

Studienrichtung Vermessungswesen  
Technische Universität Wien

GEOWISSENSCHAFTLICHE  
MITTEILUNGEN

Heft 32

**Qualitäts- und Wirtschaftlichkeitsmodelle  
für die Ingenieurphotogrammetrie**

von  
F. SCHLÖGELHOFER

Veröffentlichung des Institutes für Photogrammetrie u. Fernerkundung

Herausgeber und Verleger: o.Prof.Dr.-Ing.K.Kraus  
Vorstand des Institutes für Photogrammetrie und Fernerkundung  
der Technischen Universität Wien  
A-1040 Wien, Gußhausstraße 27-29

Die Kosten für den Druck wurden aus der ordentlichen Dotation und aus  
eigenen Einnahmen des Institutes für Photogrammetrie und Fernerkundung  
der Technischen Universität Wien getragen.

Druck: ÖHTUW - Vervielfältigung, Wien  
Auflage: 400 Stück

### Kurzfassung:

Die Bündeltriangulation erlangt bei photogrammetrischen Vermessungen im Ingenieurbereich zunehmende Bedeutung. Die Aufnahmeplanung für die photogrammetrische Punktbestimmung im Nahbereich war bisher fast ausschließlich auf den stereophotogrammetrischen Normalfall beschränkt. Bei der Bündelphotogrammetrie kann die Aufnahmeanordnung unabhängig von den optischen und mechanischen Einschränkungen herkömmlicher Auswertegeräte gewählt werden. Die Aufnahmen werden so angeordnet sein, daß sich in den Neupunkten gute Schnittbedingungen ergeben und das Bildformat maximal genutzt wird.

In dieser Arbeit werden zunächst für sehr unterschiedliche Objektformen praxisingerechte Aufnahmeanordnungen unter Einbeziehung verschiedener Paßpunktverteilungen ermittelt. Mit Hilfe des Bündelausgleichungsprogramms ORIENT und mit synthetisch erzeugten Bildkoordinaten werden einige hundert Varianten durchgerechnet und daraus einfache, für den Praktiker einprägsame Genauigkeitsgesetze (Faustformeln) abgeleitet. Eine Kennzahl für die innere Zuverlässigkeit und eine für den Aufwand der gewählten Variante ermöglichen dem Anwender, eine optimale Aufnahmeanordnung für seine Aufgabe zu finden. Die den Anwendern aus der Stereophotogrammetrie geläufige Aufnahmedisposition liefert in der Regel die schlechtesten Kennzahlen für die Genauigkeit und innere Zuverlässigkeit, dafür aber die Möglichkeit, stereoskopisch linienweise auswerten zu können.

Im zweiten Teil der Arbeit werden dann einige praktische Anwendungen der modernen Bündelphotogrammetrie vorgestellt. Es werden dabei die theoretisch ermittelten Genauigkeitswerte und Kennzahlen für die Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit mit den tatsächlich erreichten Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten und dem benötigten Aufwand verglichen.

### Abstract:

Bundle photogrammetry is gaining more and more importance in industrial surveying. Until recently, network design for close-range methods was limited to the so called normal case. Modern bundle photogrammetry allows for arrangements of photographs which are independent from the optically and mechanically restricted stereo compilation. Such arrangements aim at optimal ray intersections at the points to be surveyed, and at utilising the entire image.

In this study, some rules of thumb have been sought for, so to assist the surveyor in designing the network of photogrammetric bundles. Different cases concerning accuracy requirements, object shapes, and control point distribution have been constructed and tested. Hundreds of such simulated examples have been computed with the bundle adjustment system ORIENT. A code of inner reliability, and another one for the case as chosen, enable the surveyor to find the optimum configuration of the network of photogrammetric bundles for his task. Ironically, one of the worst cases concerning accuracy and inner reliability is the traditionally applied normal case.

The second part of this dissertation verifies the conclusions on some applications of modern bundle photogrammetry. The coefficients of accuracy, reliability and economy as determined theoretically are compared with the respective coefficients gained in practice.

#### Danksagung:

Ich danke all denen, durch deren Mithilfe diese Arbeit zustande gekommen ist. Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Kraus danke ich für die Betreuung und die zahlreichen Anregungen. Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Kahmen danke ich für die Übernahme des Koreferates\*. Schließlich danke ich allen Kollegen für die vielen Gespräche, Diskussionen und Hilfen und nicht zuletzt für die angenehme Zusammenarbeit.

\* Diese Arbeit wird bei der technisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität Wien zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften eingereicht.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>0. Anlaß und Zielsetzung dieser Arbeit</b> .....	1
<b>1. Einleitung</b> .....	1
1.1 Problemstellung .....	2
1.2 Mathematische Formulierung .....	5
<b>2. Aufnahmeplanung</b> .....	8
<b>3. Genauigkeitsanforderung</b> .....	10
3.1 Nichtgeometrische Genauigkeitsfaktoren .....	11
3.1.1 Genauigkeit des Einzelstrahls im Bündel .....	11
3.1.2 Erweiterung des mathematischen Modells .....	13
3.2 Geometrische Genauigkeitsfaktoren .....	13
3.2.1 Schnittqualitätsfaktor .....	14
3.2.2 Mittlere Bildmaßstabszahl .....	14
3.2.3 Paßelemente (Lagerung des Bündelblocks) .....	15
3.2.3.1 Paßelementefaktor $p$ .....	16
3.2.3.2 Verformungsfaktor $v$ .....	18
3.2.3.3 Lagerungsgenauigkeitsfaktor $l$ .....	19
3.3 Schlußfolgerung und Genauigkeitgesetz .....	21
<b>4. Zuverlässigkeitsanforderung</b> .....	23
4.1 Berechnung der Zuverlässigkeitsmaße .....	23
4.1.1 Innere Zuverlässigkeit .....	23
4.1.2 Äußere Zuverlässigkeit .....	28
<b>5. Aufwandsberechnung</b> .....	29
5.1 Geodätische Arbeit .....	30
5.2 Photogrammetrische Arbeit .....	31
5.2.1 Photogrammetrische Aufnahme .....	31
5.2.2 Photogrammetrische Auswertung .....	32
5.2.2.1 Bildkoordinatenmessung .....	32
5.2.2.2 Berechnung des Bündelausgleichs .....	33
5.3 Overhead .....	34

<b>6. Vorbemerkungen zu den Simulationsrechnungen</b>	<b>35</b>
6.1 Allgemeines zu den Testanordnungen	35
6.2 Vorbereitende Untersuchungen	38
6.2.1 Symmetrischer Konvergenzfall	38
6.2.2 Einseitiger Konvergenzfall mit horizontaler Basis	40
6.2.3 Symmetrischer Fall von einer Standlinie	41
6.2.4 Einseitiger Konvergenzfall mit vertikaler Basis	42
6.2.5 Einseitiger Konvergenzfall von einer vertikalen Standlinie	43
6.2.6 Symmetrischer Konvergenzfall mit einer Frontalaufnahme	44
6.2.7 Symmetrischer Fall von einer Standlinie aus mit einer Frontalaufnahme	46
6.2.8 Schlußfolgerung aus der Testanordnung "Wand"	48
<b>7. Spezielle Blöcke</b>	<b>51</b>
7.1 Das Objekt "Lange Wand"	51
7.1.1 Paßelementeanordnung	52
7.1.2 Bündelanordnung	54
7.1.3 Schlußfolgerung aus Testanordnung "Lange Wand"	58
7.2 Das Objekt "Würfel"	60
7.2.1 Paßelementeanordnung	60
7.2.2 Bündelanordnung	62
7.2.3 Schlußfolgerung aus Testanordnung "Würfel"	71
7.3 Das Objekt "Enge Gasse"	72
7.3.1 Paßelementeanordnung	72
7.3.2 Bündelanordnung	72
7.3.3 Schlußfolgerungen aus Testanordnung "Enge Gasse"	75
7.4 Das Objekt "Quader"	77
7.4.1 Paßelementeanordnung	78
7.4.2 Bündelanordnung	81
7.4.3 Schlußfolgerung aus Testanordnung "Quader"	89
7.5 Das Objekt "Innenraum"	90
7.5.1 Paßelementeanordnung	90
7.5.2 Bündelanordnung	92
7.5.3 Schlußfolgerung aus Testanordnung "Innenraum"	98
7.6 Das Objekt "Kuppel"	100
7.6.1 Das Objekt "Außenkuppel"	100
7.6.1.1 Paßelementeanordnung	100
7.6.1.2 Bündelanordnung	102
7.6.1.3 Schlußfolgerung aus Testanordnung "Außenkuppel"	108
7.6.2 Das Objekt "Innenkuppel"	109
7.6.2.1 Paßelementeanordnung	109
7.6.2.2 Bündelanordnung	112
7.6.2.3 Schlußfolgerung aus Testanordnung "Innenkuppel"	116

7.7 Das Objekt "Turm" .....	118
7.7.1 Paßelementeanordnung .....	118
7.7.2 Bündelanordnung .....	120
7.7.3 Schlußfolgerung aus Testanordnung "Turm" .....	128
<b>8. Praktische Vorgangsweise .....</b>	<b>130</b>
8.1 Praktische Aufnahmeplanung .....	130
8.2 Praktische Durchführung .....	134
<b>9. Praktische Beispiele .....</b>	<b>136</b>
9.1 Bauaufnahme "AKADEMIE" .....	136
9.2 Bauaufnahme "PASSAU" .....	140
9.3 Überdachung des Wiener Praterstadions .....	145
<b>10. Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>150</b>
Literaturverzeichnis .....	153
Lebenslauf .....	157

## 0. Anlaß und Zielsetzung dieser Arbeit

Anregungen zu der vorliegenden Arbeit ergaben sich aus den Tätigkeiten des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien auf dem Gebiet der terrestrischen Ingenieurphotogrammetrie. Dabei steht die photogrammetrische Punktbestimmung mit Hilfe der Bündelmethode im Mittelpunkt des Interesses.

Bei den vom Institut für Photogrammetrie bearbeiteten Projekten auf dem Gebiet des Stahlbaus, Hochbaus und der Altstadtrevitalisierung tauchte in der Planungsphase der Projekte immer wieder die Frage auf, inwieweit die Anordnung der Bündel der gestellten Aufgabe gerecht wird. Vor allem interessierte auch die optimale Verteilung der Paßpunkte bzw. der Paßelemente. Kann man durch eine bessere Anordnung der Paßelemente einige davon einsparen? Kann man Vollpaßpunkte durch andere Paßelemente (wie Höhenpaßpunkte, Strecken, Objektbedingungen, geodätische Richtungsbündel etc.) ersetzen, ohne eine nennenswerte Genauigkeitseinbuße hinnehmen zu müssen? Wie müssen die einzelnen Bündel angeordnet sein, um die geforderte Genauigkeit zu erreichen? Was bringt ein zusätzliches Bündel für die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung? Diese und ähnliche Fragen stellten wir uns immer wieder bei der Bearbeitung der einzelnen Projekte. Mit der Zeit bekamen wir auf Grund der praktischen Tätigkeit ein "Gefühl" dafür, welche Genauigkeit mit dieser oder jener Anordnung der Bündel erreicht werden kann.

Ziel dieser Arbeit ist es, über die Genauigkeit und Zuverlässigkeit sowie über den Aufwand einzelner standardisierter Aufnahmesituationen Aussagen zu treffen. Dem Praktiker sollen schlußendlich einprägsame und einfache Genauigkeitsgesetze (Faustformeln) zur Verfügung gestellt werden.

### 1. Einleitung

Während der letzten Jahre wurde die Photogrammetrie in zunehmendem Maße für Aufgaben in der Ingenieurvermessung eingesetzt. Bedingt durch neue methodische und instrumentelle Entwicklungen stellt die Ingenieurphotogrammetrie heute ein Meßverfahren dar, welches in der Praxis durch seine Flexibilität, Genauigkeit, Zuverlässigkeit und nicht zuletzt durch seine Wirtschaftlichkeit besticht.

### 1.1 Problemstellung

Die moderne Ingenieurphotogrammetrie arbeitet nach der Bündelmethode. Ein Bündel wird repräsentiert durch die Raumstrahlen zwischen den Objektpunkten und dem Projektionszentrum. Diese Raumstrahlen werden bei einer photogrammetrischen Aufnahme auf dem Negativ konserviert. Die Abbildung der Objektpunkte auf dem Meßbild kann auch als Registrierung der räumlichen Richtungen verstanden werden.

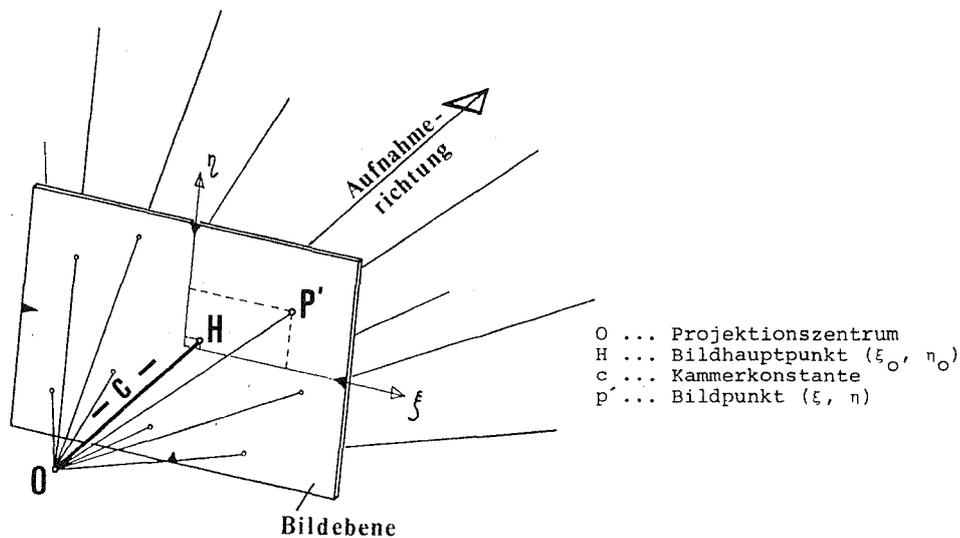


Abb. 1-1: Das photogrammetrische Bündel

Die Auswertung als Umkehrung des Aufnahmevorgangs beginnt mit der Messung der Bildkoordinaten. Diese legen in Verbindung mit der inneren Orientierung (Kammerkonstante, Lage des Bildhauptpunktes, Verzeichnung) das räumliche Strahlenbündel fest. Die Richtungsgenauigkeit der Strahlen eines auf solche Art wiederhergestellten Bündels hängt in erster Linie von der Kammerkonstante  $c$  der jeweiligen Aufnahmekamera und der Genauigkeit  $\sigma_B$  der Bildkoordinatenmessung ab. Detaillierte Richtungsgenauigkeitsangaben dieser Strahlen folgen im Kapitel 3.1.1 .

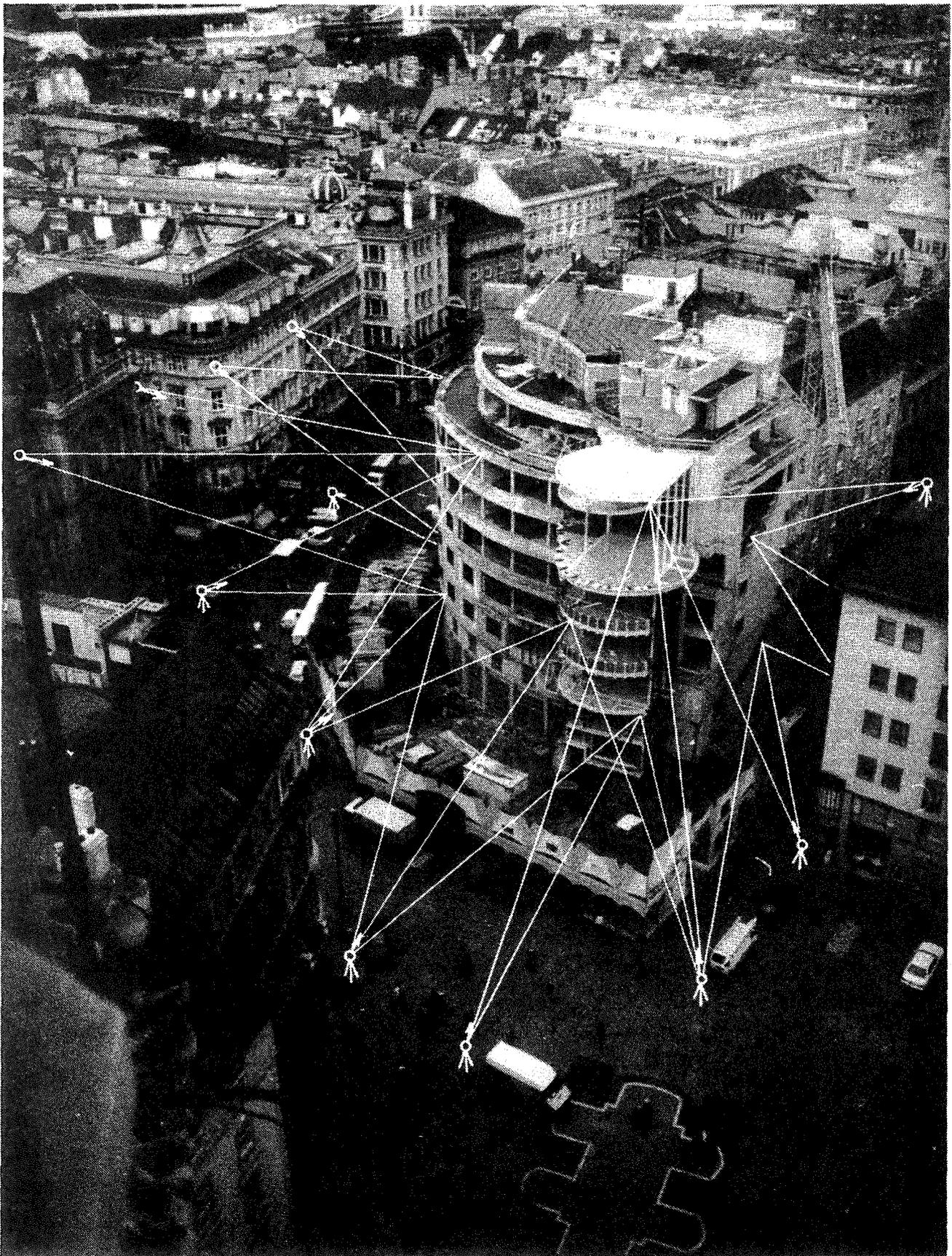
Mit einer einzelnen Aufnahme ist ein Neupunkt noch nicht bestimmbar. Man braucht mindestens einen zweiten räumlichen Strahl. Dieser zweite Strahl stammt von einer weiteren Aufnahme. Dabei soll die räumliche Basis zwischen den beiden Aufnahmestandpunkten möglichst groß sein, so daß sich in den Neupunkten keine spitzen Schnittwinkel ergeben. Zur Bestimmung eines Neupunktes reichen zwar diese zwei Strahlen von zwei verschiedenen Bildern aus. Für eine

befriedigende Zuverlässigkeitskontrolle sind aber mindestens drei Strahlen erforderlich. Dabei sind wieder dieselben Überlegungen anzustellen wie bei der zweiten Aufnahme: Es sind möglichst große räumliche Basen zwischen den Aufnahmestandpunkten zu schaffen, um günstige Schnittwinkel und damit eine große Genauigkeit und Zuverlässigkeit für die Neupunkte zu erreichen. Ein terrestrischer Bündelblock besteht dann im allgemeinen aus vielen solchen Bündeln, die nach diesem Konzept geplant werden. Die Abb. 1-2 zeigt eine typische Bündelanordnung für ein Hochbauprojekt.

Eingabedaten für die Bündeltriangulierung sind die gemessenen Bildkoordinaten der Neu-, Paß- und Verknüpfungspunkte, die Objektkoordinaten der Paßpunkte, eventuell bekannte Paßelemente, Näherungswerte für die Aufnahmerichtungen und die innere Orientierung der verwendeten Kamera, falls es sich um Aufnahmen mit Meßkammern handelt. Bei Projekten mit Photos von Amateurkameras kennt man nur genäherte Werte für die innere Orientierung. Unbekannt sind im allgemeinen die Elemente der äußeren Orientierung eines jeden Strahlenbündels (das sind die drei Koordinaten für den Aufnahmeort und die drei Winkel für die räumliche Stellung des Bildes). Über die Verknüpfung mittels gemeinsamer Objektpunkte lassen sich die Elemente der äußeren Orientierung für alle Strahlenbündel simultan im Rahmen einer Ausgleichung bestimmen. Dabei werden die Strahlenbündel so verschoben (drei Translationen in X-, Y-, Z-Richtung) und so gedreht (drei Drehwinkel Azimut (Az), Zenitdistanz (Ze), Kappa (Ka)), daß sie einander an den Verknüpfungspunkten möglichst gut schneiden und möglichst gut mit den Paßpunkten zusammentreffen. Als Ergebnis des Bündelausgleichs erhält man außer den Koordinaten der Neupunkte auch die dazugehörigen mittleren Fehler und die Kovarianzen zwischen den Unbekannten.

Der Vorteil dieser modernen Photogrammetrie ist eine enorme Flexibilität bei der Aufnahme und eine gewaltige Genauigkeits- und Zuverlässigkeitssteigerung der photogrammetrischen Punktbestimmung. Bei der Aufnahmeplanung braucht man im allgemeinen keine Rücksicht mehr auf Stereomodelle und Stereoskopie nehmen. Die Planung der Aufnahmeorte sollte sich in erster Linie auf gute Schnittbedingungen in den Objektpunkten konzentrieren.

Der Nachteil für den Praktiker liegt sicherlich darin, daß es nun in der Planungsphase eines Projektes wesentlich schwieriger ist, die zu erwartende Genauigkeit abzuschätzen. Während es für ein Stereomodell oder für einen Luftbildblock (genäherte Senkrechtaufnahmen; 60% Längsüberdeckung) viele Unter-



*Abb. 1-2: Eine zuverlässige und genaue Bündelanordnung  
bei einem Hochbauprojekt (Haas-Haus, Wien;  
Auftraggeber: Ingenieurbüro 'Dr. H. Meixner)*

suchungen und Genauigkeitsgesetze gibt (z.B. /Ackermann 1965, 1966, 1967, u. a./), fehlen diese für den weit komplizierteren Fall der terrestrischen Bündeltriangulierung fast vollkommen. Es ist auch unmöglich, für die unzähligen in der Praxis auftretenden Aufnahmesituationen Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsgesetze anzugeben. Dennoch möchte ich für einige häufig vorkommende Objektformen praxisnahe Aufnahmekonfigurationen vorschlagen und für diese oder ähnliche Situationen einfache Formeln und Diagramme angeben. Mit deren Hilfe soll der Praktiker in der Planungsphase eines Projektes die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung verhältnismäßig einfach abschätzen und auch unter Berücksichtigung des Aufwands eine "optimale" Aufnahmeanordnung angeben können.

### 1.2 Mathematische Formulierung

Für die mathematische Formulierung wird vorerst eine exakte Zentralperspektive vorausgesetzt. Das heißt, daß sämtliche Aufnahmestrahlen ihren Ursprung im Projektionszentrum haben. Ein Objektpunkt  $P$ , der entsprechende Bildpunkt  $p'$  und das Projektionszentrum  $O$  liegen stets auf einer Geraden. Die im mathematischen Modell zu formulierenden geometrischen Verhältnisse sind in der Abbildung 1-3 veranschaulicht.

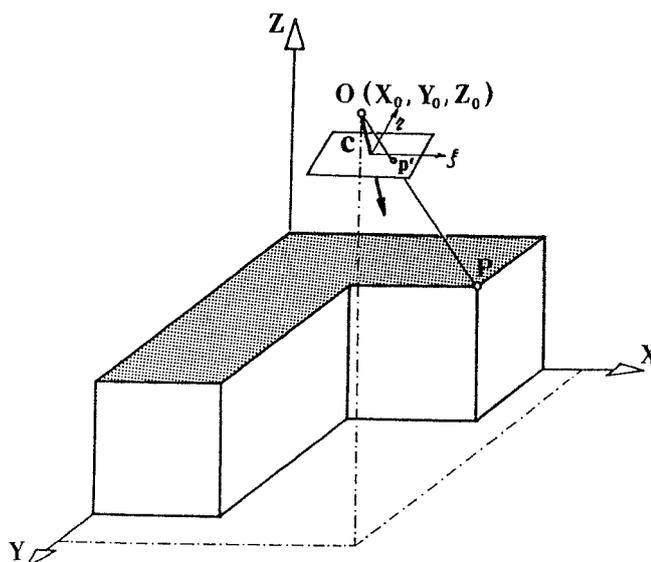


Abb. 1-3: Zusammenhang zwischen den ebenen Bildkoordinaten und den dreidimensionalen Objektkoordinaten

Die mathematische Formulierung beruht auf der Kollinearitätsbedingung. Die gesuchte Beziehung zwischen Bild- und Objektkoordinaten ergibt sich aus den bekannten Formeln (z.B. /Kraus 1982 b/):

$$\xi = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$
$$\eta = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

(1-1)

Da es sich im allgemeinen um eine überbestimmte Aufgabe handelt - d.h. es liegen mehr Beobachtungen als Unbekannte vor - sind die Unbekannten nach den Formeln des vermittelnden Ausgleichs zu bestimmen.

Ausgehend von den Verbesserungsgleichungen

$v = Ax - l$

(1-2)

sind nach dem Prinzip der Methode der kleinsten Quadrate die Unbekannten so zu bestimmen, daß gilt:

$$[ pvv ] = \text{Minimum}$$

Die Minimumsbedingung in Matrixschreibweise:

$$v^T P v = \text{Minimum} \tag{1-3}$$

(1-2) in (1-3) eingesetzt, ergibt:

$$v^T P v = (x^T A^T - l^T) P (Ax - l) = x^T A^T P A x - x^T A^T P l - l^T P A x + l^T P l$$

Zur Bestimmung des Minimums ist die erste Ableitung nach x Null zu setzen:

$$\frac{\delta(v^T P v)}{\delta x} = 2A^T P A x - 2A^T P l = 0$$

Daraus folgen die Normalgleichungen:

$$A^T P A x - A^T P l = 0 \tag{1-4}$$

Setzt man für  $A^T P A = N$  (Normalgleichungsmatrix), so folgt:

$$N x - A^T P l = 0 \tag{1-5}$$

Multipliziert man jetzt mit der "Kehrmatrix"  $N^{-1}$ , so ergibt sich:

$$N^{-1}Nx - N^{-1}A^T p_1 = 0 \qquad (N^{-1}N = E)$$

Damit erhält man den Vektor  $x$  der Unbekannten:

$$x = N^{-1}A^T p_1 \qquad (1-6)$$

Die Normalgleichungsmatrix  $N$  ist eine quadratische Matrix mit einer Dimension von  $n \times n$  ( $n$  ist die Anzahl der Unbekannten). Bei umfangreichen terrestrischen Bündelblöcken können sich dabei sehr große Gleichungssysteme ergeben, die jedoch mit Hilfe geeigneter Algorithmen (z.B. /Gsandtner, Kager 1988/) selbst auf Personalcomputern zu lösen sind.

## 2. Aufnahmeplanung

Bei der Aufnahmeplanung in der Ingenieurphotogrammetrie wird man im allgemeinen nach folgenden Anforderungen vorgehen:

- Genauigkeitsanforderung
- Zuverlässigkeitsanforderung
- Ökonomische Anforderung (Beschränkung des Aufwands).

Ziel einer guten Aufnahmeplanung ist es, diese drei Kriterien zu optimieren. Optimieren bedeutet Minimieren oder Maximieren einer Zielfunktion. Wobei im Fall einer ingenieurphotogrammetrischen Aufnahmeplanung die drei oben erwähnten Kriterien (Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Aufwand) Parameter dieser Zielfunktion darstellen. Das vorliegende Problem läßt sich mathematisch folgendermaßen definieren:

$$Z = f (T, S, U) \qquad (2-1)$$

Z .... Zielfunktion

T .... Genauigkeitsanforderung

S .... Zuverlässigkeitsanforderung

U .... Kosten

Diese Parameter sind untereinander stark korreliert und schließen sich teilweise aus. Sie können daher niemals gemeinsam streng erfüllt werden. So wird zum Beispiel durch das Anfertigen eines weiteren Photos im allgemeinen die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Punktbestimmung gesteigert. Das zusätzliche Photographieren und Ausmessen des Bildes vergrößert jedoch den Aufwand. Für eine Aufnahmeplanung bei der terrestrischen Bündelmethode kann diese Zielfunktion nun zum Beispiel lauten:

- Maximum an Genauigkeit und Zuverlässigkeit ("Maximierungsprinzip")

(z.B.: Die Kosten dürfen einen vorgesehenen Betrag nicht übersteigen. Mit diesen vorgegebenen Kosten ist die maximale Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Punktbestimmung zu erreichen).

- Minimum der Kosten ("Sparprinzip")

(z.B.: Die vorgegebenen Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanforderung muß eingehalten werden. Die dabei entstehenden Kosten sollen so gering wie möglich gehalten werden).

Das Ermitteln einer exakten Lösung dieser komplexen Problematik ist wegen der fehlenden Eingabedaten und des zu großen Rechenaufwands bei der praktischen Aufnahmeplanung im allgemeinen nicht möglich. Erste Ansätze dazu findet man zum Beispiel in /Zinndorf 1986/.

Es ist aber möglich, an Hand der Faustformeln dieser Arbeit und von Erfahrung, Intelligenz und Intuition empirische Lösungen anzugeben, die zwar nicht unbedingt zum Optimum führen, sich diesem jedoch ausreichend nähern. Die angedeutete Vorgangsweise zeigt das Ablaufdiagramm in Abb. 8-1.

Für "Standardobjekte" werden in den folgenden Kapiteln einige "Standardaufnahmesituationen" beschrieben, so daß auch der Anwender, der mit der terrestrischen Bündelphotogrammetrie nicht vertraut ist, Anhaltswerte für die Eingabeparameter der Optimierung der Bündelphotogrammetrischen Aufnahmeanordnung zur Verfügung hat.

### 3. Genauigkeitsanforderung

Beim vermittelnden Ausgleich ist es bekanntlich möglich, den zu erwartenden Punktfehler vorweg ohne jede Messung zu berechnen. Es genügt die Kenntnis der Netzgeometrie und des Gewichtsansatzes. Die invertierte Normalgleichungsmatrix ergibt die Kofaktorenmatrix:

$$Q_{XX} = N^{-1} \quad (3-1)$$

Die Kofaktorenmatrix enthält in der Hauptdiagonale die Gewichtskoeffizienten der Unbekannten. In den Nebendiagonalen stehen die gemischten Gewichtskoeffizienten. Multipliziert man die  $Q_{XX}$ -Matrix noch mit  $\sigma_0^2$  (= Varianz der Gewichtseinheit), so erhält man die Kovarianzmatrix  $\Sigma_{XX}$ .

$$\Sigma_{XX} = \sigma_0^2 \cdot Q_{XX} \quad (3-2)$$

Die Kovarianzmatrix  $\Sigma_{XX}$  ist der alleinige Träger der Genauigkeitsinformationen für den jeweiligen Bündelblock. Führt man nun statt der berechneten Varianz der Gewichtseinheit einen geschätzten Wert ein, kann man die Genauigkeit a priori zum Zeitpunkt der Aufnahmeplanung bestimmen. Es läßt sich nämlich aus der  $Q_{XX}$ -Matrix und dem  $\sigma_0$  a priori ein Maß für den räumlichen Punkt-lagefehler abschätzen:

$$\sigma_{p_i} = \pm \sigma_0 \sqrt{q_{xx_i}^2 + q_{yy_i}^2 + q_{zz_i}^2} = \pm \sqrt{\sigma_{x_i}^2 + \sigma_{y_i}^2 + \sigma_{z_i}^2} \quad (3-3)$$

Dieses Verfahren ist jedoch relativ rechenaufwendig. Deshalb soll im folgenden versucht werden, für den zu erwartenden Punktlagefehler eine einfache Abschätzungsformel anzugeben. Dazu ist es notwendig, die Größe der einzelnen genauigkeitsbeeinflussenden Faktoren zu kennen und sie richtig in Relation zu setzen.

Die genauigkeitsbeeinflussenden Faktoren lassen sich in die Gruppe der geometrischen und in die der nichtgeometrischen Faktoren unterteilen. In die Gruppe der geometrischen Faktoren fallen alle Parameter, die die Netzgeometrie der Bündeltriangulierung irgendwie beeinflussen können (Aufnahmeanordnung der einzelnen Bündel; Anordnung der Paßelemente). Zu der Gruppe der nichtgeometrischen Faktoren zählen die Richtungsgenauigkeit des Einzelstrahls im Bündel und gewisse Erweiterungen des mathematischen Modells des Bündelausgleichs.

### 3.1 Nichtgeometrische Genauigkeitsfaktoren

Die in diesem Kapitel beschriebenen genauigkeitsbeeinflussenden Faktoren unterteilt Zinndorf /1986/ in:

- kammerabhängige Parameter
- messungsabhängige Parameter
- Erweiterungen des mathematischen Modells

Ich möchte die kammerabhängigen und messungsabhängigen Parameter unter "Richtungsgenauigkeit eines Einzelstrahls im Bündel" zusammenfassen.

#### 3.1.1 Genauigkeit des Einzelstrahls im Bündel

Der Richtungsfehler  $\sigma_R$  eines Einzelstrahls in einem photogrammetrischen Strahlenbündel ist in erster Linie abhängig von der Kammerkonstante  $c$  der verwendeten Kammer und der Genauigkeit  $\sigma_B$  der gemessenen Bildkoordinaten. Die Genauigkeit einer gemessenen Bildkoordinate  $\sigma_B$  in einem photogrammetrischen Strahlenbündel ist abhängig von:

- der Definitionsunsicherheit der Objektpunkte (Signale oder natürliche Punkte)
- der Lage innerhalb des Strahlenbündels
- der Abbildungsqualität (Objektbeleuchtung, verwendete photographische Emulsion, ....)
- der Objektpunktabbildung (Bildmaßstab, Frontalaufnahmen oder Schrägaufnahmen,...)
- der verwendeten Kamera
- dem verwendeten Auswertegerät (Komparator, Digitizer, ...).

Für gut einstellbare Signale kann heute bei Verwendung von modernen Komparatoren eine Genauigkeit der gemessenen Bildkoordinaten von etwa  $\pm 4 \mu\text{m}$  erreicht werden. Die Genauigkeit von nichtsignalisierten Objektpunkten ist vor allem abhängig von der Definitionsunsicherheit der Punkte und ist etwa um den Faktor zwei schlechter als bei signalisierten Punkten.

In der Tab. 1-1 sind für verschiedene terrestrische Meßkammern die Richtungsfehler  $\sigma_R$  der räumlichen Strahlenbündel eingetragen, zusätzlich noch die vom Bildformat abhängigen Öffnungswinkel dieser Strahlenbündel.

Kamera	Kammerkonstante c (mm)	Richtungsfehler $\sigma_R$ (mgon)	Format (mm x mm)	Öffnungswinkel (gon x gon)
Jenoptik UMK	100	$\pm 2.5$	120 x 166	64 x 84
	200	$\pm 1.3$	120 x 166	34 x 47
	300	$\pm 0.8$	120 x 166	23 x 32
Wild P31	45	$\pm 5.6$	92 x 118	94 x 112
	100	$\pm 2.5$	84 x 118	44 x 62
	202	$\pm 1.3$	83 x 118	23 x 33
Wild P32	64	$\pm 4.0$	60 x 80	46 x 64
Zeiss TMK	60	$\pm 4.2$	80 x 95	67 x 78

*Tab. 1-1 : Richtungsfehler  $\sigma_R$  des fotogr. Strahlenbündels bei einem Bildkoordinatenfehler  $\sigma_B = \pm 4 \mu m$ , und Öffnungswinkel dieser Strahlenbündel nach Berücksichtigung eines 5 mm breiten Sicherheitsstreifen am Bildrand (Tab. entnommen aus /Kraus 1984 b/)*

Wie aus der Tab. 1-1 ersichtlich ist, beträgt der Richtungsfehler  $\sigma_R$  zwischen  $\pm 0.8$  mgon und  $\pm 5.6$  mgon. Je höher die Genauigkeit, desto kleiner ist aber der Öffnungswinkel des Strahlenbündels (vgl. /Kraus 1984 b/).

Nach einer Untersuchung von Kahler /1984/ sollten die gemessenen Bildkoordinaten, abhängig von ihrer Lage im Strahlenbündel, mit ungleicher Genauigkeit in den Ausgleich eingeführt werden. Kahler hat empirische Untersuchungen für die Punkteinstellung in terrestrischen Meßbildern durchgeführt. Diese Untersuchungen zeigen ein Ansteigen der Varianzen in radialer Richtung zum Bildrand für beide Bildkoordinaten. Dieser Verlauf des Einstellfehlers kann laut Kahler durch die Varianzfunktion

$$\sigma_i^2 = \frac{\sigma_0^2}{\cos^2 k \alpha_i}$$

beschrieben werden. Der Winkel  $\alpha$  ist der Einfallswinkel des Bildstrahls zur optischen Achse des Objektivs. Kahler empfiehlt, für terrestrische Meßaufnahmen  $k = 2$  einzuführen. Die Verschlechterung zum Bildrand hin dürfte auch auf den Einfluß von Unebenheiten der Bildebene zurückzuführen sein.

### 3.1.2 Erweiterung des mathematischen Modells

Systematische Bildfehler beeinflussen das Ergebnis des Ausgleichs sehr wesentlich. Das mathematische Modell des Bündelausgleichs kann durch die Einführung zusätzlicher Parameter den physikalischen Gegebenheiten besser angepaßt werden. Richtig eingeführte zusätzliche Parameter können systematische Bildfehler weitgehend kompensieren. Es besteht jedoch die Gefahr der Überparameterisierung. Eine richtige Auswahl der Parameter für den individuellen Fall erfordert große praktische Erfahrung (/Grün 1978/; /Torlegard 1981/).

### 3.2 Geometrische Genauigkeitsfaktoren

Die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung nach der Bündelmethode hängt einerseits von der Richtungsgenauigkeit des Einzelstrahls im Bündel (nichtgeometrische Faktoren) und andererseits sehr wesentlich von der Geometrie der Bündelanordnung ab. Während die nichtgeometrischen Faktoren für eine gestellte Aufgabe mehr oder weniger durch das vorhandene Instrumentarium (Kamera, Komparator) und durch die Tatsache, ob es sich um signalisierte oder natürliche Punkte handelt, vorgegeben sind, hat man im allgemeinen bei einer Aufnahmeplanung bei den geometrischen Genauigkeitsfaktoren wesentlich mehr Entscheidungsfreiheit.

Bei der herkömmlichen Normalfallphotogrammetrie konnte man nur relativ wenige Faktoren variieren. Bei der modernen Bündelphotogrammetrie ändert sich das vollständig. Von der rechentechnischen Seite her kennt die Bündelphotogrammetrie keine Grenzen der Aufnahmekonfigurationen. Diese Variationsbreite macht aber gerade die terrestrische Bündelphotogrammetrie zu einem extrem flexiblen Aufnahmeverfahren. Die Ingenieurphotogrammetrie kann damit in neue Bereiche vorstoßen und in solche, die bisher anderen Meßverfahren vorbehalten waren.

Die geometrischen Faktoren sollen die folgenden die Genauigkeit beeinflussenden Bereiche charakterisieren:

- Schnittqualität (Kap. 3.2.1)
- Abbildungsmaßstab (Kap. 3.2.2)
- Paßelemente (Lagerung und Stabilisierung des Bündelblocks)  
(Kap. 3.2.3)

### 3.2.1 Schnittqualitätsfaktor

Die Anordnung der Strahlenbündel für eine terrestrische photogrammetrische Punktbestimmung ist natürlich stark von den Gegebenheiten an Ort und Stelle abhängig. Eine allgemein gültige Anordnung kann daher nicht gefunden werden. Die Anordnung der Bündel und vor allem die Aufnahmerichtungen werden bei einer guten Aufnahmeplanung so gewählt, daß sich in den Neupunkten gute Schnittbedingungen ergeben und die Schnittqualität möglichst wenig über das gesamte Objekt variiert.

Unter dem "Schnittqualitätsfaktor" versteht man eine Kennzahl, die die Schnittqualität in den Neupunkten bei einer bestimmten Aufnahmeanordnung angibt. Dieser Faktor wird im folgenden mit  $o$  bezeichnet und wird bestimmt durch die räumlichen Schnittwinkel in den Neupunkten und der Anzahl der zugehörigen Aufnahmestrahlen. Ein bestimmter Faktor gilt natürlich nur für eine konkrete Aufnahmeanordnung, ist aber unabhängig vom Bildmaßstab. Je kleiner der Faktor, desto besser die Schnittqualität. Im allgemeinen wird man versuchen, die Basis möglichst groß zu wählen, und unter Aufgabe der Stereoskopie stark konvergente Aufnahmen anzufertigen.

Betrachtet man als einfachsten Fall den Normalfall der Stereophotogrammetrie, so spiegelt dieser Faktor das Verhältnis zwischen der Aufnahmebasis  $b$  und der Aufnahmeentfernung  $E$  wider. Das ist das sogenannte Basisverhältnis  $b/E$ . Bei komplizierten Bündelblöcken, wo das Objekt nicht nur stereo sondern mehrfach gedeckt ist, fällt die Angabe eines solchen Faktors schon wesentlich schwerer. In den Kapiteln 6. und 7. werden für einzelne Standardaufnahmefälle die jeweils ermittelten Faktoren angegeben.

### 3.2.2 Mittlere Bildmaßstabszahl

Neben dem Schnittqualitätsfaktor ist die mittlere Bildmaßstabszahl ein wichtiger Parameter, der die geometrische Genauigkeit beeinflusst. Über den Bildmaßstab läßt sich nämlich die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung ganz einfach steuern. Je kleiner die mittlere Bildmaßstabszahl ist, desto größer ist die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung. Es läßt sich damit eine nahezu beliebige Steigerung der Genauigkeit erreichen. Die Angabe der mittleren Bildmaßstabszahl ist bei Frontalaufnahmen

sehr einfach. Die mittlere Bildmaßstabszahl ist dabei nur abhängig von der Aufnahmeentfernung und der Kammerkonstante.

$$m = \frac{E}{c} \quad (3-4)$$

m ..... mittlere Bildmaßstabszahl  
E ..... Aufnahmeentfernung  
c ..... Kammerkonstante

Eine Verkleinerung der mittleren Bildmaßstabszahl erreicht man entweder durch eine Verkleinerung der Aufnahmeentfernung oder durch Verwendung einer größeren Kammerkonstante. Man wird daher bemüht sein, soweit es die Raumverhältnisse zulassen, mit einer möglichst kleinen Bildmaßstabszahl zu photographieren. Ein sinnvoller Wert für die mittlere Bildmaßstabszahl wird sich allerdings unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit ergeben.

Bei Schrägaufnahmen ist die Angabe einer mittleren Bildmaßstabszahl wesentlich schwieriger. Sie wird definiert als das integrale Mittel der Bildmaßstabszahl über die Bildfläche. Bei den einzelnen Standardaufnahmevarianten in den Kapiteln 6. und 7. wird sie jeweils für die entsprechende Variante ermittelt. Die Standardaufnahmevarianten sind prinzipiell maßstabslos. Sie beschreiben nur die relative Lage der Projektionszentren zueinander und zum Objekt. Durch Festlegen einer Strecke (das kann zum Beispiel der Normalabstand der (Schräg-) Aufnahmen zum Objekt sein) ist der Maßstab bestimmt. Ändert man diese Strecke, so ändern sich auch alle anderen Strecken in der Aufnahmeanordnung; im selben Verhältnis ändert sich dann auch die mittlere Bildmaßstabszahl.

### 3.2.3 PaBelemente

Die PaBelemente werden zur Lagerung und Stabilisierung des Bündelblocks verwendet. Als PaBelemente können zum Beispiel vorliegen:

- Vollpaßpunkte
- Lagepaßpunkte
- Höhenpaßpunkte
- Nivellierte Höhenunterschiede
- Strecken
- Winkel

- Geodätische Richtungsbündel
- Informationen über die gegenseitige Lage von Punkten  
(Gerade, Ebene, usw.)

Ihre Anzahl, Verteilung und Genauigkeit beeinflussen die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung. Um die Lagerung des Bündelblocks zu bewerkstelligen und damit den Rangdefekt der Normalgleichungsmatrix zu beseitigen, muß durch die Paßelemente mindestens jeder der sieben Freiheitsgrade der absoluten Lagerung einfach und hinreichend genau definiert sein. Diese Problematik ist dem Photogrammeter von der absoluten Orientierung eines Stereomodells her bekannt.

Die Paßelemente werden natürlich nicht als fehlerfrei in den Ausgleich eingeführt. Sie sind genauso, wie alle anderen Messungen, mit einem mittleren Fehler behaftet. Die Paßelemente führt man daher auch als verbesserungsbedürftige Beobachtungen in den Ausgleich ein. Die Genauigkeit der Paßelemente beeinflußt sehr stark die Lagerungsgenauigkeit des gesamten Bündelblocks (Berücksichtigung durch den Faktor  $l$ ). Die Genauigkeit der Paßelemente sollte etwa in der Größenordnung der erwarteten photogrammetrischen Punktgenauigkeit liegen. Ungenauere Paßelemente beseitigen zwar den Rangdefekt, tragen aber wenig oder fast nichts zur Blockgenauigkeit bei.

Die Paßelemente sollen möglichst gut über das gesamte Objekt verteilt sein, und zwar so, daß ein gedachtes, umschließendes räumliches Polyeder - mit den Paßpunkten als Eckpunkte - fast den gesamten Objektpunktebereich umschließt. Größere Extrapolationen ergeben nämlich sehr ungünstige Genauigkeiten.

Die Genauigkeit der Bündelphotogrammetrischen Punktbestimmung verschlechtert sich natürlich mit der Reduktion der Anzahl der Paßpunkte. Beim Durchrechnen der verschiedenen Versionen und Varianten (Kap. 7.) stellte es sich heraus, daß die Auswirkung der Paßpunktverteilung auf die Genauigkeit stark abhängig ist von der Größe des paßpunktlosen Bereichs (Berücksichtigung durch den Paßelementefaktor  $p$ ) und von der Anordnung der Bündel (Berücksichtigung durch den Verformungsfaktor  $v$ ).

#### 3.2.3.1 Der Paßelementefaktor $p$

In der Luftbildmessung führt man zur Genauigkeitsabschätzung die Anzahl der Modelle ein, die einen paßpunktlosen Bereich überbrücken /Ackermann 1965/.

Bei den üblichen terrestrischen Bündelblöcken mit Mehrfachdeckung und Konvergentaufnahmen ist der Begriff Modell nur mehr schwer zu definieren. Näherliegend ist da schon der Begriff des einzelnen Bündels. Da aber in einem terrestrischen Bündelblock verschiedenste Aufnahme­richtungen und Aufnahme­entfernungen erlaubt sind, ergeben sich die unterschiedlichsten Bildmaßstäbe. Um für die Abschätzung eine einheitliche Bezugsgröße zu schaffen, kann man für streifenartige Bündelblöcke eine imaginäre Frontalaufnahme mit dem mittleren Bildmaßstab der tatsächlichen Aufnahmen annehmen. Die Anzahl  $f$  solcher Frontalaufnahmen, die notwendig sind, um einen paßpunktlosen Bereich zu überbrücken, scheint daher eine geeignete Größe zu sein.

$$f = \frac{g}{s}$$

$f$  ..... Anzahl der imaginären Frontalaufnahmen

$s$  ..... Bildseite in der Natur (Frontalaufnahme; mittl. Bildmaßstab)

$g$  ..... Paßpunktfreie Strecke in der Natur

Zum besseren Verständnis ein kleines Beispiel: Eine bestimmte Aufnahmeanordnung hat zum Beispiel eine mittlere Bildmaßstabszahl von 250. Es wird mit einer P31-WW-Kamera ( $c = 100$  mm; Format 90 mm x 120 mm) photographiert. Daraus ergibt sich die Seite  $s$  in der Natur:

$$s = 250 \cdot 0.12 = 30 \text{ m}$$

Es handelt sich um einen streifenartigen Bündelblock; die Paßpunkte sind im Abstand von 60 Metern angeordnet:

$$g = 60 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad f = \frac{60}{30} = 2$$

Mit zwei solchen imaginären Frontalaufnahmen kann in diesem Beispiel der paßpunktlose Bereich überbrückt werden. Die Funktion, die den Faktor  $f$  in den gesuchten Paßelementefaktor  $p$  umwandelt, kann man direkt aus dem Diagramm in Abbildung 3-1 entnehmen. Das Diagramm in Abbildung 3-1 wurde aus Simulationen streifenartiger terrestrischer Bündelblöcke gewonnen (Kapitel 7.1). Der Verlauf entspricht im wesentlichen den bekannten Genauigkeitsgesetzen der Streifentriangulation. Dieses Diagramm bringt für den Praktiker den Vorteil, schnell eine Größenordnung für den Paßelementefaktor zu haben.

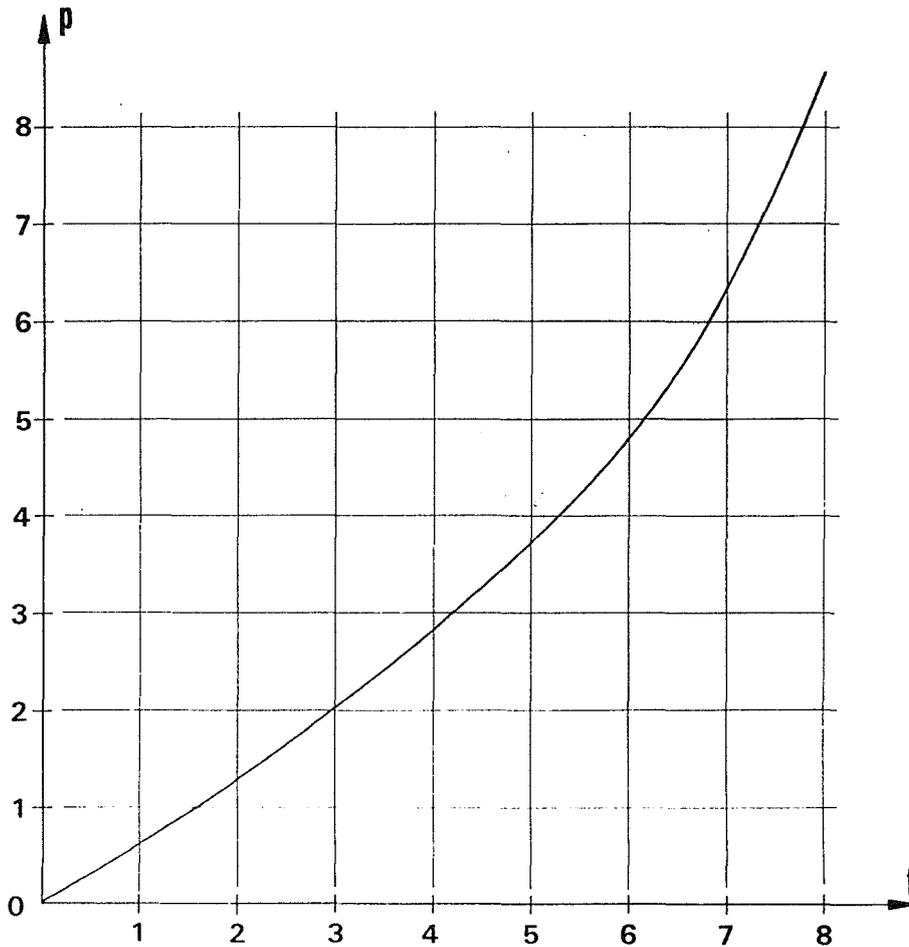


Abb. 3-1: Der PaBelementefaktor  $p$

Für das oben angeführte Beispiel ergibt sich bei  $f = 2$  ein PaBelementefaktor  $p = 1.3$ . Das Diagramm in Abb. 3-1 gilt nur für streifenartige terrestrische Bündelblöcke. Für nichtstreifenartige "Standardobjekte" (siehe Kap. 7.) werden die Werte für  $p$  jeweils bei der Besprechung der einzelnen Aufnahmevarianten angeführt. Wie die Anzahl und Verteilung der PaBelemente die Genauigkeit der Punktbestimmung beeinflusst, hängt auch noch vom sogenannten Verformungsfaktor  $v$  ab.

### 3.2.3.2 Der Verformungsfaktor $v$

Die Geometrie der Bündelanordnung beeinflusst natürlich die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung sehr wesentlich. Sie drückt sich einerseits im Schnittqualitätsfaktor  $o$  (Kap. 3.2.1) aus, andererseits im Verformungsfaktor  $v$ . Je anfälliger die Bündelanordnung gegen das Ausschwingen und Verwinden in paßpunktlosen Bereichen ist, desto größer wird der Faktor  $v$ .

Das Produkt  $v \cdot p$  gibt die zu erwartende Verschlechterung der Punktbestimmung durch Einsparen von Paßpunkten an. Der Faktor  $v$  für die einzelnen Standardaufnahmesituationen wurde wieder aus Simulationen empirisch bestimmt. Er ist jeweils bei der Beschreibung der entsprechenden Standardaufnahmesituation angeführt (Kap. 7.).

### 3.2.3.3 Der Lagerungsgenauigkeitsfaktor $l$

Die Genauigkeit der verwendeten Paßelemente, und hier vor allem der Paßpunkte, beeinflußt sehr wesentlich die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung. Je schlechter die Genauigkeit der Paßelemente, desto größer wird der Faktor  $l$ . Man muß aber die Genauigkeit der Paßelemente in Relation zur inneren Genauigkeit der Photogrammetrie setzen. Die innere Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung kann man ausreichend genau durch die Formel

$$\sigma_{\text{Pho}} = m \cdot \sigma_B \cdot o$$

bestimmen. Wobei es sich bei  $m$  um die mittlere Bildmaßstabszahl (wie in Kap. 3.2.2 beschrieben), bei  $\sigma_B$  um den mittleren Bildkoordinatenfehler (Kap. 3.1.1) und bei  $o$  um den Schnittqualitätsfaktor (Kap. 3.2.1) handelt.

Sind zum Beispiel für einen Fall die Paßelemente mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  cm verhältnismäßig genau, weil die innere Genauigkeit der Photogrammetrie ( $m \cdot \sigma_B \cdot o$ ) =  $\pm 2$  cm ergibt, so können in einem anderen Fall die Paßelemente mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  cm als sehr ungenau angesehen werden, wenn die innere Genauigkeit der Photogrammetrie zum Beispiel  $\pm 1$  mm ergibt.

Wie sich die Genauigkeit der Paßelemente auf die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung auswirkt, kann der Abb. 3-2 entnommen werden. Der Faktor  $f_l$  gibt das Verhältnis der Paßelementegenauigkeit ( $\sigma_{pp}$ ) zur inneren Genauigkeit der Photogrammetrie ( $m \cdot \sigma_B \cdot o$ ) an. Der Faktor  $f_l$  ist gleich eins, wenn die Genauigkeit der Paßelemente ( $\sigma_{pp}$ ) gleich der inneren Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung ( $m \cdot \sigma_B \cdot o$ ) ist. Dann ist aber auch dieser Einfluß auf die Genauigkeit der bündelphotogrammetrischen Punktbestimmung vernachlässigbar klein. Es kommt dann weder zu einer zusätzlichen Genauigkeitssteigerung noch zu einem zusätzlichen Genauigkeitsverlust. Der Faktor  $l$  im Diagramm in Abb. 3-2 ergibt daher dafür den Wert Null. Ist der Faktor  $f_l$  größer als eins - d.h. die Paßelementegenauigkeit ist schlechter als die innere Genauigkeit des photogrammetrischen Blocks - dann wird der Faktor  $l$

größer als Null. Sofern die Paßelemente genauer als die innere Genauigkeit der Photogrammetrie sind, erreicht der Faktor  $f_l$  Werte zwischen 0 und 1. Wie aus dem Diagramm in Abb. 3-2 ersichtlich ist, entspricht das  $l$ -Werten zwischen 0 und -1.

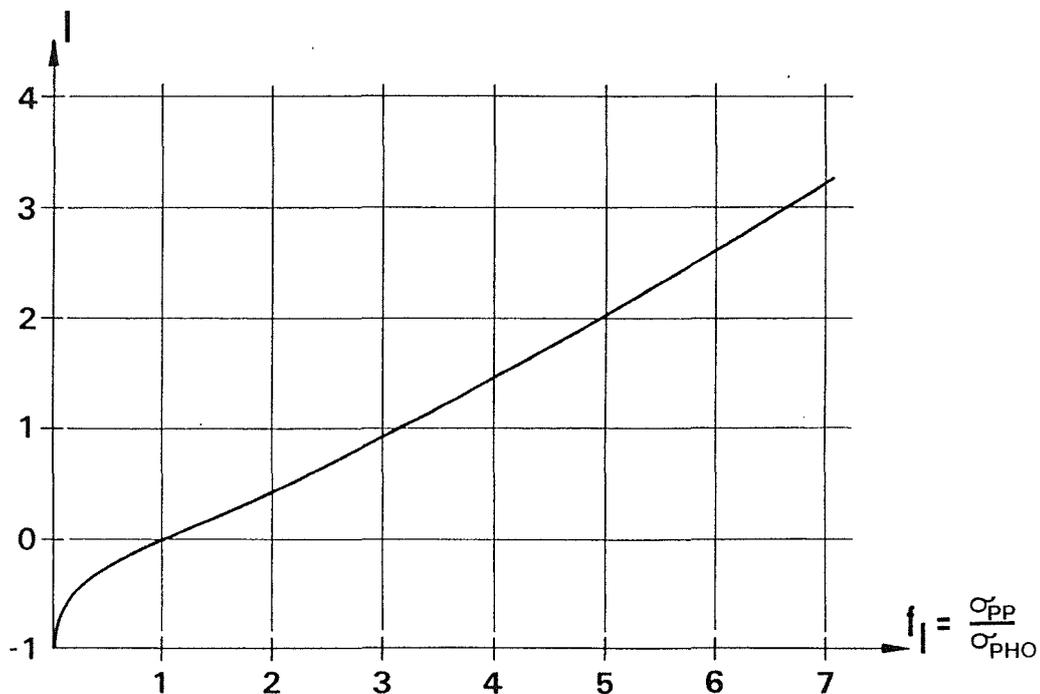


Abb. 3-2: Der Lagerungsgenauigkeitsfaktor  $l$

Für herkömmliche Objekte kann der Lagerungsgenauigkeitsfaktor  $l$ , der die Auswirkung der Genauigkeit der Paßelemente auf die Genauigkeit des Bündelblockes angibt, direkt aus dem Diagramm in Abb. 3-2 herausgegriffen werden. Es ist aber zu beachten, daß im individuellen Fall durchaus Abweichungen bis 50% von diesem Faktor auftreten können.

### 3.3 Schlußfolgerung und Genauigkeitsgesetz

Faßt man die soeben besprochenen geometrischen und nichtgeometrischen Genauigkeitsfaktoren zusammen, so kann man unter Bedachtnahme auf Fraser /1983/ folgendes vereinfachte Genauigkeitsgesetz für die photogrammetrische Punktbestimmung mit der Bündelmethode aufstellen:

$$\sigma_p = m \cdot \sigma_B \cdot (1 + l) \cdot (o + v \cdot p) \quad (3-5)$$

- $\sigma_p$  .... mittlerer zu erwartender räumlicher Punktlagefehler
- $m$  .... mittlere Bildmaßstabszahl
- $\sigma_B$  .... mittlerer Bildkoordinatenfehler
- $l$  .... Lagerungsgenauigkeitsfaktor
- $o$  .... Schnittqualitätsfaktor
- $v$  .... Verformungsfaktor
- $p$  .... Paßelementefaktor

Der mittlere zu erwartende räumliche Punktlagefehler ergibt sich als eine Funktion von: der mittleren Bildmaßstabszahl, des mittleren Bildkoordinatenfehlers, des Schnittqualitätsfaktors, des Paßelementefaktors, des Verformungsfaktors und des Lagerungsgenauigkeitsfaktors.

Der mittlere Bildkoordinatenfehler  $\sigma_B$  beinhaltet im großen und ganzen die Einflüsse der nichtgeometrischen Faktoren und kann heute bei Verwendung von modernen Komparatoren und gut einstellbaren signalisierten Punkten mit etwa  $\pm 4 \mu\text{m}$  angenommen werden. Für gut einstellbare natürliche Punkte kann man  $\sigma_B$  etwa mit  $\pm 10 \mu\text{m}$  annehmen (siehe Kapitel 3.1.1).

Der Schnittqualitätsfaktor  $o$  und der Verformungsfaktor  $v$  sind abhängig von der jeweiligen Aufnahmeanordnung; sie wurden für bestimmte Standardaufnahmesituationen bestimmt. Sie sind bei den jeweiligen Aufnahmeanordnungen in den Kapiteln 6. und 7. angegeben.

Der Paßelementefaktor  $p$  wurde durch Simulation bestimmt und gilt für eine bestimmte Anordnung der Paßelemente. Er ist bei den entsprechenden Paßelementeanordnungen im Kap. 7. jeweils angeführt und kann für streifenartige Objekte einem im Kapitel 3.2.3.1 angegebenen Diagramm entnommen werden.

Der Lagerungsgenauigkeitsfaktor  $l$  wurde ebenfalls aus Simulation ermittelt. Die Werte von  $l$  sind abhängig vom Verhältnis der Paßelementegenauigkeit zur inneren Genauigkeit der Photogrammetrie. Aus dem Diagramm in Abb. 3-2 kann die Größe des  $l$ -Faktors bestimmt werden. Ist die Genauigkeit der Paßpunkte in der Größenordnung der inneren Genauigkeit der Photogrammetrie - was den Standardfall darstellt - dann ist der Faktor  $l$  gleich Null und das Genauigkeitsgesetz (3-5) kann vereinfacht angeschrieben werden:

$$\sigma_p = m \cdot \sigma_B \cdot (0 + v \cdot p) \quad (3-6)$$

Bei einer sehr guten Bündel- und Paßelementeanordnung erreicht der Term  $(0 + v \cdot p)$  etwa eins (siehe Tabellen im Kap. 7.). Für diese Fälle reduziert sich dann das Genauigkeitsgesetz auf die Form:

$$\sigma_p = m \cdot \sigma_B \quad (3-7)$$

Bei einer guten Bündelanordnung ergibt die ermittelte Tiefenkoordinate annähernd gleiche oder nur geringfügig schlechtere Werte als die Koordinaten senkrecht zur Aufnahme- richtung. Die Koordinaten senkrecht zur Aufnahme- richtung werden im folgenden als Lagekoordinaten bezeichnet.

#### 4. Zuverlässigkeitsanforderung

Die Qualität einer Punktbestimmung läßt sich unterteilen in die Genauigkeit (siehe Kapitel 3.) und in die Zuverlässigkeit. Die Aufgabe besteht bei der Zuverlässigkeitsanforderung darin, die Beobachtungsdaten auf nicht aufdeckbare grobe Fehler zu untersuchen. Grobe Beobachtungsfehler werden durch die Ausgleichung "verdrückt", manchmal so, daß ihre Lokalisierung langwierig wird und unerkannte grobe Fehler in schwach bestimmten Netzteilen die ausgeglichenen Koordinaten verfälschen können. Die mittleren Fehler der Unbekannten beziehungsweise die Fehlerellipsoide geben in vielen Fällen wenig Auskunft über die Qualität der Resultate. Deshalb ist es in der Planungsphase eines photogrammetrischen Projekts wichtig, die beabsichtigte Aufnahmeanordnung auch auf die Zuverlässigkeitsanforderung hin zu untersuchen. Die Theorie dazu wurde von W. Baarda /1968/ entwickelt. Die Qualität eines Netzes umfaßt nach Baarda die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit. Die Zuverlässigkeit wird noch in eine innere und äußere Zuverlässigkeit unterteilt.

#### 4.1 Berechnung der Zuverlässigkeitsmaße

##### 4.1.1 Innere Zuverlässigkeit

Eine gute innere Zuverlässigkeit ist dann erreicht, wenn alle Beobachtungen durch die Ausgleichung möglichst gut kontrolliert werden. Die Zuverlässigkeit einer Netzausgleichung hängt von der Anzahl der überschüssigen Beobachtungen und der Punktverteilung ab. Sie gibt an, inwieweit grobe Fehler in den Beobachtungsdaten gefunden werden können.

Die Gesamtredundanz einer Ausgleichungsaufgabe ergibt sich aus der Anzahl der überschüssigen Beobachtungen.

$$r = n - u \quad (4-1)$$

r .... Redundanz  
n .... Anzahl der Beobachtungen  
u .... Anzahl der Unbekannten

Man kann sie aber auch aus der Beziehung von Hayford und Wright /1906/

$$r = \text{spur} ( Q_{vv} \cdot P_{11} ) \quad (4-2)$$

bestimmen. Die Spur ist definiert als die Summe der Hauptdiagonalglieder. Zur

Herleitung der Gewichtskoeffizientenmatrix  $Q_{VV}$  geht man von den Verbesserungsgleichungen aus:

$$v = Ax - l \quad (4-3)$$

Mit der Gewichtsmatrix  $P_{11} = Q_{11}^{-1}$  für die Beobachtungen  $l$ , die bei unkorrelierten Beobachtungen eine Diagonalmatrix wird, kann man die Unbekannten  $x$  aus folgender Gleichung ermitteln:

$$x = (A^T P_{11} A)^{-1} A^T P_{11} l \quad (4-4)$$

Setzt man (4-4) in (4-3) ein und wendet man das Fehlerfortpflanzungsgesetz an, so erhält man die Gewichtskoeffizientenmatrix  $Q_{VV}$  der Verbesserungen  $v$ :

$$v = (A (A^T P_{11} A)^{-1} A^T P_{11} - E) l \quad (4-5)$$

$$Q_{VV} = (A (A^T P_{11} A)^{-1} A^T P_{11} - E) Q_{11} (P_{11} A (A^T P_{11} A)^{-1} A^T - E) \quad (4-6)$$

Da  $P_{11} \cdot Q_{11}$  die Einheitsmatrix  $E$  ergibt, bekommt man durch Ausmultiplizieren:

$$Q_{VV} = Q_{11} - A(A^T P_{11} A)^{-1} A^T = Q_{11} - A Q_{XX} A^T \quad (4-7)$$

Schreibt man Gleichung (4-5) in der Form

$$v = -(Q_{11} - A(A^T P_{11} A)^{-1} A^T) P_{11} l = -(Q_{11} - A Q_{XX} A^T) P_{11} l \quad (4-8)$$

an und vergleicht man mit (4-7), so kommt man zu einem einfachen Zusammenhang zwischen den Verbesserungen  $v$  und den Beobachtungen  $l$ :

$$v = - (Q_{VV} \cdot P_{11}) l \quad (4-9)$$

Unter der Annahme, daß keine zufälligen Beobachtungsfehler vorliegen, kann daraus unmittelbar berechnet werden, welche Verbesserungen  $v$  bei einem bestimmten Beobachtungsfehler  $\Delta l$  auftreten:

$$\Delta v = - (Q_{VV} \cdot P_{11}) \Delta l \quad (4-10)$$

Die  $Q_{VV}$ -Matrix bildet also den Zusammenhang zwischen dem Beobachtungsfehler  $\Delta l$  und der dazugehörigen Verbesserung  $\Delta v$ . An den Hauptdiagonalelementen der  $Q_{VV}$ -Matrix kann man die Kontrollierbarkeit der einzelnen Beobachtungen ablesen. Je größer die Hauptdiagonalelemente der  $Q_{VV}$ -Matrix sind, desto mehr

entsprechen die Verbesserungen den groben Beobachtungsfehlern und desto zuverlässiger lassen sich die groben Datenfehler finden. Man kann die Matrix  $(Q_{VV} \cdot P_{11})$  schon im voraus, ohne Kenntnis der Beobachtungswerte, berechnen. Es spielt ja nur die in der Koeffizientenmatrix  $A$  verkörperte (geometrische) Struktur der Ausgleichungsaufgabe, zusammen mit der a priori Gewichtsmatrix  $P_{11}$  der Beobachtungen, eine Rolle. Deshalb ist diese  $Q_{VV}$ -Matrix ein ausgezeichnetes Hilfsmittel in der Planungsphase eines photogrammetrischen Projekts. Die Hauptdiagonalelemente des Matrizenproduktes  $(Q_{VV} \cdot P_{11})$  bezeichnet man wegen (4-2) als Redundanzanteil  $r_i$  der entsprechenden Beobachtung  $l_i$  an der Gesamtredundanz  $r$ . Es gilt daher:

$$\text{spur}(Q_{VV} \cdot P_{11}) = \sum r_i = r = n - u \quad (4-11)$$

Der Redundanzanteil einer bestimmten Beobachtung  $l_i$  liegt immer innerhalb der Grenzen Null und Eins ( $0 \leq r_i \leq 1$ ). Schwache Überbestimmung entspricht kleinen Werten, starke Überbestimmung äußert sich in größeren Werten. Für die Beurteilung der Kontrollierbarkeit von Beobachtungen mittels der Redundanzanteile werden in /Mürle, Bill 1984/ folgende Schranken angegeben:

$0 \leq r_i < 0.01$	(nicht kontrollierbar)
$0.01 \leq r_i < 0.1$	(schlecht kontrollierbar)
$0.1 \leq r_i < 0.3$	(ausreichend kontrollierbar)
$0.3 \leq r_i < 1$	(gut kontrollierbar)

Wie Ackermann in /1981/ angibt, liegen die Werte für den durchschnittlichen Redundanzanteil ( $\sum r_i/n = r/n$ ) bei konventionellen photogrammetrischen Blöcken (d.h. genäherter Normalfall, Längsüberdeckung = 60%) bei etwa 0.25. Sie steigen bei Doppelblöcken auf Mittelwerte um 0.5. Für geodätische Lage-netze werden für den durchschnittlichen Redundanzanteil ähnliche Beträge angegeben. Durchschnittliche Redundanzanteile um 0.4 oder größer entsprechen schon sehr gut überbestimmten und damit sehr gut kontrollierbaren Systemen. Die Redundanzanteile sind also beim Entwurf eines photogrammetrischen Blocks ein wichtiges Kriterium für dessen Zuverlässigkeit. Der Redundanzanteil ist ein Maß dafür, wie sehr eine Beobachtung durch die restlichen Beobachtungen aufgrund der vorliegenden Netzgeometrie kontrolliert ist. Ist  $r_i = 0$ , so ist die entsprechende Beobachtung nicht kontrollierbar, da sie nichts zur Überbestimmung beiträgt.

Mit Hilfe der Formel (4-10) kann unmittelbar die Auswirkung eines groben Fehlers  $\Delta l_i$  einer Beobachtung auf deren Verbesserung  $v_i$  angegeben werden. Es ist damit aber noch kein Verfahren gegeben, um grobe Fehler aufzudecken. Die Beurteilung aufgrund der Größe der Verbesserung, die früher vielfach angewendet wurde, ist deshalb ungeeignet, weil sich bei sehr kleinen Redundanzanteilen grobe Beobachtungsfehler kaum in der dazugehörigen Verbesserung zeigen. Es muß daher ein anderes Testverfahren zur Anwendung gelangen. Baarda hat ein statistisches Testverfahren vorgeschlagen, welches als Testgröße die normierte Verbesserung verwendet :

$$w_i = \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} \quad (4-12)$$

Die dazu notwendige Genauigkeit  $\sigma_{v_i}$  einer Verbesserung  $v_i$  ergibt sich aus:

$$\sigma_{v_i} = \sqrt{(Q_{VV})_{ii}} \sigma_0 = \sqrt{(Q_{VV} P_{11})_{ii} (P_{11})_{ii}^{-1}} \sigma_0 = \sqrt{(Q_{VV} P_{11})_{ii}} \sigma_{l_i} = \sqrt{r_i} \sigma_{l_i} \quad (4-13)$$

Die normierten Verbesserungen

$$w_i = \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} = \frac{v_i}{\sqrt{r_i} \sigma_{l_i}} = \frac{v_i \sqrt{p_i}}{\sigma_0 \sqrt{r_i}} \quad (4-14)$$

sind normalverteilt; sie haben den Erwartungswert  $\emptyset$  und die Standardabweichung  $\pm 1$ . Die Prüfung auf grobe Datenfehler erfolgt durch ein Vergleichen der einzelnen normierten Verbesserungen  $w_i$  mit einem Schwellenwert  $k$ .

$$|w_i| > k \quad (4-15)$$

Mit anderen Worten: Es werden alle normierten Verbesserungen  $w_i$  dahingehend überprüft, ob ihr Betrag als nach der Null-Hypothese zulässig akzeptiert werden kann oder nicht. Wie setzt man jetzt den Schwellenwert  $k$  fest ?

Dazu werden zunächst einige Grundbegriffe von statistischen Testverfahren erläutert. Betrachten wir dazu die Abbildung 4-1 . Sie zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichte (WD) der Zufallsvariablen  $w_i$ . Da  $w_i$  normalverteilt ist, ergibt sich eine Gauß'sche Glockenkurve. Testet man jetzt mit dem Schwellenwert  $k$  (= Toleranz) den Absolutbetrag der normierten Verbesserungen und

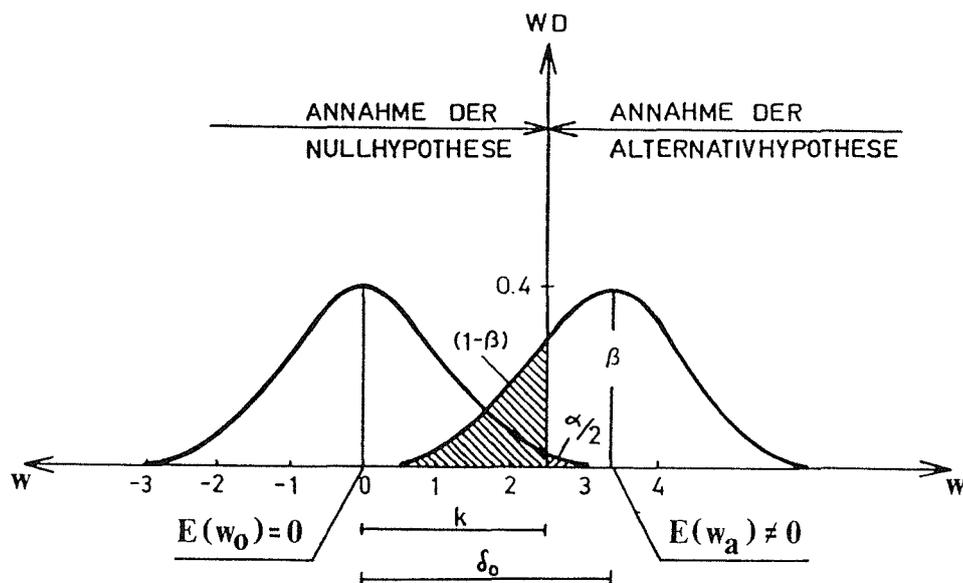


Abb. 4-1: Wahrscheinlichkeitsdichte für die Nullhypothese und die Alternativhypothese bei einem Test zum Aufdecken eines groben Beobachtungsfehlers ( $\alpha \hat{=} \text{Fehler 1. Art}$ ,  $(1-\beta) \hat{=} \text{Fehler 2. Art}$ )

scheidet man normierte Verbesserungen, für die  $|w_i| > k$  gilt, aus, ordnet sie also den mit einem groben Fehler behafteten Beobachtungen zu, so trifft man eine Fehlentscheidung (= Fehler 1. Art). Ein Maß für die Fehler 1. Art ist die sogenannte Signifikanzzahl  $\alpha$ . Sie ist der Anteil der normierten Normalverteilung, die außerhalb  $\pm k$  liegt.

Für den Fall, daß eine grob fehlerhafte Beobachtung im Datenmaterial enthalten ist (= Alternativhypothese), ist für die dazugehörige normierte Verbesserung  $w_a$  der Erwartungswert  $E(w_a) \neq 0$ . Sondert man die Beobachtung, deren normierte Verbesserung  $w_a$  größer als  $\pm k$  ist (= Annahme der Alternativhypothese) als grob fehlerhaft aus, so bleibt - wie die schraffierte Fläche in der Abb. 4-1 zeigt - in einer beachtlichen Anzahl von Fällen der grobe Fehler unerkant. Man begeht wiederum eine Fehlentscheidung, und diese wird Fehler 2. Art genannt. Ein Maß für die Fehler 2. Art ist die Wahrscheinlichkeit  $(1-\beta)$ , wobei  $\beta$  als Macht des Tests bezeichnet wird. Gibt man die Signifikanzzahl  $\alpha$  und die Macht des Tests  $\beta$  vor, ergibt sich die Lage der Alternativhypothese durch den Nichtzentralitätsparameter  $\delta_0$ . In der Praxis hat sich  $\delta_0 = 4$  bewährt, hinter dem sich z.B. eine Signifikanzzahl  $\alpha = 1\%$  bzw. eine Toleranz  $k = 2.56$  und eine Macht  $\beta = 93\%$  verbergen.

Unter Berücksichtigung von (4-10), (4-11) und (4-14) kann man nun einen unteren Wert  $E(|\Delta l_a|)_{\text{zuv}}$  für einen groben Datenfehler angeben, der mit der

Macht  $\beta$  durch dieses statistische Testverfahren noch signifikant nachweisbar ist (z.B. /Kraus 1984 a/):

$$E(|\Delta l_a|)_{\text{ZUV}} = \frac{\delta_0}{\sqrt{r_i}} \sigma_{l_i} = \text{IZ} \cdot \sigma_{l_i} \quad (4-16)$$

$E(|\Delta l_a|)_{\text{ZUV}}$  wird als innere Zuverlässigkeit bezeichnet. Sie wird in dieser Arbeit mit dem IZ-Faktor angegeben, der besagt, daß ein grober Beobachtungsfehler, der dem IZ-fachen des mittleren Fehlers  $\sigma_{l_i}$  der jeweiligen Beobachtung  $l_i$  entspricht, mit einer Wahrscheinlichkeit von  $(1-\beta)$  unerkannt bleibt.

Die in den folgenden Kapiteln angeführten Werte für die innere Zuverlässigkeit haben als Grundlage einen Nichtzentralitätsparameter  $\delta_0$  von 4, das heißt IZ kann im günstigsten Fall den Wert 4 annehmen. Je kleiner der Wert von IZ, desto zuverlässiger sind die Ausgleichsergebnisse. Je größer der Wert von IZ, umso größer muß ein grober Fehler sein, um erkannt zu werden. In der Planungsphase eines photogrammetrischen Projekts ist es daher äußerst wichtig, die Zuverlässigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung festzustellen. Denn die Projektplanung hat sich primär nach der Zuverlässigkeit des Endresultats zu richten und erst in zweiter Linie nach der Genauigkeit. Theoretische Genauigkeitsangaben werden nämlich bedeutungslos, wenn nicht entdeckbare grobe Fehler das Ausgleichungsergebnis verfälschen.

In den Kapiteln 6. und 7. werden zu den angeführten Standardaufnahmekonfigurationen immer auch die Werte für die innere Zuverlässigkeit angegeben.

#### 4.1.2 Äußere Zuverlässigkeit

Die innere Zuverlässigkeit gibt die Kontrollierbarkeit einer Beobachtung an. Ein nicht erkannter grober Beobachtungsfehler wirkt im Prinzip auf sämtliche Unbekannte und verfälscht diese. Diese Auswirkung auf die Unbekannten der Ausgleichung wird als äußere Zuverlässigkeit bezeichnet. Die Theorie dazu setzt voraus, daß nur ein einziger grober Beobachtungsfehler im Datenmaterial vorliegt; sie ist in einer sehr verständlichen Weise in /Ackermann 1981/ beschrieben. Die äußere Zuverlässigkeit wird für die Standardaufnahmekonfigurationen allerdings nicht ermittelt.

## 5. Aufwandsberechnung

Für den Praktiker ist, neben der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse, die Wirtschaftlichkeit der benutzten Methode von besonderem Interesse. Es nützt nämlich gar nichts, die photogrammetrische Punktbestimmung durch das Hinzunehmen von immer mehr Photos und PaBelementen in der Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu steigern, wenn damit der Aufwand astronomische Höhen erreicht. Es wird daher im folgenden versucht, Kosten für die einzelnen Bearbeitungsschritte anzugeben. Diese Kosten sind Mittelwerte aus vielen praktisch durchgeführten terrestrischen, Bündelphotogrammetrischen Projekten und sollen als Anhaltswerte für die Aufwandsplanung verstanden werden. Die photogrammetrische Punktbestimmung mit Hilfe der Bündeltriangulierung läßt sich in folgende Arbeitsschritte unterteilen:

- Geodätische Arbeit
- Photogrammetrische Arbeit
- Overhead (Anbot, Aufnahmeplanung, usw.)

Die Schwierigkeit liegt darin, den Arbeitsaufwand von so verschiedenen Aufgaben, wie Paßpunktmessung am Objekt und Bildkoordinatenmessung am Komparator, ins richtige Verhältnis zu setzen. Der Arbeitsaufwand dafür soll ähnlich wie in der Gebührenordnung für Vermessungswesen (GOV) der Bundes-Ingenieurkammer angesetzt werden. Ausgehend von der dieser Gebührenordnung zugrunde gelegten Formel

$$G = F \cdot Z$$

(5-1)

G ..... Gebühr

F ..... Gebührenfaktor

Z ..... Zeitgrundgebühr als Verrechnungseinheit

ergibt sich die Gebühr aus dem Gebührenfaktor F und einer Verrechnungseinheit, welche der durch Verordnung der Bundes-Ingenieurkammer jeweils festgelegten Zeitgrundgebühr entspricht. Die Zeitgrundgebühr Z beträgt derzeit 546.- ÖS (Stand: 1.7.1988). Der Gebührenfaktor F ist von der jeweiligen Tätigkeit abhängig und wird im folgenden bei den einzelnen Arbeitsschritten angeführt. Der Gebührenfaktor ist im allgemeinen auch abhängig von der Schwierigkeitsklasse. Man unterscheidet drei Schwierigkeitsstufen:

- a....leicht Das Aufnahmeobjekt ist leicht zugänglich. Es gibt keine Behinderungen durch Bewuchs, Verkehr, räumliche Beengtheit und sonstige störende Gegebenheiten.
- b....mittel Es handelt sich um ein Aufnahmeobjekt mit mittlerem Grad an Behinderung durch Bewuchs, Verkehr, Zugänglichkeit, usw. .
- c....schwer Sehr schwer zugängliches Aufnahmeobjekt, starker Verkehr, viele Sichthindernisse oder sonstige Gegebenheiten, wodurch eine nicht unwesentliche Erschwerung der Vermessungsarbeiten bzw. Hemmung des Arbeitsfortschrittes entsteht.

### 5.1 Geodätische Arbeit

Die photogrammetrische Punktbestimmung kommt nicht ganz ohne geodätische Vermessung aus. Um einen Bündelblock in ein übergeordnetes System zu transformieren und damit das Rangdefizit der Normalgleichungsmatrix zu beseitigen, ist durch Paßelemente mindestens jeder der sieben Freiheitsgrade der absoluten Orientierung hinreichend genau zu definieren (siehe Kapitel 3.2.3). Um darüberhinaus das Ausschwingen und Verwinden des Blocks zu vermeiden, sind weitere Paßelemente notwendig. Diese Paßelemente werden im allgemeinen durch geodätische Meßmethoden bestimmt. Dazu ist mit der für die entsprechende Aufgabe erforderlichen Genauigkeit eine kontrollierte Bestimmung der Paßpunkte in Lage und Höhe durchzuführen. Zu liefern sind:

- Punktbeschreibungen der Paßpunkte.
- Ein Satz Kontaktkopien, worin die Paßpunkte eingetragen sind.
- Koordinatenverzeichnis

Die Gebühr ist nach der Anzahl der Paßpunkte  $n$  sowie nach der Schwierigkeitsstufe unter Berücksichtigung des Zuschlagsfaktors  $s$  zu ermitteln:

$$G = n \cdot F \cdot s \cdot Z \quad (5-2)$$

Gebührenfaktor F für Koordinaten mit mm - Genauigkeit:		Gebührenfaktor F für Koordinaten mit cm - Genauigkeit:	
a	1.00	a	0.50
b	1.40	b	0.70
c	2.00	c	1.00

Zuschlagfaktor s nach der Anzahl der Standpunkte:

Anzahl der Standpunkte	s	Anzahl der Standpunkte	s
2	1.00	8	1.48
3	1.08	9	1.56
4	1.16	10	1.64
5	1.24	11	1.72
6	1.32	12	1.80
7	1.40	13	1.88

Für jeden weiteren Standpunkt erhöht sich der Faktor s um 0.08

Der Zeitaufwand für die eventuell notwendige Signalisierung und die Nebenkosten sind in den Gebühren nicht enthalten und daher gesondert zu verrechnen.

## 5.2 Photogrammetrische Arbeit

Der photogrammetrische Arbeitsanteil bei der Punktbestimmung mit Hilfe der Bündelmethode unterteilt sich in einen Aufnahme- und einen Auswerteteil.

### 5.2.1 Photogrammetrische Aufnahme

Die Aufnahme des zu vermessenden Objekts mit einer Meßkammer ist von so vielen und so gewählten Standpunkten aus vorzunehmen, daß eine zuverlässige und der gestellten Aufgabe entsprechend genaue, punktweise Auswertung des Objekts möglich ist. Zu liefern sind:

- Negative der angefertigten Meßbilder
- Näherungswerte für die Aufnahmerichtungen (Azimut, Zenitdistanz, Kappa)
- Skizze des zu vermessenden Objekts mit näherungsweise eingetragenen Photo-standpunkten

Die Gebühr ist abhängig von der Anzahl der Aufnahmen n sowie von der Schwierigkeitsstufe (a - c) der Begehbarkeit der Aufnahmeorte.

$$G = n \cdot F \cdot Z \quad (5-3)$$

Gebührenfaktor F je Standpunkt:

a	0.75
b	1.00
c	1.50

Der Zeitaufwand für die Aufnahmeplanung und die Nebenkosten sind in den Gebühren nicht enthalten und daher gesondert zu verrechnen.

### 5.2.2 Photogrammetrische Auswertung

Die photogrammetrische Auswertung gliedert sich in den eigentlichen Meßvorgang - die Bildkoordinatenmessung - und die anschließende Berechnung der Neupunktkoordinaten mit Hilfe des Bündelausgleichs.

#### 5.2.2.1 Bildkoordinatenmessung

Die Messung der Bildkoordinaten von Paß- und/oder Neu- und/oder Verknüpfungspunkten erfolgt in der Regel in einem Monokomparator. Zu liefern sind:

- Punktskizzen (falls keine signalisierten Punkte)
- ein Satz Kontaktkopien mit den eingetragenen Punkten
- eine Klarschrift der Meßdaten
- ein computerkompatibler Datenträger mit den Meßdaten.

Die Gebühr ist abhängig von der Anzahl  $n$  der auszumessenden Photos und der Anzahl der Bildkoordinatenmessungen  $m$  unter Berücksichtigung des Schwierigkeitsfaktors. Die Schwierigkeitsstufen (a, b und c) sind hier natürlich nicht vom Gelände und den äußeren Gegebenheiten abhängig, sondern in erster Linie von der Punktverteilung im Bild (d.h. je schneller die Punkte im Bild aufgefunden werden können, desto kleiner ist der Gebührenfaktor  $F_2$ ).

- a..... Übersichtliche und klare Verteilung der Punkte im Bild, so daß ein problemloses und schnelles Auffinden der Punkte bei der Bildkoordinatenmessung gewährleistet ist und die automatische Punkt-nummerngenerierung bei den analytischen Auswertegeräten genutzt werden kann.
- b..... Verteilung der Punkte nach einem gewissen Schema, so daß ein unkompliziertes Auffinden der Punkte bei der Bildkoordinatenmessung gewährleistet ist.
- c..... Erschwerte Meßbedingungen (durch unregelmäßige Verteilung der Punkte oder schwer aufzufindende Punkte im Bild oder sonstige die Bildkoordinatenmessung erschwerende Gegebenheiten).

$$G = ( n \cdot F_1 + m \cdot F_2 ) \cdot Z \quad (5-4)$$

$n$  ..... Anzahl der auszumessenden Photos

$m$  ..... Anzahl der Bildkoordinatenmessungen

Gebührenfaktor  $F_1 = 0.25$

Gebührenfaktor  $F_2$  :

	sign. Punkte	nat. Punkte
a	0.006	0.012
b	0.012	0.024
c	0.020	0.040

#### 5.2.2.2 Berechnung des Bündelausgleichs

Die Berechnung der ausgeglichenen Objektkoordinaten von Paß-, Neu- und Verknüpfungspunkten und der äußeren Orientierung der Aufnahmen geschieht mit Hilfe eines Bündelausgleichsprogrammes. Zu liefern sind:

- Berechnungsprotokoll mit Genauigkeitsnachweis
- Angaben zur äußeren Orientierung der Aufnahmen
- Koordinatenverzeichnis der Objektpunkte

Die Gebühr setzt sich aus einer Grundgebühr und je einem Anteil zusammen, welcher abhängig ist von

- der Anzahl der Photos  $n$
- der Anzahl der Punkte  $l$  aus dem Rahmenblock (Unter dem Rahmenblock eines Bündelausgleichs versteht man jene gut verteilten Paß- und Verknüpfungspunkte, die bei der Ausgleichung die äußere Orientierung der Bündeln beeinflussen können.)
- der Anzahl der nur vorwärtsgeschnittenen Punkte  $k$ .

$$G = ( F_1 + n \cdot F_2 + l \cdot F_3 + k \cdot F_4 ) \cdot Z \quad (5-5)$$

$$F_1 = 4 \quad F_2 = 0.5 \quad F_3 = 0.02 \quad F_4 = 0.004$$

Werden im Rahmen des Bündelausgleichs auch die inneren Orientierungen und Verzeichnungsparameter der verwendeten Kameras bestimmt, so ist zusätzlich zur Gebühr aus (5-5) zu verrechnen:

$$G = F \cdot Z \quad (5-6)$$

$F = 0.1$  je zu bestimmende innerer Orientierung

$F = 0.2$  je zu bestimmendes Verzeichnungsparameter

### 5.3 Overhead

Für alle anderen Arbeiten, die im Zuge einer photogrammetrischen Punktbestimmung anfallen und nicht in den Kapiteln 5.1 (Geodätische Arbeit), 5.2.1 (Photogrammetrische Aufnahme) und 5.2.2 (Photogrammetrische Auswertung) angeführt sind, ist der Zeitaufwand gesondert zu verrechnen. Dabei beträgt die Gebühr pro Stunde:

$$G = F \cdot Z \quad (5-7)$$

Leiter des Ingenieurbüros	F = 1.50
Akademiker, Ingenieur, qualifizierte Techniker	F = 1.00
Techniker	F = 0.80
Zeichner, Sekretärinnen	F = 0.65
Schreibkräfte und andere Hilfskräfte	F = 0.50

Es wird nicht die Qualifikation der Person verrechnet (z.B. Diplomingenieur generell mit 1.0), sondern die tatsächlich erbrachte Leistung. Das bedeutet, daß Angestellte, die nicht qualifikationsgemäß eingesetzt werden, nicht entsprechend den anfallenden Kosten zu verrechnen sind, sondern nur entsprechend ihrer erbrachten Leistungen.

Die zusätzlich anfallenden Arbeiten bei einem ingenieurphotogrammetrischen Projekt sollen nur schlagwortartig zusammengefaßt werden. Eine vollständige Aufzählung ist auf Grund der Unterschiedlichkeit der Projekte gar nicht möglich.

- Aufnahmeplanung
- Vorbereitung der Bilder für die Messung (Punktauswahl, Numerierung)
- Sämtliche Nachbearbeitungsschritte (wie z.B. Kartierungen in verschiedenen Ansichten, Schnitte, Restvektorenplott, Diagramme, Baustatistiken)
- Sämtliche photographische Arbeiten, sofern sie nicht bereits in den Kapiteln 5.1 und 5.2 angeführt sind.

Darüberhinaus sind sämtliche Bestimmungen des allgemeinen Teils der Gebührenordnung Vermessungswesen anzuwenden.

## 6. Vorbemerkungen zu den Simulationsrechnungen

In den folgenden Kapiteln werden bei einigen charakteristischen Objektformen praxisnahe "Standardaufnahmesituationen" simuliert und es werden sowohl Aussagen über deren Genauigkeit und Zuverlässigkeit, als auch über den notwendigen Aufwand getroffen. Es handelt sich dabei um die Testobjekte:

- Wand (Kap. 6.2)
- Lange Wand (Kap. 7.1)
- Würfel (Kap. 7.2)
- Enge Gasse (Kap. 7.3)
- Quader (Kap. 7.4)
- Innenraum (Kap. 7.5)
- Außenkuppel (Kap. 7.6.1)
- Innenkuppel (Kap. 7.6.2)
- Turm (Kap. 7.7) .

In der Abb. 6-1 sind die untersuchten Objektformen in einer axonometrischen Darstellung gegenübergestellt.

### 6.1 Allgemeines zu den Testanordnungen

Die in der Folge besprochenen Aufnahmeobjekte sind prinzipiell maßstabslos und werden daher nur durch ihre Ausdehnungsverhältnisse charakterisiert. Die angegebenen Verhältniszahlen gelten für das ideale "Standardobjekt" und sind so gewählt, daß sie für möglichst viele der in der Praxis auftretenden Objektformen gültig sind. Geringfügige Abweichungen davon treten naturgemäß in der Praxis auf, sind aber tolerierbar.

Zu jedem "Standardobjekt" wird ein konkretes "Testobjekt" mit vorgegebenen Abmessungen festgelegt. Das Testobjekt ist bei dieser Untersuchung jeweils durch ein regelmäßiges Punktraster repräsentiert. Diese Objektpunkte werden zunächst mit den Formeln der zentralperspektivischen Abbildung zurück in die geplanten Bilder transformiert. Dazu wird für jedes Bild das entsprechende Projektionszentrum, die Aufnahmerichtungen und eine bestimmte Kamera (mit bekannter innerer Orientierung und bekanntem Bildformat) angenommen. In dieser Untersuchung wird dabei die Meßkammer P31 der Firma Wild mit dem Weitwinkelobjektiv ( $c = 100$  mm; Bildformat: 84 mm x 117 mm; asymmetrischer Bildhauptpunkt) und dem Überweitwinkelobjektiv ( $c = 45$  mm; Bildformat 92 mm x 118 mm;

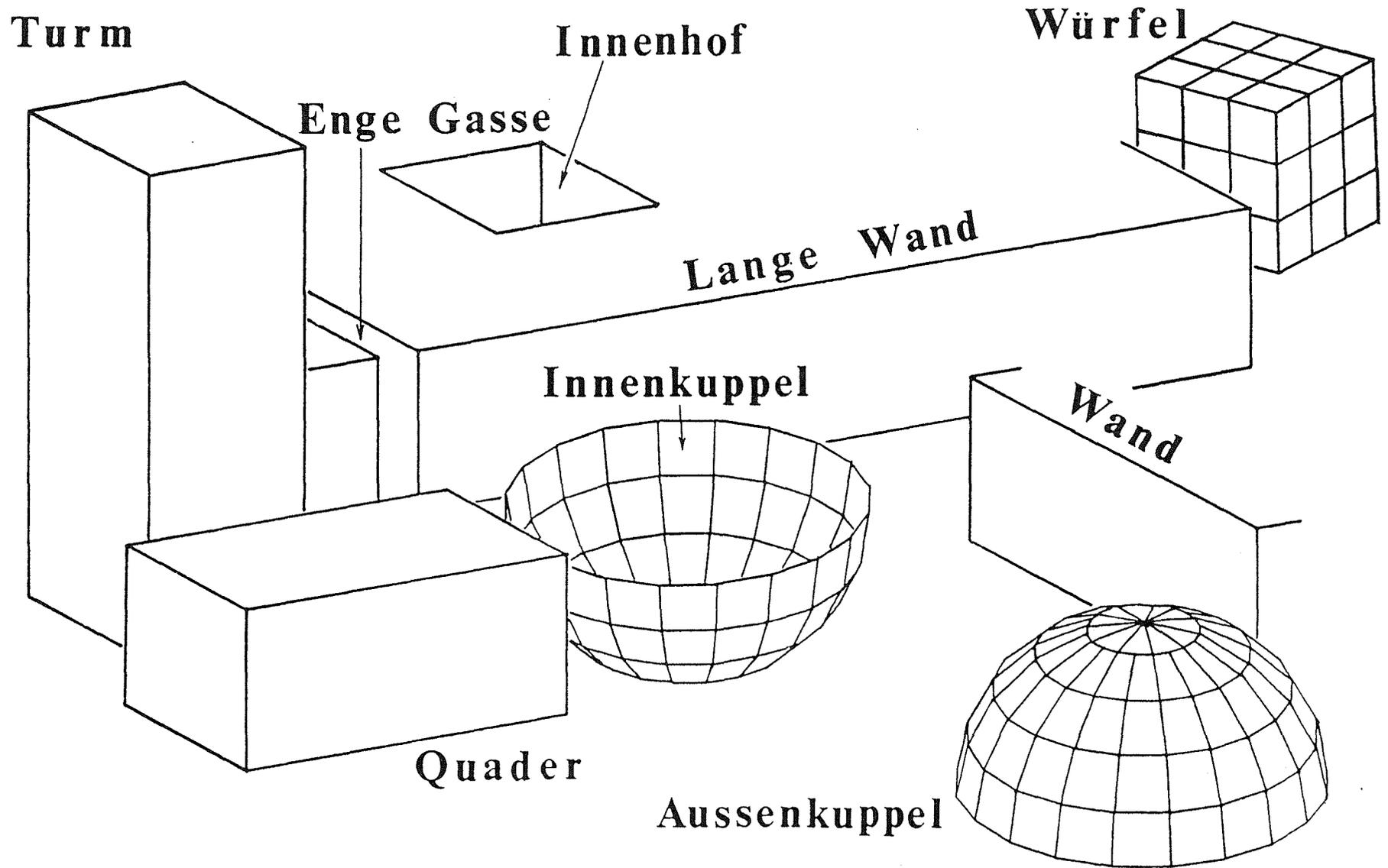


Abb. 6-1: Die ausgewählten Objektformen in einer axonometrischen Darstellung

symmetrischer Bildhauptpunkt) angenommen. Die so erhaltenen "synthetischen" Bildkoordinaten werden nun als Eingangsdaten in das Bündelausgleichungsprogramm ORIENT /Kager 1980/ eingeführt und damit die verschiedenen Aufnahmeanordnungen gerechnet. Die Bildkoordinaten werden als gleich genau und unkorreliert mit einer Genauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$  in den Ausgleich eingeführt. Auf den Einfluß systematischer Bildfehler wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

Bei jeder Testanordnung werden die unterschiedlichen Bündelanordnungen mit den verschiedenen Paßpunkt- bzw. Paßelementeanordnungen durchgerechnet. Die angeführten Kenngrößen für die Genauigkeit ( $m$ ,  $o$ ,  $v$ ,  $p$ ,  $l$ ) bzw. für die innere Zuverlässigkeit (IZ) sind Mittelwerte von allen Objektpunkten bzw. Beobachtungen. Wie werden die einzelnen Genauigkeitsfaktoren ermittelt?

- die mittlere Bildmaßstabszahl  $m$ : Von jedem synthetisch erzeugten Bildpunkt wird der Abbildungsmaßstab gerechnet. Der Mittelwert von allen Punkten in den entsprechenden Photos ergibt den Wert für  $m$  bei der jeweiligen Aufnahmevariante.

- der Schnittqualitätsfaktor  $o$ : Jede Bündelanordnung wird auch mit fehlerfrei festgehaltener äußerer Orientierung durchgerechnet. Die Objektpunkte werden somit nur räumlich vorwärtsgeschnitten. Der Einfluß der Paßelemente ( $v$ ,  $p$ ,  $l$ ) auf die Genauigkeit der Punktbestimmung ist daher auch Null. Damit reduziert sich aber das Genauigkeitsgesetz (3-5) auf die Form  $\sigma_p = m \cdot \sigma_B \cdot o$ , und daraus kann leicht der Wert für  $o$  bestimmt werden.

- der Lagerungsgenauigkeitsfaktor  $l$ : Die unterschiedlichen Paßelementeanordnungen werden auch mit unterschiedlicher Genauigkeit in den Ausgleich eingeführt. Die daraus resultierende Verbesserung oder auch Verschlechterung ergibt den Verlauf der Kurve in Abb. 3-2.

- der Paßelementefaktor  $p$  und der Verformungsfaktor  $v$ : Die beiden Größen werden in dieser Untersuchung gemeinsam bestimmt. Für eine konkrete Paßelementeanordnung wird ein plausibler  $p$ -Wert angenommen; damit ergeben sich die Werte für  $v$  der unterschiedlichen Bündelanordnungen. Umgekehrt wird bei einer konkreten Bündelanordnung der ermittelte Wert für  $v$  festgehalten; die Varianten der Paßelementeanordnungen ergeben die entsprechenden  $p$ -Werte.

## 6.2 Vorbereitende Untersuchungen

Im Kapitel 7. werden einige Standardaufnahmesituationen bei den ausgewählten Standardobjekten simuliert. Um für die unterschiedlichen Objekte entsprechende Bündelanordnungen zu finden, werden zunächst einige grundlegende Untersuchungen an einem ganz einfachen Objekt durchgeführt. Es handelt sich dabei um das Objekt "Wand". Darunter versteht man eine ebene, vertikale Fläche mit einem Verhältnis von Länge : Höhe = 2 : 1. Die einzelnen Aufnahmen sind dabei immer so gewählt, daß das gesamte Objekt auf einem Photo registriert ist. Das Objekt "Wand" stellt das Basiselement von vielen Standardobjekten dar. Die Ergebnisse dieser Simulation können als Grundinformation für alle später besprochenen Aufnahmeanordnungen übernommen werden.

Das Testobjekt "Wand" ist 30 Meter lang und 15 Meter hoch und ist durch ein Punktraster von 5 x 3 Metern repräsentiert. Das ergibt 30 Objektpunkte. Für die erste Untersuchung wird nur der Aufnahmewinkel (Az) der Meßphotos variiert.

### 6.2.1 Symmetrischer Konvergenzfall

Diese Aufnahmevariante besteht aus nur zwei Schrägaufnahmen. Es wird die Auswirkung der verschiedenen Konvergenzwinkel auf die Genauigkeit der Objektpunkte untersucht. Dazu wandern die Projektionszentren der Aufnahmen entlang eines Halbkreises. Das Zentrum des Halbkreises befindet sich in der Mitte der Wand in 1,2 Meter Höhe. Der Radius dieses Halbkreises beträgt 35 Meter. Die Aufnahmerichtung ist horizontal und jeweils auf den Mittelpunkt des Halbkreises gerichtet.

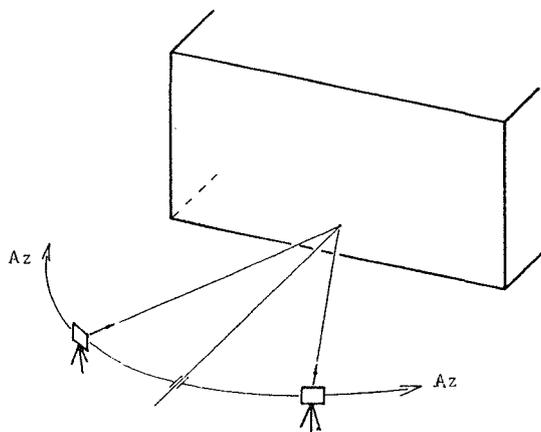


Abb. 6-2: Aufnahmeconfiguration für den symmetrischen Konvergenzfall

Die Objektpunkte (= Neupunkte) an der Wand werden von den beiden symmetrischen Schrägaufnahmen nur räumlich vorwärtsgeschnitten. Dazu werden die äußeren Orientierungen der Meßaufnahmen fehlerfrei festgehalten. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Abbildung 6-3 dargestellt. Auf der Abszisse ist dabei der Aufnahmewinkel  $Az$  (siehe Abb. 6-2) aufgetragen. Dabei bedeutet Aufnahmewinkel  $0^\circ$  zwei Frontalaufnahmen auf die ebene Wand. Der Aufnahmewinkel  $40^\circ$  bedeutet zum Beispiel die eine Aufnahme  $40^\circ$  nach links verschwenkt, die zweite Aufnahme  $40^\circ$  nach rechts verschwenkt. Auf der Ordinate wird die berechnete Auswertegenauigkeit am Objekt in Millimetern aufgetragen. Die Bildkoordinatenmeßgenauigkeit wird dabei mit  $\pm 5 \mu\text{m}$  in den Ausgleich eingeführt.

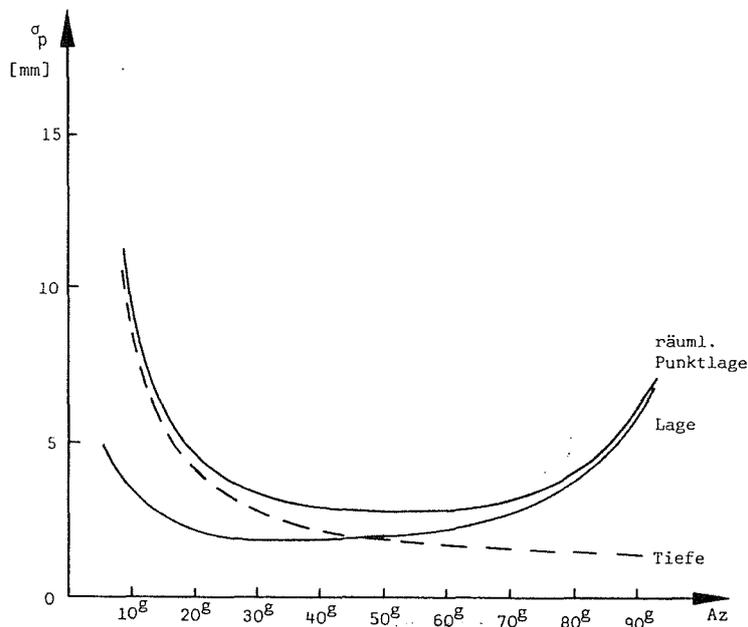


Abb. 6-3: Mittlere Fehler am Objekt für den symmetrischen Konvergenzfall.

Wie aus der Abbildung 6-3 ersichtlich ist, steigert sich die Tiefengenauigkeit mit zunehmenden Aufnahmewinkel sehr stark, bis mit einem Aufnahmewinkel von ca.  $50^\circ$  jene Disposition erreicht ist, wo die Tiefengenauigkeit bereits besser als die Lagegenauigkeit ist. Das Optimum des räumlichen Punktlagefehlers liegt bei dieser Aufnahmeanordnung zwischen  $50^\circ$  und  $60^\circ$ .

### 6.2.2 Einseitiger Konvergenzfall mit horizontaler Basis

Für diese Untersuchung wird die Frontalaufnahme festgehalten, und nur die zweite Aufnahme wandert wieder auf einem Kreis (siehe Abb. 6-4). Das Zentrum des Kreises befindet sich wiederum in der Mitte der Wand in 1,2 Meter Höhe. Der Radius des Kreises beträgt abermals 35 Meter.

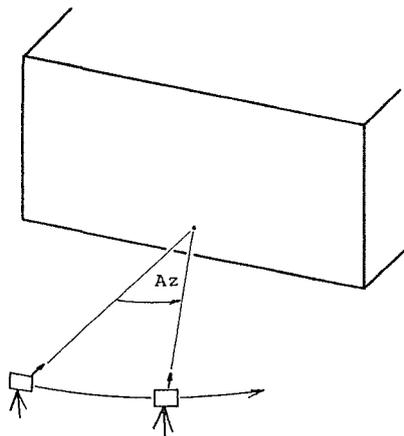


Abb. 6-4: Aufnahmekonfiguration für den einseitigen Konvergenzfall mit horizontaler Basis

Dabei wird erneut unterstellt, daß die äußeren Orientierungen der Meßaufnahmen (P31-WW;  $c = 100$  mm) fehlerfrei sind. In der Abbildung 6-5 sind für diese Aufnahmeanordnung die reine Lagegenauigkeit, die Tiefengenauigkeit und die räumliche Punktlagegenauigkeit eingetragen.

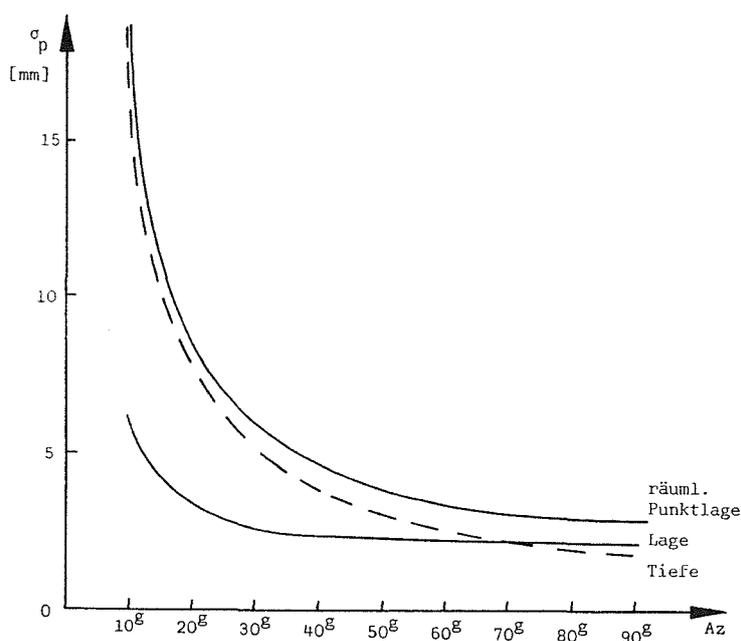
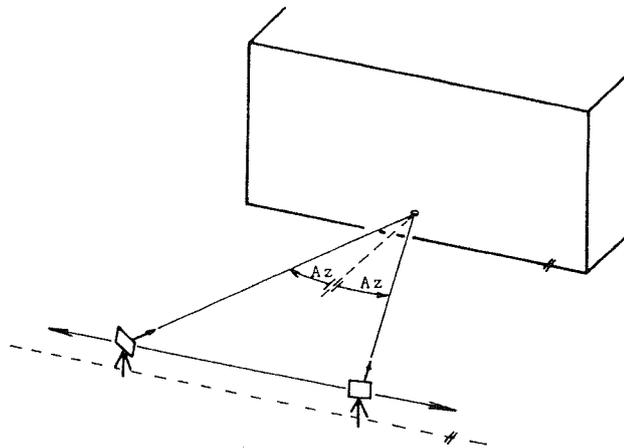


Abb. 6-5: Mittlere Fehler am Objekt für den einseitigen Konvergenzfall mit horizontaler Basis

Wie aus der Abb. 6-5 ersichtlich, steigert sich die Genauigkeit sehr stark mit zunehmendem Azimut. Die reine Lagegenauigkeit verbessert sich bis zu einem Aufnahmewinkel von ca.  $35^\circ$  relativ stark und bleibt dann nahezu unverändert. Die Tiefengenauigkeit ist bei dieser Anordnung bis zu einem Aufnahmewinkel von ca.  $70^\circ$  wesentlich schlechter als die Lagegenauigkeit, danach sogar ein klein wenig besser.

### 6.2.3 Symmetrischer Fall von einer Standlinie aus

Diese Aufnahmevariante besteht wiederum aus nur zwei Photos. Die Projektionszentren der Aufnahmen wandern dabei symmetrisch von der Mitte nach außen entlang einer Standlinie (siehe Abb. 6-6).



*Abb. 6-6: Aufnahmekonfiguration für den symmetrischen Fall von einer Standlinie aus*

Bedingt durch die oftmals auftretende räumliche Beengtheit - z. B. in der Architekturvermessung in den Straßenzügen - ist diese Aufnahmevariante in der Praxis sehr häufig. Die Abbildung 6-7 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung. Das Optimum dieser Aufnahmeanordnung liegt bei ca.  $40^\circ$  Konvergenzwinkel der Photos. Betrachtet man nur den Lagefehler, so wird das Optimum bereits bei ca.  $30^\circ$  Konvergenzwinkel erreicht. Die Tiefengenauigkeit erreicht den niedrigsten Wert bei ca.  $50^\circ$  Aufnahmewinkel. Auffallend ist das rasche Ansteigen des räumlichen Punktlagefehlers bei größeren Aufnahmewinkeln als  $60^\circ$ . Dies ist in erster Linie auf die rasch schlechter werdende mittlere Bildmaßstabszahl zurückzuführen.

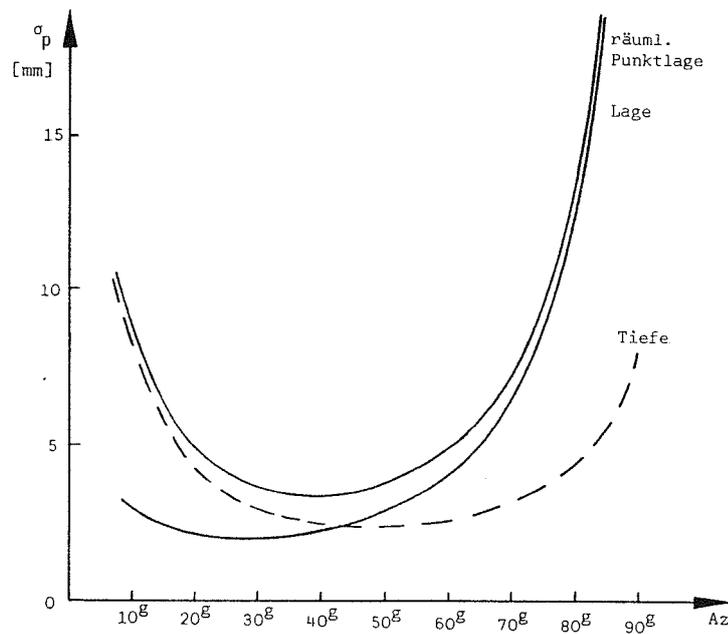


Abb. 6-7: Mittlere Fehler am Objekt für den symmetrischen Fall von einer Standlinie aus

#### 6.2.4 Einseitiger Konvergenzfall mit vertikaler Basis

Hier wird wieder die Frontalaufnahme (P31-WW) fehlerfrei festgehalten, und eine weitere Aufnahme wandert diesmal auf einem vertikalen Kreis.

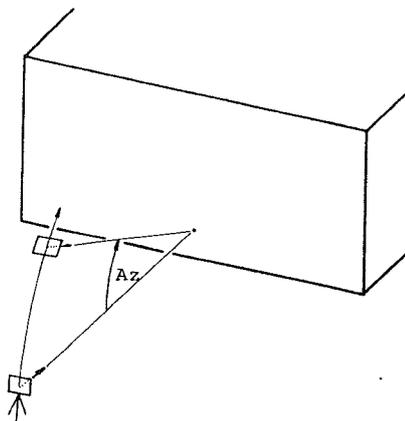


Abb. 6-8: Aufnahmekonfiguration für den einseitigen Konvergenzfall mit vertikaler Basis

In der Abbildung 6-9 sind für diese Aufnahmeanordnung die reine Lagegenauigkeit, die Tiefengenauigkeit und die räumliche Punktlagegenauigkeit eingetragen. Der Kurvenverlauf zeigt im wesentlichen das selbe Verhalten wie beim Einseitigen Konvergenzfall mit horizontaler Basis (vgl. Abb. 6-5).

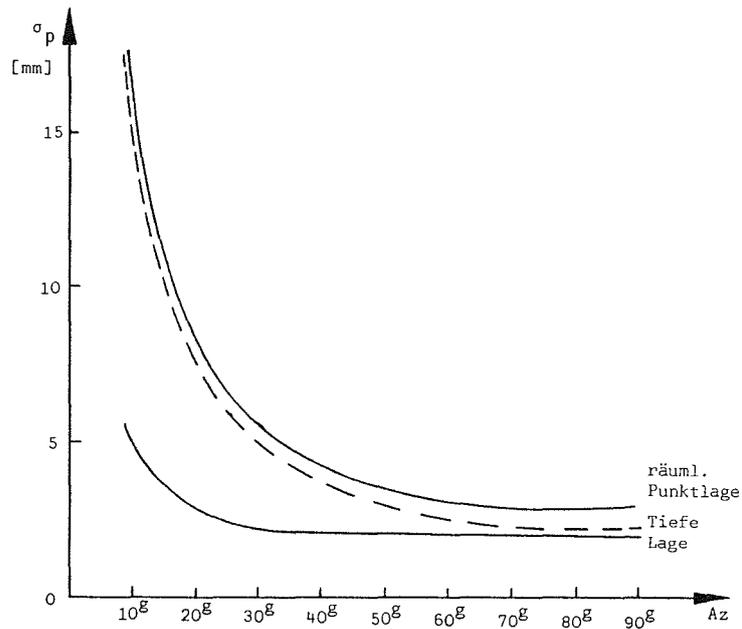


Abb. 6-9: Mittlere Fehler am Objekt für den einseitigen Konvergenzfall mit vertikaler Basis

6.2.5 Einseitiger Konvergenzfall von einer vertikalen Standlinie aus

Es ist eine Aufnahmevariante, wie sie in der Praxis häufig vorkommt. Eine Fassade wird zum Beispiel durch Aufnahmen von einem gegenüberliegenden Haus aus erfaßt. Man photographiert dabei aus verschiedenen Stockwerken und erreicht damit eine vertikale Basis und konvergente Aufnahmen.

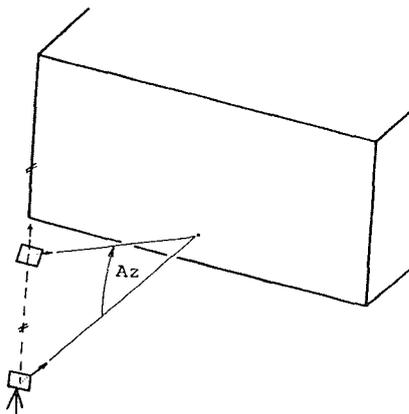


Abb.6-10: Aufnahmekonfiguration für den einseitigen Konvergenzfall von einer vertikalen Standlinie aus

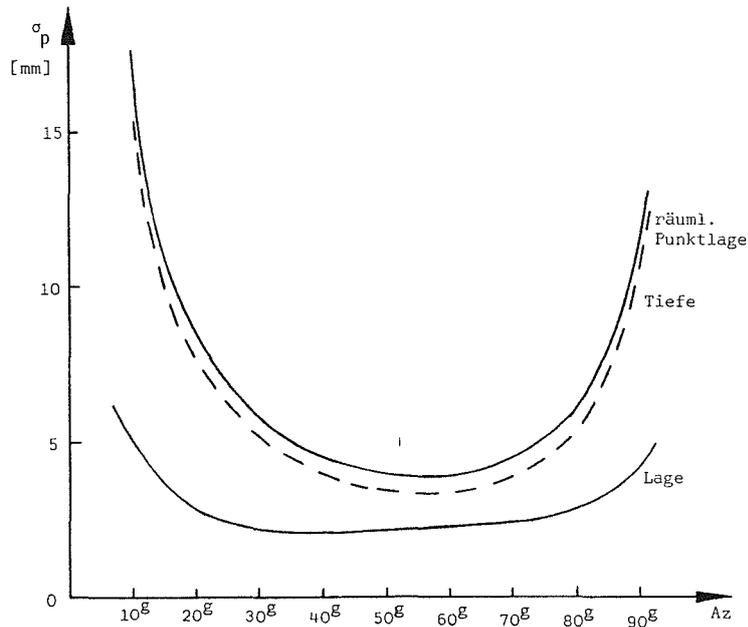


Abb. 6-11: Mittlere Fehler am Objekt für den einseitigen Konvergenzfall von einer vertikalen Standlinie aus

Das Optimum des räumlichen Punktlagefehlers liegt bei dieser Anordnung bei ca. 55°. Bei noch größeren Azimuten steigt der räumliche Punktlagefehler sehr rasch an, was in erster Linie auf die rasch steigende Bildmaßstabszahl zurückzuführen ist.

#### 6.2.6 Symmetrischer Konvergenzfall mit einer Frontalaufnahme

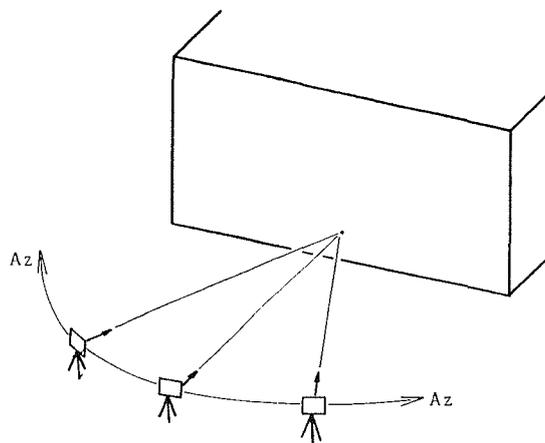


Abb. 6-12: Aufnahmeconfiguration für den symmetrischen Konvergenzfall mit einer Frontalaufnahme

Diese Aufnahmeanordnung stellt eine Erweiterung der Version aus Kapitel 6.2.1 dar. Zusätzlich zu den zwei symmetrischen Schrägaufnahmen wird eine Frontal-

aufnahme angefertigt. Diese dritte Aufnahme steigert nicht nur die Genauigkeit der Punktbestimmung (siehe Abb. 6-13), sondern macht vor allem die Punktbestimmung erst zuverlässig. In Abbildung 6-14 ist auf der einen Achse die innere Zuverlässigkeit (IZ), wie in Kapitel 4.1.1 definiert, aufgetragen, auf der zweiten Achse ist der Aufnahmewinkel (siehe Abb. 6-12) aufgetragen.

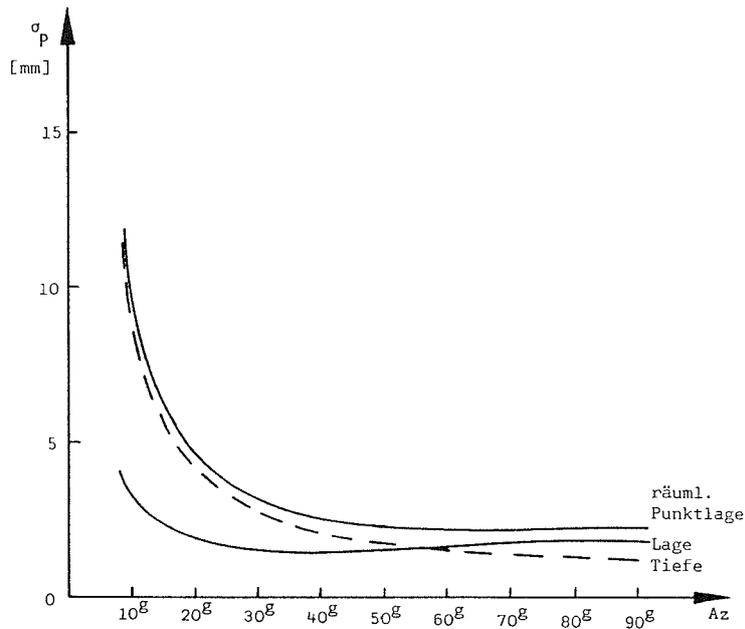


Abb. 6-13: Mittlere Fehler am Objekt für den symmetrischen Konvergenzfall mit einer Frontalaufnahme

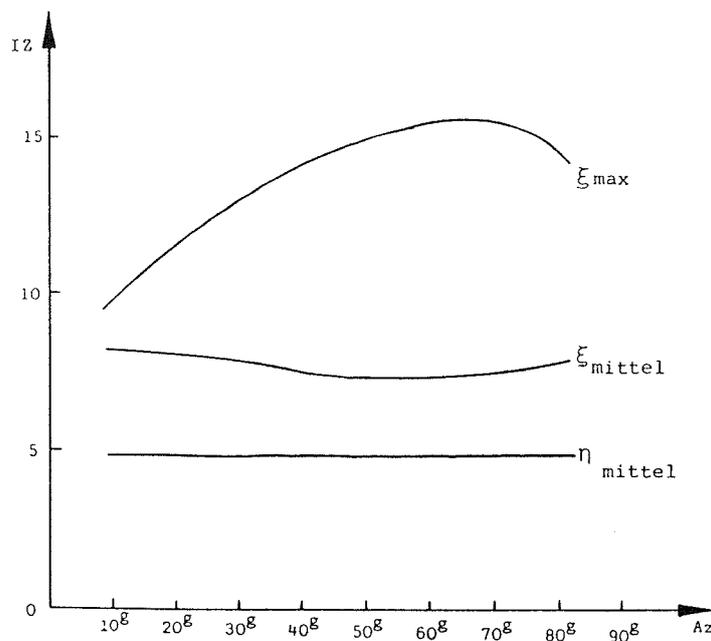


Abb. 6-14: Innere Zuverlässigkeit für den symmetrischen Konvergenzfall mit einer Frontalaufnahme

### 6.2.7 Symmetrischer Fall von einer Standlinie aus mit einer Frontalaufnahme

Es handelt sich hier um eine analoge Anordnung wie in Kap. 6.2.6 . Nur sind die Photos entlang einer Standlinie angeordnet (siehe Abb. 6-15).

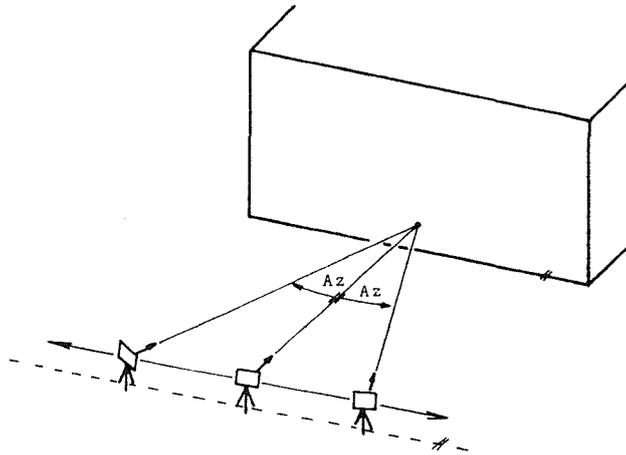


Abb. 6-15: Aufnahmekonfiguration für den symmetrischen Fall von einer Standlinie aus mit einer Frontalaufnahme

Die Genauigkeit dieser Anordnung kann man Abbildung 6-16 entnehmen. In Abbildung 6-17 ist die Zuverlässigkeit dieser Anordnung ersichtlich.

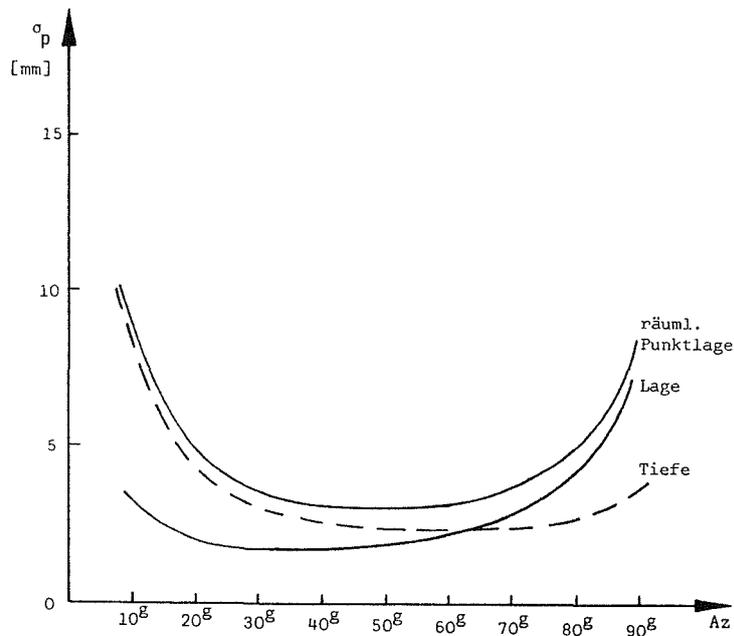


Abb. 6-16: Mittlere Fehler am Objekt für den symmetrischen Fall von einer Standlinie aus mit einer Frontalaufnahme

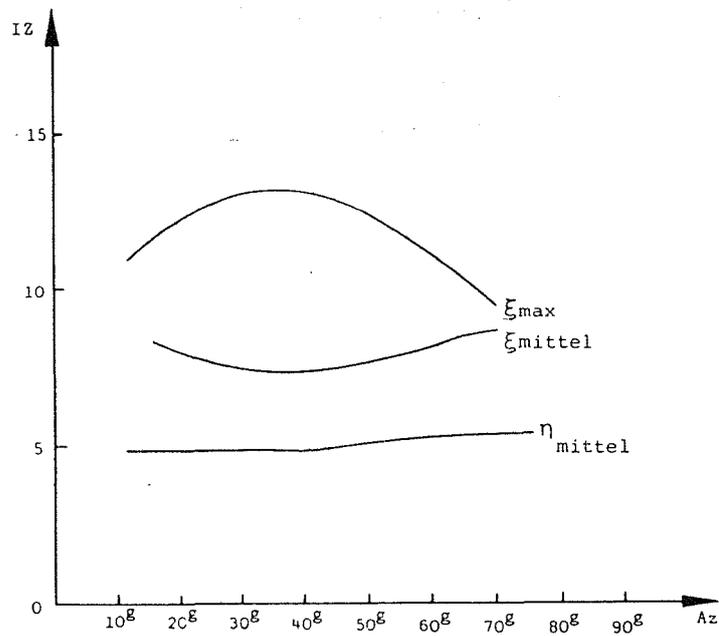
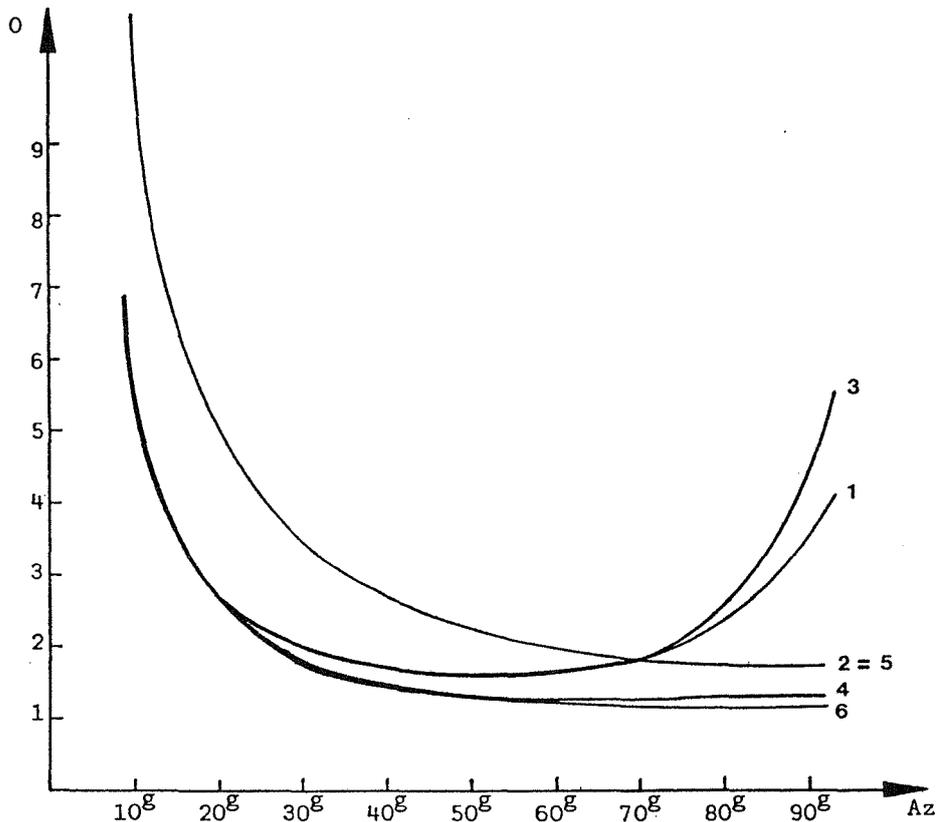


Abb. 6-17: Innere Zuverlässigkeit für den symmetrischen Fall von einer Standlinie aus mit einer Frontalaufnahme

### 6.2.8 Schlußfolgerungen aus Testanordnung "Wand"

Ausgehend von der Genauigkeitsformel (3-5) in Kapitel 3.3 läßt sich der Schnittqualitätsfaktor  $o$  für die verschiedenen Aufnahmesituationen in einem Diagramm darstellen (Abb.: 6-18).



- 1...Symmetrischer Konvergenzfall (Kap. 6.2.1)
- 2...Einseitiger Konvergenzfall (Kap. 6.2.2; Kap. 6.2.4)
- 3...Symmetrischer Fall von einer Standlinie aus (Kap. 6.2.3)
- 4...Symmetr. Konvergenzfall mit einer Frontalaufnahme (Kap. 6.2.6)
- 5...Einseitiger Konvergenzfall von einer Standlinie aus (Kap. 6.2.5)
- 6...Symmetrischer Fall von einer Standlinie aus mit einer Mittelaufnahme (Kap. 6.2.7)

Abb. 6-18: Vergleich des Schnittqualitätsfaktors  $o$  bei den unterschiedlichen Aufnahmevarianten beim Objekt "Wand"

Da ja bei dieser Versuchsanordnung die äußere Orientierung fehlerfrei eingeführt wird, sind in der Formel (3-5) sowohl der Paßelementefaktor  $p$  als auch der Lagerungsgenauigkeitsfaktor  $l$  gleich Null.

Wie aus der Abbildung 6-18 hervorgeht, verbessert sich der Schnittqualitätsfaktor  $o$  mit zunehmendem Azimut. Eine Ausnahme bilden die Aufnahmevarianten 1

und 3 in der Abbildung. Bei diesen verschlechtert sich der Schnittqualitätsfaktor mit zunehmendem Azimut ab  $50^\circ$  wieder. Die Varianten 4 und 5 schneiden dabei am besten ab. Bei Variante 5 ist aber zu beachten, daß mit zunehmendem Konvergenzwinkel sich zwar der o-Faktor weiter verbessert, aber gleichzeitig sich die mittlere Bildmaßstabszahl wesentlich erhöht. Das hat zur Folge, daß sich ab circa  $50^\circ$  Konvergenzwinkel der räumliche Punktlagefehler, trotz besser werdendem o-Faktor, wieder verschlechtert (siehe Abb. 6-16).

Interessant ist noch die Frage, wie sich das Hinzunehmen weiterer Aufnahmen auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit auswirkt. Ausgehend von der Aufnahme-konfiguration "Symmetrischer Konvergenzfall" (siehe Kap. 6.2.1) mit einer Aufnahmerichtung von jeweils  $60^\circ$  werden zunächst zusätzliche Aufnahmen zwischen den beiden Photos der Grundversion angefertigt. Diese zusätzlichen Aufnahmen verdichten nur die vorhandene Aufnahmegeometrie. Die damit erzielte Genauigkeitssteigerung kann dem Diagramm in Abb. 6-19 entnommen werden.

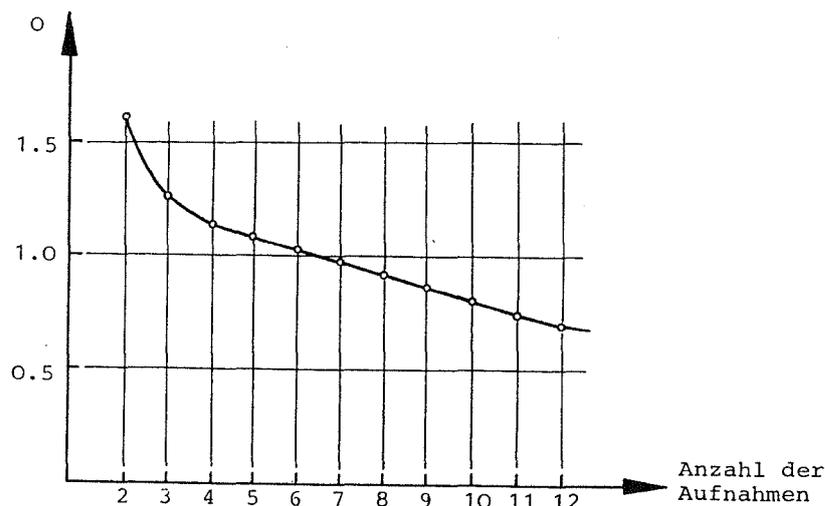


Abb. 6-19: Der Schnittqualitätsfaktor o in Abhängigkeit von der Anzahl der Aufnahmen beim "Symmetrischen Konvergenzfall" ( $Az=60^\circ$ )

Wie aus dem Diagramm ersichtlich ist, verbessert sich der Schnittqualitätsfaktor o - und damit der mittlere räumliche Punktlagefehler am Objekt - sehr stark abhängig von der Anzahl der Aufnahmen. Der Übergang von den zwei Aufnahmen der Grundversion zu drei Aufnahmen bringt in diesem Fall eine ca. 25%-ige Genauigkeitssteigerung mit sich. Macht man an Stelle dieser drei Aufnahmen vier Photos, so führt das zu einer weiteren Genauigkeitssteigerung von etwa 10%. Jede weitere Aufnahme bringt noch einmal etwa 5% Genauigkeitsgewinn.

Wie sich die zusätzlichen Aufnahmen auf die innere Zuverlässigkeit auswirken, zeigt das Diagramm in Abb. 6-20.

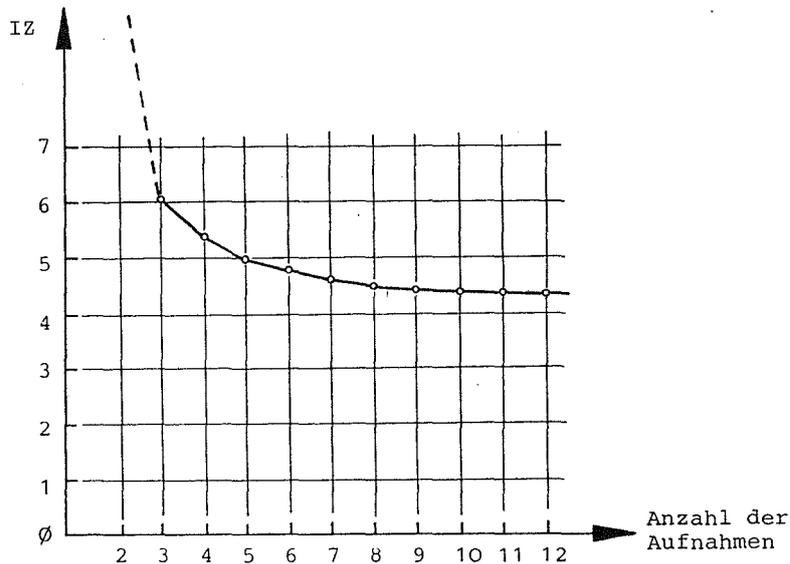


Abb. 6-20: Der Kennwert für die innere Zuverlässigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Aufnahmen beim "Symmetrischen Konvergenzfall" ( $Az=60^\circ$ )

Der Übergang von den zwei Aufnahmen der Grundversion zu drei Aufnahmen macht die Punktbestimmung erst zuverlässig. Bei vier Aufnahmen wird in diesem Fall der Mittelwert der inneren Zuverlässigkeit um etwa 10% verbessert. Jede weitere Aufnahme bringt nur mehr eine geringfügige Verbesserung. Bei unendlich vielen Aufnahmen geht IZ in den Wert 4 über.

Untersucht wurde auch noch die Auswirkung auf die Genauigkeit, wenn die Projektionszentren der Aufnahmen nicht in einer Ebene liegen. Bei den bisherigen Untersuchungen waren die Projektionszentren immer auf einem horizontalen Halbkreis in 1.2 Meter Höhe über der untersten Punktreihe angeordnet. Wenn man die Mittelaufnahme aus derselben Aufnahmeentfernung und in horizontaler Richtung, aber von der Höhe der obersten Punktreihe aus anfertigt, dann ergibt sich eine cirka 5 bis 10%-ige Genauigkeitssteigerung der Punktbestimmung.

## 7. Spezielle Blöcke

Im Kapitel 6. wurden an einem einfachen Objekt einige grundlegende Variationen der Aufnahmeanordnung durchsimuliert. Mit der Kenntnis dieser Ergebnisse und mit gewissen Einschränkungen, die sich beim praktischen Arbeiten unweigerlich ergeben, wird in diesem Kapitel versucht, sogenannte "Standardaufnahmesituationen" festzulegen. Diese Einschränkungen bestehen einerseits darin, daß die Objektpunkte (i.a. Signale) nur bis zu einem bestimmten Abbildungsmaßstab problemlos eingestellt werden können und andererseits, daß zu starke Schrägaufnahmen nur mehr mit großen Schwierigkeiten ausgemessen werden können (siehe /Ballik 1989/).

Bei den folgenden Untersuchungen wird zuerst immer das Objekt kurz beschrieben, anschließend die durchgerechneten Paßpunktvarianten. Danach erfolgt eine genaue Beschreibung der unterschiedlichen Bündelanordnungen. Zu jeder Bündelanordnung gibt es eine kleine Skizze. Die angegebenen Maße beziehen sich konkret auf die jeweilige Größe des "Testobjekts". Beim praktischen Arbeiten wird das tatsächliche Objekt im allgemeinen nicht der Größe des Testobjekts entsprechen. Um trotzdem die der Testanordnung entsprechende Bündelanordnung zu erreichen, sind die angegebenen Maße noch mit dem sogenannten "Objektfaktor" zu multiplizieren. Der Objektfaktor gibt das Verhältnis von tatsächlicher Objektgröße zur Testobjektgröße an.

In den Tabellen am Ende des jeweiligen Kapitels ist nur die mittlere Bildmaßstabszahl  $m$  von den Abmessungen des Testobjekts abhängig. Man muß also nur die Größe  $m$  mit dem Objektfaktor multiplizieren, um die im konkreten Fall gültige mittlere Bildmaßstabszahl zu bestimmen. Die übrigen Kenngrößen für die Genauigkeit ( $\sigma$ ,  $\nu$ ), für die Zuverlässigkeit (IZ) und für den Aufwand (AE) sind unabhängig von den tatsächlichen Abmessungen des Objekts und können daher für eine Aufnahmeplanung direkt aus den Tabellen entnommen werden.

### 7.1 Das Objekt LANGE WAND

Beim Standardobjekt "Lange Wand" handelt es sich um eine langgestreckte, ebene Fläche mit dem Verhältnis Länge : Höhe = 20 : 1. Im konkreten Fall wird eine 300 Meter lange und 15 Meter hohe ebene Wand als "Testobjekt" angenommen. Die Wand ist wieder durch ein 5 x 3 Meter dichtes Punktraster repräsentiert. Wie bei den zuvor beschriebenen Tests, werden auch hier ver-

schiedene Anordnungen berechnet, wobei wiederum die Aufnahmeorte und die Aufnahmerichtungen sowie eine bestimmte Kamera angenommen werden. Aus den insgesamt 366 bekannten Objektpunkten werden mit Hilfe der Formeln für die perspektive Abbildung Bildkoordinaten errechnet. Es wird als Aufnahmekamera wieder die P31-WW angenommen. Der Unterschied zum Testobjekt "Wand" besteht darin, daß mit einer Aufnahme nicht das gesamte Objekt erfaßt werden kann. Im folgenden werden fünf verschiedene Bündelanordnungen und zehn unterschiedliche Paßelementeanordnungen vorgestellt.

### 7.1.1 Paßelementeanordnung

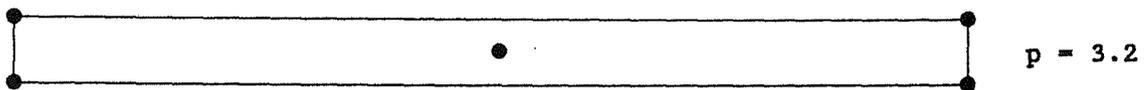
Jede der fünf verschiedenen Bündelanordnungen wird mit zehn unterschiedlichen Paßpunktvarianten durchgerechnet. Es werden dabei sowohl die Anzahl als auch die Anordnung und Verteilung der Paßpunkte variiert. Diese Testanordnung soll Auskunft darüber geben, wieviele Paßpunkte notwendig sind und wie man sie am günstigsten verteilt, damit einerseits gewisse Fehlergrenzen eingehalten, andererseits auch eine für die Praxis wirtschaftlich vertretbare Lösung gefunden werden kann. Es soll damit auch festgestellt werden, bei welcher Bündelanordnung am meisten mit Paßpunkten gespart werden kann - d. h. welche Bündelanordnung am ehesten stabil gegen Verformung ist. Die angegebenen p-Faktoren sind dem Diagramm in Abb. 3-1 entnommen.

#### 1. Variante:



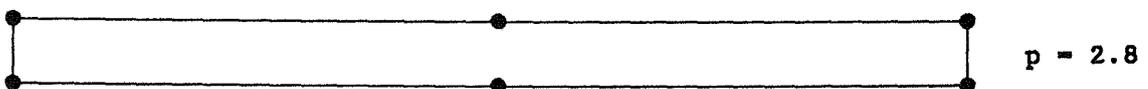
4 Paßpunkte in den Ecken

#### 2. Variante:



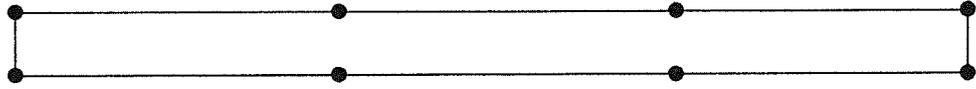
5 Paßpunkte (4 PP in den Ecken + 1 PP in der Mitte)

#### 3. Variante:



6 Paßpunkte (4 PP in den Ecken + 2 PP oben und unten in der Mitte)

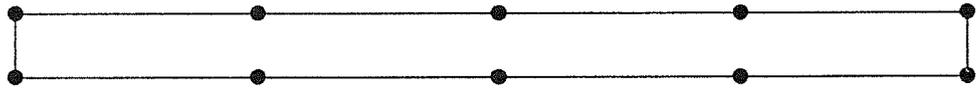
4. Variante:



p = 2.0

8 Paßpunkte (4 PP in den Ecken + je 2 PP oben und unten nach jeweils 100 Metern)

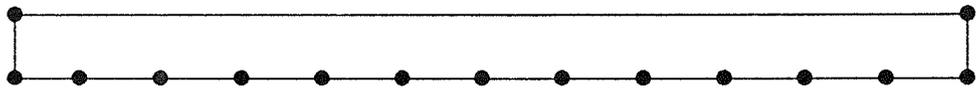
5. Variante:



p = 1.6

10 Paßpunkte (oben und unten gleichmäßig über die Wand verteilt)

6. Variante:

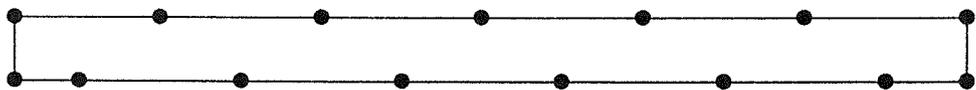


p = 1.6

15 Paßpunkte (4 PP in den Ecken + 11 PP am unteren Rand)

Diese Anordnung ist deshalb interessant, weil die Punkte unten an der Fassade geodätisch leicht eingemessen werden können.

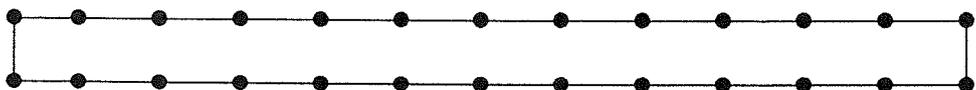
7. Variante:



p = 1.2

15 Paßpunkte (alternierend oben und dann unten angeordnet)

8. Variante:



p = 0.8

26 Paßpunkte (nur am Rand angeordnet; PP-Abstand: 25 m)

9. Variante:



p = 0.3

120 Paßpunkte (dichter Rand; PP-Abstand: 5 m)

10. Variante:



p = 0

366 Paßpunkte (alle Objektpunkte sind Paßpunkte)

Die Paßpunkte werden nicht als Fixpunkte in den Ausgleich eingeführt, sondern haben wie die anderen Beobachtungen auch einen mittleren Fehler. Die Genauigkeit der Paßpunktmessung sollte in der Größenordnung der zu erwartenden photogrammetrischen Auswertegenauigkeit liegen (oder noch besser etwas darunter). In dieser Untersuchung wurden die Paßpunkte zunächst mit einem mittleren Fehler von  $\pm 5$  mm in den Ausgleich eingeführt. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist im Diagramm in Abbildung 3-1 dargestellt.

### 7.1.2 Bündelanordnung

Insgesamt werden fünf Standardversionen besprochen. In Kapitel 7.1.3 werden die Kenndaten dieser Varianten gegenübergestellt. Welche Variante bei praktischen Projekten Anwendung findet, richtet sich einerseits nach den örtlichen Gegebenheiten am Aufnahmeort, andererseits nach den Forderungen an das Endprodukt (Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Frontalaufnahmen, usw.). Es ist auch vorstellbar, die verschiedenen Varianten miteinander zu kombinieren.

#### LANGE WAND - Version A

Die Aufnahmeversion A besteht nur aus Frontalaufnahmen mit einem Bildmaßstab von 1:250. Die Aufnahmeentfernung beträgt also 25 Meter.

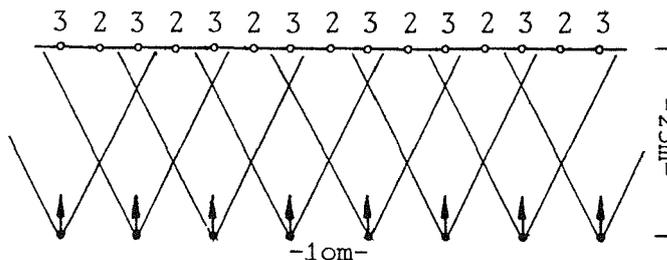


Abb. 7-1: Aufnahmeanordnung "Lange Wand" - Version A

Die Projektionszentren sind höhenmäßig in normaler Arbeitshöhe mit dem Stativ (1,8 m über der untersten Punktreihe des Objekts). Die Basis zwischen den einzelnen Aufnahmen beträgt 10 m. Diese Aufnahmeanordnung entspricht etwa dem Luftbildfall mit 60% Längsüberdeckung. Sie dient in erster Linie zum Vergleich. 31 Frontalaufnahmen sind notwendig, um das Testobjekt "Lange Wand" mit dieser Aufnahmevariante zu erfassen.

Die eingetragenen Ziffern bei den Objektpunkten in Abbildung 7-1 geben die

Anzahl der Bestimmungsstrahlen pro Objektpunkt an. Wie in Abbildung 7-1 ersichtlich, wird jeder Objektpunkt durch mindestens zwei Strahlen bestimmt. Jede zweite Punktreihe wird von drei Strahlen getroffen.

LANGE WAND - Version B

Bei der Aufnahmeanordnung B wird jeder Neupunkt durch drei Strahlen bestimmt. Der Grundidee dabei ist, das gesamte Objekt mit Frontalaufnahmen mono zu decken. Zu jeder Frontalaufnahme gibt es zwei Schrägaufnahmen. Die eine Aufnahme  $34^{\text{g}}$  nach links verschwenkt, die andere  $34^{\text{g}}$  nach rechts verschwenkt. Damit ist gewährleistet, daß jeder Punkt in drei Photos angemessen werden kann. Die Frontalaufnahmen haben - wie bei der Aufnahmeversion A - 25 Meter Abstand vom Objekt, also einen Bildmaßstab von 1:250. Bei den Schrägaufnahmen variiert die Bildmaßstabszahl von 220 bis 370. Somit ergibt sich bei dieser Aufnahmeanordnung eine mittlere Bildmaßstabszahl von 290.

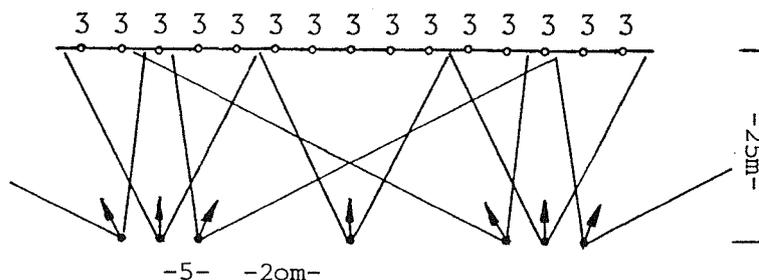


Abb. 7-2: Aufnahmeanordnung "Lange Wand" - Version B

Die Frontalaufnahmen haben untereinander einen Abstand - wie bei Version A - von 25 Metern. Die Schrägaufnahmen haben jeweils 5 Meter Basis zur Frontalaufnahme. Um das Testobjekt "Lange Wand" mit dieser Aufnahmeanordnung in der eben beschriebenen Weise zu erfassen, benötigt man 12 Frontalaufnahmen und 13 Schrägaufnahmen (P31-WW).

LANGE WAND - Version C

Diese Aufnahmevariante hat eine gewisse Ähnlichkeit mit der Variante B. Es gibt hier wieder einen einfach deckenden Block aus Frontalaufnahmen. Diese sind wieder aus 25 Meter Entfernung zum Objekt mit einer Weitwinkelkamera aufgenommen, und der Abstand zwischen den Frontalaufnahmen beträgt ebenfalls wieder 25 Meter. Der Unterschied zur Variante B besteht darin, daß die

Schrägaufnahmen in die Mitte zwischen die Frontalaufnahmen verlegt sind. Damit ergibt sich folgende Aufnahmeanordnung: alle 12,5 Meter (= halbe Aufnahmeentfernung) eine Aufnahme und zwar abwechselnd eine Frontalaufnahme, dann eine um  $34^{\text{g}}$  nach links verschwenkte Aufnahme, dann wieder eine Frontalaufnahme, dann eine um  $34^{\text{g}}$  nach rechts verschwenkte Aufnahme, dann wieder eine Frontalaufnahme, usw. .

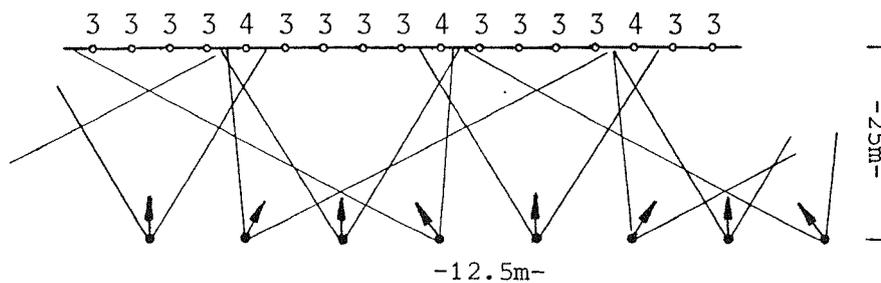


Abb. 7-3: Aufnahmeanordnung "Lange Wand" - Version C

Bei dieser Aufnahmevariante braucht man wieder 12 Frontalaufnahmen und insgesamt 13 Schrägaufnahmen, um das gesamte Testobjekt zu erfassen. Die mittlere Bildmaßstabszahl ergibt sich dabei wieder mit 290. Jeder Punkt wird von mindestens drei Strahlen getroffen. Jede fünfte Punktreihe wird sogar von vier Strahlen bestimmt.

LANGE WAND - Version D

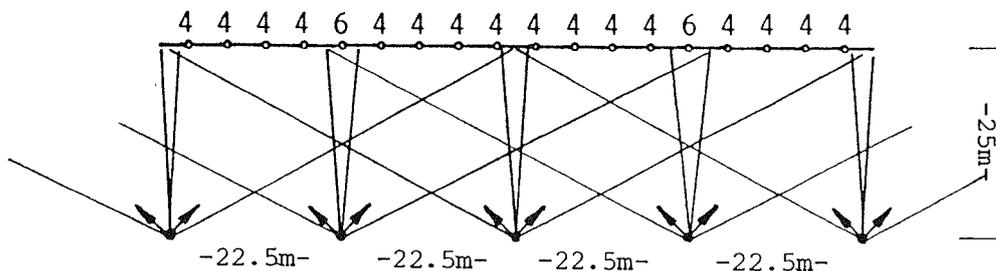


Abb. 7-4: Aufnahmeanordnung "Lange Wand" - Version D

In der Aufnahmeversion D wird auf die Frontalaufnahmen verzichtet. Man macht von jedem Aufnahmeort aus zwei Aufnahmen. Eine  $34^{\text{g}}$  nach links verschwenkt, die andere  $34^{\text{g}}$  nach rechts verschwenkt. Geometrisch kann man sich das jetzt als eine Aufnahme mit einem sehr großen Öffnungswinkel vorstellen.

Die Basis zwischen diesen "Pseudo-ÜWW-Aufnahmen" beträgt in diesem Fall 22,5 Meter. Das entspricht also etwa der Aufnahmeentfernung.

Wie in Abbildung 7-4 ersichtlich, gibt es zu jedem Objektpunkt vier photogrammetrisch registrierte Richtungen aus vier verschiedenen Bildern. Obwohl man mit dieser Aufnahmevariante eine hohe Redundanz der Ausgleichung erreicht (jeder Objektpunkt ist vierfach beobachtet), braucht man dazu nur 28 Schrägaufnahmen (P31-WW).

#### LANGE WAND - Version E

Bei der Aufnahmevariante E wird die Variante D so abgeändert, daß die "Pseudo-ÜWW-Aufnahmen" noch näher ans Objekt heranrücken. Daneben werden in 25 Meter Entfernung zusätzliche Frontalaufnahmen angefertigt, die das Objekt mono überdecken.

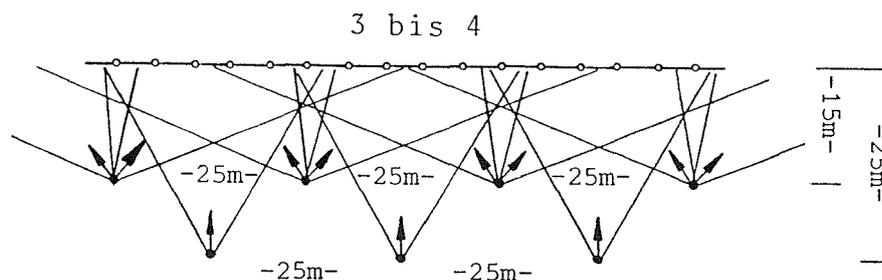


Abb. 7-5: Aufnahmeanordnung "Lange Wand" - Version E

Durch die sehr nahen Schrägaufnahmen verbessert sich die mittlere Bildmaßstabszahl. Man muß aber jetzt diese Schrägaufnahmen noch stärker schwenken ( $40^\circ$ ) und zusätzlich auch noch kippen (Zenitdistanz =  $92^\circ$ ), um das Objekt noch in voller Höhe (15 Meter) zu erfassen. Die mittlere Bildmaßstabszahl ergibt sich bei der in Abbildung 7-5 dargestellten Grundrißsituation mit 249. Die Bildmaßstabszahl variiert bei den Schrägaufnahmen zwischen 160 und 344.

12 Frontalaufnahmen und 24 Schrägaufnahmen sind bei dieser Aufnahmevariante notwendig, um das gesamte Testobjekt zu erfassen. Jeder Objektpunkt wird bei der Aufnahmevariante E von mindestens drei Bildstrahlen bestimmt. Ungefähr 80% der Objektpunkte werden sogar von vier Bildstrahlen getroffen.

### 7.1.3 Schlußfolgerung aus Testanordnung LANGE WAND

In der Tabelle 7-1 sind die wichtigsten Kenndaten der einzelnen Aufnahmevarianten zusammengestellt.

Aufnahmeversion	A	B	C	D	E
m (mittl. Bildmaßstabszahl)	250	290	290	330	249
o (Schnittqualitätsfaktor)	3.0	1.7	1.5	1.1	1.2
v (Verformungsfaktor)	5.2	2.2	1.0	0.7	1.6
IZ (Innere Zuverlässigkeit)	$\infty$	6.4	6.2	5.3	5.9
Anzahl der Aufnahmen	31	25	25	27	36
FA (=Frontalaufnahme)	31	12	12	0	12
SA (=Schrägaufnahme)	0	13	13	27	24
Anzahl der beob. Bildpunkte	906	1060	1158	1482	1324
AE (Arbeitseinheiten)	64	57	58	65	77

Tab. 7-1: Kenndaten der verschiedenen Aufnahmeversionen "Lange Wand"

Von den Faktoren her beurteilt, schneidet Variante D am besten ab. Die Genauigkeit und auch die Zuverlässigkeit sind besser als bei den übrigen Varianten. Der Nachteil dieser Anordnung liegt wohl im Fehlen von Frontalaufnahmen. Vergrößerungen dieser Frontalaufnahmen werden nämlich häufig zum Eintragen des Punktnummernschemas und als "Ansichtsskizze" - als Hilfsmittel beim punktweisen Messen in den Schrägaufnahmen - verwendet.

Die Aufnahmevariante A entspricht von der äußeren Geometrie her dem Luftbildfall (60% Längsüberdeckung). Sie schneidet hier bei weitem am schlechtesten ab und dient in erster Linie zum Vergleich. Vor allem die innere Zuverlässigkeit erreicht bei dieser Variante bei den Neupunkten mit nur zwei Bestimmungsstrahlen den Wert  $\infty$  - d.h. ein Fehler in der Beobachtung einer  $\xi$ -Bildkoordinate wird durch die Berechnung nicht aufgedeckt. Auch der Verformungsfaktor v, der ein Maß für die Verschlechterung in paßpunktlosen Bereichen ist, ergibt bei dieser Variante einen auffallend schlechten Wert.

Diese Aufnahmevariante wird daher bei praktischen Anwendungen, wo man auf die Stereoskopie verzichten kann, kaum oder nur in Ausnahmefällen zur Anwendung gelangen.

Die in der Tabelle 7-1 angeführte mittlere Bildmaßstabszahl bezieht sich konkret auf die in diesem Beispiel durchgerechneten Aufnahmeentfernungen. Die ursprünglichen Aufnahmeanordnungen sind ja maßstabslos. Es geht nur um Schnittbedingungen. Verkürzt man die Aufnahmeentfernung (in diesem Fall 25 Meter) zum Beispiel um 50% (auf 12,5 Meter), so ändern sich natürlich auch im selben Verhältnis die Basen zwischen den Aufnahmen und genauso die mittlere Bildmaßstabszahl. Die Faktoren  $o$ ,  $v$  und  $IZ$  bleiben aber dieselben.

Die unteren drei Zeilen der Tabelle 7-1 enthalten Angaben über den Arbeitsaufwand der einzelnen Varianten. Es sind die Anzahl der benötigten Aufnahmen und die Anzahl der Bildkoordinatenmessungen für die einzelnen Varianten eingetragen. Aus diesen Daten und mit den Formeln aus Kapitel 5.2 (Aufwandsberechnung) werden für einen Aufwandsvergleich sogenannte "Arbeitseinheiten" (AE) berechnet. In diesen Arbeitseinheiten sind der Aufwand für die photogrammetrische Aufnahme, für die Bildkoordinatenmessung an einem Komparator und für die Berechnung mit einem Bündelausgleichsprogramm berücksichtigt. Es ist aber notwendig, in den Formeln des Kapitels 5.2 bestimmte Parameter fix einzuführen, um die Arbeitseinheiten direkt vergleichen zu können. Folgende Parameter werden dabei fix angenommen:

- bei der photogrammetrischen Aufnahme (Formel 5-3) die Schwierigkeitsstufe der Begehrbarkeit der Aufnahmeorte: Schwierigkeitsstufe  $a$  bei Aufnahmen vom Boden aus und Schwierigkeitsstufe  $b$  bei höher gelegenen Aufnahmen.
- bei der Bildkoordinatenmessung (Formel 5-4) signalisierte Punkte mit der Schwierigkeitsstufe  $b$
- bei der Berechnung des Bündelausgleichs:  $\frac{1}{4}$  der Gesamtanzahl der Neupunkte ist im Rahmenblock (= Faktor  $l$  in Formel 5-5).  $\frac{3}{4}$  der Gesamtanzahl der Neupunkte tragen nichts zur äußeren Orientierung im Rahmen des Bündelblockausgleichs bei. Sie werden nur räumlich vorwärtsgeschnitten (= Faktor  $k$  in Formel 5-5).

Multipliziert man den Wert für die Arbeitseinheiten mit der Zeitgrundgebühr  $Z$  (siehe Kap. 5.), so kann man direkt die Kosten für die photogrammetrische Punktbestimmung angeben; nicht berücksichtigt sind die geodätische Paßpunktmessung, der Signalisierungsaufwand und der sonstige Aufwand (wie im Kapitel 5.3 beschrieben).

## 7.2 Das Objekt WÜRFEL

Beim Standardobjekt "Würfel" handelt es sich um einen durchsichtigen quadratischen räumlichen Körper mit den Seitenverhältnissen 1 : 1 : 1. Das Testobjekt "Würfel" ist 15 x 15 x 15 Meter groß und ist durch ein 5 x 5 x 5 Meter dichtes Punktraster repräsentiert. Es besteht insgesamt aus 64 Objektpunkten. Es sollen damit Aufnahmeanordnungen simuliert werden, die ein dreidimensionales Objekt in der Form eines durchsichtigen Würfels erfassen. Die Objektpunkte sind dabei nicht nur in einer Ebene angeordnet - wie beim Objekt "Wand" -, sondern haben auch in der dritten Dimension eine große Ausdehnung.

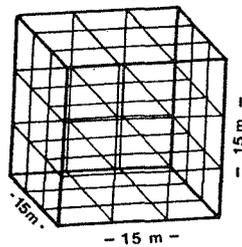


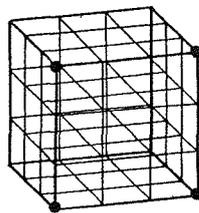
Abb. 7-6: Das Testobjekt "Würfel"

Als Aufnahmekammern werden eine Weitwinkelkammer (Wild P31-WW) und eine Überweitwinkelkammer (Wild P31-ÜWW) angenommen.

### 7.2.1 Paßelementeanordnung

Insgesamt werden fünf unterschiedliche Paßelementeanordnungen durchgerechnet. Es handelt sich dabei um Vollpaßpunkte.

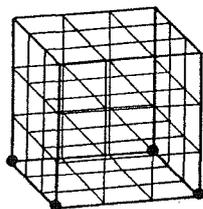
#### 1. Variante:



$$p = 1.5$$

**4 Vollpaßpunkte** (an den Ecken der vorderen Fläche des Objekts)

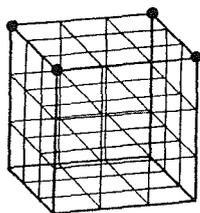
#### 2. Variante:



$$p = 1.5$$

**4 Vollpaßpunkte** (an den Ecken der unteren Fläche des Objekts)

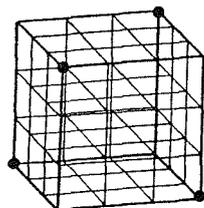
3. Variante:



$$p = 1.5$$

**4 Vollpaßpunkte** (an den Ecken der obersten Fläche des Objekts)

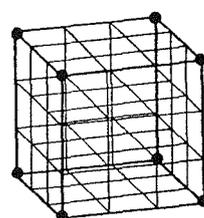
4. Variante:



$$p = 1.0$$

**4 Vollpaßpunkte** (abwechselnd oben und unten in den Ecken)

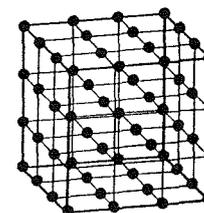
5. Variante:



$$p = 0.55$$

**8 Vollpaßpunkte** (in den Ecken des Objekts)

6. Variante:



$$p = 0$$

**64 Vollpaßpunkte** (alle Objektpunkte sind Paßpunkte)

Die Anzahl und Verteilung der Paßpunkte beeinflusst natürlich die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung. In der Formel (3-5) im Kap. 3.3 ist dieser Einfluß durch das Produkt  $v \cdot p$  berücksichtigt, wobei es sich bei  $p$  um den sogenannten Paßelementefaktor (siehe 3.2.2.1) und bei  $v$  um den Verformungsfaktor (siehe 3.2.3.2) handelt.

Bei den einzelnen Varianten ist der entsprechende Paßelementefaktor angeführt. Die Variante 5 ergibt dabei den besten Wert. Die acht Vollpaßpunkte umschließen das Objekt in allen drei Dimensionen. Es kommt zu keinen Extrapolationen;  $p$  erreicht daher auch den sehr guten Wert von 0.55. Von den Varianten mit nur vier Vollpaßpunkten schneidet die 4. Variante am besten ab, wo die Paßpunkte abwechselnd oben und unten in den Ecken des Objekts angeordnet sind.

### 7.2.2 Bündelanordnung

Insgesamt werden zwölf verschiedene Aufnahmeanordnungen (Version A - L) durchgerechnet. Bei den Varianten A bis E wird davon ausgegangen, daß das Objekt nur von vorne photogrammetrisch erfaßt werden kann. Die Varianten F, G und H erfassen das Objekt nur von oben. Bei den Varianten I und J wird das Objekt rundherum mit Aufnahmen vom Boden aus erfaßt. Bei diesen Varianten - wie bei den folgenden auch - ist allerdings eine spezielle Signalisierung notwendig. Die signalisierten Punkte müssen dabei aus allen Richtungen anmeßbar sein, eine Forderung, die herkömmliche ebene Signale nicht erfüllen. Denkbar sind Signale in Form einer kleinen Kugel oder in Form eines Doppelkegels. Die Varianten K und L erfassen das Objekt von oben und unten bzw. auch rundherum von allen Seiten.

#### WÜRFEL - Version A

Die Version A besteht aus zwei Frontalaufnahmen mit einer Weitwinkelkammer. Diese Aufnahmeanordnung entspricht dem "klassischen" Fall der Stereophotogrammetrie.

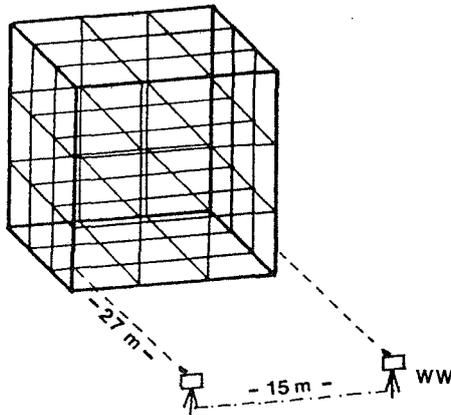


Abb. 7-7: Bündelanordnung "Würfel" - Version A

Die Aufnahmeentfernung beträgt 27 Meter. Die Basis hat in diesem Fall eine Länge von 15 Metern (= Breite des Objekts). Die Aufnahmen werden vom Boden aus angefertigt ( $i = 1.7$  m). Den verhältnismäßig guten Aufwandswerten stehen recht schlechte Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte gegenüber (siehe Tab. 7-2).

WÜRFEL - Version B

Die Aufnahmevariante B besteht aus drei Weitwinkelaufnahmen. Das Objekt wird dabei wieder von vorne und vom Boden aus ( $i = 1.7 \text{ m}$ ) erfaßt.

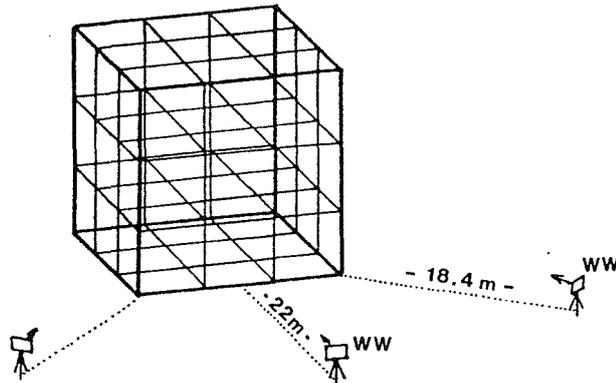


Abb. 7-8: Bündelanordnung "Würfel" - Version B

Es wird eine horizontale Frontalaufnahme aus 22 Metern Entfernung angefertigt und zwei Schrägaufnahmen aus einer Aufnahmeentfernung von 18 Metern. Die Aufnahmerichtungen sind dabei diagonal auf die Kanten des Würfels gerichtet. Um das Objekt möglichst formatfüllend zu erfassen, sind die Schrägaufnahmen leicht nach oben geneigt (Zenitdistanz =  $92^\circ$ ). Diese Dreieranordnung liefert zuverlässige und verhältnismäßig genaue Ergebnisse.

WÜRFEL - Version C

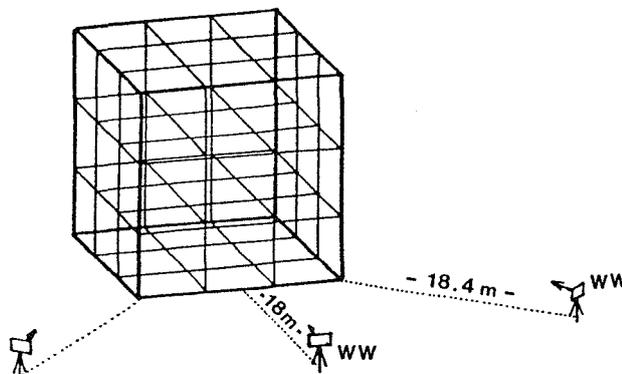


Abb. 7-9: Bündelanordnung "Würfel" - Version C

Die Aufnahmevariante C stellt eine Abänderung der Version B dar. Es werden zwei Schrägaufnahmen (wie in Version B beschrieben) vom Boden aus mit einer Weitwinkelkammer angefertigt. Die Frontalaufnahme rückt aber bei dieser Version näher ans Objekt heran. Die Aufnahmeentfernung beträgt in diesem Fall 18 m (Version B: 22 m). Damit wird das Objekt zwar formatfüllend erfaßt, aber die Kamera muß dafür leicht nach oben gekippt werden (Zenitdistanz = 93°).

Bei dieser Aufnahmevariante wird zwar die mittlere Bildmaßstabszahl gegenüber der Variante B verbessert, man verzichtet dabei jedoch auf eine horizontale Frontalaufnahme. Eine maßstäbliche Vergrößerung dieser horizontalen Frontalaufnahme wird oft zusätzlich zur bündelphotogrammetrischen Vermessung des Objekts verlangt. Die restlichen Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsfaktoren bleiben unverändert.

#### WÜRFEL - Version D

Die Aufnahmevariante D stellt eine Erweiterung der Version C dar. Zusätzlich zu den drei Weitwinkelaufnahmen der Version C wird eine weitere Frontalaufnahme angefertigt. Diese zusätzliche Aufnahme wird aus einer Höhe von 15 m photographiert (= oberste Punktreihe des Objekts). Es ergibt sich damit eine vertikale Basis von 13.3 m zwischen den beiden Frontalaufnahmen. Diese zusätzliche Frontalaufnahme ist leicht nach unten gekippt (Zenitdistanz = 110°).

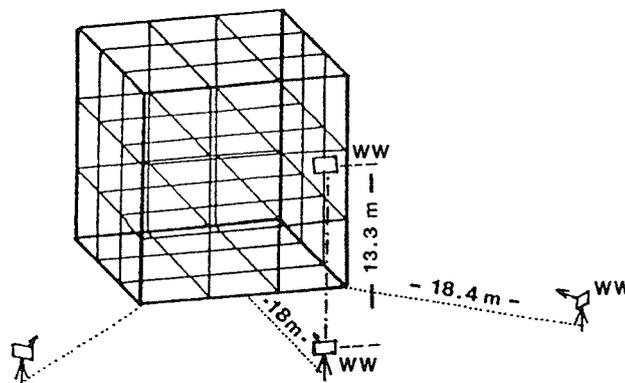


Abb. 7-10: Bündelanordnung "Würfel" - Version D

Vergleicht man diese Aufnahmeversion mit der Variante C, so verbessert sich vor allem der Schnittqualitätsfaktor  $\sigma$  auf 1.1 (Version C: 1.3) und die innere Zuverlässigkeit auf 5.3 (Version C: 6.3).

#### WÜRFEL - Version E

Die Aufnahmevariante E besteht auch aus vier Weitwinkelaufnahmen. Es werden zusätzlich zu den zwei Schrägaufnahmen vom Boden aus (wie in Version B beschrieben), zwei weitere Schrägaufnahmen aus 15 m Höhe angefertigt. Es ergibt sich jeweils eine vertikale Basis von 13.3 m.

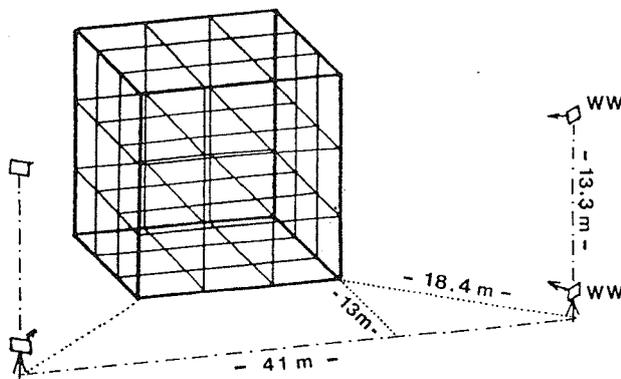


Abb. 7-11: Bündelanordnung "Würfel" - Version E

Vergleicht man mit der soeben beschriebenen Aufnahmevariante D, die ebenfalls aus vier Weitwinkelaufnahmen besteht, so ergeben sich annähernd gleiche Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte.

#### WÜRFEL - Version F

Bei den bisher beschriebenen Aufnahmevarianten wird das Objekt nur mit Aufnahmen von vorne erfaßt. Die folgenden Varianten F, G und H erfassen das Objekt nur mit Aufnahmen von oben.

Die Version F besteht aus vier Weitwinkelaufnahmen, die aus einer Höhe von 28 m symmetrisch auf die Kanten des Würfels angefertigt werden. Die Aufnahmen sind dabei stark nach unten geneigt (Zenitdistanz = 150°).

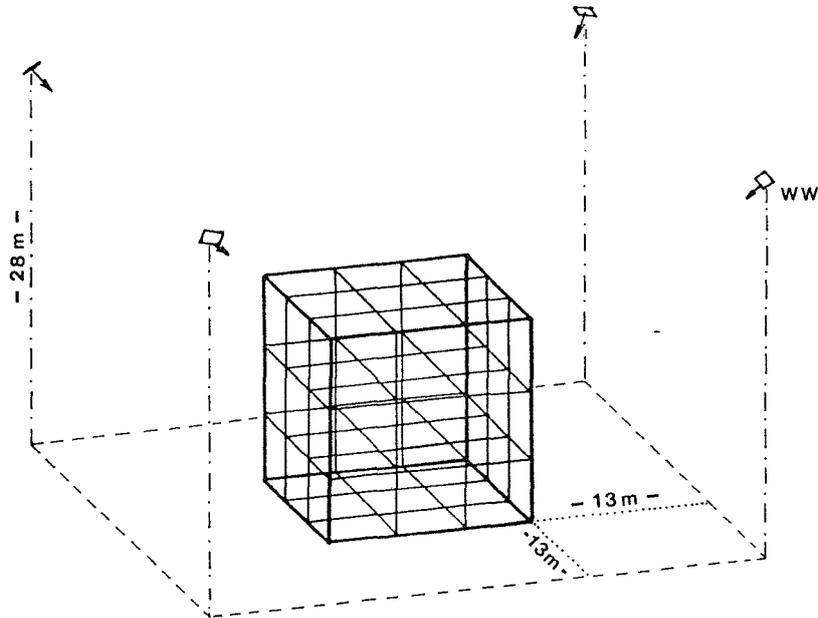


Abb. 7-12: Bündelanordnung "Würfel" - Version F

Jeder Punkt des Objekts wird in allen vier Aufnahmen abgebildet. Die Bildmaßstabszahl variiert zwischen 233 und 478 und ergibt einen Mittelwert von 350. Vergleicht man mit den Varianten D und E, die ebenfalls aus vier Weitwinkelaufnahmen bestehen, so verbessert sich zwar der Schnittqualitätsfaktor  $\sigma$  auf den Wert 0.95 (Version E u. D: 1.1) und der Verformungsfaktor  $v$  auf 1.5 (Version D: 1.8 ; Version E: 1.6). Diese Aufnahmevariante ergibt aber eine schlechtere mittlere Bildmaßstabszahl, so daß die Version F sogar geringfügig schlechtere Genauigkeiten der Objektpunkte liefert. Auch die Aufwandskennzahl AE ergibt bei dieser Variante, bedingt durch die kompliziertere Erreichbarkeit der Aufnahmeorte, einen etwas schlechteren Wert.

#### WÜRFEL - Version G

Die Aufnahmevariante G ist eine Erweiterung der soeben beschriebenen Version F. Es wird zusätzlich zu den vier Weitwinkelschrägaufnahmen (wie in Version F beschrieben) eine Nadiraufnahme mit einer Überweitwinkelkammer angefertigt. Diese zusätzliche Aufnahme wird aus 23 Meter Höhe photographiert und ist auf die Mitte des Objekts gerichtet. Die Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte werden dadurch nur ganz geringfügig verbessert. Man hat damit aber eine Frontalaufnahme zur Verfügung, die sehr oft für das Eintragen des Punktnummernschemas bzw. für Dokumentationszwecke gebraucht wird. Die Aufwandskennzahl AE verschlechtert sich aber gegenüber Version F auf den Wert 17.

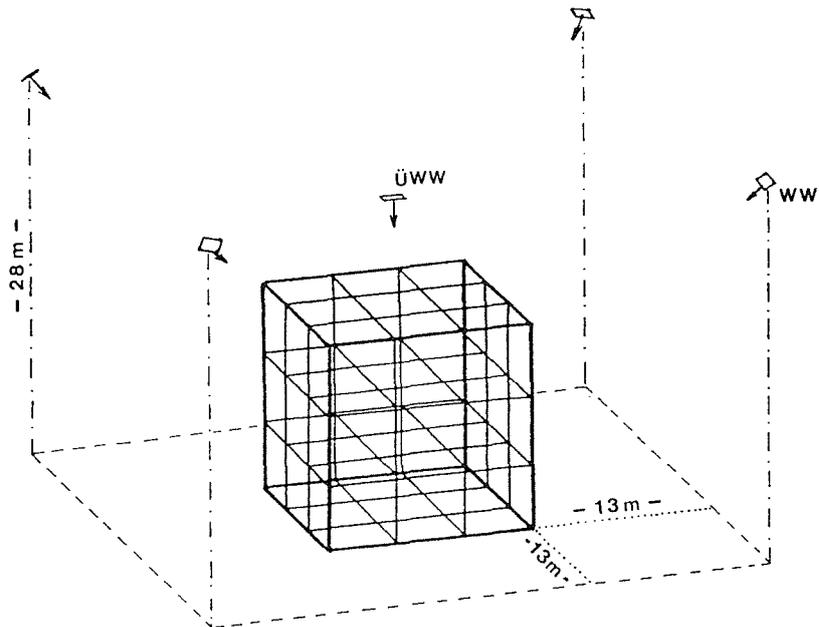


Abb. 7-13: Bündelanordnung "Würfel" - Version G

#### WÜRFEL - Version H

Die Aufnahmevariante H ist eine Erweiterung der Version G. Es werden zusätzlich zu den fünf Aufnahmen der Version G je eine weitere Frontalaufnahme auf die vier Seitenflächen des Würfels angefertigt. Diese Aufnahmen sind dabei jeweils auf die Mitte der Seitenfläche gerichtet und aus einer Entfernung von 8 Metern mit einer Überweitwinkelkammer aufgenommen.

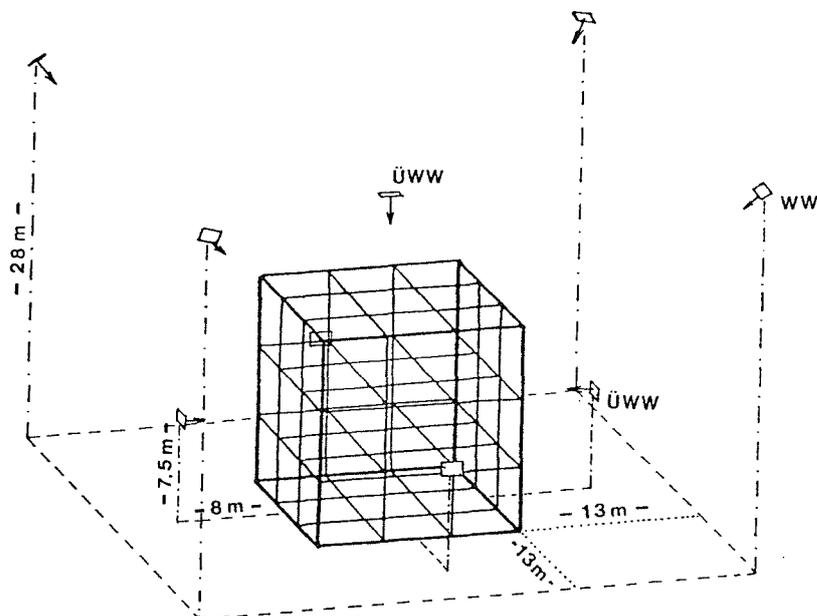


Abb. 7-14: Bündelanordnung "Würfel" - Version H

Diese Aufnahmevariante besteht insgesamt aus vier Weitwinkel- und fünf Überweitwinkelaufnahmen. Sie ergibt recht gute Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte. Es werden allerdings dafür auch zwei Objektivtypen (Weitwinkel- und Überweitwinkelkammer) und spezielle Signale benötigt. Diese Signale müssen sowohl von oben als auch von allen Seiten anmeßbar sein.

#### WÜRFEL - Version I

Die Aufnahmevariante I besteht aus vier Weitwinkelaufnahmen. Diese Aufnahmen werden vom Boden aus ( $i = 1.7 \text{ m}$ ) angefertigt und sind diagonal auf die Kanten des Würfels gerichtet. Die Aufnahmeentfernung beträgt 18 Meter und die Aufnahmen sind, um das Objekt möglichst formatfüllend zu erfassen, leicht nach oben gekippt (Zenitdistanz =  $92^\circ$ ).

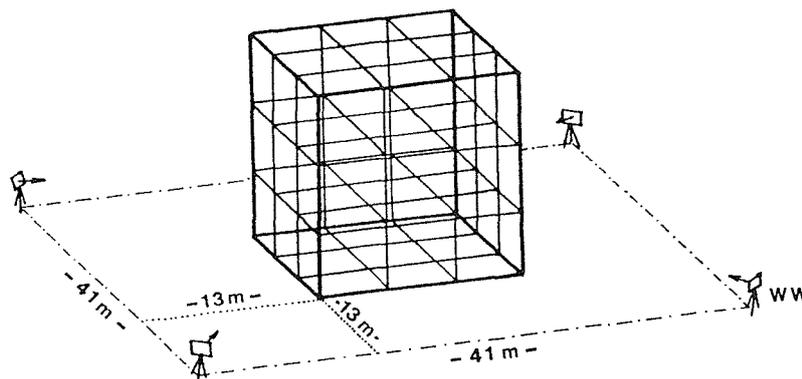


Abb. 7-15: Bündelanordnung "Würfel" - Version I

Vergleicht man diese Variante mit den Versionen D, E und F, die ebenfalls aus vier Weitwinkelaufnahmen bestehen, so stellt man ganz ähnliche Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte fest. Die Version I hat allerdings den Nachteil, daß man spezielle Signale braucht - wie bei den folgenden Varianten auch - die rundherum von allen Seiten anmeßbar sind. Beim praktischen Arbeiten werden sich eventuell auch Probleme mit Verdeckungen ergeben.

#### WÜRFEL - Version J

Die Aufnahmevariante J stellt eine Erweiterung der Version I dar. Zusätzlich zu den vier Schrägaufnahmen (siehe Variante I) werden vier horizontale Frontalaufnahmen auf die Seitenflächen des Objekts angefertigt. Die Aufnahmeentfernung dieser zusätzlichen Weitwinkelaufnahmen beträgt 22 Meter. Alle acht Aufnahmen dieser Variante werden vom Boden aus ( $i = 1.7 \text{ m}$ ) aufgenommen.

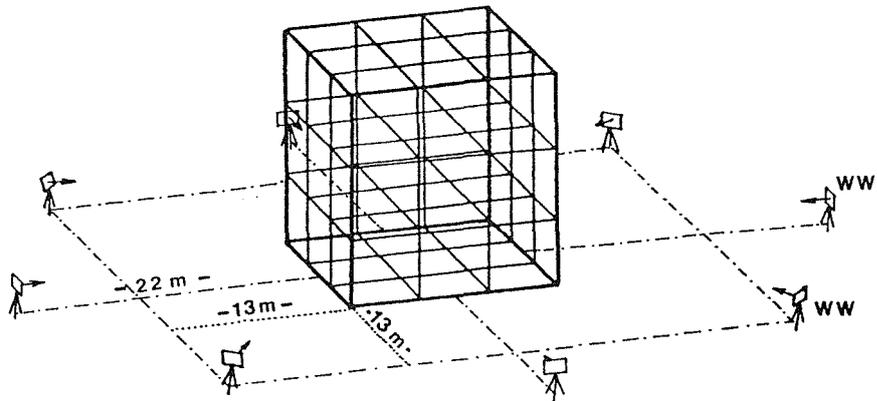


Abb. 7-16: Bündelanordnung "Würfel" - Version J

Die vier zusätzlichen Frontalaufnahmen verbessern den Schnittqualitätsfaktor  $\sigma$  auf 0.8 (Version I: 1.0) und den Verformungsfaktor  $\nu$  auf 1.5 (Version I: 1.6). Der Wert für die innere Zuverlässigkeit verbessert sich auch auf 4.6 (Version I: 5.4). Der Kennwert AE für den Aufwand verschlechtert sich aber auf den Wert 23 (Version I: 14).

WÜRFEL - Version K

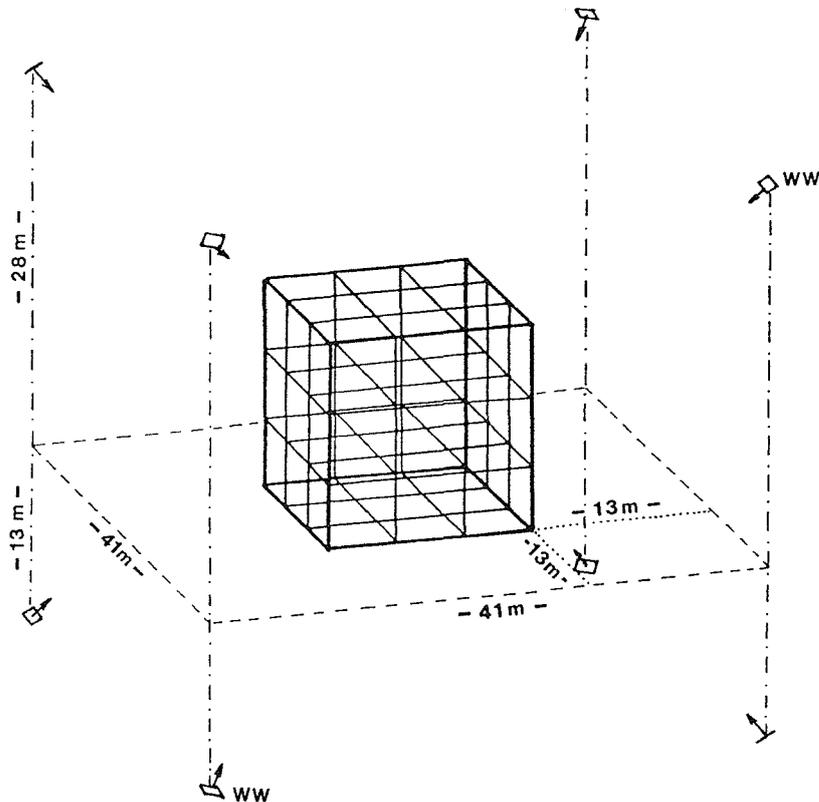


Abb. 7-17: Bündelanordnung "Würfel" - Version K.

Die Aufnahmevariante K besteht ebenfalls aus acht Weitwinkelaufnahmen. Sie stellt eine Erweiterung der Version F dar. Zusätzlich zu den vier Schrägaufnahmen der Variante F von oben auf das Objekt werden vier weitere Schrägaufnahmen von unten auf das Objekt angefertigt. Diese Aufnahmevariante ergibt recht gute Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte, setzt aber das Vorhandensein von Signalen, die von oben und von unten angemessen werden können, voraus. Vergleicht man mit der relativ einfachen Aufnahmevariante F, so ergibt sich nur eine geringfügige Steigerung der Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte.

#### WÜRFEL - Version L

Die Aufnahmevariante L stellt eine Erweiterung der soeben beschriebenen Version K dar. Es werden - zusätzlich zu den acht Weitwinkelschraugaufnahmen - Überweitwinkelfrontalaufnahmen auf die sechs Seiten des Würfels angefertigt. Diese Überweitwinkelaufnahmen haben eine Aufnahmeentfernung von 8 Metern.

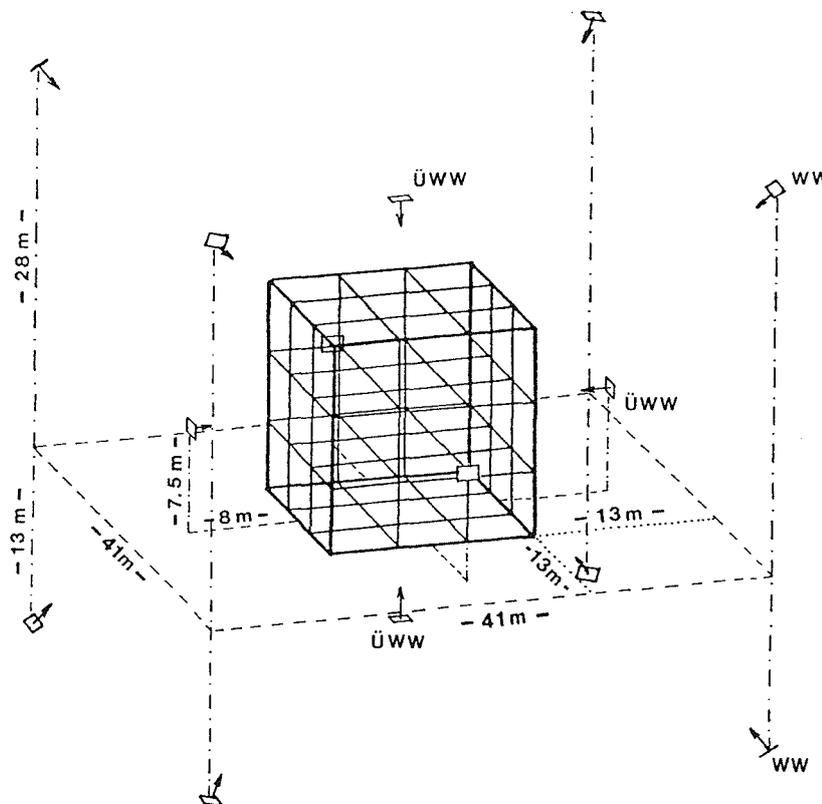


Abb. 7-18: Bündelanordnung "Würfel" - Version L

Es ergeben sich die besten Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte von allen untersuchten Aufnahmeanordnungen. Dieser Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsgewinn muß jedoch mit einem sehr großen Aufwand "bezahlt" werden.

7.2.3 Schlußfolgerung aus Testanordnung WÜRFEL

In der Tab. 7-2 sind die wichtigsten Kenndaten der einzelnen Bündelanordnungen zusammengestellt.

Variante	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
m	345	295	283	279	297	350	349	347	295	295	350	347
o	2.2	1.3	1.3	1.1	1.1	1.0	0.9	0.6	1.0	0.8	0.7	0.6
v	2.9	1.8	1.8	1.8	1.6	1.5	1.4	1.3	1.6	1.5	1.3	1.2
IZ	∞	6.3	6.3	5.3	5.3	5.2	5.0	4.6	5.4	4.6	4.6	4.4
Σ Pho	2	3	3	4	4	4	5	9	4	8	8	14
Σ n <sub>0</sub>	128	192	192	256	256	256	320	576	256	512	512	896
AE	9	11	11	14	14	15	17	27	14	23	25	40

- m ..... mittlere Bildmaßstabszahl (3.2.2)
- o ..... Schnittqualitätsfaktor (3.2.1)
- v ..... Verformungsfaktor (3.2.3)
- IZ ..... Mittelwert der inneren Zuverlässigkeit für die beobachteten Bildkoordinaten (4.1.1)
- Σ n<sub>0</sub> ... Anzahl der beobachteten Bildpunkte
- AE ..... Arbeitseinheiten (7.1.3.)

*Tab. 7-2: Kenndaten der verschiedenen Aufnahmevarianten "Würfel"*

Die Tabelle 7-2 soll bei der praktischen Aufnahmeplanung als Entscheidungshilfe herangezogen werden. Es ist jedoch zu beachten, daß nicht alle Varianten von den gleichen Voraussetzungen ausgehen. Die Varianten A bis E erfassen das Objekt mit Aufnahmen nur von vorne, die Varianten F und G bestehen aus Aufnahmen von oben. In beiden Fällen kommt man mit herkömmlichen ebenen Signalen aus. Die restlichen Varianten I bis L erfassen das Objekt mit Aufnahmen rundherum. Dazu sind spezielle Signale notwendig. Die Varianten A, B, C, I und J bestehen nur aus Aufnahmen, die vom Boden aus angefertigt werden ( $i = 1.7 \text{ m}$ ). Bei den restlichen Varianten muß eine Hebevorrichtung (Leiter, Hubkanzel, Kran, etc.) vorhanden sein. Bei den Varianten G, H und L werden zwei verschiedene Objektivtypen eingesetzt. Die übrigen Varianten bestehen nur aus Weitwinkelaufnahmen.

### 7.3 Das Objekt ENGE GASSE

Bei der Testanordnung "Enge Gasse" handelt es sich um ein Objekt in der Form einer engen Gasse. Das Objekt ist dabei durch zwei ebene, langgestreckte, vertikale Flächen repräsentiert. Die beiden Flächen haben ein Verhältnis von Länge zu Höhe zu Abstand wie  $35 : 5 : 1$ . Das Testobjekt "Enge Gasse" ist 100 Meter lang und 15 Meter hoch. Die Breite der Gasse beträgt in diesem Fall nur drei Meter. Das Objekt ist wiederum durch ein  $5 \times 3$  Meter dichtes Punktraster gegeben.

Mit diesem Objekt werden Aufnahmeanordnungen simuliert, wie sie zum Beispiel sehr häufig bei Fassadenvermessungen in Altstädten auftreten (siehe Kapitel 9.2). Es handelt sich dabei um eine sehr aktuelle Aufgabe der Bündelphotogrammetrie, da unter solchen engen räumlichen Gegebenheiten - wie sie in Altstädten üblich sind - andere geodätische oder photogrammetrische Meßverfahren kaum wirtschaftlich einsetzbar sind. Geodätisches Vorwärtsschneiden ist nur äußerst zeitaufwendig und mühsam mit Zenitokularen möglich. Die Bündelphotogrammetrie hingegen arbeitet in diesen Fällen mit Zenitaufnahmen oder sehr stark geneigten Photos. Diese lassen sich zu Hause am Auswertegerät bequem ausmessen.

#### 7.3.1 Paßelementeanordnung

Die verschiedenen Aufnahmevarianten werden jeweils mit sechs unterschiedlichen Paßpunktanordnungen gerechnet. Dabei wird jeweils ein "Paßpunktring" mit vier Vollpaßpunkten (je 1 VPP an der linken und an der rechten Wand unten und je 1 VPP an der linken und rechten Wand oben) in unterschiedlichen Abständen voneinander angeordnet. Die Auswirkung der verschiedenen Paßpunktanordnungen auf den Paßelementefaktor  $p$  kann bei dieser Objektform dem Diagramm in Abbildung 3-1 entnommen werden. Werden zum Beispiel nur jeweils vier Paßpunkte am Anfang und am Ende der Gasse gemessen, so ergibt sich der  $p$ -Faktor mit 2.3. Mißt man hingegen auch in der Mitte der "Engen Gasse" einen "Paßpunktring", so reduziert sich der  $p$ -Faktor auf 1.1.

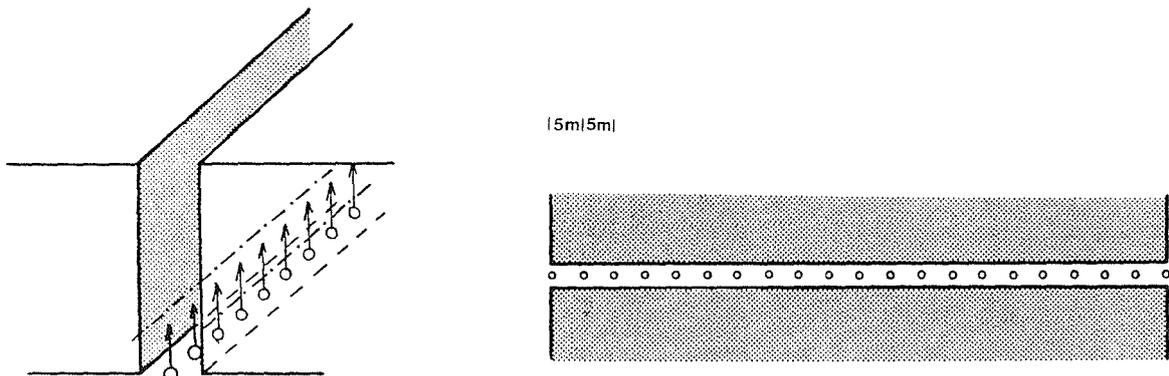
#### 7.3.2 Bündelanordnung

Insgesamt werden vier verschiedene Aufnahmevarianten simuliert. Als Aufnahmekamera kommt wegen der räumlichen Beengtheit praktisch nur eine starke

Überweitwinkelkamera in Frage. In dieser Untersuchung wird als Aufnahmekamera die Wild P31-ÜWW angenommen.

#### ENGE GASSE - Version A

Die Aufnahmeversion A besteht aus insgesamt 21 Zenitaufnahmen. Die Basislänge zwischen diesen Zenitaufnahmen beträgt in diesem Fall fünf Meter.



*Abb. 7-19: Aufnahmeanordnung "Enge Gasse" - Version A in einer axonometrischen Darstellung und in einer Grundrißdarstellung*

Die Aufnahmeorte liegen in der Gassenmitte, und zwar in der Höhe der untersten Punktreihe. Es wird dabei angenommen, daß die Kamera ohne Stativ direkt auf den Straßenboden gelegt wird. Trotzdem werden die Fassadenteile unterhalb der strichpunktiierten Linie in Abb. 7-19 photogrammetrisch nicht erfaßt. Dieser Objektteil kann im allgemeinen leicht durch eine geodätische Zusatzmessung aufgenommen werden. Oberhalb dieser strichpunktiierten Linie wird jeder Objektpunkt von mindestens drei Strahlen aus verschiedenen Bildern bestimmt. Die Anzahl der Strahlen pro Objektpunkt nimmt mit der Höhe ständig zu. Jeder Objektpunkt der obersten Punktreihe wird dabei sogar in sieben Bildern abgebildet.

#### ENGE GASSE - Version B

Die Aufnahmevariante B ist eine Erweiterung der Version A. Es werden zusätzlich zu den Zenitaufnahmen Schrägaufnahmen angefertigt. Diese Schrägaufnahmen haben einen Abstand von 20 Metern. Die Aufnahmerichtung dieser gekippten Photos verläuft in Gassenrichtung; sie sind so stark geneigt (50°), daß das Objekt bis zur untersten Punktreihe erfaßt ist.

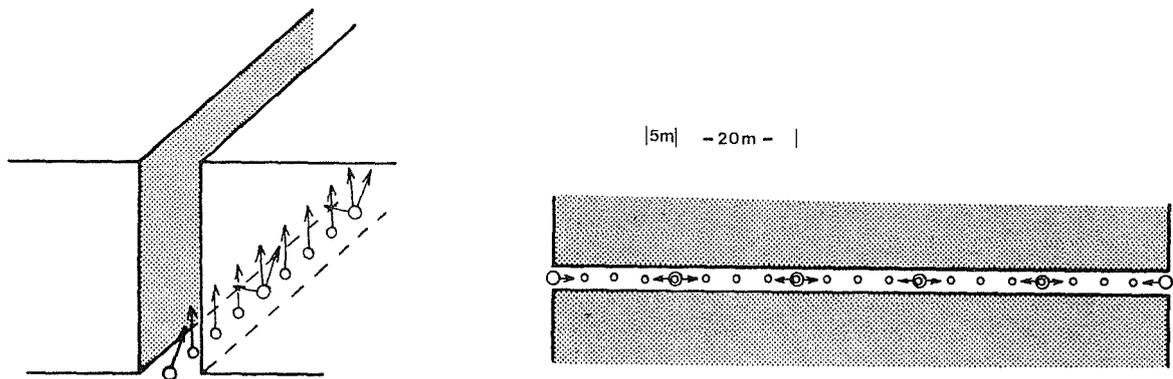


Abb. 7-20: Aufnahmeanordnung "Enge Gasse" - Version B in einer axonometrischen Darstellung und in einer Grundrißdarstellung

In dieser Versuchsanordnung - wie bei allen folgenden auch - werden bei den Schrägaufnahmen nur jene Bildpunkte als Beobachtungen in den einzelnen Photos eingeführt, deren Entfernung vom entsprechenden Projektionszentrum nicht größer als 30 Meter sind. Beim praktischen Arbeiten hat es sich nämlich herausgestellt, daß Punkte in größerer Entfernung in den Photos nicht mehr oder nur mehr sehr schlecht eingestellt werden können. Durch das Wegfallen dieser Beobachtungen in den Schrägaufnahmen ist gewährleistet, daß die Geometrie der Bündelanordnung bei der Simulation etwa der beim praktischen Arbeiten entspricht.

Um auf diese Art und Weise das Objekt vollständig zu erfassen, benötigt man 10 Schrägaufnahmen und 19 Zenitaufnahmen. Die unterste Punktreihe wird dabei von mindestens zwei Bildstrahlen bestimmt. Punkte der obersten Reihe werden bei dieser Bündelanordnung sogar von 10 Bildstrahlen getroffen.

#### ENGE GASSE - Version C

Bei der Aufnahmevariante C wird die Variante B so reduziert, daß nur jede zweite Zenitaufnahme verwendet wird. Die Schrägaufnahmen in Gassenrichtung bleiben erhalten. Somit ergeben sich bei dieser Version 10 Zenitaufnahmen mit einem Abstand von jeweils 10 m und 10 Schrägaufnahmen mit einem Abstand von 20 m.

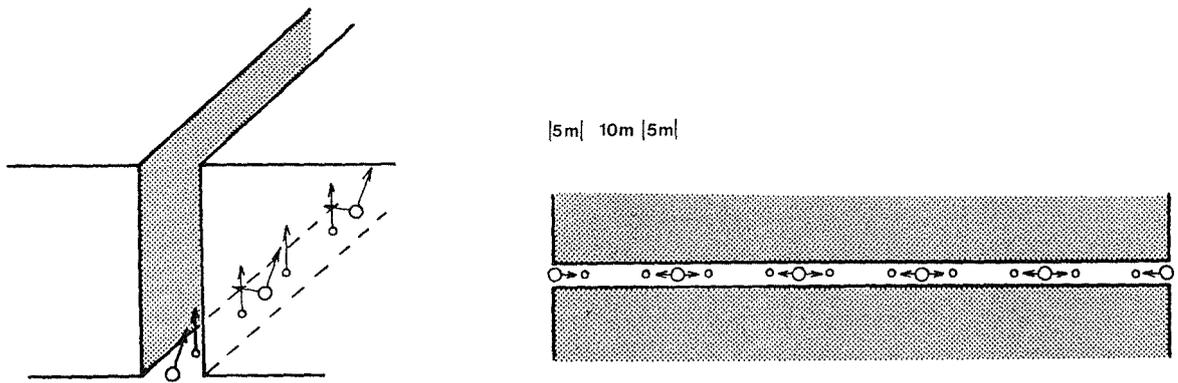


Abb. 7-21: Aufnahmeanordnung "Enge Gasse" - Version C in einer axonometrischen Darstellung und in einer Grundrißdarstellung

Die Anzahl der Bestimmungsstrahlen pro Objektpunkt variiert zwischen zwei und sechs Strahlen - abhängig von der Höhenlage des Punktes.

#### ENGE GASSE - Version D

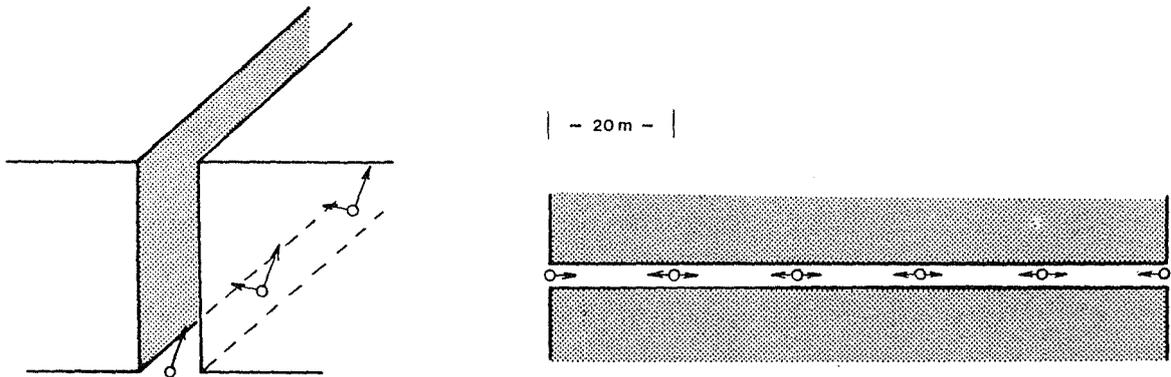


Abb. 7-22: Aufnahmeanordnung "Enge Gasse" - Version D in einer axonometrischen Darstellung und in einer Grundrißdarstellung

Aufnahmevariante D verzichtet gänzlich auf die Zenitaufnahmen. Man fertigt 10 Schrägaufnahmen mit einer Basis von 20 m an. Es handelt sich dabei um eine Variante, die vor allem dann interessant wird, wenn wirtschaftliche Überlegungen eine große Rolle spielen.

#### 7.3.3 Schlußfolgerungen aus der Bündelanordnung ENGE GASSE

Für welche Bündelanordnung man sich bei einem praktischen Projekt in der Form einer engen Gasse schlußendlich entscheidet, hängt von vielen Faktoren ab. In der Tab. 7-3 sind die wichtigsten Kenndaten der verschiedenen Aufnahmevarianten als Entscheidungshilfe zusammengestellt.

Aufnahmeversion	A	B	C	D
m (mittl. Bildmaßstabszahl)	244	311	336	400
o (Schnittqualitätsfaktor)	0.9	0.9	1.0	1.0
v (Verformungsfaktor)	2.5	2.4	3.1	4.5
IZ (Innere Zuverlässigkeit)	5.3	4.7	5.3	5.0
Anzahl der Aufnahmen	21	29	20	10
ZA (= Zenitaufnahmen)	21	19	10	/
SA (= Schrägaufnahmen)	/	10	10	10
Anzahl der beob. Bildpunkte	1718	2868	2080	1248
AE (= Arbeitseinheiten)	58	84	61	36

Tab. 7-3: Kenndaten der verschiedenen Aufnahmeversionen "Enge Gasse"

Vergleicht man die Kennzahlen in Tab. 7-3, so wird man feststellen, daß die Varianten A und B am besten abschneiden. Bei der Variante A (21 Zenitaufnahmen) ist allerdings zu beachten, daß die unteren Punktreihen photographisch nicht erfaßt sind. Die Aufnahmevariante A ist daher nur bedingt mit den restlichen Versionen vergleichbar. Die Reduzierung der Anzahl der Zenitaufnahmen von Version B (19 Zenitaufnahmen) auf die Version C (10 Zenitaufnahmen) bringt einen Genauigkeitsverlust von etwa 20% mit sich (abhängig von der paßpunktfreien Strecke am Objekt). Gleichzeitig verschlechtert sich natürlich auch die innere Zuverlässigkeit auf den noch recht guten Wert von 5.3 (Version B: 4.7). Die innere Zuverlässigkeit erreicht bei allen vier vorgestellten Aufnahmevarianten recht brauchbare Werte.

Von den Genauigkeitsfaktoren her beurteilt, schneidet Variante D (10 Schrägaufnahmen, keine Zenitaufnahmen) am schlechtesten ab. Es ist dies aber auch die wirtschaftlichste Variante.

#### 7.4 Das Objekt QUADER

Als Standardobjekt "Quader" sei ein liegender undurchsichtiger Körper mit den Verhältnissen Länge : Breite : Höhe = 1 : 2 : 1 definiert. Das Standardobjekt "Quader" ist eine in der Praxis sehr häufig auftretende Objektform. Mit diesem Objekt sollen Aufnahmeanordnungen simuliert werden, bei denen Punkte an allen vier Seitenflächen eines liegenden Quaders bündelphotogrammetrisch bestimmt werden. Diese sogenannten "Rundumblöcke" treten sehr häufig in der Architekturvermessung (rund um ein Haus; rund um einen Häuserblock), aber auch bei der Vermessung von Maschinenteilen auf.

Die angeführten Aufnahmevarianten sind wiederum maßstabslos. Die ermittelten Genauigkeits-, Zuverlässigkeits- und Aufwandskennzahlen gelten somit sowohl für sehr kleine "Rundumblöcke" - wie sie zum Beispiel bei der Formkontrolle von kleinen quaderförmigen Maschinenbauteilen auftreten - als auch für räumlich weit ausgedehnte "Rundumblöcke" (wie z.B. in der Architekturvermessung - ein Häuserblock).

Als Testobjekt wird ein Quader mit einer Länge von 30 Metern und einer Höhe und Breite von 15 Metern angenommen. Das Testobjekt ist durch ein 5 x 5 Meter dichtes Punktraster gegeben und besteht insgesamt aus 72 Rasterpunkten.

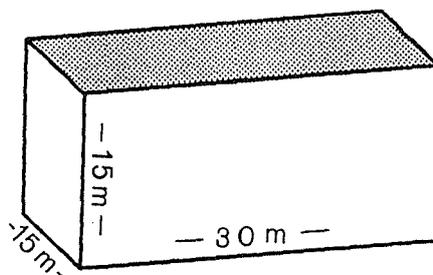


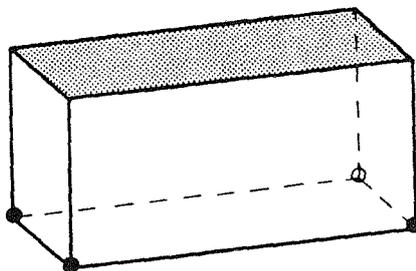
Abb. 7-23: Das Testobjekt "Quader"

Bei der herkömmlichen "Stereophotogrammetrie" würde man die jeweiligen Seitenflächen mehr oder weniger unabhängig durch ein oder mehrere Stereomodelle erfassen. Bei einer guten bündelphotogrammetrischen Aufnahme eines solchen "Rundumblocks" dürfen natürlich verknüpfende Schrägaufnahmen an den Ecken nicht fehlen. Insgesamt werden 12 verschiedene Bündelanordnungen durchgerechnet (Versionen A - J).

### 7.4.1 Paßelementeanordnung

Die einzelnen Aufnahmevarianten werden mit neun verschiedenen Paßelementeanordnungen durchgerechnet. Als Paßelemente kommen dabei sowohl geodätisch bestimmte Vollpaßpunkte als auch am Objekt direkt gemessene Strecken vor. Die Vollpaßpunkte werden mit einer Genauigkeit von  $\pm 5$  mm in den Ausgleich eingeführt. Die Genauigkeit der gemessenen Paßstrecken beträgt ebenfalls  $\pm 5$  mm.

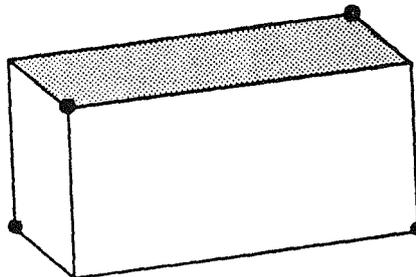
#### Variante 1:



$$p = 1.2$$

4 Vollpaßpunkte in den unteren Ecken des Quaders

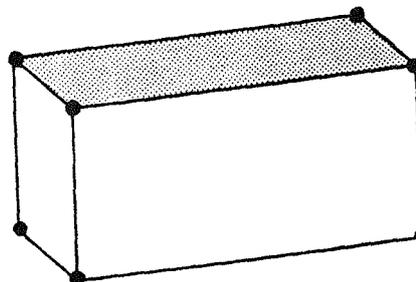
#### Variante 2:



$$p = 1.0$$

4 Vollpaßpunkte (abwechselnd oben und unten in den Ecken)

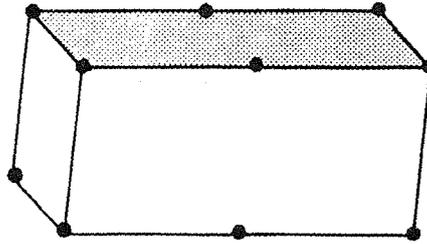
#### Variante 3:



$$p = 0.6$$

8 Vollpaßpunkte (in den Ecken des Quaders)

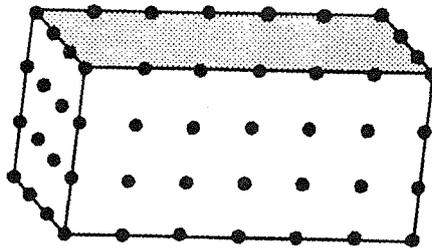
Variante 4:



$P = 0.4$

12 Vollpaßpunkte (8VPP in den Ecken, und zusätzlich jeweils in der Mitte der Längsseiten des Quaders je 1 VPP oben u. unten)

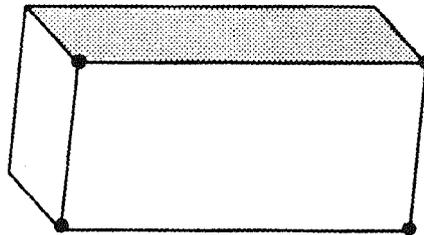
Variante 5:



$P = 0$

72 Vollpaßpunkte (alle Objektpunkte sind Paßpunkte)

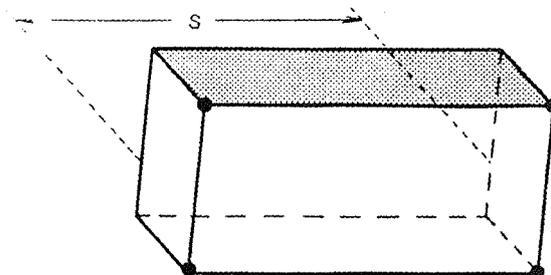
Variante 6:



$P = 1.9$

4 Vollpaßpunkte (nur an der vorderen Längsseite des Quaders)

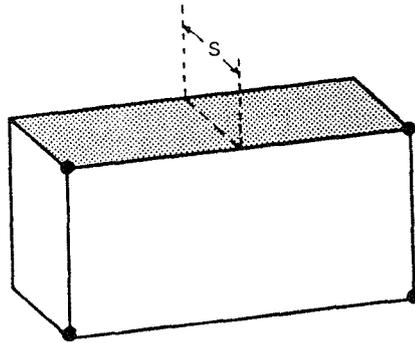
Variante 7:



$P = 1.8$

4 Vollpaßpunkte (wie in Variante 6)  
+ 1 Paßstrecke (an der hinteren paßpunktfreien Längsseite)

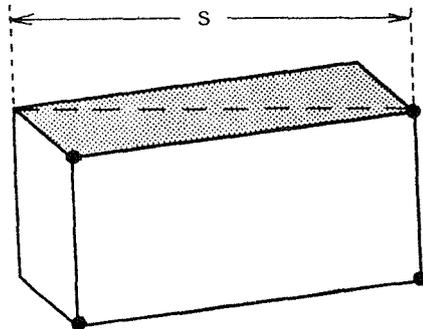
Variante 8:



$$p = 1.8$$

4 Vollpaßpunkte (wie in Variante 6)  
+ 1 Paßstrecke

Variante 9:



$$p = 1.9$$

4 Vollpaßpunkte (wie in Variante 6)  
+ 1 Paßstrecke (Diagonale des Deckels)

Bei den Varianten 1 bis 6 werden nur Vollpaßpunkte verwendet, bei Variante 6 vier Vollpaßpunkte, die nur an der vorderen Ebene des Quaders angeordnet sind. Es handelt sich dabei um eine schlechte Verteilung der Paßpunkte, da der umschließende Paßpunktpolyeder den Objektbereich in allen drei Richtungen des Raumes umschließen soll. In der Genauigkeitsformel (3-5) wird dieser Einfluß durch den Paßelementefaktor  $p$  berücksichtigt. Der Paßelementefaktor erreicht bei der Variante 6 daher auch den recht schlechten Wert von 1.9. Die Varianten 7, 8 und 9 sollen klären, ob durch das zusätzliche Messen einer Paßstrecke der Paßelementefaktor verkleinert, und damit die Genauigkeit der Punktbestimmung gesteigert werden kann. Wie aus dem angegebenen  $p$ -Faktor ersichtlich ist, verbessert sich durch die zusätzlich gemessene Paßstrecke die durchschnittliche räumliche Punktlage nur ganz geringfügig.

### 7.4.2 Bündelanordnung

#### QUADER - Version A

Bei der Aufnahmevariante A werden vier symmetrische Schrägaufnahmen mit einer Weitwinkelkammer angefertigt (siehe Abb. 7-24). Die Aufnahmen sind dabei auf die Ecken des Objekts und leicht nach oben (Zenitdistanz =  $94^{\circ}$ ) gerichtet.

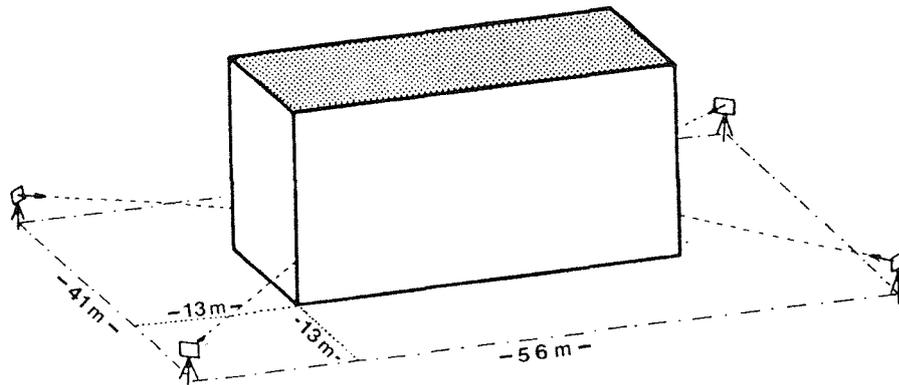


Abb. 7-24: Aufnahmeanordnung "Quader" - Version A

Die Projektionszentren befinden sich dabei in normaler Arbeitshöhe mit einem Stativ (1.7 Meter über der untersten Punktreihe). Die Bildmaßstabszahl variiert zwischen 191 und 409 und ergibt einen Mittelwert von 285. Jeder Objektpunkt ist dabei aber in nur zwei Photos abgebildet. Die wünschenswerte Kontrolle der Bildkoordinatenbeobachtungen ist damit nicht gegeben ( $IZ = \infty$ ).

Die Aufnahmevariante A stellt - den Aufwand betreffend - eine Minimalversion dar. Es werden zwar brauchbare Genauigkeitswerte erreicht, wegen der fehlenden Kontrolle der Bildkoordinatenmessung handelt es sich aber um eine "kritische" Aufnahmeanordnung.

#### QUADER - Version B

Die Aufnahmevariante B ist eine Erweiterung der soeben besprochenen Version A. Es wird zu jeder der vier Schrägaufnahmen der Variante A eine weitere Schrägaufnahme mit einer vertikalen Basis angefertigt. Die Projektionszentren dieser zusätzlichen Weitwinkelaufnahmen befinden sich in 15 Meter Höhe, also in der Höhe der obersten Punktreihe des Objekts. Die vertikale Basis ergibt sich daher mit 13.3 Meter. Um diese Aufnahmeorte erreichen zu können, braucht

man entweder eine Hubkanzel, Kran, Leiter, usw. oder man photographiert von etwa gleich hohen Objekten (z.B. umliegende Häuser) auf das zu vermessende Objekt herab.

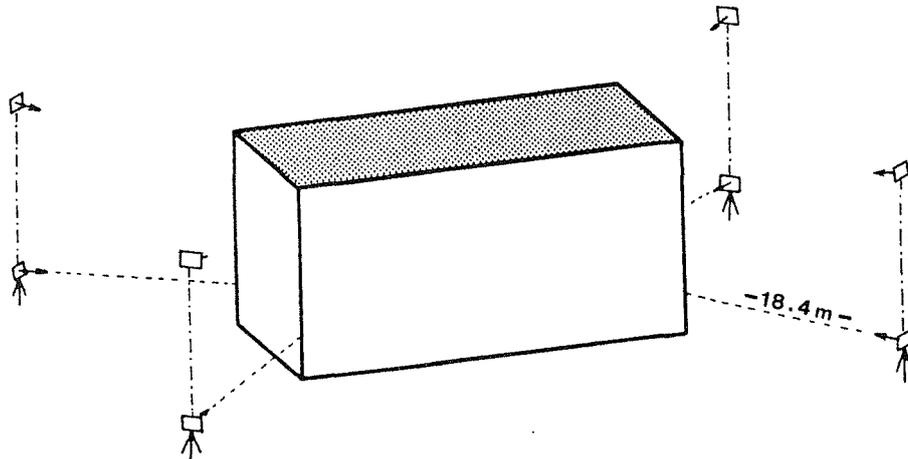


Abb. 7-25: Aufnahmeanordnung "Quader" - Version B

Die zusätzlichen vier Aufnahmen bringen eine Genauigkeitssteigerung der Punktbestimmung von durchschnittlich 10% (abhängig von der PaBelementeverteilung). Der Mittelwert für die innere Zuverlässigkeit erreicht den recht guten Wert von 5.2.

#### QUADER - Version C

Die Aufnahmevariante C stellt eine Abänderung der soeben besprochenen Version B dar. Es werden wieder acht Schrägaufnahmen mit einer Weitwinkelkamera angefertigt, vier davon vom Boden aus (siehe Version A). Die vier weiteren Photos werden wieder mit einer vertikalen Basis, aber in diesem Fall aus einer noch größeren Höhe aufgenommen. Man photographiert 8 Meter über der obersten Punktreihe aus 23 Meter Höhe von oben herab auf den Quader mit einer Zenitdistanz von etwa 125°.

Die Basisvergrößerung bringt nur eine geringfügige Verbesserung der Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung. Es verbessert sich zwar der Schnittqualitätsfaktor  $\sigma$  von 1.1 (Version B) auf 1.0. Auch der Verformungsfaktor  $\nu$  verbessert sich geringfügig von 0.9 (Version B) auf 0.8. Gleichzeitig verschlechtert sich aber die mittlere Bildmaßstabszahl  $m$  von 286 (Version B) auf 315. Der Wert für die innere Zuverlässigkeit verbessert sich nicht nennenswert von 5.2 (Version B) auf 5.1.

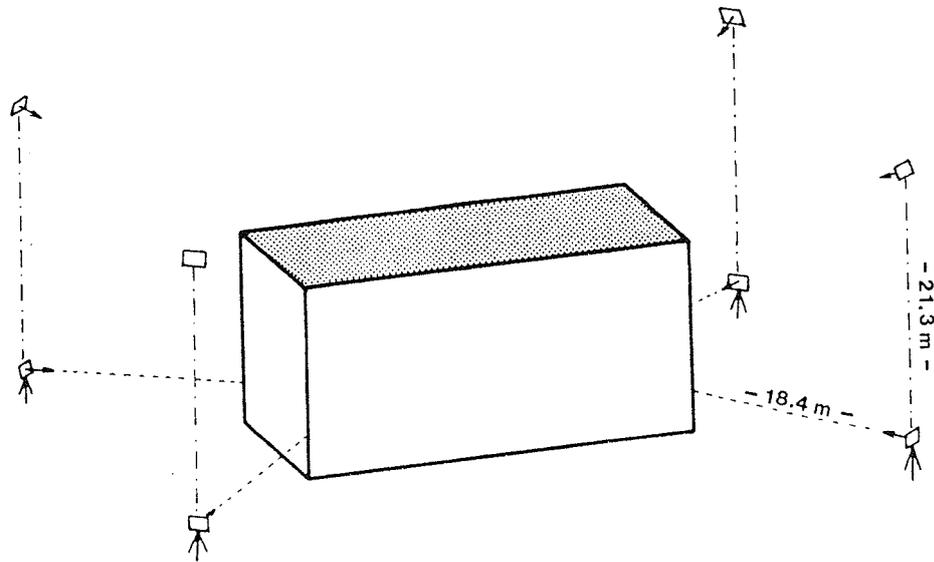


Abb. 7-26: Aufnahmeanordnung "Quader" - Version C

QUADER - Version D

Die Aufnahmevariante D stellt eine Kombination der bisher besprochenen Versionen dar. Sie besteht aus 12 Weitwinkelaufnahmen. Vier Aufnahmen werden dabei wieder vom Boden aus angefertigt (siehe Version A). Jeweils zwei weitere Aufnahmen werden senkrecht darüber mit einer vertikalen Basis von 13.3 Meter (siehe Version B) und 21.3 Meter (siehe Version C) photographiert.

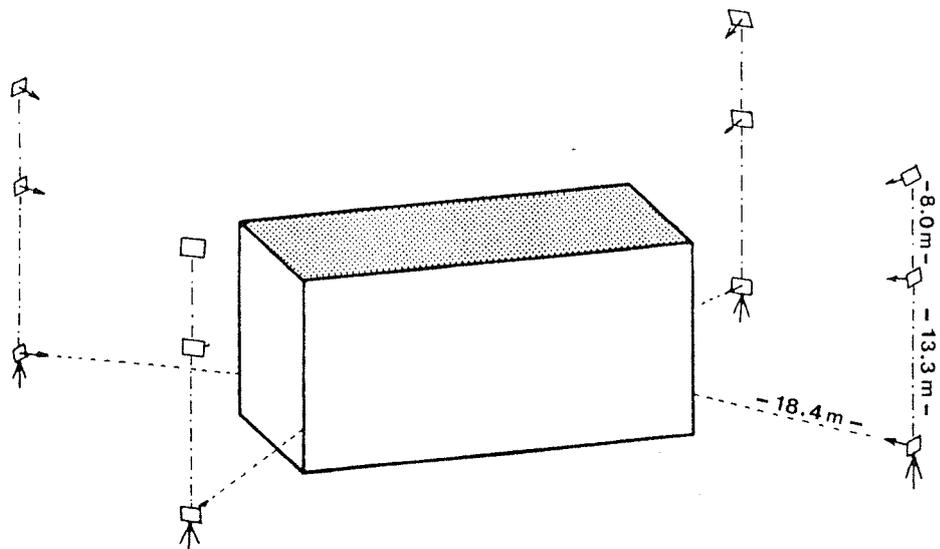


Abb. 7-27: Aufnahmeanordnung "Quader" - Version D

Vergleicht man diese Variante mit der zuvor besprochenen, so stellt man eine geringfügige Genauigkeitssteigerung und eine kleine Verbesserung der inneren Zuverlässigkeit auf den sehr guten Wert von 4.7 (Version C: 5.1) fest. Gleichzeitig verschlechtert sich natürlich die Aufwandskennzahl dieser Variante. Die Aufnahmevariante D wird wohl nur dann zur Anwendung gelangen, wenn man großen Wert auf höchste Zuverlässigkeit der Ergebnisse legt und wirtschaftliche Überlegungen eher in den Hintergrund treten.

#### QUADER - Version E

Die bisher besprochenen Aufnahmevarianten bestehen nur aus Schrägaufnahmen. In sehr vielen praktischen Fällen ist es aber wünschenswert, auch Frontalaufnahmen vom Objekt anzufertigen - um zum Beispiel in Vergrößerungen dieser Aufnahmen das Punktnummernschema einzutragen, oder um in entsprechenden Vergrößerungen eine maßstäbliche Dokumentation der einzelnen Ansichten zu haben. Deshalb bestehen die folgenden Aufnahmevarianten aus einer Kombination von Schrägaufnahmen und Frontalaufnahmen.

Die Aufnahmevariante E verlangt insgesamt acht Weitwinkelaufnahmen. Alle acht Aufnahmen werden dabei vom Boden aus mit Stativ ( $i = 1.7 \text{ m}$ ) photographiert.

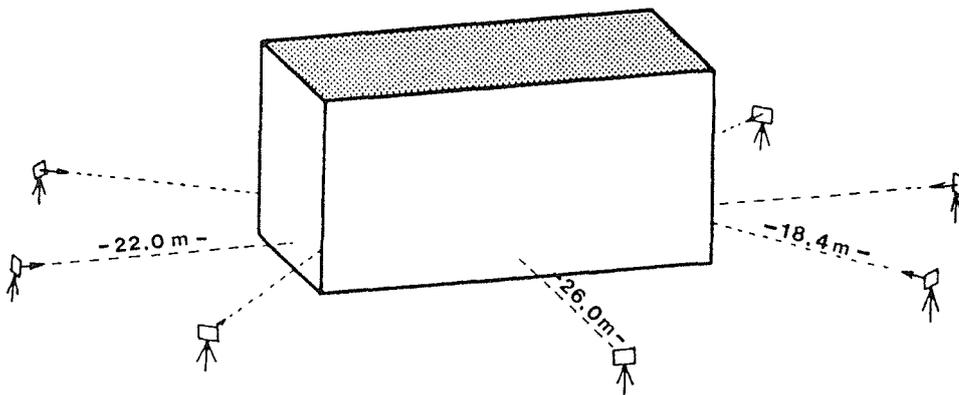


Abb. 7-28: Aufnahmeanordnung "Quader" - Version E

Es werden wieder vier Schrägaufnahmen (wie in Version A beschrieben) belichtet. Zusätzlich werden jeweils aus der Mitte auf die vier Seitenflächen des Quaders Frontalaufnahmen angefertigt. Die beiden Längsseiten werden dabei im Querformat aus einer Aufnahmeentfernung von 26 Metern erfaßt. Von den beiden schmalen Seitenflächen des Quaders werden Hochformataufnahmen aus

einer Entfernung von 22 Metern angefertigt. Die Aufnahme­richtung dieser Frontalaufnahmen ist natürlich horizontal, die der Schrägaufnahmen ist wieder leicht nach oben gekippt (Zenitdistanz = 94°). Jeder Objektpunkt wird dabei in mindestens drei Photos abgebildet. Es ergeben sich recht gute Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte, die etwa den bisher besprochenen Versionen entsprechen.

#### QUADER - Version F

Die Aufnahmevariante F variiert Version E hinsichtlich der vier Schrägaufnahmen, die nun aus einer Höhe von 15 Metern (= oberste Punktreihe des Objekts) photographiert werden. Die vier Frontalaufnahmen werden wieder vom Boden aus angefertigt (siehe Version E).

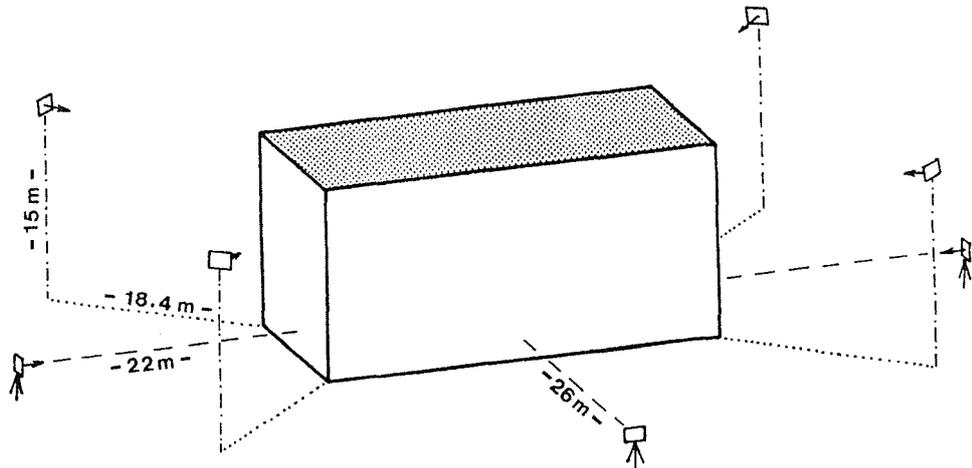


Abb. 7-29: Aufnahmeanordnung "Quader" - Version F

Es ergibt sich eine mittlere Bildmaßstabszahl von 273. Genauigkeit und Zuverlässigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung werden nicht wesentlich gesteigert.

#### QUADER - Version G

Die Aufnahmevariante G stellt eine weitere Abänderung der Version E dar. Die Projektionszentren der Schrägaufnahmen wandern in diesem Fall über das Objekt hinaus; die Aufnahmen werden aus einer Höhe von 23 Metern angefertigt (Zenitdistanz = 125°). Jeder Objektpunkt ist dabei wieder in mindestens drei Aufnahmen abgebildet.

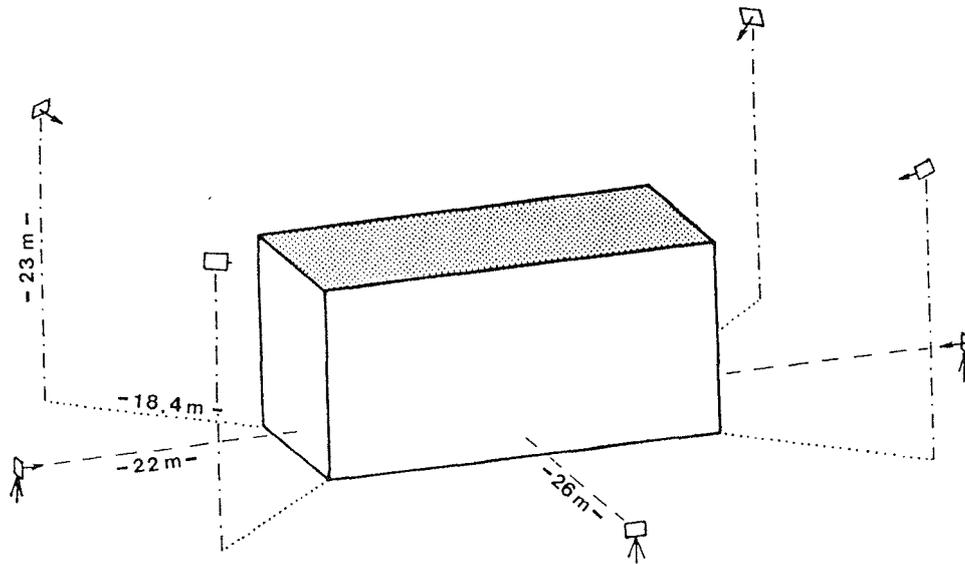


Abb. 7-30: Aufnahmeanordnung "Quader" - Version G

Auch diese Aufnahmevariante bringt keine weitere Steigerung der Auswertegenauigkeit gegenüber der Grundvariante E. Die geringfügige Steigerung der inneren Zuverlässigkeit auf den sehr guten Wert von 5.7 (Version E: 6.1) muß mit einem größeren Aufwand, der aus der Erreichbarkeit der Aufnahmeorte der Schrägaufnahmen resultiert, "bezahlt" werden. Das ist eine Maßnahme, die nur in Ausnahmefällen von Wichtigkeit ist, es sei denn, es sprechen andere Gründe dafür, etwa Sichthindernisse (Bewuchs, Autos, usw.) bei den Aufnahmen vom Boden aus.

#### QUADER - Version H

Die Aufnahmevariante H stellt eine Kombination der Versionen E und G dar. Sie besteht aus insgesamt 12 Weitwinkelaufnahmen. Es werden wieder vier Frontalaufnahmen vom Boden aus ( $i = 1.7 \text{ m}$ ) angefertigt und zusätzlich acht symmetrische Schrägaufnahmen zu den Ecken des Quaders hin. Vier dieser Schrägaufnahmen werden ebenfalls vom Boden aus photographiert, die restlichen vier Schrägaufnahmen macht man aus einer Höhe von 23 Metern auf das Objekt herunter (Zenitdistanz =  $125^\circ$ ). Jeder Objektpunkt ist dabei in mindestens fünf Photos abgebildet. Vergleicht man diese aufwendige Bündelanordnung mit der Grundversion E (acht Aufnahmen vom Boden aus), so stellt man eine ganz geringfügige Genauigkeitssteigerung und eine leichte Verbesserung der inneren Zuverlässigkeit fest.

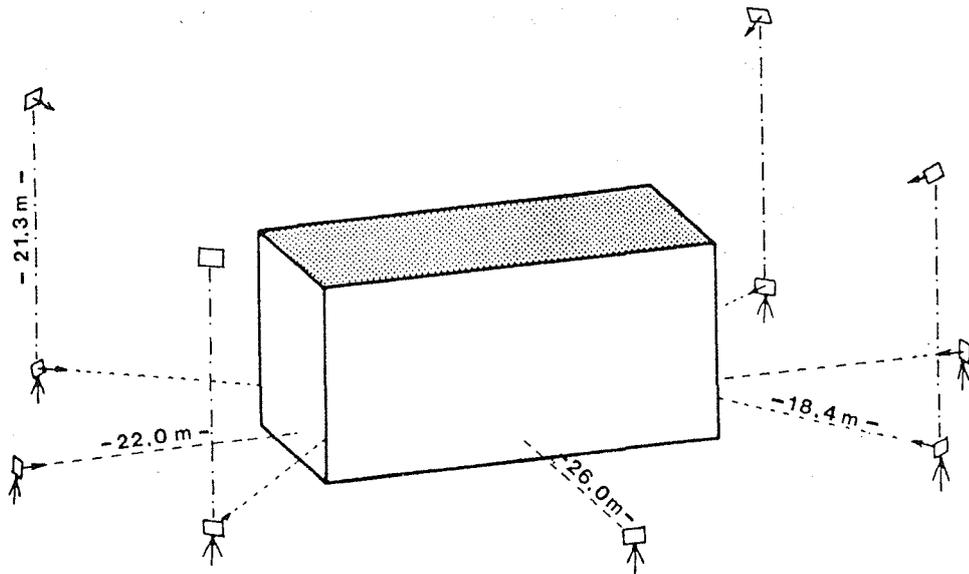


Abb. 7-31: Aufnahmeanordnung "Quader" - Version H

QUADER - Version I

Bei der Aufnahmevariante I verzichtet man auf die Schrägaufnahmen. Es werden zwölf Frontalaufnahmen mit horizontaler Aufnahmerichtung angefertigt. Es handelt sich dabei wieder um Weitwinkelaufnahmen.

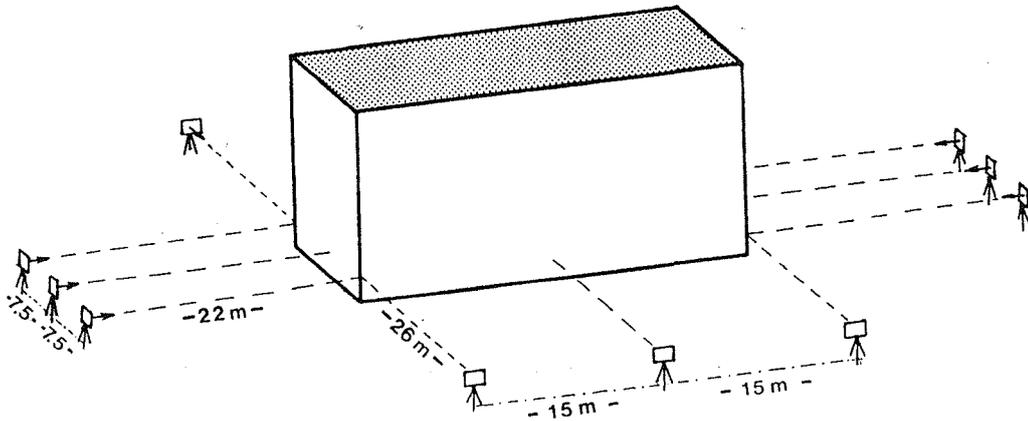


Abb. 7-32: Aufnahmeanordnung "Quader" - Version I

Die beiden Längsseiten des liegenden Quaders sind dabei nur stereo gedeckt. Die Objektpunkte der beiden kleinen Seitenflächen sind aber in mindestens drei Photos abgebildet. Es ist dies der klassische Fall der "Stereo-photogrammetrie" und soll nur zum Vergleich dienen. Es soll damit ver-

deutlich werden, welcher großen Einfluß die Schrägaufnahmen vor allem auf die Genauigkeit der Bündelphotogrammetrischen Punktbestimmung haben. Trotz relativ schlechter Aufwandskennzahlen, ergeben sich auch wesentlich schlechtere Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte. Die Aufnahmevariante I sollte deshalb bei praktischen Anwendungen vermieden oder zumindest mit Schrägaufnahmen ergänzt werden.

#### QUADER - Version J

Bei der Aufnahmevariante J werden die Aufnahmen aller bisherigen Versionen zusammengefaßt. Das ergibt 24 Weitwinkelaufnahmen (siehe Abb. 7-33).

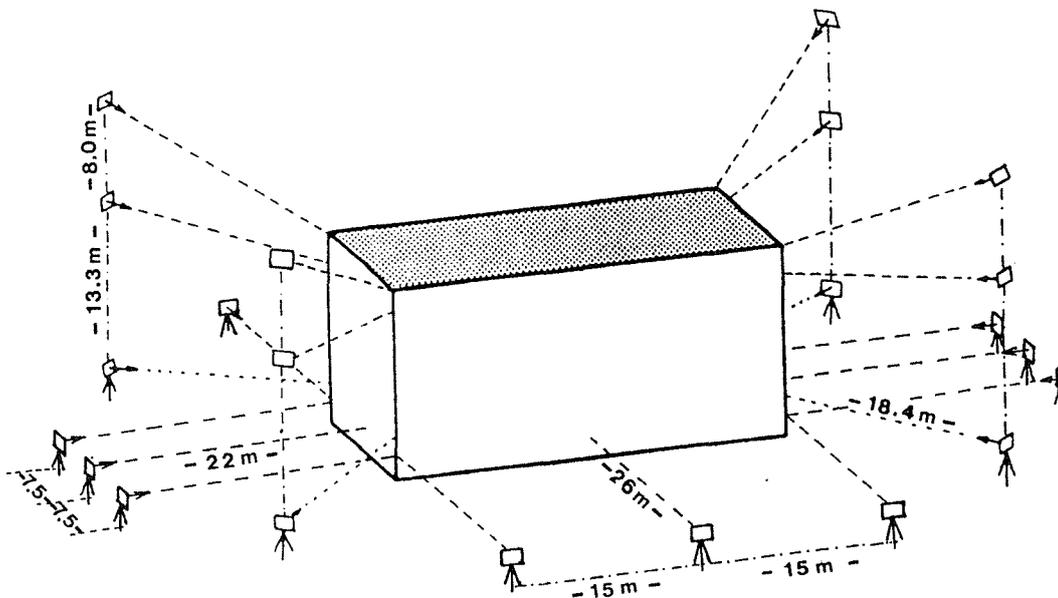


Abb. 7-33: Aufnahmeanordnung "Quader" - Version J

Es soll damit gezeigt werden, daß trotz wesentlicher Erhöhung des Aufwandes (24 Photos; 732 Bildpunktbeobachtungen) keine wesentliche Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit erreicht wird. Eine gute überbestimmte Aufnahmegeometrie liefert relativ schnell recht gute Werte für die Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Mit einer weiteren Aufwandssteigerung werden nur geringfügig bessere Werte erreicht. Der Aufwand steht also in keiner vertretbaren Relation zum Ergebnis.

7.4.3 Schlußfolgerung aus Testanordnung QUADER

In der Tab. 7-4 sind die wichtigsten Kenndaten der einzelnen Bündelanordnungen zusammengestellt.

Variante	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
m	285	286	315	309	271	273	317	306	244	284
o	1.5	1.1	1.0	0.8	1.1	1.1	1.0	0.8	2.2	0.6
v	1.3	0.9	0.8	0.6	1.0	0.9	0.8	0.6	2.7	0.5
IZ	∞	5.2	5.0	4.7	6.1	6.1	5.7	4.9	∞	4.7
Σ Pho	4	8	8	12	8	8	8	12	12	24
Σ n <sub>0</sub>	160	320	372	532	248	248	300	460	200	732
AE	13	21	22	31	20	21	21	29	25	51

- m ..... mittlere Bildmaßstabszahl (3.2.2)
- o ..... Schnittqualitätsfaktor (3.2.1)
- v ..... Verformungsfaktor (3.2.3)
- IZ ..... Mittelwert der inneren Zuverlässigkeit  
für die beobachteten Bildkoordinaten (4.1.1)
- Σ n<sub>0</sub> ... Anzahl der beobachteten Bildpunkte
- AE ..... Arbeitseinheiten (7.1.3)

Tab. 7-4: Kenndaten der verschiedenen Aufnahmevarianten "Quader"

Von der Genauigkeit und Zuverlässigkeit her beurteilt, schneidet die Version J am besten ab. Bei dieser Variante ist aber die Aufwandskennzahl sehr hoch. Nur geringfügig schlechtere Werte ergeben die Versionen B, C, D, E, F, G und H, etwas schlechter in der Genauigkeit die Version A und noch einmal eine Größenordnung darunter die Version I. Bei diesen beiden letztgenannten Versionen erreicht vor allem auch die innere Zuverlässigkeit den Wert ∞, was eine nicht durchgreifend kontrollierte Bildkoordinatenmessung bedeutet.

Allgemein kann gesagt werden, daß eine gute überbestimmte Aufnahmegeometrie recht gute Werte für die Genauigkeit und Zuverlässigkeit liefert. Mit einer weiteren Aufwandssteigerung werden nur recht mühsam und nur geringfügig bessere Werte erreicht (siehe Version J). Falls eine weitere Genauigkeitssteigerung gefragt ist, ist deshalb bei der Bildmaßstabszahl anzusetzen. Das heißt, die Projektionszentren (Aufnahmeorte) müßten näher ans Objekt rücken. Das bewirkt natürlich eine Änderung der ganzen Aufnahmegeometrie und eine wesentliche Erhöhung des Aufwandes.

### 7.5 Das Objekt INNENRAUM

Beim Standardobjekt "Innenraum" handelt es sich um die Innenfläche eines Quaders ohne Deckel und Boden. Die Seitenlängen des Quaders verhalten sich wie Länge : Breite : Höhe = 1 : 1 : 1. Das Testobjekt hat eine Ausdehnung von 15 x 15 x 15 Metern. Das Objekt ist durch ein 5 x 5 Meter Raster repräsentiert und besteht aus 48 Punkten.

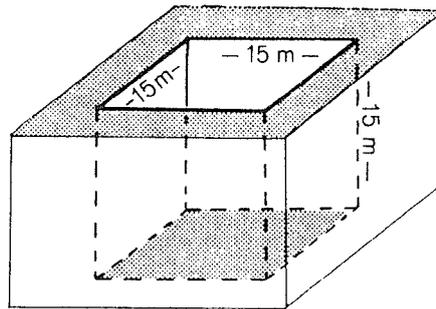


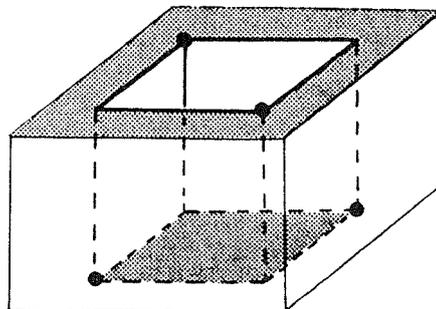
Abb. 7-34: Das Testobjekt "Innenraum"

Es sollen damit Aufnahmeanordnungen simuliert werden, wie sie zum Beispiel in der Architekturvermessung (Innenhof, Hallen, usw.) bzw. im Maschinenbau häufig auftreten.

#### 7.5.1 Paßelementeanordnung

Jede Aufnahmeversion wird mit fünf verschiedenen Paßpunktvarianten durchgerechnet. Bei den Paßelementen handelt es sich wieder um Vollpaßpunkte.

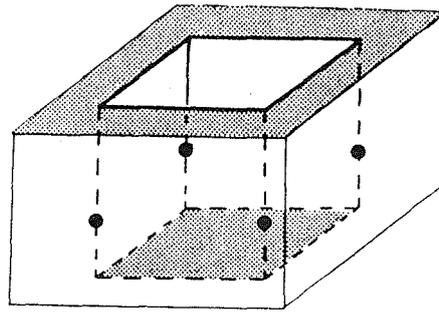
##### Variante 1:



p = 1.1

4 Vollpaßpunkte (abwechselnd oben und unten in den Ecken)

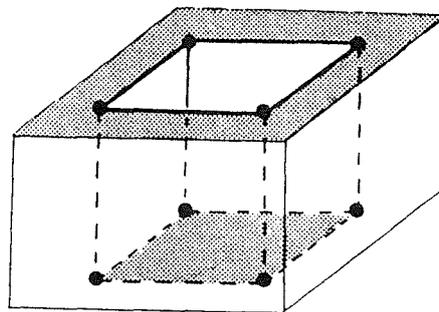
Variante 2:



$p = 1.3$

4 Vollpaßpunkte (in den Ecken im unteren Bereich)

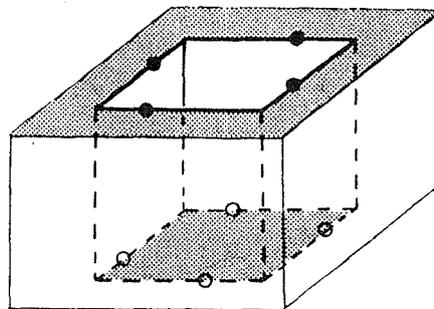
Variante 3:



$p = 0.5$

8 Vollpaßpunkte (in den Ecken oben und unten)

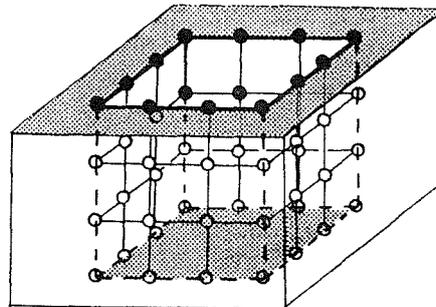
Variante 4:



$p = 0.6$

8 Vollpaßpunkte (jeweils 4 oben und unten; Verteilung: siehe Skizze)

Variante 5:



$p = 0$

48 Vollpaßpunkte (alle Objektpunkte sind Paßpunkte)

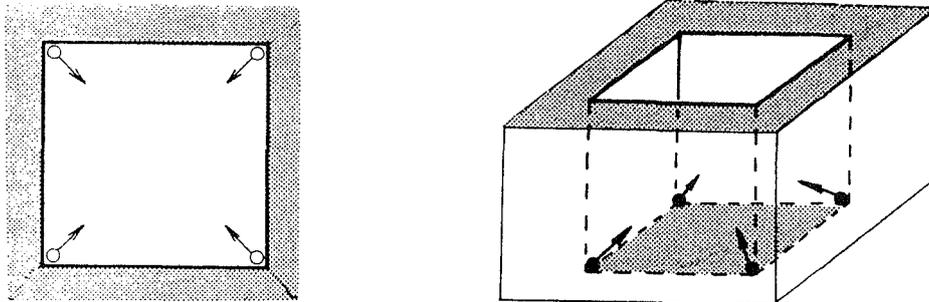
Bei den einzelnen Varianten ist jeweils der ermittelte Paßelementefaktor  $p$  angegeben. Abgesehen von Variante 5 schneidet die Variante 3 mit einem Paßelementefaktor  $p = 0.5$  am besten ab. Der Übergang von vier Paßpunkten (Variante 1 und 2) auf 8 Paßpunkte (Variante 3 und 4) bringt eine beachtliche Verbesserung des Paßelementefaktors.

### 7.5.2 Bündelanordnung

Es werden neun verschiedene Aufnahmevarianten durchgerechnet. Wegen der räumlichen Beengtheit kommt als Aufnahmekamera nur eine Überweitwinkelkamera in Frage. In dieser Untersuchung wird als Aufnahmekamera die P31-ÜWW der Firma Wild ( $c = 45$  mm; Format: 118 mm x 90 mm) angenommen.

#### INNENRAUM - Version A

Bei der Aufnahmeversion A werden vier Überweitwinkelaufnahmen schräg nach oben (Zenitdistanz =  $50^\circ$ ) aus den vier Ecken des Innenraums angefertigt.



*Abb. 7-35: Aufnahmeanordnung "Innenraum" - Version A im Grundriß und in einer axonometrischen Darstellung*

Die Projektionszentren befinden sich dabei am Boden des Innenraums. Jeder Punkt wird dabei in zwei Photos abgebildet. Die mittlere Bildmaßstabszahl ergibt sich dabei mit 323.

#### INNENRAUM - Version B

Die Aufnahmevariante B besteht nur aus zwei Überweitwinkelaufnahmen, die in den Zenit gerichtet sind. Die Basis zwischen den beiden Zenitaufnahmen beträgt in diesem Fall 9 Meter. Die Projektionszentren sind wieder am Boden des Innenraums angeordnet.

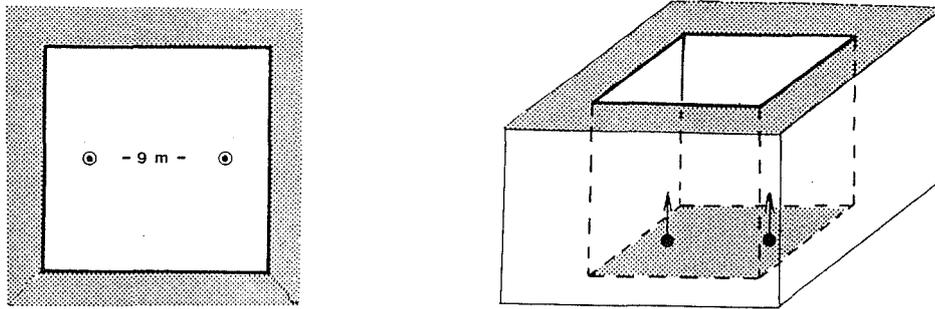


Abb.7-36: Aufnahmeanordnung "Innenraum" - Version B im Grundriß und in einer axonometrischen Darstellung

Mit dieser Aufnahmeversion sind die untersten zwei Punktreihen photographisch überhaupt nicht erfaßt. Punkte, die höher liegen, sind natürlich auch nur in zwei Photos abgebildet. Die Aufwandskennzahl AE dieser Anordnung erscheint daher zunächst einmal sehr niedrig, ist aber aus den oben erwähnten Gründen mit den restlichen Aufnahmevarianten nicht direkt vergleichbar. Der sichttote Bereich im unteren Teil des Innenraums muß entweder durch geodätische Zusatzmessungen erfaßt werden oder es befindet sich in diesem Bereich kein auszumessender Punkt.

#### INNENRAUM - Version C

Die Aufnahmevariante C ist eine Erweiterung der Variante A. Es werden, zusätzlich zu den vier Überweitwinkelaufnahmen vom Boden aus, vier Überweitwinkelaufnahmen vom oberen Rand des Innenraums aus angefertigt. Es entsteht damit jeweils eine vertikale Basis - in diesem Fall mit einer Länge von 15 m.

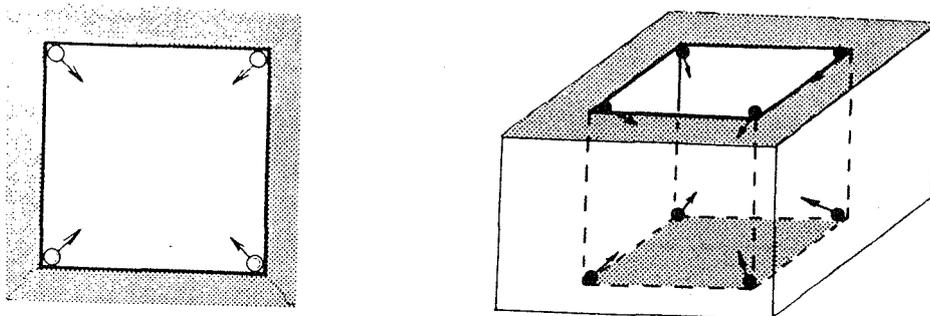
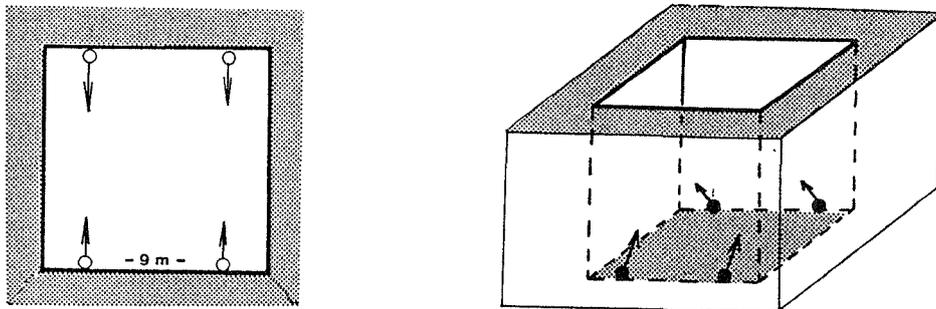


Abb. 7-37: Aufnahmeanordnung "Innenraum" - Version C im Grundriß und in einer axonometrischen Darstellung

Jeder Punkt des Objekts wird dabei in vier Bildern registriert. Vergleicht man jetzt mit der Variante A, bemerkt man eine wesentliche Verbesserung des Schnittqualitätsfaktors  $\sigma$  von 2.4 auf 0.9. Daneben verbessert sich auch der Verformungsfaktor  $\nu$  von 3.3 auf 0.8. Die mittlere Bildmaßstabszahl ergibt mit 323 denselben Wert wie bei der Variante A. Durch die zusätzlichen vier Aufnahmen erreicht man gegenüber Variante A eine Steigerung der Genauigkeit um etwa den Faktor 2. Es verbessert sich nicht nur die Genauigkeit, sondern auch die Zuverlässigkeit erfährt eine beachtliche Steigerung (Variante A:  $\infty$  ; Variante C: 5.3). Dieser Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsgewinn wird aber nur durch eine Verdoppelung des Aufwands erreicht.

#### INNENRAUM - Version D

Die Aufnahmevariante D besteht aus vier Überweitwinkelaufnahmen. Es sind jeweils zwei Aufnahmen am Fuß von zwei gegenüberliegenden Seitenwänden angeordnet (siehe Abb. 7-38).



*Abb. 7-38: Aufnahmeanordnung "Innenraum" - Version D im Grundriß und in einer axonometrischen Darstellung*

Alle vier Aufnahmen werden vom Boden des Innenraums aus angefertigt. Die Aufnahmen sind schräg nach oben gerichtet (Zenitdistanz =  $50^\circ$ ). Die Basis zwischen den zwei Aufnahmen entlang einer Seitenwand beträgt in diesem Fall 9 Meter. Auch bei dieser Aufnahmeanordnung wird ein Großteil der Objektpunkte nur von zwei Aufnahmestrahlen getroffen - d.h. die Bildkoordinaten in  $\xi$ -Richtung sind bei diesen Punkten nicht kontrolliert (IZ in  $\xi$ -Richtung =  $\infty$ ). Die mittlere Bildmaßstabszahl ergibt bei dieser Bündelanordnung den Wert 307.

INNENRAUM - Version E

Die Aufnahmevariante E besteht ebenfalls wieder aus vier Überweitwinkel-  
aufnahmen. Die Projektionszentren aller vier Aufnahmen befinden sich wieder  
in der Höhe der untersten Punktreihe des Objekts, also am Boden des Innen-  
raums. Die Aufnahmen werden jeweils von der Mitte der Wand auf die gegenüber-  
liegende Wand angefertigt.

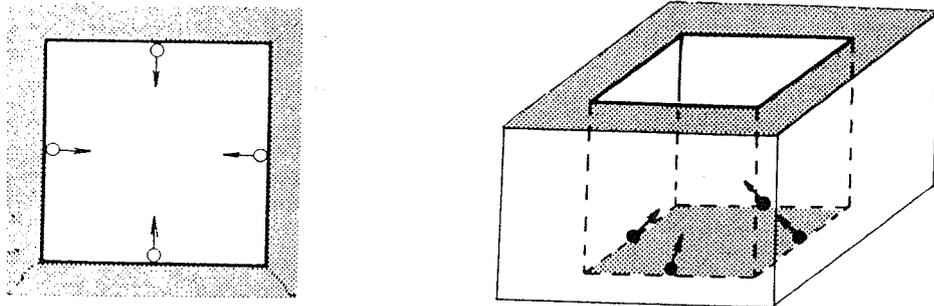


Abb. 7-39: Aufnahmeanordnung "Innenraum" - Version E im  
Grundriß und in einer axonometrischen Darstellung

Von den 120 Bildkoordinaten sind 40 in der  $\xi$ -Richtung nicht kontrolliert  
( $I_Z = \infty$ ). Für die restlichen Bildkoordinaten wird ein Mittelwert für die  
innere Zuverlässigkeit von 6.5 ermittelt (Maximalwert : 11.8).

Die Bildmaßstabszahl variiert zwischen 165 und 467 und ergibt im Mittel den  
Wert 305. Der Schnittqualitätsfaktor ergibt den Wert 2.0. Der  
Verformungsfaktor  $v$  ergibt sich mit 1.8. Auf Grund der relativ schlechten  
Genauigkeitswerte und vor allem wegen der schlechten inneren Zuverlässigkeit  
ist diese Bündelanordnung für die praktische Anwendung nicht zu empfehlen.

INNENRAUM - Version F

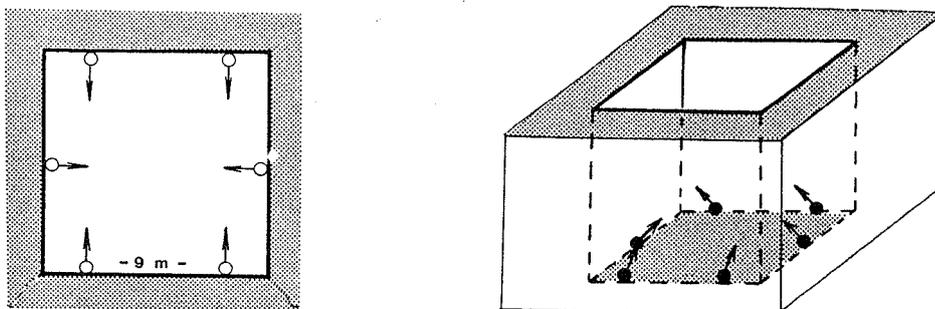


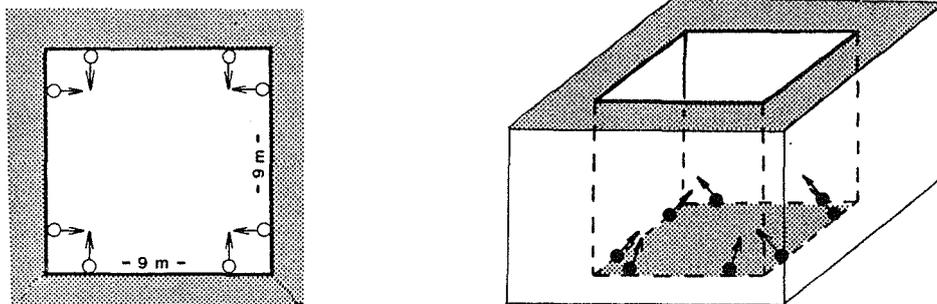
Abb. 7-40: Aufnahmeanordnung "Innenraum" - Version F im  
Grundriß und in einer axonometrischen Darstellung

Die Aufnahmevariante F besteht aus sechs Überweitwinkelaufnahmen und stellt eine Erweiterung der Version D dar. Zusätzlich zu den vier Aufnahmen der Version D werden noch zwei gegenüberliegende, stark nach oben gekippte (Zenitdistanz =  $50^\circ$ ) Überweitwinkelaufnahmen vom Boden aus angefertigt. Jeder Objektpunkt wird dabei in mindestens drei, maximal fünf Photos abgebildet.

Diese Bündelanordnung liefert zuverlässige und recht genaue Ergebnisse. Vergleicht man mit den zuvor besprochenen Versionen D und E, so verbessert sich bei fast gleichbleibender mittlerer Bildmaßstabszahl der Schnittqualitätsfaktor  $\sigma$  auf den Wert 1.4 (Version D: 2.7; Version E: 2.0) und der Verformungsfaktor  $\nu$  auf den Wert 1.4 (Version D: 2.0; Version E: 1.8).

#### INNENRAUM - Version G

Die Aufnahmevariante G besteht aus acht Überweitwinkelaufnahmen. Von den vier Innenseiten des Objekts werden je zwei Aufnahmen auf die gegenüberliegende Seitenfläche des Objekts angefertigt, und zwar vom Boden aus. Die Aufnahmerichtungen sind dabei stark nach oben geneigt (Zenitdistanz =  $50^\circ$ ). Die Basis zwischen den zwei Aufnahmen entlang einer Seitenwand beträgt 9 Meter.

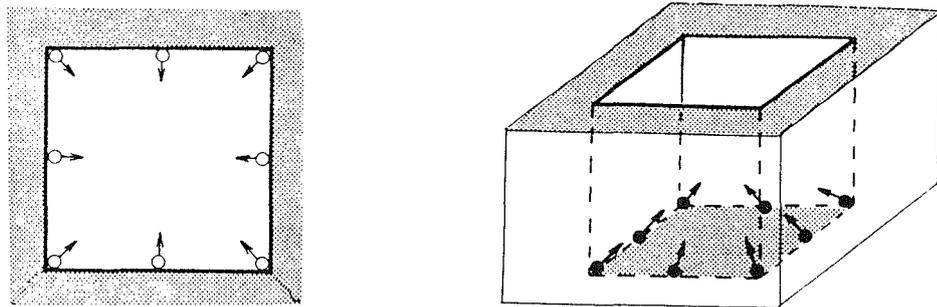


*Abb. 7-41: Aufnahmeanordnung "Innenraum" - Version G im Grundriß und in einer axonometrischen Darstellung*

Jeder Objektpunkt wird dabei in mindestens vier bis maximal sechs Photos abgebildet. Diese Aufnahmeanordnung führt zu einer weiteren Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Auswertergebnisse.

INNENRAUM - Version H

Die Bündelanordnung der Variante H ist eine Kombination aus den Versionen A und E. Es werden - zusätzlich zu den vier Überweitwinkelaufnahmen aus den Ecken heraus (siehe Version A) - vier Überweitwinkelaufnahmen jeweils von der Mitte der Wand aus auf die gegenüberliegende Wand angefertigt (siehe Version E).

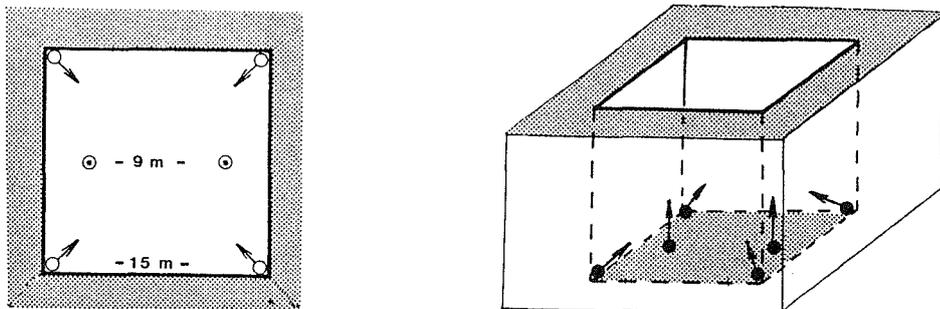


*Abb. 7-42: Aufnahmeanordnung "Innenraum" - Version H im Grundriß und in einer axonometrischen Darstellung*

Alle Aufnahmen werden dabei vom Boden aus photographiert und sind stark nach oben gekippt (Zenitdistanz = 50°). Jeder Objektpunkt wird in mindestens drei Aufnahmen abgebildet. Die Aufnahmevariante H liefert recht gute und zuverlässige Ergebnisse.

INNENRAUM - Version I

Die Bündelanordnung der Variante I besteht aus sechs Überweitwinkelaufnahmen und stellt eine Kombination aus den Versionen A und B dar. Zusätzlich zu den zwei Zenitaufnahmen der Version B werden vier Überweitwinkelaufnahmen diagonal aus den Ecken heraus angefertigt (siehe Version A).



*Abb. 7-43: Aufnahmeanordnung "Innenraum" - Version I im Grundriß und in einer axonometrischen Darstellung*

Die Punkte im unteren Bereich des Innenraums werden durch die Zenitaufnahmen überhaupt nicht erfaßt. In den Schrägaufnahmen wird jeder Objektpunkt auch nur in zwei Photos abgebildet. Daher sind die Bildkoordinaten dieser Punkte nicht durchgreifend kontrolliert ( $IZ = \infty$ ). Die restlichen Punkte sind ausreichend oft beobachtet, so daß sich für diese Punkte ein recht guter Wert für die innere Zuverlässigkeit von 5.1 (Maximalwert: 11.0) ergibt.

7.5.3 Schlußfolgerung aus der Testanordnung INNENRAUM

In der Tab. 7-5 sind die wichtigsten Kenndaten der verschiedenen Aufnahmevarianten zusammengestellt.

Variante	A	B	C	D	E	F	G	H	I
m	323	273	323	307	305	306	307	314	306
o	2.4	2.2	0.9	2.7	2.0	1.4	1.2	1.3	1.8
v	3.3	4.4	0.8	2.0	1.8	1.4	1.1	1.3	1.9
IZ	$\infty$	$\infty$	5.3	$\infty$	$\infty$	5.8	5.2	5.7	$\infty$
$\Sigma$ Pho	4	2	8	4	4	6	8	8	6
$\Sigma n_O$	92	44	184	116	120	176	232	212	136
AE	12	8	20	12	12	16	19	19	15

- m ..... mittlere Bildmaßstabszahl (3.2.2)
- o ..... Schnittqualitätsfaktor (3.2.1)
- v ..... Verformungsfaktor (3.2.3)
- IZ ..... Mittelwert der inneren Zuverlässigkeit  
für die beobachteten Bildkoordinaten (4.1.1)
- $\Sigma n_O$  ... Anzahl der beobachteten Bildpunkte
- AE ..... Arbeitseinheiten (7.1.3)

*Tab. 7-5: Kenndaten der verschiedenen Aufnahmevarianten "Innenraum"*

Sämtliche Aufnahmevarianten bestehen nur aus Überweitwinkelaufnahmen. Von den Aufwandskennzahlen her beurteilt, schneidet Variante B (2 Zenitaufnahmen) am besten ab. Sie ist aber nicht direkt mit den restlichen Varianten vergleichbar, da bei dieser Variante der untere Objektteil nicht erfaßt wird und im

allgemeinen durch Zusatzmessungen ergänzt werden muß. Außerdem ergibt sich bei dieser Variante der schlechteste mittlere räumliche Punktlagefehler. Beachtlich ist die Genauigkeitssteigerung von Variante A (4 Aufnahmen) zu Variante C (8 Aufnahmen).

Die Varianten C, F, G und H liefern recht gute und annähernd gleiche Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte. Gute Genauigkeit liefern noch die Varianten D, E und I. Der Kennwert für die innere Zuverlässigkeit erreicht allerdings bei diesen Varianten den Wert  $\infty$ .

## 7.6 Das Objekt KUPPEL

Bei der Testanordnung "Kuppel" handelt es sich um 101 Objektpunkte, die auf einer Halbkugel angeordnet sind. Der Radius dieser Halbkugel beträgt bei dieser Untersuchung 20 Meter. Die ermittelten Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte sind natürlich wieder maßstabsunabhängig - d.h. durch Änderung der Objektgröße (Radius) ändert sich auch im selben Verhältnis die Bündelanordnung, so daß die Anordnung, relativ gesehen, gleich bleibt. Die Faktoren in der Tabelle 7-6 und 7-7 bleiben, da sie bis auf die mittlere Bildmaßstabszahl maßstabsunabhängig sind, die selben. Die mittlere Bildmaßstabszahl ändert sich im selben Verhältnis wie der Radius der Kuppel.

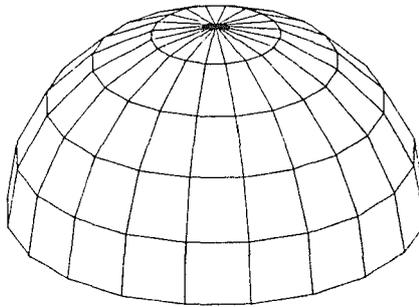


Abb. 7-44: Das Testobjekt "Kuppel"

Die Objektform "Kuppel" tritt in der Praxis in der Architekturvermessung und im Maschinenbau /Brown, Fraser 1986/ auf. Es werden wieder verschiedenste Aufnahmekonfigurationen durchgerechnet, wobei eine Unterscheidung in Innen- und Außenkuppel getroffen wird.

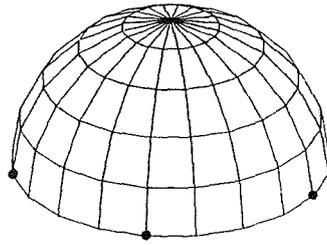
### 7.6.1 Das Objekt AUSSENKUPPEL

Es werden nur Aufnahmen auf die Außenfläche der Kuppel verwendet. Dabei werden acht verschiedene Aufnahmevarianten durchgerechnet. Als Aufnahmekamera wird wieder die Wild P31-WW angenommen.

#### 7.6.1.1 Paßelementeanordnung

Jede Aufnahmeversion wird mit fünf verschiedenen Paßpunktvarianten durchgerechnet, wobei sowohl die Anzahl der Vollpaßpunkte als auch deren Verteilung variiert wird. Der Paßelementefaktor  $p$  wurde an Hand von Simulationsrechnungen ermittelt und ist bei der jeweiligen Variante angeführt.

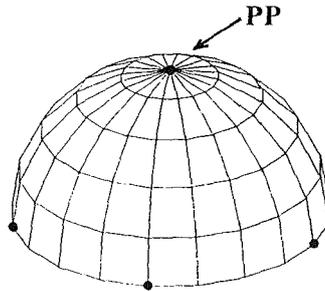
1.Variante:



$p = 0.9$

**5 Vollpaßpunkte** (gleichmäßig am Großkreis der Kuppel verteilt)

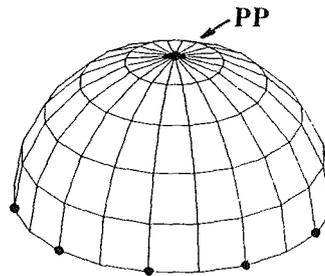
2.Variante:



$p = 0.7$

**6 Vollpaßpunkte** (5 Paßpunkte wie in Variante 1 + 1 zusätzlicher Paßpunkt am höchsten Punkt der Kuppel)

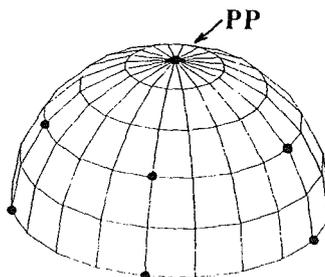
3.Variante:



$p = 0.4$

**11 Vollpaßpunkte** (wie Variante 2, nur sind die Paßpunkte am Großkreis doppelt so dicht angeordnet)

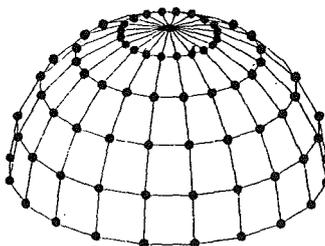
4.Variante:



$p = 0.3$

**11 Vollpaßpunkte** (wie Variante 2, aber zusätzlich 5 Vollpaßpunkte auf einem Kleinkreis der Kuppel)

5.Variante:



$p = 0$

**101 Vollpaßpunkte** (alle Objektpunkte sind Paßpunkte)

Ein zusätzlicher Paßpunkt am höchsten Punkt der Kuppel verbessert den Paßelementefaktor (Variante 2 gegenüber Variante 1) von 0.9 auf 0.7. Die Verdoppelung der Paßpunkte am Grundkreis (Variante 3 gegenüber Variante 2) bewirkt ebenfalls eine beachtliche Genauigkeitssteigerung - der Paßelementefaktor verbessert sich auf den Wert 0.4. Eine noch bessere Verteilung der Paßpunkte ist mit Variante 4 gegeben. Obwohl insgesamt nur 11 Paßpunkte gemessen werden, erreicht  $p$  den bereits sehr guten Wert von 0.3.

Allgemein kann gesagt werden, je gleichmäßiger die Paßpunkte auf der Kuppel verteilt sind - bei gleicher Anzahl der Paßpunkte -, desto besser ergibt sich der Wert für den Paßelementefaktor  $p$ .

#### 7.6.1.2 Bündelanordnung

##### AUSSENKUPPEL - Version A

Bei der Version A wird das Objekt mit fünf Weitwinkelaufnahmen erfaßt. Die

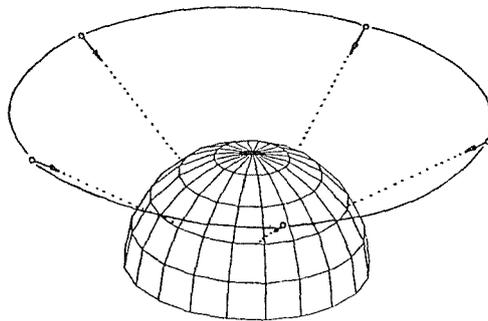


Abb. 7-45: Bündelanordnung "Außenkuppel" - Version A

Aufnahmeorte sind dabei auf einem Kreis angeordnet. Der Radius des Kreises beträgt 42 Meter. Höhenmäßig liegt der Kreis 30 Meter über der Grundfläche der Kuppel. Es wird dabei unterstellt, daß für die Aufnahmen ein Kran beziehungsweise eine Hubkanzel zur Verfügung stehen. Die Aufnahmerichtungen dieser Photos zeigen auf den Mittelpunkt der Halbkugel. Jeder Punkt des Objekts wird von mindestens zwei, im oberen Bereich der Kuppel sogar von bis zu fünf Bildstrahlen getroffen. Die Bildmaßstabszahl variiert dabei von 325 bis 474. Diese Aufnahmeversion stellt vom Aufwand her eine Minimalversion da. Die Genauigkeit und vor allem die innere Zuverlässigkeit sind aber entsprechend schlecht (siehe Tab. 7-6). Bei dieser Anordnung haben 14 Objekt-

punkte nur zwei Bestimmungsstrahlen, und ihre Bildkoordinaten sind daher in einer Richtung nicht kontrolliert ( $IZ = \infty$ ).

#### AUSSENKUPPEL - Version B

Version B verdichtet die Version A insofern, als daß zwischen zwei Aufnahmen der Version A jeweils eine weitere Weitwinkelaufnahme angefertigt wird.

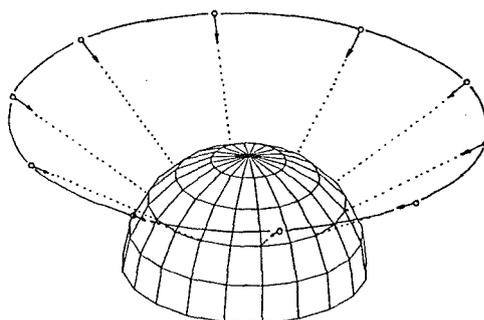


Abb. 7-46: Bündelanordnung "Außenkuppel" - Version B

Das Objekt wird bei dieser Variante mit insgesamt 10 Aufnahmen erfaßt. Jeder Punkt des Objekts wird dabei von mindestens vier, im oberen Bereich der Kuppel sogar von bis zu neun Bildstrahlen getroffen. Diese Verdichtung steigert sowohl die Genauigkeit ( $\sigma = 0.9$ ) als auch vor allem die innere Zuverlässigkeit. Während bei der Version A relativ viele Punkte noch unkontrolliert sind, erreicht man bei dieser Bündelanordnung eine sehr gute und homogene Zuverlässigkeit der Punktbestimmung. Der Mittelwert der inneren Zuverlässigkeit für alle Bildkoordinaten erreicht den sehr guten Wert von 4.7. Aber auch die Streuung dieser Zuverlässigkeitswerte ist bei dieser Anordnung sehr gering. Der schlechteste Zuverlässigkeitswert ergibt sich mit 5.5.

Diese Aufnahmeanordnung stellt einen Kompromiß zwischen recht guten Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerten und vernünftigen Aufwandswerten dar (siehe Tab. 7-6).

#### AUSSENKUPPEL - Version C

Version C stellt eine weitere Verdichtung der Version B dar. Insgesamt werden 20 Weitwinkelaufnahmen angefertigt. Damit wird jeder Objektpunkt in mindestens neun Aufnahmen erfaßt. Punkte im oberen Bereich der Kuppel werden sogar in bis zu 20 Photos abgebildet.

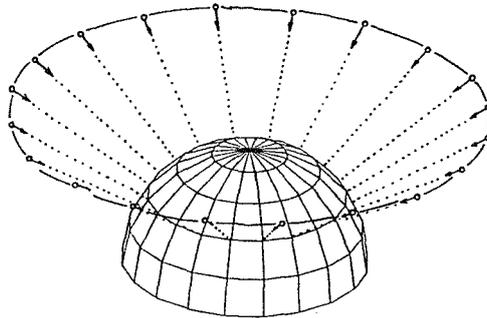


Abb. 7-47: Bündelanordnung "Außenkuppel" - Version C

Damit läßt sich natürlich eine weitere Genauigkeitssteigerung erreichen. Der Schnittqualitätsfaktor  $\sigma$  (siehe Kapitel 3.2.1) verbessert sich auf den Wert 0.6 (Version A: 1.3; Version B: 0.9). Auch der Wert für die innere Zuverlässigkeit verbessert sich auf 4.4 (Version B: 4.7). Dafür ist aber ein sehr hoher Aufwand erforderlich (siehe Tab. 7-6).

AUSSENKUPPEL - Version D

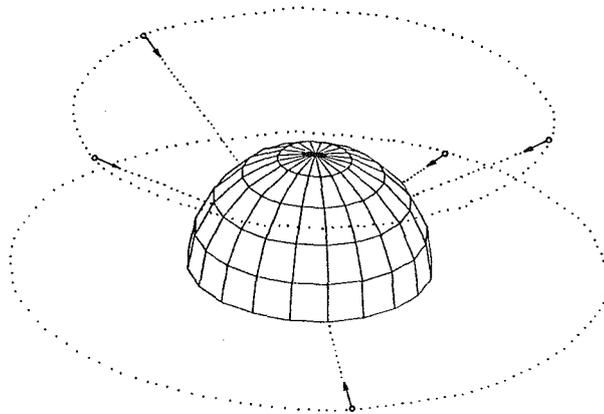


Abb. 7-48: Bündelanordnung "Außenkuppel" - Version D

Version D stellt eine Abänderung der Version A dar. Das Objekt wird wie bei Version A mit fünf Weitwinkelaufnahmen erfasst. Während aber bei der Version A die Projektionszentren gleichverteilt auf einem Kreis - 30 Meter über der Grundfläche der Kuppel - angeordnet sind, werden bei dieser Aufnahmevariante die 1. und 3. der fünf Aufnahmen von einem Kreis in der Höhe der Grundfläche der Kuppel angefertigt. Dieser zweite Kreis hat denselben Mittelpunkt wie die Kuppel und einen Radius von 52 Metern. Damit ist gewährleistet, daß die Normalabstände der Projektionszentren zur Kuppel gleich den bisherigen

Normalabständen sind - d.h. alle Projektionszentren liegen auf einer großen Halbkugel mit einem Radius von 52 Metern. Wie die Version A stellt auch diese Anordnung eine Minimalversion dar. Es werden 64 der insgesamt 101 Objektpunkte nur in zwei Photos abgebildet, was wiederum den Wert  $\infty$  für die innere Zuverlässigkeit bedeutet. Auch der Schnittqualitätsfaktor  $\sigma$  verschlechtert sich geringfügig auf 1.4 (Version A: 1.3). Auch die mittlere Bildmaßstabszahl erhöht sich bei dieser Aufnahmeanordnung geringfügig auf den Wert 393 (Version A: 382).

Insgesamt eine noch schlechtere Minimalversion als Variante A, die sicherlich nur dann zur Anwendung gelangen wird, wenn durch irgendwelche örtliche Gegebenheiten keine anderen Bündelanordnungen möglich sind.

#### AUSSENKUPPEL - Version E

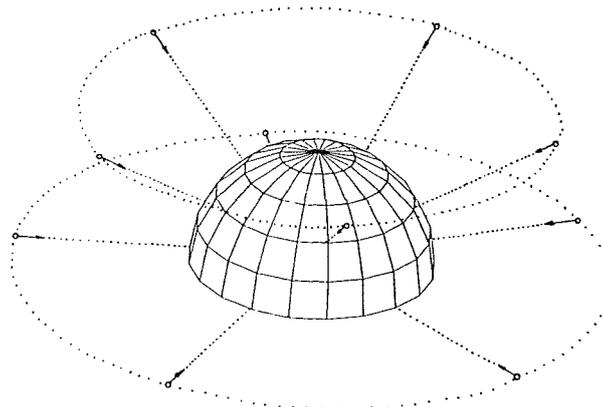
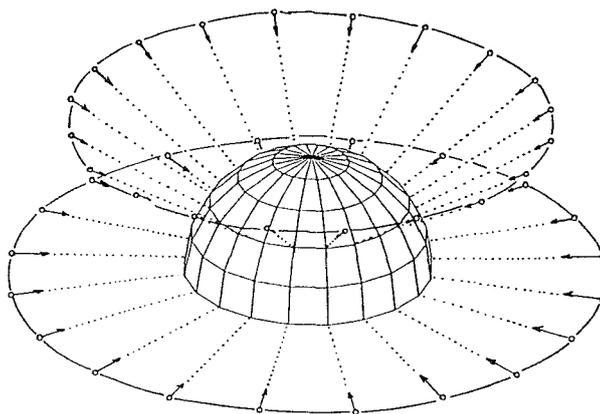


Abb. 7-49: Bündelanordnung "Außenkuppel" - Version E

Die Version E ist eine Erweiterung der Version A, und zwar werden - zusätzlich zu den fünf Weitwinkelaufnahmen der Version A - fünf weitere Weitwinkelaufnahmen vom Grundkreis aus (wie in Version D beschrieben) angefertigt. Das Objekt wird dabei insgesamt von 10 Weitwinkelaufnahmen erfaßt. Es ergibt sich dabei eine mittlere Bildmaßstabszahl von 396. Jeder Objektpunkt wird in mindestens vier, maximal in sieben Photos abgebildet. Der Schnittqualitätsfaktor erreicht den sehr guten Wert von 0.9. Vergleicht man mit der Version B, die ebenfalls aus 10 Weitwinkelaufnahmen besteht, so ergeben sich nahezu gleiche Genauigkeitswerte. Der Schnittqualitätsfaktor ist bei beiden Varianten gleich gut ( $\sigma = 0.9$ ). Bei der Version E ergibt sich eine etwas größere Bildmaßstabszahl und ein geringfügig schlechterer Verformungs-

faktor. Die innere Zuverlässigkeit ergibt bei dieser Anordnung den geringfügig schlechteren Wert von 5.0 (Version B: 4.7).

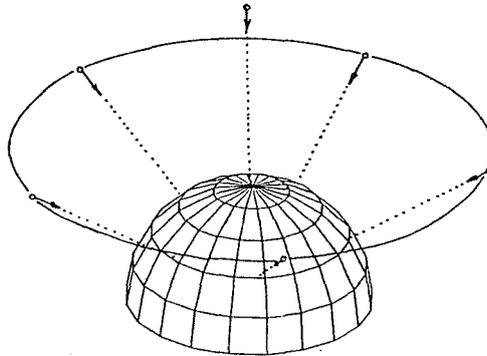
AUSSENKUPPEL - Version F



*Abb. 7-50: Bündelanordnung "Außenkuppel" - Version F*

Die Version F besteht aus 40 Weitwinkelaufnahmen und erweitert dadurch die Version C. Es werden bei dieser Anordnung - zusätzlich zu den 20 Aufnahmen der Version C - 20 weitere Aufnahmen vom Grundkreis aus (wie in Version D beschrieben) angefertigt. Es ergibt sich dabei eine mittlere Bildmaßstabszahl von 396. Jeder Objektpunkt wird in 19 bis 22 Photos abgebildet. Es ergeben sich damit recht gute Genauigkeitswerte ( $\sigma = 0.5$ ;  $\nu = 0.4$ ) und sehr gute Werte für die innere Zuverlässigkeit ( $IZ = 4.3$ ; Maximalwert = 4.7). Diese guten Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte sind allerdings mit einem recht hohen Aufwand verbunden. Man muß 40 Photos anfertigen und 2020 Bildkoordinaten messen. Vergleicht man zum Beispiel mit der Version B, wo nur 10 Photos und 620 Bildkoordinatenmessungen notwendig sind, so wird man feststellen, daß man die etwas besseren Genauigkeitswerte ( $\sigma = 0.9 \rightarrow 0.5$ ;  $\nu = 0.9 \rightarrow 0.4$ ) und die etwas besseren Zuverlässigkeitswerte ( $IZ = 4.7 \rightarrow 4.3$ ) doch nur mit einem unverhältnismäßig großen Mehraufwand schafft. Die Version F wird in der Praxis sicherlich nur dort ihre Berechtigung haben, wo es wirklich auf höchste Genauigkeit und Zuverlässigkeit ankommt und wirtschaftliche Überlegungen eher in den Hintergrund treten.

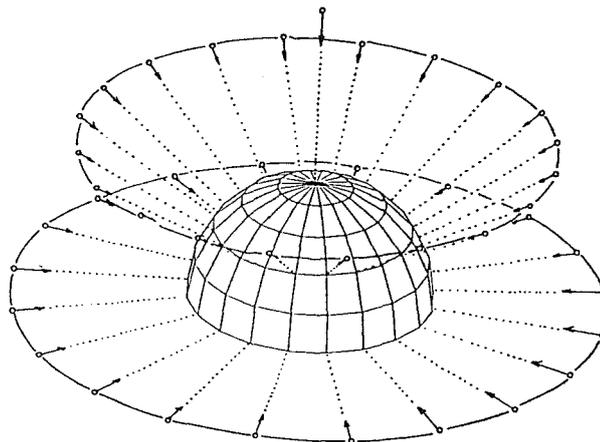
AUSSENKUPPEL - Version G



*Abb. 7-51: Bündelanordnung "Außenkuppel" - Version G*

Die Version G ist eine Erweiterung der Variante A. Zusätzlich zu den fünf Aufnahmen der Variante A wird eine Nadiraufnahme 32 Meter über dem höchsten Punkt der Kuppel angefertigt. Obwohl der Aufwand sich dadurch nur sehr gering steigert, verbessert sich der Schnittqualitätsfaktor  $\sigma$  auf 1.0 (Version A: 1.3) und der Verformungsfaktor  $\nu$  auf 1.1 (Version A: 1.3). Die innere Zuverlässigkeit bleibt auf dem Wert  $\infty$ , da die zusätzliche Nadiraufnahme die unterste Punktreihe der Kuppel nicht abbildet.

AUSSENKUPPEL - Version H



*Abb. 7-52: Bündelanordnung "Außenkuppel" - Version H*

Die Version H ist eine Erweiterung der Variante F. Es wird zusätzlich - wie bei der Variante G beschrieben - eine Nadiraufnahme angefertigt. Dies hat eine ganz geringfügige Genauigkeitssteigerung und eine nicht merkbare

Änderung der inneren Zuverlässigkeit zur Folge. Der schon sehr große Aufwand der Version F wird noch weiter gesteigert.

7.6.1.3 Schlußfolgerung aus Testanordnung AUSSENKUPPEL

In der Tabelle 7-6 sind die wichtigsten Kenndaten der einzelnen Aufnahmevarianten zusammengestellt.

Variante	A	B	C	D	E	F	G	H
m	382	382	382	393	396	396	382	395
o	1.3	0.9	0.6	1.4	0.9	0.5	1.0	0.5
v	1.3	0.9	0.7	1.4	1.0	0.4	1.1	0.4
IZ	∞	4.7	4.4	∞	5.0	4.3	∞	4.3
Σ Pho	5	10	20	5	10	40	6	41
Σ n <sub>0</sub>	310	620	1240	264	505	2020	391	2101
AE	17	30	55	16	27	94	20	97

- m ..... mittlere Bildmaßstabszahl (3.2.2)
- o ..... Schnittqualitätsfaktor (3.2.1)
- v ..... Verformungsfaktor (3.2.3)
- IZ ..... Mittelwert der inneren Zuverlässigkeit  
für die beobachteten Bildkoordinaten (4.1.1)
- Σ n<sub>0</sub> ... Anzahl der beobachteten Bildpunkte
- AE ..... Arbeitseinheiten (7.1.3)

*Tab. 7-6: Kenndaten der verschiedenen Aufnahmevarianten "Außenkuppel"*

Alle Aufnahmevarianten (A - H) haben annähernd gleiche mittlere Bildmaßstabszahlen. Der Schnittqualitätsfaktor zeigt aber schon beachtliche Unterschiede in der Genauigkeit der einzelnen Varianten an.

Bei den Aufnahmevarianten A, D und G sind einige Objektpunkte nicht kontrolliert (nur zwei Bildstrahlen). Der Wert der inneren Zuverlässigkeit IZ wird daher ∞. Bei den übrigen Varianten ergeben sich recht gute Mittelwerte der inneren Zuverlässigkeit von 4.3 bis 5.0.

Die Aufwandskennzahlen der einzelnen Varianten sind sehr unterschiedlich.

Eine Erhöhung des Aufwands bringt nicht immer eine bedeutende Genauigkeits- und Zuverlässigkeitssteigerung mit sich (vergleiche Variante E mit F). Hier sinnvolle Obergrenzen festzulegen, ist sehr schwierig und wohl von Projekt zu Projekt verschieden.

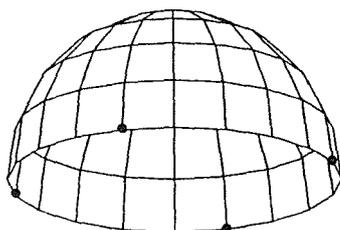
### 7.6.2 Das Objekt INNENKUPPEL

Das Testobjekt "Innenkuppel" hat in dieser Untersuchung dieselben Ausdehnungen wie das Objekt "Außenkuppel" (Halbkugel mit einem Radius von 20 m). Es werden aber diesmal nur Aufnahmen auf die Innenfläche der Kuppel angefertigt. Als Aufnahmekamera wird die Wild P31-WW ( $c = 100$  mm) und die Wild P31-ÜWW ( $c = 45$  mm) eingesetzt. Es werden sieben verschiedene Bündelanordnungen und neun unterschiedliche Paßelementeanordnungen vorgestellt.

#### 7.6.2.1 Paßelementeanordnung

Jede der sieben verschiedenen Bündelanordnungen wird mit neun unterschiedlichen Paßelementevarianten durchgerechnet. Es wird dabei die Anzahl als auch die Anordnung und Verteilung der Paßelemente variiert. Die Varianten 1 bis 7 bestehen nur aus Vollpaßpunkten. Die Varianten 8 und 9 bestehen aus einer Kombination von Paßpunkten und Paßstrecken. Die Strecken werden dabei mit einer Genauigkeit von  $\pm 5$  mm in den Ausgleich eingeführt. Dies entspricht einer Meßgenauigkeit, die im allgemeinen problemlos mit einem Stahlmaßband erreicht werden kann.

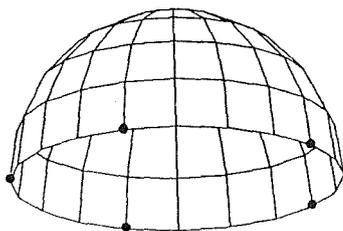
##### 1.Variante:



$p = 1.1$

4 Vollpaßpunkte (gleichmäßig am Großkreis der Kuppel verteilt)

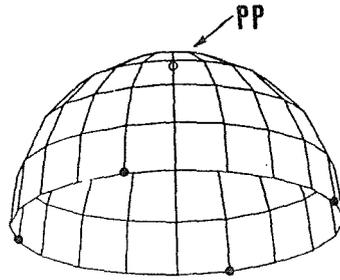
##### 2.Variante:



$p = 0.9$

5 Vollpaßpunkte (gleichmäßig am Großkreis der Kuppel verteilt)

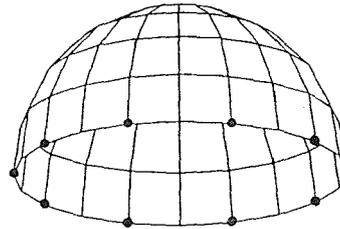
3.Variante:



$p = 0.8$

**5 Vollpaßpunkte** (4 Paßpunkte wie in Variante 1  
+ 1 zusätzlicher Paßpunkt am höchsten Punkt der Kuppel)

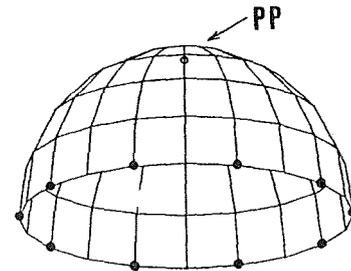
4.Variante:



$p = 0.4$

**10 Vollpaßpunkte** (wie Variante 2, nur sind die  
Paßpunkte am Großkreis doppelt so dicht angeordnet)

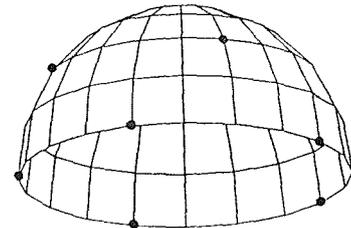
5.Variante:



$p = 0.3$

**11 Vollpaßpunkte** (10 VPP wie Variante 4,  
+ 1 zusätzlicher Paßpunkt am höchsten Punkt der Kuppel)

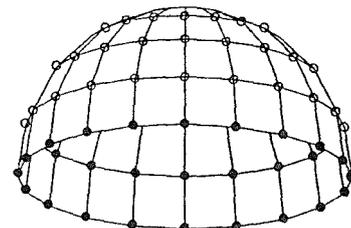
6.Variante:



$p = 0.35$

**9 Vollpaßpunkte** (5 VPP wie Variante 2, und zusätzlich  
4 Paßpunkte auf einem Kleinkreis der Kuppel)

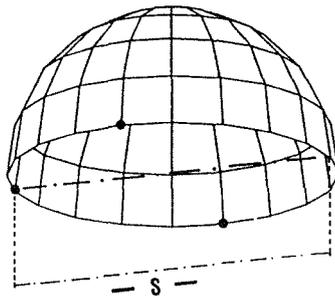
7.Variante:



$p = 0$

**101 Vollpaßpunkte** (alle Objektpunkte sind Paßpunkte)

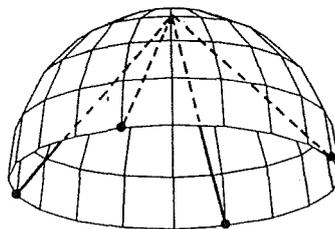
8.Variante:



$$p = 1.4$$

**3 Vollpaßpunkte + 1 Paßstrecke**

9.Variante:



$$p = 0.9$$

**4 Vollpaßpunkte (wie Variante 1) + 4 Paßstrecken**

Der angeführte Paßelementefaktor erreicht Werte zwischen 1.4 (Variante 8) und 0.3 (Variante 5). Je größer die Anzahl der Paßpunkte und je gleichmäßiger die Verteilung der Paßpunkte über das Objekt, desto kleiner ist der Wert für  $p$ .

Vergleicht man Variante 1 (4 Vollpaßpunkte gleichmäßig am Großkreis der Kuppel verteilt) mit Variante 2 und 3 (je 5 Vollpaßpunkte), so ergibt sich eine Verbesserung des Paßelementefaktors  $p$  von 1.1 (Variante 1) auf 0.9 (Variante 2) bzw. 0.8 (Variante 3). Das bedeutet eine Verbesserung des räumlichen Punktlagefehlers von etwa 10 bis 20% - abhängig von den übrigen Parametern in der Formel (3-5).

Der Übergang von fünf gleichmäßig am Großkreis der Kuppel verteilten Vollpaßpunkten (Variante 2) auf 10 Vollpaßpunkte (Variante 4) bringt ebenfalls eine beachtliche Verbesserung des Paßelementefaktors  $p$  auf den Wert 0.4 (Variante 2: 0.9) mit sich.

Interessant ist noch der Vergleich der Variante 9 mit Variante 1. Bei beiden Varianten wird mit vier Vollpaßpunkten gearbeitet. Bei der Variante 9 werden zusätzlich noch vier Paßstrecken gemessen, was eine Verbesserung des  $p$ -Faktors von 1.1 (Variante 1) auf 0.9 (Variante 9) bewirkt.

### 7.6.2.2 Bündelanordnung

#### INNENKUPPEL - Version A

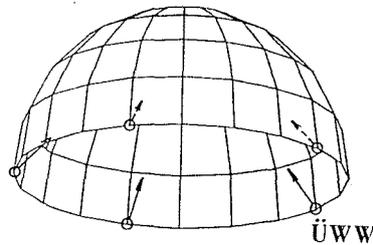


Abb. 7-53: Bündelanordnung "Innenkuppel" - Version A

Bei der Version A wird das Objekt mit fünf Überweitwinkelaufnahmen erfaßt. Die Aufnahmeorte sind dabei gleichmäßig am Grundkreis der Kuppel verteilt. Die Aufnahmerichtungen sind jeweils auf die Mittelachse der Kuppel gerichtet und 50° nach oben gekippt. Jeder Punkt des Objekts wird dabei in mindestens zwei, im oberen Bereich der Kuppel sogar in fünf Bildern abgebildet. Die Bildmaßstabszahl variiert dabei zwischen 130 und 745. Diese Bündelanordnung stellt vom Aufwand her eine "Minimalversion" dar. Die Genauigkeitsfaktoren und vor allem die innere Zuverlässigkeit sind entsprechend schlecht (siehe Tab. 7-7).

#### INNENKUPPEL - Version B

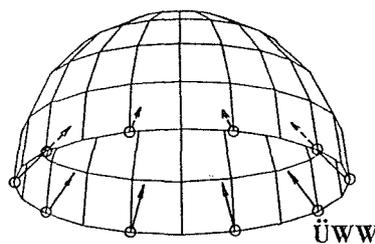


Abb. 7-54: Bündelanordnung "Innenkuppel" - Version B

Die Version B ist eine Erweiterung der Variante A. Dabei werden zehn Überweitwinkelaufnahmen gleichmäßig am Grundkreis der Kuppel verteilt. Es erhöht sich damit natürlich der Aufwand, was sich in einer schlechteren Wirtschaftlichkeit ausdrückt. Die Genauigkeit und vor allem die innere Zuverlässigkeit werden aber stark verbessert (siehe Tab. 7-7). Die Objektpunkte im unteren Bereich der Kuppel werden in mindestens vier Bildern abgebildet. Punkte im oberen Bereich der Kuppel werden sogar in zehn Aufnahmen erfaßt.

INNENKUPPEL - Version C

Die Bündelanordnung der Version C ist eine weitere Verdichtung der Aufnahmevariante B. Das Objekt wird dabei von zwanzig gleichmäßig am Grundkreis der Kuppel verteilten Überweitwinkelaufnahmen erfaßt.

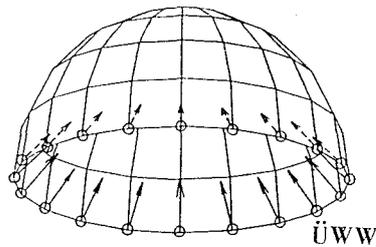


Abb. 7-55: Bündelanordnung "Innenkuppel" - Version C

Die mittlere Bildmaßstabszahl ergibt natürlich denselben Wert wie bei den Varianten A und B. Der Schnittqualitätsfaktor  $\sigma$  verbessert sich aber auf den sehr guten Wert von 0.45 (Variante A: 1.1; Variante B: 0.7). Die innere Zuverlässigkeit (IZ) verbessert sich gegenüber der Variante B nur sehr gering. Der Aufwand ist bei dieser Anordnung aber sehr hoch (siehe Tab. 7-7).

INNENKUPPEL - Version D

Bei den Varianten A bis C wurde davon ausgegangen, nur Aufnahmen im Innenbereich der Halbkugel (Kuppel) anfertigen zu können. Für die folgenden Varianten gilt diese Einschränkung nicht mehr. Es werden nun auch Aufnahmen von weit unterhalb der Kuppel auf die Innenfläche des Objekts angefertigt.

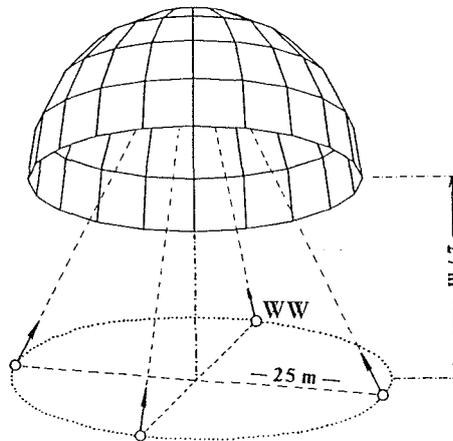


Abb. 7-56: Bündelanordnung "Innenkuppel" - Version D

Die Version D besteht aus vier Weitwinkelaufnahmen, die auf einem Kreis 27 Meter unterhalb der Kuppel angeordnet sind. Der Radius des Kreises beträgt in diesem Fall 25 Meter (Radius der Kuppel: 20 m). Die Aufnahmerichtungen dieser Photos sind jeweils wieder auf die Mittelachse der Kuppel gerichtet und 68° nach oben gekippt. Die mittlere Bildmaßstabszahl beträgt 463. Der Schnittqualitätsfaktor ergibt einen Wert von 1.3. Trotz der sehr guten Aufwandskennzahlen ergibt diese Anordnung recht gute Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsfaktoren (siehe Tab. 7-7).

#### INNENKUPPEL - Version E

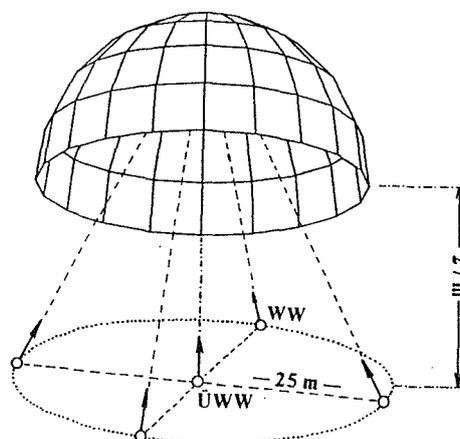


Abb. 7-57: Bündelanordnung "Innenkuppel" - Version E

Die Version E ist eine Erweiterung der Variante D. Zusätzlich zu den vier Weitwinkelaufnahmen der Variante D wird eine Überweitwinkelaufnahme angefertigt. Diese Überweitwinkelaufnahme erfasst das gesamte Objekt auf einmal. Die mittlere Bildmaßstabszahl verschlechtert sich dadurch auf den Wert 538 (Version D: 463). Es verbessert sich aber der Schnittqualitätsfaktor  $\sigma$  auf den Wert 1.1 (Version D: 1.3). Dies hat zur Folge, daß die mittleren Koordinatenfehler am Objekt bei beiden Varianten etwa gleich groß sind. Die innere Zuverlässigkeit allerdings wird durch die zusätzliche Überweitwinkelaufnahme auf den Wert 5.1 verbessert (Version D: 5.5). Jeder Punkt des Objekts ist bei dieser Bündelanordnung in mindestens vier Photos abgebildet.

#### INNENKUPPEL - Version F

Die Aufnahmevariante F besteht aus den fünf Überweitwinkelaufnahmen der Variante A und den vier Weitwinkelaufnahmen der Variante D. Jeder Objektpunkt

ist dabei in mindestens fünf Aufnahmen abgebildet. Es ergeben sich recht gute Genauigkeitswerte ( $\sigma = 0.7$ ,  $m = 501$ ); (Version A:  $\sigma = 1.1$ ,  $m = 531$ ); (Version D:  $\sigma = 1.3$ ,  $m = 463$ ). Auch die innere Zuverlässigkeit ergibt den sehr guten Wert von 4.6 (Version A:  $\infty$ ; Version D: 5.5).

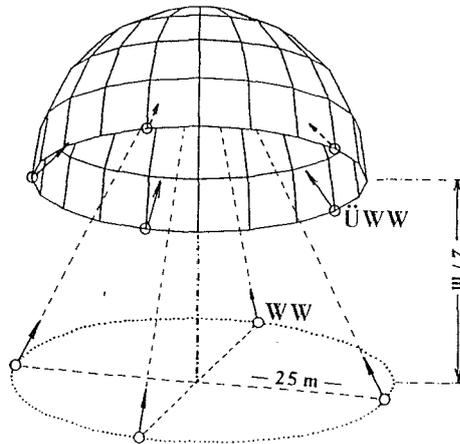


Abb. 7-58: Bündelanordnung "Innenkuppel" - Version F

Mit insgesamt 9 Aufnahmen und 798 Bildkoordinatenmessungen ergibt diese Aufnahmeanordnung auch noch brauchbare Aufwandswerte ( $AE = 29$ ).

INNENKUPPEL - Version G

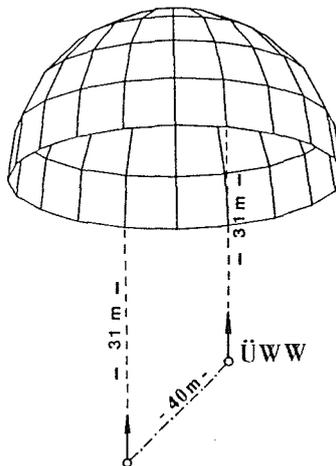


Abb. 7-59: Bündelanordnung "Innenkuppel" - Version G

Die Bündelanordnung der Version G entspricht dem "klassischen" Fall der Stereophotogrammetrie. Es werden dabei mit einer Überweitwinkelkamera zwei in den Zenit gerichtete Aufnahmen angefertigt. Die Basis zwischen den beiden Aufnahmen entspricht dem Durchmesser der Kuppel ( $2 \cdot R = b = 40$  m). Eine Auf-

nahmeentfernung von 31 Meter zum Grundkreis der Kuppel ist in diesem Fall notwendig, um mit diesen beiden Aufnahmen das Objekt stereoskopisch zu erfassen. Es ergibt sich daraus eine recht große mittlere Bildmaßstabszahl von 927. Diese große Bildmaßstabszahl ist hauptverantwortlich dafür, daß diese Aufnahmevariante die mit Abstand schlechtesten Genauigkeiten liefert (siehe Tab. 7-7). Daher sollte trotz der verhältnismäßig guten Aufwandskennzahlen diese Variante in der Praxis nicht eingesetzt werden. Will man jedoch auf die Möglichkeit der zusätzlichen stereoskopischen Auswertung in einem Analoggerät nicht verzichten, so kann man ja diese Aufnahmeversion mit einer zuvor vorgestellten kombinieren.

7.6.2.3 Schlußfolgerung aus Testanordnung INNENKUPPEL

In der Tabelle 7-7 sind die wichtigsten Kenndaten der einzelnen Bündelanordnungen zusammengestellt.

Variante	A	B	C	D	E	F	G
m	531	531	531	463	538	501	927
o	1.1	0.7	0.45	1.3	1.1	0.7	1.9
v	1.3	0.8	0.6	1.3	1.1	0.7	2.1
IZ	∞	4.7	4.3	5.5	5.1	4.6	∞
Σ Pho	5	10	20	4	5	9	2
Σ n <sub>o</sub>	430	750	1720	368	469	798	202
AE	17	29	55	16	19	29	11

- m ..... mittlere Bildmaßstabszahl (3.2.2)
- o ..... Schnittqualitätsfaktor (3.2.1)
- v ..... Verformungsfaktor (3.2.3)
- IZ ..... Mittelwert der inneren Zuverlässigkeit  
für die beobachteten Bildkoordinaten (4.1.1)
- Σ n<sub>o</sub> ... Anzahl der beobachteten Bildpunkte
- AE ..... Arbeitseinheiten (7.1.3)

*Tab. 7-7: Kenndaten der verschiedenen Aufnahmevarianten "Innenkuppel"*

Von den Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsfaktoren her beurteilt, schneidet die Version C am besten ab. Etwas schlechtere Werte ergeben sich bei den Versionen B und F. In der Abb. 7-60 ist die mittlere Punktlagegenauigkeit am Objekt für die einzelnen Aufnahmevarianten dargestellt. Auf der Abszisse sind dabei die verschiedenen Paßpunktanordnungen aufgetragen. Auf der Ordinate ist der räumliche Punktlagefehler in Millimeter aufgetragen. Die Bildkoordinatenmeßgenauigkeit  $\sigma_B$  wurde dafür mit einer Genauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$  (signalisierte Punkte) in den Ausgleich eingeführt. Die Genauigkeit der Paßpunkte beträgt  $\pm 5 \text{ mm}$ .

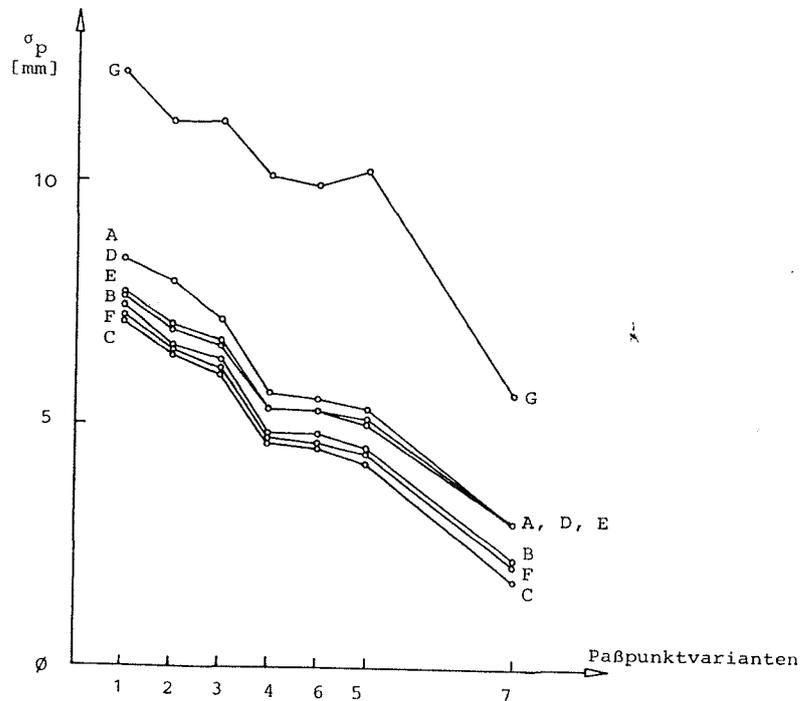


Abb. 7-60: Vergleich der räumlichen Punktlagegenauigkeit der verschiedenen Aufnahmevarianten "Innenkuppel"

In der Abbildung 7-60 wird deutlich, wieviel schlechter die Genauigkeit der Version G ("klassische" Stereophotogrammetrie) gegenüber den anderen Aufnahmeanordnungen ist.

### 7.7 Das Objekt TURM

Unter dem Standardobjekt "Turm" versteht man einen schmalen aufgestellten Quader mit den Verhältnissen Länge : Breite : Höhe = 1 : 1 : 3. Das Testobjekt hat eine Grundfläche von 15 x 15 Meter und ist 45 Meter hoch. Das Objekt ist undurchsichtig und ist durch ein 5 x 5 Meter dichtes Punktraster repräsentiert. Es besteht aus insgesamt 120 Rasterpunkten.

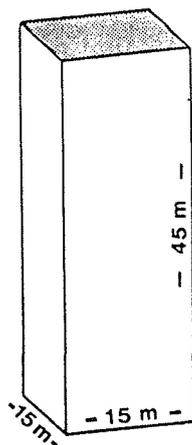


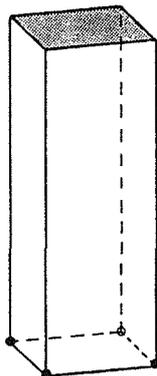
Abb. 7-61: Das Testobjekt "Turm"

Mit diesem Objekt sollen Aufnahmeanordnungen simuliert werden, bei denen Punkte an allen vier Seitenflächen eines stehenden Quaders bündelphotogrammetrisch bestimmt werden. Im Gegensatz zum Quader (Kapitel 7.4) handelt es sich bei diesem Objekt um einen, im Vergleich mit seiner Grundfläche sehr hohen Körper.

#### 7.7.1 Paßelementeanordnung

Die einzelnen Aufnahmevarianten werden mit sieben verschiedenen Paßpunktanordnungen durchgerechnet. Die Anzahl und Verteilung einiger Vollpaßpunkte wird wieder variiert.

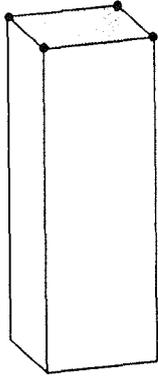
##### Variante 1:



p = 6.2

**4 Vollpaßpunkte** (in den Ecken der untersten Objektpunktreihe)

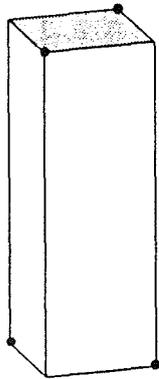
Variante 2:



$p = 6.5$

4 **Vollpaßpunkte** (in den Ecken der obersten Objektpunktreihe)

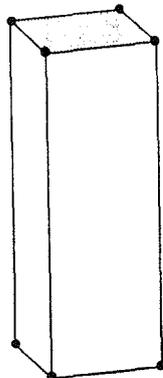
Variante 3:



$p = 1.5$

4 **Vollpaßpunkte** (abwechselnd oben und unten in den Ecken)

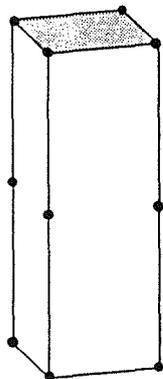
Variante 4:



$p = 0.7$

8 **Vollpaßpunkte** (in den Ecken des Objekts)

Variante 5:



$p = 0.45$

12 **Vollpaßpunkte** (8 VPP in den Ecken des Objekts und zusätzlich 4 VPP an den Kanten des Objekts in halber Höhe)

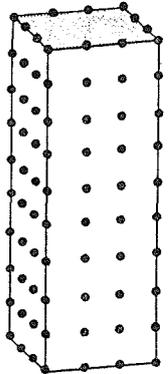
Variante 6:



$$p = 0.3$$

**16 Vollpaßpunkte** (in den Ecken und entlang der Kanten des Objekts)

Variante 7:



$$p = 0$$

**120 Vollpaßpunkte** (alle Objektpunkte sind Paßpunkte)

Der ermittelte Paßelementefaktor  $p$  ist bei der jeweiligen Variante angeführt. Die Varianten 1 und 2 (Paßpunkte nur ganz oben bzw. Paßpunkte nur ganz unten angeordnet) ergeben natürlich die schlechtesten  $p$ -Faktoren.

7.7.2 Bündelanordnung

Es werden neun verschiedene Bündelanordnungen durchgerechnet. Als Aufnahmekamera kommen eine Weitwinkelkamera Wild P31-WW ( $c = 100$  mm) und eine Überweitwinkelkamera Wild P31-ÜWW ( $c = 45$  mm) zum Einsatz.

TURM - Version A

Die Aufnahmevariante A besteht aus vier Weitwinkelaufnahmen. Die Aufnahmen werden vom Boden aus angefertigt und sind aus einer Entfernung von 28 Metern symmetrisch auf die Kanten des Turms und nach oben gerichtet (Zenitdistanz =  $70^\circ$ ). Das Weitwinkelobjektiv wird dabei im Hochformat eingesetzt.

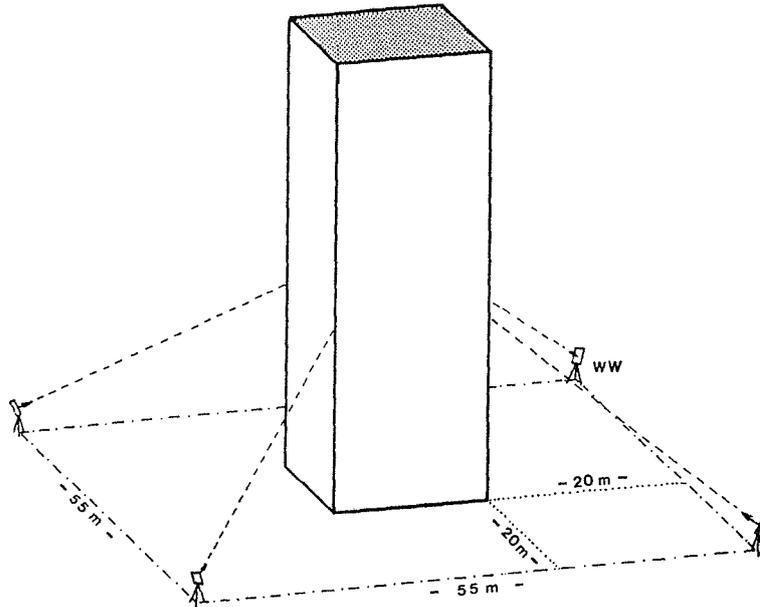


Abb. 7-62: Aufnahmeanordnung "Turm" - Version A

Es handelt sich dabei um eine sogenannte "Minimalversion". Jeder Objektpunkt wird in nur zwei Photos erfaßt. Die Bildkoordinatenmessung ist dadurch nicht durchgreifend kontrolliert und die innere Zuverlässigkeit erhält damit den Wert  $\infty$ .

TURM - Version B

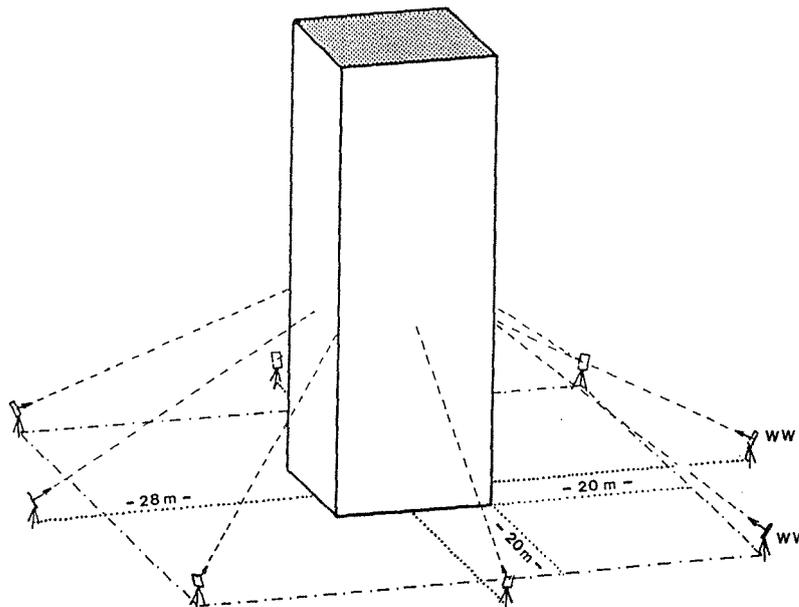


Abb. 7-63: Aufnahmeanordnung "Turm" - Version B

Die Aufnahmevariante B ist eine Erweiterung der Version A. Sie besteht aus insgesamt acht Weitwinkelaufnahmen, die vom Boden aus angefertigt werden. Zusätzlich zu den vier Schrägaufnahmen der Variante A macht man auf jede Seitenfläche des Turms eine stark nach oben gekippte Frontalaufnahme. Die Aufnahmeentfernung dieser Frontalaufnahmen beträgt 28 Meter. Der Bildmaßstab variiert dabei zwischen 250 und 560 und ergibt einen Mittelwert von 388.

Vergleicht man diese Aufnahmevariante mit der zuvor besprochenen Variante A, so stellt man zwar eine Verdoppelung des Aufwands fest, aber gleichzeitig auch eine wesentliche Verbesserung der inneren Zuverlässigkeit auf den Wert 5.6 (Version A:  $\infty$ ). Es verbessert sich auch der Schnittqualitätsfaktor  $\sigma$  auf 1.3 (Version A: 1.5) und geringfügig auch der Verformungsfaktor  $v$  auf 0.7 (Version A: 0.8). Auch die mittlere Bildmaßstabszahl ergibt bei dieser Version einen etwas besseren Wert. Insgesamt ergibt sich eine Genauigkeitssteigerung von ca. 10% (abhängig von der Paßpunktverteilung).

#### TURM - Version C

Die Aufnahmevariante C besteht aus insgesamt acht Aufnahmen. Zusätzlich zu den vier stark nach oben geneigten Weitwinkelaufnahmen der Variante A werden vier Überweitwinkelaufnahmen angefertigt. Diese vier Überweitwinkelaufnahmen sind horizontale Frontalaufnahmen - jeweils auf die Mitte der vier Seitenflächen des Turms gerichtet. Die Aufnahmeentfernung beträgt in diesem Fall 18 Meter.

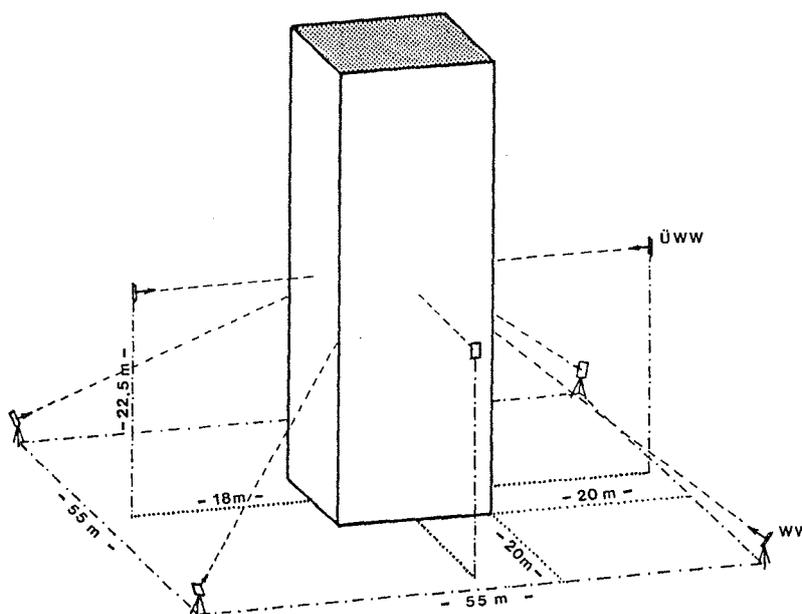


Abb.7-64: Aufnahmeanordnung "Turm" - Version C

Die Weitwinkelaufnahmen werden vom Boden aus angefertigt. Die Projektionszentren der Überweitwinkelaufnahmen liegen höhenmäßig in der halben Objekt-höhe (= 22.5 m über den Weitwinkelaufnahmen).

Diese Aufnahmevariante liefert geringfügig bessere Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte als die Version B. Der Vorteil dieser Variante liegt wohl darin, daß von jeder Seitenfläche des Turms eine Frontalaufnahme vorliegt, in die zum Beispiel das Punktnummernschema bequem eingetragen werden kann. Es ist auch leicht möglich, photographische Entzerrungen der jeweiligen Seitenflächen herzustellen, wie sie oft parallel mit der Vermessung für Beweissicherungs- und Dokumentationszwecke verlangt werden.

Der Nachteil dieser Aufnahmevariante liegt darin, daß zwei verschiedene Objektivtypen notwendig sind (Weitwinkelkammer für die Schrägaufnahmen und Überweitwinkelkammer für die Frontalaufnahmen), und daß die Frontalaufnahmen aus einer Höhe von 22.5 Meter angefertigt werden, was den Einsatz einer Hubkanzel oder eines Krans voraussetzt.

#### TURM - Version D

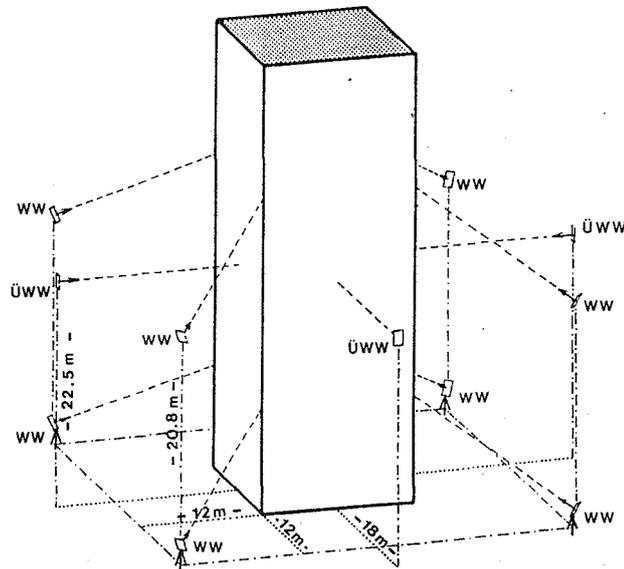


Abb. 7-65: Aufnahmeanordnung "Turm" - Version D

Die Aufnahmevariante D besteht aus acht Weitwinkelaufnahmen und vier Überweitwinkelaufnahmen. Es werden zunächst vom Boden aus vier Schrägaufnahmen mit einer Weitwinkelkammer auf die Kanten des Turms angefertigt. Ein

Vergleich dieser Schrägaufnahmen mit den Aufnahmen der Variante A zeigt, daß die Projektionszentren näher ans Objekt herangerückt sind (Aufnahmeentfernung: 17 m; Version A: 28 m) und bei Variante D im Querformat photographiert wird. Dies hat zur Folge, daß mit diesen Schrägaufnahmen die oberen Objektteile nicht mehr erfaßt werden. Deshalb werden in derselben Aufnahmeentfernung mit einer vertikalen Basis von 22.5 Meter weitere vier Weitwinkelschraugaufnahmen angefertigt. Diese beiden "Rundum-Streifen" überlappen sich stark und werden noch zusätzlich mit vier Überweitwinkelfrontalaufnahmen (wie in Version C beschrieben) verknüpft.

Der etwas größere Aufwand, den diese Version erfordert, bringt eine beachtliche Genauigkeitssteigerung mit sich. Durch das näher Herangehen an das Objekt verkleinert sich natürlich die mittlere Bildmaßstabszahl (Version D: 317; Version C: 404). Es verbessert sich aber auch der Schnittqualitätsfaktor  $\sigma$  auf den Wert 0.9 (Version C: 1.2) und geringfügig auch der Verformungsfaktor  $\nu$  auf den Wert 0.55 (Version C: 0.6). Insgesamt eine recht genaue und zuverlässige Aufnahmevariante, die allerdings zwei verschiedene Objektivtypen und eine Hubkanzel etc. benötigt.

#### TURM - Version E

Die Aufnahmevariante E ergibt sich aus insgesamt 12 Überweitwinkelaufnahmen. Vier Aufnahmen werden aus einer Entfernung von 10 Metern vom Boden aus schräg und stark nach oben geneigt (Zenitdistanz =  $60^\circ$ ) auf die Kanten des Turms angefertigt. Vier weitere Aufnahmen macht man ebenfalls vom Boden aus frontal auf die Seitenflächen des Objekts (Aufnahmeentfernung: 10 m; Zenitdistanz =  $60^\circ$ ). In 18 Meter Entfernung und 22.5 Meter Höhe werden zusätzlich vier horizontale Frontalaufnahmen registriert. Durch die stark geneigten Überweitwinkelaufnahmen und das relativ hohe Objekt erreicht der Bildmaßstab Werte zwischen 204 und 956 und ergibt im Mittel den Wert 504.

Vergleicht man mit der zuvor besprochenen Variante D, so ergibt sich eine etwa 20%-ige Genauigkeitsverschlechterung der Objektpunkte, obwohl bei beiden Varianten die gleiche Anzahl von Bildern belichtet werden muß, und bei der Version E sogar die Anzahl der gemessenen Bildkoordinaten höher ist.

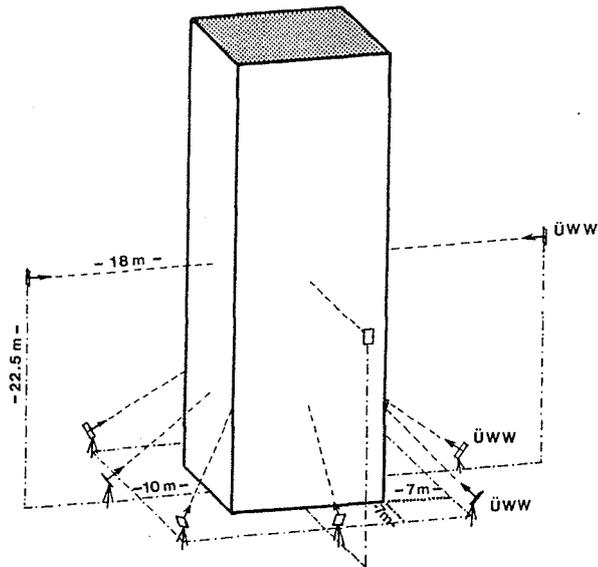


Abb. 7-66: Aufnahmeanordnung "Turm" - Version E

TURM - Version F

Die Aufnahmevariante F ist mit ihren insgesamt 12 Aufnahmen eine Erweiterung der Version B. Zusätzlich zu den acht vom Boden aus aufgenommenen Weitwinkelaufnahmen der Version B, werden vier weitere Weitwinkelaufnahmen aus einer Höhe von 22.5 Metern auf die Seitenflächen angefertigt. Es handelt sich dabei um horizontale Frontalaufnahmen. Um das Objekt damit in seiner vollen Höhe zu erfassen, ist eine Aufnahmeentfernung von 39 (1) Metern für diese Frontalaufnahmen notwendig.

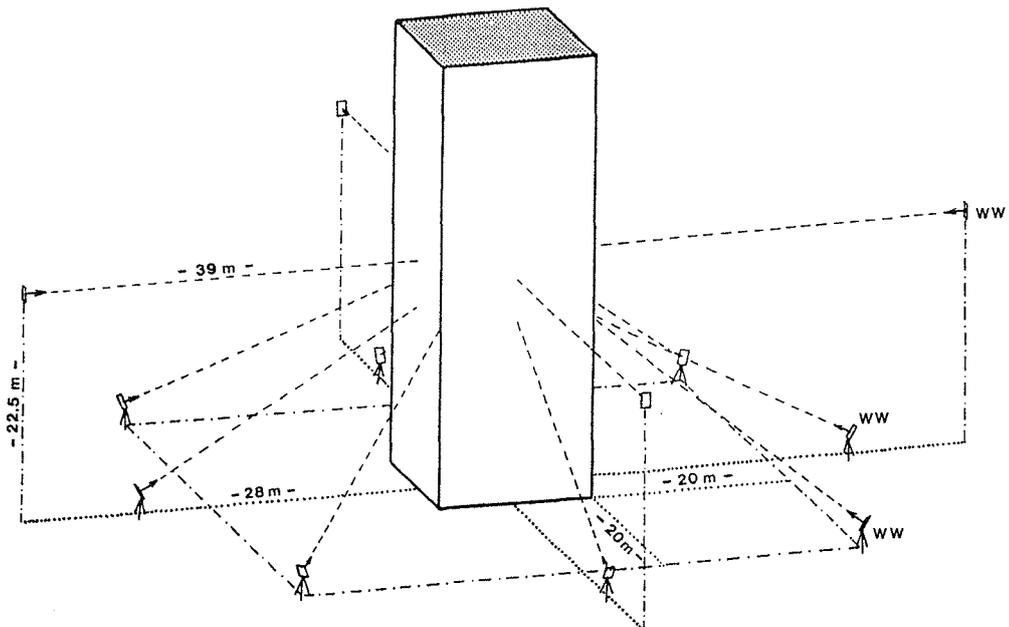


Abb. 7-67: Aufnahmeanordnung "Turm" - Version F

Für diese Aufnahmevariante braucht man zwar nur eine Weitwinkelkammer, doch auch sehr viel freien Platz rund um das Aufnahmeobjekt. Vergleicht man mit der Version E, die aus 12 Überweitwinkelaufnahmen besteht, so fällt vor allem die Verbesserung der mittleren Bildmaßstabszahl auf. Die restlichen Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte ergeben nahezu idente Werte.

#### TURM - Version G

Auch Aufnahmevariante G besteht wieder aus insgesamt 12 Aufnahmen. Vier Überweitwinkelschrägaufnahmen werden aus einer Entfernung von 10 Metern stark nach oben gekippt (Zenitdistanz =  $60^\circ$ ) symmetrisch auf die Kanten des Turms angefertigt. Vier weitere Überweitwinkelaufnahmen registriert man aus 22.5 m Höhe frontal auf die Seitenflächen. Die Aufnahmeentfernung beträgt dabei 18 Meter und die Aufnahmeentfernung beträgt dabei 18 Meter und die Aufnahmeentfernung ist horizontal. Es werden noch vier weitere Weitwinkelaufnahmen aus 22.5 Meter Höhe angefertigt. Die Aufnahmeentfernung dieser Weitwinkelaufnahmen beträgt jetzt 17 Meter. Es handelt sich dabei um nach oben gekippte Schrägaufnahmen. Die Aufnahmen sind wiederum auf die Kanten des Objekts gerichtet, erfassen aber nur den oberen Objektteil.

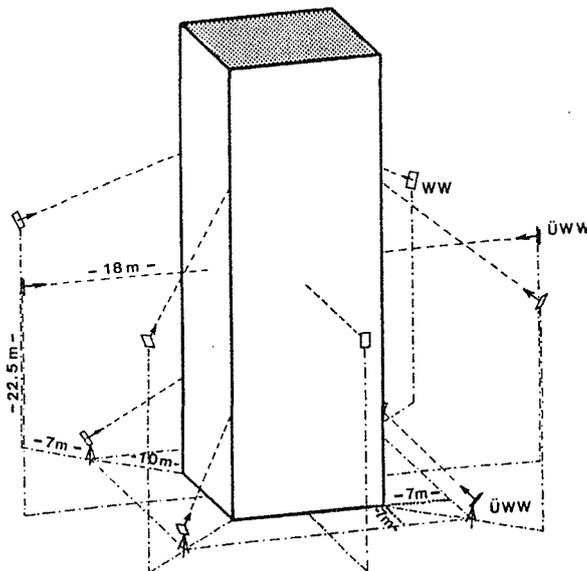


Abb. 7-68: Aufnahmeanordnung "Turm" - Version G

Für diese Aufnahmevariante braucht man zwei verschiedene Objektivtypen, aber verhältnismäßig wenig Platz rund um das Aufnahmeobjekt.

TURM - Version H

Die Aufnahmevariante H besteht wiederum nur aus 12 Weitwinkelaufnahmen. Es handelt sich dabei um eine Erweiterung der Version B bzw. um eine Abänderung der Version F. Acht Weitwinkelaufnahmen werden vom Boden aus (wie in Variante B beschrieben) angefertigt. Zusätzlich dazu registriert man aus einer Höhe von 22.5 Metern und einer Entfernung von 17 Metern vier weitere Weitwinkelaufnahmen.

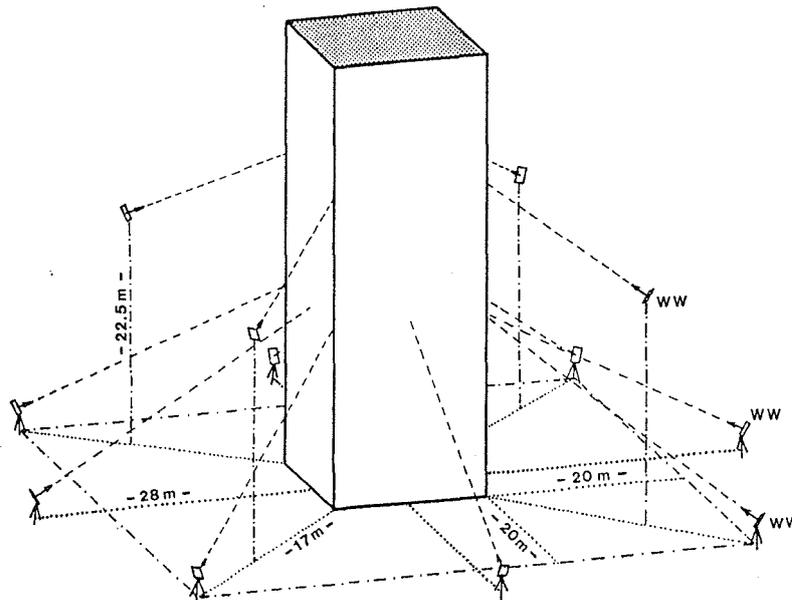


Abb. 7-69: Aufnahmeanordnung "Turm" - Version H

Es handelt sich dabei um Schrägaufnahmen auf die Kanten des Turms. Die Aufnahmen sind dabei stark nach oben gekippt, und erfassen so nur den oberen Objektteil. Gerade dieser obere Teil wird von den restlichen acht Aufnahmen nur schlecht bestimmt. Vergleicht man daher mit der Variante B, wo diese "Detailaufnahmen" des oberen Objektteils fehlen, so stellt man eine Genauigkeitssteigerung von etwa 20% fest. Gleichzeitig erfährt auch die innere Zuverlässigkeit eine geringfügige Genauigkeitssteigerung (Version H: 5.3; Version B: 5.6).

TURM - Version I

Die Aufnahmevariante I erweitert Version H (12 Weitwinkelaufnahmen) um vier Weitwinkelaufnahmen, die aus einer Höhe von 22.5 Meter angefertigt werden. Es

handelt sich dabei um horizontale Frontalaufnahmen auf die Mitte der einzelnen Seitenflächen. Die Aufnahmeentfernung beträgt 39 Meter.

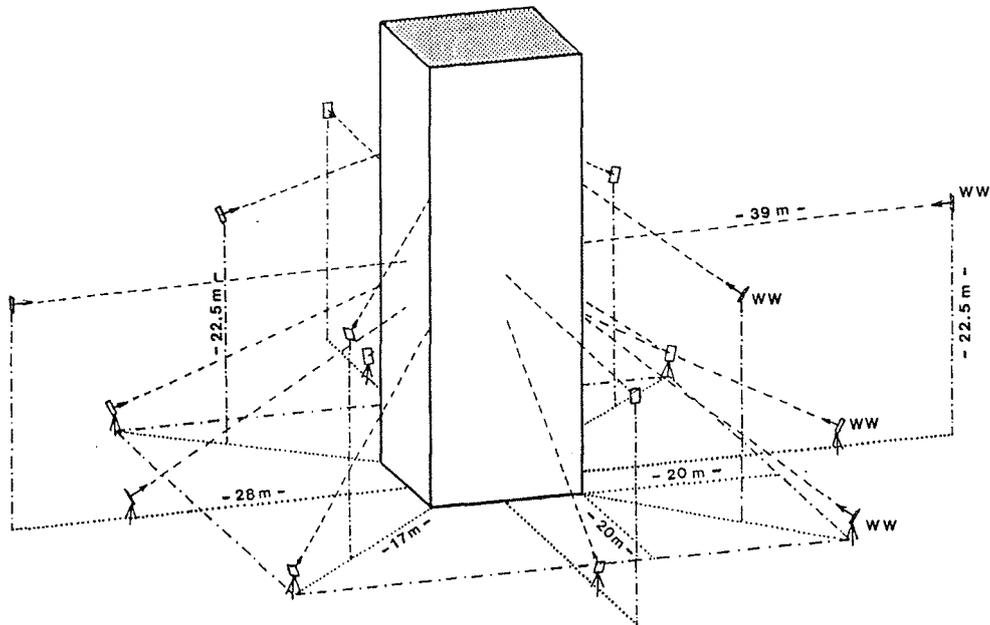


Abb. 7-70: Aufnahmeanordnung "Turm" - Version I

Die Variante I liefert sehr gute Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte. Sie hat allerdings auch die schlechtesten Aufwandskennzahlen aller vorgestellten Versionen.

### 7.7.3 Schlußfolgerung aus der Testanordnung TURM

In der Tab. 7-8 sind die wichtigsten Kenndaten der verschiedenen Aufnahmevarianten zusammengestellt. Die besten Genauigkeiten liefern die Varianten D und I, knapp gefolgt von den Varianten G und H. Die schlechteste Genauigkeit zeigt die Version A, die jedoch vom Aufwand her als "Minimalversion" bezeichnet werden kann. Betrachtet man die innere Zuverlässigkeit (IZ), so erreichen alle Varianten - mit Ausnahme der Version A - recht gute Werte. Den besten Wert erreicht die Variante I mit 4.9 (16 Weitwinkelaufnahmen), den schlechtesten Wert - abgesehen von der Variante A - die Variante B mit 5.6 (8 Weitwinkelaufnahmen).

Variante	A	B	C	D	E	F	G	H	I
m	406	388	404	317	504	389	456	358	365
o	1.5	1.3	1.2	0.9	1.0	1.1	0.8	0.95	0.9
v	0.8	0.7	0.6	0.55	0.55	0.5	0.5	0.45	0.3
IZ	∞	5.6	5.5	5.5	5.2	5.0	5.4	5.3	4.9
Σ Pho	4	8	8	12	12	12	12	12	16
Σ n <sub>0</sub>	280	436	440	504	600	596	572	568	728
AE	14	22	23	31	31	31	31	31	40

- m ..... mittlere Bildmaßstabszahl (3.2.2)  
 o ..... Schnittqualitätsfaktor (3.2.1)  
 v ..... Verformungsfaktor (3.2.3)  
 IZ ..... Mittelwert der Inneren Zuverlässigkeit  
 für die Bildkoordinaten (4.1.1)  
 Σ n<sub>0</sub> ... Anzahl der beobachteten Bildpunkte  
 AE ..... Arbeitseinheiten (7.1.3)

Tab. 7-8: Kenndaten der verschiedenen Aufnahmevarianten "Turm"

Für welche Aufnahmeanordnung man sich schlußendlich bei einem praktischen Projekt entscheidet, hängt einerseits vom vorhandenen Instrumentarium (Weitwinkelkammer, Überweitwinkelkammer) ab, andererseits auch von den örtlichen Gegebenheiten (Sicht, Beengtheit) am Aufnahmeort ab. Ein weiteres Entscheidungskriterium liegt wohl in der Tatsache, ob eine Hubkranzel, Kran oder Ähnliches für das Anfertigen der Meßaufnahmen zur Verfügung steht. Die Werte der einzelnen Parameter in der Tab. 7-8 sollen überdies die Entscheidung für die günstigste Aufnahmevariante erleichtern.

## 8. Praktische Vorgangsweise

### 8.1 Praktische Aufnahmeplanung

Das folgende Ablaufschema für eine Aufnahmeplanung eines ingenieurphotogrammetrischen Projekts zeigt die möglichen Vorgangsweisen. Eine strenge Lösung scheidet an der Komplexität der Aufgabenstellung.

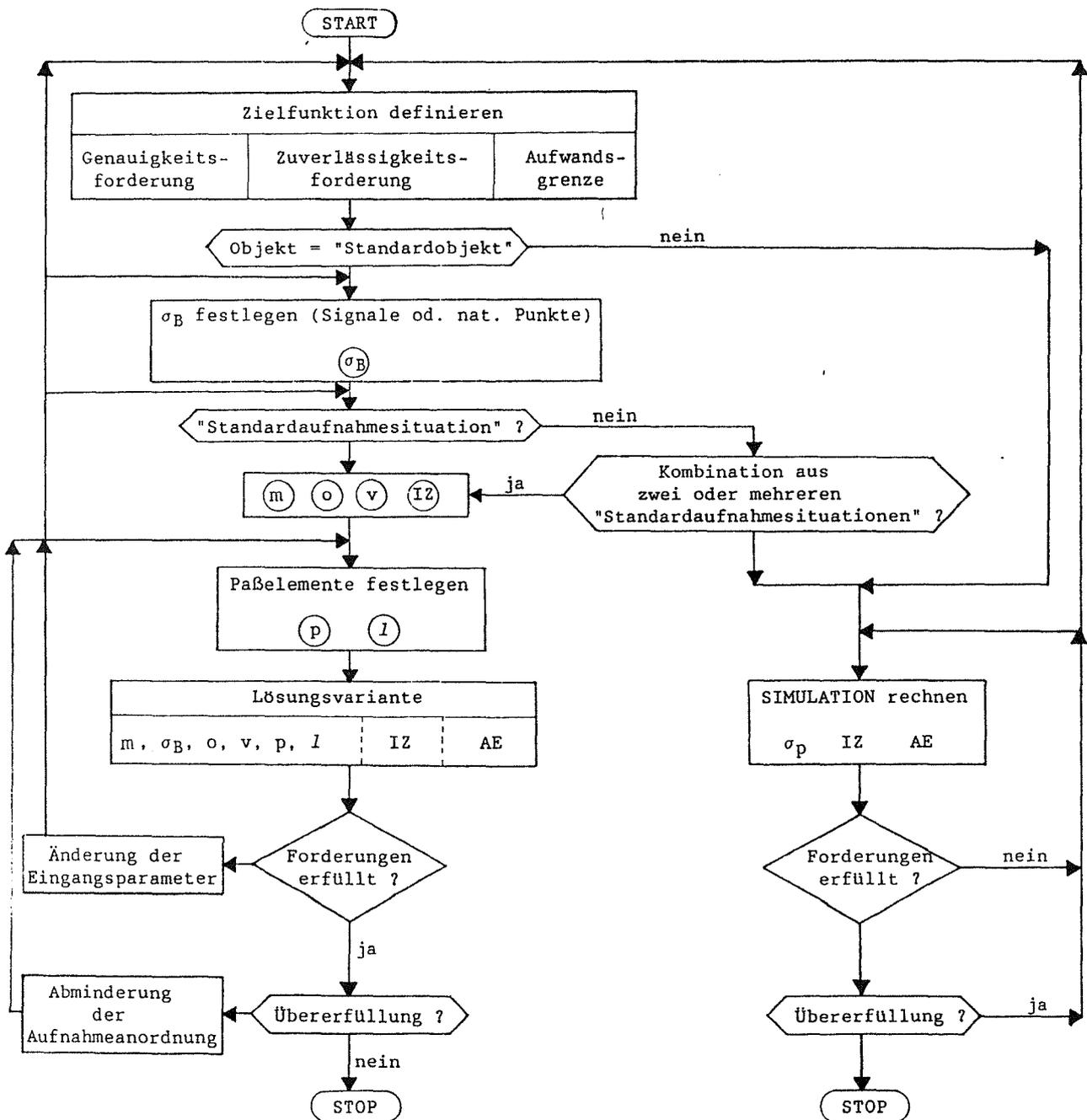


Abb. 8-1: Mögliche iterative Vorgangsweisen bei der Aufnahmeplanung für ein ingenieurphotogrammetrisches Projekt

Ausgehend von einer meist vorgegebenen Zielfunktion (Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Aufwand) und einem vorgegebenen Objekt - und damit vorgegebener Verteilung der Neupunkte - sind eine Fülle von Entscheidungen zu treffen. Ein Beispiel soll die Vorgangsweise näher erläutern:

An einem Hochhaus, mit einer Grundfläche von 10 x 12 Meter und einer Höhe von 40 Metern, sollen für eine Fassadenverkleidung an allen vier Seitenflächen Punkte bündelphotogrammetrisch bestimmt werden. Die Genauigkeit der Neupunkte soll sowohl in der Lage als auch in der Tiefe  $\pm 1$  mm betragen. Das entspricht einem räumlichen Punktlagefehler von  $\pm 1.7$  mm. Hohe Zuverlässigkeit und möglichst geringe Kosten werden angestrebt, womit aber auch schon die Zielfunktion definiert wäre.

Die Verteilung der Neupunkte an den vier Seitenflächen des Hochhauses entspricht etwa dem Standardobjekt "Turm" (siehe Kap. 7.7). Die Anpassung der tatsächlichen Objektgröße an das entsprechende Testobjekt erfolgt mit Hilfe einer Strecke. In diesem Beispiel wählt man am günstigsten die Richtung der größten Objektausdehnung - die Objekthöhe. Die Höhe des Hochhauses beträgt 40 Meter. Das Testobjekt hat eine Höhe von 45 Metern. Daraus ergibt sich ein Objektfaktor von etwa 0.9.

Nun hat man die Entscheidung zu treffen, ob die zu vermessenden Punkte signalisiert werden sollen oder ob mit natürlichen Punkten das Auslangen gefunden werden kann. In diesem Beispiel sollen die Fensterecken recht gut definiert sein, so daß man zunächst einmal die Vermessung mit natürlichen Punkten plant und so Kosten für die Signalisierung spart. Damit ist aber der erste Parameter für die Genauigkeitsabschätzung bereits festgelegt. Die Genauigkeit der Bildkoordinatenmessung für gut definierte, aber nicht-signalisierte Punkte beträgt etwa  $\pm 10$   $\mu$ m.

Danach ist auf Grund der Objektgröße, der örtlichen Gegebenheit, des vorhandenen Instrumentariums, der Sichthindernisse, usw. die Entscheidung zu treffen, ob eine "Standardaufnahmevariante" benutzt werden kann oder nicht. Eine gute Entscheidungshilfe dafür stellt ein eventuell vorhandener Grundrißplan dar, aus dem mögliche Aufnahmeentfernungen, Sichthindernisse und sonstige Aufnahmegegebenheiten entnommen werden können.

Im Falle des Testobjekts "Turm" wurden neun verschiedene Aufnahmevarianten durchgerechnet (Version A - I). Die Aufnahmevariante A als sogenannte "Minimalversion" mit nur vier Aufnahmen scheidet aus, da die geforderte hohe

innere Zuverlässigkeit nicht gegeben ist ( $IZ = \infty$ ). Die restlichen Versionen erreichen sehr gute Werte für die innere Zuverlässigkeit von 5.6 bis 4.9. Damit ist bei diesen acht Versionen zunächst die Zuverlässigkeitsforderung erfüllt.

Als Aufnahmekamera soll in diesem Beispiel nur eine Weitwinkelkamera zur Verfügung stehen. Damit scheidet die Versionen C, D, E und G aus, die zumindest teilweise auch aus Überweitwinkelaufnahmen bestehen. Es verbleiben die Varianten B, F, H und I. Mit Hilfe der Kennwerte der Tabelle 7-8 und sonstiger Forderungen und Gegebenheiten am Aufnahmeort entscheidet man sich, falls überhaupt möglich, für eine dieser Varianten. In diesem Beispiel gehen wir davon aus, daß eine Hubkranz (mit einer Hubhöhe von 20 Metern) zur Verfügung steht, und daß keine horizontalen Frontalaufnahmen auf die Seitenflächen des Hochhauses verlangt sind. Aus diesen Forderungen und unter Berücksichtigung der Tab. 7-8 fällt die Entscheidung zum Beispiel auf die Variante H. Aus der Tab. 7-8 können jetzt unmittelbar die Genauigkeitswerte  $\sigma$  und  $v$ , der Mittelwert für die innere Zuverlässigkeit  $IZ$  und die Aufwandskennzahl  $AE$  entnommen werden. Die in der Tab. 7-8 angegebene mittlere Bildmaßstabszahl  $m$  ist aber noch mit dem schon zuvor bestimmten tatsächlichen Objektfaktor zu multiplizieren.

Die nächste Entscheidung ist die Festlegung der Paßelemente. Hier spielen wieder Wirtschaftlichkeitsüberlegungen unter Einbeziehung von örtlichen Gegebenheiten eine große Rolle. Man entscheidet sich zum Beispiel für die Variante 4 (acht Vollpaßpunkte) und erhält damit den Faktor  $p$ , einen weiteren Eingangsparameter für die Genauigkeitsabschätzung. Weiters geht man davon aus, daß die Genauigkeit der Paßpunkte etwa der Genauigkeit der Photogrammetrie entspricht ( $m \cdot \sigma_B \cdot \sigma$ ). Dann ist der Faktor  $l$  (Lagerungsgenauigkeitsfaktor) gleich Null und braucht nicht weiter berücksichtigt werden. Damit ist aber eine sogenannte "Startlösung" gefunden. Es sind damit sowohl sämtliche Faktoren für die Genauigkeitsabschätzung ( $m, \sigma_B, \sigma, v, p, l$ ) als auch für die innere Zuverlässigkeit ( $IZ$ ) als auch der notwendige Aufwand ( $AE$ ) festgelegt.

Die nächste Abfrage lautet jetzt: Sind die Forderungen der Zielfunktion erfüllt? Die Forderungen dieser Funktion können jetzt in jeder Hinsicht erfüllt sein, oder eine oder mehrere Forderungen sind noch nicht erfüllt. Falls die Forderungen erfüllt sind, stellt man sich noch die Frage nach einer etwaigen "Übererfüllung". Es kann zum Beispiel die Genauigkeit und/oder die

Zuverlässigkeit zu gut sein. Dann wird man Maßnahmen treffen, die auf eine Reduzierung des Aufwandes zielen. Das können vielleicht eine einfachere Aufnahmevariante oder weniger Paßelemente sein. Wo die Aufnahmeanordnung vermindert werden soll, liegt im Ermessen des Anwenders. Die Tabellen im Kapitel 7. und die Diagramme in den Kapiteln 3. und 6. sollen hier eine Hilfestellung bieten.

Doch zurück zu unserem Beispiel. Wir haben also eine Startlösung gefunden. Mit Hilfe der Genauigkeitsfaktoren aus Tab. 7-8 (Variante H):

$$m = 358 \cdot 0.9 = 322$$

$$\sigma_B = \pm 10 \mu\text{m}$$

$$o = 0.95$$

$$v = 0.45$$

$$p = 0.7$$

$$l = 0$$

und dem Genauigkeitgesetz (3-5) ergibt sich folgender mittlerer räumlicher Punktlagefehler:  $\sigma_p = 322 \cdot 0.01 \cdot (0.95 + 0.45 \cdot 0.7) = \pm 4 \text{ mm}$ . Damit ist aber die geforderte Genauigkeit nicht eingehalten. Die Forderung nach hoher Zuverlässigkeit ist mit dem sehr guten Wert für IZ von 5.3 (siehe Tab. 7-8) ausreichend erfüllt. Eine Änderung der Startlösung hat sich in erster Linie nach einer Genauigkeitssteigerung mit möglichst geringer Aufwandssteigerung zu richten. Diese Aufnahmeplanung wurde zunächst mit nichtsignalisierten Punkten kalkuliert ( $\sigma_B = \pm 10 \mu\text{m}$ ). Eine Signalisierung der Punkte bringt aber eine beachtliche Genauigkeitssteigerung ( $\sigma_B = \pm 5 \mu\text{m}$ ):

$$\sigma_p = 322 \cdot 0.005 \cdot (0.95 + 0.45 \cdot 0.7) = \pm 2 \text{ mm}$$

Die Aufwandskennzahl erhöht sich nun um die Kosten der Signalisierung; an der Kennzahl für die innere Zuverlässigkeit ändert sich gar nichts. Der mit dieser Maßnahme erreichte mittlere räumliche Punktlagefehler von  $\pm 2 \text{ mm}$  ist zwar schon ein recht guter Wert, liegt aber doch noch über der geforderten Genauigkeit von  $1.7 \text{ mm}$ . Man kann jetzt zum Beispiel bei der Paßpunktverteilung ansetzen. Mißt man an Stelle der acht Paßpunkte (Variante 4), 16 Vollpaßpunkte (Variante 6), so reduziert sich der p-Faktor von 0.7 auf 0.3. Dies wirkt sich in einer Genauigkeitssteigerung des mittleren räumlichen Punktlagefehlers wie folgt aus:

$$\sigma_p = 322 \cdot 0.005 \cdot (0.95 + 0.45 \cdot 0.3) = \pm 1.7 \text{ mm}$$

Die Verdoppelung der Paßpunktanzahl wirkt sich natürlich auch geringfügig in der Aufwandskennzahl aus. Damit sind aber die Forderungen der Zielfunktion

ausreichend genau erfüllt. Man hat damit eine Aufnahmevariante gefunden, die unter Einbeziehung vieler Randbedingungen (nur Weitwinkelkamera vorhanden; Hubkanzel vorhanden; usw.) eine wirtschaftlich recht akzeptable Lösung darstellt.

## 8.2 Praktische Durchführung

Das auszumessende Objekt wird, falls erforderlich, zunächst einmal signalisiert. Dafür sind eigene Signalisierungshilfen entwickelt worden /Waldhäusl 1981/. Dann stellt man sich mit der Meßkammer näherungsweise in der zuvor überlegten Aufnahmeentfernung auf. Dieser Kamerastandpunkt wird in der Örtlichkeit weder vermarktet noch geodätisch eingemessen, sondern lediglich in einer Grundrißskizze festgehalten. Die Näherungswerte für Azimut und Zenitdistanz der Aufnahmerichtung werden notiert. Die Kamera wird im allgemeinen auch nicht horizontiert. Man kontrolliert nur mit Hilfe des Suchers oder der Mattscheibe der Kamera, ob auch wirklich der geplante Bereich abgebildet ist. Dann belichtet man die Platte.

Damit wird ohne besonderen Aufwand jede Richtung innerhalb dieses Strahlenbündels mit der im Kap. 3.1.1 besprochenen hohen Genauigkeit registriert. Dieses Strahlenbündel hat eigentlich unendlich viele Strahlen. Man hat damit nämlich nicht nur die Strahlen zu den Paßpunkten und zu den Meßpunkten registriert, sondern auch zu jedem am Photo sichtbaren Detail. So ist es auch zu einem späteren Zeitpunkt möglich, Details in den Photos anzumessen, die zum Zeitpunkt der Aufnahme noch nicht interessant waren (etwa für Beweis-sicherung bei Baumängeln, etc.).

Die kurzen Belichtungszeiten ermöglichen auch Aufnahmen von instabilen Plattformen aus, wie von einer Hubkanzel herunter oder aus einem Krankorb. Wenn es die Situation erfordert, können auch Freihandaufnahmen angefertigt werden.

Die benötigten Paßpunkte werden sodann im allgemeinen durch geodätisches Vorwärtsschneiden bestimmt. Damit ist auch schon der Außendienst erledigt. Nächster Schritt ist die Entwicklung der Platten und die Herstellung von sogenannten Arbeitsvergrößerungen, in denen das Punktnummernschema eingetragen wird. In der Praxis hat sich eine matrizenartige Numerierung als günstig erwiesen, da sie einerseits die Fehlersuche erleichtert, andererseits die komfortable Weiterverarbeitung der Daten ermöglicht. Für die anschließende Messung der Bildkoordinaten stehen heute leistungsfähige,

preisgünstige Monokomparatoren und die analytischen Auswertegeräte zur Verfügung.

Damit liegen alle Eingabedaten für die photogrammetrische Punktbestimmung mit Hilfe der Bündelmethode vor. Es sind dies:

- die gemessenen Bildkoordinaten der Paß-, Neu- und Verknüpfungspunkte,
- die geodätisch bestimmten Paßelemente (Paßpunkte, Paßstrecken, usw.),
- die Elemente der inneren Orientierung der verwendeten Kamera,
- Näherungswerte für die Aufnahmerichtungen.

Als Ergebnis des Bündelblockausgleichs erhält man nicht nur die Koordinaten der Neupunkte und die Elemente der äußeren Orientierung der einzelnen Bündel, sondern auch die dazugehörenden mittleren Fehler und die Kovarianzen zwischen den Unbekannten. Ein hochentwickeltes Bündelausgleichsprogramm liefert nicht nur Ergebnisse in Form von Koordinatenlisten, darüber hinaus aber auch noch graphische Ergebnisse (Grundriß, Aufriß, Schnitte, Soll-Ist-Vergleich in Vektordarstellung, Histogramme, usw.).

## 9. Praktische Beispiele

Im folgenden werden einige typische Anwendungen der terrestrischen Bündelphotogrammetrie vorgestellt. Es werden zunächst die Überlegungen und die Vorgangsweise bei den einzelnen Projekten beschrieben. Anschließend wird die tatsächlich erreichte Genauigkeit der mit Hilfe des Genauigkeitgesetzes im Kapitel 3.3 a priori bestimmten Genauigkeit gegenübergestellt. Die erreichte Zuverlässigkeit und der notwendige Arbeitsaufwand werden ebenfalls mit den entsprechenden Formeln des Kap. 4. (Zuverlässigkeit) bzw. Kap. 5. (Aufwandsberechnung) verglichen.

### 9.1 Bauaufnahme "AKADEMIE"

Um für eine geplante Sanierung der Fassaden der Akademie der Bildenden Künste in Wien entsprechende maßstäbliche Unterlagen zu haben, wurde eine photogrammetrische Vermessung geplant und durchgeführt. Das Objekt sollte rundherum von allen Seiten und vom Dachfirst bis zur Unterkante des Sockels photogrammetrisch erfaßt sein. Jede Gebäudeöffnung sollte mit mindestens einem koordinativ bekannten Punkt festgelegt sein. Diese Punkte sollten so ausgewählt sein, daß eine Innenaufmessung des Gebäudes anschließen kann.

Für die photogrammetrische Aufnahme stand die Wild P31-Kamera mit dem Weitwinkelobjektiv ( $c = 100$  mm) und dem Überweitwinkelobjektiv ( $c = 45$  mm) zur Verfügung. Es konnte überdies auf eine Hubkanzel für die Aufnahmearbeiten zurückgegriffen werden, um Sichthindernissen am Boden (Bewuchs, parkende Autos, usw.) ausweichen zu können. Gefordert war eine Genauigkeit von  $\pm 2$  cm für die koordinativ bestimmten Punkte. Von gewissen Fassadenteilen sollte auf stereophotogrammetrischem Wege eine Strichauswertung der Fassadenansicht und ein Fassadenschnitt anfertigbar sein. Die Orientierung der dafür benötigten Aufnahmen soll aus dem Bündelausgleich hervorgehen. In der Abbildung 9-1 ist in einer Grundrißskizze die Aufnahmeanordnung dargestellt.

Drei der vier Objektseiten (Fassaden 1, 2 u. 4) bieten relativ beengte Aufnahmeverhältnisse. Es wurden hier ausschließlich Überweitwinkel-aufnahmen angefertigt. Mit Hilfe der Hubkanzel wurden die Aufnahmen aus einer Höhe von circa 20 Metern (= halbe Objekthöhe) belichtet. Die vier Übereckaufnahmen (Photo 40, 50, 60 und 70 in Abb.9-1) wurden ebenfalls mit einer Überweitwinkelkammer, aber diesmal vom Boden aus, registriert.

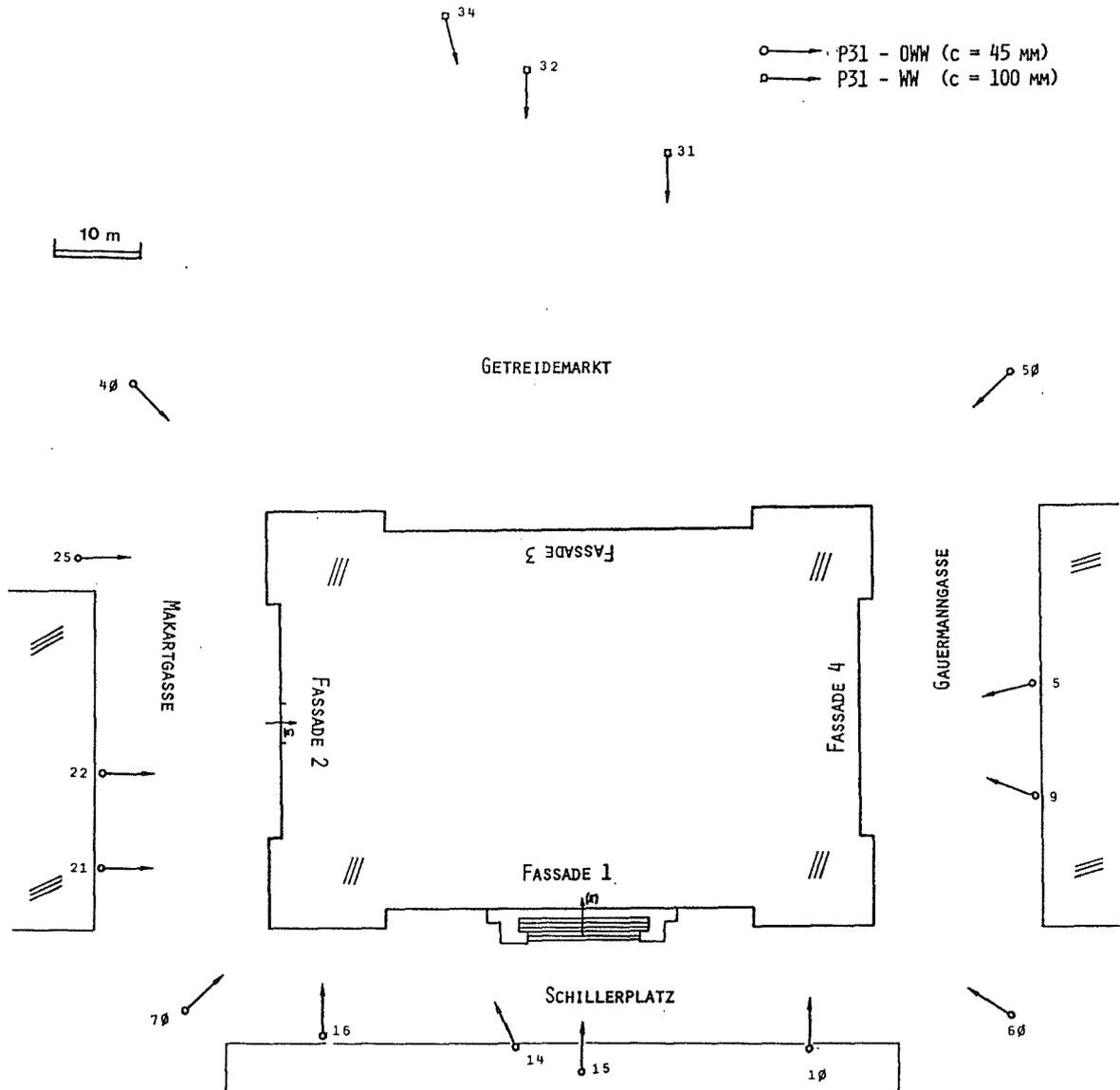


Abb. 9-1: Bündelanordnung - Projekt "AKADEMIE"

Bei der Fassade 3 mußte eine größere Aufnahmeentfernung gewählt werden, da die Hubkanzel nicht auf der dazwischenliegenden Wiese aufgestellt werden konnte. Die Aufnahmen vom Boden aus hätten große Sichtbehinderungen durch den Bewuchs mit sich gebracht. Es wurde hier das Weitwinkelobjektiv eingesetzt. Das Objekt wird durch insgesamt 16 Aufnahmen (13 Überweitwinkelaufnahmen, 3 Weitwinkelaufnahmen) erfaßt (siehe Abb. 9-1).

Für die Bündelphotogrammetrische Auswertung standen noch 16 Vollpaßpunkte zur Verfügung, die geodätisch durch räumliches Vorwärtsschneiden bestimmt wurden. Es handelte sich dabei wie bei den Neupunkten um natürliche Punkte (Fensterecken, Gesimskanten, Leibungsecken, usw.).

Die 16 Aufnahmen wurden am analytischen Auswertegerät WILD-AC1 im Monokomparatormodus ausgemessen. Der Block bestand insgesamt aus 256 Bildkoordinaten für die 92 Neupunkte. Der mittlere Gewichtseinheitsfehler des Bündelausgleichs ergab sich zu  $\pm 7 \mu\text{m}$ .

Beim Objekt AKADEMIE handelt es sich um einen liegenden Quader (ähnlich wie in Kap. 7.4 beschrieben). Vergleicht man die Abmessungen des Testobjekts "Quader" im Kap. 7.4 mit dem Objekt AKADEMIE, so stellt man einen Objektfaktor von ungefähr drei fest.

Die tatsächliche Aufnahmeanordnung hat eine gewisse Ähnlichkeit mit der simulierten Testanordnung Quader - Version E (siehe Kap. 7.4.2.5). Es werden dabei zusätzlich zu den vier Übereckaufnahmen Frontalaufnahmen auf die vier Seitenflächen des liegenden Quaders angefertigt. In der Tab. (7-4) sind dafür die Kennwerte für die Genauigkeit und Zuverlässigkeit angegeben. Setzt man nun diese Werte in das Genauigkeitgesetz (3-5) ein, so erhält man den zu erwartenden mittleren Punktlagefehler:

$$\sigma_p = (271 \cdot 3) \cdot 0.01 \cdot (1.1 + 1.0 \cdot 0.4) = \underline{\pm 12 \text{ mm}} .$$

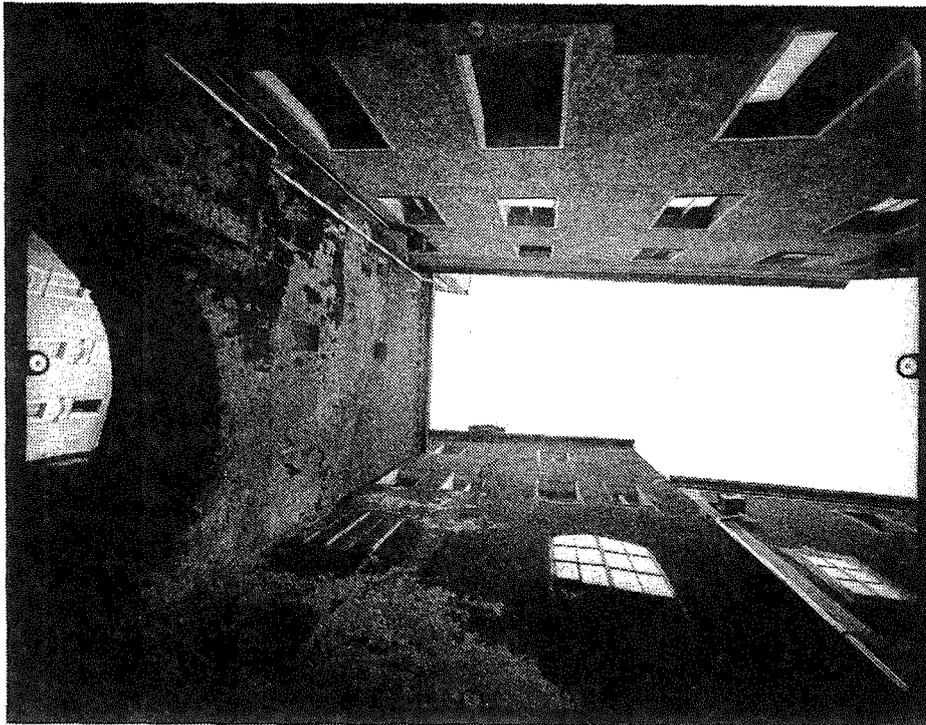
Der tatsächliche mittlere räumliche Punktlagefehler - berechnet mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz aus der tatsächlichen Ausgleichung - ergab sich beim Objekt AKADEMIE mit  $\pm 14 \text{ mm}$ . Auch der Kennwert für die innere Zuverlässigkeit stimmt recht gut mit dem tatsächlich erreichten Wert von 6.0 überein (IZ aus Tab. 7-4: 6.1).

Der Vergleich des tatsächlichen Aufwands mit dem aus Kap. 5. (Aufwandsberechnung) errechneten Aufwand zeigt ebenfalls eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Mit den Formeln aus Kap. 5. berechnet man Gesamtkosten, bei denen die Geräte- und Materialkosten in Arbeitseinheiten (AE) ausgedrückt werden. Um einen Vergleich zu ermöglichen, ist der tatsächliche Aufwand ebenfalls in Arbeitseinheiten auszudrücken.

Tätigkeit	Aufwandsberechnung mit den Formeln aus Kap. 5.	Tatsächlicher Aufwand
Paßpunktmessung	Formel (5-2)  $AE = n \cdot F \cdot s$ $16 \cdot 0.7 \cdot 1.32 = 14.8$	6 Std. Außendienst 1 qual. Techniker à 1.0      6.0 1 Techniker      à 0.8      4.8 1 Hilfskraft      à 0.5      3.0  <div style="text-align: right;"><math>\Sigma</math>    <b>13.8</b></div>
Photographieren	Formel (5-3)  $AE = n \cdot F$ $16 \cdot 1.0 = 16.0$	7 Std. Außendienst 1 qual. Techniker à 1.0      7.0 1 Hilfskraft      à 0.5      3.5  Miete Aufnahmekammer (P31-ÜWW; P31-WW)      3.5  Photomaterialkosten      1.5  <div style="text-align: right;"><math>\Sigma</math>    <b>15.5</b></div>
Bildkoordinatenmessung	Formel (5-4)  $AE = n \cdot F_1 + m \cdot F_2 =$ $16 \cdot 0.25 + 256 \cdot 0.024 =$ $10.1$	4.5 Std. Meßzeit 1 Techniker à 0.8      3.6  4.5 Std. Amortisationskosten (Monokomparator)      6.8  <div style="text-align: right;"><math>\Sigma</math>    <b>10.4</b></div>
Bündelblockberechnung	Formel (5-5)  $AE = F_1 + n \cdot F_2 + l \cdot F_3 + k \cdot F_4 =$ $4 + 16 \cdot 0.5 + 0.02 \cdot 92 =$ $13.8$	6 Std. 1 Akademiker à 1.0      6.0  6 Std. Amortisationskosten (Hard- u. Software)      6.0  <div style="text-align: right;"><math>\Sigma</math>    <b>12.0</b></div>
Overhead	Pauschale 25% <b>13.7</b>	2 Std. Aufnahmeplanung 1 Akademiker à 1.0      2.0  5 Std. Vorbereitung d. Bilder für die Messung 1 qual. Techniker à 1.0      5.0  4 Std. Photoarbeiten 1 Techniker à 0.8      3.2 Amortisationskosten (Duka)      1.0  3 Std. Vorbereitende Arbeiten u. Lieferung zusammenstellen 1 qual. Techniker à 1.0      3.0  <div style="text-align: right;"><math>\Sigma</math>    <b>14.2</b></div>
$\Sigma$	<b>68.4</b>	<b>65.9</b>

## 9.2 Bauaufnahme "PASSAU"

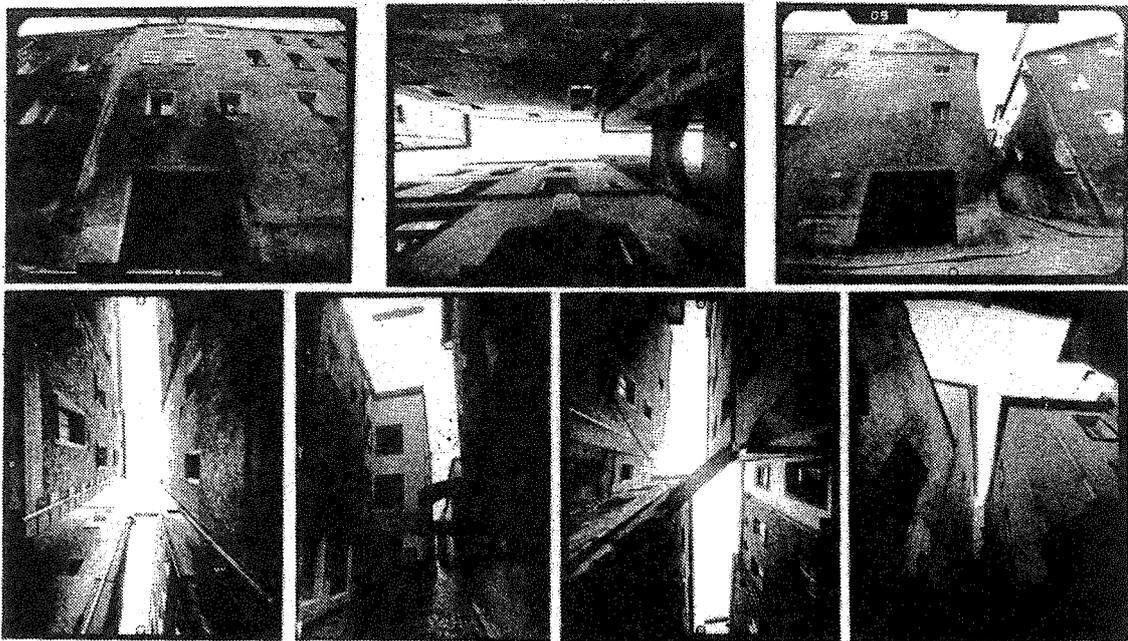
Beim nächsten Projekt geht es wiederum um eine photogrammetrische Bauaufnahme /Kraus, Schlögelhofer, Waldhäusl, Wehdorn 1984/. Es handelt sich dabei um die Altstadt von Passau. Insgesamt sollten 50 000 m<sup>2</sup> Fassadenfläche vermessen werden. Das entspricht cirka 2.5 km Fassadengrundrißlänge. Das eigentliche Problem war nicht der Umfang der Arbeit, sondern vielmehr die beengten Raumverhältnisse, wie in den meisten Altstädten üblich. Die Straßenbreiten betragen oft nur ein bis zwei Meter, für die herkömmliche Stereophotogrammetrie fast unmöglich zu bewältigen. Mit der photogrammetrischen Bündelmethode kann dieses Problem befriedigend gelöst werden /Steinkellner 1982/. Man registriert mit einer Meßkammer mit Superweitwinkelobjektiv oder auch für etwas niedrigere Genauigkeit mit einer Teilmeßkammer /Wester-Ebbinghaus 1981/ - ebenfalls mit einem starken Weitwinkelobjektiv - beliebig im Raum liegende Richtungs-bündel.



*Abb. 9-2: P31-ÜWW-Aufnahme (in den Zenit gerichtet)  
in einer engen Gasse in der Altstadt von Passau*

Man fertigt entweder ganz steil nach oben gerichtete Aufnahmen an, wenn die Fassaden nur auf einer Straßenseite aufzunehmen sind. Oder man photographiert überhaupt in den Zenit - senkrecht nach oben - vor allem dann, wenn die Fassaden von beiden Straßenseiten aufzunehmen sind (siehe Abb.9-2). Dazu wird

die Kamera ohne Stativ eingesetzt. Sie wird einfach in der Mitte der Gasse auf den Boden gelegt; dann wird ungefähr senkrecht nach oben photographiert. Je nach Straßenbreite ist damit aber der unterste Fassadenbereich photographisch nicht erfaßt. Deshalb werden zusätzlich in einem etwas größeren Abstand annähernd horizontal angeordnete Strahlenbündel in Richtung der Gassen- bzw. Straßenachse angefertigt. Diese zusätzlichen Photos erfassen nicht nur die unteren Fassadenflächen, sondern dienen auch zur Versteifung des Netzes der Strahlenbündel. Die Abb. 9-3 zeigt einige dieser Strahlenbündel.



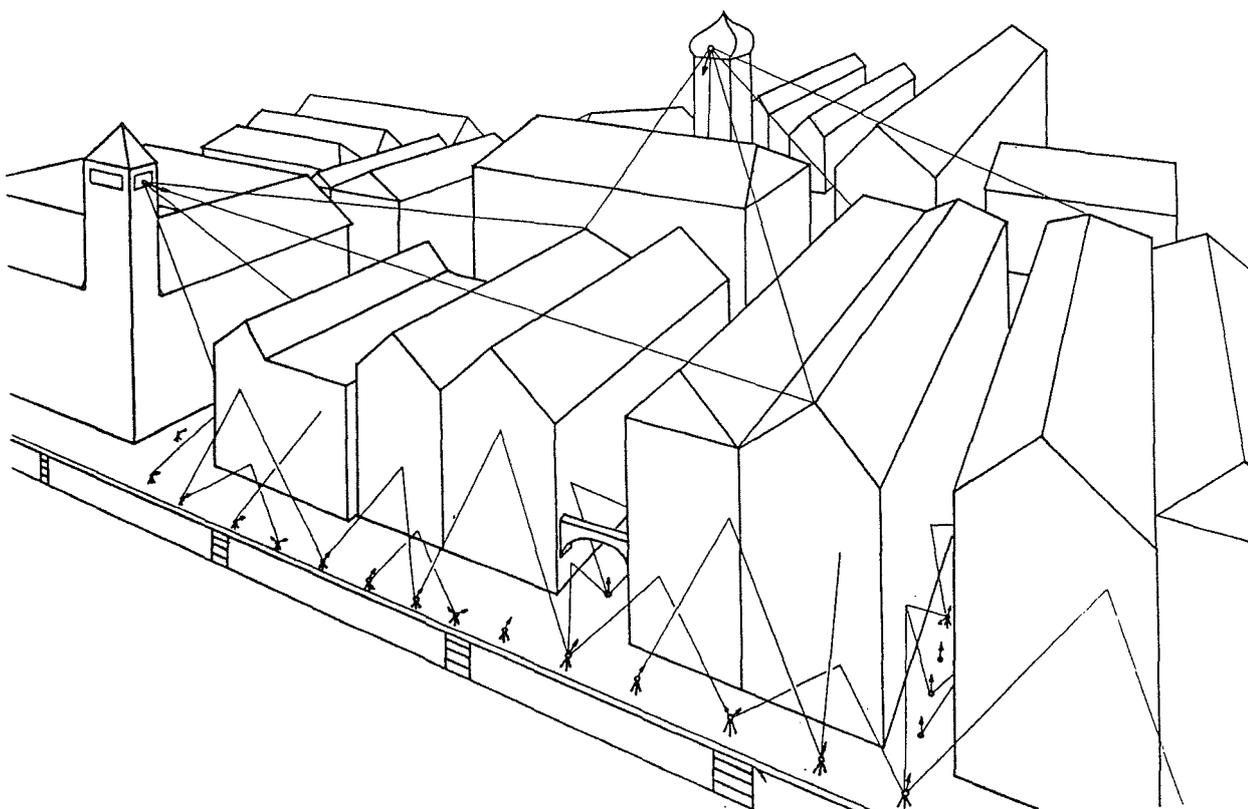
*Abb. 9-3: Eine kleine Auswahl von Meßbildern für eine Bauaufnahme in einer engen Gasse (Höllgasse - Passau)*

Der Paßpunktauswahl fällt bei solchen Aufnahmen ein besonderes Gewicht zu. Einerseits sollten die Paßpunkte wieder möglichst gut über das ganze Objekt verteilt sein, andererseits ist in den engen Gassen der Aufwand für die Messung der Paßpunkte sehr hoch. Man muß nämlich mit Zenitokularen arbeiten; das Anvisieren und richtige Identifizieren der entsprechenden Punkte wird sehr mühsam. Man ist daher bemüht, mit möglichst wenigen Paßpunkten auszukommen. Wie sich die Paßpunktverteilung auf die Genauigkeit der photographisch bestimmten Punkte auswirkt, kann dem Diagramm in Abb. 3-2 entnommen werden.

In die Bauaufnahme - meistens im Maßstab 1:50 - ist auch die Dachlandschaft einzubeziehen. Zunächst denkt man in diesem Fall an eine Luftbildvermessung.

Der dazu notwendige Bildmaßstab von 1:1500 mit einer Weitwinkelkamera würde Flughöhen erfordern, die aus Sicherheitsgründen verboten sind.

Die Bündelphotogrammetrie bietet auch hier eine elegante Lösung an. Man photographiert - mehr oder weniger freihändig - von Kirchtürmen und ähnlich exponierten Positionen herunter und verknüpft die einzelnen Strahlenbündel mit den Aufnahmen vom Boden aus zu einem einzigen Bündelblock. Die Abbildung 9-4 zeigt so eine typische Aufnahmesituation.



*Abb. 9-4: Typische Bündelanordnung für eine photogrammetrische Bauaufnahme in engen Gassen*

Mit Hilfe der Bündelausgleichung werden dann die Koordinaten aller charakteristischen Punkte simultan im System der Stadtvermessung bestimmt. Der Lieferumfang an den Architekten umfaßt:

- Koordinaten und Punktnummern der markanten Gebäudepunkte mit ihren mittleren Fehlern sowohl im Koordinatensystem der Stadtvermessung als auch in einem Fassadenkoordinatensystem,
- Kartierung und Numerierung der markanten Gebäudepunkte zu den einzelnen Fassadenebenen
- photographische Entzerrungen, zumindest von Teilen der Fassade, bezogen auf die einzelnen Objektebenen.

Was der Architekt aus diesen Unterlagen macht, zeigt der rechte Teil der Abb. 9-5. Diese Arbeitsteilung bewirkt, daß künstlerisch hochwertige Produkte entstehen, deren Gerippe von einer genauen Vermessung stammt.

Einige technische Details eines typischen Bündelblocks in einer engen Gasse (Höllgasse) in Passau:

Straßenlänge: 60 m

Straßenbreite: 2 bis 6 m

Anzahl der Aufnahmen: 15 Stk. P31-ÜWW

Anzahl der Paßpunkte: 12 Vollpaßpunkte

Anzahl der Bildkoordinaten: 1634

Anzahl der Unbekannten: 660

Redundanz: 974

Mittlerer Gewichtseinheitsfehler des Bündelausgleichs:  $\pm 14 \mu\text{m}$

Mittlerer räumlicher Punktlagefehler:  $\pm 2.1 \text{ cm}$

Auch bei diesem Projekt wurde eine zufriedenstellende Übereinstimmung des tatsächlich erreichten mittleren räumlichen Punktlagefehlers von  $\pm 2.1 \text{ cm}$  mit dem nach der Formel (3-5) und den Kennwerten der Aufnahmeversion C in der Tab. (7-3) berechneten a priori Wert

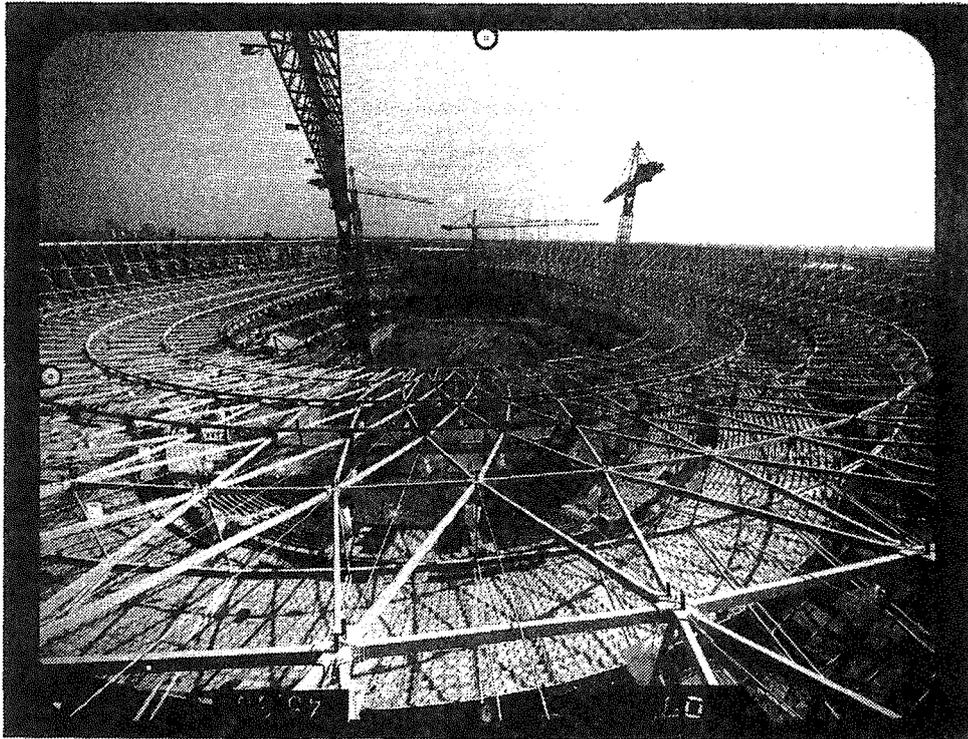
$$\sigma_p = 336 \cdot 0.01 \cdot (1.0 + 3.1 \cdot 1) = \pm 14 \text{ mm}$$

festgestellt.



### 9.3 Überdachung des Wiener Praterstadions

Im Zuge der Generalsanierung des Wiener Praterstadions sollten auch die Zuschauertribünen überdacht werden. Das Dach ist für den Schutz von 64.000 Zuschauern ausgelegt. Die überdachte Fläche beträgt zirka 32.000 m<sup>2</sup>. Der Dachring von 48 Meter Breite spannt sich in geschweifter Form frei über eine Ellipse von 270 x 215 m und gehört damit zu den weitest gespannten Überdachungen der Welt.



*Abb. 9-6: Die Dachkonstruktion in einer Übersichtsaufnahme*

Die Konstruktion ist so ausgeführt, daß keine Stützpfeiler die freie Sicht auf das Spielfeld behindern. An den Geodäten wurde die Aufgabe herangetragen, die 784 Knoten der Stahlkonstruktion innerhalb weniger Stunden exakt dreidimensional zu erfassen und die Abweichungen zur Soll-Position nach nur wenigen Tagen anzugeben /Schlögelhofer 1986/.

Der von der Firma VOEST-Alpine HEBAG ausgeführte Stahlbau besteht aus einer Hängeschale, die aus einem äußeren Druckring und einem inneren Zugring mit einem dazwischenliegenden Stabwerk aus Rechteckrohren und Rundstählen gebildet wird. Das wesentliche Element dieser Konstruktion bilden sechsstrahlige, mit Spannseilen radial verbundene Knoten. In diese werden Stahlträger eingeführt, die während der Montage noch beweglich sind.

Nach Abschluß der Montage werden die Knoten mit Spezialbeton ausgegossen; das Netzwerk wird damit starr. Durch Änderung der Länge der Spannseile können die Knoten während der Montage in ihrer räumlichen Position verändert werden. Nachdem die Konstruktion entsprechend den Planmaßen auszuführen war, sollte festgestellt werden, inwieweit die Knoten ihre räumliche Soll-Position eingenommen hatten.

Es wurde zunächst erwogen, diese Knoten geodätisch vom Boden aus mittels räumlicher Vorwärtsschnitte zu vermessen. Dagegen stellten sich jedoch zwei wesentliche Hindernisse:

- Um das Gewicht der Dacheindeckung und der Füllung der Knoten bereits im Stadium der Montage zu realisieren, wurde an jeden Knoten ein mit 150 l Wasser gefüllter Plastiksack gehängt, der die Visur zu den Knoten behinderte (siehe Abb. 9-6).
- Die Sonneneinstrahlung verursacht eine Ausdehnung der Stahlkonstruktion. Die räumliche Erfassung der zirka 800 Knoten sollte aus diesem Grund innerhalb eines möglichst kurzen Zeitraumes erfolgen.

Eine photogrammetrische Vermessung kann diese Hindernisse überwinden. Einerseits dokumentieren die photographischen Aufnahmen den jeweiligen Zustand in kürzester Zeit, während die eigentliche Messung später erfolgt. Andererseits standen vier Baukräne zur Verfügung, von denen aus der gesamte Innenraum des Stadions erreicht werden konnte. Die Kräne waren auch ausreichend hoch, um die Konstruktion von oben ohne Sichthindernisse aufnehmen zu können. Ausgehend von diesen Überlegungen beauftragte der Ingenieurkonsulent Dr. Palfinger das Institut für Photogrammetrie der TU Wien mit der Durchführung der photogrammetrischen Arbeiten.

Zunächst wurden an den Sockeln der Stützpfeiler und im unteren Bereich der Tribüne kleine Metallplättchen angeklebt, die als Paßpunkte für die spätere Bündelausgleichung dienen konnten (PP in Abb. 9-7). Die Koordinaten dieser 60 Signale wurden vom Ingenieurbüro Dr. Palfinger mittels überbestimmter räumlicher Vorwärtsschnitte geodätisch ermittelt.

Die photogrammetrische Aufnahmeanordnung wurde so gewählt, daß jeder zu bestimmende Punkt in mindestens vier Photos abgebildet ist und die Raumstrahlen möglichst gute Schnitte ergeben. Erschwerend kam bei diesem Projekt hinzu, daß die Dachkonstruktion eine Tiefenausdehnung von fast 50 Meter hat. Deshalb

wurden zusätzlich zum dreifach deckenden Bildverband mit einer Weitwinkelkamera (UMK-WW) noch stark geneigte Aufnahmen mit einer Überweitwinkelkamera gemacht (siehe Abb.9-7). Diese Aufnahmen mit der Wild P31 dienten in erster Linie dazu, den Bündelblock im Außenbereich zu versteifen.

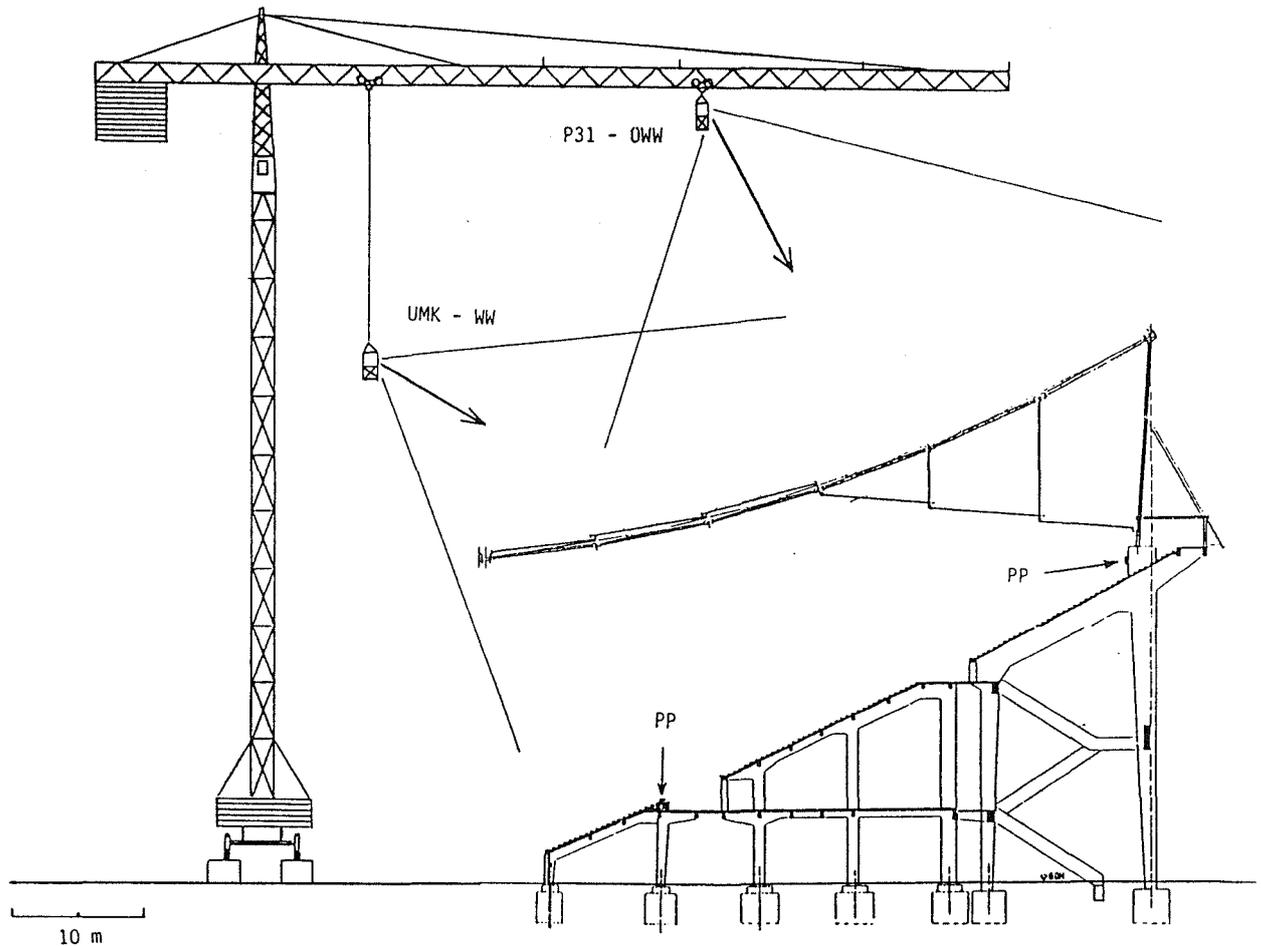


Abb. 9-7: Aufnahmeanordnung im Querschnitt

Aus dieser Aufnahmeanordnung ergaben sich Bildmaßstäbe von etwa 1:150 bis 1:500. Durch eine exakte Planung der Aufnahmeanordnung (Aufnahmeort und Aufnahme- richtung) war es möglich, ca. 25 Aufnahmen in einer Stunde zu machen. Es wurde mit zwei Meßkammern gleichzeitig gearbeitet, um die Aufnahmezeit und damit den thermischen Einfluß auf die Dachkonstruktion gering zu halten. So konnte innerhalb von drei Stunden mit 72 Aufnahmen die räumliche Lage der Konstruktion erfaßt werden.

Für die anschließende Berechnung standen 10 704 gemessene Bildkoordinaten für die 2997 Unbekannten des Bündelausgleichs zur Verfügung. Der mittlere Ge-

wichtseinheitsfehler der gemessenen Bildkoordinaten ergab sich mit  $\pm 10 \mu\text{m}$ . Der mittlere Koordinatenfehler der Neupunkte schwankte zwischen  $\pm 0.5$  und  $\pm 1.5$  cm. Bei diesem Projekt waren nur die Paßpunkte signalisiert. Eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor 2 wäre problemlos durch Signalisierung der Neupunkte möglich. Für künftige Projekte sollten schon bei der Fertigung der Knoten entsprechende Signale vorgesehen werden.

Die Baufirma und den Statiker interessierte in erster Linie, ob die Toleranzen von Fertigung und Montage eingehalten wurden und wo und wieviel die Konstruktion von ihrer Soll-Lage abwich. Dazu wurde ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt und das Ergebnis sowohl in graphischer Form als auch in Form von Koordinatenlisten erstellt.

WIENER PRATERSTADION - DACHAUSWERTUNG

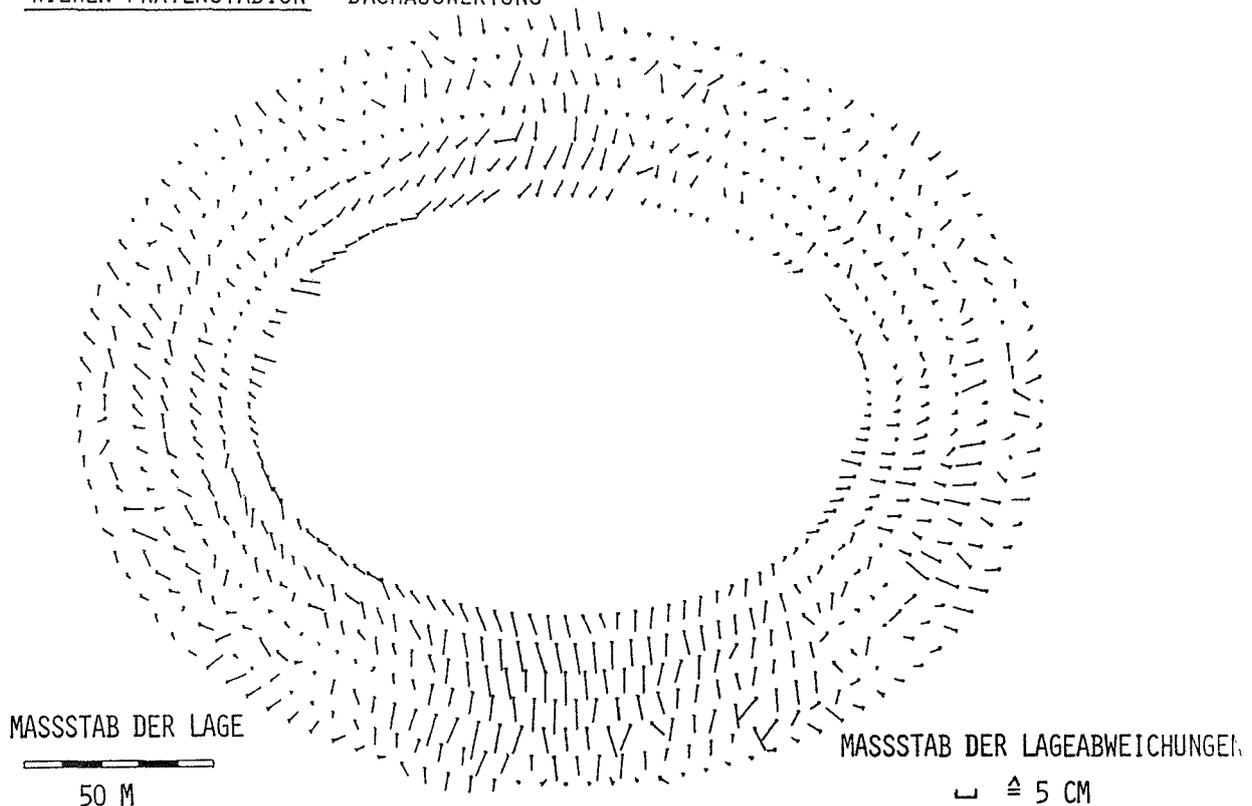


Abb. 9-8: Grundrißdarstellung der Lageabweichungen

Das Vektorbild in Abb. 9-8 zeigt die Lageabweichung der Knoten zu ihren Soll-werten. Zusätzlich zu diesem Grundriß wurden die Höhenabweichungen in einer axonometrischen Darstellung geliefert (Abb. 9-9). Diese graphischen Unterlagen erlauben einen schnellen Überblick über systematische Abweichungen der einzelnen Ringe der Konstruktion. So konnte rasch und exakt entschieden werden, an welchen Spannseilen noch Längenänderungen vorzunehmen waren.

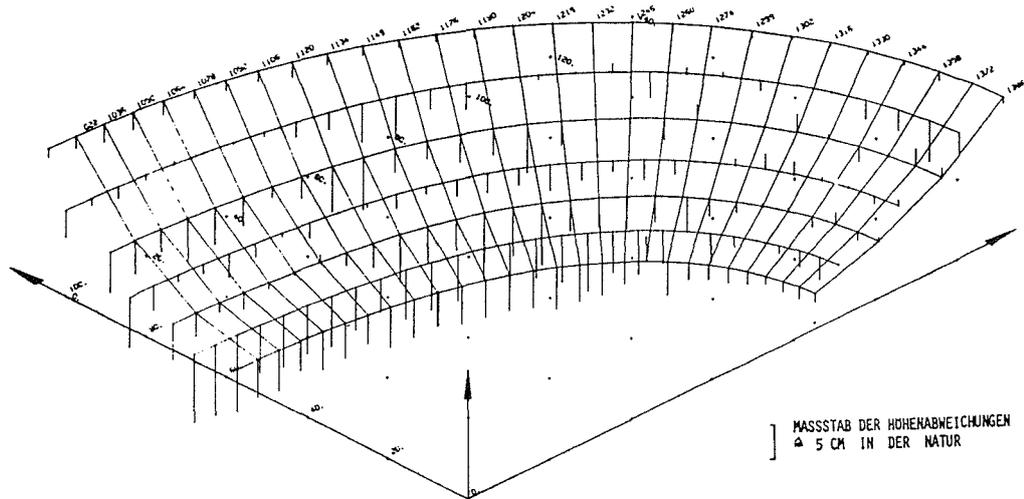


Abb. 9-9: Axonometrische Darstellung der Höhenabweichungen

Nach der ersten Korrektur wurde die photogrammetrische Vermessung wiederholt. Hier ist der zeitliche Ablauf besonders herauszustellen:

Samstag, 12.7., um 8 Uhr: Beginn der Aufnahme. Drei Meßkammern waren gleichzeitig im Einsatz. Anschließend Beginn der Entwicklung und überlappend Beginn der Meßarbeiten am AC1. Sonntag, 13.7., 20 Uhr: Beginn der Berechnung, und Montag, 5 Uhr: Ergebnisse in Form von Koordinatenlisten. Aufgrund der Ergebnisse der Wiederholungsmessung wurden nochmals Positionsänderungen der Knoten vorgenommen. Mit einer dritten Messung wurde dieser Iterationsprozeß abgeschlossen.

Das Objekt STADION - elliptische Form; Neupunkte in allen drei Raumrichtungen verteilt - entspricht keinem der vorgestellten "Standardobjekte". Für eine Abschätzung der Genauigkeit, Zuverlässigkeit und des Aufwands der photogrammetrischen Punktbestimmung ist es daher bei solchen Objekten sinnvoll, die geplante Aufnahmesituation rechnerisch zu simulieren.

Dazu braucht man zunächst grobe Näherungswerte der zu vermessenden Punkte. Diese erhält man entweder durch das Digitalisieren von Bauplänen, oder sie sind - wie im Falle des STADIONS - bereits als SOLL-Werte in digitaler Form vorhanden. Danach sind, wie im Kap. 6.1 beschrieben, ausgehend von den geplanten Aufnahmeorten, Aufnahmerichtungen und der vorhandenen Aufnahmekammer (innere Orientierung, Bildformat) die Bildkoordinaten zu rechnen. Mit diesen "synthetischen" Beobachtungen und einem Bündelausgleichungsprogramm kann dann die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der geplanten Aufnahmeanordnung überprüft werden. Dieser Ablauf ist im Diagramm in Abb. 8-1 bei "Standardaufnahmesituation" → "nein" dargestellt.

## 10. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde versucht, mit Hilfe umfangreicher Simulationsrechnungen Aussagen über die zu erwartende Genauigkeit, über die Zuverlässigkeit und den Aufwand der photogrammetrischen Punktbestimmung mit der Bündelmethode zu treffen. Eine für die Anwendung in der Praxis geeignete Genauigkeitsformel wurde ermittelt:

$$\sigma_p = m \cdot \sigma_B \cdot (1 + l) (o + v \cdot p)$$

Daraus können folgende grundsätzliche Aussagen zur Aufnahmeplanung für ein ingenieurphotogrammetrisches Projekt abgeleitet werden:

1) Die Bildmaßstabszahl  $m$  ist so klein wie möglich zu halten. Es soll das Aufnahmeobjekt möglichst formatfüllend erfaßt werden. Im allgemeinen wird man dazu die Kamera leicht aus der Horizontalen kippen müssen.

2) Man fertigt an Stelle von stereoskopischen Normalfallaufnahmen stark konvergente Aufnahmen an. Man muß zwar auf die Stereoskopie verzichten, erreicht aber wesentlich bessere Schnittbedingungen in den Objektpunkten. Damit ergeben sich günstige Schnittqualitätsfaktoren  $o$  und Verformungsfaktoren  $v$  im oben angeführten Genauigkeitgesetz. Das Diagramm in Abb. 6-18 verdeutlicht, welche Genauigkeitssteigerung durch Konvergenzaufnahmen möglich ist. Es konnte nachgewiesen werden, daß durch konvergente Aufnahmeanordnungen eine durchschnittliche Genauigkeitssteigerung von 30% erreicht wird.

3) Man plant die Bündelanordnung so, daß jeder Objektpunkt in mindestens drei, besser noch in vier Aufnahmen abgebildet ist. Bei einer Dreifachdeckung des Objekts ist die Bildkoordinatenmessung durchgreifend kontrolliert. Bei vier Aufnahmestrahlen zu einem Objektpunkt verbessert sich die innere Zuverlässigkeit nur mehr um durchschnittlich 10%. Die vierte Aufnahme gewährleistet aber für den Fall, daß ein Objektpunkt in dem einen oder anderen Photo nicht angemessen werden kann (Sichthindernis, Schatten, usw.), trotzdem noch eine ausreichende Kontrolle. Die zusätzlichen Aufnahmen verbessern überdies den Schnittqualitätsfaktor  $o$  und geringfügig auch den Verformungsfaktor  $v$ .

4) Sind die Projektionszentren einer guten und zuverlässigen Bündelanordnung in einer Ebene angeordnet, kann bei gleicher Anzahl von Aufnahmen durch eine grobe Verlagerung eines Projektionszentrums aus der Ebene heraus eine Genauigkeits- und Zuverlässigkeitssteigerung von etwa 5% erreicht werden.

- 5) Die Anzahl und vor allem die Verteilung der Paßpunkte beeinflussen die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung sehr stark. Die Paßpunkte sollen räumlich gut verteilt und am Objektrand angeordnet sein. Ein gedachtes räumliches Paßpunktpolyeder soll das Objekt in allen drei Raumrichtungen umschließen. Extrapolationen wirken sich sehr ungünstig auf den p-Faktor aus.
- 6) Die Auswirkung des Paßelementefaktors p auf die Auswertegenauigkeit steht in direktem Zusammenhang mit dem Verformungsfaktor v. Der ungünstige Einfluß eines schlechten p-Faktors kann durch einen guten v-Faktor kompensiert werden und umgekehrt. Bei schlechter Paßelementeanordnung ( $\rightarrow$  großes p) sollten Konvergenzaufnahmen eingesetzt werden, welche einem Verwinden und Ausschwingen des Bündelblocks entgegenwirken ( $\rightarrow$  kleines v).
- 7) Bei der Messung zusätzlicher Paßelemente ist zu beachten, daß vor allem der Vollpaßpunkt zu einer weiteren Genauigkeitssteigerung beiträgt. Zusätzlich gemessene Paßstrecken bringen recht wenig für die Genauigkeit der Punktbestimmung. Auch zusätzlich eingeführte Höhenpaßpunkte bringen bei den meisten Aufnahmevarianten nur eine ganz geringe Genauigkeitssteigerung (vgl. /Stark 1970/).
- 8) Die Genauigkeit der Paßelemente sollte der Genauigkeit der Photogrammetrie - berechnet nach der Beziehung  $\sigma_p = m \cdot \sigma_B \cdot o$  - entsprechen.

Durch Beachtung der oben angeführten Schlußfolgerungen können heute hervorragende Genauigkeiten mit der terrestrischen Bündelmethode erreicht werden. Eine weitere Genauigkeitssteigerung hat bei der Bildkoordinatenmeßgenauigkeit anzusetzen. Bei Einsatz von hochwertigen Auswertegeräten und Verwendung von herkömmlichen Signalen beträgt  $\sigma_B$  heute etwa  $\pm 4 \mu\text{m}$ . Durch Verwendung von speziellen retroreflektierenden Signalen kann besonders bei Schrägaufnahmen eine beachtliche Genauigkeitssteigerung erreicht werden (siehe /Ballik 1989/). Diese Art von Signalen erleichtert das Erkennen bei der manuellen Bildkoordinatenmessung und ermöglicht den Einsatz von Methoden der digitalen Bildverarbeitung zur automatischen Signalerkennung und Bildkoordinatenmessung. Mit geeigneten Korrelationsverfahren scheint eine Meßgenauigkeit der Bildkoordinaten von  $\pm 1 \mu\text{m}$  im Bereich des Möglichen zu sein (siehe /Brown 1986/, /Grün 1987/, u.a.). Unter Zugrundelegung dieser neuen Bildkoordinatenmeßgenauigkeit ergeben sich Steigerungen für die Genauigkeit der Objektkoordinaten um den Faktor 4. In dieser Arbeit wurde ja für die Bildkoordinatenmeßgenauigkeit nur  $\pm 4 \mu\text{m}$  benutzt. Die Ingenieurphotogrammetrie mit dem neuen Genauigkeitsniveau wird für die Praxis eine große Bedeutung erlangen.

L I T E R A T U R

- Ackermann, F. (1965) : Fehlertheoretische Untersuchungen über die Genauigkeit photogrammetrischer Streifentriangulierungen. DGK, Reihe C, Nr.87, München 1965.
- Ackermann, F. (1966) : Photogrammetrische Lagegenauigkeit streifenartiger Modellverbände. BuL 3/66 (S. 119-124).
- Ackermann, F. (1967) : Theoretische Beispiele zur Lagegenauigkeit ausgeglichener Blöcke. BuL 3/67 (S. 114-116).
- Ackermann, F. (1981) : Grundlagen und Verfahren zur Erkennung grober Datenfehler. Schriftenreihe d. Inst. f. Photogrammetrie d. Universität Stuttgart, Heft 7, (S. 7-23).
- Altan, M. (1984) : Genauigkeitsuntersuchungen photogrammetrischer Deformationsmessungen an einem Testfeld. BuL 1/84, (S. 29-35).
- Baarda, W. (1968) : A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks. Neth. Geod. Comm. Publ. in Geodesy, New Series 2, No.5, Delft 1968.
- Ballik, Ch. (1989) : Signalisierung in der Präzisionsphotogrammetrie mit retroreflektierendem Material. Diplomarbeit am Inst. f. Photogrammetrie u. Fernerkundung d. TU-Wien, Wien 1989.
- Böttiger, W.U. (1981) : Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Genauigkeit der Nahbereichsphotogrammetrie. DGK, Reihe C, Nr. 266, München 1981.
- Brown, D.C., Fraser, C.S. (1986) : Industrial photogrammetry : New developments and recent applications. Photogrammetric Record 12/86 (S. 197-217).
- Bundes-Ingenieurkammer (1980) : Gebührenordnung Vermessungswesen (GOV). Wien.
- Düppe, R.D. , Seegel, K.-J. (1978) : Photogrammetrische Präzisionspunktbestimmung an einem Hochhaus. BuL 5/78, (S. 163-170).
- Ellenbeck, H., Wrobel, B. (1977) : Zur Leistungssteigerung der terrestrisch-photogrammetrischen Punktbestimmung. BuL 3/77, (S. 69-77).
- Faig, W., Moniwa, H. (1973) : Convergent Photos for Close Range. PE, Vol. 39, No.6, (S. 605-610).
- Förstner, R. (1960) : Über Ausgleichungsprobleme und Fehlertheorien bei Aerotriangulationen. DGK, Reihe A, Nr.35, 1960.
- Fraser, C.S. (1982) : Optimization of precision in close-range photogrammetry. PE, Vol.48, No.4, (S. 561-570).

- Fraser, C.S. (1983) : Photogrammetric monitoring of turtle mountain : A feasibility study. PE, Vol.49, No.11, (S. 1551-1559).
- Fraser, C.S. (1987) : Limiting Error Propagation in Network Design. PE, Vol.53, No.5, (S. 487-493).
- Grün, A. (1978) : Accuracy, reliability and statistics in close - range photogrammetry. Int. Archiv f. Photogr., Kommission V, Stockholm 1978.
- Grün, A., Beyer, H. (1987) : Real - Time Photogrammetry at the Digital Photogrammetric Station (DIPS) of ETH Zurich. The Canadian Surveyor, Vol. 41, No. 2, (S. 181-199).
- Gsandtner, M., Kager, H. (1988) : An Out of Core Solution of Normal Equations Providing also Accuracy and Reliability Data. Poster Paper, 16. ISPRS - Kongreß, Kommission III, Kyoto, 1988, Int. Arch. Phot. 27, B 8, (S. 52-59).
- Hayford, Wright (1906) : Adjustment of Observations. Second Edition 1906, art. 113, S.142.
- Hell, G. (1979) : Terrestrische Bildtriangulation unter Berücksichtigung zusätzlicher Beobachtungen. DGK, Reihe C, Nr.252, München 1979.
- Hottier, P. (1976) : Accuracy of Close-Range Analytical Restitutions: Practical Experiments and Prediction. PE, Vol.42, No.3, (S. 345-375).
- Kager, H., Kraus, K. (1976) : Gemeinsame Ausgleichung photogrammetrischer, geodätischer und fiktiver Beobachtungen. Geowiss. Mitt. der TU-Wien, Heft 8, (S. 113-133).
- Kager, H. (1980) : Das interaktive Programmsystem ORIENT im Einsatz. Presented Paper, 14. Kongreß der Int. Gesellschaft für Photogrammetrie, Kommission V, Hamburg 1980, Int. Arch. Phot. XXIII, B 5, (S. 390-401).
- Kager, H. (1984) : Der Einsatz des Programmsystems ORIENT in der Nahbereichsphotogrammetrie. Tagung Nahbereichsphotogrammetrie an der Universität Bonn, Kurzfassung, 1984.
- Kahler, D. (1984) : Untersuchung zur Varianzschätzung von Punktkoordinaten im terrestrisch photogrammetrischen Raummodell. Veröff. d. Geod. Inst. d. Rheinisch-Westfälischen Techn. Hochschule Aachen, Nr.36, 1984.
- Kahler, D. (1986) : Testfeld-Kalibrierung unter Berücksichtigung von Beobachtungen ungleicher Genauigkeit. BuL 1/86, (S. 17-22).
- Kraus, K. (1982 a) : Netzoptimierung am Beispiel des Vorwärtseinschneidens. Mitteilungen der Geod. Institute d. TU-Graz, Folge 40 (Festschrift Prof. Rinner), (S. 188-197).

- Kraus, K. (1982 b) : Lehrbuch " Photogrammetrie - Band 1 ". Dümmler Verlag, Bonn 1982.
- Kraus, K. (1984 a) : Lehrbuch " Photogrammetrie - Band 2 ". Dümmler Verlag, Bonn 1984.
- Kraus, K. (1984 b) : Gegenwärtiger Leistungsstand der Ingenieur-photogrammetrie. IX. Int. Kurs für Ingenieurvermessung in Graz; Ingenieurvermessung 84, Band 1, (S. 1-12), Dümmler Verlag, Bonn.
- Kraus, K. (1986) : Modern Photogrammetric Technology Focusing Civil Engineering. Photogrammetria, 41, (S. 31-41).
- Kraus, K., Schlögelhofer, F. (1988) : Photogrammetrische Überwachung komplexer Hochbauprojekte. X. Int. Kurs für Ingenieurvermessung in München; Ingenieurvermessung 88, Band 2, E5, Dümmler Verlag, Bonn.
- Kraus, K., Schlögelhofer, F., Waldhäusl, P., Wehdorn, M. (1984) : Photogrammetrische Altstadtvermessung. Mitteilungen des Inst. für Geodäsie der Universität Innsbruck, Heft 7, (S. 107-124).
- Kraus, K., Waldhäusl, P. (1981 a) : Die Photogrammetrie im Dienste der Architektur. Architektur aktuell 15, Heft 82, (S. 36-37).
- Kraus, K., Waldhäusl, P. (1981 b) : Millimetergenauigkeit im Fassadenbau. Bau im Spiegel, Ausgabe 1a (Hochbau), Architektur und Bau. Installation. (abi). Heft 10, (S. 52-56).
- Krauss, H. (1983) : Das Bild - n - Tupel. Ein Verfahren für photogrammetrische Ingenieurvermessungen hoher Präzision im Nahbereich. DGK, Reihe C, Nr.276, München 1983.
- Mohle, E., Mohr, H. (1974) : Photogrammetrische Raumnetze in der Architektur-photogrammetrie. BuL 5/74, (S. 155-159).
- Müller, B.G. (1982) : Zur Wahl der Aufnahmeanordnung für ingenieur-photogrammetrische Nahbereichsaufnahmen. Vermessung und Raumordnung (44), Heft 5/82.
- Mürle, M., Bill, R. (1984) : Zuverlässigkeits- und Genauigkeitsuntersuchung ebener geodätischer Netze. AVN 2/84, (S. 45-62).
- Pelzer, H. (1985) : Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II. Vorträge des Kontaktstudiums in Hannover, Wittwer Verlag, Stuttgart 1985.
- Reißmann, G. (1976) : Die Ausgleichsrechnung. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1976.
- Schlögelhofer, F. (1986) : Bauüberwachung mit Hilfe der Photogrammetrie. ÖZVPh, Heft 3/86, (S. 167-176).

- Schlögelhofer, F., Waldhäusl, P. (1987) : Computer software : Documenting of old towns and cities. High Tech Austria. Federal Ministry of Science and Research. Bohmann Druck- u. Verlags Ges.m.b.H., (S.65).
- Stark, E. (1970) : Die Einbeziehung geodätischer Strecken- und Azimutmessungen in die Punktbestimmung durch photogrammetrische Blocktriangulation. AVN 8/70, (S. 318-328).
- Steinkellner, G. (1982) : Fassadenaufnahme in engen Gassen. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie, TU - Wien.
- Torlegard, K. (1981) : Accuracy Improvement in Close Range Photogrammetry. Schriftenreihe der Bundeswehr - Hochschule München, Heft 5, München 1981.
- Waldhäusl, P. (1981) : Präzisionsfassadenvermessung für Großplattenverkleidungen. Ingenieurvermessung 80, Beiträge zum VIII. Int. Kurs f. Ingenieurvermessung, Zürich, Band 2, (S. C9 / 1-8), Dümmler, Bonn.
- Waldhäusl, P. (1982) : Photogrammetrie und Lasertechnik : Präzision im Fassadenbau. Eternit-Magazin 5, Heft 15, (S. 6-7).
- Waldhäusl, P. (1984) : Photogrammetrie im Dienste der Altstadtinventarisierung. Stadt und Land. 3. Handbuch Pro Austria Nostra, (S. 73-77), Wien.
- Wester - Ebbinghaus, W. (1981) : Zur Verfahrensentwicklung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Dissertation, Eigenverlag, Bonn.
- Wester - Ebbinghaus, W. (1985) : Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen. Zeitschrift für Vermessungswesen (110), Heft 3/85.
- Wunderlich, T. (1981) : Fehlertheoretische Betrachtungen zum Problem des allgemeinen Rückwärtsschnitts. Geowissenschaftliche Mitteilungen der TU-Wien, Heft 18, (S. 145-152).
- Zinndorf, S. (1986) : Optimierung der photogrammetrischen Aufnahmeanordnung. DGK, Reihe C, Heft 323, München.

Verwendete Abkürzungen:

- AVN ..... Allgemeine Vermessungsnachrichten  
BuL ..... Bildmessung und Luftbildwesen  
DGK ..... Deutsche Geodätische Kommission  
ÖZVPh ..... Österreichische Zeitschrift f. Vermessungswesen und  
Photogrammetrie  
PE ..... Photogrammetric Engineering and Remote Sensing

LEBENS LAUF

Name: Ferdinand Schlögelhofer

Familienstand: verheiratet

21. 2. 1957 geboren in Amstetten  
Eltern: Ing. Ferdinand SCHLÖGELHOFER  
Maria SCHLÖGELHOFER, geb. GROßMANN

1963 - 1967 Besuch der Volksschule in Amstetten

1967 - 1975 Besuch des Bundesrealgymnasiums in Amstetten

2. 6. 1975 Reifeprüfung

1. 10. 1975 Beginn des Studiums an der Technischen Universität Wien  
Studienrichtung Vermessungswesen  
Studienzweig: Photogrammetrie und Kartographie

20. 6. 1978 1. Diplomprüfung

15. 6. 1981 2. Diplomprüfung

1981 - 1986 Vertragsassistent am Institut für Photogrammetrie  
an der Technischen Universität Wien

seit 1.10.1986 Universitätsassistent am Institut für Photogrammetrie  
und Fernerkundung an der Technischen Universität Wien

Bisher erschienen:

- Heft 1 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen 1970 - 1973, Dezember 1973.
- Heft 2 EGGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Taschenrechner HP 45 und HP 65, Programme und Anwendungen im Vermessungswesen, 1. Auflage, März 1974, Special Edition in English, Juli 1974, 2. verbesserte Auflage, November 1974.
- Heft 3 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen 1973 - 1974, September 1974.
- Heft 4 EGGER-PALFINGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Tektronix-Taschenrechner TEK 31, Programmbibliothek für den Einsatz im Vermessungswesen, November 1974.
- Heft 5 K. LEDERSTEGER, Die horizontale Isostasie und das isostatische Geoid, Februar 1975.
- Heft 6 F. REINHART, Katalog von FK4 Horrebow-Paaren für Breiten von +30 bis +60, Oktober 1975.
- Heft 7 Arbeiten aus dem Institut für Höhere Geodäsie, Wien, Dezember 1975.
- Heft 8 Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie zum XIII. Internationalen Kongreß für Photogrammetrie in Helsinki 1976, Wien, Juli 1976.
- Heft 9 W. PILLEWIZER, Felsdarstellung aus Orthophotos, Wien, Juni 1976.
- Heft 10 PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Der Einsatz des programmierbaren Taschenrechners Texas Instruments SR-52 mit Drucker PC100 in der ingenieurgeodätischen Rechentechnik, Wien, Mai 1976.
- Heft 11 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen 1974 - 1976, November 1976.
- Heft 12 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1976, Wien, Mai 1977.
- Heft 13 Veröffentlichung des Instituts für Photogrammetrie anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr.h.c. K. Neumaier, Wien, Januar 1978.
- Heft 14 L. MOLNAR, Self Checking Analytical Relative Orientation and Strip Formation, Wien, Dezember 1978.
- Heft 15 Veröffentlichung des Instituts für Landesvermessung anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr. Alois Bavir, Wien, Januar 1979.
- Heft 16 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen 1976 - 1979, Wien, November 1979.
- Heft 17 E. VOZIKIS, Die photographische Differentialumbildung gekrümmter Flächen mit Beispielen aus der Architekturbildmessung, Wien, Dezember 1979.
- Heft 18 Veröffentlichung des Instituts für Allgemeine Geodäsie anlässlich des 75. Geburtstages von Prof. Dipl. Ing. Dr. F. Hauer, Die Höhe des Großglockners, Wien, 1981.
- Heft 19 H. KAGER, Bündeltriangulation mit indirekt beobachteten Kreiszentren, Wien, April 1981.

- Heft 20 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1980, Wien, Mai 1982.
- Heft 21 Veröffentlichung des Instituts für Kartographie anlässlich des 70. Geburtstages von Prof. Dr. Wolfgang Pillewizer: Glaziologie und Kartographie, Wien, Dezember 1982.
- Heft 22 K. TEMPFLI, Genauigkeitsschätzung digitaler Höhenmodelle mittels Spektralanalyse, Wien, Mai 1982.
- Heft 23 E. CSAPLOVICS, Interpretation von Farbinfrarotbildern, Wien, November 1982.
- Heft 24 J. JANSKA, Rektifizierung von Multispektral-Scanneraufnahmen - Entwicklung und Erprobung eines EDV-Programms, Wien, Mai 1983.
- Heft 25 Zusammenfassungen der Diplomarbeiten, Dissertationen und Habilitationen an den geodätischen Instituten der TU Wien, Wien, November 1984.
- Heft 26 T. WUNDERLICH, Die voraussetzungsfreie Bestimmung von Refraktionswinkeln, Wien, August 1985.
- Heft 27 G. GERSTBACH (Hrsg.), Geowissenschaftliche/geotechnische Daten in Landinformationssystemen - Bedarf und Möglichkeiten in Österreich, Wien, Juni 1986.
- Heft 28 K. NOVAK, Orientierung von Amateuraufnahmen ohne Paßpunkte, Wien, August 1986.
- Heft 29 Veröffentlichung des Instituts für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Abteilung Ingenieurgeodäsie anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dipl. Ing. Dr. F. Hauer, Wien, Oktober 1986.
- Heft 30 K.-H. ROCH, Über die Bedeutung dynamisch ermittelter Parameter für die Bestimmung von Gesteins- und Gebirgseigenschaften, Wien, Februar 1987.
- Heft 31 G. HE, Bildverbesserung mittels digitaler Filterung, Wien, April 1989.