

# 1 Einführung

## 1.1 Übersicht

### 1.1.1 Inhalt

Kapitel 1 gibt zunächst einen Überblick über grundlegende Fragen der Photogrammetrie unter Berücksichtigung besonderer Aspekte des Nahbereiches. Nach einer Erläuterung prinzipieller Methoden und Systembetrachtungen werden Anwendungsschwerpunkte vorgestellt. Ein kurzer geschichtlicher Rückblick auf die Entstehung der Nahbereichsphotogrammetrie beschließt diesen Abschnitt.

In Kapitel 2 werden mathematische Grundlagen vermittelt. Hierzu gehört die Definition wichtiger Koordinatensysteme ebenso wie die Ableitung grundlegender geometrischer Transformationen, die für das Verständnis der folgenden Kapitel unerlässlich sind. Weiterhin wird eine Abhandlung wichtiger geometrischer Elemente zur Objektrepräsentation gegeben. Schließlich folgt eine Zusammenfassung ausgewählter Fragen der Ausgleichungsrechnung.

Kapitel 3 befasst sich mit Aspekten der photogrammetrischen Aufnahmetechnik im Nahbereich. Nach einer Einführung über physikalische Grundlagen werden grundlegende Aufnahmekonzepte erläutert. Es folgen geometrische Grundlagen sowie Komponenten und Systeme für die digitale Bilderfassung. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenstellung wichtiger Aspekte zu Reflexion, Signalisierung, Projektions- und Beleuchtungstechniken.

In Kapitel 4 werden analytische Verfahren zur Bildorientierung und Objektrekonstruktion vorgestellt, unterteilt nach Einbild-, Stereo- und Mehrbildverfahren. Es folgen Verfahren für Sondergebiete wie Panorama- und Mehrmedien- bzw. Unterwasserphotogrammetrie.

Kapitel 5 fasst wichtige Methoden der digitalen photogrammetrischen Bildauswertung zusammen. Aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der digitalen Bildanalyse werden hier vor allem solche Verfahren diskutiert, die der messtechnischen Auswertung und der 3D-Objektrekonstruktion dienen, also überwiegend Verfahren zur Merkmalerkennung und Bildzuordnung (Matching).

Photogrammetrische Messsysteme für den Nahbereich werden in Kapitel 6 vorgestellt. Zunächst werden Zielmarkentypen und -anordnungen sowie Lösungen zur Definition von Maßstab und Referenzkoordinatensystemen besprochen. Die Messsysteme gliedern sich in interaktive Systeme, taktile und laserbasierte Messsysteme, Systeme zur Messung punkt- und flächenhafter Informationen, Systeme zur Erfassung dynamischer Vorgänge sowie Systeme auf mobilen Plattformen, z.B. Drohnen. Abschließend werden Lösungen zur 3D-Visualisierung und Projektion behandelt.

In Kapitel 7 werden Aufnahmeanordnungen und Lösungskonzepte für spezielle Aufgaben der Nahbereichsphotogrammetrie besprochen. Nach einer Einführung in die Aufnahmeplanung und Netzoptimierung folgen Hinweise zu Qualitätskriterien und Genauigkeitsanalysen. Strategien zu Kamera- und Systemkalibrierungen schließen das Kapitel ab.

Kapitel 8 schließlich zeigt anhand einiger exemplarischer Projekte die Einsatzmöglichkeiten in wichtigen Anwendungsgebieten der Nahbereichsphotogrammetrie wie Architektur und Kulturerbe, Ingenieur- und Bauwesen, Industrie, Medizin, Forensik und Naturwissenschaften.

### 1.1.2 Literatur

Im Text wird auf verwendete oder ergänzende Publikationen nur dann direkt verwiesen, wenn es für das Verständnis einzelner Abschnitte zwingend erforderlich ist. Kapitel 9 enthält eine umfangreiche Sammlung thematisch geordneter Lehrbücher sowie für jedes Hauptkapitel eine strukturierte Liste von Referenzen und weiterführender Literatur. Im Allgemeinen wurde dabei leicht verfügbaren, deutschsprachigen Publikationen der Vorzug gegeben. Daneben geben die Tagungsbände wissenschaftlicher Gesellschaften, Konferenzen und Arbeitskreise sowie Internetseiten von Unternehmen und Hochschulen aktuelle Informationen zu den oben genannten Themengebieten.

## 1.2 Prinzipielle Methoden

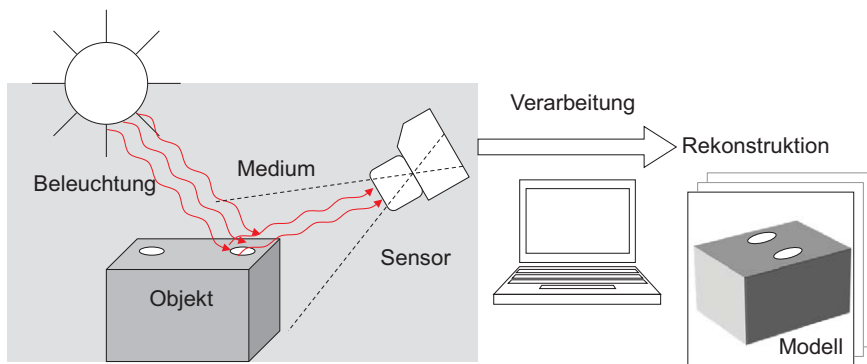
### 1.2.1 Der photogrammetrische Prozess

Unter *Photogrammetrie* versteht man allgemein Methoden, aus einem oder mehreren Bildern eines beliebigen Objektes indirekt dessen Form und Lage durch Bildmessungen sowie dessen inhaltliche Beschreibung durch Bildinterpretation zu gewinnen. Photogrammetrische Verfahren können also grundsätzlich in allen Anwendungsbereichen eingesetzt werden, in denen ein Messobjekt fotografisch abgebildet und ausgewertet werden kann. Primäres Ziel einer photogrammetrischen Messung ist die exakte dreidimensionale geometrische Rekonstruktion des Objektes, wobei das Objekt in digitaler (Koordinaten, Punktwolken, 3D-Modelle, abgeleitete geometrische Elemente) oder grafischer Form (Bilder, Pläne, Karten, 3D-Visualisierungen) modelliert wird. Daneben stellt das Bild einen Informationsspeicher dar, auf den zu jedem Zeitpunkt, auch für eine inhaltliche Interpretation, zurückgegriffen werden kann.



**Abb. 1.1:** Photogrammetrische Messbilder

Abb. 1.1 zeigt beispielhaft eine photogrammetrische *Bildaufnahme*. Die Abbildung eines dreidimensionalen Gegenstandes in ein zweidimensionales Bild unterliegt in vielfältiger Hinsicht einem Informationsverlust. Zunächst können Objektbereiche, die nicht im Bild sichtbar sind, aus diesem Bild heraus nicht rekonstruiert werden. Dazu zählen verdeckte Teile des Objektes (z.B. Rückseite des Gebäudes) ebenso wie solche Stellen, die aufgrund mangelnden Kontrastes oder zu geringer Größe nicht mehr erkannt werden können. Weiterhin werden geometrische Veränderungen durch die dreidimensionale Gestalt des Objektes, die räumliche Anordnung von Kamera und Gegenstand, die projektive Abbildung sowie mögliche optische Abbildungsfehler verursacht. Schließlich treten auch noch radiometrische (farbliche) Veränderungen auf, da die Aufzeichnung der vom Objekt reflektierten elektromagnetischen Strahlung durch Eigenschaften der Beleuchtung, vorhandenen Medien (Luft, Glas) und des lichtempfindlichen Sensors (Film, Detektor) beeinflusst wird.



**Abb. 1.2:** Vom Objekt zum Ergebnis

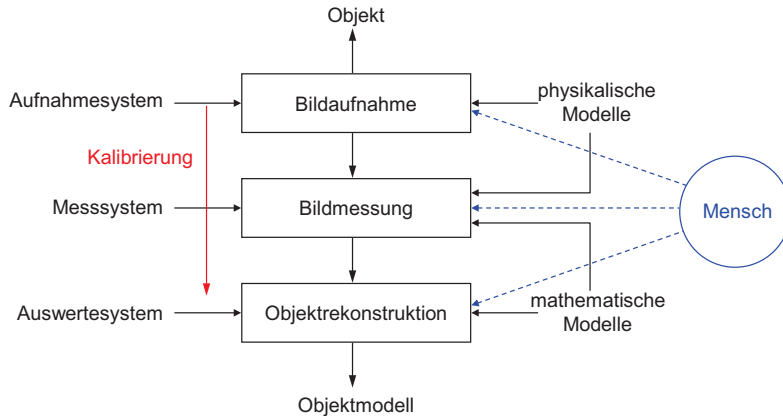
Zur exakten Rekonstruktion eines Objektes aus Bildern ist es daher notwendig, zunächst den physikalischen (optischen) Entstehungsprozess einer Bildaufnahme zu beschreiben. Dazu gehören alle an diesem Prozess beteiligten Komponenten wie Lichtquellen, Eigenschaften der Objektoberfläche und vom Licht durchlaufene Medien ebenso wie Sensor- und Kameratechnik, Bildverarbeitung, Objektrekonstruktion und Weiterverarbeitung (Abb. 1.2).

Für die Bildinterpretation und Bildmessung werden Methoden benötigt, die eine Identifizierung eines abgebildeten Objektpunktes aus der Helligkeits- oder Farbverteilung im Bild gestatten. Zu jedem Bildpunkt können dann Messwerte in Form radiometrischer Informationen (Intensität, Grauwert, Farbwert) und geometrischer Informationen (Lage im Bild) gewonnen werden. Dazu sind ggf. geeignete geometrische und radiometrische Kalibrierverfahren erforderlich.

Aus den vorgenommenen Bildmessungen kann schließlich das Objekt rekonstruiert und modelliert werden, indem basierend auf mathematischen Modellen eine Transformation zwischen Bild- und Objektraum bestimmt wird. Diese Transformation beschreibt die oben genannten Vorgänge von Bildaufnahme und Bildmessung.

Abb. 1.3 fasst diesen Vorgang vereinfacht zusammen. Während auf der linken Seite die wesentlichen instrumentellen Komponenten dargestellt werden, beschreibt die rechte Seite die

methodischen Aspekte dieses Prozesses. Wissen, Erfahrung und Handeln des Menschen spielen neben den physikalischen und mathematischen Modellen eine wesentliche Rolle. Sie bestimmen, inwieweit das rekonstruierte Modell dem aufgenommenen Objekt entspricht bzw. der praktischen Aufgabenstellung genügt.



**Abb. 1.3:** Der photogrammetrische Prozess: vom Objekt zum Modell

## 1.2.2 Einteilungen der Photogrammetrie

Die *Nahbereichsphotogrammetrie* ist ein Teilgebiet der Photogrammetrie, hat aber aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten einen starken interdisziplinären Charakter, sodass enge Berührungspunkte sowohl mit anderen Messverfahren als auch mit weiteren methodischen Disziplinen bestehen.

Neben den Grundlagen aus Mathematik, Physik und Informatik ist die Nahbereichsphotogrammetrie eng verknüpft mit Fachgebieten aus Grafik und Bildverarbeitung, z.B. mit Computergrafik, Computer Vision, Virtual/Augmented Reality (AR/VR), digitaler Bildverarbeitung, Computer-Aided Design (CAD), Geoinformatik (GIS) und Kartographie bzw. Visualisierung.

Traditionell besitzt die Nahbereichsphotogrammetrie enge Verbindungen zur geodätischen Messtechnik, insbesondere bei der Ausgleichsrechnung und in der Ingenieurgeodäsie. Architektur und Kulturerbe sind seit Anbeginn der Photogrammetrie wichtige Anwendungsfelder. Daneben bringt der zunehmende industrielle Einsatz der Photogrammetrie zahlreiche Verknüpfungen zur Fertigungsmesstechnik und Qualitätssicherung mit sich. Weiterhin steigt der Bedarf optischer 3D-Messsysteme beim Einsatz autonomer Fahrzeuge oder auch in der Medizintechnik.

Betrachtet man nach Abb. 1.4 den Zusammenhang zwischen aufzunehmender Objektgröße und geforderter geometrischer Genauigkeit, liegt der überwiegende Einsatzschwerpunkt der Nahbereichsphotogrammetrie zwischen Objektgrößen von etwa 0.1 m bei Genauigkeiten bis unter 0.1 mm (Industrieanwendungen) und Objektgrößen von ca. 200 m bei Genauigkeiten im cm-Bereich (Architektur- und Ingenieur Anwendungen).

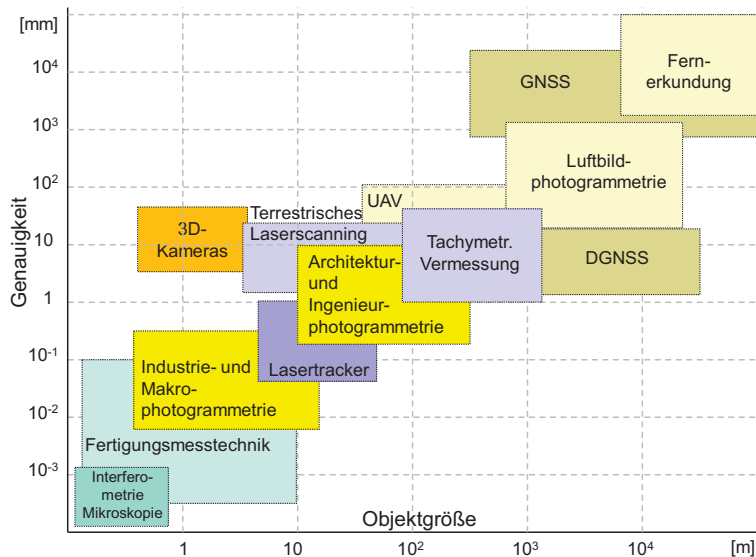


Abb. 1.4: Messverfahren in Abhängigkeit von Objektgröße und Genauigkeit (schematische Darstellung)

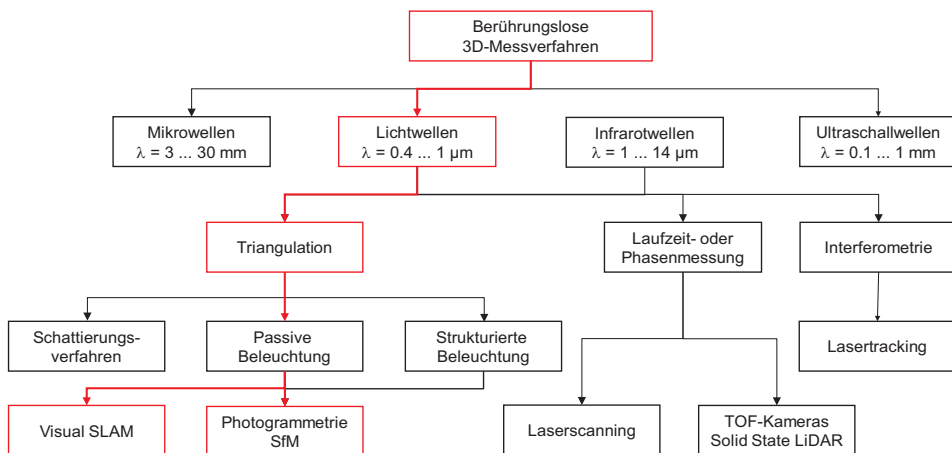


Abb. 1.5: Berührungslose Messverfahren

Bei den berührungslos arbeitenden 3D-Messverfahren haben optische Verfahren mit Licht als Informationsträger die größte Bedeutung. Nach Abb. 1.5 unterscheidet man vor allem folgende Messprinzipien auf der Basis von Lichtwellen:

- **Triangulationsverfahren:**

Photogrammetrie (Einbild-, Stereo- und Mehrbildauswertung), Structure-from-Motion (SfM) und bildbasiertes Simultaneous Localisation and Mapping (Visual SLAM), strukturierte Beleuchtung (Lichtschnitt, Streifenprojektion, Phasenmessung, Moiré-Verfahren), Fokusverfahren, Schattierungsverfahren u.a.

- Interferometrie:  
Optisch kohärente Laufzeitmessung, Holografie, Speckle-Interferometrie, Kohärenz-Radar, Laser Tracker.
- Laufzeitmessung:  
Entfernungsmessung mit optischer Modulationslaufzeitbestimmung, Puls-Modulation (Tachymeter, Laserscanner, TOF-Kameras)

Die Einteilung nach Abb. 1.5 zerfließt in der Praxis zunehmend, da Multisensorsysteme und hybride Messsysteme verschiedene Prinzipien nutzen und die spezifischen Vorteile kombinieren.

Photogrammetrie, insbesondere die Nahbereichsphotogrammetrie, wird in vielfältiger Weise begrifflich eingeteilt:

- Nach Aufnahmeort und -entfernung  $h$ :
  - Weltraumphotogrammetrie: Auswertung von Fernerkundungs- und Satellitenbildern,  $h > \text{ca. } 200 \text{ km}$
  - Luftbildphotogrammetrie: Auswertung von Luftbildern,  $h > \text{ca. } 300 \text{ m}$
  - UAV-Photogrammetrie: Auswertung von Luftbildern aus Drohnen,  $h < \text{ca. } 120 \text{ m}$
  - Terrestrische Photogrammetrie: Aufnahme von erdfesten Standorten
  - Nahbereichsphotogrammetrie: Aufnahmeentfernung  $h < \text{ca. } 300 \text{ m}$
  - Unterwasserphotogrammetrie: Objekterfassung im oder durch Wasser
  - Makrophotogrammetrie: Bildmaßstäbe  $> 1$  (Mikroskopaufnahmen)
  - Mobile Mapping: Aufnahme aus bewegten Plattformen  $h < \text{ca. } 100 \text{ m}$
- Nach Anzahl der auszuwertenden Bilder:
  - Einbildphotogrammetrie: Einzelbildauswertungen, Monoplotting, ebene Entzerrungen, Orthophotos
  - Stereophotogrammetrie: Zweibildauswertungen, stereoskopische Messungen
  - Mehrbildphotogrammetrie: beliebige Anzahl  $> 2$  Bilder, Bündeltriangulation
- Nach Aufnahme- und Auswertemethode:
  - Messtischphotogrammetrie: grafisch-zeichnerische Auswertung (bis ca. 1930)
  - Analogphotogrammetrie: analoge Kameras, optisch-mechanische Auswertesysteme (bis ca. 1980)
  - Analytische Photogrammetrie: analoge Bilder, rechnergesteuerte Auswertung (bis ca. 2000)
  - Digitale Photogrammetrie: digitale Bilder, digitale Auswertung (seit ca. 1985)
  - Videogrammetrie: digitale Videobilderfassung und Auswertung
  - Linienphotogrammetrie: Auswerteverfahren mit Geraden
  - Mehrmedienphotogrammetrie: Aufnahme durch Medien verschiedener Brechkraft
  - Panoramaphotogrammetrie: Aufnahme und Auswertung von Panoramabildern

- Nach Anwendungsgebieten und Sonstigem:
  - Architekturphotogrammetrie: Architektur, Denkmalpflege, Archäologie
  - Ingenieurphotogrammetrie: allgemeine ingenieurtechnische Anwendungen
  - Industriephotogrammetrie: industrielle Messtechnik
  - Forensische Photogrammetrie: Unfall- und Tatortvermessung
  - Shape from Stereo: Stereobildauswertung (Computer Vision)
  - Structure from Motion: Objektrekonstruktion aus vielen (bewegten) Bildern

### 1.2.3 Abbildungsmodell

Die Photogrammetrie ist ein dreidimensionales Messverfahren, dem die *zentralprojektive Abbildung* als mathematisches Modell zugrunde liegt (Abb. 1.6). Form und Lage des Objektes werden über die Rekonstruktion von Strahlenbündeln ermittelt, wobei jeder Bildpunkt  $P'$  zusammen mit dem *Projektionszentrum*  $O'$  eine Raumrichtung des entsprechenden Strahls zum Objektpunkt  $P$  festlegt. Sind die reale Abbildungsgeometrie in der Kamera (innere Orientierung) und die Lage des Aufnahmesystems im Raum (äußere Orientierung) bekannt, kann jeder Bildstrahl absolut im 3D-Raum beschrieben werden. Da Photogrammetrie prinzipiell eine Methode zur Messung von Richtungen (Winkel) ist, muss mindestens eine absolute Maßstabsinformation im Objektraum vorliegen, z.B. über eine gemessene Distanz oder bekannte Passpunkte.

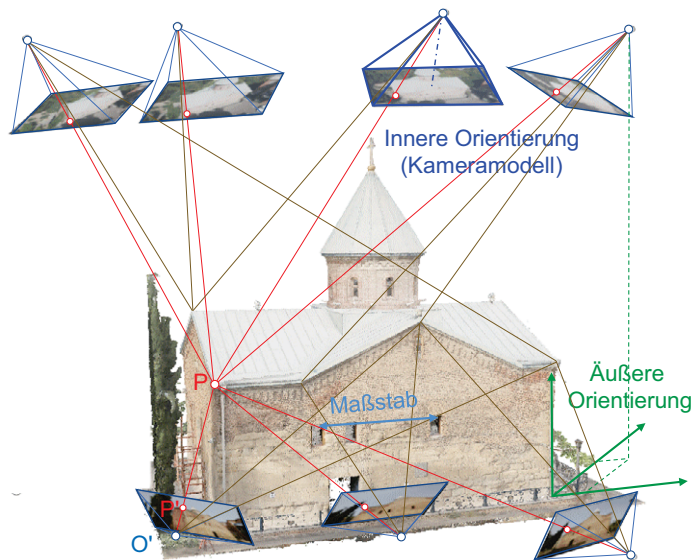


Abb. 1.6: Photogrammetrisches Messprinzip

Aus dem Schnitt von mindestens zwei korrespondierenden (homologen), räumlich verschiedenen Bildstrahlen lässt sich ein Objektpunkt dreidimensional bestimmen. In der Stereophotogrammetrie werden dazu zwei Aufnahmen verwendet, in der Mehrbildphotogrammetrie ist die Anzahl der dabei beteiligten Bilder grundsätzlich nicht begrenzt.