

EMPIRISCHE ANALYSE UND KORREKTUR SYSTEMATISCHER MODELLFEHLER BEIM OEEPE-VERSUCH OBERSCHWABEN

Von M. Schilcher, Stuttgart

1. Einleitung

1.1 Die Entwicklung strenger Ausgleichungsverfahren für die photogrammetrische Punktbestimmung sowie die Bereitstellung entsprechender Programmsysteme für die praktische Anwendung kann im wesentlichen als abgeschlossen gelten. Das wissenschaftliche Interesse konzentriert sich daher in jüngster Zeit verstärkt auf die Verfeinerung des mathematischen Modells und einer damit erhofften nochmaligen Genauigkeitssteigerung. Dies gilt insbesondere für die Behandlung systematischer Bild- und Modellfehler zur Verbesserung von Blockausgleichungsergebnissen.

1.2 Verschiedene Autoren haben sich bereits in den vergangenen Jahren in überwiegend theoretischen Beiträgen mit dem Problem der systematischen Fehler beschäftigt [1], [2], [3]. Inzwischen wird der Erfassung und Korrektur systematischer Fehler aber auch erhöhte praktische Bedeutung beigemessen, wie die Zahl der Beiträge zu diesem Thema für das Symposium der Kommission III/ISP, 1974, in Stuttgart, deutlich beweist (siehe [4]). Obwohl in jüngster Zeit bereits verschiedene Methoden und Verfahren der Berücksichtigung systematischer Fehler sowohl für Bündel als auch für Modelle bekannt geworden sind, [5], [6], [7], besteht noch weitgehend Unklarheit über die wichtigsten Eigenschaften der bei praktischen Fällen auftretenden systematischen Fehler. Dies gilt für Größe und Typ sowie für Ausdehnung und Konstanz systematischer Fehler innerhalb eines Blockes genauso, wie für die Frage der Abhängigkeit systematischer Fehler von verschiedenen Parametern wie Aufnahmekammer, Flugtag, Flugrichtung, Überdeckung, Auswertegerät, Paßpunktanordnung usw.

1.3 Das Ziel dieser empirischen Untersuchung ist es daher, durch eine Analyse der Restfehler an Verknüpfungspunkten und Projektionszentren nach einer Blockausgleichung ohne vorherige Korrektur systematischer Fehler, Aufschlüsse über die wichtigsten Eigenschaften der systematischen Modellfehler zu erhalten. Dazu wird das Material des OEEPE-Versuchs Oberschwaben untersucht, das sowohl von der Größe wie auch von der Versuchsanordnung her (Befliegung mit verschiedenen Kammern, signalisierte Verknüpfungspunkte) relativ sichere Aussagen ermöglicht und sich deshalb für eine derartige Untersuchung besonders eignet.

2. Der OEEPE-Versuch Oberschwaben

Der Aerotriangulationstest Oberschwaben wurde bereits ausführlich in [8] und [9] beschrieben. Da für die Ermittlung von systematischen Bild- und Modellfehlern Einzelheiten der Versuchsanordnung, Befliegung und auch Auswertung von Bedeutung sind, werden die wichtigsten Daten des Versuchs nocheinmal kurz zusammengestellt:

Das 40 x 62.5 km² große Testgebiet Oberschwaben wurde im Frühjahr 1969 mit einer WW-Kammer Zeiss RMK 15/23 und einer OWW-Kammer Zeiss RMK 8.5/23 mit 60 % Längs- und Querüberdeckung aufgenommen. Insgesamt wurden für beide Kammer je-weils 15 Streifen mit je 26 Bildern parallel zu den Nord-Süd-Gitterlinien des Gauß-Krüger-Koordinatensystems geflogen. Die Aufnahme des Testgebietes erfolgte an insgesamt 5 Flugtagen durch gezielte Befliegung (Flugdatum und Flugrichtung der Streifen s. Abb. 2). Neben den Paßpunkten waren auch die Verknüpfungspunkte durch Doppelsignale gekennzeichnet, so daß die meisten Modelle 6 x 2 signalisierte Verknüpfungspunkte in den jeweiligen Standardpositionen enthalten.

Für die Auswertung der Bilder wurden die beiden 60 %-igen Gesamtblöcke in je-weils 2 Teilblöcke mit je 20 % Querüberdeckung unterteilt und nach dem Ort des Auswertezentrums benannt:

Weitwinkel: Block Frankfurt, ungerade Streifennummern, (1,3,5...13,15),
 8 Streifen, 208 Bilder bzw. 200 Modelle
 Block Wien, gerade Streifennummern, (2,4,...12,14),
 7 Streifen, 182 Bilder bzw. 175 Modelle

Oberweitwinkel: Block Den Haag, ungerade Streifennummern, (1,3,5...13,15),
 8 Streifen, 208 Bilder bzw. 200 Modelle
 Block Delft, gerade Streifennummern, (2,4,...12,14),
 7 Streifen, 182 Bilder bzw. 175 Modelle.

Die Messung der Bilder erfolgte mit Stereokomparatoren (Zeiss PSK: WW-Frankfurt, OWW-Den Haag; Wild StK 1: WW-Wien, OWW-Delft). Die Bildkoordinaten wurden wegen radialsymmetrischer Verzeichnung, Erdkrümmung und Refraktion korrigiert. Die relative Orientierung unabhängiger Modelle erfolgte analytisch. Für die Modelle wurden anschließend mit dem Blockausgleichsprogramm PAT-M43 eine Reihe von Ausgleichungen gerechnet, deren Ergebnisse in |10| publiziert sind. Die bei diesen Blockausgleichungen ermittelten Restfehler an Verknüpfungspunkten und Projektionszentren bilden das Ausgangsmaterial für diese Untersuchung.

3. Methode zur Bestimmung systematischer Bild- und Modellfehler nach der Blockausgleichung

3.1 Unter systematischen Bild- und Modellfehlern verstehen wir Fehler, die als Funktion der Lage eines Punktes im Bild oder im Modell dargestellt werden können und die für einen gegebenen Ort im Bild oder Modell über eine größere Gruppe von Bildern oder Modellen konstant sind. Im Sinne der Statistik handelt es sich um Trendfunktionen.

Nach einer Blockausgleichung lassen sich systematische Fehler für Bündel und unabhängige Modelle durch Bildung der Durchschnittswerte der Restfehler an den jeweiligen Verknüpfungspunkten in den 9 bzw. 6 Standardpositionen des Bildes bzw. des Modells darstellen (vgl. Abb. 1a und Abb. 1b).

Die Durchschnittswerte der Restfehler in den Standardpunkten können je nach Ausdehnung und Konstanz der Systematik nur über Teilbereiche eines Blocks bestimmt werden, z.B. für einzelne Streifen oder Streifen gleicher Flugrichtung, oder bei einheitlicher Systematik über alle Modelle eines Blockes. Bei einer genügend großen Anzahl von Modellen bzw. Restfehlern kann der von Null abweichende Betrag des Mittels als gute Näherung des systematischen Anteils in diesem Punkt angesehen werden.

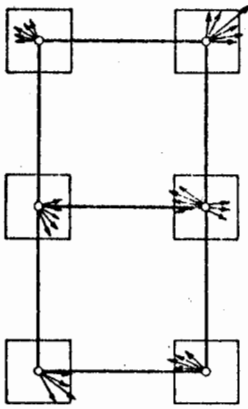


Abb. 1a
 Restfehler der Verknüpfungspunkte
 in den 6 Standardbereichen durch
 Superposition der Modelle nach
 einer Blockausgleichung

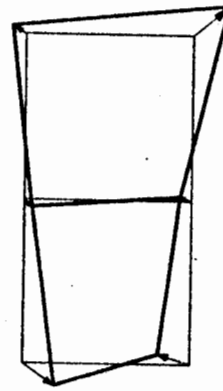


Abb. 1b
 Systematische Modellfehler
 aus den Durchschnittswerten
 der Restfehler in den Standard-
 bereichen

3.2 Systematische Modellfehler beim Versuch Oberschwaben

Beim Versuch Oberschwaben mußten für die Ermittlung der systematischen Modellfehler mittels Superposition der Modelle zunächst sämtliche Modelle eines Blocks in ein einheitliches Bezugsmodell transformiert werden. Dafür erhielten die beiden Projektionszentren eines Modells die Koordinaten $x_1=y_1=0$, $x_2=2500$ m, $y_2=0$ zugewiesen, wobei 2500 m dem durchschnittlichen Basisabstand zweier Projektionszentren nach der Flugplanung entspricht (vgl. Abb. 1c). Die positiven Richtungen der Koordinatenachsen des Bezugsmodells beziehen sich auf das übergeordnete Gauß-Krüger-Koordinatensystem der Blockausgleichung.

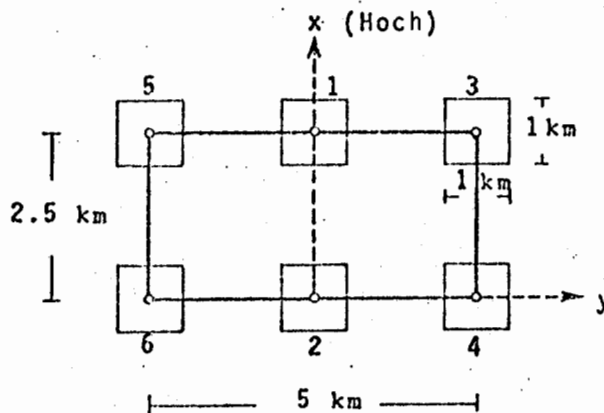


Abb. 1c Bezugsmodell für die Ermittlung der systematischen Modellfehler

Nach der Transformation konnten die Restfehler der Verknüpfungspunkte entsprechend ihrer Lage im Einheitsmodell den in Abb. 1c dargestellten 6 Standardbereichen zugeordnet werden. Aus den Mittelwerten der Restfehler in X, Y und Z, die für einen einzelnen Block für jeden Bereich streifenweise oder für Streifen gleicher Flugrichtung berechnet wurden, ergaben sich dann die systematischen Modelldeformationen.

Auf die gleiche Weise wurden auch die systematischen Fehler an den Projektionszentren bestimmt.

Der Umfang dieser empirischen Untersuchung erstreckt sich auf das gesamte Material Oberschwaben:

- Auf die 4 Teilblöcke mit 20 % Querüberdeckung und 200 bzw. 175 Modelle
- sowie auf die beiden WW- und OWW-Gesamtblöcke mit 60 % Querüberdeckung und 375 Modelle.

Im einzelnen wurden dabei folgende Blockausgleichungen und Paßpunktversionen untersucht:

Version 0: alle Lage- und Höhenpaßpunkte

WW: Block Frankfurt (q=20%), Wien (q=20%), WW (q=60%)

OWW: Block Den Haag (q=20%), Delft (q=20%), OWW (q=60%)

Version 1: Lage: dichter PP-Rand, $i=2$ Basislängen

Höhe: Paßpunktketten, Abstand $i=2$ Basislängen

WW: Block Frankfurt, WW (q=60%)

OWW: Block Den Haag

Version 5: Lage: 4 Eckpunkte

Höhe: 3 Paßpunktketten, Abstand $i=12.5$ Basislängen mit 4 zusätzlichen Punkten am Blockrand zwischen den Paßpunktketten

WW: Block Frankfurt, WW (q=60%)

OWW: Block Den Haag

Bei der Blockausgleichung mit Version 0 sind in jedem Modell 3 - 4 Paßpunkte vorhanden, so daß die Ausgleichung genähert einer Absolutorientierung eines Einzelmodells entspricht. Daher kann mit Version 0 die vorhandene Modelldeformation am besten erfaßt werden. Bei einer Ausgleichung mit Version 5 unterliegt der Block dagegen durch die geringe Zahl von Paßpunkten nur einem geringen Zwang zur Einpassung und gewisse systematische Modelldeformationen können zu Blockdeformationen führen, die sich nicht in Klaffungen zwischen den Modellen zu äußern brauchen. Daher läßt sich mit Version 5 die wirklich vorhandene Modelldeformation durch eine Untersuchung der Restfehler an den Verknüpfungspunkten nur teilweise erfassen. Um den Einfluß der Paßpunktanordnung auf systematische Fehler feststellen zu können, wurden für die Blöcke Frankfurt, Den Haag und WW (q=60%) zusätzlich die Versionen 1 und 5 in die Untersuchung miteinbezogen.

4. Ergebnisse der Analyse der systematischen Modelldeformationen

Die Ergebnisse der umfangreichen Untersuchung sind zahlenmäßig in den Tabellen 1 - 6 zusammengestellt. Die Größe der ermittelten Modelldeformationen wird jeweils durch die durchschnittlichen Koordinaten-Restfehler an den 6 Standard-Modellverknüpfungspunkten angegeben.

Die einzelnen Tabellen enthalten folgende Resultate:

Tabellen 1 und 2:

Systematische Modellfehler für jeden der 15 Weitwinkel- und Oberweitwinkelstreifen bei 20 % Querüberdeckung und der Blockausgleichung mit Version 0. (alle Paßpunkte)

Tabellen 3 und 4:

Systematische Modellfehler der einzelnen Blöcke in Abhängigkeit von Flugrichtung und Querüberdeckung. Da sich bei den Einzelstreifen eine offensichtlich starke Abhängigkeit der systematischen Fehler von der Flugrichtung ergab, wurden für die Blöcke Streifen gleicher Flugrichtung in Gruppen zusammengefaßt und aus dem Mittel die Modelldeformation für die jeweilige Flugrichtung berechnet. Diesen Mittelwerten für die verschiedenen Flugrichtungen wurde jeweils das Gesamtittel eines Blocks bei Nichtberücksichtigung unterschiedlicher Flugrichtungen gegenübergestellt.

Tabelle 5:

Abhängigkeit systematischer Modellfehler von der Paßpunktversion durch Vergleich der Ergebnisse bei Ausgleichungen mit Version 0, 1 und 5 für die Blöcke WW-Frankfurt (q=20%), ÜWW-Den Haag (q=20%) und WW (q=60%).

Tabelle 6:

Systematische Fehler der Projektionszentren, streifenweise und für die einzelnen Blöcke getrennt nach den verschiedenen Flugrichtungen.

5. Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchung brachten interessante und aufschlußreiche Erkenntnisse über die wichtigsten Eigenschaften der systematischen Modellfehler:

- die Größe der systematischen Modellfehler an Verknüpfungspunkten und Projektionszentren ist beträchtlich
- der Typ der auftretenden Modelldeformation ist in der Lage trapezförmig; in der Höhe eine zylindrische Durchbiegung in der Modellmitte und eine Querneigung der Modelle
- die systematischen Modellfehler sind sehr stark vom Aufnahmesystem (Kammer) abhängig und sind in erstaunlich hohem Maße konstant.

5.1 Größe der systematischen Modellfehler

Die ermittelten systematischen Modellfehler sind verglichen mit den mittleren Gewichtseinheitsfehlern σ_0 nach der Blockausgleichung in Lage und Höhe erstaunlich groß.

5.1.1 In der Lage treten die maximalen Modelldeformationen in den Modellecken auf, während die Nadirpunkte 1 und 2 in der Modellmitte erkennbar kleinere Werte aufweisen (vgl. Abb. 3 - 5).

Bei 20 % Querüberdeckung betragen die Maximalwerte der systematischen Koordinatenfehler in den Modellecken für die Mittel aus den Streifen gleicher Flugrichtung in x und y: $9.8 \mu\text{m}$ und $5.1 \mu\text{m}$ bei Weitwinkel sowie $8.5 \mu\text{m}$ und $7.4 \mu\text{m}$ bei Oberweitwinkel. Bei den Einzelstreifen zeigen sich z.T. noch größere Werte (vgl. Tab. 1 - 4).

Für 60 % Querüberdeckung ergeben sich nur sehr geringe Unterschiede zu den Ergebnissen bei $q=20\%$. Der quadratische Mittelwert der Differenzen an den 6 Standardpunkten beträgt für Weitwinkel und Oberweitwinkel jeweils nur $0.5 \mu\text{m}$. Signifikante Unterschiede ergeben sich lediglich für die Nadirpunkte 1 und 2 durch eine zusätzliche seitliche Verknüpfung der Modellmitte mit benachbarten Streifen bei $q=60\%$. Allerdings erreichen auch diese Differenzen an den Nadirpunkten nur maximal $1.5 \mu\text{m}$ für Weitwinkel und $1.0 \mu\text{m}$ für Oberweitwinkel (vgl. Tab. 3, 4).

Aus den geringen Unterschieden der systematischen Fehler in der Lage zwischen 20 % und 60 % Querüberdeckung kann allgemein der Schluß gezogen werden, daß die systematischen Modellfehler in der Lage bereits bei $q=20\%$ nahezu vollständig erfaßt werden können, mit Ausnahme der allerdings nur sehr kleinen Differenzen in den Nadirpunkten.

5.1.2 In der Höhe zeigen sich die wirklich vorhandenen systematischen Modellfehler nur bei 60 % Querüberdeckung (vgl. Abb. 6, 7). Daher sind die ermittelten systematischen Höhenfehler bei $q=20\%$ relativ klein und deutlich kleiner als die entsprechenden systematischen Fehler in der Lage. Dabei treten die Maximalwerte häufig in den Punkten 1 und 2 in der Modellmitte auf und betragen für die Mittel aus den Streifen gleicher Flugrichtung $3.8 \mu\text{m}$ bei Weitwinkel und $3.4 \mu\text{m}$ bei Oberweitwinkel.

Die tatsächlich vorhandenen systematischen Höhenfehler bei 60 % Querüberdeckung sind erheblich größer und erreichen bei Weitwinkel und Oberweitwinkel sogar deutlich größere Werte als die systematischen Fehler in der Lage. (vgl. Tab. 3, 4). Die Maximalwerte treten dabei eindeutig in der Modellmitte auf und erreichen für die Mittelwerte aus den Streifen gleicher Flugrichtung $8.1 \mu\text{m}$ bei Weitwinkel und $9.6 \mu\text{m}$ bei Oberweitwinkel. Die Modellecken werden bei $q=60\%$ ebenfalls stärker deformiert und weisen für beide Kammern in jeweils beiden Flugrichtungen ausschließlich positive Werte auf. Denken wir uns daher die Höhendeformation um die Fehler in den Modellecken angehoben, - die Modellecken lägen dann in einer Ebene -, so ergeben sich in der Modellmitte maximale systematische Höhenfehler, die bei Weitwinkel und Oberweitwinkel bei etwa $10 \mu\text{m}$ liegen. Das Auftreten dieser enormen Durchbiegung in der Modellmitte ist der Grund dafür, daß die wirklich vorhandene Höhendeformation bei 20 % Querüberdeckung nicht erfaßt werden kann, da sich die Effekte der Durchbiegung durch die ausschließliche Verknüpfung der Punkte 1 und 2 in Streifenrichtung nicht in den Restfehlern dieser Punkte bemerkbar machen. Bei 60 % Querüberdeckung dagegen zeigen sich durch die zusätzliche seitliche Modellverknüpfung der

Nadirpunkte mit benachbarten Streifen auch die systematischen Höhendeformationen in der Modellmitte in voller Größe (vgl. Abb. 1d).

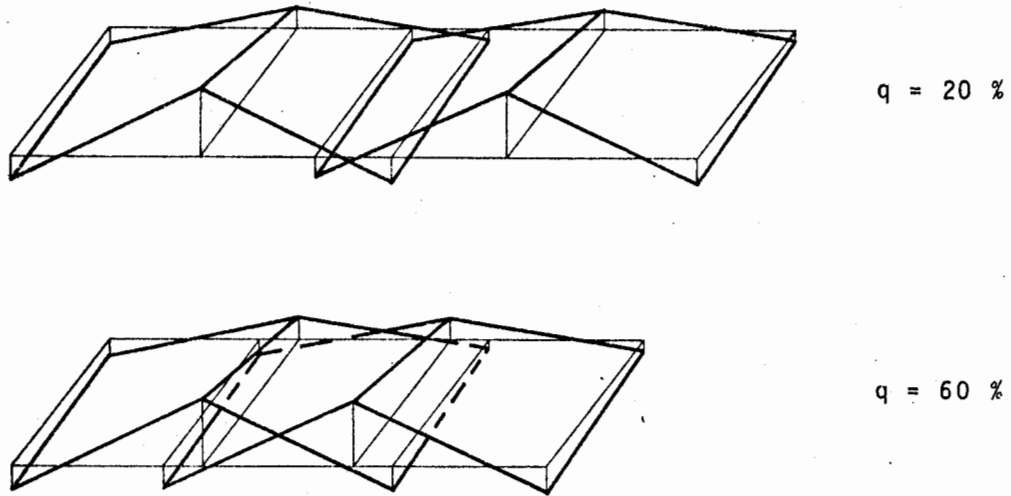


Abb. 1d

Erfaßbarkeit der systematischen Höhenfehler bei 20 % und 60 % Querüberdeckung

5.1.3 Die systematischen Fehler an den Projektionszentren weisen grundsätzlich kleinere Werte auf als diejenigen an den Verknüpfungspunkten, sie sind aber dennoch deutlich sichtbar. Während sie in der Lage bei Weitwinkel beinahe die Größe der systematischen Fehler an den Verknüpfungspunkten erreichen, sind sie bei Oberweitwinkel nur sehr klein. In der Höhe ist das Verhältnis umgekehrt, nur geringen systematischen Fehlern bei Weitwinkel (1 - 2 μ m) stehen Fehler von etwa 3 μ m bei Oberweitwinkel gegenüber.

Die in Tabelle 6 angegebenen systematischen Fehler der Projektionszentren beziehen sich nur auf das Projektionszentrum 1, da die Fehler am Projektionszentrum 2 nur durch das Vorzeichen unterschieden symmetrisch gleich sind.

5.2 Typ der Modelldeformation

Hinsichtlich der Korrektur ist neben der Größe der systematischen Fehler auch der Typ der auftretenden Modelldeformation von besonderem Interesse. Aus den graphischen Darstellungen der Modelldeformationen (Abb. 3 - 7) ist klar zu erkennen, daß sich bei beiden Kammern - Weitwinkel und Oberweitwinkel - in Lage und Höhe jeweils derselbe Deformationstyp ergibt.

5.2.1 In der Lage läßt sich der Typ der Modelldeformation folgendermaßen charakterisieren:

- trapezförmige Deformation der Modelle
- zwischen den kurzen Modellseiten treten durch Dehnungen bzw. Verkürzungen erhebliche Maßstabsunterschiede auf.

Aus den Abb. 3 - 5 lassen sich weitere interessante Merkmale erkennen:

- die Deformationsmodelle für Weitwinkel und Oberweitwinkel unterscheiden sich bei gleichem Typ und etwa gleicher Größe durch die Form (vgl. Abb. 4, 5)

- bei $q=20\%$ bleibt die Geradlinigkeit zwischen den Punkten 3-1-5 und 4-2-6 erhalten; die systematischen Fehler in den Punkten 1 und 2 weisen bei gleicher Größe nur entgegengesetztes Vorzeichen auf
- bei $q=60\%$ liegen die Punkte 1 und 2 durch die Änderungen in der Verknüpfung geringfügig außerhalb der Geraden $\overline{3-5}$ und $\overline{4-6}$.

5.2.2 In der Höhe tritt der tatsächliche Typ der Modelldeformation aus den bereits genannten Gründen nur bei 60 % Querüberdeckung in vollem Umfang in Erscheinung:

- starke zylindrische Durchbiegung der Modelle in der Mitte
- Querneigung der Modelle, die sich mit der Flugrichtung ändert.
Die maximalen Neigungen treten dabei in der Modellmitte auf und sind trotz der unterschiedlichen Größe der Deformation bei 20 % und 60 % Querüberdeckung fast exakt gleich groß (vgl. Tab. 3, 4)
- zwischen Weitwinkel und Überweitwinkel stimmt im Gegensatz zur Lage neben dem Typ auch die Form der Deformationsmodelle sehr gut überein (vgl. Abb. 6, 7).

Auf eine weitere Analyse über die Typen der systematischen Fehler, insbesondere über die Möglichkeiten der mathematischen Erfassbarkeit wird an dieser Stelle verzichtet, da sich Ebner in seinem Vortrag [11] sehr ausführlich mit diesen Fragen beschäftigt.

5.3 Abhängigkeiten der systematischen Fehler

Bei einer Analyse systematischer Fehler ist neben der Größe auch die Klärung der Frage, von welchen Parametern sie abhängen von besonderem Interesse.

Parameter des Bildfluges: Flugrichtung und Aufnahmesystem, Flugtag

Die verschiedenen Tabellen und Abbildungen zeigen klar, daß sich die Modelldeformationen, bezogen auf das übergeordnete Gauß-Krüger-Koordinatensystem, der Blockausgleichung in erster Linie mit der Flugrichtung ändern. Dies gilt für Lage und Höhe bei Weitwinkel und Überweitwinkel ebenso, wie für die Projektionszentren (vgl. Abb. 3 - 7).

Werden die systematischen Fehler durch Drehung auf eine gemeinsame Flugrichtung bezogen, so stimmen die Ergebnisse zwischen den beiden Flugrichtungen NS und SN sehr gut überein (vgl. Abb. 3, 4). Die Differenzen zwischen NS- und SN-Deformationen betragen im Mittel für Lage und Höhe jeweils nur $0.5 \mu\text{m}$ und $0.8 \mu\text{m}$ bei Weitwinkel sowie $1.4 \mu\text{m}$ und $0.8 \mu\text{m}$ bei Überweitwinkel.

Zu welchem Ergebnis die Nichtberücksichtigung unterschiedlicher Flugrichtungen in einem Block führt, ist für die Lage klar aus den Abb. 3 - 5 zu erkennen. Das Gesamtmittel über alle Modelle eines Blocks enthält in diesem Falle nur noch die von der Richtung unabhängigen Deformationen. Die von der Flugrichtung abhängige Trapezform geht weitgehend verloren.

In der Höhe wird bei Nichtberücksichtigung unterschiedlicher Flugrichtungen der richtungsabhängige Anteil der Modellneigung eliminiert.

Das Flugdatum hat keinen signifikanten Einfluß auf die systematischen Modellfehler, obwohl die Flugtage bei Weitwinkel über einen Monat und bei Überweitwinkel immerhin 16 Tage auseinanderlagen (vgl. Abb. 2). Die sicherlich veränderten Aufnahmebedingungen (physikalische Verhältnisse, fortgeschrittene Vegetation zwischen April und Mai, verschiedene Filme, gegebenenfalls verschiedene Kassetten, Filmentwicklung etc.) haben demnach keine erkennbaren Auswirkungen auf die systematischen Fehler.

Insgesamt läßt sich aus der ermittelten Abhängigkeit der systematischen Fehler der interessante Schluß ziehen, daß die Modelldeformationen in erster Linie vom Aufnahmesystem (Kammer) abhängig sind. Diese Annahme wird auch aus folgenden Eigenschaften der systematischen Fehler ersichtlich:

- die Abhängigkeit der systematischen Fehler von der Flugrichtung entsteht im Grunde nur durch die Beziehung zum übergeordneten Koordinatensystem der Blockausgleichung. In Wirklichkeit dürfte es sich um systematische Fehler des Aufnahmesystems handeln, wie die geringen Unterschiede zwischen den Deformationen der verschiedenen Flugrichtungen nach einer Drehung beweisen.
- bei Weitwinkel und Überweitwinkel tritt in Lage und Höhe jeweils nur ein Deformationstyp in Erscheinung
- die ermittelten systematischen Fehler sind erstaunlich konstant.

Auf welche Ursachen die starke Abhängigkeit der systematischen Modellfehler vom Aufnahmesystem (Kammer) im einzelnen zurückzuführen ist, kann bisher nicht sicher beantwortet werden. Interessant sind in diesem Zusammenhang die Ergebnisse des Aerotriangulationstests "Appenweier" [12]. Dort ergaben sich nach einer Korrektur der systematischen Fehler mit zusätzlichen Parametern in der Lage bei annähernd gleicher Größe dieselben trapezförmigen Modelldeformationen.

Einfluß der Paßpunktversion

Für die praktische Anwendung der Blockausgleichung ist besonders die Beantwortung der Frage wichtig, inwieweit der Einfluß vorhandener systematischer Fehler bereits durch eine entsprechende Anordnung der Paßpunkte verringert werden kann.

Die Ergebnisse der 3 untersuchten Paßpunktversionen 0, 1 und 5 sind für die Blöcke Frankfurt (WW, $q=20\%$), Den Haag (UWW, $q=20\%$) und Weitwinkel ($q=60\%$) in Tabelle 5 und in den Abb. 8 und 9 dargestellt.

In der Lage bleibt die charakteristische Trapezform der Modelldeformation für alle Versionen unabhängig von der Querüberdeckung erhalten. Mit abnehmender Paßpunktanzahl verringern sich lediglich die Affinitäten und Scherungseffekte. Die Differenzen zwischen der "wahren Modelldeformation" bei Version 0 (alle Paßpunkte) und der Version 1 (dichter Paßpunktrand) sind ausgesprochen klein, während die Unterschiede zwischen Version 0 und Version 5 (4 Paßpunkte in den Ecken) wie erwartet etwas größer sind. Die Zahlenwerte für den Weitwinkelblock ($q=60\%$) demonstrieren dies sehr deutlich: Die Differenzen zwischen Version 0 und Version 1 sowie zwischen Version 0 und Version 5 betragen im Mittel $0.4 \mu\text{m}$ bzw. $1.8 \mu\text{m}$ und erreichen maximal $0.9 \mu\text{m}$ bzw. $2.9 \mu\text{m}$. Bei 20% Querüberdeckung treten zwischen Version 0 und Version 5 etwas größere Unterschiede auf.

In der Höhe führt die unterschiedliche Anordnung der Paßpunkte lediglich bei 60 % Querüberdeckung bei abnehmender Paßpunktanzahl zu einer leichten Verringerung der Durchbiegung in der Modellmitte. Zwischen Version 0 (alle Paßpunkte) und Version 1 (Ketten $i=2$) sowie zwischen Version 0 und Version 5 (3 Ketten $i=12.5(6)$) erreichen die Differenzen im Mittel nur $0.3 \mu\text{m}$ bzw. $0.9 \mu\text{m}$ und maximal $0.7 \mu\text{m}$ bzw. $1.7 \mu\text{m}$. Ein bemerkenswertes Ergebnis ergibt sich für die Modellneigung, die bei allen Versionen fast auf ein Zehntelmikron genau erhalten bleibt (siehe Tab. 5). Bei 20 % Querüberdeckung ist die Paßpunktversion gänzlich ohne Einfluß auf die systematischen Höhenfehler.

Einfluß des Auswertezentrums

Die Auswertung des Bildmaterials an 4 verschiedenen Zentren bot die Möglichkeit, den Einfluß des Auswertegerätes und des Beobachters auf die systematischen Modellfehler zu untersuchen. Die Differenzen betragen bei Weitwinkel zwischen Frankfurt (PSK) und Wien (StK1) in der Lage $2.0 \mu\text{m}$ und $0.8 \mu\text{m}$ in der Höhe; bei Oberweitwinkel zwischen Den Haag (PSK) und Delft (StK1) $1.4 \mu\text{m}$ und $0.8 \mu\text{m}$. Die Abhängigkeit der systematischen Modellfehler vom Auswertezentrum ist demnach bei Komparatormessungen nur sehr gering.

Zusammenfassend kann aus der starken Abhängigkeit der systematischen Fehler von der Flugrichtung die Feststellung getroffen werden, daß jede Methode zur Korrektur systematischer Fehler mit zusätzlichen Parametern die Flugrichtung eines Streifens berücksichtigen muß. Die Auswirkungen von Flugdatum, Paßpunktversion und Auswertegerät spielen dagegen nur eine untergeordnete Rolle.

5.4 Konstanz der systematischen Modellfehler

Da sich Hinweise über die Stabilität der systematischen Modellfehler bereits aus verschiedenen Einzelergebnissen ergeben haben, werden die wichtigsten Merkmale, aus denen dies besonders deutlich hervorgeht, nur noch stichpunktartig zusammengestellt:

- die systematischen Fehler der Einzelstreifen unterscheiden sich im Mittel nur gering von den Mittelwerten für Streifen gleicher Flugrichtung
- für beide Kammern - Weitwinkel und Oberweitwinkel - tritt in Lage und Höhe jeweils derselbe Typ der Modelldeformation in Erscheinung
- nach einer Drehung sind die Differenzen zwischen den Flugrichtungen minimal
- der Einfluß des Flugdatums und des Auswertezentrums ist unbedeutend.

Diese Beweise für die außerordentliche Konstanz der systematischen Modellfehler lassen zusammen mit der Größe im Falle einer Korrektur eine erhebliche Genauigkeitssteigerung in Lage und Höhe erwarten.

6. Genauigkeitssteigerung durch Korrektur systematischer Modellfehler

Nachdem neue Erkenntnisse über die wichtigsten Eigenschaften der systematischen Modellfehler bekannt waren, entstand zwangsläufig Interesse, nach einer Korrektur mit den ermittelten Werten durch eine Genauigkeitssteigerung entweder eine Bestätigung für die zum Teil überraschenden Resultate der Analyse zu erhalten, oder andernfalls neue Hinweise für weitere Untersuchungen zu bekommen. Durch eine Korrektur sollten in erster Linie folgende Fragen geklärt werden:

- Welche Genauigkeitssteigerung läßt sich aus einer Korrektur mit den ermittelten systematischen Modellfehlern wirklich erzielen ?
- Welche Verbesserungen können im einzelnen in Lage und Höhe für die verschiedenen Kammern und Überdeckungen erreicht werden ?

6.1 Korrekturverfahren

Bei der für die Korrektur der systematischen Fehler angewandten Methode handelt es sich um ein relativ einfaches Iterationsverfahren. Durch eine Interpolation mit Hilfe eines Polynoms werden aus den durchschnittlichen Restfehlern der 6 Standardmodellpunkte modellweise die Verbesserungen in X,Y,Z für sämtliche Punkte eines Modells - also auch für Paßpunkte - berechnet und an den modellweise transformierten Koordinaten nach der Blockausgleichung angebracht. Die Projektionszentren können direkt mit den ermittelten Werten verbessert werden. Nach einer neuen Blockausgleichung mit den verbesserten Koordinaten werden erneut die verbliebenen systematischen Fehler bestimmt und wenn notwendig, eine weitere Korrektur durchgeführt.

Bei den untersuchten Blöcken waren die systematischen Fehler in den meisten Fällen bereits nach 1 - 2 Iterationen so gering, daß das Verfahren abgebrochen werden konnte (vgl. Tab. 7, 8).

Die Korrektur der systematischen Fehler erfolgte wegen der Abhängigkeit von der Flugrichtung streifenweise, allerdings nicht mit den Fehlern der einzelnen Streifen, sondern mit den Mittelwerten für die Streifen gleicher Flugrichtung. Der für die Interpolation verwendete Polynomansatz hat folgende Form:

$$v_x = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4y^2 + a_5xy^2$$

$$v_y = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4y^2 + b_5xy^2$$

$$v_z = c_0 + c_1x + c_2y + c_3xy + c_4y^2 + c_5xy^2$$

6.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Diskussion bezieht sich in erster Linie auf die Blöcke mit $q=20\%$, da die Untersuchungen für $q=60\%$ zum Zeitpunkt des Vortrags noch nicht abgeschlossen waren.

Mittlere Gewichtseinheitsfehler σ_{OL} , σ_{OH}

In der Lage ergibt sich nach der Korrektur der systematischen Modellfehler für alle Blöcke eine deutliche Verbesserung des mittleren Gewichtseinheitsfehlers σ_{OL} , wobei die Faktoren der Genauigkeitssteigerung bei WW signifikant größer sind als bei OWW. Interessant ist weiter, daß die Werte von σ_{OL} innerhalb eines Kammertyps für die verschiedenen Blöcke sehr gut übereinstimmen. Für die Version 0 mit allen Paßpunkten ergeben sich bei WW für Block Frankfurt $5.2 \mu\text{m}$, für Block Wien $5.5 \mu\text{m}$ sowie für den Gesamtblock $q=60\%$, $5.0 \mu\text{m}$. Die vergleichbaren Werte bei OWW betragen für Block Den Haag $7.4 \mu\text{m}$ und für Block Delft $7.2 \mu\text{m}$ (vgl. Tab. 7, 8). Die Werte von σ_{OL} für die WW-Blöcke stellen für den Bildmaßstab 1:28 000 ein bis vor kurzem kaum für möglich gehaltenes Ergebnis dar und dürften damit sehr nahe an die überhaupt erreichbare Genauigkeitsgrenze heranreichen.

In der Höhe kann eine spürbare Verbesserung von σ_{OH} nur für den WW-Gesamtblock mit $q=60\%$ festgestellt werden.

Absolutgenauigkeiten $\sigma_{x,y}$, σ_z

Bei den Absolutgenauigkeiten $\sigma_{x,y}$ für die Lage und σ_z für die Höhe, die aus den Restfehlern an den Vergleichspunkten bestimmt werden, zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie bei den mittleren Gewichtseinheitsfehlern.

In der Lage ist die Genauigkeitssteigerung für die Paßpunktversionen 1 (dichter Rand) und 5 (4 Eckpunkte) bei allen Blöcken deutlich erkennbar. Für Version 1 erreicht die Verbesserung der Absolutgenauigkeit beim WW-Block Frankfurt den Faktor 1.4, beim OWW-Block Den Haag den Faktor 1.5. Eine unerwartet große Genauigkeitssteigerung ergibt bei WW die Korrektur der PP-Version 5 mit den "wahren systematischen Fehlern" aus Version 0 (alle Paßpunkte). Dabei wird die Absolutgenauigkeit für $q=20\%$ beim Block Frankfurt um den Faktor 3.8 (!) und beim Gesamtblock $q=60\%$ um den Faktor 2 verbessert. Bei OWW läßt sich die Genauigkeit von Version 5 für den Block Den Haag durch eine ähnliche Korrektur immerhin um den Faktor 1.5 steigern (vgl. Tab. 7, 8). Interessant ist ferner, daß bei den Blöcken Frankfurt (WW) und Den Haag (OWW) die unterschiedliche Genauigkeit in X und Y auch nach der Korrektur der systematischen Fehler erhalten bleibt.

In der Höhe läßt sich die Absolutgenauigkeit bei $q=20\%$ wegen der Nichterfaßbarkeit der Modelldurchbiegung weder bei WW noch bei OWW nennenswert verbessern. Lediglich für Version 5 (3 PP-Ketten $i=12.5$) ergibt sich beim WW-Block Frankfurt eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor 1.5.

Daß die Höhengenaueigkeit aber dennoch entscheidend verbessert werden kann, zeigt sich am Ergebnis für den WW-Gesamtblock mit $q=60\%$. Die Genauigkeitssteigerung erreicht hier den Faktor 3, wobei sich der Absolutwert von $54.7 \mu\text{m}$ auf $17.8 \mu\text{m}$ verbessert.

Es bleibt in diesem Zusammenhang allerdings zu bemerken, daß der Absolutwert von $17.8 \mu\text{m}$ für $q=60\%$ noch deutlich über dem vergleichbaren Wert für $q=20\%$ liegt. Die Ergebnisse für die Höhengenaugigkeit bei $q=60\%$ stehen damit auch nach der Korrektur systematischer Fehler noch in deutlichem Widerspruch zur Theorie.

Für das Problem der Nichterfaßbarkeit der systematischen Höhenfehler bei $q=20\%$ bieten sich weitere Untersuchungen der Form an, daß die Ergebnisse von Blockausgleichungen für $q=20\%$ mit den für $q=60\%$ gewonnenen Werten der systematischen Fehler durch eine a priori Korrektur verbessert werden. Damit könnte festgestellt werden, welche Höhengenaugigkeit bei $q=20\%$ generell erreicht werden kann, wenn die vorhandenen systematischen Fehler nahezu vollständig erfaßt sind.

7. Zusammenfassung und Folgerungen

Die Untersuchung der Restfehler an Verknüpfungspunkten und Projektionszentren nach einer Blockausgleichung ohne vorherige Korrektur systematischer Fehler, brachte für den Test Oberschwaben höchst interessante und aufschlußreiche Ergebnisse über wichtige Eigenschaften der systematischen Modellfehler.

Als Hauptergebnis der Untersuchung kann der Nachweis angesehen werden, daß die systematischen Modellfehler fast ausschließlich vom Aufnahmesystem abhängen und in erstaunlich hohem Maße konstant sind.

Weitere besonders für die Korrektur interessante Erkenntnisse ergeben sich aus den folgenden Ergebnissen der Untersuchung:

- Die Größe der systematischen Modellfehler an den Verknüpfungspunkten ist beträchtlich, dabei sind die Fehler in der Höhe größer als in der Lage.
- Die systematischen Lagefehler können bereits bei 20 % Querüberdeckung nahezu vollständig erfaßt werden, während dies für die Höhenfehler nur bei 60 % Querüberdeckung möglich ist.
- Weitwinkel- und Überweitwinkelkammer besitzen in Lage und Höhe jeweils denselben Typ der systematischen Modelldeformation.
- Die systematischen Fehler sind durch die Beziehung zum übergeordneten Koordinatensystem von der Flugrichtung abhängig.
- Die Einflüsse des Flugdatums, der Paßpunktversion und des Auswertezentrums sind von untergeordneter Bedeutung.

Die sich an die Analyse anschließende Korrektur der systematischen Fehler führte zu einer erheblichen Verbesserung der Lagegenauigkeit. Für die Höhe konnte eine entscheidende Genauigkeitssteigerung bisher nur für 60 % Querüberdeckung erreicht werden.

Aus diesen zum Teil recht bedeutsamen Resultaten können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

- Die in der Untersuchung erreichten Genauigkeitssteigerungen machen deutlich, daß sich die Korrektur systematischer Fehler lohnt. Dies gilt insbesondere dann, wenn das vorhandene Genauigkeitspotential der Aerotriangulation voll ausgeschöpft werden muß, um höchsten Genauigkeitsanforderungen gerecht zu werden.

- Die Hauptanteile der systematischen Modellfehler können wegen der enormen Konstanz und der fast ausschließlichen Abhängigkeit vom Aufnahmesystem bereits mit relativ wenigen Parametern mathematisch streng erfaßt werden. Damit werden frühere Vermutungen widerlegt, wonach für die Korrektur der systematischen Fehler eine Vielzahl von Parametern notwendig sein dürfte.
- Die starke Abhängigkeit der systematischen Fehler von der Kammer bzw. vom Aufnahmesystem sollte auch die Hersteller von Kammer zu Untersuchungen über die Fehlerursachen bzw. über Möglichkeiten zur Verringerung der Fehler anregen.
- Nachdem sich für drei verschiedene Kammer desselben Fabrikats der gleiche Typ der Modelldeformation feststellen ließ, dürften weitere ähnliche Untersuchungen mit anderen Kammer gleichen Fabrikats sinnvoll sein. Würden sich dabei wiederum dieselben Modelldeformationen zeigen, so dürfte daraus wohl mit einiger Sicherheit geschlossen werden können, daß wahrscheinlich sämtliche Kammer derselben Herstellerfirma gleiche oder ähnliche systematische Modellfehler verursachen. In diesem Falle könnten die systematischen Modellfehler durch eine einfache Kalibrierung mit den bereits bekannten Fehlerwerten korrigiert werden. Ein solches Korrekturverfahren hätte den Vorteil, daß für die Bestimmung der Kalibrierungswerte kein eigenes Testfeld benötigt würde. Damit könnten auch die Schwierigkeiten der Korrektur systematischer Höhenfehler bei 20 % Querüberdeckung umgangen werden, indem die für $q=60\%$ bekannten Werte verwendet werden.
- Die einzige Einschränkung dieser umfangreichen Untersuchung, daß die Ergebnisse nur für die Kammer eines Fabrikats gelten, sollte zugleich Anregung für ähnliche Untersuchungen mit Kammer anderer Hersteller sein.

Literatur

- |1| Kubik, K.: The Effect of Systematic Image Errors in Block Triangulation.
ITC Publikation A 49, 1971.
- |2| Kubik, K.: Systematic image errors in aerial triangulation.
Invited paper of Commission III, ISP-Congress
Ottawa, 1972.
- |3| Masson d'Autume, G.: Le Traitement des Erreurs Systématiques dans l' Aérotriangulation.
Presented paper of Commission III, ISP-Congress
Ottawa, 1972.
- |4| Proceedings vom Symposium der Kommission III/ISP in Stuttgart, 1974 (In Vorbereitung).
- |5| Bauer, H.: Compensation of systematic errors by analytical block adjustment with common image deformations parameters.
OEEPE Official Publication N° 8, 1973, S.319-334.
- |6| Kraus, K.: Untersuchung zur Genauigkeit der Interpolation nach kleinsten Quadraten.
Zeitschrift für Vermessungswesen 99, 1974, S. 198 - 205.
- |7| Ebner, H. and Schneider, W.: Simultaneous compensation of systematic errors with block adjustment by independent models.
Presented to the Symposium of Commission III/ISP, Stuttgart, 1974.
- |8| Ackermann, F.: On Statistical Investigations into Accuracy of Aerial Triangulation. The Test Project Oberschwaben.
OEEPE Official Publication N° 8, 1973, S. 15 - 26.
- |9| Belzner, H.: The Planning, Establishing and Flying of the Test Field Oberschwaben.
OEEPE Official Publication N° 8, 1973, S. 35 - 47.
- |10| Ackermann, F.: Testblock Oberschwaben, Program I. Results of block adjustment by independent models.
OEEPE Official Publication N° 8, 1973, S. 87 - 150.
- |11| Ebner, H.: Automatische Kompensation systematischer Fehler bei der Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen.
Lehrgang für Numerische Photogrammetrie, Technische Akademie Esslingen, 1975.
- |12| Ackermann, F.: Photogrammetrische Netzverdichtung - Das Projekt Appenweiler.
Lehrgang für Numerische Photogrammetrie, Technische Akademie Esslingen, 1975.

Tabelle 1: OEEPE-Oberschwaben
 Systematische Modellfehler nach der Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen
Weitwinkel-Streifen: Mittel aus 25 Modellen
 q = 20 %; PP-Version O; Einheit μm

Streifen Nr.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Flugrichtung		NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	SN	NS	SN	SN	NS	NS	SN
Flugdatum		8.4.	8.4.	8.4.	8.4.	8.4.	8.4.	9.4.	12.5.	9.4.	12.5.	12.5.	12.5.	12.5.	12.5.	12.5.
	Standardbereich															
x	1	+1.6	+0.6	+2.1	+2.1	+1.7	+1.0	+2.1	+1.6	+ 3.3	+2.7	+ 2.4	+2.0	+1.9	+0.3	+2.0
	2	-1.7	-0.8	-2.1	-2.1	-1.7	-1.0	-2.1	-1.7	- 3.3	-2.7	- 2.4	-2.0	-1.9	-0.3	-2.0
	3	-0.8	+7.7	+0.0	+6.4	-2.4	+6.7	+0.1	+4.0	+10.3	-4.2	+11.4	+5.8	-0.6	-5.4	+7.9
	4	+4.1	-3.7	+4.1	-2.7	+5.1	-4.5	+2.6	-4.5	- 6.2	+3.9	- 6.3	-6.1	+3.9	+5.4	-7.9
	5	+6.0	-3.4	+4.6	-4.1	+4.6	-4.4	+5.0	-2.7	- 3.5	+9.4	- 5.7	-2.1	+4.7	+7.1	-3.9
	6	-6.0	+3.9	-8.5	+0.0	-8.7	+1.5	-7.9	+0.7	+ 0.6	-9.2	+ 1.9	+2.4	-8.0	-6.2	+1.2
y	1	+2.8	+2.1	+3.4	+2.2	+2.7	+2.5	+3.0	+0.5	+ 2.0	-1.1	+ 2.6	-0.2	+1.5	-2.1	+1.7
	2	-2.7	-2.3	-3.4	-2.2	-2.7	-2.5	-3.0	-0.6	- 2.0	+1.1	- 2.6	+0.2	-1.5	+2.1	-1.7
	3	+0.4	+3.0	+0.8	+1.8	+0.4	+1.4	-0.6	+0.7	- 1.5	-2.8	+ 2.4	+0.4	-1.5	+0.5	+2.3
	4	-2.8	-5.6	-2.1	-4.8	-3.3	-3.4	-7.2	-1.5	- 2.8	-5.0	-3.6	-0.7	-5.7	-0.3	-2.3
	5	+2.5	-0.1	+5.9	+3.8	+3.3	+3.3	+2.7	-1.0	+ 7.2	-0.2	+ 4.2	+1.5	+2.5	+0.6	+3.9
	6	-2.2	-0.2	-2.6	-0.7	-1.8	+0.2	-0.1	+3.0	+ 0.3	+0.6	+ 0.6	+6.3	-1.4	-0.2	+2.5
z	1	+2.6	+0.5	+3.5	-3.4	+3.4	-1.8	+3.8	-1.4	- 3.5	+2.7	- 0.8	-3.1	+0.2	+3.3	-1.1
	2	-2.4	-0.0	-3.5	+3.3	-3.4	+1.8	-3.8	+1.6	+ 3.5	-2.7	+ 0.8	+3.1	-0.2	-3.3	+1.1
	3	-1.2	-3.1	+0.0	-1.8	+0.1	+1.7	-1.5	-1.0	+ 2.8	-3.8	+ 0.1	-1.2	+0.0	-3.9	-0.1
	4	+0.1	+2.0	+1.3	-0.3	-0.0	-0.9	+2.6	+1.9	- 1.3	+3.8	- 0.9	-0.1	+0.9	+3.6	+0.1
	5	-2.1	+1.0	-0.9	+2.8	-3.3	+1.9	-2.3	+1.7	+ 1.6	+0.7	- 1.6	+1.8	+0.7	+1.7	-0.0
	6	+2.7	-0.7	+1.5	-2.2	+2.2	-0.1	+2.3	-2.4	- 2.2	-1.3	+ 0.3	-1.8	+0.1	-0.4	-0.6

Tabelle 2: OEEPE-Oberschwaben
 Systematische Modellfehler nach der Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen
Überweitwinkel-Streifen: Mittel aus 25 Modellen
 q = 20 %; PP-Version O; Einheit μm

Streifen Nr.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Flugrichtung		NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS
Flugdatum		10.4.	10.4.	10.4.	10.4.	10.4.	10.4.	10.4.	10.4.	26.4.	26.4.	26.4.	26.4.	26.4.	26.4.	26.4.
	Standardbereich															
x	1	+3.1	+1.4	+3.0	+ 3.5	+3.7	+2.9	+4.8	+ 4.3	+4.3	+1.8	+ 4.3	+2.8	+2.3	+1.2	+1.7
	2	-3.1	-1.4	-3.0	- 3.5	-3.7	-2.9	-4.8	- 4.3	-4.3	-1.8	- 4.3	-2.8	-2.3	-1.2	-1.7
	3	+6.3	-0.3	+8.5	+ 0.9	+6.9	+0.7	+5.9	+ 0.0	+8.7	-1.4	+ 8.8	-1.7	+8.2	-5.1	+5.1
	4	-4.9	+3.8	-5.3	+ 1.1	-4.4	+1.9	-4.3	+ 1.9	-4.0	+5.0	- 4.9	+4.8	-5.2	+4.8	-5.1
	5	-1.1	+7.1	-1.0	+ 5.8	-0.1	+5.6	+1.6	+ 8.0	+1.0	+6.0	- 2.8	+4.9	-3.9	+4.7	-2.4
	6	+1.1	-7.1	-0.9	-10.0	-2.5	-7.7	-3.0	-10.5	-2.6	-7.8	- 2.1	-8.0	-0.3	-8.3	+0.9
y	1	+1.0	+0.7	+3.0	+ 1.0	+2.0	+1.1	+0.7	+ 1.0	+1.9	+2.0	+ 4.5	+2.2	+1.8	+1.6	-0.0
	2	-1.0	-0.7	-3.0	- 1.0	-2.0	-1.1	-0.7	- 1.0	-1.9	-2.0	- 4.5	-2.2	-1.8	-1.6	+0.0
	3	-2.8	+1.9	-5.5	+ 1.4	-5.9	-1.1	-2.8	+ 0.5	-4.8	+2.9	- 3.4	+5.6	-2.2	+4.9	+0.7
	4	-2.0	-6.1	+1.2	- 7.6	-0.2	-4.5	-2.8	- 5.4	-0.8	-6.9	- 0.8	-8.6	-0.4	-4.8	-0.7
	5	+4.0	+0.4	+7.4	+ 4.2	+8.2	+5.0	+7.4	+ 2.7	+8.6	+4.1	+10.8	+0.4	+7.0	-0.2	+5.3
	6	-4.0	-0.4	-1.6	+ 0.6	-3.7	+0.9	+0.4	+ 2.8	-2.1	+0.6	- 3.7	+3.1	-2.6	+2.4	-2.8
z	1	+4.2	-4.3	+1.9	- 2.3	+2.2	-3.5	+3.5	- 2.9	+4.4	-3.8	+ 4.7	-3.0	+3.5	-1.9	+2.3
	2	-4.2	+4.3	-1.9	+ 2.3	-2.2	+3.5	-3.5	+ 2.9	-4.4	+3.8	- 4.7	+3.0	-3.5	+2.1	-2.3
	3	-1.5	+0.1	+0.9	- 1.2	+1.1	-1.5	-3.0	+ 0.6	-0.8	+1.6	- 1.0	+1.4	-1.3	+1.1	-2.2
	4	+1.4	+0.3	-0.1	+ 1.1	-0.5	-1.9	+2.4	- 0.1	+1.6	+0.2	- 0.3	-1.0	+0.5	-1.2	+2.2
	5	-0.8	+2.9	-0.8	+ 1.7	-0.4	+0.9	+0.8	+ 0.2	-0.2	+1.3	- 1.1	-0.7	+0.4	-0.5	+1.7
	6	+0.8	-2.8	+1.4	- 1.8	-0.1	-0.8	-0.8	+ 0.2	+0.8	-1.7	- 0.1	-0.4	+1.1	+0.6	-1.2

Tabelle 3: OEEPE-Oberschwaben
 Systematische Modellfehler nach der Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen
 Abhängigkeit von Flugrichtung und Querüberdeckung
 Weitwinkel: PP-Version 0; Einheit μm

Block Flugrichtung Mittel aus n Streifen	n=	Frankfurt (q=20%)			Wien (q=20%)			WW ²⁾ (q=20%)		WW (q=60%)		
		NS	SN	NS+SN ¹⁾	NS	SN	NS+SN ¹⁾	NS	SN	NS	SN	NS+SN ¹⁾
		5	3	8	2	5	7	7	8	7	8	15
	Standardbereich											
x	1	+1.9	+2.6	+2.2	+1.5	+1.5	+1.5	+1.8	+1.9	+1.3	+1.8	+1.6
	2	-1.9	-2.6	-2.2	-1.5	-1.5	-1.5	-1.8	-1.9	-2.1	-1.6	-1.8
	3	-0.7	+9.8	+3.2	-4.8	+6.1	+2.9	-1.9	+7.5	-2.1	+7.6	+3.1
	4	+4.0	-6.8	-0.0	+4.6	-4.3	-1.6	+4.2	-5.2	+4.2	-5.2	-0.8
	5	+5.0	-4.3	+1.5	+8.3	-3.3	+0.2	+5.9	-3.7	+5.9	-3.7	+0.8
	6	-7.9	+1.2	-4.5	-7.7	+1.7	-1.2	-7.8	+1.5	-7.6	+1.8	-2.6
y	1	+2.6	+2.1	+2.4	-1.6	+1.4	+0.5	+1.4	+1.7	+1.9	+0.6	+1.2
	2	-2.6	-2.1	-2.4	+1.6	-1.5	-0.6	-1.4	-1.7	+0.1	-2.4	-1.2
	3	-0.1	+1.0	+0.4	-1.2	+1.4	+0.6	-0.4	+1.3	-0.9	+1.5	+0.4
	4	-4.2	-2.9	-3.7	-2.7	-3.0	-2.9	-3.8	-3.0	-3.6	-2.6	-3.1
	5	+3.4	+5.1	+4.0	+0.2	+1.6	+1.1	+2.5	+2.9	+2.0	+2.9	+2.5
	6	-1.6	+1.1	-0.6	+0.2	+1.8	+1.3	-1.1	+1.5	-1.1	+1.7	+0.4
z	1	+2.7	-1.8	+1.0	+3.0	-1.9	-0.4	+2.8	-1.9	-2.9	-7.2	-5.2
	2	-2.7	+1.8	-1.0	-3.0	+1.9	+0.5	-2.8	+1.9	-8.1	-3.7	-5.7
	3	-0.5	+1.0	+0.1	-3.8	-1.0	-1.9	-1.4	-0.3	+1.3	+2.2	+1.8
	4	+1.0	-0.7	+0.4	+3.7	+0.5	+1.4	+1.8	+0.1	+4.1	+2.9	+3.5
	5	-1.6	+0.1	-1.0	+1.2	+1.8	+1.6	-0.8	+1.2	+2.1	+3.8	+3.0
	6	+1.8	-0.8	+0.8	-0.9	-1.4	-1.2	+1.0	-1.2	+3.6	+1.6	+2.6

- 1) Bei Nichtberücksichtigung unterschiedlicher Flugrichtungen innerhalb eines Blocks
 2) Gesamtmittel aus den NS- bzw. SN-Streifen der Blöcke Frankfurt und Wien

Tabelle 4: OEEPE-Oberschwaben
 Systematische Modellfehler nach der Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen
 Abhängigkeit von Flugrichtung und Querüberdeckung
 Überweitwinkel: PP-Version 0; Einheit μm

Block Flugrichtung Mittel aus n Streifen	n=	Den Haag (q=20%)		Delft (q=20%)		UWW (q=60%)		
		NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS+SN ¹⁾
		8		7		8	7	15
	Standardbereich							
x	1	+3.4		+2.6		+2.4	+2.5	+2.4
	2	-3.4		-2.6		-3.2	-2.2	-2.7
	3	+7.3		-0.9		+7.0	-0.5	+3.5
	4	-4.8		+3.3		-4.6	+3.5	-0.8
	5	-1.2		+6.0		-1.4	+6.2	+2.2
	6	-1.2		-8.5		-1.1	-8.2	-4.4
y	1	+1.8		+1.4		+2.1	+2.2	+2.2
	2	-1.8		-1.4		-1.0	-0.8	-0.9
	3	-3.4		+2.2		-4.0	+1.6	-1.4
	4	-0.8		-6.3		-0.9	-6.5	-3.5
	5	+7.4		+2.4		+6.5	+2.1	+4.5
	6	-2.5		+1.4		-2.6	+1.2	-0.8
z	1	+3.4		-3.1		-2.6	-9.6	-5.6
	2	-3.4		+3.1		-8.9	-3.6	-6.4
	3	-1.0		+0.7		+2.0	+4.0	+2.9
	4	+0.8		-0.3		+3.8	+3.0	+3.4
	5	-0.1		+0.8		+2.9	+4.1	+3.4
	6	+0.2		-1.0		+3.2	+2.3	+2.8

- 1) Bei Nichtberücksichtigung unterschiedlicher Flugrichtungen innerhalb eines Blocks

Tabelle 5: OERPE-Oberschwaben
 Systematische Modellfehler nach der Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen
 Abhängigkeit von der Paßpunktversion
 Einheit μm

Block PP-Version	Frankfurt (q=20%)						UWw-Den Haag (q=20%)			WW (q=60%)						
	0	0	1	1	5	5	0	1	5	0	0	1	1	5	5	
Flugrichtung	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	NS	NS	NS	SN	NS	SN	NS	SN	
Mittel aus n Streifen	5	3	5	3	5	3	8	8	8	7	8	7	8	7	8	
Standardbereich																
x	1	+1.9	+2.6	+1.6	+1.6	+0.1	-0.1	+3.4	+2.7	+0.2	+1.3	+1.8	+1.0	+1.4	-0.4	0
	2	-1.9	-2.6	-1.6	-1.6	-0.1	+0.1	-3.4	-2.7	-0.2	-2.1	-1.6	-1.8	-1.1	-0.3	+0.2
	3	-0.7	+9.8	-1.2	+8.5	-3.9	+5.6	+7.3	+6.3	+3.0	-2.1	+7.6	-2.6	+6.9	-4.7	+4.8
	4	+4.0	-6.8	+4.0	-6.0	+3.9	-5.2	-4.8	-4.3	-2.8	+4.2	-5.2	+4.2	-4.9	+4.8	-4.2
	5	+5.0	-4.3	+4.9	-5.0	+4.3	-5.1	-1.2	-1.7	-2.9	+5.9	-3.7	+5.7	-4.0	+5.1	-4.6
	6	-7.9	+1.2	-7.1	+2.3	-4.4	+4.8	-1.2	-0.1	+2.6	-7.6	+1.8	-7.0	+2.5	-4.9	+4.6
y	1	+2.6	+2.1	+2.2	+1.8	+0.3	+0.1	+1.8	+1.3	+0.0	+1.9	+0.6	+1.4	+0.5	+0.4	-0.5
	2	-2.6	-2.1	-2.1	-1.8	-0.3	-0.1	-1.8	-1.3	-0.0	+0.1	-2.4	+0.1	-2.0	+1.1	-0.9
	3	-0.1	+1.0	+0.4	+1.0	-0.3	+0.2	-3.4	-3.1	-2.6	-0.9	+1.5	-0.7	+1.4	-0.7	+1.4
	4	-4.2	-2.9	-2.8	-2.6	+0.3	-0.3	-0.8	+0.1	+2.7	-3.6	-2.6	-2.9	-2.2	-1.0	-0.4
	5	+3.4	+5.1	+2.9	+2.9	+0.4	-0.1	+7.4	+6.1	+3.2	+2.0	+2.9	+1.8	+2.0	-0.2	0
	6	-1.6	+1.1	-1.1	-0.2	-0.3	+0.2	-2.5	-2.5	-2.9	-1.1	+1.7	-0.7	+1.4	-0.6	+1.4
z	1	+2.7	-1.8	+2.7	-1.7	+2.8	-1.8	+3.4	+3.5	+3.4	-2.9	-7.2	-2.1	-7.1	-1.2	-6.2
	2	-2.7	+1.8	-2.7	+1.7	-2.7	+1.8	-3.4	-3.5	-3.4	-8.1	-3.7	-7.5	-3.8	-6.5	-2.9
	3	-0.5	+1.0	-0.4	+0.7	-0.3	+0.6	-1.0	-0.9	-0.9	+1.3	+2.2	+1.1	+2.4	+0.6	+2.0
	4	+1.0	-0.7	+0.9	-0.7	+0.8	-0.6	+0.8	+0.8	+0.8	+4.1	+2.9	+3.9	+3.1	+3.4	+2.5
	5	-1.6	+0.1	-1.7	+0.4	-1.8	+0.5	-0.1	-0.2	-0.3	+2.1	+3.8	+1.7	+3.8	+1.0	+3.3
	6	+1.8	-0.8	+1.7	-0.8	+1.6	-0.9	+0.2	+0.2	+0.3	+3.6	+1.6	+3.2	+1.5	+2.8	+1.2

Tabelle 6: OERPE-Oberschwaben
 Systematische Fehler der Projektionszentren nach der Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen
 Weitwinkel-Streifen: PP-Version 0; Einheit μm

Streifen Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Flugrichtung	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	SN	NS	SN	SN	NS	NS	SN
Flugdatum	8.4.	8.4.	8.4.	8.4.	8.4.	8.4.	9.4.	12.5.	9.4.	12.5.	12.5.	12.5.	12.5.	12.5.	12.5.
x	+7.7	+2.0	+2.1	+1.1	+7.6	+6.3	+6.2	+3.9	+4.3	+0.7	+4.6	+2.8	+5.1	+3.5	+5.0
y	-6.4	-2.0	-2.7	-1.9	-5.4	-2.2	-5.8	-1.6	-3.5	-0.3	-1.5	-0.3	-3.8	+0.9	-3.0
z	+1.5	-4.2	+2.7	-3.0	+0.8	-1.3	-0.1	-2.5	+0.1	+0.7	-2.1	-4.1	-0.3	+0.9	-2.4

Überweitwinkel-Streifen: PP-Version 0; Einheit μm

Streifen Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Flugrichtung	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS
Flugdatum	10.4.	10.4.	10.4.	10.4.	10.4.	10.4.	10.4.	10.4.	26.4.	26.4.	26.4.	26.4.	26.4.	26.4.	26.4.
x	+0.4	+0.7	-1.5	+1.3	+1.8	+3.5	-0.0	-1.7	-0.7	-0.2	-0.3	+1.8	+2.6	+3.3	+3.0
y	+0.7	-1.1	-0.8	-1.6	-2.2	-2.0	+0.7	-3.9	-1.2	-3.7	+0.1	-1.2	-0.7	-2.4	+1.7
z	+3.0	-3.2	+4.5	-3.0	+4.7	-0.6	+2.8	-2.4	+3.6	-3.1	+5.8	-4.5	+4.0	-3.3	+1.8

Abhängigkeit von Flugrichtung und Querüberdeckung
 PP-Version 0; Einheit μm

Kamerar Überdeckung q Block Flugrichtung Mittel aus n Streifen n=	Weitwinkel						Überweitwinkel			
	20 % Frankfurt		20 % Wien		60 % WW		20 % Den Haag	20 % Delft	60 % UWw	
	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN
	5	3	2	5	7	8	8	7	8	7
x	+5.8	+4.6	+2.1	+3.2	+4.7	+3.9	+0.7	+1.3	+1.2	+1.3
y	-4.8	-2.7	+0.3	-1.6	-3.1	-1.8	-0.2	-2.3	0	-2.4
z	+0.9	-1.4	+0.8	-3.0	+0.7	-2.2	+3.8	-2.9	+3.6	-2.8

Tabelle 7: OEEPE-Oberschwaben
 Genauigkeitssteigerung durch Korrektur systematischer Modellfehler
 Weitwinkel

Block	PP-Version	Genauigkeit ohne Korrektur						Genauigkeit mit Korrektur						Iterationen	Genauigkeitssteigerung in %								
		σ_{oL} cm μm	σ_{oH} cm μm	σ_x cm μm	σ_y cm μm	σ_{xy} cm μm	σ_z cm μm	σ_{oL} cm μm	σ_{oH} cm μm	σ_x cm μm	σ_y cm μm	σ_{xy} cm μm	σ_z cm μm		σ_{oL}	σ_{oH}	σ_x	σ_y	σ_{xy}	σ_z			
Frankfurt q = 20 % 200 Mod.	0	20.3 7.2	25.8 9.2					14.6 5.2	25.4 9.1					2	28	2							
	1	19.4 6.9	23.5 8.4	23.2 8.3	41.8 14.9	33.8 12.1	36.2 12.9	13.0 4.6	22.9 8.2	16.5 5.9	29.3 10.5	23.8 8.5	36.1 12.9	2	33	3	29	30	30	0			
	5	16.8 6.0	23.4 8.4	112.7 40.2	139.8 49.9	127.0 45.3	53.1 19.0	12.8 4.6	22.8 8.1	75.8 27.1	90.4 32.3	83.4 29.8	41.6 14.9	2	24	3	33	35	34	22			
	5 ¹⁾							12.7 4.5	22.8 8.1	28.7 10.2	38.0 13.6	33.7 12.0	41.2 14.7	1	24	3	75	73	73	22			
Wien q = 20 % 175 Mod.	0	19.2 6.9	23.8 8.5					15.3 5.5	23.7 8.5					1	20	0							
WW q = 60 % 375 Mod.	0	19.0 6.8	27.0 9.6					14.1 5.0	22.5 8.0					1	27	17							
	5 ¹⁾	16.8 6.0	24.8 8.9	69.5 24.8	68.3 24.4	68.9 24.6	153.1 54.7	12.9 4.6	20.7 7.4	33.3 11.9	27.7 9.9	30.6 11.0	49.8 17.8	1	23	16	52	59	56	68			

1) Korrektur mit den bei Version 0 ermittelten systematischen Fehlern.

Tabelle 8: OEEPE-Oberschwaben
 Genauigkeitssteigerung durch Korrektur systematischer Modellfehler
 Überweitwinkel

Block	PP-Version	Genauigkeit ohne Korrektur						Genauigkeit mit Korrektur						Iterationen	Genauigkeitssteigerung in %									
		σ_{oL} cm μm	σ_{oH} cm μm	σ_x cm μm	σ_y cm μm	σ_{xy} cm μm	σ_z cm μm	σ_{oL} cm μm	σ_{oH} cm μm	σ_x cm μm	σ_y cm μm	σ_{xy} cm μm	σ_z cm μm		σ_{oL}	σ_{oH}	σ_x	σ_y	σ_{xy}	σ_z				
Den Haag q = 20 % 200 Mod.	0	25.1 9.0	24.6 8.8					20.8 7.4	24.1 8.6					1	17	2								
	1	24.3 8.7	21.5 7.7	35.2 12.6	49.8 17.8	43.1 15.4	42.3 15.1	19.6 7.0	20.9 7.5	26.7 9.5	32.1 11.5	29.5 10.5	42.1 15.0	3	19	3	24	36	32	0				
	5	21.4 7.6	20.9 7.5	100.6 35.9	151.3 54.0	128.5 45.9	64.1 22.9	19.4 6.9	20.1 7.2	95.3 34.0	141.3 50.5	120.5 43.0	63.4 22.6	2	9	4	5	7	6	1				
	5 ¹⁾							19.2 6.9	20.1 7.2	69.2 24.7	97.5 34.8	84.5 30.2	63.6 22.7	1	10	4	31	36	34	1				
Delft q = 20 % 175 Mod.	0	24.6 8.8	21.8 7.8					20.3 7.2	21.4 7.6					2	17	2								

1) Korrektur mit den bei Version 0 ermittelten systematischen Fehlern.

OEEPE - OBERSCHWABEN

Flugrichtung und Flugdatum der Streifen

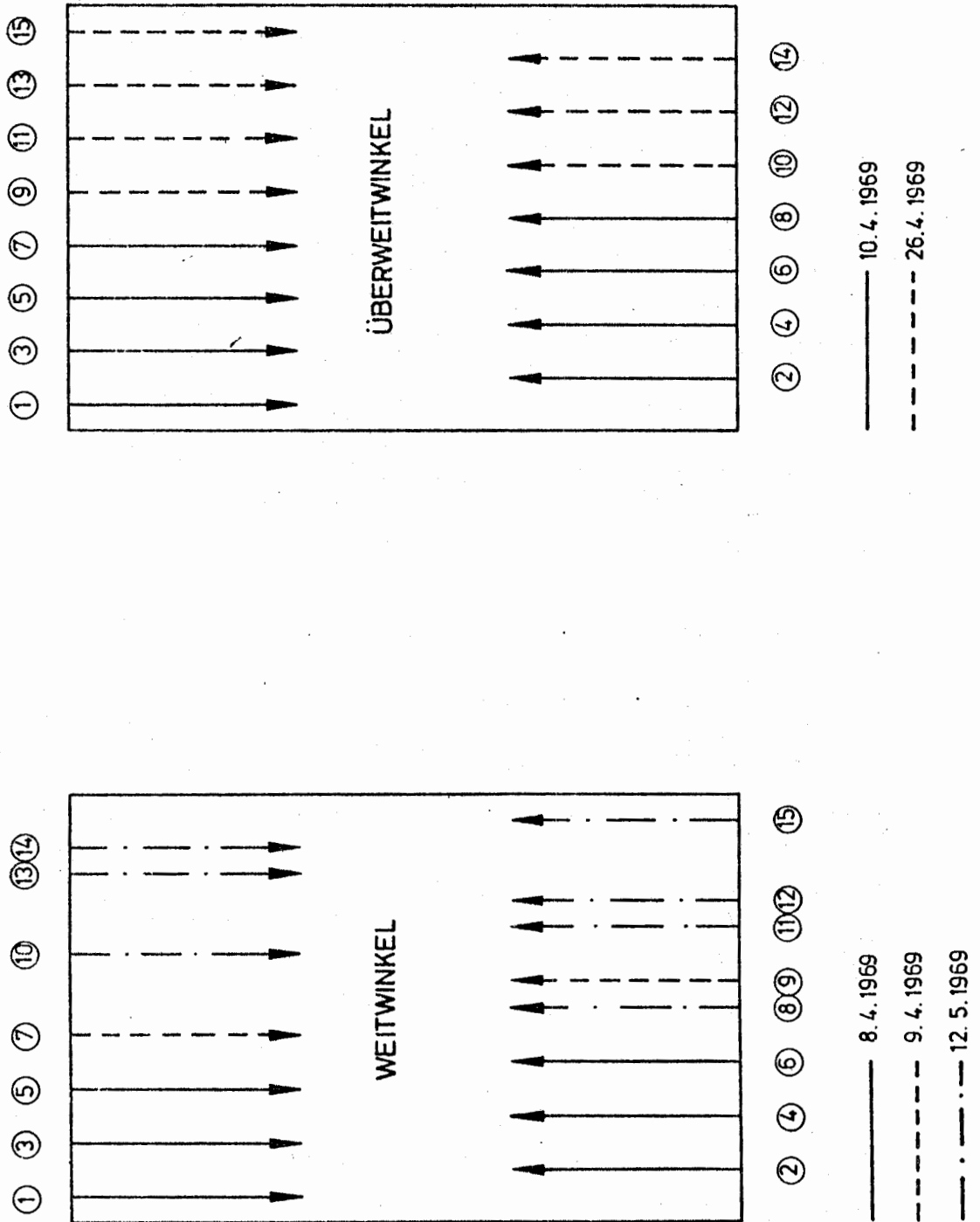


Abbildung 2

OEEPE - OBERSCHWABEN

Systematische Modellfehler nach der Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen

Abhängigkeit von Flugrichtung und Kamerageometrie
 Vergleich Weitwinkel - Überweitwinkel, $q = 20 \text{ ‰}$
 Lage: PP-Version 0;
 $\mu = 5 \text{ } \mu\text{m}$

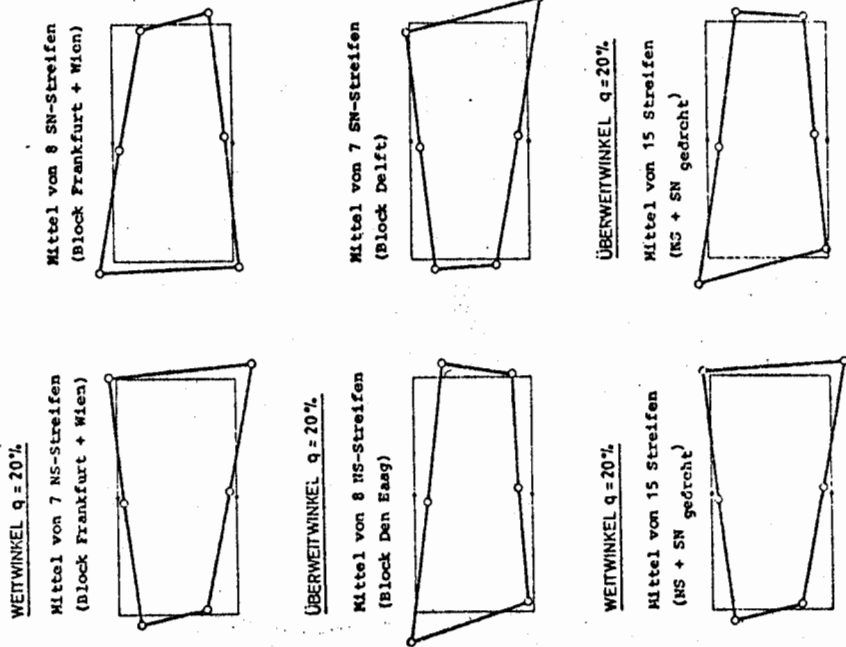


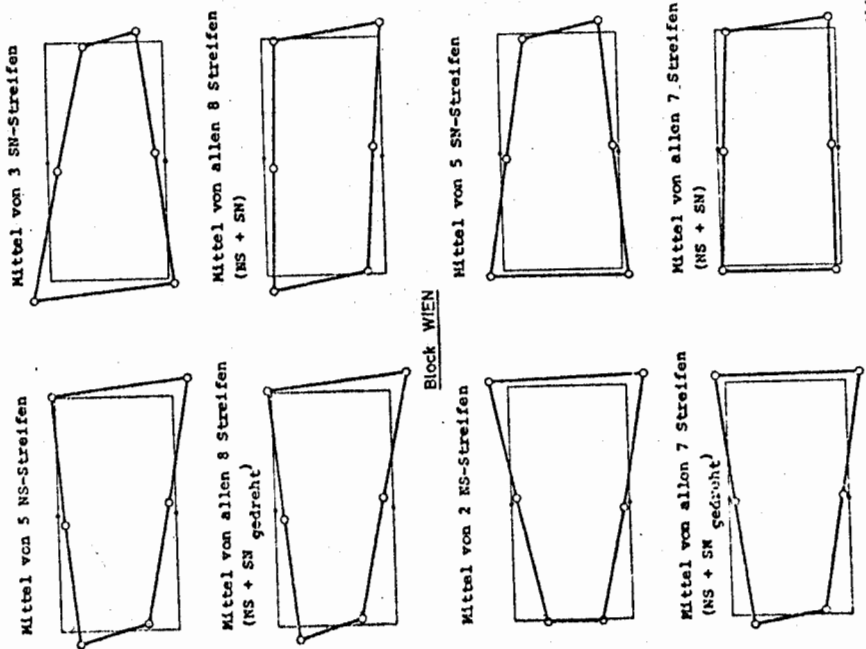
Abb. 4

OEEPE - OBERSCHWABEN

Systematische Modellfehler nach der Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen

Abhängigkeit von der Flugrichtung
 Lage: Weitwinkel $q = 20 \text{ ‰}$; PP-Version 0;
 $\mu = 5 \text{ } \mu\text{m}$

Block FRANKFURT



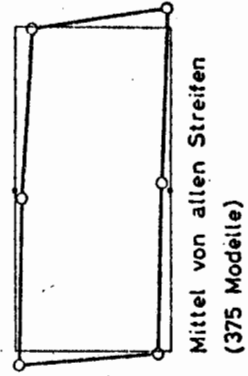
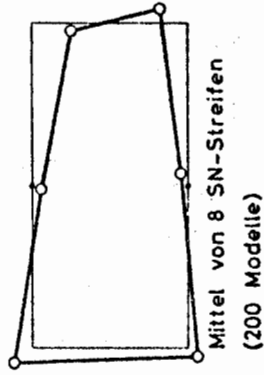
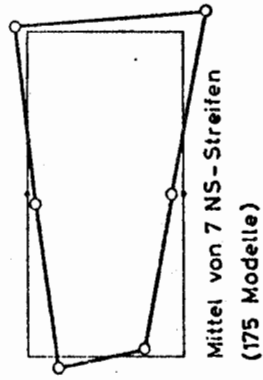
Block WIEN

Abb. 3

OEEPE - OBERSCHWABEN
SYSTEMATISCHE MODELLEFehler IN DER LAGE

Einfluß von Flugrichtung und Aufnahmekammer
 PP Version: Alle PP (528), $\mu = 5 \mu\text{m}$

WEITWINKEL $q = 60^\circ$



ÜBERWEITWINKEL $q = 60^\circ$

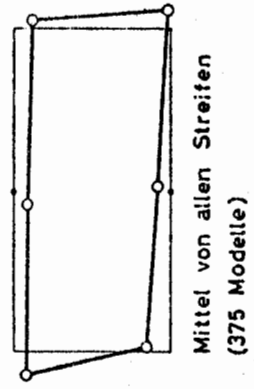
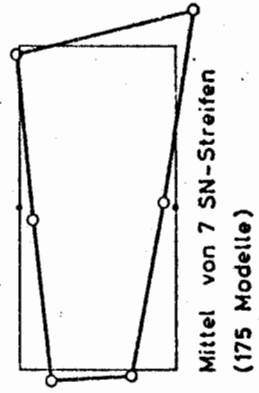
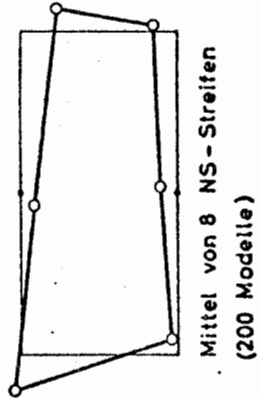


Abb. 5

OEEPE - OBERSCHWABEN

Systematische Modellfehler in der Höhe
 Abhängigkeit von Flugrichtung und Überüberdeckung
 Überweitwinkel, PP-Version 0,
 $\mu = 5 \mu\text{m}$

OEEPE - OBERSCHWABEN

Systematische Modellfehler in der Höhe
 Abhängigkeit von Flugrichtung und Überüberdeckung
 Weitwinkel, PP-Version 0,
 $\mu = 5 \mu\text{m}$

ÜBERWEITWINKEL $q = 20\%$

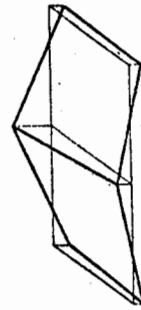


Mittel von 7 SN-Streifen
(Block Delft)



Mittel von 8 NS-Streifen
(Block Den Haag)

ÜBERWEITWINKEL $q = 60\%$



Mittel von 7 SN-Streifen



Mittel von 8 NS-Streifen

WEITWINKEL $q = 20\%$



Mittel von 7 NS-Streifen
(Block Frankfurt + Wien)



Mittel von 8 SN-Streifen
(Block Frankfurt + Wien)

WEITWINKEL $q = 60\%$



Mittel von 7 NS-Streifen



Mittel von 8 SN-Streifen

Abb. 7

Abb. 6

OEEPE - OBERSCHWABEN

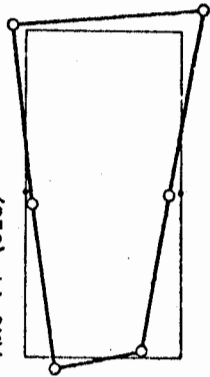
Einfluß der Paßpunktversion auf systematische Modellfehler

$i = 5 \mu\text{m}$

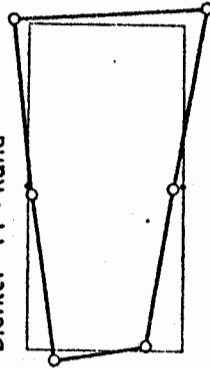
LAGE

WEITWINKEL $q = 60^\circ$

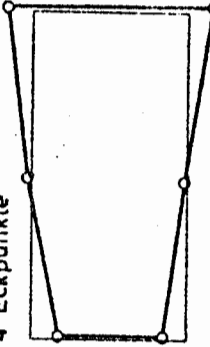
Alle PP (528)



Dichter PP - Rand



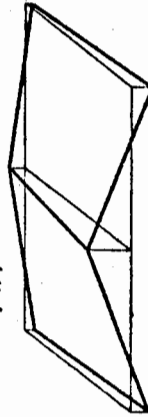
4 Eckpunkte



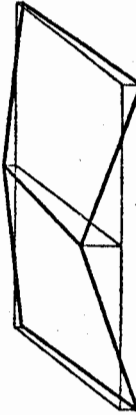
HÖHE

WEITWINKEL $q = 60^\circ$

Alle PP (417)



HPP - Ketten $i = 2$ (117)



HPP - Ketten $i = 12.5$ (31)

