

1.8 Fotogrammetrie

In der Unfallrekonstruktion sind Fotos seit jeher eine wichtige Informationsquelle. Die fotografische Beweissicherung am Unfallort ist seit Jahrzehnten unverzichtbar, zumindest bei schweren Unfällen. Die Frage, inwieweit sich Maße aus diesen Fotos rekonstruieren lassen, drängt sich vor diesem Hintergrund geradezu auf – und wird von der Fotogrammetrie beantwortet.

Die Fotogrammetrie begann sich Ende des 19. Jahrhunderts als eigenständiges Teilgebiet der Vermessungskunde zu entwickeln. Bis in die 1980er Jahre hinein dominierten grafische Verfahren, die sich zumeist Spezialapparaturen bedienten. So war etwa der Einsatz von Stereomesskameras bei der Aufnahme schwerer Unfälle bis in die 1990er Jahre in Teilen Deutschlands gebräuchlich. Frühere Standardwerke zur Unfallrekonstruktion [B1] beschäftigten sich vornehmlich mit grafischen Verfahren zur Bildauswertung. Nach zaghaften Vorstößen in den 1980er Jahren [B2, G1] begannen sich Anfang der 1990er Jahre PC-gestützte numerische Verfahren in der Unfallrekonstruktion durchzusetzen und sind heute Standard.

Die Aufgabe, ein Kapitel über Fotogrammetrie für das vorliegende Buch zu verfassen, erwies sich als nicht trivial: Fotogrammetrie ist entweder ganz einfach («Kaufen Sie Programm xy.») oder extrem schwierig, wenn man tiefer einsteigen möchte. Letzteres liegt an der Entwicklung der Nahbereichs- aus der Luftbildfotogrammetrie und dem ganz anderen Genauigkeitsanspruch der Vermessungstechniker. Wer sich, wie der Unfallanalytiker, mit einer 2-D-Auswertung und einer Genauigkeit von vielleicht ± 5 cm zufrieden gibt, ist manche Sorge los, die den Fotogrammeter quält.

Wir werden deshalb im Folgenden versuchen, die Probleme möglichst praktisch anzugehen. Dabei beschränken wir uns thematisch auf das Auswerten von Fotos, die ohne spezielle Hilfsmittel (etwa Streifenlicht) aus der Hand oder von leicht erhöhter Position (z.B. aus einem Hubschrauber) geschossen wurden (sog. passive Nahbereichsfotogrammetrie); Luftbildaufnahmen werden im Kapitel «Vermessung» angesprochen. Aktive Verfahren, etwa der Einsatz von Laserscannern, sind im vorliegenden Kapitel ebenfalls kein Thema. Kurzum: Wir präsentieren nur einen schmalen Ausschnitt aus dem, was der Begriff «Fotogrammetrie» umfasst.

1.8.1 Aufnahmesituation

Im Hinblick auf die Aufnahmesituation lassen sich drei Arten von Fotos unterscheiden:

- speziell für die fotogrammetrische Auswertung gefertigte Aufnahmen
- Aufnahmen mit vorgegebener Anordnung, etwa bei Radarmessungen
- Fotos aus beliebigem Blickwinkel, geschossen von Polizeibeamten und Unfallbeteiligten.

Nur bei der ersten Kategorie hat der Unfallanalytiker Einfluss auf die Aufnahmeanordnung. Ist dies der Fall, so lautet die erste Regel: Die Aufnahmeebene sollte möglichst parallel zur fotografierten Ebene und die Brennweite möglichst lang sein. Diese Anweisung lässt sich beim Fotografieren von Fahrzeugen leicht befolgen, vgl. «Fotografische Dokumentation». Bei der Unfallaufnahme wird man kaum einen Fesselballon steigen lassen wollen, wie in [L1] vorgeschlagen, und wird daher nicht mehr als 10 m hoch hinaus kommen. Bis 6 ... 8 m lassen sich dazu Fensterputzerstangen verwenden, darüber hinaus sind spezielle Apparaturen [A1] erforderlich. Bei größeren Unfällen können Mutige in den Leiterwagen der Feuerwehr steigen und Einflussreiche einen Hubschrauber ordern.

Trotz aller Rechnerleistung gilt immer noch: Die planparallele Aufnahme (Fotoebene parallel zur aufgenommenen Ebene) ist am einfachsten und mit den geringsten Fehlern auszuwerten. Letzteres gilt besonders in dem Fall, in dem die Ebene nicht exakt plan ist, wie dies etwa bei der Karosserie-Außenhaut und bei etlichen Fahrbahnoberflächen der Fall ist.

Die Forderung nach langer Brennweite ergibt sich einerseits aus dem Parallaxenfehler, der sich automatisch einstellt, wenn die fotografierte Ebene nicht exakt plan ist, vgl. «Fotografische Dokumentation». Andererseits nehmen die Objektiv-Verzerrungen bei kurzen Brennweiten meist zu, sodass sich unnötige Abbildungsfehler einstellen. Um letztere zu vermeiden, sollte die eingesetzte Kamera ein hochwertiges Objektiv haben. Es muss nicht gerade eine Spezialekamera sein, eine Consumer-Kamera aus dem mittleren Preissegment tut's auch.

In Falle fester, aber nicht zu beeinflussender Aufnahmeanordnung sind Informationen über den Aufnahmestandort (z.B. Objektivhöhe), Orientierung (z.B. Neigung) und besonders die Brennweite der Kamera bei der Auswertung hilfreich, sodass man entsprechend nachfragen sollte.

Freie Aufnahmen wird man so nehmen müssen, wie sie sind. Bei Digitalfotos finden sich in den EXIF-Informationen Angaben zu Kameratyp und Brennweite. Teilweise lässt sich zumindest die Aufnahmehöhe durch Nachfrage eingrenzen,

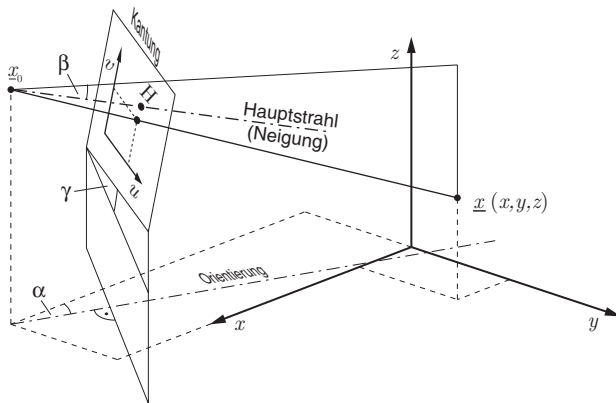


Abb. 1.8.1: Projektive Abbildung des Weltpunkts (x, y, z) in die Bildebene (u, v)

etwa im Hinblick auf Körperhaltung und -größe des Fotografen.

Auch die Frage, ob die chemische oder die digitale Aufnahme zu bevorzugen ist, stellt sich allenfalls bei selbst gefertigten Aufnahmen und ist ansonsten vorgegeben. Professionelles Equipment, etwa für Luftbildaufnahmen, basiert im Moment noch weitgehend auf chemischer Fotografie, aber auch hier zeichnet sich der Umschwung zur digitalen Aufnahme ab: Zu vielfältig sind die Vorteile, die sich aus der rein digitalen Weiterverarbeitung ergeben. Bei dem Genauigkeitsgrad, den der Unfallanalytiker im Normalfall anstrebt, spricht nichts gegen die digitale Fotografie mit einer besseren Consumer-Kamera. Auch chemische Fotos werden heutzutage für die Weiterverarbeitung meist digitalisiert.

1.8.2 Passpunkte-Verfahren

Die ideale Kamera zur Fotogrammetrie ist die *camera obscura*, bei der die Objektivöffnung nur aus einem möglichst kleinen Loch besteht. Der Abbildungsvorgang sowohl der analogen wie auch der digitalen Kameras lässt sich mit der *camera obscura* näherungsweise modellieren: Alle Sehstrahlen laufen durch den gleichen Objektivpunkt, wir haben den Idealfall reiner Strahlenoptik ohne Verzeichnungen durch das Objektiv. Diesem Idealfall versucht man sich bei der Gestaltung des Objektivs zu nähern, was heutzutage auch bei Zoomobjektiven und Kleinbildkameras weitgehend gelingt. Bei der *camera obscura* entspricht die Brennweite dem Abstand zwischen Objektivöffnung und Negativ, beim realen Objektiv kann man sich einen Objektivpunkt denken, der die gleiche Bedingung erfüllt.

Unter den idealisierten Bedingungen rein projektiver Strahlenoptik lässt sich der Bildpunkt $\underline{u}(u, v)$ eines beliebigen

3-D-Punkts $\underline{x}(x, y, z)$ analytisch berechnen, Abb. 1.8.1. Die Berechnungen haben in solchem Fall letztlich nichts mit Optik zu schaffen; man spricht deshalb schlicht von projektiver Geometrie. In der realen Kamera (und auch in der Lochkamera) entsteht das Bild hinter der Linse, steht auf dem Kopf und wird erst im Rahmen der Positiv-Vergrößerung um 180° gedreht. In der projektiven Geometrie platziert man die Bildebene hingegen in entsprechendem Abstand vor dem Projektionszentrum \underline{x}_0 und gelangt so direkt zu einem seitenrichtigen Positiv in der gewählten Vergrößerung. Der Bildpunkt ist dann der Durchstich der Verbindungslinie $\underline{u} = \underline{x} - \underline{x}_0$ durch die Bildebene. Die kürzeste Verbindung zwischen Projektionszentrum und Bildebene wird Hauptachse genannt; sie steht senkrecht auf der Bildebene. Der Durchstichpunkt der Hauptachse durch die Bildebene wird als Hauptpunkt bezeichnet.

Nach kurzer Rechnung \otimes ergibt sich zwischen Welt- und Bildkoordinaten folgender Zusammenhang

$$\begin{aligned} u &= \frac{c_1 x + c_2 y + c_3 z + c_4}{c_9 x + c_{10} y + c_{11} z + 1} \\ v &= \frac{c_5 x + c_6 y + c_7 z + c_8}{c_9 x + c_{10} y + c_{11} z + 1} \end{aligned} \quad (1.8.1)$$

Die Parameter $c_1 \dots c_{11}$ lassen sich anhand von sechs Passpunkten, also Punktepaaren $\underline{x}, \underline{u}$, einfach ermitteln. Im dreidimensionalen Fall nutzt einzig die Kenntnis der Transformationsparameter freilich wenig. Denn die Aufgabe lautet im Regelfall nicht, den Bildpunkt \underline{u} eines Weltpunkts \underline{x} zu berechnen, sondern umgekehrt, die Koordinaten des Weltpunkts \underline{x} aus denjenigen des Bildpunkts \underline{u} . Genau dies ist jedoch anhand eines einzigen Bildes unmöglich, weil Gl. (1.8.1) nur zwei Gleichungen für die drei unbekanntenen Koordinaten x, y, z ergeben. Dies liegt in der Natur der Sache, denn die Abbildung einer dreidimensionalen Szene auf die Bildfläche kann nicht umkehrbar eindeutig (d.h. eineindeutig) sein.

Mit zwei Bildern, die aus unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommen wurden, gelingt dann aber die vollständige Rekonstruktion der Raumkoordinaten: Da sich die **äußere Orientierung** jeder Kamera (der Begriff wird noch erklärt) berechnen lässt, lässt sich auch die relative Position der beiden Kameras berechnen, wenn die Zuordnung der Punkte in den beiden Bildern klar ist. Auf diese Weise lassen sich heutzutage dreidimensionale Szenen rekonstruieren, ohne dass Details über die äußere wie innere Orientierung der Kamera(s) bekannt sind. Dazu müssen nur genügend Fotos mit gemeinsamen Punkten vorliegen und noch nicht einmal die

3-D-Koordinaten der Kalibrierungspunkte bekannt sein. Es genügt ein einziges Maß, dass die absolute Größe des fotografierten Objekts festlegt. Auf diese Weise arbeiten Programme wie FOTOModeler.

Interessant werden die Gln. (1.8.1) für den Fall, dass die gesuchten Weltpunkte sämtlich in einer Ebene $z = 0$ liegen. Dann nämlich gilt

$$\begin{aligned} u &= \frac{c_1x + c_2y + c_3}{c_7x + c_8y + 1} \\ v &= \frac{c_4x + c_5y + c_6}{c_7x + c_8y + 1} \end{aligned} \tag{1.8.2}$$

(Wobei wir die Koeffizienten jetzt gemäß ihrer neuen Reihenfolge durchgehend nummeriert haben.) Diese Abbildung ist nun umkehrbar eindeutig, denn es lassen sich ebenso gut die Weltkoordinaten aus den Bildkoordinaten errechnen:

$$\begin{aligned} x &= \frac{a_1u + a_2v + a_3}{a_7u + a_8v + 1} \\ y &= \frac{a_4u + a_5v + a_6}{a_7u + a_8v + 1} \end{aligned} \tag{1.8.3}$$

Das Herleiten der Beziehung zwischen den Koeffizienten $a_i = f(c_i)$ ist eine Fleißaufgabe, die man am besten einem Computeralgebrasystem überlässt ☺. In diesem Fall führen vier Passpunkte $\underline{u}_i, \underline{x}_i$ zu den gesuchten Parametern und zwar in Form eines einfachen linearen Gleichungssystems. Aus dem ersten Punktepaar $\underline{u}_1, \underline{x}_1$ ergeben sich z.B. die Gleichungen

$$\begin{aligned} (u_1x_1)a_7 + (v_1x_1)a_8 + x_1 - u_1a_1 - v_1a_2 - a_3 &= 0 \\ (u_1y_1)a_7 + (v_1y_1)a_8 + y_1 - u_1a_4 - v_1a_5 - a_6 &= 0 \end{aligned} \tag{1.8.4}$$

und analog für die restlichen drei Punktepaare. Insgesamt also acht lineare Gleichungen für acht Unbekannte a_i . Ein wenig Sortieren führt auf folgendes Gleichungssystem:

$$\begin{pmatrix} u_1 & v_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -v_1x_1 \\ u_2 & v_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_2x_2 & -v_2x_2 \\ u_3 & v_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_3x_3 & -v_3x_3 \\ u_4 & v_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_4x_4 & -v_4x_4 \\ 0 & 0 & 0 & u_1 & v_1 & 1 & -u_1y_1 & -v_1y_1 \\ 0 & 0 & 0 & u_2 & v_2 & 1 & -u_2y_2 & -v_2y_2 \\ 0 & 0 & 0 & u_3 & v_3 & 1 & -u_3y_3 & -v_3y_3 \\ 0 & 0 & 0 & u_4 & v_4 & 1 & -u_4y_4 & -v_4y_4 \end{pmatrix} \tag{1.8.5}$$

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & a_8 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \end{pmatrix}^T$$

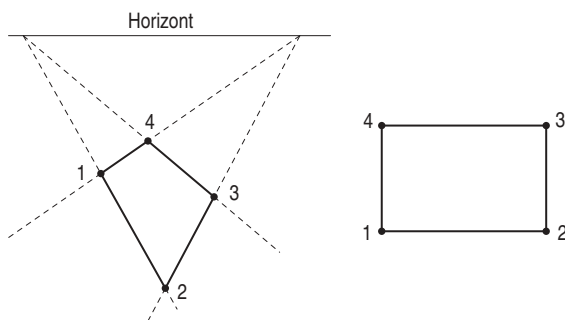
oder, kürzer

$$\underline{\underline{A}} \cdot \underline{a} = \underline{b} \tag{1.8.6}$$

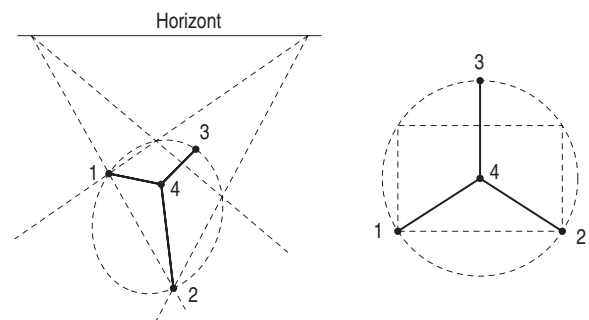
mit der formalen Lösung

$$\underline{a} = \underline{\underline{A}}^{-1} \cdot \underline{b} \tag{1.8.7}$$

Da man sich heutzutage über Rechenzeit wenig Gedanken machen muss, kann man Gl. (1.8.7) tatsächlich 1:1 in Tabellenkalkulation umsetzen. In EXCEL stehen dazu die Funktionen MINV und MMULT zur Verfügung. Die Invertierung der Matrix, bzw. die Lösung des Gleichungssystems gelingt nur für den Fall $\text{Det}(A) \neq 0$. Dies ist für den Fall garantiert, dass weder drei Welt- noch drei Bildpunkte auf einer Linie liegen. Entgegen verbreiteter Meinung müssen dazu nicht unbedingt zwei Vierecke aufeinander abgebildet werden, Abb. 1.8.2a,



a) Die Punkte spannen ein Viereck (hier: Rechteck) auf.



b) Die Punkte liegen sternförmig. Die Punkte 1 ... 3 spannen ein Dreieck auf.

Abb. 1.8.2: Wahl der Kalibrierungspunkte beim Vier-Passpunkte-Verfahren

ein Dreieck samt Zentrumspunkt tut's aus Sicht der reinen Mathematik ebenso gut, Abb. 1.8.2b.

Wie man sieht, sind nur die letzten beiden Spalten der Matrix A voll besetzt. Die Elemente in den Spalten 1 ... 3 wiederholen sich in den Spalten 4 ... 6. Zudem kann man den Nullpunkt \underline{u}_0 in der Bildebene in den Punkt \underline{u}_4 legen, sodass in den Zeilen 4 und 8 jeweils nur der Eintrag «1» verbleibt. Dadurch lässt sich die Lösung des Gleichungssystems derart effektiv berechnen, dass dies auch in sehr einfachen Programmiersprachen möglich wird.

Sind die Koeffizienten a_i anhand der Passpunkte berechnet, kann anschließend mit Gln. (1.8.3) zu jedem Bildpunkt der zugehörige Weltpunkt berechnet werden. Nach diesem Vier-Passpunkte-Verfahren arbeiten alle derzeit in der Unfallrekonstruktion gebräuchlichen Programme zur Entzerrung von Fotos.

1.8.3 Innere und äußere Orientierung

Alle fotogrammetrischen Verfahren bestimmen – mehr oder weniger explizit – im ersten Schritt zunächst die Orientierung der Kamera zur beobachteten Szene und legen diese dann der weiteren Auswertung zugrunde. Dabei unterscheidet man zwischen innerer und äußerer Orientierung der Kamera. Die **äußere Orientierung** besteht aus, Abb. 1.8.1:

- den Koordinaten des Projektionszentrums \underline{x}_0
- der Blickrichtung α , also z.B. der Orientierung des Hauptstrahls zur Fahrbahnlängsrichtung
- der Neigung β , also den Winkel, um den der Hauptstrahl gegenüber der fahrbahnparallelen Ausrichtung gekippt ist
- der Kantung γ , also den Winkel, den z.B. die Bildunterkante mit dem Horizont einschließt.

Die **innere Orientierung** besteht aus:

- der Brennweite f
- den Koordinaten des Hauptpunkts u_0, v_0
- den Maßstabsfaktoren in u - und v -Richtung σ_u und σ_v .

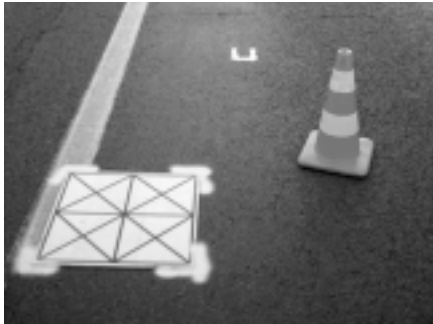
Die letzten beiden Punkte bedürfen näherer Erklärung. Der Hauptpunkt liegt selbstverständlich im Zentrum des Bildes und kann damit direkt ermittelt werden. Nicht immer steht für die Auswertung jedoch das komplette Bild zur Verfügung. Ein einfaches Beispiel wäre etwa der randlose Abzug eines chemischen Negativs: Wer garantiert, dass das Zentrum des Negativs exakt auf das Zentrum des Fotopositivs abgebildet wurde? Was die Maßstabsfaktoren betrifft, so verwendet man für die Bildkoordinaten gängigerweise andere Einheiten als für die Weltkoordinaten, also etwa Millimeter anstelle

von Metern. Wird das Foto in einem CAD-Programm ausgewertet, ist der Maßstab sogar oft beliebig. Im Regelfall sind die Maßstabsfaktoren allerdings in beiden Richtungen identisch und es gilt $\sigma_u = \sigma_v$. Wir haben also insgesamt 11 Orientierungsparameter, die sich eineindeutig in die 11 Parameter der Projektionsgleichungen (1.8.1) umrechnen lassen.

Die rein projektive Abbildung ist natürlich eine Idealisierung. In der Praxis spielt die Verzerrung durch das Objektiv hinein und bei chemischen Kameras zusätzlich die nicht ganz plane Lage des Negativfilms sowie dessen Quellung oder Schrumpfung bei der wässrigen Entwicklung. Auch diese Effekte zählt man zur inneren Orientierung der Kamera. Der Objektivfehler ist bei fester Brennweite und Entfernungseinstellung ∞ in jedem Foto derselbe, sodass man ihn nur ein einziges Mal ermitteln muss und anschließend aus jedem Bild vorab herausrechnen kann. Bessere Programme erlauben die Kalibrierung der Kamera anhand eines besonderen Fotos (MONOIMAGE) oder arbeiten gleich mit kalibrierten Kameras zusammen (ROLLEIMETRIC). Man kann dann z.B. im ersten Schritt zunächst die Objektiv-Verzerrung aus dem Bild herausrechnen und dann erst die projektive Transformation anwenden. Alternativ kann man die erweiterte innere Orientierung in zusätzlichen Transformationsparametern berücksichtigen und diese durch Hinzunahme weiterer Passpunkte gleich mit bestimmen. In diesem Fall wird also die erweiterte innere Orientierung ebenfalls aus dem Bild rekonstruiert.

Als (auch preislicher) Kompromiss zwischen schlichter Kleinbildkamera und aufwendiger Messkammer waren bei der Unfallaufnahme in Deutschland lange Jahre sog. Réseau-Kameras gebräuchlich. Man erkennt deren Bilder leicht anhand der eingeblendeten Passkreuze, Abb. 1.8.8a ... c. Sie stammen von einer Glasplatte, die sich unmittelbar vor dem Negativ befindet und in deren Rückseite die Kreuze so eingätzt sind, dass sie auf einem festen Raster liegen. Bei ideal projektiver Abbildung müssten die Passkreuze also auch auf dem Fotopositiv ein gleichmäßiges Raster bilden. Umgekehrt lassen sich die Abweichungen von diesem Idealraster dazu nutzen, die Verzeichnungen heraus zu rechnen. Die optimale Kalibrierung eines Réseaufotos schließt also als weiteren Schritt die Kalibrierung anhand der Gitterpunkte ein.

Beim Einsatz in der Unfallrekonstruktion liegt das Hauptproblem meist darin, die Koordinaten der Kalibrierungspunkte vor Ort möglichst genau auszumessen, sodass sich Korrekturen höherer Ordnung an der inneren Orientierung praktisch kaum auszahlen.



a) Fotogrammetrie-Quadrat der belgischen Polizei (50 x 50 cm)



b) klappbares Messkreuz mit vier Passpunkten in Form eines Vierecks (Diagonale: 4 m) [D1]



c) sternförmiges Kalibrierungsobjekt mit Armlängen von jeweils 1 m [M1]

Abb. 1.8.3: Vorgefertigte Kalibrierungsobjekte

1.8.4 Ermitteln der Passpunkte

Für die einfachen fotogrammetrischen Verfahren müssen vor Ort Kalibrierungspunkte eingemessen werden. Diese sollten so gewählt werden, dass sie bei der späteren Auswertung klar zu erkennen sind und notfalls nochmals eingemessen werden können, denn die fotogrammetrische Auswertung steht und fällt mit der Genauigkeit der vor Ort aufgenommenen Maße: Ist davon auch nur eines falsch, ist der Fehler nicht mehr zu korrigieren.

Um solche Fehler auszuschließen, ist der Einsatz von Kalibrierungsobjekten gebräuchlich, Abb. 1.8.3. Dabei ergibt sich jedoch ein grundsätzlicher Konflikt zwischen wünschenswerter Größe und Handlichkeit. Die in Teilen Deutschlands früher gebräuchlichen Fotogrammetriequadrate waren mit Außenabmessungen von 60×60 cm schlicht zu klein, um größere Areale verlässlich auszuwerten. Konstruktionen mit größeren Abmessungen sind meist klappbar und erreichen so Diagonalen von knapp 5 m Länge. Letztlich sind aber all solche Konstruktionen meist zu klein im Vergleich zu den Abmessungen der auszuwertenden Fläche: Die praktische Erfahrung lehrt, dass das zur Kalibrierung verwendete Viereck die ausgewertete Fläche möglichst umschließen sollte.

Will man aus diesem Grunde Kalibrierungsvierecke von 20 m Kantenlänge und mehr verwenden, kommt man kaum umhin, diese vor Ort abzustecken und einzumessen. Der Einsatz von speziellen Markierungstafeln (Pointern), Abb. 1.8.4, erleichtert später das Auffinden der Passpunkte bei der Auswertung auf dem Computer. Man tut übrigens gut daran, halbwegs dauerhafte Markierungen wie Gully-Ecken oder Fahrbahnmarkierungen als Kalibrierungspunkte zu verwenden: Deren Abstände können ggf. nachvermessen werden, sollte sich ein Maß später als falsch herausstellen. Im Übrigen

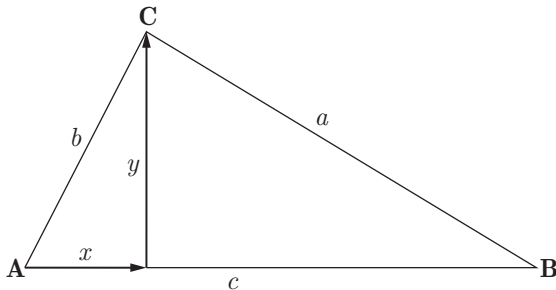
sind Länge und Abstand der Fahrbahnmarkierungen genormt, vgl. Kapitel «Straßenbau», sodass bei Inkaufnahme leichter Genauigkeitseinbußen in solchem Fall möglicherweise nicht einmal nachvermessen werden muss. Die Tafeln können bezogen werden über [K3].

Sind die Fahrbahnränder parallel, wird man im Zweifel ein Rechteck zur Kalibrierung verwenden. Damit kann sich die Vermessung vor Ort auf zwei Maße beschränken, nämlich dessen Länge und Breite. Bei allgemeinen Vierecken muss mindestens eine Diagonale mit ausgemessen werden, damit die Vermessung eindeutig ist. I.d.R. werden jedoch beide Diagonalen ausgemessen, um mindestens ein Kontrollmaß zu haben. Bei der fotogrammetrischen Auswertung wird dann ein Eckpunkt als Nullpunkt gewählt und die x-Koordinatenrichtung auf eine der Seiten gelegt, z.B. in Fahrbahnlangrichtungweisend.

Die Vermessung der Seiten- und Diagonallängen sollte, speziell wenn die Passpunkte kein Rechteck aufspannen, möglichst genau erfolgen, da sämtliche Fehler unweigerlich



Abb. 1.8.4: Markierungstafeln erleichtern das Auffinden der Passpunkte oben rechts: vergrößerte Darstellung eines Markers



a) Berechnen der Koordinaten des Punkts C im Dreieck

Abb. 1.8.5: Umrechnung der Streckenmessungen in die Koordinaten der Eckpunkte

in die fotogrammetrische Auswertung einfließen. Bei Diagonalen von bis zu 20 m ist der Einsatz eines Maßbands ratsam. Bei größeren, belebten Kreuzungen empfiehlt sich der Einsatz eines Laser-Entfernungsmessers.

Die Passpunkte lassen sich aus den vor Ort ausgemessenen Strecken konstruieren, indem man in einem CAD-Programm entsprechende Kreise um die Grundlinie schlägt. Auf diese Weise lässt sich ggf. auch ein Netz aus mehreren solcher Vierecke zusammenfügen, Abb. 1.8.6. Tatsächlich wird diese Aufgabe heutzutage jedoch meist vom Spezialprogramm übernommen, denn diese Berechnungen lassen sich selbstverständlich auch rein trigonometrisch durchführen. Aus jeweils drei Seiten lassen sich die Koordinaten des fehlenden Punkts berechnen. (Die anderen beiden sind die Eckpunkte der Grundseite und damit bekannt.)

Mit der Höhe y über der Grundlinie c lässt sich jedes Dreieck in zwei rechtwinklige Dreiecke zerlegen, Abb. 1.8.5a. Aus

$$y^2 + x^2 = b^2 \quad (1.8.8)$$

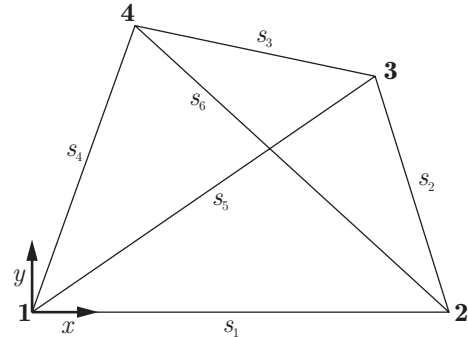
$$y^2 + (c - x)^2 = a^2$$

ergibt sich sofort

$$x = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2c} \quad (1.8.9)$$

$$y^2 = b^2 - x^2$$

Bezüglich der y -Koordinate muss vorab festgelegt werden, auf welcher Seite der Strecke c der gesuchte Eckpunkt liegt. Nummeriert man die Seiten gemäß Abb. 1.8.5b, so ergeben sie sich die beiden fehlenden Punkte aus



b) Berechnung der fehlenden Koordinaten im Viereck

$$x_3 = \frac{s_5^2 + s_1^2 - s_2^2}{2s_1} \quad y_3^2 = s_5^2 - x_3^2 \quad (1.8.10)$$

$$x_4 = \frac{s_6^2 + s_1^2 - s_4^2}{2s_1} \quad y_4^2 = s_6^2 - x_4^2$$

und damit die Länge der fehlenden Strecke zu

$$s_3 = \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2} \quad (1.8.11)$$

Aus den fünf gegebenen Strecken s_i ergibt sich so jeweils die Länge der fehlenden Strecke s_j . Indem man die Indizes zyklisch vertauscht, gelangt man also auf eine Funktion, die einen Vektor mit sechs neuen Strecken \underline{s}_i aus den sechs ausgemessenen Strecken \underline{s}_0 berechnet. Allgemeiner formuliert

$$\underline{s}_{k+1} = f(\underline{s}_k) \quad (1.8.12)$$

Indem man diese Rechenvorschrift solange anwendet, bis sich die Längen nicht mehr signifikant ändern, gelangt man zu einem konsistenten Satz von Streckenlängen (sog. **Fixpunktiteration**). Im Regelfall konvergiert dieses Verfahren. Für den Fall rein stochastischer Messfehler hat man die Redundanz der Messung auf diese Weise optimal genutzt. Leider ist das Verfahren speziell bei komplexen Messungen anfällig für systematische Fehler, wie Zahlendreher und Zuordnungsfehler. Die Differenz zwischen Fixpunktlösung \underline{s}_i mit dem Startvektor \underline{s}_0 gibt zwar einen Hinweis, in welcher Masche der Fehler liegt, besagt jedoch nicht, bei welcher Seite er liegt. Wie immer gilt auch hier: Eine einzige zusätzliche Messung erlaubt lediglich die Diagnose des Fehlers, nicht aber seine Lokalisation.

Auch die Berechnung des gesamten Netzes lässt sich automatisieren, wie dies etwa bei **ROLLEIMETRIC** der Fall ist. Bei

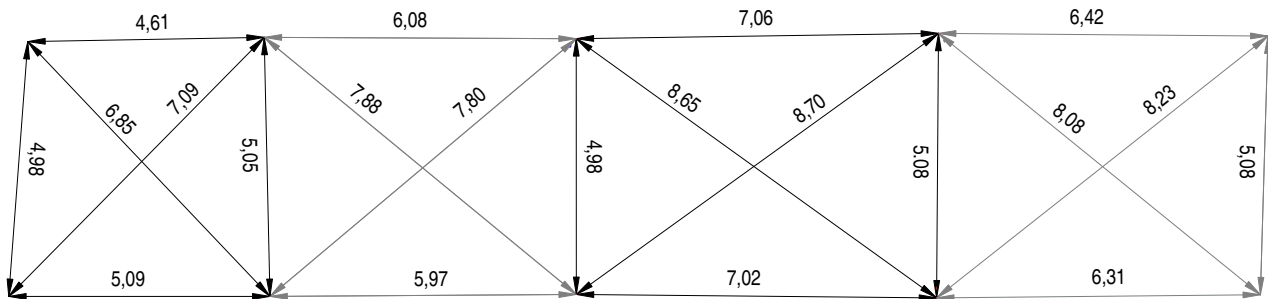


Abb. 1.8.6: Verkettung mehrerer Vermessungsquadrate

diesen Berechnungen bleibt die mehrfache Redundanz, die sich in solchen Netzen durch die Vermaschung einstellt, ungenutzt. Bei manchen Programmen wird offenbar nicht einmal die Fixpunktiteration Gln. (1.8.10) ... (1.8.12) angewendet.

1.8.5 Programme zur Monobildentzerrung

Bei der praktischen Umsetzung der Transformationsgleichungen (1.8.2) und (1.8.3) gibt es zwei Strategien: Pixelbasierte Programme rechnen das perspektivisch verzerrte Pixelbild in die entzerrte Version um. In vektorbasierten Programmen zeichnet man die Objekte im Originalfoto mit einfachen grafischen Funktionen, z.B. Linien, nach und zeichnet damit gleichzeitig eine entzerrte Version des Bildes. Letzteres Vorgehen ist besonders dann vorteilhaft, wenn nur wenige Details aus dem Foto in eine fertige CAD-Zeichnung übertragen werden sollen. Soll hingegen ein komplexes Spurenbild fotogrammetrisch rekonstruiert werden, so ist es meist effektiver, entzerrte Pixelbilder zu verwenden, etwa als Hintergrund für eine CAD-Zeichnung.

Programmtechnisch macht es einen Unterschied, ob man vektor- oder pixelorientiert arbeitet: Vektorbasierte Programme nehmen den direkten Weg und errechnen nach Gln. (1.8.3) die Weltkoordinaten eines Stützpunkts anhand seiner Bildkoordinaten. Beim Berechnen eines entzerrten Pixelbildes ergibt sich jedoch das zusätzliche Problem, die Farbe eines jeden Pixels festlegen zu müssen. Die Programme gehen deshalb meist umgekehrt vor und berechnen mit Gln. (1.8.2) zu jedem Pixel im Zielbild die Koordinaten im Ausgangsbild und interpolieren dort die Farbe anhand der Nachbarpixel.

Beide Programmtypen müssen dieselben logischen Prüfungen durchführen, damit die projektive Transformation gelingt:

- Es dürfen keine drei Passpunkte auf einer Linie liegen.

- Die Transformation darf nicht auf Punkte angewendet werden, die sich in der Nähe oder gar jenseits des Horizonts befinden.

1.8.5.1 Pixelbasierte Programme

Nach dieser Strategie arbeiten z.B. die Programme

- MONO-IMAGE
- PC-RECT
- ROLLEIMETRIC MR2.

Daneben gibt es eine Reihe weiterer Programme, die meist in Richtung 2-D-Entzerrung von Fassaden zielen, etwa ELCOVISION oder IMAGOLD. Zu größerer Bekanntheit hat es auch der PHOTOMODELER gebracht, der ähnlich wie ROLLEIMETRIC über ein 2-D-Modul verfügt. Für erste Experimente findet sich zudem auf der DVD ein VB-Skript zur perspektivischen Entzerrung kompletter Fotos. Die perspektivische Verzerrung ist im Übrigen Bestandteil der gängigen Programme zur Fotobearbeitung, so etwa bei ADOBE PHOTOSHOP. Theoretisch lässt sich diese Funktion ebenso gut zur fotogrammetrischen Entzerrung nutzen [N1]. Das Ergebnis ist jedoch schwer zu steuern, weil die Handhabung des Filters in gängigen Fotobearbeitungsprogrammen an den Eckpunkten des Bildes ansetzt und nicht die Platzierung von Passpunkten erlaubt. Im Kapitel «Digitale Bild- und Videobearbeitung» finden sich Beispiele zur perspektivischen Entzerrung von Fotos mittels dieser Funktion. Im vorliegenden Kapitel behandeln wir hingegen die exakten Methoden. Die Arbeitsweise ist bei allen Programmen zur definierten pixelbasierten Monobild-Entzerrung ähnlich:

- Kalibrieren des Fotos anhand von mindestens 4 Punkten
- Festlegen des zu entzerrenden Bereichs
- Festlegen der Zielauflösung, z.B. 1 Pixel = 5 × 5 cm
- Entzerren des Fotos bzw. Teilbereichs
- Nachbereitung oder Messung im entzerrten Bild.

Die Unterschiede liegen eher in den Details der Handhabung, etwa bei den Möglichkeiten der Kalibrierung. Hier sind einige Programme sehr restriktiv und verlangen explizit ein Rechteck. Oder es werden definitiv die Koordinaten der Eckpunkte erwartet, ohne dass alternativ Seitenlängen und Diagonalen angegeben werden könnten. Manche Programme, etwa MONO-IMAGE, können Objektiv-Verzeichnungen von eingemessenen Kameras korrigieren. Man sollte sich vor dem Kauf auch versichern, dass das Programm Einzelbilder verketten kann: Obwohl sich diese Aufgabe mit externen Programmen erledigen lässt, ist dies bei ständiger Anwendung eher hinderlich.

1.8.5.2 Vektorbasierte Programme

Vektorbasierte Lösungen zur Fotoentzerrung lassen sich in jedem CAD-Programm umsetzen, sofern es programmierbar ist. Heutzutage wird der Ausgangspunkt meist ein perspektivisch verzerrtes Pixelbild sein, das in die Zeichnung eingelesen wird. In diesem Bild klickt der Anwender vier Punkte an, deren Bildkoordinaten dem CAD-Programm so bekannt gemacht werden. Für diese Punkte sind dann nur noch die Weltkoordinaten einzugeben, z.B. über ein Dialogfeld. Anschließend zeichnet der Anwender den interessierenden Bildinhalt mit speziell programmierten Zeichenwerkzeugen nach, wobei gleichzeitig die entzerrte Version des Vektorbildes entsteht. Wie dies im Einzelnen geschieht, schaut man sich am Besten auf einem Bildschirmvideo an ☺.

Im Dunstkreis der Unfallrekonstruktion gibt es derzeit zwei Lösungen, die nach diesem Prinzip arbeiten: Die VENUS PHOTOBOX setzte das Verfahren Ende der 1990er Jahre in AUTOSKETCH 2.1 um. Leider ist AUTOSKETCH ab Version 5.0 nicht mehr programmierbar, sodass nur die Besitzer älterer Versionen von der beiliegenden Vollversion ☺ profitieren. Eine noch namenlose neuere Variante setzt das Verfahren in DESIGNCAD um [K1].

Wenn man chemische Fotos mittels Grafiktablett (*Digitizer*) entzerrt, profitiert man von deren hoher Auflösung. Programme wie AUTOCAD haben ausgefeilte Funktionen zur Kalibrierung des Grafiktablets, die auch projektive Transformationen inklusive Ausgleichsrechnung umfassen. Das Entzerren chemischer Fotos (oder Ausdrucken von Digitalfotos) ist in diesem Programm sozusagen eingebaut.

Die vektorbasierte Vorgehensweise hat durchaus Vorteile gegenüber der pixelbasierten:

- Bei nur wenigen interessierenden Details, etwa einer geraden Blockierspur samt Spurnick, kann man die Entzerrung gleich in der CAD-Zeichnung erledigen, ohne externe Programme anstoßen zu müssen.
- Kommt das Entzerren von Fotos eher sporadisch vor, so kann man sich bei diesem Vorgehen auf die halbwegs vertrauten Funktionen des CAD-Programms stützen.
- Das Originalbild ist schärfer und im Detail oft besser zu deuten als das bereits entzerrte Pixelbild.
- In der CAD-Umgebung lässt sich ein fehlender Passpunkt oft leicht mittels Fluchtlinien konstruieren, Abb. 1.8.7.
- Nicht zuletzt: In der CAD-Umgebung lässt sich der Zusammenhang zwischen Foto und entzerrter Vektorzeichnung nachvollziehbar für die Prozessparteien darstellen.

1.8.6 Beispiele für Vierpunkt-Entzerrungen

1.8.6.1 Fahrbahnoberflächen

Meist entzerrt der Unfallanalytiker Fotos der Fahrbahnoberfläche, die oft speziell zur Spurensicherung aufgenommen wurden. Abb. 1.8.8a ... d zeigt die fotogrammetrische Aufbereitung eines komplexen Spurenbildes nach einem Gegenverkehrsunfall. Die zahlreichen Aufnahmen wurden mittels einer Réseau-Kamera aus einem Hubschrauber geschossen und mit ROLLEMETRIC ausgewertet. Dies ist in Nordrhein-Westfalen eine Dienstleistung der Polizei, die der Einsatzleiter bei schwerwiegenden Unfällen samt zugehöriger Auswertung kostenlos in Anspruch nehmen kann. Wichtig ist in solchem Fall die gut sichtbare Markierung der Passpunkte mittels Sprühkreide und, wie immer, das verlässliche Einmessen der-

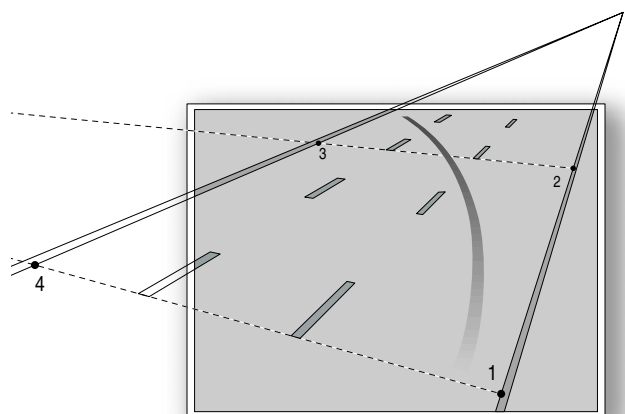


Abb. 1.8.7: Im CAD-System lässt sich ein fehlender Passpunkt ggf. konstruieren. Im Beispiel liegt der Punkt 4 außerhalb des Fotos



a) Übersichtsaufnahme im Anflug von Norden



b) Die westliche Einmündung in Bild a)



c) Die östliche Einmündung in Bild a)



d) Das vollständige Spurenbild, errechnet mit RolleiMetric aus ca. 15 Einzelbildern, die aus einem Hubschrauber geschossen wurden



e) Aufnahme vom 6-m-Hochmast



f) Aufnahme in die Gegenrichtung



g) Entzerrung mit RolleiMetric MR2



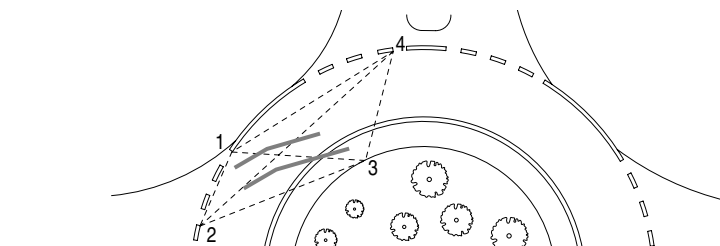
h) Foto mit 6-m-Stativ von nahegelegener Brücke



i) Entzerrte Version des in h) weiß umrandeten Bereichs



j) Blockierspur durch Clipping hervorgehoben



k) Die Blockierspur ist schnell eingezeichnet, wenn man innerhalb des CAD-Systems kalibriert

Abb. 1.8.8: Beispiele für Entzerrungen nach dem Vier-Passpunkte-Verfahren