universität Stuttgart wurden 2011 und 2012 Ausgrabungen des Echnaton-Tempels in Heliopolis/Kairo photogrammetrisch dokumentiert. Dabei konnte auch ein Vergleich zwischen terrestrischem Laser Scanning (TLS) und photogrammetrischer Punktwolkengenerierung stattfinden. In Abb. 19a ist die Punktwolke eines Hieroglyphensteins mittels TLS dargestellt. Insgesamt sind hier 1,4 Mio. Punkte bei einem mittleren Punktabstand von 1-2 mm wiedergegeben, die dichte Bildzuordnung mittels SURE liefert 5,5 Mio. Punkte bei einem mittleren Punktabstand von 0.5 mm, ist also viel detailreicher.



Abb. 19: (a) Punktwolke Laser Scanning (b) Punktwolke SURE (Photogrammetrie 3.0)

Im Zuge der Renovierung des königlichen Palastes Amsterdam waren die Marmor-Reliefs in etwa 25 m Höhe an der Ost- und Westfassade nicht hochaufgelöst mit TLS zu erfassen – hier konnte jedoch die Photogrammetrie 3.0 eingesetzt werden (siehe Abb. 20). Mittels eines eigens dafür gebauten Kamera-Rigs, bestehend aus vier Infrarotkameras und einem RGB-Sensor wurden von jedem Relief etwa 10.000 Bilder erfasst und photogrammetrisch ausgewertet. Infolge der Echtzeit-Auswertung konnte bereits vor Ort geprüft werden, ob alle Teile des Reliefs zu rekonstruieren waren. Jedes Relief wurde in sechs Cluster unterteilt und rekonstruiert, mit etwa 1,1 Mrd. Punkten, bei einer Punktdistanz von etwa 0.2-0.3 mm, bei ähnlicher Genauigkeit in x,y,z . Die Restauratoren waren von der Auflösung und Genauigkeit der Punktwolken begeistert.

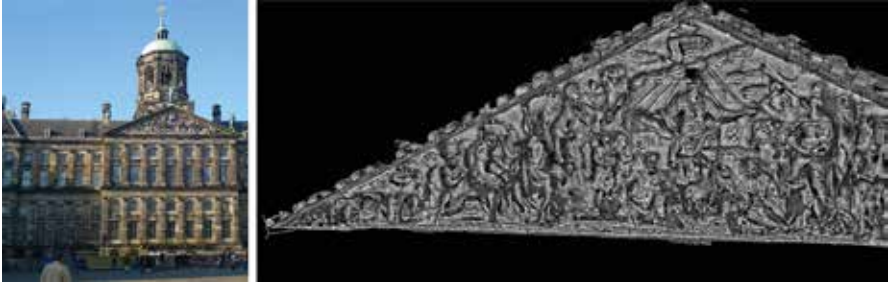


Abb. 20:
 (a) Schloss Amsterdam (b) Punktwolken-Rekonstruktion des Reliefs (Westfassade)

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Photogrammetrie 3.0 in der Lage ist, hochaufgelöste und hochqualitative Punktwolken bereitzustellen. Viele Versuche zu deren Interpretation sind in vollem Gange.

Die Integrierte Photogrammetrie – Photogrammetrie 4.0

Die integrierte Photogrammetrie sollte in verschiedenen Workflows und Produkten eingebettet sein, um 3D-Geometrien zu liefern und zu erläutern, Mehrwerte zu erzeugen und einfach den Herausforderungen der Gesellschaft wie zum Beispiel beim Autonomen Fahren, App-Entwicklung und –Nutzung genügen. Aus diesem Grund steht die Punktwolkenveredelung in Form von semantischen Interpretationen wie auch der Ableitung von Vektorgeometrien an vorderer Stelle.

Speziell im Bereich der halb- und vollautomatischen Ableitung von Gebäudesilhouetten gibt es viele Forschungsarbeiten. Der große Nachteil bisher sind die computerisierten oder auch stilistisch sehr künstlichen Endprodukte. Auch in Stuttgart wurde auf diesem Gebiet weiter geforscht und entwickelt, jüngste Ergebnisse setzen eine Grammatik für die Ableitung von Fassadenelementen sowie die 3D-Rekonstruktion des Innenraums ein (siehe Abb. 21). Der Nordwestflügel des Rotebühlbaus in Stuttgart wurde durch lediglich 95 Photos erfasst und hierfür durch SfM sowie dichte Bildzuordnung Punktwolken abgeleitet. Diese wurden gefiltert und fusioniert sowie durch eine individuelle Fassadengrammatik automatisch interpretiert. Darunter versteht man die Zerlegung der Punktwolke in Wandkacheln und Geometrikacheln (Fenster, Türen, usw.), für die eine Grammatik $G=G(V,T,P,F)$ bereitgestellt wird. V sind die Nichtterminale, T die Terminale, F die Axiome und P die Produktionsregeln. Nachdem die Grammatik anhand der zur Verfügung gestellten Punktwolke „trainiert“ wur-

de, kann man auf die nichterfassten Fassaden erlernte Strukturen abbilden. Für symmetrische Gebäudeteile funktioniert diese Art der 3D-Rekonstruktion sehr gut – es mangelt jedoch an einem gewissen Maß an „Lebendigkeit“.



Abb. 21: (a) Rotebühlbau

(b) 3D-Rekonstruktion mittels Grammatik
Rotebühlbau Stuttgart

Die Punktwolkeninterpretation durch Klassifikation ist eine Herausforderung, die man mit verschiedenen Methoden angehen kann. Hierzu stehen überwachte und unüberwachte Klassifikationsverfahren zur Verfügung, was jedoch an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden soll.

Da die Wissenschaft im Bereich der Punktwolkenveredelung bisher noch nicht mit überzeugenden Methoden aufwarten kann, bleibt nur die manuelle Interpretation, die gerade im Bereich der Computer Graphik ein sehr hohes Qualitätsniveau erreicht hat. Man erinnere sich an den Film „Avatar“, dessen Szenen überwiegend durch die Computer Graphik bereitgestellt wurden.

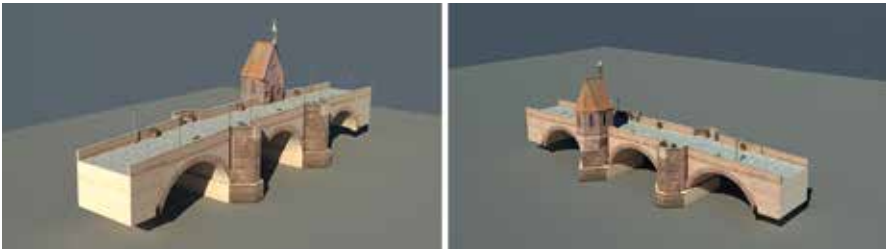


Abb. 22: Photorealistische 3D Rekonstruktion der Nikolausbrücke in Calw

Im EU-Projekt „Four-dimensional Cultural Heritage World (4D CH World)“ hatte man sich zum Ziel gesetzt, 3D- und 4D-Apps für mobile Endgeräte zu entwickeln. Die Stadt Calw diente als Testbed, um photogrammetrische Punktwolken und Laserscan-Punktwolken in volltexturierte 3D-Modelle zu überführen. Die Modelle wurden

durch Masterstudenten des englischsprachigen Studiengangs GEOENGINE der Universität Stuttgart erfasst und bereitgestellt. Mittlerweile sind mehr als 200 Gebäude im Bereich des Marktplatzes komplett rekonstruiert und liefern ein realistisches Abbild der Realität (siehe Abb. 22). Die zur Verfügung gestellten Apps sollen die Aufmerksamkeit und das Interesse eines breiten Personenkreises wecken: (1) Kindergartenkinder, (2) Schüler und Teenager, (3) Studenten an Universitäten und Hochschulen, (4) Erwachsene und (5) ältere Menschen, auch mental eingeschränkte Personen. Das Calwer Stadtarchiv hat mehr als 3.500 Photos aus den Jahren 1860 bis heute gesammelt und diese für das Projekt zur Verfügung gestellt.

Einen Ausschnitt aus der Arbeit mit den Masterstudenten gibt Abb. 23, bei der Gebäudesilhouetten durch terrestrisches Laser Scanning erfasst und in 3D CAD modelliert wurden. Die bei der Datenerfassung parallel aufgenommenen Fassadenaufnahmen mussten entzerrt und konnten dann auf das CAD-Modell digital montiert werden.



Abb. 23: (a) 3D-CAD Calw Marktplatz

(b) Fassaden-
photo

(c) Entzerrtes Photo

Mit diesen Rekonstruktionen wurden Apps entwickelt für die drei führenden Plattformen Android, iOS und Windows. Alle Gebäudemodelle wurden in Autodesk 3ds MAX durch Methoden der Computer Graphik „homogenisiert“ und auf minimale Datenvolumina heruntergerechnet. Danach erfolgt der Export in die Game-Plattform Unity, um hier Geländeformen, Vegetation und Gebäude zu kombinieren und in Apps zu transformieren.

Fehlende Gebäude bzw. Gebäudeteile wurden mittels der Fluchtpunktgeometrie in 3D modelliert. Hierzu sucht man sich drei parallele Linienpaare im Photo und

kann auf diese Weise die Position und Lage der Kamera rekonstruieren – siehe Abb. 24. Der Maßstab ist dabei noch frei wählbar. Mittels Internet stehen mittlerweile Millionen von Photos zum Download zur Verfügung, bekannte Beispiele hier sind Flickr, Picasa und Panoramio. Auch diese Bildsammlungen wurden genutzt, um aktuelle und ältere Photos von Calw zu erhalten.

Die Calw VR App bietet eine Echtzeit 3D-Umgebung mit OpenGL ES 3.0, hat eine automatische Skalierung und Orientierung der Benutzeroberfläche und kann durch die im Mobilgerät verfügbaren Beschleunigungsmesser und Gyros gesteuert werden. Text, Audio und Video werden in zwei Sprachen angeboten: Deutsch und Englisch. Es stehen Marker zur Verfügung, um hinterlegte zusätzliche Infos abzurufen.

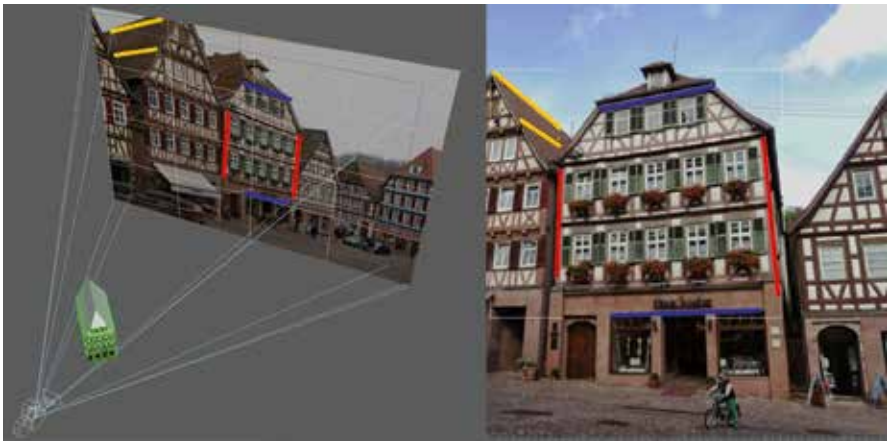


Abb. 24: Rekonstruktion der Virtuellen Kamera mittels Fluchtpunktgeometrie

Einen Einblick in die App „Calw Virtual Reality“ ist mit der Abb. 25 gegeben. Hier bewegt sich der Nutzer mit seinem Mobilgerät durch das 3D-Modell der Stadt Calw und kann zwischen den Epochen 2015 und 1890 umschalten. Der Unterschied zu Google Earth und Apple Maps liegt darin, dass alle Gebäude, Straßenschilder, Laternen, Bestuhlungen, etc. in echtem 3D modelliert sind. Gelbe Marker lassen Audiofiles abspielen, um Geschichten zu erzählen, die mit den Gebäuden zusammenhängen.

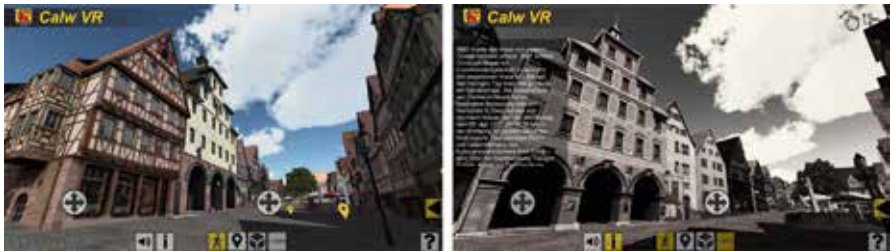


Abb. 25: (a) Calw VR App Gegenwart (2015) (b) Calw VR App Vergangenheit (1890)

Diese neue Art der Verwertung von photogrammetrischen Produkten belegt die Vernetzung und Integration der Photogrammetrie, die neben der Computer Graphik und Computer Vision einen wesentlichen Beitrag zum Serious Gaming liefern kann.

6. Schluss und Ausblick

Die digitale Photogrammetrie – in diesem Beitrag als Photogrammetrie 3.0 bezeichnet – liefert Punktwolken von hoher Qualität und vielen Details. Damit erschließen sich viele neue Anwendungen, vor allen Dingen für die Nachbardisziplinen der Photogrammetrie. Einige von ihnen wie das Autonome Fahren, die Computerspiele-Entwicklungen sowie die Bereiche Augmented und Virtual Reality haben bereits die Verfahren der Photogrammetrie gänzlich integriert, so dass die integrierte Photogrammetrie – also Photogrammetrie 4.0 - bereits Realität geworden ist.

Um für weitere Anwendungen ein interessanter Partner zu sein, muss die Photogrammetrie noch viele Herausforderungen annehmen, insbesondere die Interpretation der Punktwolken. Punktwolken, seien sie auch noch so hochaufgelöst und hochqualitativ, stellen lediglich ein Zwischenprodukt dar. Sie sind speicherhungrig - Datenvolumina von vielen GB oder sogar TB sind keine Seltenheit. Sicher gibt es Anwendungen, bei denen texturierte Punktwolken bereits ausreichen, wie Beispiele der Archivierung von Baudenkmälern belegen. Gefilterte und vermaschte Punktwolken beeindrucken als „3D Fly-overs“, wie Google Earth, Bing Maps 3D und Apple Maps demonstrieren. Doch dies sind alles „Quick-and-dirty“ Visualisierungen – es fehlt die Vektorisierung!

Die Photogrammetrie 4.0 muss in der Interpretation von Punktwolken neue Wege gehen, wir benötigen Auswertestrategien für die halb- und vollautomatische Vektorisierung. Hier ist die Wissenschaft gefordert, um lebendige Gebäude- und Stadtmodelle bereitzustellen. Eine Augmentierung in Form von Stadtmobiliar, Vegetation und Avatars wird helfen, die Realität in eine spannende Virtualität zu überführen.

Neue Visualisierungshilfsmittel wie Game Engines (z. B. Unity, Blender) sowie VR-Sichtgeräte (z. B. Oculus Rift, Google Cardboard, HTC VIVE) helfen dabei.

Die realitätsgetreue 3D-Modellierung stellt eine große Herausforderung dar. Hier muss sich die Photogrammetrie 4.0 behaupten und konkurriert mit den Methoden der Computer Vision und Computer Graphik. Es bleiben jedoch für jeden Fachbereich genügend Aufgaben in der Zukunft, vor allem auch im Hinblick auf das neue, große Thema der Digitalisierung, die alle Bereiche der Industrie, Verwaltung und des Alltags umfasst.

Referenzen

Albertz, J. (1991). Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 204 S.

Baltsavias, E. P. Gruen, A. & L. Van Gool, Eds. (2001): Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III). A. A. Balkema Publishers, Lisse, 415p.

Brenner, C. (2000): Dreidimensionale Gebäuderekonstruktion aus digitalen Oberflächenmodellen und Grundrissen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 530, München.

Fritsch, D. & D. Hobbie, Eds. (1993): Photogrammetric Week,93. Wichmann, Karlsruhe, 318 p.

Fritsch, D. (1993): Photogrammetry and Geographic Information Systems – Evolution instead of Revolution. In: Photogrammetric Week '93, Eds. D. Fritsch&D. Hobbie, Wichmann, Karlsruhe, pp. 3-10.

Fritsch, D. & R. Spiller, Eds. (1999): Photogrammetric Week '99. Wichmann Verlag, Heidelberg, 380p.

Fritsch, D. (1999): Virtual Cities and Landscape Models – What has Photogrammetry to Offer? In: Photogrammetric Week '99, Eds. D. Fritsch&R. Spiller, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 3-14.

Fritsch, D., Ed. (2015): Photogrammetric Week'15. Wichmann Verlag, VDE Verlag, Berlin and Offenbach, 394p.

Fritsch, D. (2015): Some Stuttgart Highlights of Photogrammetry and Remote Sensing. In: Photogrammetric Week '15, Ed. D. Fritsch, Wichmann Verlag, VDE Verlag, Berlin and Offenbach, pp. 3-20.

Fritsch, D. (2017): Photogrammetrische Auswertung digitaler Bilder – Neue Methoden der Kamerakalibration, dichten Bildzuordnung und Interpretation von Punktwolken. In: Photogrammetrie und Fernerkundung, Ed. C. Heipke, Springer, Berlin, S. 157-196.

Hartley, R. & A. Zisserman (2000): Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, New York, 655p.

Heipke, C. Ed. (2017): Photogrammetrie und Fernerkundung. Springer, Berlin, 839 S.

Hirschmueller, H. (2005): Accurate and efficient Stereo Processing by Semi-global Matching and Mutual Information. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego, Vol. 2, pp. 807-814

Hobbie, D. (2010): Die Entwicklung photogrammetrischer Verfahren und Instrumente bei Carl Zeiss in Oberkochen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe E, Heft. Nr. 30, München, 144 S.

Kada, M. (2007): Zur maßstabsabhängigen Erzeugung von 3D-Stadtmodellen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 590, München.

Konecny, G. & G. Lehmann (1985): Photogrammetrie. De Gruyter Verlag, Berlin.

Kraus, K. (1994): Photogrammetrie. Band 1. Dümmler Verlag, Bonn, 394 S.

Luhmann, T. (2003): Nahbereichsphotogrammetrie. Wichmann Verlag, Heidelberg, 586 S.

Mikhail, M. E., Bethel, S. J. & J. C. McGlone (2001): Introduction to Modern Photogrammetry. John Wiley & Sons, New York, 479p.

Reed, H. A. (1888): Photography Applied to Surveying. J. Wiley & Sons, New York, 68p.

Schwidefsky, K. & F. Ackermann (1976): Photogrammetrie. B. G. Teubner, Stuttgart, 384 S.

Schenk, T. (1999): Digital Photogrammetry. TerraScience, Laurelville, 428 p.

Schneider, R. (2006): Die Kölner Kirchen – Photographiert um 1900. Nicolaische Verlagsbuchhandlung, Berlin, 142 S. ■■■