

PHOTOGRAMMETRISCHE NETZVERDICHTUNG - DAS PROJEKT APPENWEIER

Von F. Ackermann, Stuttgart

1. Einleitung

Die photogrammetrische Methode der Punktbestimmung durch Blocktriangulation hat ein Genauigkeitsniveau erreicht, welches ihre Anwendung für geodätische Zwecke nahelegt. Insbesondere erscheint es möglich, trigonometrische Netze photogrammetrisch zu verdichten oder Polygonnetze durch photogrammetrisch bestimmte Punkte zu ersetzen.

Theoretische Grundlage solcher Überlegungen sind die Erfahrungen und Erkenntnisse über das Genauigkeitsverhalten von Blöcken:

- Gut kontrollierte Blöcke (Paßpunkte am Blockrand und gegebenenfalls in der Blockfläche) erreichen mit signalisierten Punkten mittlere Fehler der Lagekoordinaten von 10 μ m im Bildmaßstab bzw. unterschreiten diesen Grenzwert deutlich.
- Diese Genauigkeit ist nur sehr schwach von Bildmaßstab und Blockgröße abhängig.

Somit kann ohne wesentlich höhere Anforderungen an Paßpunktdichte die auf das Gelände bezogene Lagegenauigkeit mit großen Bildmaßstäben gesteigert werden, bis eine praktische Grenze erreicht ist. Sie ist nicht grundsätzlicher Art sondern wird jeweils von der Wirtschaftlichkeit diktiert sein. Man wird aus verschiedenen praktischen Gründen Bildmaßstäbe größer als 1:3000 in der Regel nicht mehr in Betracht ziehen.

2. Das Projekt "Appenweier"

2.1 Planung, Signalisierung, Befliegung

Auf Initiative des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg ist im Jahre 1973 der kontrollierte Versuch "Appenweier" zur photogrammetrischen Verdichtung eines gegebenen trigonometrischen Netzes 3. Ordnung geplant und durchgeführt worden.

Die photogrammetrischen Messungen und Blockausgleichungen hat das Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart übernommen. Das Gebiet "Appenweier" liegt im Landesteil Baden, in der Oberrheinebene. Es bedeckt eine Fläche von 9.1 km x 10.4 km \approx 95 km² und enthält 24 gegebene trigonometrische Punkte 2. und 3. Ordnung. Sie wurden alle signalisiert, einige von ihnen exzentrisch. Im Sinne der Netzverdichtung waren 85 mehr oder weniger gleichmäßig verteilte Neupunkte photogrammetrisch zu bestimmen. Für den Versuch dienten sie als Vergleichspunkte, deren bekannte terrestrische Koordinaten bei der Blockausgleichung zurückgehalten wurden. Die Lagegenauigkeit der terrestrischen Paß- und Vergleichspunkte wird mit 1 cm angenommen.

Die Planung des Versuchs zielte auf eine resultierende Genauigkeit der Lagekoordinaten von 3 cm. Damit sind zwar die amtlichen Genauigkeitsvorschriften für Netze nicht erfüllt, für Versuchszwecke wurde jedoch dieses Projektziel akzeptiert. Bei noch höheren Genauigkeitsforderungen steigen die Kosten der photogrammetrischen Punktbestimmung rasch an, so daß ihre Wirtschaftlichkeit von vornherein in Frage gestellt ist.

Um eine Lagegenauigkeit von 3 cm im Gelände zu erreichen, benötigt man nach den bisherigen Erfahrungswerten der Blocktriangulation Bildmaßstäbe von 1:3000 bis 1:5000, wenn man im Bildmaßstab entsprechend Lage-Genauigkeiten von 10 µm bis 6 µm voraussetzt.

Wegen gewisser erwarteter Schwierigkeiten bei der Punktübertragung von nicht signalisierten Verknüpfungspunkten wurde nun nicht eine Einfach-Befliegung im großen Maßstab (etwa um 1:4000) sondern eine 4-fach Befliegung im Bildmaßstab 1:7800 geplant und ausgeführt. Von der 4-fachen Überdeckung (mit gekreuzten und antiparallelen Flugachsen, s. Abb. 1) wird bei der simultanen Blockausgleichung eine Genauigkeitssteigerung um mehr als den Faktor 2 erwartet, verglichen mit der einfachen Befliegung gleichen Bildmaßstabs. Die 4-fach Befliegung ergab im Bildmaßstab 1:7800 zusammen 448 Bildpaare, was etwa der Anzahl entspricht, die im doppelt so großen Bildmaßstab zur einfachen Flächendeckung erforderlich gewesen wäre.

Alle 24 Paßpunkte und 85 Neupunkte wurden im Gelände mit 20 cm x 20 cm großen Signalscheiben signalisiert, davon 35 Punkte als Exzentren. Jedem dieser Punkte waren nach Abb. 2 zusätzlich 2 oder 4 signalisierte Hilfspunkte zugeordnet, die mit Hilfe von Geraden- und Abstandsbedingungen eine Kontrolle auf mögliche Störungen der Hauptsignale ermöglichen sollten.

Weiterhin wurden im Gelände Verknüpfungspunkte signalisiert, jeweils mit 3-fach Signalen für die 6 Schema-Punkte eines Modells. Diese zusätzliche Signalisierung, die gezielte Befliegung oder entsprechend hohe Längsüberdeckung beim Bildflug erfordert, wäre im normalen praktischen Anwendungsfall aus Aufwandsgründen nicht zu vertreten. Bei diesem Versuch sollte sie den Vergleich mit natürlichen und künstlichen Verknüpfungspunkten ermöglichen.

Die zusätzliche Signalisierung der Verknüpfungspunkte gibt Anlaß zu der Feststellung, daß der Versuch Appenweier zur Untersuchung der Genauigkeitsleistung der Blockmethode unter den hier gegebenen äußeren Bedingungen angesetzt wurde. Dieser Versuch kann nicht gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit der Methode untersuchen oder optimieren, obwohl gewisse Aufwandsdaten dabei gewonnen wurden.

Die Befliegung des Gebietes durch die photogrammetrische Abteilung der Rheinischen Braunkohle AG mit der Zeiss RMK A 15/23 Weitwinkel-Kammer litt unter den schlechten Wetterbedingungen im Frühjahr 1973. Der erste Flug am 24. April wurde wegen Turbulenz abgebrochen. Erst am 12. Mai gelang die restliche Befliegung. Die Signalisierung mußte etwa 2 Monate lang aufrecht erhalten und überwacht werden.

2.2 Auswertung

Die Film-Diapositive der Luftbilder wurden mit Doppelmessungen am Zeiss-Stereo-komparator PSK ausgewertet. Einige Bilder zeigten deutliche Bewegungsunschärfen. Aus den Doppelmessungen errechnete sich eine mittlere Koordinatengenauigkeit der Einzelmessung von $1.5 \mu\text{m}$. Die Auswertung der 448 Modelle erforderte insgesamt einen Zeitaufwand von rund 600^{h} (80 min/Modell, Doppelmessungen; 20 Punkte/Modell, 4 Rahmenmarken/Bild). Dieser Meßaufwand ist verhältnismäßig hoch, er könnte im Routinebetrieb und durch Wegfall der Doppelmessungen erheblich reduziert werden. Die Komparator-Koordinaten wurden durch Ähnlichkeitstransformation auf die kalibrierten Bild-Rahmenmarken in Bildkoordinaten transformiert¹⁾. Nach flächenhafter Korrektur für Verzeichnung²⁾ und Erdkrümmung erfolgte damit die rechnerische Modellbildung durch analytische relative Orientierung. Die mittleren y -Parallaxen der Modelle vom Betrag $4.5 \mu\text{m}$ bestätigen die gute allgemeine Qualität des Bildmaterials. Die so berechneten Modellkoordinaten bildeten das Ausgangs-Datenmaterial für die räumliche Blockausgleichung nach der Methode der unabhängigen Modelle.

3. Blockausgleichungen - Lagegenauigkeit

3.1 Übersicht

Das Datenmaterial erlaubte Untersuchungen nach verschiedenen Gesichtspunkten. Wir unterscheiden:

- 2 Paßpunkt-Versionen: (1) Benützung aller gegebenen Lagepaßpunkte (Randpunkte + 8 Punkte im Block); (2) Paßpunkte nur am Blockrand (mit einigen zusätzlichen, aus den Vergleichspunkten übernommenen Randpunkten, um gewisse offene Stellen zu schließen).
- 3 Versionen verschiedener Oberdeckung: (1) 4 Einzelblöcke einfacher Oberdeckung (gekennzeichnet durch die 4 Flugrichtungen OW, WO, NS, SN, s. Abb. 1; je 128 Modelle, 20 % Querüberdeckung); (2) je 2 Doppelblöcke mit gekreuzten Flugrichtungen (WO/NS, OW/SN); (3) gemeinsame Ausgleichung der 4-fach Befliegung (WO/NS/OW/SN). Bei diesem Block wurde eine zusätzliche Variante berechnet, bei der die nicht ganz planungsgerechten offenen Stellen des Blockrandes durch einige zusätzliche Paßpunkte verdichtet wurden.
- Die ausgeglichenen Blöcke wurden zur weiteren Genauigkeitssteigerung jeweils einer Interpolation nach kleinsten Quadraten unterzogen. Dabei konnte nur beim 4-fach Block die Kovarianz-Funktion empirisch bestimmt werden, für alle anderen Versionen wurde sie nach den Erfahrungen der Katasterphotogrammetrie *a priori* vorgegeben.

1) Ein erster Versuch mit affiner Bildtransformation wurde abgebrochen. Offenbar hatten sich die Bildrahmenmarken gegenüber der Kalibrierung verändert, denn der Block zeigte insgesamt eine Maßstabsaffinität und ergab nach der Blockausgleichung eine knapp geringere Genauigkeit als bei nicht-affiner Bildtransformation.

2) siehe K. Kraus und E. Stark: Flächenhafte Verzeichnungskorrektur in der numerischen Photogrammetrie, BuL 41 (1973) 50 - 56.

- Weitere Untersuchungen werden im Abschnitt 5. behandelt.

Bemerkung:

In den Blockausgleichungen wurden bis zu 30 Lagepaßpunkte benützt. Bei einigen der gegebenen 24 Paßpunkte waren die Koordinaten signalisierter Hilfspunkte bekannt, die deshalb ebenfalls als Paßpunkte herangezogen werden konnten.

3.2 Darstellung der Ergebnisse

Die Genauigkeitsergebnisse der verschiedenen Blockausgleichungen sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengestellt. Sie enthalten die mittleren und maximalen Differenzen der Lagekoordinaten zwischen der jeweiligen photogrammetrischen und der terrestrischen Bestimmung der Vergleichspunkte. Die Werte sind in μm , bezogen auf den Bildmaßstab und in cm , bezogen auf das Gelände angegeben.

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen in Vektordarstellung 2 Beispiele der Differenzen an den Vergleichspunkten.

3.3 Besprechung der Ergebnisse

4-fache Überdeckung. Als Hauptergebnis des Versuchs soll zunächst nach Tabelle 1 die kontrollierte Lagegenauigkeit des 4-fach Blocks bei Verwendung der gegebenen Paßpunkte herausgestellt werden. Die Mittelwerte der Koordinatendifferenzen an den Vergleichspunkten betragen

$$\begin{aligned}\mu_{x,y} &= 3.5 \text{ cm} \hat{=} 4.5 \mu\text{m} \text{ nach der Blockausgleichung} \\ \mu_{x,y} &= 2.7 \text{ cm} \hat{=} 3.4 \mu\text{m} \text{ nach kleinste-Quadrate-Interpolation}\end{aligned}$$

(Die entsprechenden Werte bei verdichtetem Paßpunktrand sind $3.3 \text{ cm} \hat{=} 4.2 \mu\text{m}$ bzw. $2.5 \text{ cm} \hat{=} 3.2 \mu\text{m}$). Damit ist die geplante Genauigkeit von 3 cm insgesamt erreicht. Ebenso entspricht der Wert $\sigma_0 = 3.8 \text{ cm} = 4.9 \mu\text{m}$ des mittleren Gewichtseinheitsfehlers den Erwartungen.

Die Vektor-Diagramme der an den Vergleichspunkten verbliebenen Differenzen zeigen die bekannten regionalen systematischen Tendenzen. Man kann 4 solcher Regionen mit hoher örtlicher Korrelation der Differenzen ausmachen, die sich je etwa über $1/4$ der Blockfläche erstrecken. Die kleinste-Quadrate-Interpolation vermindert die regionalen Fehlertendenzen erheblich, kann sie jedoch nicht völlig beseitigen. Man kann daher vermuten, daß im Ergebnis immer noch unkompensierte regional-systematische Fehlereffekte wirksam sind.

Die maximalen Koordinatenfehler von $10.6 \text{ cm} \hat{=} 13.6 \mu\text{m}$ nach der Blockausgleichung bzw. $9.4 \text{ cm} \hat{=} 12.1 \mu\text{m}$ nach der kleinste-Quadrate-Interpolation können im Vergleich zu den Mittelwerten nicht als unerwartet groß gelten (Faktor 3.0 bzw. 3.5). Die großen Fehlervektoren haben zwar jeweils eine gewisse Korrelation zu der örtlichen Tendenz des Vektorfeldes, treten aber im wesentlichen örtlich unabhängig auf, z.B. in der Nähe von Paßpunkten. Sie können daher nicht näher erklärt oder bestimmten Ursachen zugeschrieben werden.

Vergleich der 1-fach und mehrfach-Blöcke untereinander. Die 4 Einfach-Blöcke entsprechen konventionellen Blöcken mit 20 % Querüberdeckung. Die Mittelwerte ihrer Lagegenauigkeiten lauten:

$$\mu_{x,y} = 5.3 \text{ cm} \hat{=} 6.8 \text{ } \mu\text{m} \text{ (Bereich } 5.3 - 7.8 \text{ } \mu\text{m) nach Blockausgleichung}$$

$$\mu_{x,y} = 4.4 \text{ cm} \hat{=} 5.6 \text{ } \mu\text{m} \text{ (Bereich } 4.6 - 6.3 \text{ } \mu\text{m) nach kl.Quadr.Interpol.}$$

$$\sigma_0 = 3.6 \text{ cm} \hat{=} 4.7 \text{ } \mu\text{m} \text{ (Bereich } 4.4 - 4.9 \text{ } \mu\text{m)}$$

$$\mu_{x,y}/\sigma_0 = 1.4 \text{ bzw. } 1.2.$$

Diese Lagegenauigkeiten aus dem Bildmaßstab 1:7800 qualifizieren die 4 Einzelblöcke für sich genommen als ungewöhnlich gut.

Im Vergleich zu der hohen Genauigkeit der 4 Einzelblöcke entspricht die Genauigkeitssteigerung durch die 2-fach und die 4-fach Überdeckung nicht den Erwartungen. Die Verhältnisse der Genauigkeitswerte $\mu_{x,y}$ der einfach-, zweifach- und 4-fach Blöcke untereinander lauten

$$1 : 0.81 : 0.66 \text{ (} 1 : 1/1.23 : 1/1.52 \text{) nach Blockausgleichung}$$

$$1 : 0.80 : 0.61 \text{ (} 1 : 1/1.25 : 1/1.63 \text{) nach kl.Quadr.Interpolation.}$$

Bezogen auf zufällige Fehler dürften die theoretischen Verhältnisse höchstens bei $1 : 0.67 : 0.45$ liegen, weil jede Verdoppelung der Überdeckung die Genauigkeit um mehr als den Faktor 2 steigern müßte. Es ist somit nur wenig mehr als die Hälfte der erwarteten Genauigkeitssteigerung wirksam geworden.

Das Endergebnis des 4-fach-Blocks, das den anfänglich gesetzten Spezifikationen entspricht, kann nun genauer interpretiert werden. Es setzt sich zusammen aus der über die Erwartungen hinausgehenden hohen Anfangsgenauigkeit der 4 Datensätze der Einzelblöcke und der hinter der Erwartung zurückgebliebenen Genauigkeitssteigerung durch die simultane Ausgleichung der Mehrfachblöcke.

Die allgemeine Erklärung dieser Zusammenhänge muß sich auf die Wirkung unkompenzierter systematischer oder hochkorrelierter Bildfehler berufen, die bekanntermaßen zu Nichtübereinstimmung mit theoretischen Erwartungen führen, die nur auf der Annahme zufälliger Fehler beruhen. Trotzdem läßt diese Erklärung einige Fragen offen. Ursprünglich war von dem 4-fach-Block eine wirksame Kompensation systematischer Fehler erwartet worden, was offensichtlich nicht in vollem Umfang eingetreten ist. Und seltsamerweise hat die kleinste-Quadrate-Interpolation, von der die weitgehendste Kompensation verbliebener systematischer Fehler erwartet wird, beim 4-fach-Block prozentual eine stärkere Verbesserung erzielt als bei den Einfach- und Doppelblöcken ($1 : 0.77$ gegen $1 : 0.81$). Dieser Effekt dürfte mit den starken Modell-Verknüpfungen zusammenhängen.

Kleinste-Quadrate-Interpolation

Die Schlußfolgerung über die Wirksamkeit nicht-zufälliger Fehler ist durch die allgemeine Genauigkeitssteigerung nach der kleinsten-Quadrate-Interpolation bekräftigt. Die Genauigkeit der Lagekoordinaten wird bei den Einfach-, Doppel- und 4-fach-Blöcken um die Faktoren 1.20, 1.23 und 1.30 gesteigert. Die Interpolation hat sich somit als sehr wirksam erwiesen, was die Notwendigkeit der Behandlung systematischer Fehler bestätigt.

Dagegen sind die Maximalfehler durch die Interpolation im Durchschnitt nur unwesentlich zurückgegangen, in 2 Fällen sogar größer geworden.

Vergleich mit Paßpunkt-Randbesetzung

Die Ergebnisse der Tabelle 2 beziehen sich auf den Fall des mit Paßpunkten dicht besetzten Blockrandes. Im Vergleich zur Tabelle 1 sind die Paßpunkte im Blockinnern entfallen und einige Randpunkte hinzugefügt worden, um dem Sollabstand der Lage-Paßpunkte am Blockrand von etwa 2 Basislängen möglichst nahe zu kommen. Der Vergleich der Tabellen 1 und 2 zeigt, daß die Blockausgleichungen in beiden Paßpunkt-Versionen in allen besprochenen Genauigkeits-Eigenschaften praktisch identisch und gleichwertig sind. Die reine Randbesetzung erreicht sogar in den Genauigkeitswerten $\mu_{x,y}$ geringfügig günstigere Werte (um 0 - 9 %). Damit ist jedenfalls die weitgehende Unabhängigkeit der Ergebnisse von der Paßpunktverteilung im Blockinnern bestätigt.

3.4 Lageblockausgleichung mit zusätzlichen Parametern

Neben der kleinste-Quadrate-Interpolation ist ein wirksames Mittel zur rechnerischen Kompensation systematischer Bild- oder Modellfehler die Blockausgleichung mit zusätzlichen Parametern. Mit dem vorläufigen Rechenprogramm für die Lage-Blockausgleichung unabhängiger Modelle mit zusätzlichen Parametern¹⁾ konnte inzwischen der Einzelblock SN berechnet werden. Dabei wurden für jeden Streifen 2 zusätzliche Parameter (p,q) ¹⁾ und zusätzlich 2 Affinfaktoren (e,f) für den ganzen Block angesetzt.

Die Abbildung 5 und die Tabelle 3 zeigen die Ergebnisse und den Vergleich mit der Interpolation. Der Wert σ_0 reduziert sich durch die zusätzlichen Parameter von $4.9 \mu\text{m}$ auf $3.7 \mu\text{m}$ (Faktor 1.3) und kommt damit dem etwa bei $3 \mu\text{m}$ liegenden Rauschpegel nahe. Die absolute Lagegenauigkeit verbessert sich von $7.8 \mu\text{m}$ um den Faktor 1.4 auf $5.6 \mu\text{m}$. Die kleinste-Quadrate-Interpolation hatte demgegenüber den Wert $6.0 \mu\text{m}$ erreicht. Damit erweist sich in diesem Fall die Methode der zusätzlichen Parameter der Interpolation im Mittel geringfügig überlegen. Allerdings ist der maximale Koordinatenfehler von 19.7 cm sehr erheblich auf 13.1 cm reduziert worden. Es bleibt abzuwarten, ob sich dieses Verhältnis in anderen Fällen signifikant bestätigt.

Eine Analyse der zusätzlichen Parameter weist als wirksamsten Faktor den Parameter q aus, der eine trapezartige Grundrißdeformation der Modelle bewirkt. Die Korrekturbeträge belaufen sich an den Modellecken auf $7 \mu\text{m}$ (Bereich $\pm 2.3 \mu\text{m}$). Damit entsprechen interessanterweise die Lagedeformationen der Modelle sowohl nach Typ und Größe den bei anderen Befliegungen festgestellten systematischen Modellfehlern.

¹⁾ siehe H. Ebner, Simultaneous Compensation of Systematic Errors with Block Adjustment by Independent Models, BuL 42 (1974), 198 - 203.

4. Blockausgleichungen - Höhengenaugigkeit

Die Blockausgleichung mit dem Programm PAT-M-43 nach der Methode der unabhängigen Modelle ist trotz Lage-Höhen-Iteration ein räumliches Verfahren und erbringt die Lage- und die Höhenergebnisse gleichzeitig. Hinsichtlich der Genauigkeit sind Lage und Höhe jedoch praktisch unabhängig voneinander und können daher getrennt betrachtet werden.

Von den 68 gegebenen Höhen-Vergleichspunkten fielen 2 als nicht gemessen, ein weiterer als grob falsch aus. In Tabelle 4 sind die Genauigkeitsergebnisse der verschiedenen Blockausgleichungen zusammengestellt. Die Höhengenaugigkeit der Einzelblöcke von $\mu_z = 10.6 \text{ cm} \hat{=} 0.089 \text{ ‰}$ bestätigt wie bei den Lageergebnissen die hohe Qualität des Bildmaterials, zumal die rasterförmige Anordnung der Höhenpaßpunkte für Blöcke mit 20 % Querüberdeckung keineswegs ideal ist. Damit ist erneut nachgewiesen, daß Blöcke etwa dieselbe Höhengenaugigkeit wie Einzelmodelle erreichen. Die Höhengenaugigkeit des 4-fach-Blockes ist mit $\mu_z = 7.5 \text{ cm} = 9.6 \text{ } \mu\text{m} \hat{=} 0.063 \text{ ‰}$ zwar, absolut genommen, recht zufriedenstellend. Es fällt jedoch auf, daß gegenüber den Einzelblöcken nur eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor 1.41 eingetreten ist, während theoretisch mindestens der Faktor 2 zu erwarten gewesen wäre. Man kann daraus wiederum wie bei der Lage auf die Existenz nicht-kompensierter systematischer Höhenfehler schließen. Möglich wäre auch eine durch das Gelände und die Signalisierung bedingte Begrenzung der Höhengenaugigkeit. Aus anderen Versuchen ist bekannt, daß auch bei signalisierten Punkten in Feld- und Ackerland ziemlich unabhängig vom Bildmaßstab mittlere Höhenfehler von 10 cm nur schwer unterschritten werden können.

5. Zusätzliche Genauigkeitsuntersuchungen

Das Bild- und Datenmaterial der Befliegung Appenweier ermöglicht die Untersuchung weiterer Fragen, die für die photogrammetrische Punktbestimmung durch Blocktriangulation von allgemeinem Interesse sind.

Von dem Einzelblock der Nord-Süd-Befliegung (8 Streifen à 14 Bildpaaren) wurden gleichzeitig mit den Film-Diapositiven auch Diapositive auf Glas hergestellt. Es ist nämlich immer noch nicht nachgewiesen, ob Filmdiapositive den Glasdiapositiven auch hinsichtlich der Genauigkeit der Aerotriangulation gleichwertig sind. Die Ausmessung der Glasdiapositive erlaubte zunächst den Vergleich Glas - Film. Darüber hinaus wurden natürliche und künstlich markierte Verknüpfungspunkte gemessen, um durch verschiedene Kombinationen bei der Blockberechnung empirisch den Einfluß von Art und Anzahl der Verknüpfungspunkte untersuchen zu können.

5.1 Vergleich von Glas- und Filmdiapositiven

Den direkten Vergleich der Blocktriangulation mit Glas und Filmdiapositiven zeigen die beiden ersten Zeilen der Tabelle 5, Sie betreffen den Einzelblock NS und beziehen sich auf die Messung jeweils aller signalisierten Modell-Verknüpfungspunkte (in der Regel $6 \times 3 = 18$ pro Bildpaar). Der Vergleich zeigt, daß beide Ergebnisse sowohl nach Lage- und Höhengenaugigkeit im wesentlichen als gleichwertig gelten können bzw. sich sogar eine leichte Oberlegenheit des Film-Materials andeutet.

5.2 Untersuchung über Verknüpfungspunkte

Im Gebiet Appenweier waren für Untersuchungszwecke für jedes Bildpaar 6 Dreiergruppen von Verknüpfungspunkten im Gelände signalisiert worden. Diese idealen Verknüpfungen mit jeweils 18 Punkten pro Bildpaar eignen sich als Vergleichsbasis, um den Genauigkeitsabfall des Blocks bei Verwendung einer geringeren Anzahl und/oder anderer Arten von Verknüpfungspunkten feststellen zu können. Zusätzlich zu den signalisierten Verknüpfungspunkten wurden in den Glas-Diapositiven jeweils weitere 6 natürliche und 24 künstlich markierte und übertragene Verknüpfungspunkte gemessen (s. Abb. 6). Zur künstlichen Markierung und Übertragung hat das Landesvermessungsamt Hessen freundlicherweise das Punktübertragungsgerät Wild PUG IV zur Verfügung gestellt.

Die in Tabelle 5 zusammengestellten Vergleiche zeigen einige interessante Zusammenhänge auf:

(1). Zunächst scheint bei signalisierten Verknüpfungspunkten die Lagegenauigkeit unabhängig von der Anzahl der Verknüpfungspunkte zu sein. Man erkennt jedoch, daß die sogenannten starken Verknüpfungen die stärksten systematischen Fehler nach sich ziehen und deshalb durch die Interpolation die wirksamsten Verbesserungen erfahren (von 6.9 auf 4.7 μm). Dagegen werden die Blöcke mit schwacher Verknüpfung durch die Interpolation nur noch unwesentlich verbessert (von 6.7 auf 6.4 μm). Für die Höhengenaugigkeit nach der Blockausgleichung und die Lagegenauigkeit nach der Interpolation zeigt sich insgesamt eine deutliche Abhängigkeit von der Stärke der Verknüpfungen. Diese Abhängigkeit äußert sich auch in den Beträgen der Maximalfehler.

(2). Die Verknüpfung des Blocks durch natürliche Punkte ist offenbar derjenigen mit signalisierten Punkten völlig gleichwertig, wie ein Vergleich der Versionen 2.1 und 2.2 mit 1.3 und 1.4 zeigt.

(3). Bei den künstlich markierten Verknüpfungspunkten bestätigt sich zunächst die Abhängigkeit der Blockgenauigkeit von der Stärke der Verknüpfungen. Noch stärker ausgeprägt als bei den signalisierten Punkten zeigen sich starke systematische Fehler bei den starken Verknüpfungen, die deshalb nach der Blockausgleichung zunächst ungenauer ausfallen als die schwachen Verknüpfungen. Entsprechend wirksam ist jedoch wiederum die Interpolation (von 13,7 auf 7,7 μm bei starker Verknüpfung, von 11,0 auf 9,7 μm bei schwacher Verknüpfung), so daß insgesamt eine in erster Näherung lineare Abhängigkeit sowohl der Lage- als auch der Höhengenaugigkeit von der Anzahl der Verknüpfungspunkte deutlich bestätigt wird.

Als wichtigstes Ergebnis ist hervorzuheben, daß die künstliche Punktmarkierung deutlich ungenauere Blockergebnisse liefert als signalisierte oder natürliche Verknüpfungspunkte. In der Lage beträgt der Unterschied vergleichbarer Fälle mehr als 50 %, in der Höhe immerhin noch 4 - 28 %. Dieses Ergebnis widerspricht anderen Erfahrungen mit dem OEEPE-Testblock Oberschwaben. Man kann deshalb vermuten, daß sich restliche Justierungsfehler des verwendeten Punktübertragungsgerätes auswirken. Die Umkehrung der Genauigkeitsverhältnisse der Versionen 3.1 - 3.5 stützt diese Vermutung. Außerdem übersteigt das hier erreichte Ge-

naugigkeitsniveau die bisher üblichen Anforderungen an die Punktübertragung und damit an die Justierung der Übertragungsgeräte erheblich, die durch Werte von $\sigma_0 = 20 \mu\text{m}$ gekennzeichnet sind.

6. Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit

Obwohl ein auf die Überprüfung der Genauigkeit ausgerichteter Erstversuch in den praktischen Umständen nur eine geringe Aussagekraft über Zeitaufwand und Kosten hat, können aus dem Versuch Appenweier einige Aufwandsabschätzungen abgeleitet werden.

Das Landesvermessungsamt Baden-Württemberg hat eine Kostenabschätzung gemacht, die hier mit freundlicher Genehmigung auszugsweise wiedergegeben ist. Sie benutzt als Kostensätze DM 23.- für 1 Ing.Stunde, DM 60.- für eine Meßtruppstunde (1 Ing., 1 Kraftfahrer, 1 Meßgehilfe) bzw. DM 45.- (1 Ing., 1 Kraftfahrer). Offenbar sind weitere Kosten für Geräte, Rechenanlagen usw. nicht in Rechnung gestellt. Auf dieser Basis erhält man, bezogen auf 84 Neupunkte, folgende Kostenaufstellung:

(1) Vorbereitung und Lochbelege (6 Tage)	DM 13.80/Pkt
(2) Signalisierung (359 Punkte), Verlegung von Paßpunkten, Einmessung der Exzentren, Überwachung und Abbau der Signalisierung (93 Tage Feldarbeit, 1 Ing., 1 Kraftfahrer)	" 418.50/Pkt
(3) Nivellement und Berechnung (21 Tage Feldarbeit, 4 Mann-Gruppe; 13 Tage häuslich, 1 Ing.)	" 187.40/Pkt
(4) Bildflug (pauschal DM 14 500.-)	" 172.60/Pkt
(5) Photogrammetrische Messung (pausch. DM 20 000.-)	" 238.10/Pkt
	<hr/>
	DM 1030.40/Pkt

Nach Korrektur für die ungewöhnlich lange Überwachung der Signalisierung:

DM 837.--/Pkt ¹⁾
=====

An diese Aufstellung könnte man nach eigener Schätzung für den Routinebetrieb, unter Wegfall der Signalisierung der Verknüpfungspunkte, auf der gleichen Basis der Kostenberechnung für einige Positionen reduzierte Werte ansetzen:

(2) 200.-/Pkt, (3) 100.-/Pkt, (5) 120.-/Pkt und käme insgesamt noch auf DM 600.-/Pkt. Mit Reduzierung der Verknüpfungspunkte und Verzicht auf Doppelmessungen sind wohl auch DM 500.- erreichbar, immer bezogen auf die hier angesetzte Berechnungsgrundlage, die nicht alle Kosten erfaßt.

Demgegenüber wird für die terrestrisch-geodätische Netzverdichtung vom Landesvermessungsamt ein Vergleichswert von DM 302.-/Pkt genannt.

¹⁾ Die Kosten der Berechnung sind in der Aufstellung des Landesvermessungsamtes nicht enthalten und bleiben deshalb hier unberücksichtigt.

Es ist somit offensichtlich, daß die photogrammetrische Punktbestimmung in dem vorliegenden Fall unwirtschaftlich ist. Die Ursache dafür bildet die geringe Dichte der Neupunkte, die mit 0.9 Pkt/km^2 nur etwa 1 Punkt/5.3 Modelle beträgt.

Das Bild ändert sich rasch, wenn die Anzahl der zu bestimmenden Neupunkte größer ist. Für z.B. 400 Punkte im gleichen Gebiet ($\hat{=} 4.2 \text{ Punkte/km}^2$) ändern sich die Schätzungen der relativen Kostenpositionen der obigen Aufstellung wie folgt:

(2) 100.-/Pkt, (3) 21.-/Pkt, (4) 36.-/Pkt, (5) 25.-/Pkt. Die Summe entspricht bei einer Punktdichte von rund 1 Punkt/Bildpaar dem Betrag von 190.-/Pkt.

Bei einer noch stärkeren Netzverdichtung auf z.B. 10 Punkte/km, wie z.B. beim System der Einschaltpunkte in Österreich, erniedrigen sich die relativen Kosten der photogrammetrischen Punktbestimmung nach obiger Berechnungsgrundlage weiter auf etwa 110.-/Pkt.

Auch wenn es sich hier nur um relative Hochrechnungen handelt ist deutlich, daß die Photogrammetrische Netzverdichtung mit zunehmender Punktdichte, insbesondere unter den vorliegenden Bedingungen etwa ab 3 Punkten/ km^2 in den wirtschaftlichen Bereich kommt.

Soll andererseits die Genauigkeit der Punktbestimmung höher sein als hier angenommen und z.B. den als Grenzwert anzusehenden Wert von 2 cm erreichen, können die Kosten, wiederum auf der hier angenommenen Berechnungsgrundlage, entsprechend höhere Werte annehmen von etwa

DM 750.-/Pkt bei einer Dichte von etwa 1 Pkt/km^2

DM 250.-/Pkt bei einer Dichte von etwa 4 Pkt/km^2

DM 145.-/Pkt bei einer Dichte von etwa 10 Pkt/km^2

Sind umgekehrt die Genauigkeitsanforderungen geringer, z.B. 5 cm, reduzieren sich die Kosten für Punktdichten von 1, 4, 10 Punkten/ km^2 etwa auf Werte von 410.-, 160.-, 100.- DM/Punkt.

Diese nur relativ zu wertenden Hochrechnungen zeigen deutlich die Tendenz: Die photogrammetrische Punktbestimmung ist umso wirtschaftlicher, je größer die Punktdichte und je geringer die geforderte Genauigkeit ist. Die vom Bildmaßstab her gegebene praktische Genauigkeitsgrenze dürfte bei etwa 2 cm liegen. Bei derartigen Genauigkeitsforderungen ist die photogrammetrische Netzverdichtung mit Punktdichten von 1 - 2 Punkten/ km^2 derzeit nicht wirtschaftlich. Sie kann jedoch mit terrestrisch-geodätischen Verfahren konkurrieren, wenn entweder nur Genauigkeiten von 5 oder 10 cm gefordert werden oder andererseits eine größere Punktdichte von 5 oder 10 Punkten/ km^2 angestrebt wird. Denkbar, und von der Wirtschaftlichkeit her problemlos wäre die Kombination der photogrammetrischen Netzverdichtung mit der Katasterneuvermessung.

Im Ausland werden gegenwärtig Projekte großräumiger photogrammetrischer Netzverdichtung diskutiert, z.B. mit Genauigkeiten von 2 - 3 dm bei Punktabständen bis zu 5 km. Auch für diese Projekte gelten ähnliche Zusammenhänge zwischen Genauigkeit, Punktdichte und Wirtschaftlichkeit, wie sie hier aufgezeichnet worden sind.

Tabelle 1: APPENWEIER, Ergebnisse der Lageblockausgleichung mit unabhängigen Modellen
 (WV, Bildmaßstab 1:7800). Alle Paßpunkte benützt (Rand- und Innenpunkte)

Block	nach Blockausgleichung					nach kleinste Quadrate-Interpolation												
	σ_0	μ_x	μ_y	$\mu_{x,y}$	ϵ_{max}	σ_0	μ_x	μ_y	$\mu_{x,y}$	ϵ_{max}	μ_x	μ_y	$\mu_{x,y}$	ϵ_{max}				
		- cm -					- μm -					- μm -						
Einfach-Blöcke (112 Modelle, 27 Paßpunkte, 77 Vergleichspunkte)																		
OW	3.5	4.0	5.3	4.7	12.8	4.5	5.1	6.8	6.0	16.4	3.2	4.7	4.0	13.3	4.1	6.0	5.1	17.1
WO	3.8	5.4	6.5	6.0	19.1	4.9	6.9	8.3	7.6	24.5	4.5	5.3	4.9	16.3	5.8	6.8	6.3	20.9
NS	3.4	4.7	3.5	4.1	12.8	4.4	6.0	4.5	5.3	16.4	4.0	3.1	3.6	9.9	5.1	4.0	4.6	12.7
SN	3.8	6.0	6.1	6.1	20.3	4.9	7.7	7.8	7.8	26.0	5.1	4.2	4.7	19.7	6.5	5.4	6.0	25.3
Mittel	3.6	5.1	5.5	5.3	30.3	4.7	6.5	7.1	6.8	26.0	4.3	4.4	4.4	19.7	5.5	5.6	5.6	25.3
2-fach Blöcke (224 Modelle, 30 Paßpunkte, 82 Vergleichspunkte)																		
WO/NS	3.8	3.8	4.1	4.0	12.6	4.9	4.9	5.3	5.1	16.2	3.1	3.3	3.2	13.1	4.0	4.2	4.1	16.8
OW/SN	3.7	4.2	5.1	4.7	14.3	4.7	5.4	6.5	6.0	18.3	3.6	3.7	3.7	12.2	4.6	4.7	4.7	15.5
Mittel	3.8	4.0	4.6	4.3	14.3	4.9	5.1	5.9	5.5	18.3	3.4	3.5	3.5	13.1	4.3	4.5	4.4	16.8
4-fach Block WO/OW/NS/SN (448 Modelle, 30 Paßpunkte, 83 Vergleichspunkte)																		
1)	3.8	3.4	3.6	3.5	10.6	4.9	4.4	4.6	4.5	13.6	2.7	2.6	2.7	9.4	3.5	3.3	3.4	12.1
	3.8	3.3	3.2	3.3	10.6	4.9	4.2	4.1	4.2	13.6	2.6	2.4	2.5	9.2	3.3	3.1	3.2	11.8

μ_x, μ_y = quadratische Mittelwerte der Restfehler an den Vergleichspunkten; $\mu_{x,y} = \sqrt{(\mu_x^2 + \mu_y^2)/2}$;
 ϵ_{max} = maximaler Koordinatenfehler an Vergleichspunkten

1) 8 zusätzliche Paßpunkte am Blockrand, 75 Vergleichspunkte

Tabelle 2: APPENWEIER, Ergebnisse der Lageblockausgleichung mit unabhängigen Modellen
 (WW, Bildmaßstab 1:7800). Paßpunkte nur am Blockrand

Block	nach Blockausgleichung					nach kleinsten-Quadrate-Interpolation								
	σ_0	μ_x	μ_y	$\mu_{x,y}$	ϵ_{max}	σ_0	μ_x	μ_y	$\mu_{x,y}$	ϵ_{max}	μ_x	μ_y	$\mu_{x,y}$	ϵ_{max}
		- μm -					- cm -				- μm -			
Einfach-Blöcke (112 Modelle, 25 Paßpunkte, 79 Vergleichspunkte)														
OW	3.5	3.9	4.8	4.4	12.5	4.5	5.0	6.2	5.6	16.0	3.4	4.4	3.9	12.0
WO	3.8	5.9	6.1	6.0	21.7	4.9	7.6	7.8	7.7	27.8	5.7	4.8	5.3	20.3
NS	3.4	4.2	3.8	4.0	11.6	4.4	5.4	4.9	5.2	14.9	3.6	3.3	3.5	10.1
SN	3.9	6.0	5.2	5.6	19.3	5.0	7.7	6.7	7.2	24.7	5.1	4.1	4.6	18.4
Mittel	3.7	5.1	5.0	5.1	21.7	4.7	6.5	6.4	6.5	27.8	4.6	4.2	4.4	20.3
2-fach Blöcke (224 Modelle, 28 Paßpunkte, 84 Vergleichspunkte)														
WO/NS	3.8	3.3	4.0	3.7	12.5	4.9	4.2	5.1	4.7	16.0	3.3	3.2	3.3	13.0
OW/SN	3.7	4.2	4.3	4.3	14.0	4.7	5.4	5.5	5.5	17.9	3.6	3.3	3.5	12.4
Mittel	3.8	3.8	4.2	4.0	14.0	4.9	4.9	5.4	5.2	17.9	3.5	3.3	3.4	13.0
4-fach Block WO/OW/NS/SN (448 Modelle, 28 Paßpunkte, 85 Vergleichspunkte)														
Mittel	3.8	3.1	3.3	3.2	10.4	4.9	4.0	4.2	4.1	13.3	2.6	2.4	2.5	7.7
											3.3	3.1	3.2	9.9

Tabelle 3: APPENWEIER, Block SN(WW,112 Modelle, 1:7800)

Korrektur systematischer Lage-Fehler

	σ_0	$\mu_{x,y}$	ϵ_{max}	σ_0	$\mu_{x,y}$	ϵ_{max}
	- cm -			- μm -		
I	3.8	6.1	20.3	4.9	7.8	26.0
II	(3.8)	4.7	19.7	(4.9)	6.0	25.3
III	2.9	4.4	13.1	3.7	5.6	16.8

I: Blockausgleichung (PAT-M-43)

II: I + kleinste Quadrate Interpolation

III: Blockausgleichung mit zusätzlichen Parametern

Tabelle 4: APPENWEIER, Höhengenaugigkeit nach Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen (WW, Bildmaßstab 1:7800, h = 1193 m, Höhenpaßpunktraster mit 4 b Abstand)

Block	$\sigma_{\theta H}$		mittl. Höhendifferenzen μ_z			ϵ_{max}	
	(cm)	(μm)	(cm)	(μm)	(‰h)	(cm)	(μm)
<u>Einfach-Blöcke</u> (112 Modelle, 138 Höhenpaßpunkte ¹⁾ , 60 Vergleichspunkte)							
OW	5.7	7.3	10.2	13.1	0.085	23.3	29.9
WO	6.0	7.7	11.6	14.9	0.097	27.4	35.1
NS	5.9	7.6	8.9	11.4	0.075	23.8	30.5
SN	6.0	7.7	11.4	14.6	0.096	30.3	38.8
Mittel			<u>10.6</u>	13.6	0.089		
<u>2-fach Blöcke</u> (224 Modelle, 151 Höhenpaßpunkte ¹⁾ , 64 Vergleichspunkte)							
WO/NS	6.5	8.3	9.1	11.7	0.076	21.3	27.3
OW/SN	6.2	7.9	9.1	11.7	0.076	23.2	29.7
Mittel			<u>9.1</u>	11.7	0.076		
<u>4-fach Block</u> WO/OW/NS/SN (448 Modelle, 153 Höhenpaßpunkte ¹⁾ , 65 Vergleichsp.							
	6.4	8.2	<u>7.5</u>	9.6	0.063	15.7	20.1

Tabelle 5: APPENWEIER, Block NS (WW, 1:7800, 112 Modelle)
 Einfluß der Modellverknüpfungen auf die Lage-
 und Höhengenaugigkeit des Blocks

Dia- positive	VP- Version	nach der Blockausgleichung						nach kl. Quadr. Interp.	
		Lage			Höhe			Lage	
		σ_0 (μm)	$\mu_{x,y}$ (μm)	ϵ_{max} (μm)	σ_0 (μm)	μ_z (μm)	ϵ_{max} (μm)	$\mu_{x,y}$ (μm)	ϵ_{max} (μm)
Film	sign. VP 1.2 (18)	4.4	5.3	16.4	7.6	11.4	30.5	4.7	12.7
Glas	sign. VP								
	1.1 (18)	4.4	6.9	19.2	7.8	12.3	41.0	4.7	11.7
	1.2 (12)	4.4	6.4	16.7	7.9	14.1	42.3	5.1	15.0
	1.3 (6)	4.4	6.9	22.9	8.8	15.1	43.6	6.0	19.7
	1.4 (4)	4.5	6.7	25.5	9.2	16.3	46.1	6.4	25.5
	natürl. VP								
	2.1 (6)	4.9	6.9	21.2	8.8	14.6	43.6	6.2	21.0
	2.2 (4)	4.6	6.9	21.5	8.7	16.9	52.6	6.4	18.8
	künstl. VP								
	3.1 (24)	7.2	13.7	37.8	10.6	13.0	37.2	7.7	28.2
3.2 (12)	7.1	11.8	32.7	10.4	16.2	44.9	8.2	28.1	
3.3 (12)	7.6	11.9	43.6	10.1	14.7	41.0	8.8	37.9	
3.4 (6)	7.2	11.0	42.3	10.0	18.8	51.3	9.2	40.4	
3.5 (4)	7.2	11.0	40.4	10.0	19.5	56.4	9.7	39.2	

Abb. 3a: APPENWEIER
Block SN, nach Blockausgleichung

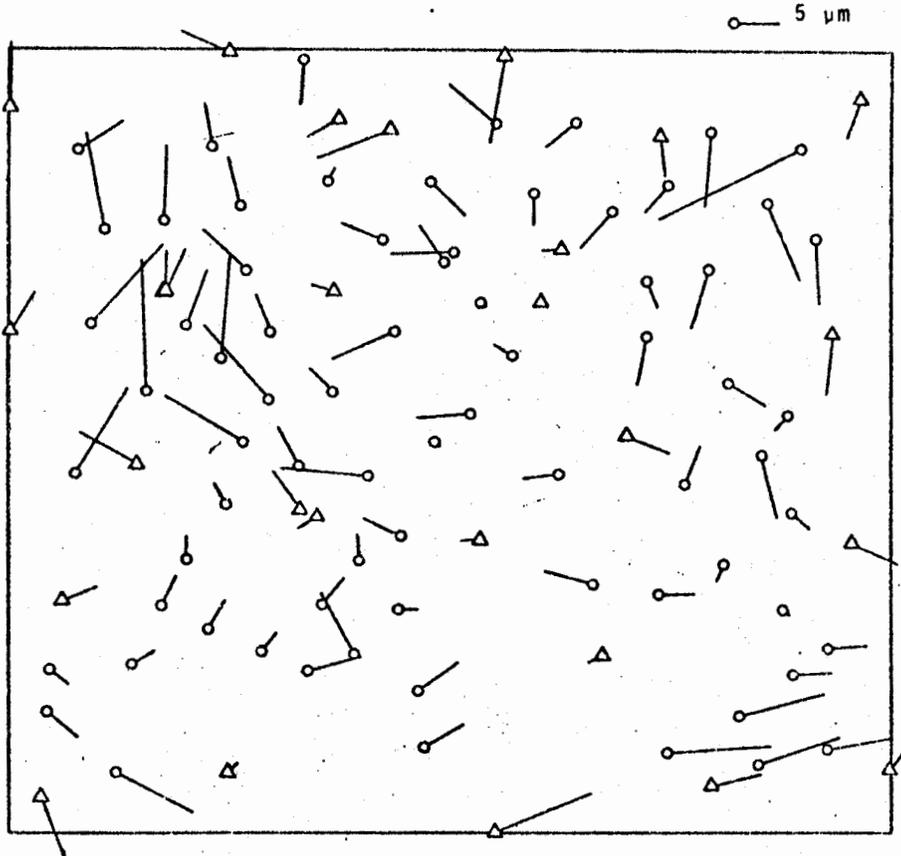


Abb. 3b: APPENWEIER
Block SN, nach kl.Quadrate-Interpolation

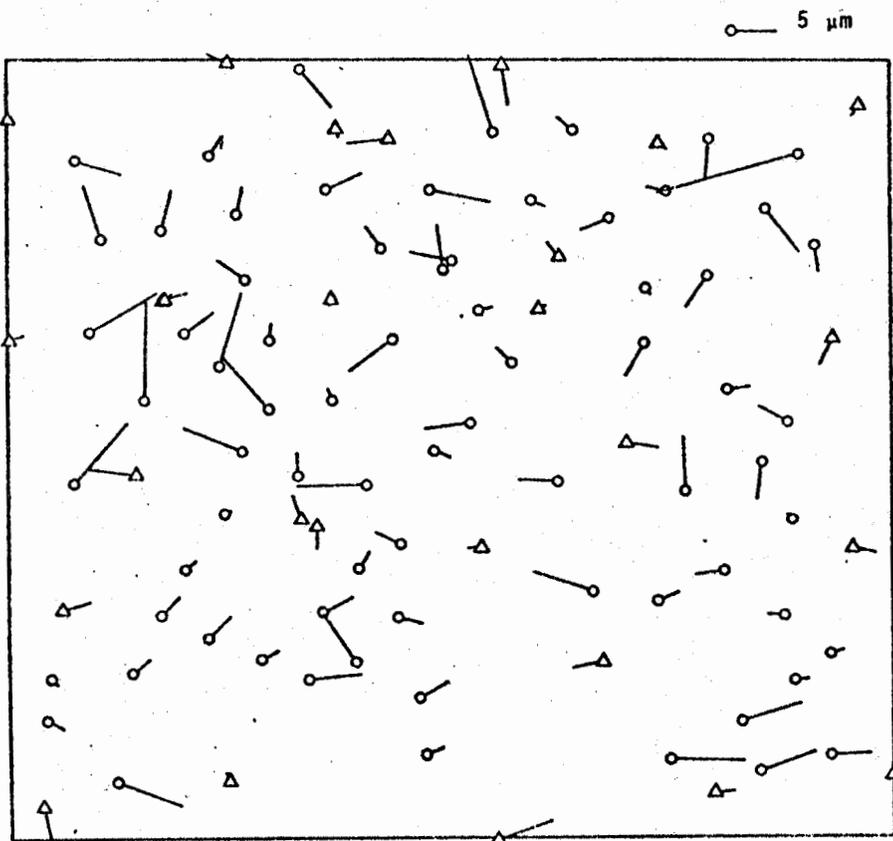


Abb. 4a: APPENWEIER
4-fach Block, nach Blockausgleichung

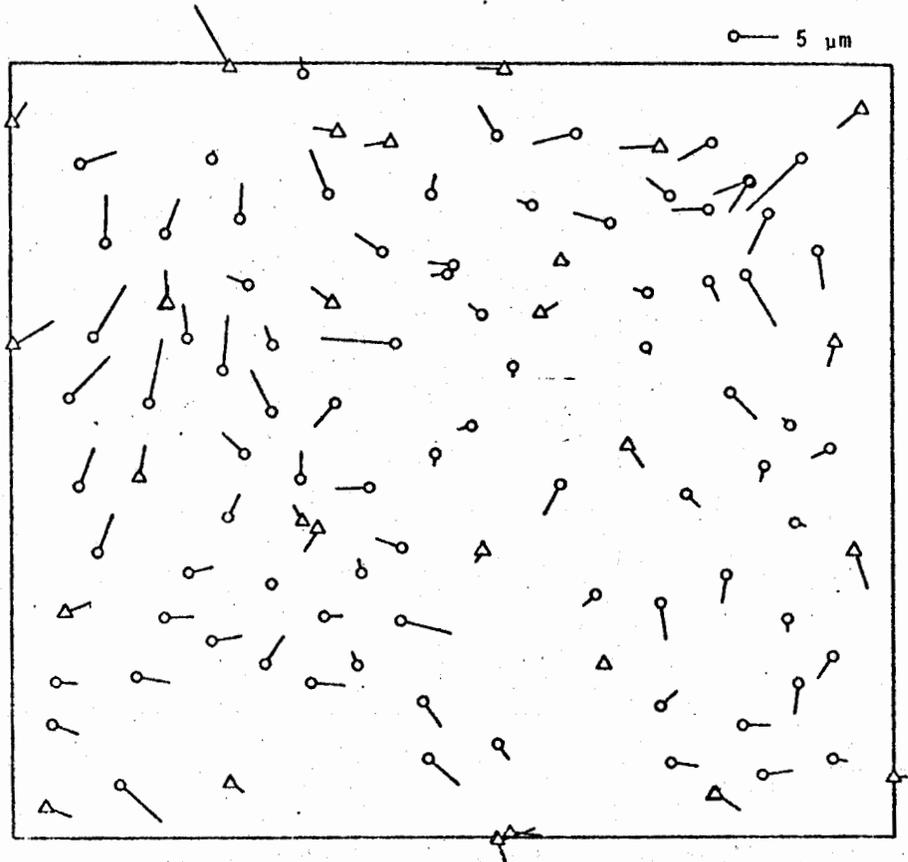


Abb. 4b: APPENWEIER
4-fach Block, nach kl. Quadrate-Interpolation

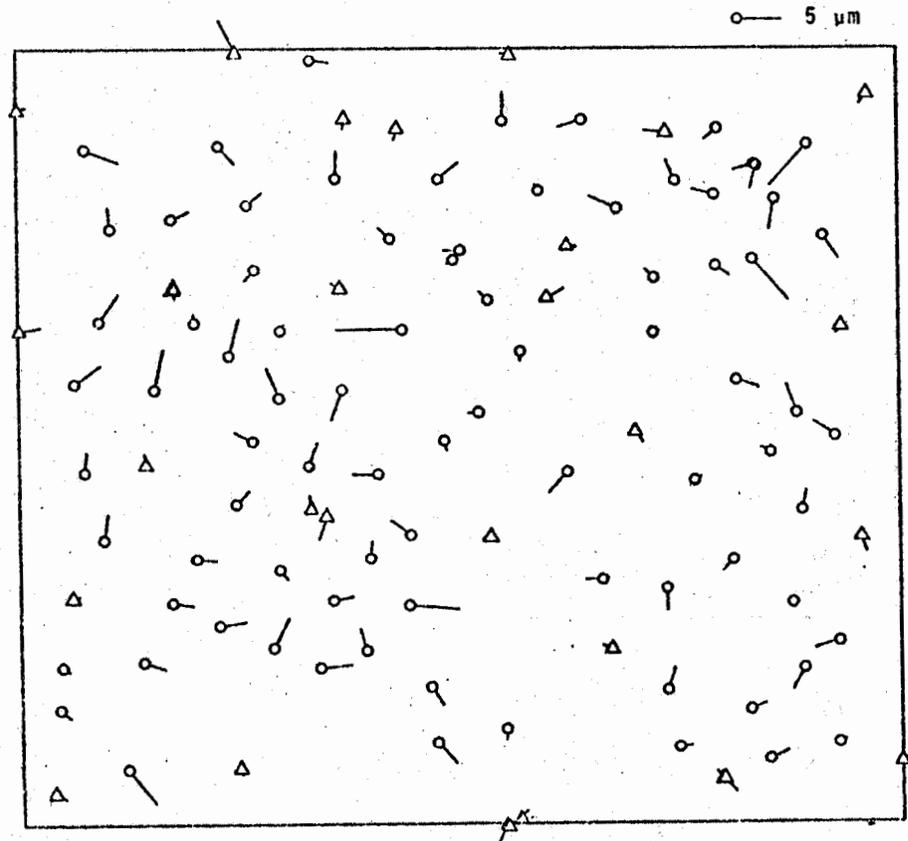


Abb. 5: APPENWEIER
 Block SN, nach Blockausgleichung
 mit zusätzlichen Parametern

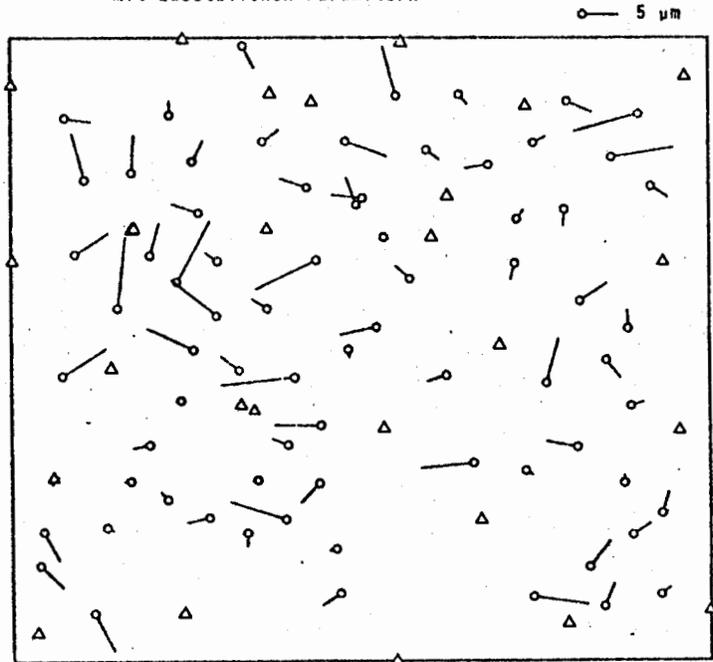
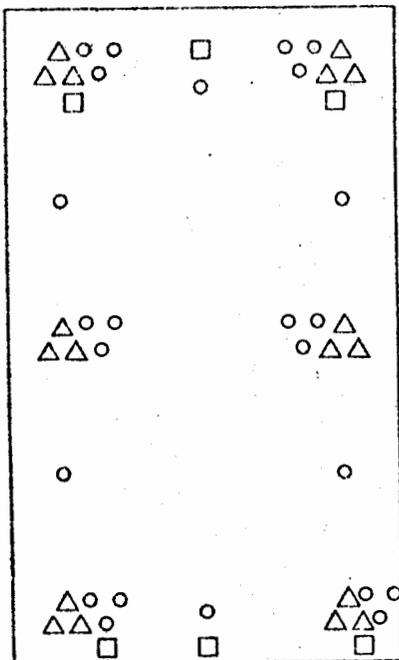


Abb. 6: APPENWEIER, Block NS, Glasdiapositive
 Arten und Anordnung der Verknüpfungspunkte (VP)



Zur Blockausgleichung benützte Versionen:

1. Signalisierte Verknüpfungspunkte
 - 1.1 18 VP, 6 Dreiergruppen
 - 1.2 12 VP, 4 Dreiergruppen in den Modellecken
 - 1.3 6 VP, von jeder Dreiergruppe je 1 Punkt
 - 1.4 4 VP, in jeder Modellecke 1 Punkt
2. Natürliche Verknüpfungspunkte
 - 2.1 6 VP, je 3 Punkte am oberen und unteren Modellrand
 - 2.2 4 VP, in jeder Modellecke 1 Punkt
3. Künstlich markierte Verknüpfungspunkte
 - 3.1 24 VP, 6 Dreiergruppen + 6 Einzelpunkte
 - 3.2 12 VP, aus jeder Dreiergruppe 1 Punkt + 6 Einzelpunkte
 - 3.3 12 VP, 4 Dreiergruppen in den Modellecken
 - 3.4 6 VP, aus jeder Dreiergruppe 1 Punkt
 - 3.5 4 VP, in jeder Modellecke 1 Punkt

-  Signalisierte VP (18)
-  natürliche VP (16)
-  künstlich markierte VP (24)