

## Entwicklung von Kenngrößen zur Qualitätsbeurteilung optischer Prozessketten

MANFRED WIGGENHAGEN & KARSTEN RAGUSE, Hannover

**Keywords:** close-range photogrammetry, evaluation indices, quality validation

**Summary:** *Development of quality parameters for quality assessment of optical process chains.* This paper presents quality parameters for the quality assessment of photogrammetric bundles in photogrammetric close-range applications. For the preparation and realisation of photogrammetric object determinations the quality parameters shall enable the user to get a maximum amount of result quality. The indices can be calculated from simple geometric measures and require no detailed experience in statistical methods or adjustment procedures.

**Zusammenfassung:** In diesem Beitrag werden Kenngrößen zur Beurteilung der Qualität photogrammetrischer Bildverbände in Nahbereichsprojekten vorgestellt. Diese Kenngrößen sollen den Nutzer in die Lage versetzen, bei der Vorbereitung und Durchführung photogrammetrischer Objektbestimmungen qualitativ hochwertige Ergebnisse zu erzielen. Die Kenngrößen können aus einfachen geometrischen Maßen abgeleitet werden und erfordern kein tiefer gehendes Wissen über statistische Methoden oder Ausgleichungsverfahren.

---

### 1 Einleitung

Die dreidimensionale Punktbestimmung mit Methoden der Photogrammetrie basiert auf klar definierten geometrischen Zusammenhängen der Zentralperspektive. Trotz dieser mathematisch eindeutig festgelegten Methoden werden von potenziellen Nutzern häufig folgende Kritikpunkte genannt: „Photogrammetrie ist kompliziert, nicht nachvollziehbar und nur Experten können reproduzierbare Ergebnisse erzielen“.

Diese Kritik entsteht oft aufgrund des fehlenden Einblicks in die einzelnen Arbeitsschritte bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Aufnahmen. Weiterhin kann oftmals kein tiefer gehendes Wissen über den theoretischen Hintergrund der eingesetzten Bündelausgleichungsprogramme vorausgesetzt werden. Um diesem Defizit Abhilfe zu schaffen, enthalten viele der aktuell verfügbaren photogrammetrischen

Softwaresysteme umfangreiche Handbücher, die ein Lehrbuch auf dem Gebiet zwar nicht ersetzen können, diesem aber oft sehr nahe kommen, siehe z. B. ROLLEI (2002) und EOS (2001).

Die Akzeptanz der photogrammetrischen Verfahren kann jedoch auch dadurch erhöht werden, wenn nachvollziehbare unabhängige Kontrollmöglichkeiten der Zwischenresultate und Endergebnisse vorgesehen werden.

Zu diesem Zweck wurden in den vergangenen Jahren in den unterschiedlichen Gremien, wie z.B. DIN und VDI verstärkt Richtlinien entwickelt und Verfahren vorgestellt, die unabhängig von den verwendeten Ausgleichungsansätzen eine Bewertung der Qualität der photogrammetrischen Ergebnisse ermöglichen LUHMANN & WENDT (2000) und RAUTENBERG & WIGGENHAGEN (2002).

## 2 Zielsetzung

Die Qualität der dreidimensionalen Punktbestimmung wird von einer Vielzahl von einzelnen Prozessen und Parametern beeinflusst. Im Sinne des Qualitätsmanagements müssen für die Beurteilung der Qualität des Gesamtergebnisses die einzelnen an der Berechnung beteiligten Verfahren isoliert und im Einzelnen beurteilt werden können DIN (1995). Im Gegensatz zu Vorgehensweisen, die nur eine abschließende Bewertung der Ergebnisqualität ermöglichen und keinen Hinweis auf Optimierungsmöglichkeiten der gesamten Prozesskette geben, werden in diesem Beitrag Kenngrößen vorgestellt, die über die Beurteilung der einzelnen Teilprozesse Hinweise zu Defiziten im Gesamtprozess liefern und die gezielte Verbesserung einzelner Teilkomponenten erlauben.

### 2.1 Bestandteile der optischen Prozesskette

Die dreidimensionale photogrammetrische Punktbestimmung kann in folgende Teilprozesse unterteilt werden:

- Vorbereitung der Aufnahme,
- Bildaufnahme, Bildmessung und
- Ausgleichung des Bildverbandes.

Die Photogrammetrie findet heute fachübergreifend in den unterschiedlichsten Disziplinen Anwendung. Dort wird der Gesamtprozess der dreidimensionalen Punktbestimmung als „optische Messkette“ oder auch „optische Prozesskette“ bezeichnet.

Da die Ausgleichung des Bildverbandes am Ende dieser Prozesskette steht, sind hier zwar hohe Anforderungen an die optimale Bündelausgleichung und z.B. die Entdeckung grober Fehler und Ausreißer zu stellen, Mängel bei der Vorbereitung und Durchführung der Aufnahme können aber nur bei hoher Redundanz kompensiert werden.

### 2.2 Beurteilung der Qualität optischer Messketten

Die mathematisch rechnerische Auswertung des Bildverbandes basiert in den gängigen Softwarepaketen auf der ausgleichungstech-

nischen Umsetzung des zentralperspektivischen Modells unter Einführung zusätzlicher Beobachtungen und Bedingungen zwischen den Unbekannten. Experten beurteilen die Qualität der Ergebnisse, z.B. der ausgeglichenen Objektkoordinaten, über die Varianzen, Kovarianzen und Korrelationen der ausgeglichenen Unbekannten sowie den Verbesserungen der ausgeglichenen Beobachtungen.

Über dieses Expertenwissen verfügt nicht jeder Nutzer, außerdem erlaubt die Kapselung der Softwarepakete oft nur bedingt die Analyse des gesamten Fehlerhaushaltes. Um für die Ausgleichung des photogrammetrischen Bildverbandes optimale Ausgangsbedingungen zu schaffen, werden die nachfolgend vorgestellten Kenngrößen für die Prozessschritte Vorbereitung der Aufnahme und Bildaufnahme entwickelt.

## 3 Definition von Kenngrößen

Unter Kenngrößen werden Zahlenwerte verstanden, die einen Teilprozess der optischen Prozesskette zahlenmäßig charakterisieren bzw. Entscheidungshilfen liefern, ob die Qualität des jeweiligen Teilprozesses der gestellten Anforderung genügt.

### 3.1 Vorbereitung der Aufnahme

Dieser Abschnitt umfasst die Auswahl der geeigneten Sensor-Optik-Kombination, der Punktsignalisierung, der Beleuchtung und Auswahl der Kamerastandpunkte.

#### 3.1.1 Bildmaßstabszahl

Unabhängig von der zu lösenden Messaufgabe ist die Qualität der Ergebnisse wesentlich von der gewählten Bildmaßstabszahl abhängig.

Die Kenngröße **Bildmaßstabszahl** wird mit folgender Formel berechnet:

$$m_b = \frac{pel_o}{pel_i} = \frac{y}{c}$$

Es gilt:

$$\begin{aligned} m_b &= \text{Bildmaßstabszahl} \\ y &= \text{maximaler Abstand zwischen} \\ &\quad \text{Kamera und Objekt} \\ c &= \text{Kamerakonstante der eingesetzten} \\ &\quad \text{Kamera} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} pel_o &= \text{Bildelementgröße am Objekt} \\ pel_i &= \text{Bildelementgröße des Sensors} \end{aligned}$$

$$\text{Beispiel: } \begin{aligned} y &= 5000 \text{ mm}, \quad c = 25 \text{ mm}, \\ pel_o &= 2 \text{ mm}, \quad pel_i = 0.009 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$m_{bsoll} = \frac{pel_o}{pel_i} = \frac{2}{0.009} = 222$$

$$m_{bist} = \frac{y}{c} = \frac{5000}{25} = 200$$

Im vorgegebenen Beispiel wurde vom Auftragegeber eine Mindestbildelementgröße am Objekt von 2 mm gefordert. Die eingesetzte Digitalkamera hat eine Bildelementgröße von 0.009 mm. Aus dem Quotienten wird die erforderliche Bildmaßstabszahl  $m_{bsoll}$  mit 222 berechnet.

Aus dem Verhältnis der geplanten maximalen Aufnahmeentfernung und der gewählten Kamerakonstante kann die tatsächlich existierende Bildmaßstabszahl  $m_{bist}$  mit 200 ermittelt werden. Mit der Forderung  $m_{bist} \leq m_{bsoll}$  ist in diesem Beispiel das Kriterium „Bildmaßstabszahl“ erfüllt.

### 3.1.2 Zielmarkendurchmesser

Bei hohen Genauigkeitsanforderungen werden die zu bestimmenden Objektpunkte z. B. mit kreisförmigen Zielmarken versehen. Werden innerhalb der Auswertung die Bildkoordinaten der abgebildeten Zielmarken mit automatischen Verfahren ermittelt, wie z. B. mit Stern-, Ring-, oder Ellipsenoperator, muss ein Mindestdurchmesser der Zielmarken im Bild gewährleistet sein.

Bei der Vorbereitung der Aufnahme muss im folgenden Beispiel dafür gesorgt werden, dass die Zielmarken nicht kleiner als 18 mm im Durchmesser sind. Bei einer nachträglichen Überprüfung eines Bildverbandes wird das Kriterium „Zielmarkendurchmesser“ als erfüllt angesehen, wenn der tatsächliche Zielmarkendurchmesser größer oder gleich 18 mm ist. Es ist noch zu diskutieren, ob die

Beurteilung der Qualität nur auf dieser reinen ja/nein Entscheidung basieren soll oder auch Zwischenstufen möglich sind, da die abgebildeten Ellipsen auch bei nicht erreichtem Mindestdurchmesser gefunden werden, allerdings nicht mit der erwarteten Genauigkeit von z. B. 0.02 Bildelementen.

Die Kenngröße **Zielmarkendurchmesser** wird mit folgender Formel berechnet:

$$d_o = \frac{d_b \cdot pel_i \cdot y}{c}$$

Es gilt:

$$\begin{aligned} d_o &= \text{Minstdurchmesser der Zielmarke im} \\ &\quad \text{Objekt} \\ d_b &= \text{Minstdurchmesser der Zielmarke} \\ &\quad \text{im Bild} \\ c &= \text{Kamerakonstante} \\ pel_i &= \text{Bildelementgröße der eingesetzten} \\ &\quad \text{Kamera} \\ y &= \text{maximaler Abstand zwischen Kamera} \\ &\quad \text{und Objekt} \end{aligned}$$

$$\text{Beispiel: } \begin{aligned} d_b &= 10 \text{ pixel}, \quad c = 25 \text{ mm}, \\ pel_i &= 0.009 \text{ mm}, \quad y = 5000 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$d_o = \frac{d_b \cdot pel_i \cdot y}{c} = \frac{10 \cdot 0.009 \cdot 5000}{25} = 18 \text{ mm}$$

### 3.1.3 Zielmarkenkontrast

Die Präzision der automatischen Ellipsenmessung in digitalen Bildern ist wesentlich vom Kontrast abhängig. Mit Blitzgeräten oder Zusatzbeleuchtung ist daher für eine geeignete Ausleuchtung der Szene zu sorgen. Automatisierte Punktmessverfahren erlauben zwar die dynamische Anpassung des Messverfahrens an den lokalen Kontrast im Bild, die Einhaltung eines ausreichenden Kontrastes im Bild wird jedoch oftmals zur Gewährleistung einer präzisen Punktmessung gefordert.

Die Kenngröße **Zielmarkenkontrast** wird mit folgender Formel berechnet:

$$k_{ist} = \frac{g_{max} - g_{min}}{g_{max} + g_{min}}$$

Es gilt:

$k_{ist}$  = tatsächlicher Kontrast im Bild

$k_{soll}$  = minimaler Kontrast im Bild

(vom Softwarehersteller gefordert)

$g_{max}$  = maximaler Grauwert innerhalb der abgebildeten Zielmarke (weiß)

$g_{min}$  = minimaler Grauwert innerhalb der abgebildeten Zielmarke (schwarz)

Beispiel:  $k_{soll} \geq 0.5$ ,  $g_{max} = 250$ ,  $g_{min} = 128$

$$k_{ist} = \frac{g_{max} - g_{min}}{g_{max} + g_{min}} = \frac{250 - 128}{250 + 128} = 0.32$$

Die Beurteilung dieser Kenngröße ist nur im digitalen Bild direkt möglich. Durch den Einsatz digitaler Kameras, die sofort ausgelesen und deren Bilder z.B. auf dem Notebook unmittelbar ausgewertet werden können, stellt die Bestimmung des Kontrastes über die Grauwertmessung jedoch kein Problem dar. Mit einem erforderlichen Kontrast von  $k_{soll} \geq 0.5$  erfüllt das Beispiel die gestellten Anforderungen nicht.

### 3.1.4 Unschärfekreisdurchmesser

Photogrammetrische Bildverbände werden mit auf  $\infty$  fokussierten Objektiven oder mit gerasteten Fokussierungen aufgenommen. Die Schärfe der abgebildeten Zielmarken im Bild kann bei bekanntem Aufnahmeabstand und vorgegebener Optik vorausgerechnet werden.

Die Kenngröße **Unschärfekreisdurchmesser** wird mit folgender Formel berechnet:

$$u = \frac{\left| \frac{y_f}{y} - 1 \right| \cdot f^2}{(y_f - f) \cdot k}$$

Es gilt:

$u$  = tatsächlicher Unschärfekreisdurchmesser

$y$  = maximaler Abstand zwischen Kamera und Objekt

$y_f$  = fokussierter Abstand zwischen Kamera und Objekt

$f$  = Brennweite

$k$  = gewählte Blendenzahl des Objektivs

Beispiel:  $y = 6000 \text{ mm}$ ,  $y_f = 8000 \text{ mm}$ ,  
 $f = 25 \text{ mm}$ ,  $k = 8$

$$u = \frac{\left| \frac{y_f}{y} - 1 \right| \cdot f^2}{(y_f - f) \cdot k} = \frac{\left| \frac{8000}{6000} - 1 \right| \cdot 25^2}{(8000 - 25) \cdot 8} = 0.003 \text{ mm}$$

Falls das Objektiv auf  $\infty$  fokussiert wurde, gilt die Formel:  $u = \frac{f^2}{y \cdot k}$ .

Bei einem maximal zulässigen Unschärfekreisdurchmesser von 0.010 mm, wird im vorgegebenen Beispiel das Kriterium „Unschärfekreisdurchmesser“ erfüllt, da  $u < u_{max}$ .

In der Praxis wird für analoge Bilder ein Unschärfekreisdurchmesser von ca. 30  $\mu\text{m}$  gefordert. Bei digitalen Bildern entspricht der maximal zulässige Unschärfekreisdurchmesser etwa der Bildelementgröße des Sensors.

### 3.1.5 Bewegungsunschärfe

Bei der Bildaufnahme aus einem bewegten Fahrzeug oder bei der Aufnahme bewegter Objekte muss die Relativbewegung zwischen Objekt und Aufnahmesystem berücksichtigt werden. Für die praktische Anwendung sind die Größen zulässige Bewegungsunschärfe im Bild, maximale Belichtungszeit und Bewegungsunschärfe am Objekt von Bedeutung LUHMANN (2000).

Innerhalb eines Sicherheitsversuches wurde ein mit einer Geschwindigkeit von 68 km/h rechtwinklig zur Aufnahmeachse fahrender Pkw mit einer Belichtungszeit von 0.2 ms aufgenommen. Bei einer Bildmaßstabszahl von 400 ergibt sich eine tatsächliche Bewegungsunschärfe von 0.009 mm. Unter der Bedingung  $\Delta s' \leq \Delta s'_{max}$  ist in diesem Fall das Kriterium „Bewegungsunschärfe“ erfüllt.

Die Kenngröße **Bewegungsunschärfe** wird mit folgender Formel berechnet:

$$\Delta s' = \frac{\Delta t \cdot v}{m_b} \quad \text{mit:} \quad \Delta s'_{max} = \frac{1.5}{AV}$$

Es gilt:

$\Delta s'_{\max}$  = maximal zulässige Bewegungsunschärfe

$\Delta s'$  = tatsächliche Bewegungsunschärfe im Bild

$v$  = Geschwindigkeit rechtwinklig zur optischen Achse

$\Delta t$  = Belichtungszeit

$\Delta t_{\max}$  = maximale Belichtungszeit

$m_b$  = Bildmaßstabzahl

$AV$  = Auflösungsvermögen des Sensors

Beispiel:  $v = 68 \text{ km/h} = 18.9 \text{ m/s}$ ,  
 $\Delta t = 0.2 \text{ ms}$ ,  $m_b = 400$ ,  
 $AV = 111 \text{ L/mm}$

$$\Delta s'_{\max} = \frac{1.5}{AV} = \frac{1.5}{111} = 0.014 \text{ mm}$$

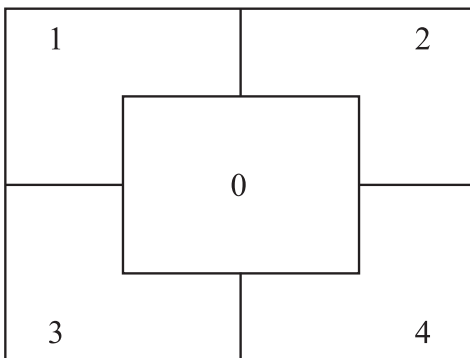
$$\Delta s' = \frac{\Delta t \cdot v}{m_b} = \frac{0.0002 \cdot 18900}{400} = 0.009 \text{ mm}$$

$$\Delta t_{\max} = \frac{\Delta s'_{\max} \cdot m_b}{v} = \frac{0.014 \cdot 400}{18900} = 0.296 \text{ ms}$$

### 3.1.6 Passpunktverteilung

Zwingend erforderlich für die Datumsdefinition bzw. die absolute Orientierung des photogrammetrischen Modells ist die Aufnahme von Passpunkten. Um eine ungünstige Lage von Passpunkten im Bild zu vermeiden, wird folgende Kenngröße festgelegt:

#### Passpunktverteilung



**Abb. 1:** Passpunktverteilung.

Im Bild müssen Passpunkte in den Sektoren 1 bis 4 abgebildet sein.

Es ergibt sich daraus als Kenngröße:

$pp_i = 1$ , falls in Sektor  $i$  ein Passpunkt liegt

$pp_i = 0$ , falls in Sektor  $i$  kein Passpunkt liegt

mit  $i = 1, 2, 3, 4$

$$v_p = pp_1 + pp_2 + pp_3 + pp_4$$

Die Existenz von vier Vollpasspunkten im Bild ( $v_p = 4$ ) erlaubt z.B. die Einzelbildauswertung im Sinne der projektiven Transformation. Bei der Berechnung von Bildverbänden ist diese Bedingung nicht für jedes Bild, sondern für das Modell bzw. den Verband einzuhalten.

Bei der Vorbereitung der Punktsignalisierung und der Kamerastandorte ist die Passpunktverteilung zu planen und die Zielmarken der Passpunkte sind mit höherer Genauigkeit z. B. geodätisch einzumessen.

### 3.2 Bildaufnahme

Die für die Bildaufnahme vorgestellten Kenngrößen sind sowohl für die digitale, als auch für die analoge Photogrammetrie anwendbar. Bei der Beurteilung der radiometrischen Eigenschaften hat die digitale Bildaufnahme einen erheblichen Zeitgewinn gegenüber der analogen Aufnahme, da eine Analyse des Bildmaterials unverzüglich erfolgen kann.

#### 3.2.1 Kamerastandorte

In Abhängigkeit von der zu erfassenden Objektform werden in der Regel komplette Rundumverbände oder Streifenverbände mit konvergent angeordneten Aufnahmerichtungen geplant. Zur Erhöhung der Redundanz bei der Punktbestimmung wird nach Abb. 2 ein Planungsschema für die Kamerastandorte im Grundriss und Aufriss vorgegeben.

Aufnahme-Ebenen

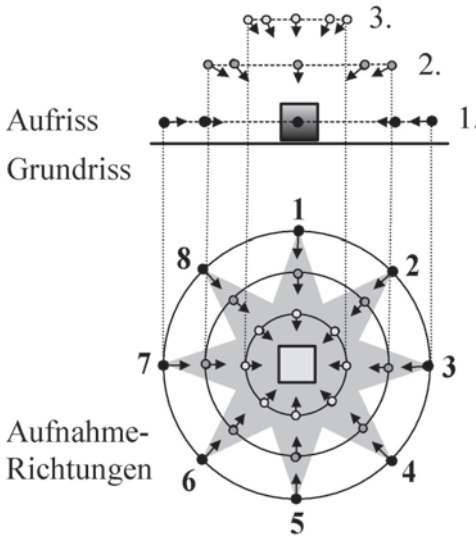


Abb. 2: Kamerastandorte.

Im Bildverband sollten die Kamerastandorte möglichst in der Nähe der Positionen 1 bis 8 und in den Ebenen 1 bis 3 vorgesehen werden.

Es ergibt sich daraus als Kenngröße **Kamerastandort**:

$$k_{st} = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^8 k_{ij}$$

mit  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$  und  $j = 1, 2, 3$

$k_{ij} = 1$ , falls ein Kamerastandpunkt im Bereich  $i$  und in der jeweiligen Ebene  $j$  liegt, *anderenfalls* gilt  $k_{ij} = 0$ .

In dem idealisierten Beispiel des Rundumverbandes wird die Qualität der Kamerastandorte über den Zusammenhang  $k = k_{st}/24 \leq 1$  charakterisiert. Da je nach Messaufgabe unterschiedliche Bildverbände entstehen, die aufgrund örtlicher Zwänge mehr oder weniger stark von dem idealen Rundumverband abweichen, ist die Kenngröße  $k$  nur als Richtwert zu verstehen. Bei Nichteinhaltung des Kriteriums kann dieses ggf. einen Hinweis auf eine mögliche Optimierungsnotwendigkeit der Kamerastandorte geben.

3.2.2 Aufnahmewinkel

Der Aufnahmewinkel, unter dem ein Objektpunkt abgebildet wird, sollte nicht zu klein werden, da sonst die Zielmarken und Objektdetails zu stark verzerrt dargestellt werden. Für kreisförmige Zielmarken sollte der Aufnahmewinkel daher nicht unter  $30^\circ$  liegen (siehe Abb. 3).

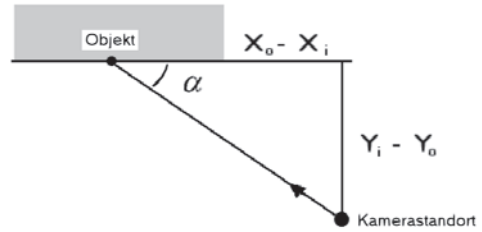


Abb. 3: Aufnahmewinkel.

Die Abschätzung für den Aufnahmewinkel kann sowohl im Grundriss (Abb. 3) als auch im Aufriss vorgenommen werden. Bei näherungsweise bekannten Objektpunktkoordinaten und Koordinaten des Projektionszentrums der Kamera lässt sich der Aufnahmewinkel abschätzen.

Die Kenngröße **Aufnahmewinkel** wird z. B. im Grundriss mit folgender Formel berechnet:

$$\alpha = \text{atan} \left( \frac{Y_i - Y_o}{X_o - X_i} \right)$$

Es gilt:

- $\alpha =$  Aufnahmewinkel
- $Y_o =$  Koordinate des Projektionszentrums
- $X_o =$  Koordinate des Projektionszentrums
- $Y_i =$  Koordinate des Objektpunktes
- $X_i =$  Koordinate des Objektpunktes

Beispiel:  $Y_o = 10 \text{ mm}, X_o = 3600 \text{ mm}, Y_i = 2610 \text{ mm}, X_i = 100 \text{ mm}$

$$\alpha = \text{atan} \left( \frac{Y_i - Y_o}{X_o - X_i} \right) = \frac{2600}{3500} = 36.6^\circ$$

Die Berechnung dieser Kenngröße kann für jeden Kamerastandort und für jeden im Bild sichtbaren Objektpunkt durchgeführt werden.

### 3.2.3 Überdeckung

Eine stabile Modellbildung mittels benachbarter Bilder kann durch eine ausreichende Überdeckung der Einzelbilder gewährleistet werden (siehe Abb. 4). Die gewünschte Überdeckung der Bilder ist abhängig vom Zweck der Auswertung. Bei dreidimensionaler Punktbestimmung muss eine stereoskopische Überdeckung von mindestens 50% vorgesehen werden. In der Praxis wird oftmals ein Wert von 60% angestrebt. Bei der Herstellung von Bildplänen für Dokumentationszwecke wird eine zusätzliche Sicherheitsüberdeckung benachbarter Bilder von 5–10% gefordert. Die Abschätzung kann für Grund- und Aufriss getrennt durchgeführt werden. Ähnlich der Bildflugplanung kann bei ausreichender horizontaler Überdeckung eine geringere vertikale Überdeckung gewählt werden. Die erfassbare Objektfläche ist im wesentlichen vom Formatwinkel des Aufnahmesystems abhängig.

#### Aufnahme-Ebenen

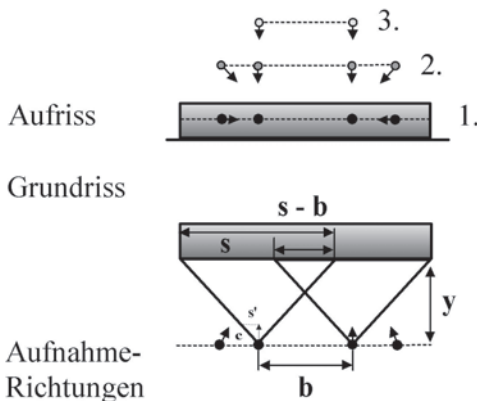


Abb. 4: Bildüberdeckung.

Die Kenngröße **Überdeckung** wird mit folgender Formel berechnet:

$$q_{ist} = 1 - \frac{b}{s'} \cdot \frac{c}{y}$$

Es gilt

$q_{ist}$  = tatsächliche Überdeckung

$q_{soll}$  = geforderte Überdeckung

$y$  = Abstand zwischen Kamera und Objekt

$c$  = Kamerakonstante

$s'$  = Bildformatseite

$b$  = Aufnahmebasis

Beispiel:  $q_{soll} = 0.60$ ,  $y = 10000 \text{ mm}$ ,  
 $c = 9 \text{ mm}$ ,  $s' = 8.6 \text{ mm}$ ,  
 $b = 3000 \text{ mm}$

$$q_{ist} = 1 - \frac{b}{s'} \cdot \frac{c}{y} = 1 - \frac{3000}{8.6} \cdot \frac{9}{10000} = 0.686$$

Mit der Forderung  $q_{ist} \geq q_{soll}$  erfüllt dieses Beispiel das Prüfkriterium „Überdeckung“. Eine gute Überdeckung spielt eine sehr große Rolle bei der Stabilität des Bildverbandes, der flexiblen Modellbildung und der Erhöhung der Redundanz in der Punktbestimmung.

Die Berechnung dieser Kenngröße basiert auf dem Normalfall der Kameraanordnung, der in der Praxis in den meisten Fällen durch die flexiblere Konvergentanordnung ersetzt wird. Hiermit lassen sich auch bei kleiner Basis und größeren Aufnahmeentfernungen höhere Überdeckungen erreichen.

### 3.2.4 Schnittverhältnis

Die Qualität der dreidimensionalen Objektpunktkoordinaten ist abhängig vom Netzdesign und der vorliegenden Schnittgeometrie. Für die Beurteilung der Schnittgeometrie in photogrammetrischen Bildverbänden kann das Abstands-Basis-Verhältnis pro Kamerapaar genutzt werden.

Die Kenngröße **Schnittverhältnis** wird mit folgender Formel berechnet:

$$i_s = \frac{y_{max}}{b}$$

Es gilt:

$i_s$  = Schnittverhältnis

$b$  = Abstand zwischen benachbarten  
Kameras (Basis)

$y_{max}$  = maximaler Abstand zwischen  
Kamera und Objekt

Beispiel:  $b = 10000 \text{ mm}$ ,  $y_{max} = 5000 \text{ mm}$

$$i_s = \frac{y_{max}}{b} = \frac{5000}{10000} = 0.5$$

Unter günstigen Bedingungen und Schnittwinkeln am Objekt von  $90^\circ$ , gilt  $i_s = 0.5$ . Werden bei mindestens vier beteiligten Bildern Schnittwinkel zwischen  $45^\circ$  und  $120^\circ$  zugelassen, ergibt sich  $0.3 < i_s < 1.3$ .

Für die grobe Abschätzung der Genauigkeit der photogrammetrischen Objektpunktkoordinaten kann angesetzt werden:

$$s_{XYZ} = i_s \cdot m_b \cdot s_{x'y'}$$

Hiermit wird über das Schnittverhältnis die Unsicherheit der Bildkoordinatenmessung  $s_{x'y'}$  mit der Maßstabszahl  $m_b$  in den Objekt- raum  $s_{XYZ}$  übertragen. Da in Bildverbänden nicht mit Stereonormalfallaufnahmen, sondern in konvergenter Aufnahmeanordnung gearbeitet wird, kann die Genauigkeit der Ergebnisse streng genommen nur über das stochastische Modell der Ausgleichung abgeschätzt werden. Die Kenngröße „Schnittverhältnis“ ermöglicht jedoch für sämtliche Kamerakombinationen eine Grobabschätzung, d. h. ob z. B. die Kamerastationen für die dreidimensionale Punktbestimmung geeignet sind.

### 3.3 Skalierung und Kontrolle des Objektmodells

Zur Skalierung und Kontrolle des resultierenden Objektmodells werden entweder Pass- und Kontrollpunkte aufgenommen oder hochgenau kalibrierte Längenmaßstäbe in der Aufnahmeszene platziert und die Zielmarken der Maßstäbe photogrammetrisch erfasst.

#### 3.3.1 Maßstabsdefinition

Zur Festlegung des Systemmaßstabes und zur unabhängigen Kontrolle der dreidimensionalen Punktbestimmung werden vier und mehr hochgenau kalibrierte Längenmaßstäbe benötigt. Die Anordnung erfolgt in drei zueinander senkrechten Richtungen und ggf. quer dazu mit einer Länge von mindestens  $2/3$  der maximalen Länge im Messvolumen (siehe Abb. 5).

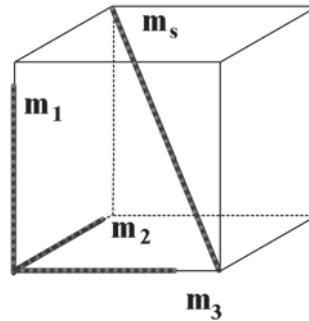


Abb. 5: Maßstabsanordnung.

Die Kenngröße **Maßstabsdefinition** wird berechnet, mit:

$$m_s = 1, \quad \text{falls Systemmaßstab in mehr als einem Bild sichtbar ist,}$$

$$\text{ansonsten gilt: } m_s = 0$$

$$m_{ki} = 1, \quad \text{falls Kontrollmaßstab in mehr als einem Bild sichtbar ist,}$$

$$\text{ansonsten gilt: } m_{ki} = 0 \quad \text{mit } i = 1, 2, 3,$$

ergibt sich:

$$m_k = m_{k1} + m_{k2} + m_{k3}$$

Falls nach Abb. 5 in einem Bildverband nur der Systemmaßstab  $m_s$  vorgesehen wurde, besteht keine Kontrollmöglichkeit über unabhängige Strecken. Es ist daher als Größe für die Maßstabsdefinition  $m_k$  mindestens der Wert 1 anzustreben. Weiterhin wird gefordert  $m_s = 1$ .

#### 3.3.2 Relative Längenmessabweichung

Auf den System- und Kontrollmaßstäben befinden sich jeweils mindestens zwei klar definierte Zielmarken für welche der Soll-Abstand aus dem Kalibrierungsprotokoll entnommen werden kann. Die Differenz zwischen den gemessenen Ist- und den kalibrierten Soll-Abständen ist ein Kriterium für die erreichte Qualität der dreidimensionalen Punktbestimmung.

Die Kenngröße **relative Längenmessabweichung** wird mit folgender Formel berechnet:



$$s_{kd} = \left| \frac{d_s - d_i}{d_s} \right| \leq s_{zd}$$

Es gilt:

$s_{kd}$  = relative Längenmessabweichung

$d_s$  = kalibrierter Soll-Abstand zwischen zwei Zielmarken

$d_i$  = gemessener Ist-Abstand zwischen zwei Zielmarken

$s_{zd}$  = maximal zulässige relative Längenabweichung

Beispiel:  $d_s = 1000.100 \text{ mm}$ ,  
 $d_i = 1000.060 \text{ mm}$ ,  
 $s_{zd} = 1 : 20000$

$$s_{kd} = \left| \frac{1000.100 - 1000.060}{1000.100} \right|$$

$$= 0,00004 = 1 : 25000$$

Im vorgegebenen Beispiel ist das Kriterium „relative Längenmessabweichung“ erfüllt, da  $s_{kd}$  mit 1 : 25000 kleiner als die geforderte Längenmessabweichung  $s_{zd}$  ist.

#### 4 Qualitätsangaben

Die beschriebenen Kenngrößen ermöglichen vor der Durchführung der Aufnahme eine Einschätzung der Qualität einzelner Teilprozesse der optischen Messkette. Nach der Auswertung und Berechnung der Ergebnisse können mögliche Schwachstellen in der Prozesskette durch die Beurteilung der einzelnen Kenngrößen ermittelt werden. Hieraus ergeben sich Optimierungsmöglichkeiten für zukünftige Messkampagnen.

##### 4.1 Quantitative Beurteilung der Ergebnisse

Wird in der abschließenden Bewertung für jede Kenngröße, welche die Anforderungen erfüllt hat, ein Wertungspunkt vergeben, so ermöglicht die Summation sämtlicher Wertungspunkte die Beurteilung des Gesamtfehlerbudgets der Punktbestimmung. Aus der Gegenüberstellung der theoretisch erreichbaren Punktzahl zur tatsächlich er-

reichten ergibt sich ein Hinweis auf die Gesamtqualität der optischen Messkette.

##### 4.2 Qualitative Beurteilung der Ergebnisse

Konkrete Zahlenwerte lassen sich z.B. aus dem Soll-Ist-Vergleich der Kontrollmaßstäbe ableiten. Die relative Längenmessabweichung ermöglicht somit dem Nutzer die zahlenmäßige Einschätzung der Ergebnisqualität. Da in der Praxis Strecken einfacher kontrolliert werden können als Koordinaten, ist den unabhängigen Kontrollmaßstäben gegenüber isolierten dreidimensionalen Passpunkten der Vorrang zu geben.

#### 5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass unter Zuhilfenahme unterschiedlicher Kenngrößen die einzelnen Teilprozesse der optischen Messkette untersucht und beurteilt werden können.

Da die Grenzwerte für manche Kenngrößen nicht in allen Fällen bereits hinreichend untersucht wurden, ist zu prüfen, ob die Prüfgrößen selbst sowie die Entscheidungsgrenzen noch entsprechend angepasst werden müssen. In den kommenden Monaten werden die vorgestellten Prüfkriterien in unterschiedlichen praktischen Anwendungen auf ihre Eignung untersucht.

Dieser Beitrag soll einerseits Einsteigern in die Anwendung der Nahbereichsphotogrammetrie Hilfestellung zur Optimierung der Aufnahme und Auswertung geben, andererseits wünschen sich die Autoren einen regen Meinungsaustausch zu diesem Thema mit den Berufskollegen.

#### Dank

Anlass für die Entwicklung der hier vorgestellten Kenngrößen sind die aktuellen Untersuchungen im Projekt „Qualitätsermittlung im Fahrzeugbau“. Die Automobilhersteller Volkswagen AG, Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG, Audi AG, BMW AG und DaimlerChrysler AG planen im Rahmen der internationalen ISO-Standardisierung,

diese und ähnliche Kenngrößen zur Charakterisierung der optischen Messkette in einer erweiterten ISO-Norm aufnehmen zu lassen. Unser Dank gilt an dieser Stelle den o.g. Auftraggebern für die vielen Anregungen und konstruktiven Fragen im ISO-Arbeitskreis, ohne die dieser Artikel nicht entstanden wäre.

## Literatur

- DIN EN ISO 8402, 1995: Qualitätsmanagement, Begriffe. Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ) im DIN. – Beuth Verlag, Berlin.
- EOS, 2001: PhotoModeler Pro 4.0, Benutzerhandbuch, S. 61–74. Eos Systems Inc. Vancouver.
- LUHMANN, T., 2000: Nahbereichsphotogrammetrie, Grundlagen, Methoden, Anwendungen, S. 502/503. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000.
- LUHMANN, T. & WENDT, K., 2000: Recommendations for an acceptance and verification test of optical 3-D measurement systems. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, B5: 493–500, Amsterdam.
- RAUTENBERG, U. & WIGGENHAGEN, M., 2002: Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI 2634, Blatt 1. – PFG 2/2002: 117–124.
- ROLLEI, 2002: Rolleimetric CDW, Close-Range Digital Workstation, Benutzerhandbuch, Kap. 3.1–3.5. – RolleiFototechnic GmbH, Braunschweig.

Anschrift der Autoren:

Dr.-Ing. MANFRED WIGGENHAGEN,  
Dipl.-Ing. KARSTEN RAGUSE,  
Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI),  
Nienburger Str.1, D-30167 Hannover  
e-mail: wigge@ipi.uni-hannover.de  
raguse@ipi.uni-hannover.de

Manuskript eingereicht: Dezember 2002  
Angenommen: Januar 2003