

Photogrammetrie: Historie, praktischer Einsatz

Dr. Erwin Kruck



Gesellschaft für Industriephotogrammetrie mbH
Leibnizstr. 28, D-73431 Aalen, Germany

Einführung

Ein einzelner kurzer Beitrag über die Photogrammetrie kann natürlich nicht die gesamte Palette der Möglichkeiten und Anwendungen darstellen. Es wird daher nur einen kurzen Einblick in die wichtigsten Methoden der Photogrammetrie gegeben. Anschließend werden Anwendungen in der Industrie und im Kraftwerksbau aufgezeigt. Ein einleitender Rückblick auf die wichtigsten Schritte der Entwicklung ist dabei für das Verständnis sehr hilfreich.

1. Historische Entwicklung und Grundlagen der Bildmessung

Vor etwa 140 Jahren kamen der französische Leutnant Laussedat und der deutsche Architekt Albrecht Meydenbauer unabhängig voneinander auf den Gedanken, anstehende Vermessungsaufgaben mit Hilfe von Fotos durchzuführen. Während Laussedat Aufnahmen von einem Ballon aus machte um topographische Karten herzustellen, beschäftigten Meydenbauer hauptsächlich Vermessung und Darstellung von Bauwerken. Meydenbauer entwickelte Aufnahme- und Auswertetechniken und baute auch die notwendigen Kameras. Noch heute ist als Folge seiner Arbeiten ein sehr umfangreiches Archiv von Glasplatten mit den Aufnahmen historischer Gebäude zu bewundern.

1.1 Analoge Stereoauswertung

Maßgeblich für den Durchbruch der photogrammetrischen Techniken war die Erfindung der Stereophotogrammetrie durch Carl Pulfrich im Jahre 1901. Dabei wird ein Objekt mit zwei Aufnahmen unterschiedlicher Perspektive aber möglichst parallelen Aufnahmerichtungen erfaßt. Die Auswertung geschah anfangs rechnerisch. Im Laufe der nächsten 50 Jahre wurden dann weltweit viele aufwendige optische und mechanische Geräte höchster Präzision zur Auswertung solcher Aufnahmen entwickelt.

Dabei wird jeweils das linke Bild dem linken Auge, und das rechte Bild dem rechten Auge des Auswerters zugeführt. Nach der „Orientierung“ eines Bildpaares verschmelzen beide Bilder im Gehirn des Betrachters zu einem räumlichen Objektmodell. Mit Hilfe einer räumlichen Meßmarke ist es dann möglich, das Objekt dreidimensional nachzufahren. Die Spur dieser Meß-

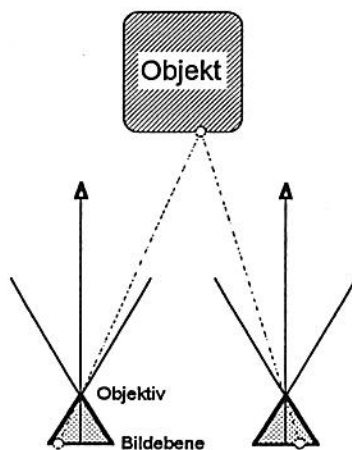


Abb. 1 Stereoaufnahme

markenbewegungen ergibt auf einen Zeichentisch übertragen das gewünscht Objektabbild.

Der *Orientierung* kommt dabei stets große Bedeutung zu. Sie dient dazu, genau die Situation während der Aufnahme der Bilder mechanisch nachzubilden. Sie erfolgt in zwei Schritten:

1. Die relative Orientierung bringt die beiden Bilder durch räumliche mechanische Drehungen und Verschiebungen in diejenige gegenseitige Lage, die sie auch während der Aufnahme hatten. Damit entsteht bereits das räumliche Modell.
2. Die absolute Orientierung ordnet dieses Raummodell mit Hilfe von Paßpunkten einem Koordinatensystem zu. Auch diese Zuordnung erfolgt mechanisch. Damit erhält man bei der Auswertung unmittelbar absolute Koordinaten.

Da all diese Prozesse rein mechanisch ohne weitere Berechnungen ablaufen, wird diese Vorgehensweise als analoge Photogrammetrie bezeichnet.

Parallel zu den Auswertegeräten wurden auch Präzisionskameras sowohl für den terrestrischen Einsatz, als auch für Luftbildanwendungen entwickelt. Diese Kameras sind besonders stabil, haben eine Präzisionsoptik und große Bildformate bis $23 \times 23 \text{ cm}^2$. Sie werden stets werkseitig kalibriert und regelmäßig überwacht.

Für die Herstellung topographischer Karten konnte sich die Photogrammetrie schnell als Standard durchsetzen. Auch für die Vermessung und Darstellung aufwendiger Architekturen gibt es keine wirtschaftliche alternative zur Photogrammetrie.

Sobald jedoch höchste Genauigkeiten gefordert waren, wie in der Kataster- oder der Industrievermessung, stießen die mechanischen Auswerteprozesse der Analoggeräte an die Grenzen der Möglichkeiten. Auch in Bezug auf die Flexibilität waren diesen Geräten durch ihre Konstruktion enge Grenzen gesetzt.

1.2. Analytische Plotter

Diese Situation hat sich durch die Erfindung der analytischen Plotter in den 70er Jahren grundlegend geändert. Bei gleichem mechanischen Aufwand konnte das Genauigkeitspotential fast um den Faktor 10 gesteigert werden. Damit bestehen von der Genauigkeit her keine Beschränkungen mehr für den Einsatz der Photogrammetrie in der Industrievermessung. Trotzdem hat sich die Bildmeßtechnik in der Industrie bisher nur an wenigen Stellen zu einem Standard entwickelt. Dies

liegt wohl daran, daß die Auswertesoftware bisher hauptsächlich auf die Herstellung topographischer Karten zugeschnitten war.

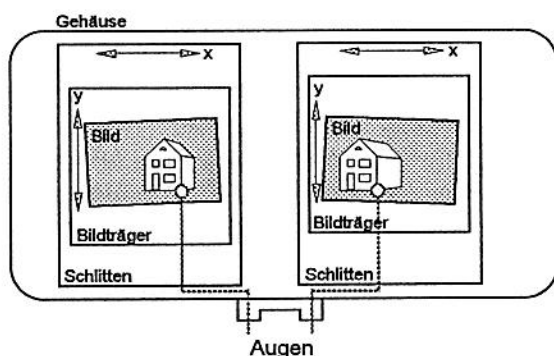


Abb. 2 Aufbau des analytischen Plotters

Das Prinzip der analytischen Plotter unterscheidet sich deutlich von dem der analogen Geräte. Die Aufnahmesituation wird nicht mehr durch Drehungen und Verschiebungen wiederhergestellt, sondern rein rechnerisch. Zwei identische Bildträger sind je auf einem Schlitten montiert. Jeder Schlitten kann sich im Gehäuse in x-Richtung bewegen und jeder Bildträger auf dem Schlitten in y-Richtung. In der Mitte ist je ein festes Betrachtungssystem installiert. Die Bilder (Abb. 2) bewegen sich rechnergesteuert über die festen Meßmarken. Im Steuerrechner wird ein Register mit den aktuellen Objektpunktkoordinaten X, Y, Z geführt. Der Inhalt dieses Registers kann mit einem Joystick, einer Maus oder einer

Rändelscheibe verändert werden. Ein Realtime-Prozess rechnet die Koordinaten dieser Registers 50 mal pro Sekunde mit Hilfe der Gleichung der Zentralperspektiven Abbildung und den vorab bestimmten Orientierungsdaten der Bilder in jedes Bild um und bewegt die Bildträger soweit, daß die berechneten Bildkoordinaten genau über den Meßmarken stehen. Der Operateur steuert die

Meßmarke dreidimensional durch den Objektraum und kann Auswertungen durchführen, die dann digital in Dateien abgelegt werden.

Diese analytischen Plotter bieten nicht nur eine bequemere Auswertung und befreien von den Beschränkungen der Analoggeräte, sondern es bietet sich eine völlig neue Arbeitsmethodik an. Während ein Analoggerät eine Einheit für sich war, die als Ergebnis eine Strichzeichnung lieferte, können analytische Plotter als intelligente 3D-Eingabeeinheiten direkt an eine CAD-Station angeschlossen werden, die auf die speziellen Anforderungen des Anwenders zugeschnitten ist. Zusätzlich zur Geometrie können Objektbezeichnungen und Klassifizierungen mit abgelegt werden. Der Auswerter sollte daher ein Fachmann bezüglich des auszuwertenden Objektes sein, also z.B. ein Maschinenbauer, wenn Industrieobjekte auszuwerten sind.

1.3 Digitale 3-D-Arbeitsstationen

Der Gedanke, Bilder mit hoher Auflösung direkt im Rechner zu speichern wird schon seit vielen Jahren verfolgt. Doch erst jetzt stehen Rechner mit ausreichenden Rechenleistungen und Speicherkapazitäten zur Verfügung, die eine Verwendung solcher Bilder in größerer Anzahl und mit akzeptablen Geschwindigkeiten zu konkurrenzfähigen Preisen ermöglichen. An die Stelle analytischer Plotter treten daher allmählich die digitalen Stereoplottern. Sie arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie die analytischen Plotter: die digitalen Stereobilder werden über eine feste Meßmarke bewegt. Durch eine LCD-Shutter-Brille jedem Auge nur ein Bild zugeführt und es entsteht wieder der Raumeindruck im Gehirn des Betrachters. Bezüglich weiterer Details wird auf die weiteren Beiträge und Demonstrationen verwiesen.

Im Gegensatz zu den analytischen Plottern können jedoch mehrere Betrachter gleichzeitig das Objekt betrachten. Außerdem ergeben sich völlig neue Möglichkeiten zur computergestützten und zur automatischen Bildauswertung. Beispielhaft sollen hier automatische Punktmessung und Linienverfolgung genannt werden. Die nächsten Schritte sind das automatische Bilderkennen und Bildverstehen sowie das extrahieren bestimmter gesuchter Objektinformationen. Um das gegebene Potential richtig auszuschöpfen werden noch Jahrzehnte Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig sein. Für bestimmte Aufgaben sind jedoch bereits beachtliche Erfolge erzielt worden, wie später gezeigt wird.

Nach diesen Zukunftsperspektiven zurück zu den heutigen Möglichkeiten. Vor der Bildauswertung stehen noch die wesentlichen Punkte der Bildaufnahme und der Orientierung der Bilder, die noch vor der Darstellung ausgewählter Projekte betrachtet werden sollen.

2. Kameras zur Bildaufnahme

Normale handelsübliche Amateur- und Profikameras sind für photogrammetrische Auswertungen nicht geeignet. Folgende Anforderungen sind für genaue Auswertungen zu stellen:

- Die innere Geometrie (innere Orientierung) der Kamera muß konstant und genau bekannt sein. D.h.: Die Bildweite und das Zentrum der zentralperspektiven Abbildung müssen in Bezug auf die Bildebene mit einer Genauigkeit von etwa 10 µm kalibriert sein. Die Verzeichnung soll gering sein und muß ebenfalls genau bekannt sein. Hier ist eine Genauigkeit von etwa 1 µm zu fordern.
- Der Film muß plan in einer genau definierten Bildebene liegen. Dies wird bei Meßkameras durch einen plangeschliffenen Anlegerahmen und eine plangeschliffene Ansaugplatte erreicht, an die der Film angesaugt wird.

Auf weitere Einzelheiten soll hier nicht eingegangen werden. Es wird jedoch darauf hingewiesen, daß die Qualität der Kameras stets entscheidend für die Genauigkeit des Ergebnisses ist.

Für Luftbildanwendungen stehen „Reihenmeßkameras“ mit dem Bildformat 23 * 23 cm² zur Verfügung. Digitale Kameras, mit einem vergleichbaren Bildinhalt sind für die nächsten Jahre nicht in Sicht. Für die digitale Weiterverarbeitung werden die Bilder mit Präzisionsscannern digitalisiert.

Für terrestrische Anwendungen stehen mehrere Rollfilm- und Planfilmkameras zur Verfügung. Die Bildformate reichen von $6 * 6 \text{ cm}^2$ bis $13 * 18 \text{ cm}^2$.

Auch sind bereits digitale Kameras im Einsatz. Besonders hervorzuheben ist hier wegen der hohen Auflösung von etwa $14000 * 10400$ Pixeln die UMK-Scan von Carl Zeiss Jena. Diese Meßkamera hat jedoch den Nachteil, daß für den Bildeinzug mehrere Minuten benötigt werden. Damit fällt ein Einsatz für bewegte Objekte aus. Ansonsten ist diese Kamera uneingeschränkt für den industriellen Einsatz nutzbar.

In jedem Einzelfall ist zu prüfen, welche Kamera für ein Projekt geeignet ist, insbesondere ist zu prüfen, ob die oben genannten Kriterien erwarten lassen, daß die Kamera die gestellten Genauigkeitsanforderungen erfüllen kann.

3. Orientierung der Meßbilder

Bevor mit der eigentlichen Bildauswertung begonnen werden kann, ist die Orientierung aller Bilder zu bestimmen. Anders als bei dem in Kap. 1.1 beschriebenen Verfahren geschieht dies heute nicht mehr pro Bildpaar, sondern in einem Optimierungsprozeß, der sogenannten Bündelausgleichung, in dem die Lage der Projektionszentren und Aufnahmerichtungen (Orientierungen) aller Bilder auf einmal bestimmt wird. Dabei werden alle zur Verfügung stehenden Meßinformationen einbezogen. Diese Bündelausgleichung ist Basis für die nachfolgende Stereoauswertung.

Die GIP entwickelt und vertreibt das für diese Aufgabe weltweit führende Softwarepaket BINGO-F. In der Anlage werden die Leistungsmerkmale dieser Software kurz dargestellt und geben einen kurzen Eindruck von den komplexen Möglichkeiten.

4. Anwendungen

Jede Anwendung der Photogrammetrie ist sorgfältig zu planen. Für wiederkehrende Aufgaben können standardisierte Verfahren entwickelt werden, wie dies z.B. für die Herstellung topographischer Karten der Fall ist. Aber auch für viele industrielle Anwendungen gibt es standardisierte Anwendungen. Nachfolgend soll dies an Beispielen gezeigt werden.

4.1 Punktbestimmung

Bei vielen Anwendungen der Photogrammetrie ist ein Objekt nur in konkreten repräsentativen und besonders markierten (signalisierten) Punkten zu bestimmen. Hier ist nur eine geeignete Aufnahmeanordnung zu standardisieren. Die Meßpunkte können dann in den (digitalen) Bildern manuell oder automatisch gemessen werden. Nach der anschließenden Bündelausgleichung können die Punktkoordinaten als Vermessungsergebnis abgeliefert werden.

Diese reine Punktbestimmung ist die einfachste Form einer photogrammetrischen Vermessung. Beispielhaft sei hierzu die Messung von großen Flugzeugteilen für den Airbus genannt, bei denen dieses Verfahren eingesetzt wird.

4.2 Fahrzeugvermessung

Für die Entwicklung der Form eines neuen PKW sind während der Designphase regelmäßig Messungen der von Hand geformten Fahrzeugoberfläche erforderlich. In einer Meßmaschine dauert dieser Vorgang etwa 5 Werkzeuge und blockiert während dieser Zeit die Weiterentwicklung. Bei mehreren großen Automobilherstellern (VW, Audi, Autolatina, Mercedes Benz) wird daher ein speziell für den Zweck der Oberflächenvermessung entwickeltes photogrammetrisches System namens InduSURF (industrial surface) eingesetzt. Die Zeit, die das Fahrzeug für die Vermessung zur Verfügung stehen muß, reduziert sich damit auf etwa vier Stunden.

Die Fahrzeugoberfläche wird nach Aufnahme und Bündelausgleichung automatisch durch digitale Korrelation ohne Operateur vermessen und in digitaler Form bereitgestellt. Hier liefert die Photogrammetrie also als Ergebnis zusätzlich zu den Punkten der Bündelausgleichung noch die Oberfläche des Objektes mit allen feinen Strukturen.

Das InduSURF System ist aufgrund seiner Konzeption auch für die automatische Messung anderer relativ glatter Objekte wie Parabolantennen oder Kessel geeignet.

4.3 Stahlindustrie

Auch in der Stahlindustrie wird das InduSURF-System eingesetzt. Dort ist in regelmäßigen Abständen im laufenden Betrieb die noch verbliebene Wandstärke der Schamottauskleidung der 700 - 1000 C heißen, 4.5 m hohen Stahlveredlungsbehälter (Ladles) zu kontrollieren. Die genaue Kontrolle bringt erhebliche Kosteneinsparungen, eine Fehldiagnose dagegen kann zum Durchschmelzen des Behälters führen.

4.4 Formkontrolle eines Kühlturms

In den 70er Jahren war es zu mehreren Einstürzen von Kraftwerkskühltürmen gekommen. Im Zeitraum 1980-83 wurde vom Verfasser unter Leitung von Prof. B.Wrobel (jetzt Darmstadt) die Vermessung eines 162 m hohen Kühlturms durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, daß mit Hilfe der Photogrammetrie auch große, nicht begehbare Objekte mit hoher Genauigkeit (2 mm) vermessen werden können. Wegen fehlender weiterer Nachfrage wurde das Projekt dann jedoch nicht weiter verfolgt.

4.5 Vermessungen in Kraftwerken

Für den Austausch von Teilen wird die Photogrammetrie an vielen Stellen als vorbereitendes Meßverfahren eingesetzt. Im Vergleich zur konventionellen Vermessung kann die erforderliche Zeit für den Stillstand dadurch vielfach im Verhältnis 5:1 reduziert werden.

Auch für Abnahmemessungen von Kränen oder zur Bestandsdokumentation wird die Photogrammetrie eingesetzt.

4.5 Rohrleitungsvermessung

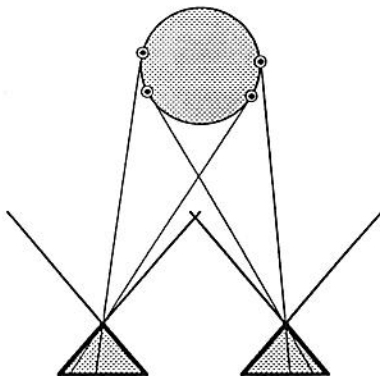


Abb. 3 Abbildung einer Rohrleitung

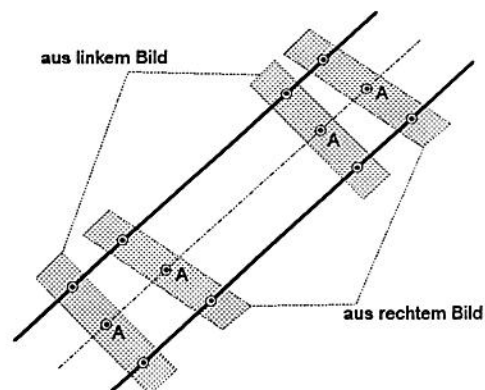


Abb. 4 Achspunkte der Rohrleitung

Die Bestandsaufnahme von Kraftwerken und Anlagen in der chemischen Industrie ist eine aktuelle Aufgabe der Anlagenbetreiber. Hier sind in den nächsten Jahren erhebliche Arbeiten und Investitionen erforderlich. Am Markt stehen heute ausgereifte Systeme zur photogrammetrischen Bearbeitung solcher Aufgaben zur Verfügung, auf die im Rahmen dieser Tagung an anderer Stelle eingegangen wird. Daher soll hier nicht auf die Anwendung, jedoch auf die photogrammetrischen Besonderheiten dieses Verfahrens eingegangen werden:

Wie Abb. 1 zeigt, werden die Koordinaten eines Punktes in der Photogrammetrie durch den Schnitt zweier Strahlen bestimmt. Voraussetzung dafür ist, daß man denselben Punkt in beiden Bildern eindeutig identifizieren und somit messen kann. Bei Rohrleitungen ist dies wegen der

homogenen Oberfläche jedoch nur ausnahmsweise der Fall. Außerdem sind im linken und rechten Bild nie dieselben Teile des Rohres als Rand der Rohrleitung abgebildet, wie Abb. 3 zeigt. Eine direkte Stereomessung ist daher nicht möglich. Man kann jedoch den Rand eines Rohres monoskopisch, d.h. in jedem Bild für sich an beiden Seiten messen und daraus die Mitte, also die Achse der Rohrleitung bestimmen. In Abb. 4 ist eine Reihe solcher Achspunkte mit A bezeichnet. Obwohl jeder Achspunkt nur in je einem Bild ermittelt ist, kann die räumliche Lage der Achse daraus durch iterative Ausgleichung bestimmt werden.

Dies ist ein typisches Beispiel für eine Sonderentwicklung für eine spezielle Anwendung.

5. *Schlußbemerkungen*

Die Photogrammetrie besitzt für die Industrievermessung ein enormes Potential, daß durch konsequente Entwicklung und Anwendung genutzt werden sollte. Für die nächsten Jahre sind hier insbesondere durch die neuen Möglichkeiten der digitalen Bildaufnahme und Verarbeitung erhebliche Zuwachsraten zu erwarten.

Abschließend seien noch die Vorteile der Photogrammetrie gegenüber klassischen Meßverfahren tabellarisch dargestellt.

Vorteile der Photogrammetrie

- Hohe Meßgenauigkeit
- Kurze Meßzeit
- Berührungslose Vermessung
- Hohe Informationsdichte
- Meßgerät kommt zum Objekt
- Einfache Archivierung
- Vollständige Objektdokumentation
- Bildauswertung kann zu einem beliebigen späteren Zeitpunkt erfolgen