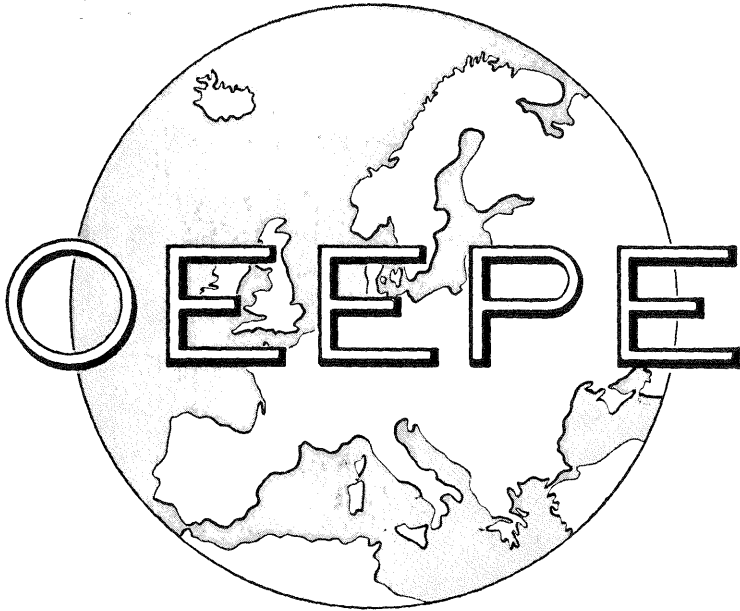


Nachrichten aus dem
Karten- und Vermessungswesen

Sonderheft

ISSN 0344-5879



BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND
SONDERVERÖFFENTLICHUNG

ISSN 0532-5919

Nr. D-13

Zusammengestellt
und herausgegeben vom
Institut für Angewandte Geodäsie
(Abt. II des Deutschen Geodätischen Forschungsinstituts)

VERLAG DES INSTITUTS FÜR ANGEWANDTE GEODÄSIE
FRANKFURT A. M. 1980

Die vorliegende Veröffentlichung ist das ausschließliche Eigentum der
„Organisation Européenne d'Etudes Photogrammétriques Expérimentales“.

Alle Rechte der Übersetzung und des Nachdrucks sind der OEEPE vorbehalten.

Gesamtherstellung:
Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt a.M.

Bestimmung und Korrektur systematischer
Bild- und Modelldeformationen in der
Aerotriangulation am Beispiel des
Testfeldes „Oberschwaben“

Von der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Gerhard Haug
geboren in Plochingen
(Kreis Esslingen)

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. F. Ackermann
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. K. Linkwitz

Tag der Einreichung: 12. Mai 1978
Tag der mündlichen Prüfung: 25. Januar 1979

Es ist dem Autor eine angenehme Pflicht, Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Ackermann für die jederzeit gewährte, freundliche Unterstützung und für seine wertvollen Hinweise Dank zu sagen. Mein Dank gilt der OEEPE für die Überlassung des Datenmaterials von dem Aerotriangulationstest "Oberschwaben" und Herrn Prof. Dr. G. Kupfer für die Ergebnisse der Testfeldkalibrierungen, die er mir zur Verfügung gestellt hat. Insbesondere bedanke ich mich für die Förderung der Untersuchungen durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
I. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG	7
1. Grundsätzliches zum Begriff der Genauigkeit in Geodäsie und Photogrammetrie	7
1.1 Zentrale Bedeutung des Begriffs Genauigkeit	7
1.2 Zum Begriff der Genauigkeit	7
1.3 Einschränkung des Genauigkeitsbegriffs auf Varianzen, Kovarianzen und repräsentative Durchschnittswerte	8
1.4 Die sogenannten systematischen Fehler und neuere Fehlermodelle	9
2. Die Konzeption des mathematischen Modells	10
2.1 Das Funktionalmodell	10
2.2 Das stochastische Modell	11
2.3 Überprüfung mathematischer Modelle	12
3. Entwicklung und Stand der Genauigkeitskenntnisse in der Aerotriangulation (bis etwa 1970)	12
3.1 Entwicklung der Methoden und vorläufige Genauigkeitsergebnisse (bis Mitte der sechziger Jahre)	13
3.2 Theoretische Genauigkeitsuntersuchungen	14
4. Der OEEPE-Versuch Oberschwaben	16
4.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung	16
4.2 Testfeld und Befliegung	17
4.3 Bearbeitung von Programm I	18
4.4 Ergebnisse der ersten Bearbeitungsphase	21
5. Aufgabenstellung für erweiterte Untersuchung	23
5.1 Beurteilung der bisherigen Ergebnisse der Blockausgleichungen (Phase I)	23
5.2 Weiterentwicklung der Methoden und erste Ergebnisse	23
5.3 Aufgabenstellung für die zweite Bearbeitungsphase des Oberschwabentests	24
5.4 Arbeitsplan	25
II. UNTERSUCHUNG ÜBER DIE WIRKSAMKEIT VON VERFEINERTEN A PRIORI KORREKTUREN UND VON TESTFELDKALIBRIERUNGEN	27
1. Übliche a priori Korrekturen und ihre Beurteilung	27
1.1 Grundsätzliches	27
1.2 Die üblichen a priori Korrekturen	27
1.2.1 Korrektur der Objektivverzeichnung	28
1.2.2 Korrektur des Filmverzugs	29
1.2.3 Refraktionskorrektur	30
1.2.4 Erdkrümmungskorrektur	30

1.3	Kritik an den üblichen a priori Korrekturen und Möglichkeiten ihrer Verfeinerung	31
2.	Untersuchung der Wirksamkeit verfeinerter a priori Korrekturen	32
2.1	Korrektur der Objektivverzeichnung	32
2.1.1	Vergleich von radialsymmetrischer und flächenhafter Verzeichnungskorrektur	34
2.1.2	Konstanz der Verzeichnung	35
2.1.3	Zusammenfassung	38
2.2	Korrektur des Filmverzugs	38
2.2.1	Maßstabsänderung	38
2.2.2	Maßstabsaffinität	39
2.3	Einfluß der Bildneigung auf die Korrektur wegen Erdkrümmung und Refraktion	41
2.3.1	Auswirkung des vereinfachten Korrekturansatzes im Einzelbild und im absolut orientierten Modell	41
2.3.2	Beurteilung der Ergebnisse	43
2.4	Einfluß der Definition der Landeskoordinaten auf die Genauigkeit der Aerotriangulation	44
2.4.1	Definition des geodätischen Koordinatensystems	44
2.4.2	Geodätische Grundlagen	45
2.4.3	Simulation	45
2.4.4	Ergebnis und Beurteilung	47
3.	Testfeldkalibrierung	48
3.1	Grundsätzliches	48
3.2	Durchführung der Testfeldkalibrierung	48
3.3	Ergebnis der Testfeldkalibrierung	49
3.4	Anwendung der Testfeldkalibrierung in der Aerotriangulation	51
3.5	Beurteilung	51
4.	Zusammenfassung	54
III.	ANALYSE UND BESCHREIBUNG DER SYSTEMATISCHEN BILD- UND MODELLDEFORMATIONEN	55
1.	Beschreibung des Verfahrens zur Bestimmung der systematischen Bild- und Modelldeformationen	55
1.1	Durchführung	57

2.	Systematische Bild- und Modelldeformationen: Zusammenstellung der Ergebnisse	59
3.	Beschreibung der systematischen Bild- und Modell- deformationen	59
3.1	Typ und Betrag der systematischen Bild- und Modell- deformationen	67
3.2	Bestimmungsgenauigkeit der systematischen Bild- und Modelldeformationen	71
3.3	Konstanz der systematischen Bild- und Modelldeformationen	72
3.3.1	Darstellung der systematischen Bilddeformationen im Streifen	72
3.3.2	Konstanz der systematischen Bild- und Modelldeformationen im Block	75
3.3.3	Zusammenfassung	78
3.4	Abhängigkeit der systematischen Fehler von den Projekt- parametern (Flugparameter)	78
3.4.1	Aufnahmesystem und Filmverarbeitung	79
3.4.2	Atmosphärische Bedingungen	79
3.4.3	Auswertesystem	80
3.4.4	Geodätisches Netz	80
4.	Bestimmbarkeit der systematischen Bild- und Modell- deformationen	81
4.1	Vergleich der Bild- und Modelldeformationen in Abhängigkeit von der Querüberdeckung	81
4.1.1	Bestimmbarkeit der systematischen Modelldeformationen in Abhängigkeit von der Querüberdeckung und der Flugrichtung	82
4.2	Vergleich der systematischen Bild- und Modelldeformationen in Abhängigkeit von der Paßpunktbesetzung	86
5.	Weitere Vergleiche	89
5.1	Vergleich der systematischen Bilddeformationen mit den systematischen Modelldeformationen	89
5.2	Vergleich der Bilddeformationen aus Selbstkalibrierung und Testfeldkalibrierung	93
5.3	Vergleich der Bild- und Modelldeformationen mit anderen Ergebnissen	96
6.	Zusammenfassung	97

IV.	KORREKTUR DER SYSTEMATISCHEN BILD- UND MODELLDEFORMATIONEN	98
1.	Korrektur	98
1.1	Korrekturansätze	98
1.2	Durchführung	100
2.	Ergebnisse der Blockausgleichungen nach der Korrektur der systematischen Bild- und Modellfehler	100
2.1	Zusammenstellung der Blockausgleichungsergebnisse mit Selbstkalibrierung	101
2.1.1	Gewichtseinheitsfehler	101
2.1.2	Absolutgenauigkeit: Lage	101
2.1.3	Absolutgenauigkeit: Höhe	101
2.2	Wirksamkeit der Korrektur der systematischen Fehler	106
2.3	Korrektur der systematischen Fehler mit der bestmöglichen Bestimmung	107
3.	Vergleich der empirischen Ergebnisse mit der theoretischen Genauigkeit	109
3.1	Ableitung der theoretischen Genauigkeit durch Simulation zufälliger Fehler	109
3.2	Diskussion der theoretischen Genauigkeit	111
3.3	Vergleich der empirischen Ergebnisse mit den theoretischen Genauigkeitserwartungen	113
3.3.1	Lagegenauigkeit	114
3.3.2	Höhengenauigkeit	117
4.	Vorläufige Beurteilung der absoluten Ergebnisse und Vergleiche	117
4.1	Vergleich der Bündelerggebnisse mit den Modellergebnissen	118
4.2	Vergleich der Genauigkeit der Weitwinkelblöcke und der Überweitwinkelblöcke	120
4.3	Vergleich der Absolutgenauigkeit in Abhängigkeit von der Querüberdeckung	122
4.4	Vergleich der Blockausgleichungsergebnisse mit Selbstkalibrierung und Testfeldkalibrierung	124
5.	Zusammenfassung	127
V.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	129
	LITERATUR UND ANHANG	134

I. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

1. Grundsätzliches zum Begriff der Genauigkeit in Geodäsie und Photogrammetrie

1.1 Zentrale Bedeutung des Begriffs Genauigkeit

In Geodäsie und Photogrammetrie sind die Durchführung und die Auswertung von Messungen Schwerpunkt praktischer und theoretischer Arbeiten. In den Aufgabebereich der Theorie fällt die Aufstellung und Prüfung von mathematischen Modellen zur Auswertung von Messungen; in der Praxis sind die ausgewerteten Messungen oft selbst das Ergebnis von geodätischen oder photogrammetrischen Arbeiten. Somit kommt der Beurteilung von Messungen große Bedeutung zu. Sowohl in der wissenschaftlichen Arbeit als auch in der Praxis ist es notwendig zu wissen, wie genau die Meßergebnisse den sogenannten 'wahren Wert', den man mit den Messungen annähert, darstellen.

Das Beurteilungskriterium für die Messungen ist die Genauigkeit. Die Genauigkeit dient unmittelbar zur absoluten und vergleichenden Beurteilung von Messungen, Meßverfahren und Meßinstrumenten, sowie für die Beurteilung von abgeleiteten Größen, wie Ergebnissen von Berechnungen und Ausgleichungen.

Mittelbar ist die Genauigkeit eine Entscheidungshilfe bei der Planung von Projekten auf dem Gebiet der Vermessung. Im Hinblick auf die gewünschten Ergebnisse und unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit und des Zeitaufwandes ist die Genauigkeit ein Kriterium für die Wahl der Verfahren und den Einsatz von Meß- und Auswertegeräten. Letztlich dienen empirische und theoretische Genauigkeitsableitungen zur Beurteilung dafür, ob bestimmte Forderungen überhaupt erreichbar sind.

Insofern ist die Genauigkeit ein grundsätzliches Kriterium für wissenschaftliche Ziele und für Fragen, die sich aus der Praxis der Vermessung ergeben.

1.2 Zum Begriff der Genauigkeit

Der Begriff der 'Genauigkeit' wurde im Laufe der Zeit unterschiedlich definiert. Die klassische Definition der Genauigkeit geht auf die Gaußsche Fehlertheorie zurück. Gauß unterteilte die Meßfehler in 'grobe', 'systematische' und 'zufällige' Fehler. Obwohl die Begriffe auch noch heute gebräuchlich sind, wird deren ursprüngliche Definition und Begründung neuerdings abgelehnt (TIENSTRA [51]). Dabei wird insbesondere darauf verwiesen, daß die systematischen, aber auch die groben Fehler, keine Meßfehler sind. Grobe Fehler sind Datenfehler wie z.B. Übertragungsfehler, Punktverwechslungen, usw. Systematische Fehler treten nur dann auf, wenn das mathematische Modell zur Beschreibung der physikalischen Wirklichkeit der Messung nicht ausreichend ist. Die Definition des zufälligen Fehlers als des Fehleranteils, der übrig bleibt wenn man grobe und systematische Fehler eliminiert hat, ist nicht überzeugend. Vor allem aber ist die Begründung der zufälligen Fehler mit Hilfe der 'Elementarfehler' problematisch und wissenschaftlich nicht befriedigend.

Heute sind derartige Hilfsvorstellungen nicht mehr erforderlich, da man die Messungen mit statistischen Methoden analysiert und beurteilt. Die Messungen werden als zufällige Ereignisse aufgefaßt. Sie sind Realisierungen einer stochastischen Variablen. Eine stochastische Variable ist eine Größe, die einen Ereignisraum besitzt. Der Ereignisraum umfaßt den Bereich aller möglichen Ereignisse. Die Gesamtheit der Messungen ist eine Stichprobe aus der Grundgesamtheit aller möglichen Ereignisse.

Arbeitet man in einem System von Messungen, so verschiebt sich die Betrachtungsweise von der Beurteilung einer einzelnen Größe zur Beurteilung des gesamten Systems.

Bei der Beurteilung von Variablen besteht grundsätzlich kein Unterschied zwischen gemessenen Größen und berechneten d.h. abgeleiteten Größen. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Variablen wird durch lineare Transformation in ihren relativen Eigenschaften nicht geändert. Die durch Berechnung oder Ausgleichung gewonnenen Größen stellen ebenfalls Schätzungen der Erwartungswerte der entsprechenden stochastischen Variablen dar.

Man kann also feststellen: Die Genauigkeit eines Systems von Variablen wird durch die n -dimensionale Wahrscheinlichkeitsverteilung aller Größen dieses Systems beschrieben (ACKERMANN [1], RINNER und BURKHARDT [39]).

1.3 Einschränkung des Genauigkeitsbegriffs auf Varianzen, Kovarianzen und repräsentative Durchschnittswerte

1. Die obige Definition der Genauigkeit eines Systems von Variablen, als die n -dimensionale Wahrscheinlichkeitsverteilung aller Größen, ist in den meisten Fällen nicht realisierbar. Für eine Anwendung des Genauigkeitsbegriffs in der Praxis sind Einschränkungen notwendig, die verschieden abgestuft werden können.

Der erste Schritt stellt nur eine Vereinfachung, aber noch keine Einschränkung der Allgemeingültigkeit dar. Man betrachtet nicht mehr die Wahrscheinlichkeitsverteilung selbst, sondern Parameter, die die Wahrscheinlichkeitsverteilung beschreiben. Dies sind in erster Linie die 1. und 2. Momente der Wahrscheinlichkeitsverteilung: die Erwartungswerte der Mittelwerte, der Varianzen und der Kovarianzen. Eine Normalverteilung ist mit diesen Parametern vollständig definiert. Damit ist häufig die Vorstellung verbunden, daß die Wahrscheinlichkeitsverteilung eine Normalverteilung sei, was allerdings nicht notwendigerweise zutreffen muß.

2. Unter der Annahme erwartungstreuer Schätzungen beschreiben die Varianzen und die Kovarianzen das Genauigkeitsverhalten eines Systems von Variablen. Bei der Ermittlung der Varianz-Kovarianz Matrix eines Systems wird davon ausgegangen, daß die Teilmatrix der Größen, die direkt gemessen worden sind, wie z.B. die Bildkoordinaten, bekannt ist. Alle anderen Elemente können dann im Prinzip durch Fehlerfortpflanzung abgeleitet werden. Dabei wird angenommen, daß die Funktionalbeziehungen zwischen den Größen linear, bzw. im Bereich der Variabilität, der betrachtet wird, hinreichend linear sind (Linearisierung). Die Linearität der Beziehungen ist prinzipiell nicht notwendig, aber aus Gründen der Einfachheit vorteilhaft.

3. Die vollständige Varianz-Kovarianz Matrix wird nur selten aufgestellt. Man beschränkt sich häufig auf eine Submatrix einer Gruppe von Beobachtungen, wie z.B. die der Neupunktskoordinaten. Andere Submatrizen, die vielleicht nur im Verlauf der Berechnungen von Interesse sind, werden häufig nicht weiter betrachtet. Ein Beispiel dafür sind die Orientierungsparameter.

4. Bei großen Systemen sind selbst noch die vollbesetzten Submatrizen zu umfangreich, als daß man sie aufstellen und damit arbeiten würde. Daher verzichtet man auf die vollständige Betrachtung der Genauigkeitsparameter eines Systems in Form der Varianz-Kovarianz Matrizen und geht auf mehr oder weniger repräsentative Ersatzgrößen über.

Hierbei sind verschiedene Abstufungen möglich. Es werden nicht mehr die vollständigen Zusammenhänge des Subsystems durch Korrelationen beschrieben, sondern nur noch Teilzusammenhänge, wie die Korrelationen der X- und der Y-Koordinate eines Punktes in Form der Fehlerellipse.

In einer letzten Stufe der Vereinfachung verzichtet man auf jegliche Korrelationen und betrachtet nurmehr die Varianzen; das sind die Diagonalelemente der ursprünglichen Varianz-Kovarianz Matrix. Die Genauigkeit, z.B. eines Punktfeldes, wird dann durch die Varianzen der X-, Y- und Z-Koordinate beschrieben. Das heißt, man beschränkt sich auf einfache Durchschnittswerte.

1.4 Die sogenannten systematischen Fehler und neuere Fehlermodelle

1. Die auf der Kenntnis der Varianz-Kovarianz Matrix beruhende Konzeption zur Beschreibung der Genauigkeit setzt eine unverzerrte Schätzung der Erwartungswerte der stochastischen Variablen voraus. Die Verzerrungen sind im engeren Sinn nicht Gegenstand der konventionellen Genauigkeitstheorie, wie oben ausgeführt worden ist. Begrifflich sind die Verzerrungen dem Konzept der systematischen und groben Fehler zugeordnet. Die systematischen Fehler haben, im Gegensatz zu der älteren Betrachtungsweise, nichts mit einer Unzulänglichkeit der Beobachtungen zu tun, sondern sind Ausdruck der unvollständigen mathematischen Beschreibung der physikalischen Realität. Sie können durch Redundanz nicht ohne weiteres festgestellt werden. Man muß vielmehr versuchen, die systematischen Fehler durch bestmögliche Aufstellung des Funktionalmodells (Definition siehe Abschn. 2.1) zu erfassen. Das schwierige Problem dabei ist, wie man sicherstellen kann, daß keine oder nur nicht relevante systematische Fehler verbleiben. Nur dann ist die Voraussetzung gegeben, unter der eine statistische Betrachtung der Genauigkeit sinnvoll ist.

2. Die sogenannten groben Fehler sind die Datenfehler und damit im konventionellen Sinne nicht Gegenstand der Theorie. Sie werden hier nicht weiter betrachtet. Allerdings sind die groben Fehler für die Praxis insofern von Bedeutung, als sie in größeren Datenmengen praktisch stets vorhanden sind und man sie erkennen und eliminieren sollte. Die vollständige Beseitigung der groben Fehler stellt eine Voraussetzung für die Anwendung der Genauigkeitstheorie dar. Da das nicht streng möglich ist, hängen Genauigkeit und "Zuverlässigkeit" doch enger zusammen als die klassische Theorie angenommen hat.

Mit dem Problem der Zuverlässigkeit beschäftigt sich hauptsächlich BAARDA [7]. Dieser Bereich bleibt hier ausgeklammert.

3. Mit der Kollokation ist zu der klassischen Genauigkeitstheorie ein neues Fehlermodell hinzugekommen (KRAUS [29]). Danach unterteilt man eine stochastische Variable in drei Komponenten. Dies sind:

- der Trend
- der korrelierte Anteil (Signal)
- und der unkorrelierte Anteil (Rauschen)

Diese Darstellung ist in der klassischen Theorie enthalten, betont die Anteile aber unterschiedlich. Der Trend beschreibt die funktionalen Abhängigkeiten der Variablen des Systems. Die beiden anderen Anteile sind in der Varianz-Kovarianz Matrix enthalten. Die Unterscheidung in korrelierte und unkorrelierte Anteile ist insbesondere von Bedeutung was die Prädiktion an nicht gemessenen Stellen betrifft.

4. Die moderne Geodäsie beschäftigt sich ausgiebig mit der Verallgemeinerung des Genauigkeitsbegriffs, mit der Erfassung der Genauigkeitsstruktur von Netzen und Blöcken, wobei die Begriffe der inneren Genauigkeit, sowie der Homogenität und Isotropie von Bedeutung sind (GRAFAREND [21], RINNER, KILLIAN, MEISL [40]). Im Rahmen dieser Arbeit kann darauf nicht eingegangen werden.

2. Die Konzeption des mathematischen Modells

Zur weiteren Diskussion des Genauigkeitsbegriffs bzw. zur Beurteilung verschiedener Ausgleichsverfahren bei der geodätischen oder photogrammetrischen Punktbestimmung muß die Konzeption des mathematischen Modells herangezogen werden, die grundlegend für alle Meß- und Rechenverfahren ist.

Man unterscheidet bei jedem auf Messungen beruhenden System das sogenannte Funktionalmodell und das stochastische Modell.

2.1 Das Funktionalmodell

Das Funktionalmodell eines Systems beschreibt, bzw. schreibt vor, die Funktionalzusammenhänge zwischen den Erwartungswerten der stochastischen Variablen. Konstante Größen des Systems werden aus rechentechnischen Gründen oft als Grenzfälle von Variablen behandelt. In den meisten Fällen hat man es in der Geodäsie und Photogrammetrie mit geometrischen Systemen zu tun, die zur Punktbestimmung dienen. Jeder Messung und insbesondere jeder Berechnung (Ausgleichung) liegt ein bestimmtes Funktionalmodell zugrunde, das die Bestimmbarkeit des Systems gewährleisten muß. Vordergründig betrachtet wird das Funktionalmodell durch das System der Bedingungs- und Fehlergleichungen einer Ausgleichung ausgedrückt. Tatsächlich beschreiben diese Formulierungen Hilfsvorstellungen, mit denen die komplexe physikalische Wirklichkeit ersatzweise und im Hinblick auf bestimmte Zwecke hinreichend und operationell dargestellt wird.

In der Praxis wird das Funktionalmodell im Rahmen des Erreichbaren der geforderten Genauigkeit angepaßt. Es gibt zum selben Problem oft verschiedene, miteinander konkurrierende Ansätze. Häufig sind in der Praxis Funktionalmodelle standardmäßig vorgegeben. Doch bleibt das Problem wie vollständig die Funktionalmodelle die physikalische Wirklichkeit ersatzweise beschreiben und daß als Folge systematische Fehler auftreten. Das bedeutet, daß es kein 'wahres Funktionalmodell' im Sinne von nicht steigerungsfähig gibt. Die Forderung der Praxis ist, ein hinreichendes Funktionalmodell, das für eine bestimmte Fragestellung eine angemessene Lösung ermöglicht, zu benutzen (siehe dazu auch ACKERMANN [1]).

Sowohl im praktischen Bereich als auch im Bereich der Theorie gewinnt heute das Problem der absoluten und vergleichenden Beurteilung von Funktionalmodellen mehr an Bedeutung, zumal der Gesichtspunkt der einfachen Berechnung meist seine Bedeutung verloren hat. Vergleiche von verschiedenen Funktionalmodellen sind nicht unmittelbar möglich, außer es gibt ein übergeordnetes Funktionalmodell, das ein einfacheres Funktionalmodell miteinschließt. Falls es nicht anders möglich ist, wird das Funktionalmodell mit Hilfe statistischer Teste empirisch beurteilt.

2.2 Das stochastische Modell

Das stochastische Modell enthält die Annahmen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der stochastischen Variablen, die in der Ausgleichung durch die Varianz-Kovarianz Matrix beschrieben wird.

Ausgangspunkt sind die a priori Annahmen über die stochastischen Variablen, von denen unmittelbar Messungen vorliegen. Die stochastischen Eigenschaften der abgeleiteten Variablen ergeben sich durch Fehlerfortpflanzung, ebenso wie die Korrelationen mit den Meßgrößen.

In der Praxis sind die stochastischen Modelle gegenüber der strengen Darstellung der Wahrscheinlichkeitsverteilung stark vereinfacht. Insbesondere werden die Korrelationen häufig nicht berücksichtigt.

Das stochastische Modell der beobachteten Größen ist durch die Varianz-Kovarianz Matrix der entsprechenden Variablen in der Ausgleichung beschrieben. Alles übrige kann daraus abgeleitet werden. Daneben gehören zum stochastischen Modell auch alle Annahmen darüber, welche Größen als gegeben und konstant, und welche Größen als freie Unbekannte behandelt werden.

Im übrigen kann man im stochastischen Modell festlegen, was im Sinne der Ausgleichung als Beobachtung gilt, unabhängig davon ob tatsächlich eine "Messung" vorliegt oder nicht. Dazu zählt jede Größe, der ein Erwartungswert und eine Varianz zugeordnet ist.

In der Praxis wird bisher das a priori stochastische Modell der ursprünglichen Beobachtungen als gegeben betrachtet. Die Gewichts- und Kovarianzschätzung aus Meßdaten und Ausgleichungsergebnissen ist im Prinzip möglich und war Gegenstand verschiedener Untersuchungen (EBNER [14], STARK [49]). Diese Möglichkeit bleibt hier unberücksichtigt, weil sich die Arbeit mit der Verbesserung des Funktionalmodells befassen wird.

2.3 Überprüfung mathematischer Modelle

Mathematische Modelle sind Hypothesen, die die physikalische Wirklichkeit nur mehr oder weniger gut annähern können. Deshalb ist eine Beurteilung der Modelle, ob diese als hinreichende Beschreibung eines tatsächlichen Systems gelten können, notwendig. Die vollständige Überprüfung muß sowohl das Funktionalmodell als auch das stochastische Modell umfassen.

Die Beschreibung der stochastischen Eigenschaften der ursprünglichen Beobachtungen sind im strengen Sinn theoretischer Natur. Obwohl sie auf früheren Erfahrungen beruhen, d.h. aus Experimenten abgeleitet wurden, sind sie doch für den Einzelfall Annahmen, die überdies häufig wesentlich vereinfacht sind. Die stochastischen Eigenschaften der durch Berechnung oder Ausgleich hergeleiteten Größen sind in zweifacher Weise theoretisch: Sie sind von den Annahmen über Gewichte und Korrelationen der ursprünglichen Beobachtungen abhängig und zusätzlich das Ergebnis der Fehlerfortpflanzung, die auf dem linearen oder linearisierten Funktionalmodell beruht. Sie sind dagegen nicht von den Zahlenwerten der Beobachtungen beeinflußt, sieht man von dem Varianzfaktor σ_0 ab.

Es bleibt das Problem, ob die angenommenen mathematischen Modelle den tatsächlichen Beobachtungen entsprechen. Diese Frage kann nur über ein übergeordnetes theoretisches Modell entschieden werden oder - falls das nicht möglich ist - empirisch, mit statistischen Tests, in diesem Fall Hypothesentests. Die angenommenen Modelle entsprechen der Nullhypothese. Für geeignete Testgrößen wird dann der empirische Wert mit dem theoretischen Erwartungswert verglichen und es werden die Abweichungen nach den Regeln der Statistik beurteilt.

Bislang wurden derartige Tests in Geodäsie und Photogrammetrie nur wenig angewandt. Statistische Tests können die Modellannahmen nicht als wahr beweisen und erlauben auch nicht, die Ursachen der Abweichung explizit darzustellen. Man kann nur feststellen, ob Veranlassung besteht, die Nullhypothese als nicht mit dem Experiment übereinstimmend zu verwerfen.

3. Entwicklung und Stand der Genauigkeitskenntnisse in der Aerotriangulation (bis etwa 1970)

Die Aerotriangulation ist eine Methode zur photogrammetrischen Punktbestimmung im Bildverband. Dabei können Gebiete ohne Paßpunkte durch Bild- oder Modellverknüpfungen überbrückt werden. Die Zahl und die Anordnung der Paßpunkte steht in direktem Bezug zu der Genauigkeit der Ergebnisse. Es ist das Ziel der Aerotriangulation, die Punktbestimmung wirtschaftlich durchzuführen, gleichzeitig aber die geforderte Genauigkeit nicht zu unterschreiten. Dazu muß man die Genauigkeitsleistung der Aerotriangulation, das sind die Parameter und die Umstände, von denen die Genauigkeit abhängt, möglichst genau kennen.

Parallel mit der Anwendung und Weiterentwicklung der Verfahren wurden deshalb theoretische und empirische Genauigkeitsuntersuchungen durchgeführt.

Hier soll nicht die Methodenentwicklung der Aerotriangulation und die Vielzahl der Genauigkeitsuntersuchungen im Detail ausgeführt werden. Vielmehr soll in einem kurzen Rückblick der Entwicklungsstand in der Aerotriangulation aufgezeigt werden, wie er sich Ende der sechziger Jahre dargestellt hat. Dies ist der Zeitpunkt der Planung des Versuchs 'Oberschwaben', der den Gegenstand der vorliegenden Untersuchung bilden wird.

3.1 Entwicklung der Methoden und vorläufige Genauigkeitsergebnisse (bis Mitte der sechziger Jahre)

1. Die grundlegenden Entwicklungen von Verfahren und Geräten in der Aerotriangulation vollzogen sich im Zeitraum von 1920 - 1935 (RINNER und BURKHARDT [39]). Als erstes Verfahren fand die Radialtriangulation Eingang in die Praxis. Die räumliche Aerotriangulation hat als Streifentriangulation in Form des Aeropolygons begonnen, wobei die Streifenbildung analog im Stereoauswertegerät realisiert wurde. Verbreitete Anwendung erfuhr die Streifentriangulation in den Jahren vor und nach dem zweiten Weltkrieg.

Die Ausgleichung erfolgte graphisch oder rechnerisch als Polynominterpolation. Zu Beginn der sechziger Jahre wurde nach der Theorie der doppelten Fehlersummation ein strengeres Ausgleichungsverfahren entwickelt (RINNER und BURKHARDT [39]).

2. Mit der verbreiterten Anwendung der Aerotriangulation wuchs das Interesse an Genauigkeitsuntersuchungen. Die ersten Untersuchungen waren überwiegend empirischer Art.

Schon 1935 begann O. von GRUBER mit Untersuchungen zur Genauigkeit der Streifentriangulation. Weitere Genauigkeitsuntersuchungen wurden in verschiedenen Organisationen, wie bei der OEEPE¹⁾, beim ITC²⁾ und beim IGN³⁾, wissenschaftlichen Instituten und anderen Stellen durchgeführt. Gegenstand der Arbeiten war unter anderem die Gegenüberstellung verschiedenartiger Polynomausgleichungen und die Einbeziehung von Hilfsdaten zur Steigerung der Höhengenaugigkeit der Streifentriangulation.

Die Ergebnisse dieser verschiedenen Genauigkeitsuntersuchungen waren ganz unterschiedlich und erlaubten meist keine statistisch signifikanten Aussagen zur Genauigkeit der Aerotriangulation. Sie waren auch nicht geeignet, alle für die Abschätzung der Genauigkeit wichtigen Parameter zu erfassen und deren Einfluß nachzuweisen. Damit konnten keine präzise formulierten und allgemein gültigen Aussagen zur Genauigkeit der Aerotriangulation gemacht werden. Insbesondere fehlte jeder Vergleich der empirischen Ergebnisse mit einer Theorie.

1) Organisation Européenne d'Etudes Photogrammétriques Expérimentales

2) International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (ITC)

3) Institut Géographique Nationale

3. Obwohl ursprünglich den empirischen Genauigkeitsuntersuchungen mehr Interesse gewidmet wurde, war man andererseits gehalten, die schon anfangs festgestellten systematischen Fehler zu erklären und überhaupt den Vorstellungen über die Genauigkeit der Aerotriangulation eine theoretische Grundlage zu geben. Die Tatsache, daß zufällige Fehler über kürzere Strecken ebenfalls systematische, jedoch nicht reproduzierbare Streifendeformationen verursachen können, fand ihre Erklärung in der 'doppelten Summation zufälliger Fehler' (GOTTHARDT [56], ROELOFS [57], VERMEIR [52]). Die Fehlertheorie der 'doppelten Summation zufälliger Fehler' war ein plausibles, vereinfachtes Fehlermodell.

Eine Untersuchung von ACKERMANN [1] behandelt die theoretische Genauigkeit ausgeglichener Streifenkoordinaten. Mit der strengen Streifenausgleichung nach der Theorie von VERMEIR als übergeordnetem Fehlermodell wurden bei verschiedener Paßpunktanordnung und Streifenlänge die Genauigkeitsleistung verschiedener Interpolationsverfahren untersucht.

Insgesamt waren die theoretischen Genauigkeitsuntersuchungen lange auf die Streifentriangulation beschränkt. Sie waren zunächst sehr speziell und wurden nicht in erster Linie für die Vorhersage von Ergebnissen benutzt, sondern zur Begründung von Ausgleichungsverfahren (z.B. Polynome 3. Grades).

4. Unabhängig davon wurde von HALLERT [25] und KUPFER [34] versucht, aus den einzelnen Fehlereinflüssen eine Theorie der Bildfehler zu entwickeln. Das Ziel, eine einheitliche, in sich geschlossene Theorie der Genauigkeit der Aerotriangulation aufzubauen, wurde bis Ende der sechziger Jahre nicht erreicht.

3.2 Theoretische Genauigkeitsuntersuchungen

Neben den Verfahren der Streifentriangulation wurden in den sechziger Jahren die Verfahren der Blocktriangulation mit Bildern und Modellen als Einheiten entwickelt (RINNER und BURKHARDT [39]). Im Ansatz wird dabei klar unterschieden zwischen dem Funktionalmodell und dem stochastischen Modell. Der Anteil der Messung wird auf die Bestimmung der Bild- und Modellkoordinaten eingeschränkt und die gesamte Aerotriangulation wird rechnerisch behandelt, wobei diese als Ausgleichungsprozeß aufzufassen ist. Dies ist als Gegensatz zu der früher vertretenen Ansicht zu betonen, wo möglichst viel (Streifenbildung) im Analog-Gerät erarbeitet werden sollte. Die neue Theorie bildet ein System, dessen klare Grundlagen wissenschaftlich exakt sind und bei dem die Voraussetzungen gegeben sind, realistische Aussagen zur theoretischen Genauigkeit der ausgeglichenen Koordinaten abzuleiten. Abgesehen von der Theorie von VERMEIR, und im Gegensatz zu den Streifenausgleichungen mit Polynomen, waren damit zum erstenmal die Grundlagen für eine 'strenge' fehlertheoretische Behandlung der Aerotriangulation gegeben.

Die Genauigkeitsuntersuchungen hatten zunächst das Ziel, eine operationelle Übersicht über den Einfluß der wesentlichen Projektparameter wie Paßpunktanordnung, Blockgröße und Querüberdeckung zu bekommen (RINNER und BURKHARDT [39]). Die Annahmen für das stochastische Modell wurden bewußt einfach gewählt, um einen durchführbaren Ansatz zu erhalten. Die Bild- und Modellkoordinaten wurden als gleich genau und unkorreliert eingeführt.

1. Nach vorausgehenden Untersuchungen von JERIE [26] mit dem Analog-Rechner wurde die theoretische Lagegenauigkeit ausgeglichener Triangulationspunkte in Streifen- und Blockverbänden nach der Anblock-Methode von ACKERMANN in [2] und [3] abgeleitet. Als ein Ergebnis der Untersuchungen wurde die schwache Genauigkeit der Einzelstreifen bestätigt.

Für den Blockverband erkannte man dagegen überraschend günstige Genauigkeitseigenschaften: Bei dichtem Paßpunktrand erreicht man eine Absolutgenauigkeit für die ausgeglichenen Modellkoordinaten in der Größenordnung des Gewichtseinheitsfehlers. Paßpunkte im Blockinnern bringen keine wesentliche Genauigkeitssteigerung.

2. Untersuchungen von JERIE [27] und [28] beschäftigten sich mit der Höhegenauigkeit der Triangulationspunkte von Streifen- und Bildverbänden unter Verwendung verschiedener Ausgleichsmethoden wie dem ITC-Analogrechner und der Interpolationsmethode nach VERMEIR. Dabei wurden ebenfalls die günstigeren Genauigkeitseigenschaften des Blockverbandes gegenüber den Einzelstreifen bestätigt. Als notwendige Paßpunktverteilung erwiesen sich Paßpunktketten quer zur Streifenrichtung (bei Querüberdeckung $q = 20\%$), wobei zusätzliche Paßpunkte an den Blockrändern bei großen Paßpunktabständen zweckmäßig sind.

Weiterhin fand JERIE, daß die Anwendung von Hilfsdaten, wie APR-Messungen oder Stoskopangaben, vor allem bei großen Paßpunktintervallen, höchst vorteilhaft ist.

3. Die Ergebnisse dieser theoretischen Genauigkeitsuntersuchungen hatten große Wirkung auf die Praxis. Verschiedene Erkenntnisse wurden in die Praxis übernommen, wie z.B. die Randbesetzung mit Lagepaßpunkten. Gewisse Kontrollen durch empirische Ergebnisse bestätigen zwar allgemein die theoretischen Vorhersagen. Tatsächlich war jedoch ein wissenschaftlicher Beweis noch nicht erbracht. Aus dieser Situation ergab sich Ende der sechziger Jahre folgende Aufgabenstellung für empirische Genauigkeitsuntersuchungen in der Aerotriangulation:

- Durchführung einer umfassenden Überprüfung der theoretischen Genauigkeit im Hinblick auf die Parameter, die in die theoretische Genauigkeit eingehen
- Durchführung von Methodenvergleichen
- Nachweis der Absolutgenauigkeit der ausgeglichenen Koordinaten der Triangulationspunkte wie sie in einem Test realisiert werden kann
- und der Vergleich der empirischen Ergebnisse mit den theoretischen Genauigkeitsvorhersagen.

Für die Bearbeitung dieser Aufgaben sind zwei verschiedene Ansätze möglich. Ausgangspunkt für die erste Methode ist die Genauigkeit der Bildkoordinaten. Die Genauigkeit der Bildkoordinaten wird empirisch oder theoretisch abgeleitet. Die Genauigkeit der ausgeglichenen Triangulationspunkte ist dann durch Fehlerfortpflanzung (theoretisch oder durch Simulation) bestimmbar. Dies ist prinzipiell die richtige Methode. Allerdings bleibt die Schwierigkeit, die Korrelation der Bildfehler im Bild und zwischen den Bildern zu erfassen und in den Berechnungen zu berücksichtigen.

Die andere Methode sind empirische Untersuchungen mit Hilfe von Testfeldern. Damit können zwei Themenbereiche abgedeckt werden: Einmal die Bestimmung oder die Schätzung theoretisch nicht oder nur schwierig ableitbarer Größen und die Durchführung von Methodenvergleichen. Der zweite Bereich betrifft die Gegenüberstellung von empirischen Ergebnissen und theoretischen Genauigkeitserwartungen. Bei gewissenhafter Durchführung und allgemeingültiger Anlage des Tests erhält man einen guten Überblick über die erreichbare Genauigkeit, ohne die Bildfehler und deren Ursachen selbst kennen zu müssen. Rückschlüsse auf die Hypothesen stellen einen Bezug zur ersten Methode her. Der Nachteil dieser Methode ist darin zu sehen, daß mit großem Aufwand viel Datenmaterial bearbeitet werden muß, wenn die verschiedenartigen Abhängigkeiten erfaßt werden sollen.

4. Der OEEPE-Versuch Oberschwaben

Die verschiedenen Ergebnisse der empirischen Versuche vor 1970 vermittelten nur einen Eindruck über die Genauigkeit der Aerotriangulation. Insgesamt war Ende der sechziger Jahre jedoch der Erkenntnisstand der Genauigkeitsuntersuchungen wissenschaftlich nicht befriedigend. Vor allem fehlte eine empirische Überprüfung der bis dahin vorliegenden, vereinfachten Theorie auf ihren Geltungsbereich.

Vor diesem Hintergrund ist die Planung des Großversuchs Oberschwaben im Rahmen der OEEPE in den Jahren 1967/68 zu sehen.

4.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Aufgabenstellung für den Oberschwabentest war, die bis dahin auf der Hypothese rein zufälliger Fehler entwickelten theoretischen Genauigkeitsmodelle mit den empirischen Ergebnissen zu vergleichen und überhaupt den Leistungsstandard der numerischen Photogrammetrie festzustellen. Die komplexen Fragen sollten in zwei verschiedenen Ansätzen angegangen werden. In der Konzeption als Globaltest sollte die empirische Genauigkeit anhand statistischer Methoden mit den theoretischen Genauigkeitserwartungen verglichen und beurteilt werden. In den Untersuchungen sollten alle, die Genauigkeit beeinflussenden Parameter erfaßt werden. Zusätzlich sollten mit demselben Material Methodenvergleiche durchgeführt werden. Diese Arbeiten wurden als Programm I bezeichnet (ACKERMANN [4]).

Im Programm II wurde der Versuch unternommen, die empirische Genauigkeit der Bildkoordinaten zu erfassen (WISER [54], CAMPS [12], KUPFER [33]). Die Strategie zielte darauf ab, die Genauigkeit der Aerotriangulation dann durch Fehlerfortpflanzung abzuleiten.

Es war das Ziel des Oberschwabentests, einen umfassenden Einblick in die empirische Genauigkeit der Aerotriangulation zu bekommen und die theoretischen Genauigkeitserwartungen zu überprüfen. Die empirischen Ergebnisse hatten damals eine selbständige Bedeutung. Sie dienten zum Nachweis dafür, welche Genauigkeit unter praktischen Bedingungen erreichbar war.

4.2 Testfeld und Befliegung

Für die Durchführung der Untersuchungen wurde mit Unterstützung der OEEPE in 'Oberschwaben' ein Testfeld angelegt und befliegen (siehe dazu auch ACKERMANN [4] und BELZNER [10]). Die wichtigsten Angaben zum Testfeld und zum Datenmaterial sind im folgenden kurz zusammengestellt.

1. 'Oberschwaben' ist die geographische Bezeichnung für ein im Südosten von Baden-Württemberg gelegenes Gebiet, das sich in Nord-Süd Richtung von der Donau bis an den Bodensee erstreckt. Die östliche Grenze ist die Iller und die Landesgrenze von Baden-Württemberg. Gletscher und Moränen der verschiedenen Eiszeiten haben die Topographie Oberschwabens gestaltet. Die Oberflächenformen sind gerundet, jähle Neigungswechsel mit großen Höhenunterschieden findet man nicht. Im Mittel beträgt die Meereshöhe 650 m. Der Waldbestand ist im allgemeinen aufgelockert und nur an wenigen Stellen über größere Flächen zusammenhängend.

Das Testfeld hat eine Ausdehnung von 62.5 km in Nord-Süd Richtung und 40 km in Ost-West Richtung. Bei einem Bildmaßstab von $\approx 1:28\ 000$ und einer Längs- und Querüberdeckung von jeweils 61 % entspricht dies einem Block mit 15 Streifen zu je 25 Modellen. Als Paßpunkte und Vergleichspunkte standen rund 500 signalisierte Punkte des trigonometrischen Netzes 4. Ordnung zur Verfügung. Die Verknüpfungspunkte, in jedem Modell 6 Doppelpunkte in der Nähe der 'Gruberpunkte', waren ebenfalls signalisiert. Der Abstand der Verknüpfungspunkte in Längsrichtung und quer zur Flugachse betrug jeweils ungefähr 2.5 km. Auf Grund der regelmäßigen Signalisierung mußte gezielt befliegen werden.

2. Angaben über Entstehung und Genauigkeit des geodätischen Netzes 4. Ordnung in Oberschwaben, dessen Punkte als Paß- und Kontrollpunkte verwendet wurden, findet man in SCHILCHER [45], STROBEL [50], SCHENK [43].

Der Entstehungszeitraum der beim Versuch Oberschwaben verwendeten Koordinaten beginnt bei der Württembergischen Urtriangulation im Jahre 1818 und erstreckte sich bis zur Neubeobachtung und Neuberechnung im Jahre 1937. Dazwischen lag die Beobachtung von zwei weiteren geodätischen Netzen. Vom Jahr 1975 an wird Oberschwaben neu trianguliert.

Die alten Landesnetze, noch in Soldner Koordinaten berechnet, wurden über identische Punkte an das Netz 1. Ordnung (Reichsdreiecksnetz) angefeldert. Die Soldnerkoordinaten wurden nach Formeln von HALLER direkt in vorläufige Gauß-Krüger Koordinaten umgerechnet. Diese wurden dann durch maschenweise Affintransformation zu genähert endgültigen Gauß-Krüger Koordinaten verbessert.

SCHENK gibt für die Urtriangulation eine Genauigkeit von 20 - 30 cm an, für die Neutriangulation in Soldner Koordinaten 22 cm und für das Netz 1. Ordnung 5 cm. SCHILCHER hat Punkte 1. Ordnung mit vorläufigen Gauß-Krüger Koordinaten auf identische Punkte mit endgültigen Gauß-Krüger Koordinaten im Testgebiet Oberschwaben transformiert und einen mittleren Gewichtseinheitsfehler von $m_0 = \pm 15$ cm erhalten.

Durch die historische Entwicklung war kein organischer Netzaufbau und gemeinsame Berechnung der verschiedenen Netzteile möglich. Dadurch wurde die Ableitung der Genauigkeit des Netzes nach den Methoden der Ausgleichsrechnung erschwert

und offensichtlich auch nicht durchgeführt. Man ist deshalb auf Schätzungen angewiesen. Unter der Berücksichtigung der oben genannten Werte, kann im Bereich des Testgebietes die Annahme eines mittleren Koordinatenfehlers von ± 10 cm für die verwendeten Punkte des trigonometrischen Netzes in der Lage als realistisch gelten.

Angaben über die Genauigkeit der beim Versuch Oberschwaben verwendeten Höhen der trigonometrischen Punkte sucht man vergebens. Sicher ist nur, daß die Höhen trigonometrisch bestimmt worden sind. Die Höhen sind nur mit Dezimetergenauigkeit bekannt. Im folgenden wird von einer Genauigkeit der trigonometrischen Höhen von ± 15 cm ausgegangen.

3. Die an ein photogrammetrisches Testfeld gestellten Anforderungen hinsichtlich der Topographie vom Gebiet Oberschwaben werden weitgehend erfüllt. Die geodätischen Grundlagen sind jedoch, was die Genauigkeit der Punkte betrifft, nicht ganz zufriedenstellend. Aus diesem Grunde wurde mit 1:28 000 (ursprünglich geplant 1:30 000, auf 1:28 000 reduziert) bewußt ein kleiner Bildmaßstab gewählt. Man wollte vermeiden, daß die Genauigkeit der Aerotriangulation durch Fehler der Paßpunkte beeinträchtigt wird. Dies schien ursprünglich gewährleistet zu sein, zumal die Genauigkeit der terrestrischen Koordinaten von geodätischer Seite mit $m_0 = \pm 5$ cm angegeben wurde.

4. Das Testfeld wurde im wesentlichen an 5 Flugtagen befliegen (siehe Abb. 1.1 in Abschn. 4.3). Als Folge der schlechten Wetterbedingungen im Frühjahr 1969 erstreckte sich der Zeitraum der Bildflüge auf über 2 Monate. Dies brachte eine Verschlechterung des Zustandes der Signalisierung durch die Vegetation und die Zerstörung eines Teils der Signale mit sich.

Das Testfeld wurde in gezieltem Bildflug mit einer WW- und mit einer ÖWW-Kammer (Zeiss RMK 15/23 und RMK 8.5/23) befliegen. Dem Bildmaßstab von $\approx 1:28$ 000 entsprechen die relativen Flughöhen von $h = 4$ 280 m bei WW¹⁾ und $h = 2$ 380 m bei ÖWW²⁾.

4.3 Bearbeitung von Programm I

Nach dem Bildflug wurden die Filmrollen auf Glasdiapositive umkopiert. Die Messung der Diapositive erfolgte mit Stereokomparatoren. Dazu wurde das umfangreiche Material auf vier Auswertezentren aufgeteilt. Dies waren

- das Institut für Angewandte Geodäsie in Frankfurt
(8 WW-Streifen, Zeiss PSK)
- das Photogrammetrische Institut der Technischen Hochschule Wien
(7 WW-Streifen, Wild StK 1)
- der Fotogrammetrische Dienst van het Cadaster in Den Haag
(8 ÖWW-Streifen, Zeiss PSK)
- das International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (ITC) in Delft (7 ÖWW-Streifen, Wild StK 1).

1) Weitwinkel; 2) Oberweitwinkel

Abb. 1.1 OEEPE-Aerotriangulationstest Oberschwaben
Blockübersicht mit Angabe der Flugrichtungen

WW-Gesamtblock, $q = 60 \%$

ÖWW-Gesamtblock, $q = 60 \%$

Teilblöcke:

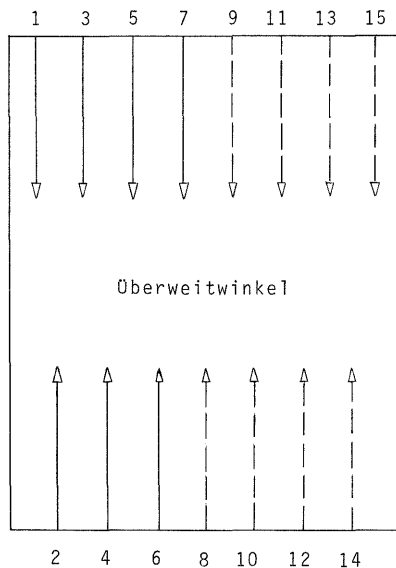
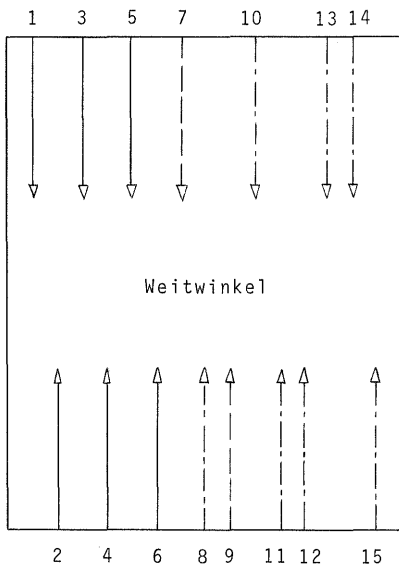
Teilblöcke:

Frankfurt Str. 1,3,5,7,9,11,13,15

Den Haag Str. 1,3,5,7,9,11,13,15

Wien Str. 2,4,6,8,10,12,14

Delft Str. 2,4,6,8,10,12,14



Flugtage

———— 8.4.1969 (6 Streifen)

———— 10.4.1969 (7 Streifen)

— — — — 9.4.1969 (2 Streifen)

— — — — 26.4.1969 (8 Streifen)

- - - - 12.5.1969 (7 Streifen)

Diese 4 Auswertestellen haben jeweils einen Teilblock mit $q = 20 \%$ gemessen. Als Bezeichnung der 4 Teilblöcke wurde der Name der Stadt gewählt, in der die Institute ihren Sitz hatten (z.B. Block 'Frankfurt'). Zusammengefügt ergeben die Teilblöcke Frankfurt und Wien den Gesamtblock WW ($q = 60 \%$) mit jeweils 61 Prozent Quer- und Längsüberdeckung. Die ÖWW-Teilblöcke 'Den Haag' und 'Delft' bilden den Gesamtblock ÖWW ($q = 60 \%$). Die Abbildung 1.1 gibt dazu eine Übersicht.

Die Messung an den Stereokomparatoren erfolgte modellweise. Dabei wurde in jedem Bild jeweils nur der stereoskopisch überdeckte Bildbereich ausgewertet. Der andere Bildteil wurde im nachfolgenden Modell gemessen. Für die Blockbildung nach der Bündelmethode mußten deshalb die in aufeinanderfolgenden Modellen ausgewerteten 'Halbbilder' zusammentransformiert werden.

Die analytische Modellbildung wurde an den oben genannten Instituten in Frankfurt und Wien ausgeführt. Entsprechend dem damals üblichen Standardverfahren wurden mit den 'a priori Korrekturen' die Einflüsse der rotations-symmetrischen Verzeichnung, der Erdkrümmung und der Refraktion auf die Bildkoordinaten eliminiert. Zur Rahmenmarkentransformation wurde eine Ähnlichkeitstransformation verwendet. Die Aufbereitung der Komparatoraten für die Bündelausgleichung erfolgte am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart. Dabei wurden an den Bildkoordinaten wiederum die entsprechenden Korrekturen angebracht.

Die Bereinigung der Daten und die Berechnung der Blockausgleichungen erfolgte ebenfalls in Stuttgart mit dem Programm PAT-M 43 für unabhängige Modelle und dem Bündelprogramm PAT-B ([14], [37]). Diese Rechenprogramme hatten zum damaligen Zeitpunkt noch keine zusätzlichen Parameter zur Erfassung von Bild- bzw. Modelldeformationen.

Das Arbeitsprogramm der Phase I war sehr umfangreich. Insgesamt wurden sechs Paßpunktversionen der Teil- und Gesamtblöcke berechnet. Außerdem wurden die Blöcke noch in Subblöcke unterteilt. Von den genannten sechs Paßpunktversionen sind die drei Versionen, die in dieser Arbeit wieder aufgegriffen wurden, von besonderem Interesse. Es sind dies:

- Version 0 alle bekannten Punkte werden als Paßpunkte eingeführt
- Version 1 Lage: dichter Rand (Paßpunkt-Abstand $i = 2 b$ Basiseinheiten)
 Höhe: Paßpunktketten in Abstand $i = 2 b$
- Version 5 Lage: 4 Eckpunkte
 Höhe: 3 Paßpunktketten im Abstand $i = 12.5 b$ und
 4 zusätzliche Randpunkte.

Folgende Gewichte wurden in die Blockausgleichung eingeführt:

Bild- und Modellpunkte	Gewicht	$p = 1$
Paßpunkte	"	$p = \infty$
Kontrollpunkte	"	$p = 0$
Projektionszentren	Lage	$p = 0.25$
	Höhe	$p = 1.0$

Die Genauigkeit der Aerotriangulation wird ausgedrückt durch die folgenden Parameter:

- Gewichtseinheitsfehler σ_0 quadratischer Mittelwert der Verbesserungen der Bild- bzw. Modellkoordinaten
- Absolutgenauigkeit μ_x, μ_y, μ_z quadratische Mittelwerte der Restfehler an den Vergleichspunkten

4.4 Ergebnisse der ersten Bearbeitungsphase

Über die ersten Ergebnisse vom Arbeitsprogramm I des Oberschwaben-Aerotriangulationstests berichteten ACKERMANN, EBNER und STARK anläßlich des Symposiums in Brüssel im Jahre 1973 [5], [16], [48]. STARK stellte die Ergebnisse von Streifenausgleichungen mit verschiedenen Ausgleichungsansätzen dar. Diese Ergebnisse sind im Zusammenhang mit dieser Arbeit nicht von Interesse. Auf die Ergebnisse von ACKERMANN, dessen Untersuchungsgegenstand die Genauigkeit der Aerotriangulation im Blockverband (Methode der unabhängigen Modelle) war, wird im folgenden näher eingegangen. Die Ergebnisse von EBNER folgen im Anschluß.

1. Die mittleren Gewichtseinheitsfehler der Lageausgleichung mit $\sigma_{oL} = 6.0-7.2 \mu\text{m}$ für WW und $\sigma_{oL} = 7.6 - 9.0 \mu\text{m}$ für ÜWW, bei $q = 20 \%$ Querüberdeckung, belegen zunächst die nach damaligen Begriffen hohe Genauigkeit der Auswertung des Bildmaterials. Bei einer Querüberdeckung von $q = 60 \%$ betragen die entsprechenden Werte für WW $\sigma_{oL} = 6.0 - 6.8 \mu\text{m}$ und für ÜWW $\sigma_{oL} = 7.6 - 8.5 \mu\text{m}$. Unabhängig von der Querüberdeckung beträgt der Unterschied in den Gewichtseinheitsfehlern etwa 30% zwischen WW und ÜWW. In der Höhenausgleichung, bei einer Querüberdeckung von $q = 20 \%$, beträgt der Gewichtseinheitsfehler für WW $\sigma_{oH} = 7.5 - 9.6 \mu\text{m}$. Die entsprechenden Werte für ÜWW liegen zwischen $\sigma_{oH} = 6.4 \mu\text{m}$ und $\sigma_{oH} = 8.7 \mu\text{m}$. Bei $q = 60 \%$ gilt entsprechend für WW $\sigma_{oH} = 9.5 - 8.8 \mu\text{m}$ und für ÜWW $\sigma_{oH} = 9.6 - 8.7 \mu\text{m}$. Allgemein ist eine deutliche Abhängigkeit der Gewichtseinheitsfehler von der Paßpunktbesetzung festzustellen. Mit abnehmender Paßpunktdichte werden die Gewichtseinheitsfehler kleiner.

Die Lagegenauigkeit ist aus der Sicht des Praktikers gut. Die Absolutgenauigkeit bei dichtem Paßpunktrand beträgt für die WW-Blöcke im Mittel $\mu_{x,y} = 11.9 \mu\text{m}$ und für die ÜWW-Blöcke $\mu_{x,y} = 14.7 \mu\text{m}$ im Bildmaßstab. Auffallend sind die unterschiedlichen Genauigkeiten für die x- und die y-Koordinate. Durch den Übergang von $q = 20 \%$ auf $q = 60 \%$ Querüberdeckung wird die Genauigkeit um den Faktor 1.2 (WW und ÜWW) gesteigert und man erreicht bei dichtem Paßpunktrand $\mu_{x,y} = 9.8 \mu\text{m}$ für WW und $\mu_{x,y} = 12.2 \mu\text{m}$ für ÜWW.

Die Höhengenauigkeit bei $q = 20 \%$ Querüberdeckung ist bei beiden WW-Blöcken mit $\mu_z = 13.8 \mu\text{m}$ und $\mu_z = 15.1 \mu\text{m}$ bei einem Paßpunktastand von 4 Basiseinheiten sehr gut. Diese Werte entsprechen 0.09 bzw. 0.10% der Flughöhe. Dagegen fallen die Werte der ÜWW-Blöcke mit $\mu_z = 16.1 \mu\text{m}$ und $\mu_z = 15.6 \mu\text{m}$, das entspricht 0.19 bzw. 0.18% der Flughöhe, deutlich ab. Die Erhöhung der Querüberdeckung von $q = 20 \%$ auf $q = 60 \%$ steigert die Genauigkeit um den Faktor 1.1. Sie ist gering, geringer noch als bei der Lage. In einigen Fällen tritt sogar eine Verschlechterung der Höhengengenauigkeit ein.

2. Der Vergleich der Ergebnisse der WW- und der ÜWW-Blöcke bestätigt die bisherige Annahme, daß die Lagegenauigkeit von WW besser ist als die von ÜWW. Das Verhältnis der Gewichtseinheitsfehler σ_{oL} , sowie der Absolutgenauigkeiten $\mu_{x,y}$, beträgt zwischen WW und ÜWW ungefähr $1 : 1.3$.

Überraschend sind die Werte der Höhengengenauigkeit. Der mittlere Gewichtseinheitsfehler ist zwar betragsmäßig bei ÜWW kleiner, in $\%$ der Flughöhe aber deutlich größer als bei WW. Auch die absolute Höhengengenauigkeit ist in Bezug auf die Flughöhe bei ÜWW deutlich schlechter. Das Verhältnis beträgt ungefähr $1 : 2.2$.

3. EBNER befaßte sich in [16] mit ersten Methodenvergleichen. Von den Ergebnissen ist hier die Genauigkeit der Bündelausgleichung und das Verhältnis der empirischen Genauigkeit der Blockausgleichungen nach der Bündelmethode und der Methode der unabhängigen Modelle von Interesse. Zu diesem Zeitpunkt lagen die Bündelerggebnisse nur für den Block Frankfurt vor. Die übrigen Blöcke wurden erst später berechnet. Die Ergebnisse der anderen Blockausgleichungen findet man in Kapitel IV.

Ergebnisse der Bündelausgleichungen des WW-Blockes Frankfurt: Der Gewichtseinheitsfehler (für Bildkoordinaten) beträgt $\sigma_o = 5.7 \mu\text{m}$ bei dichter Randbesetzung und verringert sich bei nur 4 Eckpunkten auf $\sigma_o = 4.0 \mu\text{m}$. Dem entsprechen die Absolutgenauigkeiten für die Paßpunktversion 1 (5) von $\mu_{x,y} = 15.4 (46.6) \mu\text{m}$ in der Lage und $\mu_z = 18.0 (22.0) \mu\text{m}$ in der Höhe. Der Vergleich mit den Modellergebnissen ergibt die überraschende Feststellung, daß die Bündelerggebnisse um den Faktor 1.22 (1.04) in der Lage und 1.4 (1.2) in der Höhe unterlegen sind.

Der Vergleich mit der Theorie (EBNER [17]) ergab unerwartet deutliche Widersprüche. Zwar wurde in einigen Punkten eine pauschale, qualitative Übereinstimmung erzielt;

- die Absolutgenauigkeit ist bei dichtem Rand nahezu unabhängig von der Blockgröße.
- die Höhengenaugigkeit ist unabhängig von der Blockgröße und entspricht der Theorie in Bezug auf die Änderung des Paßpunktabstandes.

doch stand die Mehrzahl der Ergebnisse in deutlichem Widerspruch zur Theorie:

- der Gewichtseinheitsfehler ist von der Paßpunktverteilung und der Querüberdeckung abhängig.
- das Verhältnis der Absolutgenauigkeit der ausgeglichenen Koordinaten zu den Gewichtseinheitsfehlern ist schlechter als theoretisch vorhergesagt.
- das Genauigkeitsverhältnis der Bündelmethode und der Methode der unabhängigen Modelle steht im völligen Widerspruch zur Theorie.
- die Genauigkeitssteigerung beim Übergang von 20 % auf 60 % Querüberdeckung ist deutlich geringer als die Theorie vorhersagt, teilweise tritt sogar in der Höhe ein Genauigkeitsverlust ein.
- die Ergebnisse mit einem Höhenpaßpunkttraster bei 60 % Querüberdeckung sind deutlich schlechter als mit Paßpunktketten gleichen Abstandes.
- die Genauigkeit der X- und der Y-Koordinate unterscheidet sich zum Teil erheblich.
- bei Auflockerung der Paßpunktdichte nimmt die Genauigkeit sprunghaft ab.
- bei gleichbleibender Paßpunktanzahl und zunehmender Blockgröße nimmt die Genauigkeit überproportional ab.

Für den Vergleich mit der Theorie wurden keine statistischen Tests durchgeführt, doch war aufgrund der Ergebnisse die Ablehnung der Nullhypothese deutlich.

5. Aufgabenstellung für erweiterte Untersuchung

5.1 Beurteilung der bisherigen Ergebnisse der Blockausgleichungen (Phase I)

Aus der damaligen Sicht des Praktikers waren die empirischen Ergebnisse als gut und die Erwartungen übertreffend zu bezeichnen. Wenn auch in vielen Punkten die theoretischen Genauigkeitserwartungen nicht erfüllt werden konnten, so sind doch zwei Feststellungen von großer praktischer Bedeutung gewesen. Bei dichtem Rand erwies sich die Absolutgenauigkeit der Lage mit ungefähr $12 \mu\text{m}$ als unerwartet hoch und nahezu unabhängig von der Blockgröße. Ebenso bestätigte sich, daß die Höhengenaugigkeit unabhängig von der Blockgröße ist und nur eine Funktion des Paßpunktabstandes darstellt, mit unerwartet günstigem Absolutbetrag.

Andererseits war in vielen Punkten eine Diskrepanz zwischen den empirischen Ergebnissen und den theoretischen Erwartungen festzustellen. Aus dem empirischen Befund aus [5] und [16] war eindeutig die Schlußfolgerung zu ziehen, daß das konventionelle mathematische Fehlermodell der Aerotriangulation nicht als realistisch gelten kann. In der Genauigkeitstheorie sind gleich genaue und unkorrelierte Bild- und Modellkoordinaten angenommen worden. 'Grobe' und 'systematische' Fehler der Beobachtungen waren nicht Gegenstand der Theorie. Offensichtlich sind die Voraussetzungen im Oberschwabenmaterial nicht erfüllt, so daß nicht kompensierte systematische Fehler, nicht eliminierte grobe Fehler und möglicherweise auch nicht beachtete Korrelationen sich auf die empirischen Ergebnisse auswirkten.

Zu diesem Ergebnis kamen auch BAUER, CAMPS, KUPFER und WISER [8], [12], [33], [54]. Diese Untersuchungen, im Rahmen von Programm II, beschäftigten sich hauptsächlich mit dem Problem der systematischen Bildfehler im Oberschwabenmaterial.

5.2 Weiterentwicklung der Methoden und erste Ergebnisse

1. Die vorläufige Schlußfolgerung aus den Ergebnissen ergibt, daß systematische und möglicherweise auch grobe Fehler wirksam sind. Dies deckt sich mit Vorstellungen und Entwicklungen, die parallel und davon unabhängig aufgekommen sind. Bevor hier ein Arbeitsprogramm aufgestellt wird, erfolgt daher eine kurze Bestandsaufnahme anderer Untersuchungen, der dabei angewandten Methoden und der dabei gewonnenen Erfahrungen.

HALLERT hat durch seine Arbeiten schon in den sechziger Jahren die Testfeldkalibrierung in die Aerotriangulation eingeführt [24]. Neuerdings arbeitet vor allem KUPFER erfolgreich mit der Methode der Testfeldkalibrierung unter dem Aspekt der Vorabkorrektur systematischer Fehler [34]. Bezüglich einer Beschreibung dieses Verfahrens wird auf Kapitel II.3 verwiesen.

Eine neue Methode zur Erfassung und zur Korrektur der systematischen Bild- und Modellfehler ist die Selbstkalibrierung (EBNER [18]). Bei der Selbstkalibrierung geht man davon aus, daß die mit dem konventionellen mathematischen Modell nicht erfaßbaren systematischen Fehler als systematische Bild- und Modelldeformationen darstellbar sind.

Die Bild- und Modelldeformationen werden durch zusätzliche Parameter in den Fehlergleichungen beschrieben. Die Zahlenwerte der Parameter werden in der Blockausgleichung simultan bestimmt.

2. Sowohl für die Testfeldkalibrierung als auch für die Selbstkalibrierung liegen inzwischen empirische Ergebnisse vor, die die Leistungsfähigkeit dieser Verfahren zur Kompensation systematischer Fehler demonstrieren. KUPFER leitet die Aussagen zur Geometrie der Luftbilder durch Auswertung von Testfeldbefliegungen mit Hilfe von Rückwärtsschnitten, Doppelpunkteinschaltungen und der Bündelausgleichung ab [33], [34]. Das Kalibrierungsergebnis sind Regressionspolynome, mit denen die Abweichung von der Zentralperspektive beschrieben wird.

BROWN sieht in der Selbstkalibrierung eine der Möglichkeiten, das bisherige System der Aerotriangulation auszubauen [11]. Die Wirksamkeit der Selbstkalibrierung konnte nachgewiesen werden. Im Gegensatz zur Testfeldkalibrierung benötigt man hier kein Testfeld.

BAUER berichtet in [8], [9] über empirische Ergebnisse der Selbstkalibrierung nach der Bündelmethode. Er konnte mit verschiedenartigen Parametergruppen teilweise eine erhebliche Genauigkeitssteigerung gegenüber der herkömmlichen Aerotriangulation erzielen. Eine Abklärung über die Wirksamkeit der Parameter ist bis jetzt noch nicht erfolgt. In diesem Sinne sind auch die Ergebnisse von SALMENPERÄ, ANDERSON und SAVOLAINEN zu interpretieren [42].

5.3 Aufgabenstellung für die zweite Bearbeitungsphase des Oberschwabentests

Aufgrund der Ergebnisse der Untersuchungen von Programm I und II des Oberschwabenmaterials wird die Hypothese aufgestellt, daß im Bildmaterial 'systematische Fehler' vorhanden sind. Diese können durch das konventionelle mathematische Fehlermodell der Aerotriangulation nicht erfaßt werden und wirken sich daher auf die Genauigkeit der Aerotriangulation aus.

Aufgabe dieser Arbeit wird es nun sein, die systematischen Fehler zu erfassen und zu korrigieren. Die Methoden, die nachstehend beschrieben werden, sind aus der Literatur bekannt und wurden teilweise schon in empirischen Untersuchungen angewendet. Eine Abklärung der Leistungsfähigkeit dieser Verfahren ist noch nicht erfolgt und soll in dieser Arbeit unternommen werden. Insbesondere soll aber das Wissen über die Eigenschaften, die Größe und die Bestimmbarkeit der systematischen Fehler erweitert werden.

Die andere Aufgabe besteht darin, das Genauigkeitspotential der Aerotriangulation nach der Korrektur der systematischen Fehler anhand empirischer Ergebnisse darzustellen und Methodenvergleiche durchzuführen. Insbesondere soll der Grad der Übereinstimmung von empirischer und theoretischer Genauigkeit festgestellt werden.

Das Aufsuchen grober Fehler, neben der üblichen Bereinigung der Daten, und die Verfeinerung des stochastischen Modells durch die Berücksichtigung von Korrelationen, sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

5.4 Arbeitsplan

Die Korrektur der systematischen Fehler wird mit drei verschiedenen Methoden durchgeführt.

Zuerst wird die Leistungsfähigkeit der a priori Korrekturen untersucht. In der ersten Bearbeitungsphase sind die üblichen a priori Korrekturen wegen Refraktion, Erdkrümmung, Verzeichnung und Filmdeformation angebracht worden. Den Korrekturansätzen lagen vereinfachende Annahmen zugrunde. In der Arbeit werden die Möglichkeiten der a priori Korrekturen diskutiert und die vorhandenen Informationen durch verfeinerte Korrekturansätze soweit als möglich ausgeschöpft. Es soll aufgezeigt werden, ob dadurch die Genauigkeit der Aerotriangulation signifikant verbessert werden kann.

Als zweites Verfahren zur Korrektur der systematischen Fehler wird die Testfeldkalibrierung geprüft. Im Zusammenhang mit dem Oberschwabenbildflug wurde das Testfeld 'Rheidt' befliegen und ausgewertet. Mit den daraus abgeleiteten Regressionspolynomen werden die Bild- und Modellkoordinaten des Oberschwabenmaterials verbessert und Blockausgleichungen berechnet. Anhand dieser Ergebnisse wird die Leistungsfähigkeit der Testfeldkalibrierung zur Korrektur systematischer Fehler beurteilt.

Davon unabhängig wird für die Oberschwabenblöcke der Einfluß der Definition der Landeskoordinaten auf die ausgeglichenen Koordinaten der Triangulationspunkte untersucht. Es wird sich zeigen, daß der Einfluß vernachlässigbar gering ist.

Der wichtigste Gegenstand der Arbeit ist die Analyse und Korrektur der systematischen Fehler mit Hilfe der Selbstkalibrierung. Dazu wird ein modifiziertes Verfahren nach de MASSON d'AUTUME [35] angewandt.

Die systematischen Fehler, das sind die systematischen Bild- und Modelldeformationen, werden bestimmt und ihre Eigenschaften werden beschrieben und analysiert. Von Bedeutung sind Typ und Betrag der Deformationen, sowie deren Abhängigkeiten von den Projektparametern, wie Aufnahmekammer, atmosphärische Einflüsse und Auswertesysteme. Außerdem wird die Frage der Bestimmbarkeit der systematischen Fehler diskutiert. Die ermittelten Bild- und Modelldeformationen werden anschließend mit Bild- und Modelldeformationen verglichen, die in anderen Untersuchungen bestimmt worden sind.

Die systematischen Bild- und Modelldeformationen werden korrigiert und die Blockausgleichungen nach der Bündelmethode und der Methode der unabhängigen Modelle neu berechnet. Die Ergebnisse der Blockausgleichungen mit und ohne Korrektur systematischer Fehler werden einander gegenübergestellt und beurteilt. Die Bündel- und Modellergebnisse werden miteinander verglichen, ebenso wie die Ergebnisse der WW-Blöcke mit denen der ÜWW-Blöcke.

Für den Vergleich von empirischer und theoretischer Genauigkeit wird die theoretische Genauigkeit anhand einer Simulation zufälliger Fehler abgeleitet. Mit Hilfe dieser Ergebnisse wird der Vergleich der empirischen und theoretischen Genauigkeit durchgeführt und die empirische Genauigkeit der Aerotriangulation beurteilt.

In einer abschließenden Zusammenfassung werden die verschiedenen Methoden zur Korrektur systematischer Fehler einander gegenübergestellt. Es wird versucht, aus der Gesamtheit der Ergebnisse ein Resümee zu ziehen und Hinweise zu geben, in welche Richtung die Weiterentwicklung des mathematischen Modells der Aero-triangulation erfolgen sollte.

II. UNTERSUCHUNG ÜBER DIE WIRKSAMKEIT VON VERFEINERTEN A PRIORI KORREKTUREN UND VON TESTFELDKALIBRIERUNGEN

1. Übliche a priori Korrekturen und ihre Beurteilung

1.1 Grundsätzliches

Unter den a priori Korrekturen versteht man Verfahren zur Korrektur von systematischen Bildfehlern, die bekannt sind, d.h. mit Hilfe von Modellen ableitbar oder aus Laborkalibrierung und Messung im Bild bestimmt sind. Dabei sind die systematischen Fehler als Abweichungen vom Funktionalmodell der Photogrammetrie aufzufassen, deren Ursache a priori bekannt und deren Auswirkung im Bild oder Modell ableitbar ist. Diese Korrekturverfahren stellen eine notwendige Ergänzung zum Funktionalmodell der perspektiven Abbildung dar.

Die Anwendung der a priori Korrekturen in der Photogrammetrie ist schon seit langem üblich. Ursprünglich wurden diese bei der Messung am Stereoauswertegerät mit Hilfe mechanischer und optischer Vorrichtungen berücksichtigt. Allerdings sind die Möglichkeiten analoger Korrekturen am Stereoauswertegerät aus Gründen der Durchführbarkeit beschränkt, so daß man sich auf vereinfachte Korrekturen der Verzeichnung, der Erdkrümmung und der Maßstabsänderung beschränkte. Weitergehende Möglichkeiten zur Anbringung der a priori Korrekturen ergeben sich bei der analytischen Photogrammetrie durch numerische Verfahren. Die numerische Behandlung der a priori Korrekturen erlaubt einen umfassenderen und detaillierteren Korrekturansatz als die gerätetechnischen Lösungen. Damit kann das Potential der a priori Korrekturen theoretisch voll ausgeschöpft werden.

Das Ziel ist es, durch die Korrekturen die Gültigkeit des Funktionalmodells der Photogrammetrie, die perspektive Abbildung, wieder herzustellen. Dieser Anspruch wird praktisch eingeschränkt auf die bestimmbar systematischen Fehler, von denen man bisher angenommen hat, sie seien dominierend. Von einer vollständigen Erfassung aller systematischen Fehler kann daher nicht gesprochen werden. Der zweite Punkt der Kritik betrifft die den a priori Korrekturen zugrunde liegenden einfachen Modelle, die für eine allgemein gültige Beschreibung der Modellfehler unzureichend sind.

1.2 Die üblichen a priori Korrekturen

Vorherrschende Gesichtspunkte bei der Ableitung der a priori Korrekturen sind die Bestimmbarkeit der systematischen Fehler mit einfachen Mitteln und eine unkomplizierte Handhabung der Korrekturverfahren. Dazu gehört die Beschränkung auf die Erfassung weniger Fehler, die als besonders wirksam angesehen werden.

Die durch die üblichen a priori Korrekturen erfaßbaren systematischen Fehler können gemäß ihrer Begründung in 4 Gruppen unterteilt werden:

- durch Laborkalibrierung feststellbare Fehler der Meßkammer
- Objektivverzeichnung

- aus physikalischen Bedingungen ableitbare Fehler
 - Refraktion
- aus Messungen im Bild bestimmbare Modellfehler
 - Filmschrumpfung
- aus mathematischen Beziehungen ableitbare Fehler
 - Erdkrümmung

1.2.1 Korrektur der Objektivverzeichnung

Laut DIN 18 716 [13] ist die optische Verzeichnung allein durch die Eigenschaften der Kammer bestimmt. Die Gesamtheit aller Abweichungen vom idealen Abbildungsgesetz, die durch Objektiv, Filter, Verschuß, Kammerkonstruktion, Andruckplatte und Emulsionsträger verursacht werden, bezeichnet man als Verbildung, die begrifflich klar von der Verzeichnung zu unterscheiden ist. Die Verzeichnung ist also nur eine der möglichen 'Fehlerkomponenten' der Kammer. In der Regel wird die Verzeichnung einer Luftbildkammer durch eine Laborkalibrierung optisch oder photographisch ermittelt. Für eine Bewertung der üblichen Laborkalibrierung sind verschiedene Einschränkungen zu beachten:

- die radiale Verzeichnung wird nur an vier Halbdiaagonalen gemessen, wodurch lokale Unsymmetrien nicht erfaßt werden können
- die tangentielle Verzeichnung wird nicht bestimmt
- die Verzeichnung ist auf den Symmetriepunkt und nicht auf den Hauptpunkt bezogen
- bei der optischen Laborkalibrierung wird nur mit gelbem Licht gearbeitet
- die physikalischen Bedingungen im Labor weichen von den tatsächlichen Bedingungen während des Bildfluges ab.

Offen bleibt die Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse der Laborkalibrierung und nach der Konstanz der Verzeichnung. Es ist nicht Aufgabe dieser Arbeit, die Leistungsfähigkeit der Laborkalibrierung zu überprüfen. Vielmehr soll deutlich gemacht werden, daß die Ergebnisse der Laborkalibrierung nur unter bestimmten Voraussetzungen gelten und daß im allgemeinen noch zusätzliche Fehler wirksam sind.

Neben der Frage der bestmöglichen Erfassung der Verzeichnung stellt sich die Frage nach der bestmöglichen Korrektur. Diese Fragestellung wurde in den letzten Jahren sehr intensiv diskutiert (SCHWIDEFSKY und KELLNER [47], SCHENK [44], KRAUS und STARK [30]) und wird in dieser Arbeit nicht nochmals behandelt.

Hier soll nur darauf abgehoben werden, daß bei der Korrektur der Verzeichnung die vollständige Nutzung der Information der Laborkalibrierung anzustreben ist. Dies ist üblicherweise nicht der Fall und auch in der ersten Bearbeitungsphase des Oberschwabenmaterials nicht geschehen. Bei der Datenaufbereitung wurde die übliche rotationssymmetrische Verzeichnungskorrektur mit linearer Interpolation in Abhängigkeit vom Radius angewandt. Dies ist ein sehr grobes Korrekturverfahren. Ob dadurch die Genauigkeit der Aerotriangulation beeinträchtigt wird, wird in Kapitel 2.1 geprüft.

1.2.2 Korrektur des Filmverzugs

Die Filmdeformation oder der Filmverzug ist definiert als die geometrische Änderung des Bildträgers im Zeitraum zwischen Belichtung des Negativ-Films und Auswertung des Diapositiv-Bildes.

Allgemein wird die bestmögliche Erfassung der Filmdeformation, vor allem der nichtlinearen und feinstrukturierten, von der Auswertung von Reseauaufnahmen erwartet. Bei den Reseauaufnahmen werden rasterförmig angeordnete, auf einer Glasplatte eingravierte Strichkreuze mitbelichtet, die bei der Auswertung koordinatenmäßig erfaßt und mit den Sollwerten verglichen werden. Der Beweis, daß durch die Korrektur der Filmdeformation mittels Reseauauswertung eine signifikante Verbesserung der Genauigkeit der Aerotriangulation ermöglicht wird, konnte bislang mit empirischen Ergebnissen nicht wirklich erbracht werden. In diesem Sinn sind auch die Ergebnisse der Untersuchungen von Programm II des Oberschwabentests zu interpretieren (VISSER, LEBERL, KURE [53]).

Ohne Reseau, wie im vorliegenden Fall, ist eine Analyse nur von Deformationen möglich, die durch Messung der Rahmenmarken im Bild und Vergleich mit den kalibrierten Werten erfaßbar sind. Die Bestimmbarkeit ist von der Anordnung der Rahmenmarken sowie der Art und der Genauigkeit der Rahmenmarkenkalibrierung abhängig. Durch die Wahl einer geeigneten Transformation vom Komparatorsystem ins Bildsystem (im folgenden kurz als Rahmenmarkentransformation bezeichnet) kann so ein Teil der Filmdeformation korrigiert werden. Als Rahmenmarkentransformation kommen in erster Linie die Ähnlichkeitstransformation und die Affintransformation zur Anwendung, deren Eigenschaften unterschiedlich sind (bzgl. weiterer Transformationen siehe KUPFER [36]). Während bei der Ähnlichkeitstransformation die Geometrie des Punkthaufens nicht geändert, sondern nur einer Verschiebung, Drehung und Maßstabsänderung unterworfen wird, ermöglicht die Affintransformation die Erfassung einer Affinität. Im allgemeinen Fall setzt sich die Affinität aus einer Maßstabsaffinität (unterschiedliche Maßstabsfaktoren der verschiedenen Koordinatenrichtungen) und einer Winkelaffinität (Scherung) zusammen. Die allgemeinere Transformation ist also die Affintransformation.

Die bisherigen Erfahrungen sind zu unterschiedlich, als daß man generell eine bestimmte Transformation empfehlen könnte (KUPFER [33], [34]). Zwar kann man in der Regel eine Maßstabsaffinität von ungefähr 0.1 ‰ nachweisen (STARK [49], ZIEMANN [55]), doch hängt die Wirksamkeit der Korrektur davon ab, ob die mit den Rahmenmarken ermittelte Filmdeformation für das entsprechende Bild tatsächlich repräsentativ ist. So wurde zum Beispiel bei der Pilot-Studie Appenweier (ACKERMANN [6]) der Versuch, als Rahmenmarkentransformation eine Affintransformation anzuwenden, abgebrochen, nachdem sich die Genauigkeit der Aerotriangulation verschlechtert hat, weil offensichtlich eine Affinität erst hineingerechnet wurde. Dieser Fall kann durchaus eintreten, da bisher in der Regel nur die Rahmenmarkenabstände kalibriert werden und die Genauigkeit der Kalibrierung nur 20 µm beträgt.

In der ersten Bearbeitungsphase von Programm I wurde für die Rahmenmarkentransformation eine Helmertstransformation angewandt. Eine Reseaukorrektur konnte nicht erfolgen, da Reseaulinien nur im Rahmen des Programms II eingesetzt wurden. In der zweiten Bearbeitungsphase wird als Rahmenmarkentransformation eine Affintransformation angewandt und das Ergebnis mit dem der Bearbeitungsphase I verglichen.

1.2.3 Refraktionskorrektur

Die Auswirkung der Refraktion auf die Geometrie der Strahlenbündel wird mit Hilfe von Refraktionsmodellen abgeleitet, denen eine Standardatmosphäre zugrunde liegt. Mangels genauerer Informationen wird die Standardatmosphäre für den praktischen Bildflug als repräsentativ angenommen. Ausreichende Parameter zur Berechnung der üblichen Refraktionskorrektur sind die absolute Flughöhe und die Geländehöhe. Andererseits ist die Refraktion ursprünglich von Änderungen der Lufttemperatur, des Luftdrucks und der Feuchtigkeit der Luft abhängig. Diese Parameter werden in der Regel nicht erfaßt. Folglich kann weder eine Abweichung der Ist-Atmosphäre von der Standardatmosphäre über den gesamten Bildflug, noch können kleinflächige Refraktionsanomalien, aufgrund der Gestalt, des Bewuchses und der Bebauung der Erdoberfläche, Sonneneinstrahlung etc., berücksichtigt werden. Dazu kommen noch die Fehler aufgrund der Verwirbelung objektivnaher Luftschichten durch die Bewegung und die Abgase des Flugzeugs (KUPFER [34]). Insgesamt muß mit Fehlern gerechnet werden, die bis zu 10 - 20 % der Refraktionskorrektur betragen.

Diese pauschalen Aussagen zur Refraktionskorrektur können mit den im Oberschwabentest vorhandenen Daten nicht weiter präzisiert werden. Über die Größe und die Art der Fehler aus der Refraktionskorrektur, ob systematisch oder zufällig, können keine näheren Angaben gemacht werden.

Wie die Ausführungen gezeigt haben, ist das der Refraktionskorrektur zugrunde liegende Modell nur sehr grob. Davon unabhängig wurde bei Phase I der Oberschwabenauswertung, wie üblich, die Refraktion im Bild radialsymmetrisch zum Bildhauptpunkt (zur Aufnahmeachse) korrigiert; d.h., die Bildneigung wurde nicht berücksichtigt. Welche Auswirkungen diese Vernachlässigungen auf die Genauigkeit des Einzelmodells haben, wird in Kapitel 2.3 untersucht.

1.2.4 Erdkrümmungskorrektur

Die Erdkrümmungskorrektur stellt eine Ersatzmaßnahme dar, die die Transformation der photogrammetrischen Daten auf die abgebildeten und verebneten Paßpunktkoordinaten ermöglichen soll. Dazu ist im allgemeinen Fall eine geodätische Abbildung der photogrammetrischen Daten notwendig. Üblicherweise werden nur die Höhen korrigiert und man vertraut, was die Lagekoordinaten betrifft, auf die Interpolationseigenschaft der Aerotriangulation.

Die rechnerische Korrektur der Bildkoordinaten wegen Erdkrümmung entspricht dem Unterschied zwischen einer perspektiven azimutalen Abbildung und einer orthographischen Projektion der Erdoberfläche (siehe Abb. 2.1). Bei der Ausgleichung nach der Methode der unabhängigen Modelle kann die Erdkrümmung auch im genähert absolut orientierten Einzelmodell korrigiert werden.

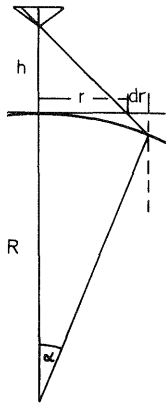


Abb. 2.1 Erdkrümmungskorrektur dr im Bild bzw. in der Tangentialebene

Die Korrektur wegen Erdkrümmung wurde sowohl für die Modellblöcke (bei der relativen Orientierung) als auch bei den Bündelblöcken (bei der Transformation der Punkte ins Bildsystem) an den Bildkoordinaten radialsymmetrisch angebracht. FINSTERWALDER hat in [20] die Zulässigkeit dieser Verfahrensweise für das Einzelmodell nachgewiesen, aber auch gleichzeitig darauf hingewiesen, daß für eine strenge Korrektur die Bildneigung und die Geländehöhenunterschiede der Bildpunkte berücksichtigt werden müssen. Der Einfluß der Bildneigung auf die Korrektur der Erdkrümmung wird zusammen mit der Refraktionskorrektur in Abschnitt 2.3 behandelt.

Weitere Korrekturen als die üblichen a priori Korrekturen wegen Verzeichnung, Filmverzug, Refraktion und Erdkrümmung werden nicht angebracht.

1.3 Kritik an den üblichen a priori Korrekturen und Möglichkeiten ihrer Verfeinerung

1. Die Diskussion der verschiedenen a priori Korrekturen hat ergeben, daß deren Modellvorstellungen gegenüber den physikalischen Gegebenheiten stark vereinfacht und nur unter speziellen Bedingungen streng gültig sind. Der Grund für die weitgehende Abstraktion der physikalischen Vorgänge ist das Prinzip der Einfachheit der a priori Korrekturen und vor allem die unvollständige Information. Dies bedeutet, daß man nicht vor und nach jedem Bildflug die Rahmenmarken zu kalibrieren pflegt und daß man keine zusätzlichen Messungen zur Bestimmung des Refraktionskoeffizienten unternimmt. Das Problem der vollständigeren Datenerfassung steht hier nicht zur Diskussion. Vielmehr soll dargestellt

werden, daß mit dem Prinzip der Einfachheit der a priori Korrekturen Modellfehler oder systematische Fehler in Kauf genommen werden müssen.

2. Die für die a priori Korrekturen notwendige Information ist also nur unvollständig vorhanden. Doch selbst die vorliegende Information, die nur beschränkten Wert hat, wird unvollständig ausgeschöpft bzw. falsch angebracht. Damit sind die Korrekturverfahren angesprochen. Die Algorithmen zur Korrektur müssen geprüft und wenn notwendig in der Weise verfeinert werden, daß eine vollständige Nutzung der Information gewährleistet ist.

3. Bei der Auswertung der Oberschwabenblöcke sind nur einfache Standardkalibrierungen und Korrekturen verwendet worden. Was die Untersuchung der a priori Korrekturen betrifft, so besteht die Aufgabe dieser Arbeit darin, die Wirksamkeit der Verfeinerung der a priori Korrekturen im Sinne einer vollständigen Auswertung der vorhandenen Informationen zu prüfen. Es ist nicht möglich zusätzliche Informationen im nachhinein noch zu erfassen. Deshalb beschränkt sich die Untersuchung darauf, festzustellen, inwieweit die Ergebnisse von Phase 1 durch eine Verfeinerung der a priori Korrekturen betroffen sind und geändert werden.

2. Untersuchung der Wirksamkeit verfeinerter a priori Korrekturen

Entsprechend Abschnitt 1.3 beschränkt sich die Untersuchung der a priori Korrekturen nur auf verfeinerte Korrekturansätze. Wir gehen also von der üblichen, vorhandenen Information aus. Die allgemeine Kritik an der Unvollständigkeit der Information bleibt unberücksichtigt. Die verschiedenen Korrekturen werden einzeln und unabhängig behandelt.

2.1 Korrektur der Objektivverzeichnung

Für die Korrektur der Objektivverzeichnung beim Oberschwabenmaterial stehen Verzeichnungswerte aus Laborkalibrierungen vor und nach dem Bildflug zur Verfügung. Diese sind auf den Autokollimationspunkt bezogen (heute wird die Verzeichnung in der Regel auf den Symmetriepunkt bezogen). In der ersten Bearbeitungsphase wurde die Verzeichnung radialsymmetrisch mit den über die vier Halbdiaagonalen und die beiden Kalibrierungen gemittelten Werten korrigiert. Mit diesem Ansatz kann eine mögliche Unsymmetrie der Verzeichnung, die durch Messung in vier Halbdiaagonalen bestimmbar ist, nicht erfaßt werden. Die Symmetrie der Objektivverzeichnung, bezogen auf den Symmetriepunkt, wird in Abbildung 2.2 demonstriert.

In der Abbildung 2.2 sind die Mittelwerte (der Halbdiaagonalen) der Verzeichnung aus beiden Kalibrierungen für die vier Halbdiaagonalen dargestellt. Für die beiden Kammern ergibt sich ein ganz unterschiedliches Bild. Bei der WW-Kammer ist der Verlauf der Halbdiaagonalen nur gering voneinander verschieden, d.h. die Verzeichnung ist in guter Näherung rotationssymmetrisch. Auch die 'Differenzen', die aus dem Vergleich der Halbdiaagonalen mit dem Mittelwert berechnet wurden und für die WW-Kammer Werte zwischen $0.5 \mu\text{m}$ und $1.5 \mu\text{m}$ (im Mittel $1.0 \mu\text{m}$) annehmen, sind klein. Die maximalen Unterschiede der Halbdiaagonalen, die für

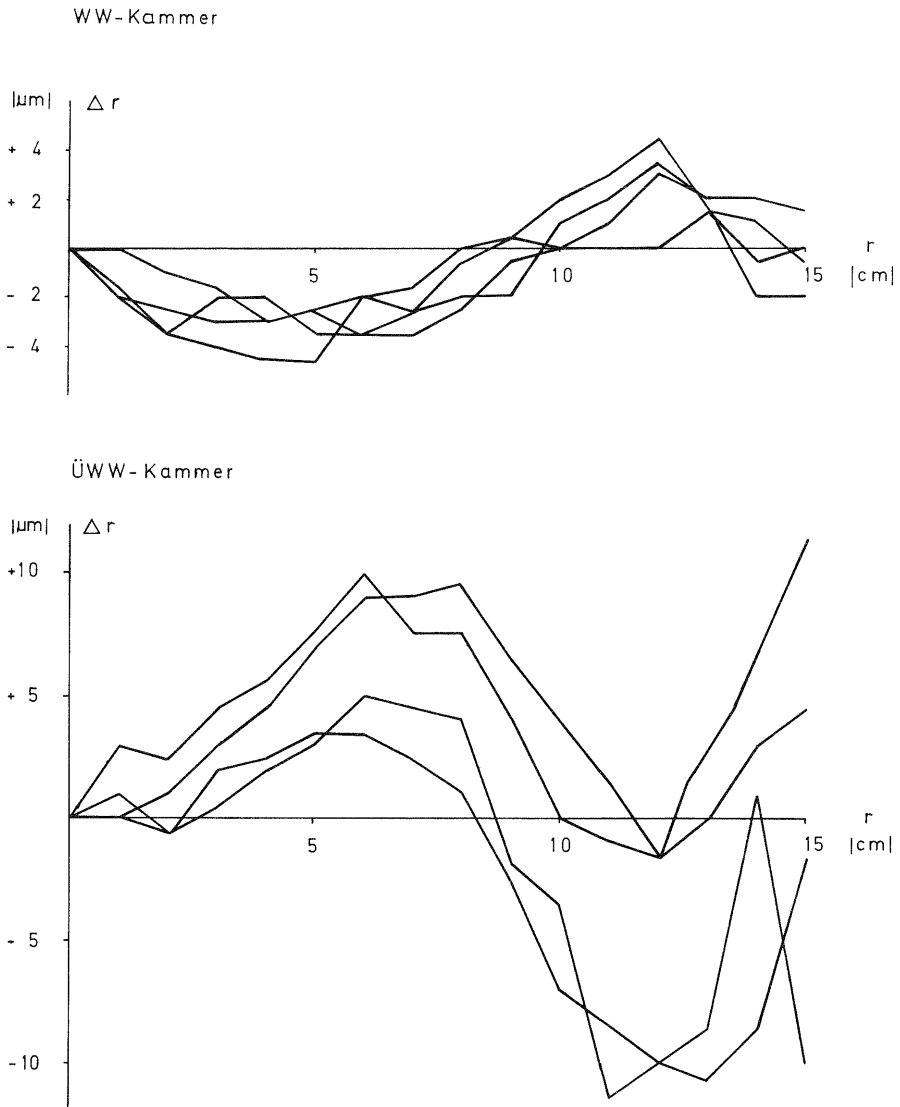


Abb. 2.2 Verzeichnung der WW- und der ÜWW-Kammer: Darstellung der Halbdiagonalen
- Mittel aus beiden Laborkalibrierungen

jeden Radius als größter Unterschied der Halbdagonalen herausgesucht werden, betragen für die WW-Kammer bis Radius $r = 100 \text{ mm}$ durchschnittlich $2.5 \text{ } \mu\text{m}$ und bei größerem Radius $4.0 \text{ } \mu\text{m}$. Insgesamt ist die Verzeichnung der WW-Kammer nur in geringem Umfang unsymmetrisch.

Anders stellt sich die Verzeichnung der ÖWW-Kammer dar. Wie aus Abbildung 2.2 ersichtlich, ist der Verlauf der Halbdagonalen bei der ÖWW-Kammer signifikant unterschiedlich. Dies wird auch in den oben angesprochenen 'Differenzen' (Differenz Halbdigonale - Mittelwert) deutlich, die mit größer werdendem Radius stetig anwachsen, und für den Radius $r = 10 \text{ mm}$ $0.5 \text{ } \mu\text{m}$, für den Radius $r = 100 \text{ mm}$ $3.5 \text{ } \mu\text{m}$ und für den Radius $r = 150 \text{ mm}$ $8.0 \text{ } \mu\text{m}$ betragen (im Mittel $3.5 \text{ } \mu\text{m}$). Die entsprechenden maximalen Unterschiede betragen $3.0 \text{ } \mu\text{m}$, $11.0 \text{ } \mu\text{m}$ und $19.5 \text{ } \mu\text{m}$. Die Verzeichnung der ÖWW-Kammer ist also in starkem Maße unsymmetrisch und kann durch einen radialsymmetrischen Ansatz der Verzeichnungskorrektur nicht hinreichend genau erfaßt werden.

2.1.1 Vergleich von radialsymmetrischer und flächenhafter Verzeichnungskorrektur

Wie oben festgestellt wurde, ist die Verzeichnung der ÖWW-Kammer nicht rotationssymmetrisch. Die Abweichungen von der Symmetrie konnten durch die in der Phase 1 des Oberschwabentests angewandte Verzeichnungskorrektur nicht erfaßt werden. Dies ist hingegen bei einer flächenhaften Verzeichnungskorrektur möglich (KRAUS und STARK [30]). Der Korrekturbetrag wird bei der flächenhaften Verzeichnungskorrektur durch zweimalige Interpolation in Abhängigkeit vom Radius und vom Drehwinkel des Radiusvektors bestimmt.

Die Auswirkung der verfeinerten Verzeichnungskorrektur auf die Genauigkeit der Aerotriangulation wurde durch Neuberechnung der Blockausgleichungen des WW-Blockes Frankfurt und des ÖWW-Blockes Den Haag unter Anwendung der flächenhaften Verzeichnungskorrektur nachgewiesen. Die Ergebnisse der Blockausgleichungen sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

	Block Frankfurt (WW)				Block Den Haag (ÖWW)			
	Version 1		Version 5		Version 1		Version 5	
	R	F	R	F	R	F	R	F
μ_x cm	23.2	22.8	112.7	104.5	35.2	36.3	100.6	95.9
μ_y cm	41.8	40.3	139.8	133.3	49.8	48.7	151.3	150.5
$\mu_{x,y}$ cm	33.8	32.7	127.0	119.8	43.1	42.9	128.5	126.2
μ_z cm	36.2	34.8	53.1	42.8	42.3	40.3	64.1	61.6
σ_{oL} μm	6.9	6.6	5.9	5.7	8.6	8.5	7.6	7.6
σ_{oH} μm	8.3	8.2	8.3	8.1	7.6	8.0	7.4	7.8

Tabelle 2.1 Vergleich der Ergebnisse der Blockausgleichungen mit radialer und flächenhafter Verzeichnungskorrektur

R = radialsymmetrische Verzeichnungskorrektur
F = flächenhafte Verzeichnungskorrektur

Die Neuberechnung der Blöcke bringt folgendes Ergebnis:

Die Absolutgenauigkeit der verschiedenen Blöcke und der Paßpunktversionen wird durch die Anwendung der flächenhaften Verzeichnungskorrektur, abgesehen von einer Ausnahme (Verbesserung der Höhengenaugkeit, Block Frankfurt, PP-Version 5), nicht signifikant verändert. Die Gewichtseinheitsfehler zeigen ein uneinheitliches Bild. Während die Gewichtseinheitsfehler der Lage beim Block Frankfurt signifikant besser werden, bleiben sie beim Block Den Haag gleich und werden bei dem gleichen Block in der Höhe sogar noch schlechter.

Mit der Neuberechnung der Blockausgleichungen unter Verwendung der flächenhaften Verzeichnungskorrektur konnte nicht der Nachweis einer deutlichen Verbesserung der Genauigkeit der Aerotriangulation erbracht werden. Offensichtlich sind im Zusammenhang mit der Bestimmung der Verzeichnung noch andere Effekte zu beachten, die durch die Laborkalibrierung nicht erfaßt werden können. Etwa die unterschiedlichen Bedingungen im Labor und beim Bildflug, oder auch eine Änderung der Verzeichnung, so daß die Laborkalibrierung für die Objektivverzeichnung im Augenblick der Aufnahme nicht repräsentativ ist. Daraus ergibt sich die Folgerung, daß mit dem verfeinerten Korrekturansatz das Problem der Verzeichnungskorrektur nicht gelöst werden kann.

2.1.2 Konstanz der Verzeichnung

Die zweimalige Durchführung der Laborkalibrierung vor und nach dem Bildflug erlaubt eine Prüfung der Verzeichnung auf mögliche Änderungen im Zeitraum zwischen den Messungen. Allerdings beziehen sich die Ergebnisse nur auf den speziellen Fall und erlauben darüber hinaus keine allgemeingültigen Aussagen zur Konstanz der Verzeichnung des betreffenden Kammertyps.

In Abbildung 2.3 und 2.4 sind die Verzeichnungskurven der Halbdiaagonalen vor und nach dem Bildflug dargestellt. Der Verlauf der Verzeichnungskurven der WW-Kammer vor und nach dem Bildflug ist nur in geringem Maße und nicht systematisch unterschiedlich. Die aus dem Vergleich der Halbdiaagonalen berechneten gemittelten Differenzen

$$d_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_{1i} - r_{2i}|$$

betragen nur $d_m = 1.3 \mu\text{m}$. Die Unterschiede der Verzeichnung lassen sich zwanglos mit der Meßgenauigkeit der Laborkalibrierung erklären, die in (MEIER [36]) mit $1.5 \mu\text{m}$ angegeben wird. Die Verzeichnung der WW-Kammer wird in guter Näherung durch Mittelbildung beider Kalibrierungen beschrieben.

Für die ÜWW-Kammer hingegen (siehe Abb. 2.4) sind die Verzeichnungskurven der beiden Kalibrierungen signifikant unterschiedlich. Die 'mittlere' Differenz aus dem Vergleich der Kalibrierungen vor und nach dem Bildflug beträgt $d_m = 5.6 \mu\text{m}$. Dies bedeutet eine Änderung der Verzeichnung im Zeitraum zwischen den beiden Messungen. Offen bleibt die Frage nach der Verzeichnung während des Bildfluges, die man mit den vorhandenen Daten aus der Laborkalibrierung nicht bestimmen kann. Für die Verzeichnungskorrektur wurden deshalb die Mittel aus beiden Kalibrierungen benutzt.

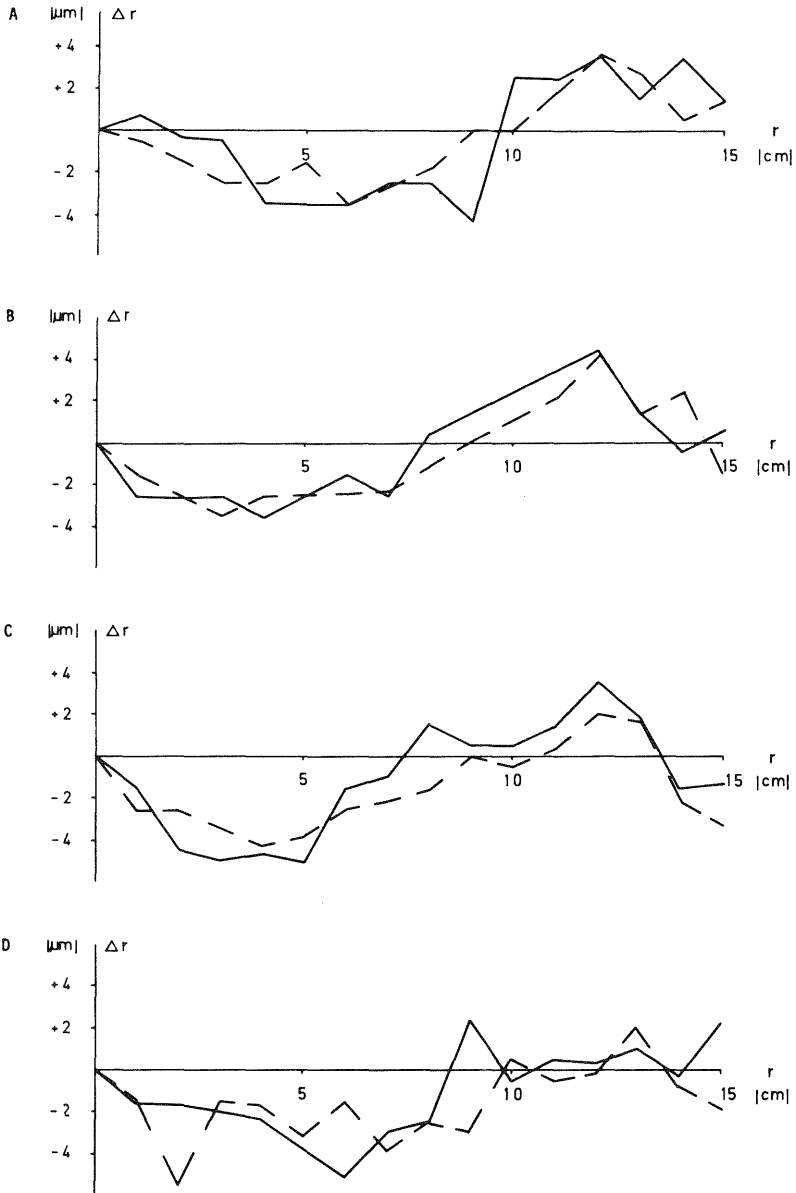


Abb. 2.3 Verzeichnung der WW-Kammer vor und nach dem Bildflug
Darstellung der Ergebnisse der Laborkalibrierungen
an den 4 Halbdiagonalen A, B, C, D

———— 26.2.1969

----- 10.7.1969

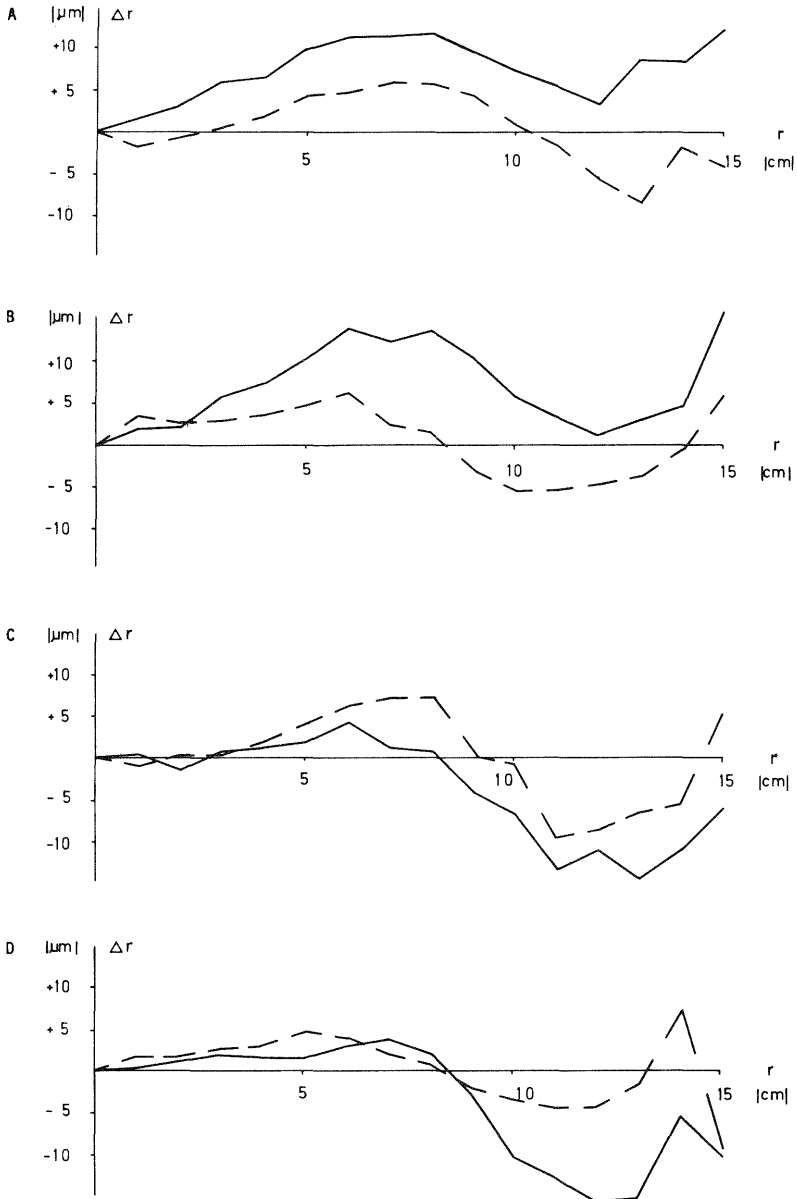


Abb. 2.4 Verzeichnung der ÖWW-Kammer vor und nach dem Bildflug
Darstellung der Ergebnisse der Laborkalibrierungen
an den 4 Halbdiagonalen A, B, C, D

———— 25.3.1969

- - - - - 23.9.1969

2.1.3 Zusammenfassung

Die Analyse der Laborkalibrierungen hat für die beiden Kammern ganz unterschiedliche Ergebnisse gebracht. Während die Verzeichnung der WW-Kammer symmetrisch ist und über den Zeitraum zwischen den Kalibrierungen konstant blieb, hat sich die Verzeichnung der ÜWW-Kammer als unsymmetrisch und veränderlich erwiesen.

Diese Tatsache spiegelt sich im Ergebnis der Blockausgleichungen mit den verschiedenen Korrekturansätzen wieder. Durch die verfeinerte Korrektur der Verzeichnung konnte keine signifikante Genauigkeitssteigerung erzielt werden. Der Grund dafür ist bei dem WW-Block und dem ÜWW-Block unterschiedlich. Die Verzeichnung der WW-Kammer ist in hohem Maße symmetrisch, so daß die flächenhafte Verzeichnungskorrektur keine wesentlichen Vorteile bringt. Die Verzeichnung der ÜWW-Kammer ist zwar unsymmetrisch, andererseits aber auch nicht konstant. Offensichtlich wird der Vorteil des allgemeineren Korrekturansatzes durch die mangelnde Stabilität der Verzeichnung aufgehoben.

Die Ergebnisse der Phase 1 sind durch die verfeinerte Verzeichnungskorrektur nicht berührt worden. Eine höhere Leistungsfähigkeit der verfeinerten Korrektur konnte nicht nachgewiesen werden. Dennoch ist grundsätzlich der flächenhaften Verzeichnungskorrektur, als der allgemeineren Korrektur, den Vorzug zu geben.

2.2 Korrektur des Filmverzugs

Zur Bestimmung des Filmverzugs und zur Beurteilung der Ergebnisse sind beim Versuch Oberschwaben nur die folgenden Daten vorhanden: Die in Laborkalibrierungen gemessenen Rahmenmarkenabstände und Aufzeichnungen über das an den verschiedenen Flugtagen verwendete Filmmaterial. Über den Einsatz der Filmkassetten liegen keine Angaben vor.

2.2.1 Maßstabsänderung

Die Änderung des Maßstabes kann als eine Komponente des Filmverzugs bei der Rahmenmarkentransformation berücksichtigt werden.

In Tabelle 2.2 sind die Maßstabsfaktoren für den Block Wien, die aus der Rahmenmarkentransformation unter Verwendung einer Ähnlichkeitstransformation stammen, streifenweise gemittelt, zusammengestellt. Weiter sind die mittleren Streuungen der Maßstabsfaktoren gegenüber dem Streifenmittel angegeben (mittlere Fehler der arithmetischen Mittel).

Die mittleren Maßstabsfaktoren aller Streifen sind kleiner als eins, d.h. die Bilder sind gedehnt worden. Einzelne Bilder, die teilweise aus Nachbefliegungen stammen, haben einen Maßstabsfaktor der größer als eins ist. Weiter ist zu erkennen, daß die Maßstabsfaktoren der Streifen eines Flugtages gut zusammenpassen, jedoch im Vergleich der beiden Flugtage sich stark unterscheiden. Der Grund dafür dürfte in den verschiedenen Filmsorten zu suchen sein, die an den entsprechenden Tagen benutzt worden sind.

Streifen	Flugtag	mittlerer Maßstabsfaktor	mittlere Streuung
2	8.4.1969	0.999 8933	0.000 01
4	8.4.1969	0.999 9608	0.000 02
6	8.4.1969	0.999 8435	0.000 02
8	12.5.1969	0.999 6278	0.000 02
10	12.5.1969	0.999 5972	0.000 01
12	12.5.1969	0.999 5960	0.000 01
14	12.5.1969	0.999 5614	0.000 01
2 - 6	8.4.1969	0.999 8992	0.000 01
8 - 14	12.5.1969	0.999 5956	0.000 01
2 - 14		0.999 7258	0.000 01

Tabelle 2.2 Maßstabsfaktoren für den Filmverzug des WW-Blocks Wien (Streifenmittel)

Der verschiedentlich beobachtete Effekt, daß die Bilder am Anfang eines Streifens und vor allem am ersten Streifen des Flugtages durch den einsetzenden Filmtransport stärker deformiert werden als die nachfolgenden Bilder, konnte nicht festgestellt werden. Weder die Maßstabsfaktoren, noch die im nachfolgenden Abschnitt behandelte Maßstabsaffinität ist davon betroffen.

2.2.2 Maßstabsaffinität

Die Maßstabsaffinität wurde anhand der Restfehler an den Rahmenmarken bestimmt. Als Rahmenmarkentransformation wurde eine Ähnlichkeitstransformation angewandt. Definiert ist die Maßstabsaffinität als $a = -1 + s_x/s_y$, wobei $s_x = s + \Delta x$ und $s_y = s + \Delta y$ die gemessenen Rahmenmarkenabstände sind und s der Sollabstand der Rahmenmarken ist. Eine Winkelaffinität kann nicht bestimmt werden, da bei der Laborkalibrierung nur die Rahmenmarkenabstände gemessen worden sind und nicht die Rahmenmarkenkoordinaten.

Mit Ausnahme des ersten und letzten Bildes eines jeden Streifens wurden alle Bilder zweimal eingelegt und ihre Rahmenmarken gemessen. Aus den Doppelmessungen wurde die Genauigkeit der Bestimmung der Affinität berechnet. In Tabelle 2.3 ist die mittlere Maßstabsaffinität für die Flugstreifen und der mittlere Fehler der Maßstabsaffinität angegeben.

Streifen	Flugtag	mittlere Maßstabsaffinität a in %	mittlerer Fehler aus Doppelmessung in %
2	8.4.1969	+ 0.07	0.012
4	8.4.1969	+ 0.08	0.011
6	8.4.1969	+ 0.11	0.011
8	12.5.1969	+ 0.03	0.009
10	12.5.1969	+ 0.06	0.014
12	12.5.1969	+ 0.09	0.011
14	12.5.1969	+ 0.11	0.014

Tabelle 2.3 Maßstabsaffinität WW-Block Wien (Streifenmittel)

Die Maßstabsaffinität ist dem Vorzeichen nach über den gesamten Block gleichbleibend. Das positive Vorzeichen bedeutet eine Dehnung des Films in x-Richtung. Betragsmäßig bleibt die Maßstabsaffinität mit einem Mittelwert über den gesamten Block von $a = 0,08 \%$ recht gering. Die mittlere Abweichung m der Einzelwerte im Vergleich zum Streifenmittel beträgt

$$m = \pm 0.017 \% \left(m = \sqrt{\frac{|VV|}{n-1}} \right).$$

Für die Beurteilung der Genauigkeit, mit der die Affinität bestimmt werden kann, muß der Meßfehler im Bild und die Genauigkeit der Kalibrierung berücksichtigt werden. Der Fehler, der durch die Ungenauigkeit der Rahmenkalibrierung verursacht wird, ist für die gesamte Auswertung konstant und ist somit systematischer Natur. Laut Angaben der Kalibrierungslabors muß man mit einem Fehler der Rahmenmarkenkalibrierung von $\pm 20 \mu\text{m}$, das entspricht $\pm 0.12 \%$ rechnen. Die aus den Rahmenmarken bestimmte Maßstabsaffinität beträgt jedoch nur $a = 0.08 \%$. Das heißt, die aus den Rahmenmarken bestimmte Maßstabsaffinität ist nicht reell.

Für den Vergleich der Genauigkeit der Aerotriangulation in Abhängigkeit von der angewandten Rahmenmarkentransformation wurde die Ähnlichkeitstransformation und die Affintransformation einander gegenübergestellt. In der ersten Bearbeitungsphase wurde als Rahmenmarkentransformation die Helmertrtransformation benutzt. Nun wurde für die Modellblöcke Frankfurt und Den Haag die relative Orientierung, unter Anwendung der Affintransformation als Rahmenmarkentransformation, neu berechnet und die Blockausgleichungen durchgeführt. In der Tabelle 2.4 sind die Ergebnisse wiedergegeben.

Block PP-Version R.-Transf.		Frankfurt (WW)				Den Haag (0WW)			
		1		5		1		5	
		H	A	H	A	H	A	H	A
μ_x	cm	23.2	22.6	112.7	109.0	35.2	50.0	100.6	124.8
μ_y	cm	41.8	38.3	139.8	106.6	49.8	66.8	151.3	208.7
$\mu_{x,y}$	cm	33.8	31.4	127.0	107.8	43.1	59.0	128.5	171.9
μ_z	cm	36.2	35.8	53.1	41.3	42.3	39.6	64.1	59.8
σ_{oL}	μm	6.9	6.6	5.9	6.0	8.6	10.1	7.6	8.0
σ_{oH}	μm	8.3	8.2	8.3	8.2	7.6	7.6	7.4	7.3

Tabelle 2.4 Vergleich der Genauigkeit der Aerotriangulation in Abhängigkeit von der Rahmenmarkentransformation
(H = Helmertrtransformation; A = Affintransformation)

Die Ergebnisse der Aerotriangulation der beiden Blöcke sind ganz unterschiedlich. Beim Block Frankfurt ist die Genauigkeit nahezu unabhängig von der Rahmenmarkentransformation. Nur bei Version 5 ist die Genauigkeit des Blockes mit Verwendung der Affintransformation besser. Dagegen hat sich die Genauigkeit des Blocks Den Haag durch die Anwendung der Affintransformation stark verschlechtert. Offensichtlich wurde durch die Affintransformation eine Affinität erst hineingerechnet, aufgrund einer ungenauen Laborkalibrierung oder einer Änderung der Rahmenmarkenabstände, die nicht erfaßt wurde. Die Rahmenmarkenabstände der OWW-Kammer sind in den beiden Kalibrierungsprotokollen vor und nach dem Bildflug um 20 μm verschieden angegeben.

Insgesamt hatte die Anwendung der flächenhaften Verzeichnungskorrektur keinen entscheidenden Einfluß auf die Genauigkeit der Blockausgleichungen.

2.3 Einfluß der Bildneigung auf die Korrektur wegen Erdkrümmung und Refraktion

Üblicherweise erfolgt die Korrektur wegen Erdkrümmung und Refraktion durch Verbesserung der Bildkoordinaten bevor man die Blockausgleichung berechnet. Unabhängig von der allgemeinen Kritik der beiden a priori Korrekturen in 1.2.3 und 1.2.4 kommt bei diesem Ansatz noch eine weitere Vereinfachung in Form der Vernachlässigung der Bildneigung hinzu. Eine 'strenge' Behandlung der Korrektur ist in der Blockausgleichung möglich, nachdem man die Drehwinkel ϕ , ω und κ der Bilder oder Modelle näherungsweise kennt. Die Unterschiede zwischen beiden Korrekturansätzen im Bild und im absolut orientierten Modell werden im folgenden dargestellt.

Mit welchen Bildneigungen man in der Praxis rechnen muß, findet man in [31], wo KRONEBERG die Bildneigungen ω , ϕ und κ für den WW-Block 'Frankfurt' des Oberschwabenmaterials zusammengestellt hat. Die mittleren Neigungen der Drehwinkel bezogen auf den Sollwert $\omega = \phi = \kappa = 0^g$, betragen für $\phi = \pm 0.75^g$, für $\omega = \pm 0.99^g$ und für $\kappa = \pm 3.0^g$ mit Maximalwerten $\phi = 2.9^g$, $\omega = 2.3^g$ und $\kappa = 10.6^g$. Die Bildneigungen lassen sich also in der Praxis des Bildfluges klein halten. Ausgenommen davon ist der Drehwinkel κ , der jedoch keinen Einfluß auf die Korrekturen hat.

2.3.1 Auswirkung des vereinfachten Korrekturansatzes im Einzelbild und im absolut orientierten Modell

In Abbildung 2.5 sind die Unterschiede zwischen der radialsymmetrischen Korrektur und der 'strengen' Korrektur, unter Berücksichtigung der Bildneigung, im Bild dargestellt. Die angenommenen Drehwinkel betragen $\omega = \phi = 1^g$ bzw. $\omega = \phi = 2^g$ und $\kappa = 0^g$. In den Abbildungen ist ein deutlich systematischer Effekt festzustellen.

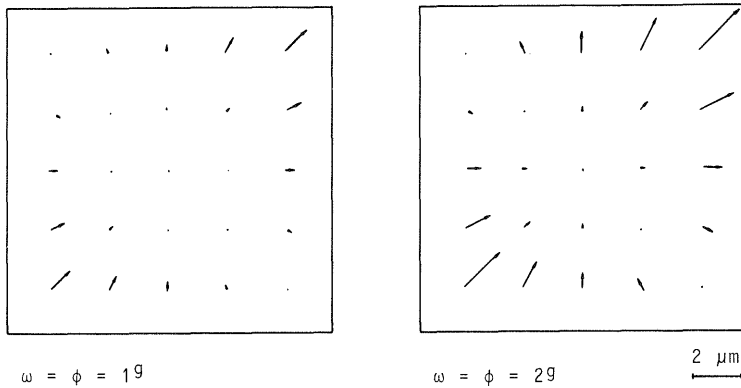


Abb. 2.5 Auswirkung der Vernachlässigung der Bildneigung bei der Korrektur wegen Erdkrümmung und Refraktion (im Einzelbild)

Die Auswirkung der radialsymmetrischen Korrektur auf die Genauigkeit des Einzelmodells wurde anhand einer Simulation abgeleitet. Die Ausgangsdaten sind 15 Punkte, die als Paß- und Vergleichspunkte verwendet werden. Von diesen Punkten werden mit den bekannten Abbildungsgleichungen Bildkoordinaten berechnet, und diese mit den Auswirkungen von Erdkrümmung und Refraktion überlagert. Anschließend wird die Erdkrümmung und Refraktion radialsymmetrisch korrigiert. Die Modellbildung wird rechnerisch nach der Bündellösung durchgeführt. Die Anzahl der Paßpunkte beschränkt sich auf das Minimum (2 Lagepaßpunkte, 3 Höhenpaßpunkte). Die Restfehler an den Vergleichspunkten nach der Ausgleichung sind auf die Vernachlässigung der Bildneigungen bei der Korrektur wegen Erdkrümmung und Refraktion zurückzuführen.

Die Ergebnisse der Simulation sind in Tabelle 2.5 wiedergegeben.

Bildneigungen			Genauigkeit der Bündelausgleichung $ \mu\text{m} $			maximale Restfehler an den Vergleichspunkten $ \mu\text{m} $		
ω	ϕ	κ	μ_x	μ_y	μ_z	μ_x	μ_y	μ_z
1	1	0	0.41	0.47	0.11	0.81	0.90	0.25
2	2	0	0.87	1.00	0.22	1.78	1.82	0.38
3	3	0	1.26	1.67	0.41	2.56	2.95	0.67
5	5	0	2.06	2.73	0.60	4.23	4.97	1.44

Tabelle 2.5 Auswirkung der Vernachlässigung der Bildneigung bei der Korrektur wegen Erdkrümmung und Refraktion (im Einzelmodell)

Für die Drehwinkel $\phi = \omega = 1^g$, zumindest für den WW-Block 'Frankfurt' repräsentative Werte, bleibt die Fehlerwirkung der Vernachlässigung mit $\mu_{x,y} = 0.4 \mu\text{m}$ in der Lage und $\mu_z = 0.1 \mu\text{m}$ in der Höhe deutlich unter $1 \mu\text{m}$. Die maximalen Restfehler in der Lage betragen $m_x = m_y = 0.8 \mu\text{m}$ und $m_z = 0.2 \mu\text{m}$. Für die maximalen Bildneigungen, die im Block Frankfurt festgestellt wurden ergibt sich die Fehlerwirkung zu $\mu_{x,y} = 1.5 \mu\text{m}$ und $\mu_z = 0.4 \mu\text{m}$. Die maximalen Restfehler betragen dann schon $2.5 \mu\text{m}$ in der Lage.

2.3.2 Beurteilung der Ergebnisse

Erkennt man den Oberschwabenblock Frankfurt als ein für die Praxis repräsentatives Beispiel an, so sind die auftretenden Bildneigungen auch allgemein nur sehr klein. Die durch die radialsymmetrische Korrektur der Erdkrümmung und der Refraktion verursachte Genauigkeitseinbuße der ausgeglichenen Geländekoordinaten ist dann im Mittel kleiner als $0.5 \mu\text{m}$. Setzt man voraus, daß die Bildneigungen der Normalverteilung folgen, so ergibt sich nur für 5 % der Bilder (Modelle) eine Verschlechterung der Genauigkeit um größer als $1 \mu\text{m}$ als Folge des einfachen Korrekturansatzes.

Für die Beurteilung der Auswirkung des vereinfachten Korrekturansatzes im Blockverband ist auch der Charakter der Restfehler, ob zufällig verteilt oder systematisch von Bedeutung. Wie Abbildung 2.6 zeigt, haben die Restfehler im Einzelmodell einen stark systematischen Anteil. Andererseits sind die Bildneigungen in der Regel im Gesamtblock zufällig verteilt mit dem Mittelwert $\omega = \phi = 0^g$. Damit sind auch die Restfehler im Gesamtblock zufällig verteilt. Somit stellt die Anwendung einer radialsymmetrischen Verzeichnungs- und Erdkrümmungskorrektur eine zulässige Vereinfachung dar. Die Ergebnisse der Bearbeitungsphase 1 können also beibehalten werden.

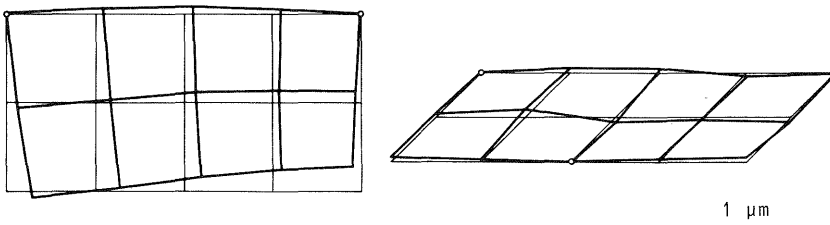


Abb. 2.6 Modelldeformationen wegen radialsymmetrischer Korrektur der Erdkrümmung und der Refraktion
(Bildneigung; $\phi = \omega = 1^g$, $\kappa = 0^g$)

2.4 Einfluß der Definition der Landeskoordinaten auf die Genauigkeit der Aerotriangulation

Aufgrund der unterschiedlichen Definition der photogrammetrischen Koordinatensysteme und der üblichen geodätischen Paßpunktsysteme sind diese nicht kompatibel. Die photogrammetrischen Koordinatensysteme sind dreidimensionale Systeme, während dies bei den üblichen geodätischen Landessystemen nicht streng der Fall ist. Die geodätischen Koordinatensysteme haben für die Lagekoordinaten und für die Höhenkoordinaten unterschiedliche Bezugsflächen. Zudem handelt es sich bei den Lagekoordinaten um 'abgebildete' Koordinaten.

Die unterschiedliche Definition von geodätischem und photogrammetrischem Koordinatensystem hat zur Folge, daß auch bei fehlerfreien photogrammetrischen Daten und fehlerfreien Paßpunkten bei der Berechnung der Blockausgleichung aufgrund der Überbestimmung Widersprüche auftreten. Damit beeinflußt die Definition der geodätischen Paßpunktkoordinaten die Genauigkeit der Aerotriangulation. Den Einfluß auf die Genauigkeit kann man in einer Simulation bestimmen. Diese Methode erlaubt zwar nur Aussagen für den speziellen Fall, ist aber am einfachsten durchführbar und hier ausreichend.

2.4.1 Definition des geodätischen Koordinatensystems

Die üblichen geodätischen Koordinatensysteme sind im strengen Sinn keine räumlichen Systeme, da die Bezugsflächen für Lage und Höhe verschieden sind und keine gegenseitige Zuordnung bekannt ist. Ausnahmen sind die Koordinatensysteme in der dreidimensionalen Geodäsie, die allerdings bisher in der Praxis noch nicht angewendet werden. Diese Koordinatensysteme werden im folgenden nicht behandelt.

Für die Lagekoordinaten ist die Kugel oder das Erdellipsoid die Referenzfläche. Aus Gründen der einfacheren Berechnung der nachfolgenden geodätischen Arbeiten werden die Lagekoordinaten in der Regel auf eine Ebene oder abwickelbare Fläche abgebildet. Die Eigenschaften der ebenen Koordinaten sind in Abhängigkeit von den angewendeten Projektionsbeziehungen unterschiedlich (GROSSMANN [22]). Die Lagekoordinaten der Paßpunkte für den Oberschwabentest sind Gauß-Krüger Koordinaten. Bei der Gauß-Krüger Projektion werden die auf dem Ellipsoid definierten Punkte konform in ein ebenes kartesisches Koordinatensystem abgebildet.

Die Bezugsfläche der geodätischen Höhen, das Geoid, ist die Äquipotentialfläche der Erde die durch den Normalnullpunkt verläuft. Das Geoid unterscheidet sich vom Erdellipsoid durch die Geoidundulationen. Da die Geoidundulationen nur großräumig und mit geringer Amplitude variieren, können diese für den Bereich eines photogrammetrischen Blockes im Rahmen der geforderten Genauigkeit als konstant angenommen und das Geoid als Ellipsoid oder als Kugel angenähert werden.

Unter dieser Voraussetzung kann man das geodätische Koordinatensystem als ein räumliches kartesisches Koordinatensystem betrachten, dessen verebnete Lagekoordinaten durch die Abbildung verzerrt sind und dessen Höhenkoordinaten, die sich ursprünglich auf das Geoid bezogen haben, sich jetzt auf eine Grundrißebene beziehen.

2.4.2 Geodätische Grundlagen

Das verebnete geodätische System und das räumliche photogrammetrische System können durch zweimalige Transformation ineinander überführt werden. Man kann dazu vom geodätischen System ausgehen, in diesem Fall von den Landeskoordinaten im Gauß-Krüger System. Durch Transformation der Gauß-Krüger Koordinaten in geographische Koordinaten, die auf dem Erdellipsoid definiert sind, wird die Projektionsverzerrung beseitigt. Nachstehend sind die Transformationsformeln als Reihenentwicklung dargestellt. Die Koeffizienten der Reihenentwicklung werden der Einfachheit halber mit B_F , B_1 , B_2 beschrieben. Die genauen Zusammenhänge kann man aus GROSSMANN [22] entnehmen.

$$B = B_F + B_2 \eta^2 + B_4 \eta^4 + \dots$$

$$l = B_1 \eta + B_3 \eta^3 + B_5 \eta^5 + \dots$$

Die geographischen Koordinaten auf dem Erdellipsoid, mit geographischer Länge und Breite definiert, können nicht durch eine verkettete Helmerttransformation, wie in der Blockausgleichung, mit kartesischen Koordinaten verglichen werden. Um dies zu erreichen werden die geographischen Koordinaten in ein dreidimensionales, kartesisches Koordinatensystem transformiert. Dieses neue Koordinatensystem ist mit dem photogrammetrischen System kompatibel. Die dazugehörigen Transformationsformeln lauten (RINNER [38])

$$X = (N + h) \cos \phi \sin l$$

N = Querkrümmungshalbmesser

$$Y = (N + h) (\sin \phi \cos \phi_0 - \sin \phi_0 \cos \phi \cos l) + e^2 \cos \phi_0 (N_0 \sin \phi_0 - N \sin \phi)$$

ϕ = geogr. Breite

l = geogr. Längendifferenz

$$Z = (N + h) (\sin \phi \sin \phi_0 - \cos \phi_0 \cos \phi \cos l) + e^2 \sin \phi_0 (N_0 \sin \phi_0 - N \sin \phi) - (N_0 + h_0)$$

e = numerische Exzentrizität

h = Höhe über Ellipsoid

Das neue kartesische Koordinatensystem ist ein Tangentialsystem dessen Ursprung im Punkt ϕ_0 liegt mit der Höhe h_0 . Die Tangentialkoordinaten sind ebenso wie die geographischen Koordinaten frei von Projektionsverzerrungen.

Wir haben nun die Voraussetzungen, die für die Simulation benötigten Daten zu berechnen.

2.4.3 Simulation

Die Simulation wird mit einem künstlichen Block durchgeführt, der in Größe, Form und Lage zum Bezugsmeridian einem Oberschwabenblock mit $q = 20\%$ Querüberdeckung entspricht. Damit ist der Rahmen vorgegeben, in dem die Daten frei gewählt werden können.

Der Ausgangspunkt ist ein regelmäßiges Gitter, von der Größe eines Oberschwabenblocks. Die Maschenweiten entsprechen mit 2.5 km dem Basisabstand der empirischen Oberschwabenblöcke. Jeder der Gitterpunkte erhält Landeskoordinaten. Aus diesem Gitter werden 200 Modelle abgeleitet, die aus sechs Verknüpfungspunkten und zwei Projektionszentren bestehen. Die Lagekoordinaten der Punkte ergeben

sich aus den Landeskoordinaten der Gitterpunkte. Die Z-Koordinate der Verknüpfungspunkte ist null; die Z-Koordinate der Projektionszentren entspricht der Flughöhe. Zu den Verknüpfungspunkten kommen noch die Paß- und Vergleichspunkte, deren Koordinaten ebenfalls von den Gitterpunkten übernommen werden.

Da sämtliche Modellpunkte im Landessystem gegeben sind, sind ihre Koordinaten durch die Projektion verzerrt. Die Verzerrungen werden nun wie beschrieben durch eine Transformation ins geographische System beseitigt. Anschließend erfolgt die Transformation der Modelle in das Tangentialsystem. Man hat nun die Ausgangssituation in einer Aerotriangulation erreicht, mit dem Unterschied, daß hier die Widersprüche in der Blockausgleichung nur auf die Projektionsverzerrungen der Paßpunkte, sieht man von dem Einfluß der Erdkrümmung auf die Modellkoordinaten ab, zurückzuführen sind. Die Genauigkeitsmaße $\mu_{x,y}$ und μ_z spiegeln den Einfluß der Erdkrümmung und der Projektionsverzerrung wieder.

Um den Einfluß der Erdkrümmung auszuschalten, werden die Modelle durch die Beseitigung der Konvergenz der Lotrichtungen in den Projektionszentren und durch die Beseitigung der Höhenunterschiede innerhalb des Modells verebnet.

Die Konvergenz wird aus dem Meridiankrümmungshalbmesser M , der Basis b und der Flughöhe h berechnet.

$$\text{arc } \alpha = \frac{b}{M} ; \quad d = h \cdot \text{arc } \alpha$$

Die Auswirkung der Änderung von Basis und Meridiankrümmungshalbmesser in Abhängigkeit von der Lage des Modells im Block ist vernachlässigbar klein, so daß der Korrekturbetrag der Konvergenz über den Gesamtblock gleich bleibt.

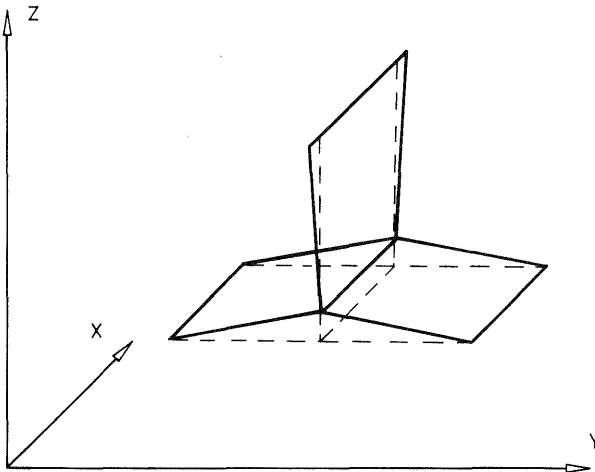


Abb. 2.7 Verebnen eines Modells durch Beseitigen der Konvergenz der Lotrichtungen in den Projektionszentren und der Höhenunterschiede im Modell

Zur Korrektur der Konvergenz und der Höhenunterschiede im Modell wird jedes Modell einzeln auf zuvor berechnete Sollwerte transformiert. Die identischen Punkte sind die Basispunkte und die um die Divergenz verbesserten Projektionszentren. Die Modelle werden durch Nullsetzen der z-Koordinaten der Modellpunkte verebnet.

In Tabelle 2.6 sind die Ergebnisse der Blockausgleichungen wiedergegeben. Die Blockausgleichungen wurden mit den Paßpunktversionen 1 und 5, die in Kapitel I.4.3 beschrieben sind, berechnet.

		Version 1	Version 5	Version 1	Version 5
		verebnete Koordinaten			
μ_x	cm	0.0	1.1	0.0	1.1
	μm	0.0	0.4	0.0	0.4
μ_y	cm	0.3	0.5	0.3	0.5
	μm	0.1	0.2	0.1	0.2
μ_z	cm	40.8	240.3	0.0	0.0
	μm	14.4	84.9	0.0	0.1
σ_{oL}	μm	0.2	0.2	0.1	0.1
σ_{oH}	μm	10.3	10.0	0.0	0.0
maximale Fehler					
x	cm	0.1	2.4	0.1	2.7
y	cm	0.6	1.4	0.6	1.6

Tabelle 2.6 Einfluß der Definition der Landeskoordinaten auf die Genauigkeit der Aerotriangulation

2.4.4 Ergebnis und Beurteilung

Das Ergebnis der Berechnungen ist: Die Definition der geodätischen Paßpunktkoordinaten beeinflusst nicht die Genauigkeit der Aerotriangulation der Oberschwabenblöcke. Die Werte μ_x und μ_y sind unabhängig von der Paßpunktversion sehr klein und können sogar in numerischen Unsicherheiten durch die zweimalige Transformation ihre Ursache haben. Die Aussage gilt streng nur für die Oberschwabenblöcke, weil der Einfluß der Definition der geodätischen Paßpunktkoordinaten auch von anderen Parametern wie Blockgröße und -form, Lage des Blockes im Landessystem, usw. abhängig ist und diese Parameter hier nicht variiert wurden und deren Einfluß nicht ermittelt wurde. Die Ergebnisse der Blockausgleichungen können jedoch in der Weise interpretiert werden, daß die Definition der Landeskoordinaten die Genauigkeit der Aerotriangulation in der Mehrzahl der praktischen Anwendungen nicht beeinflusst. Zumindest dann nicht, wenn der Block mit einem dichten Paßpunktrand abgesichert ist. Für Detailfragen in diesem Zusammenhang wird auf die noch unveröffentlichte Untersuchung von C.S. WANG verwiesen.

Der Einfluß der Erdkrümmung auf die Modellkoordinaten muß auf jeden Fall beseitigt werden. Dies ist deshalb notwendig, da die geodätischen Paßpunktkoordinaten verebnete Koordinaten sind.

3. Testfeldkalibrierung

3.1 Grundsätzliches

Die Testfeldkalibrierung ist grundsätzlich von den üblichen a priori Korrekturen zu unterscheiden. Letztere beschränken sich auf bestimmte Fehlereinflüsse, die a priori bekannt und ableitbar, oder durch Messung a priori bestimmbar sind. Die Testfeldkalibrierung hingegen ermöglicht eine integrale Erfassung der Fehler des gesamten Aufnahmesystems, ohne deren Ursachen explizit kennen zu müssen. Darin eingeschlossen sind die Fehler, die durch die Entwicklungs- und Kopierprozesse der Bilder bedingt sind. Im Gegensatz zur Laborkalibrierung gilt die Testfeldkalibrierung unter den üblichen Bildflugbedingungen und zum Zeitpunkt der Befliegung.

Mit der Testfeldkalibrierung können Aussagen zum mathematischen Modell der Photogrammetrie abgeleitet werden. Dies kann in zweierlei Hinsicht geschehen. Der eine Gesichtspunkt betrifft die Prüfung des Funktionalmodells und des stochastischen Modells. Auf der anderen Seite ist die Testfeldkalibrierung eine Methode zur Bestimmung der systematischen Fehler. Das Ziel ist dann, durch die Korrektur der analysierten Fehler die Gültigkeit des mathematischen Modells wieder herzustellen.

Die Aussagen zum mathematischen Modell werden durch die Analyse der ausgeglichenen Bildkoordinaten und den Vergleich mit den terrestrischen Paßpunktkoordinaten abgeleitet.

Offen bleibt die Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse der Testfeldkalibrierung auf andere Bildflüge. Die Aussagen zum mathematischen Modell gelten streng nur für den Kalibrierungsflug. Doch ist zu erwarten, daß diese unter gewissen Einschränkungen auch auf nachfolgende oder vorausgegangene Bildflüge übertragen werden können, sofern diese Bildflüge unter ähnlichen Bedingungen durchgeführt und wesentliche Parameter nicht geändert wurden. Mit welchem Fehler dabei gerechnet werden muß, kann nicht allgemeingültig und konkret vorhergesagt werden (KUPFER [34]). Hier wird nur das vorhandene Material untersucht.

3.2 Durchführung der Testfeldkalibrierung

Das Testfeld Rheidt wurde am 5.4., am 13.5. und am 12.6.1969 mit der für den Oberschwabenbildflug benutzten WW-Kammer und der ÜWW-Kammer aufgenommen. Die gesamte Auswertung erfolgte am Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn (KUPFER [33]).

Die Bilder wurden einzeln am Stereokomparator ausgemessen. Mit einer Helmerttransformation wurden die Komparatorkoordinaten ins Bildsystem transformiert und wegen Verzeichnung, Erdkrümmung und Refraktion korrigiert.

Die eigentliche Auswertung im Sinne einer Testfeldkalibrierung erfolgte mit einer Bündelausgleichung. Die zu bestimmende Bilddeformation wurde mit einem Polynom 3. Grades beschrieben, dessen Polynomkoeffizienten als Unbekannte in die Ausgleichung eingeführt und bestimmt worden sind. Die Verbesserungsgleichungen lauten:

$$V_x = k_1 dX + \dots + k_6 d\omega + a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 x y + a_5 y y + a_6 x^3 + a_7 x^2 y + a_8 x y^2 + a_9 y^3 + \dots + (x_0 - x)$$

$$V_y = \dots + b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 x y + b_5 y^2 + b_6 x^3 + b_7 x^2 y + b_8 x y^2 + b_9 y^3 + \dots + (y_0 - y)$$

x, y = gemessene Bildkoordinaten

$a_0 - b_9$ = unbekannte Polynom-Koeffizienten

Aus Gründen der Konvergenz mußten die Koeffizienten a_0, a_1, a_2, a_3, b_0 und b_5 zu Null gesetzt werden. Alle bekannten Punkte wurden als Paßpunkte in die Ausgleichung eingeführt.

Für die WW-Kammer wurden drei Bündelausgleichungen berechnet; nämlich Vorflug, Nachflug und gemeinsame Auswertung der gesamten Daten aus Vor- und Nachflug. Für die ÖWW-Kammer wurden die Polynomkoeffizienten in zwei Ausgleichungen bestimmt; nämlich aus Nachflug und Vor- und Nachflug.

3.3 Ergebnis der Testfeldkalibrierung

Aus den Bündelausgleichungen sind die Polynomkoeffizienten bekannt, mit denen die aus der Testfeldkalibrierung bestimmte, systematische Bilddeformation berechnet werden kann. In der Abbildung 2.8 sind die Bilddeformationen für WW und ÖWW, die aus Vor- und Nachflug ermittelt wurden, dargestellt. Diese Korrekturpolynome werden für die Korrektur der Bild- und Modelldeformationen des Oberschwabenmaterials benutzt.

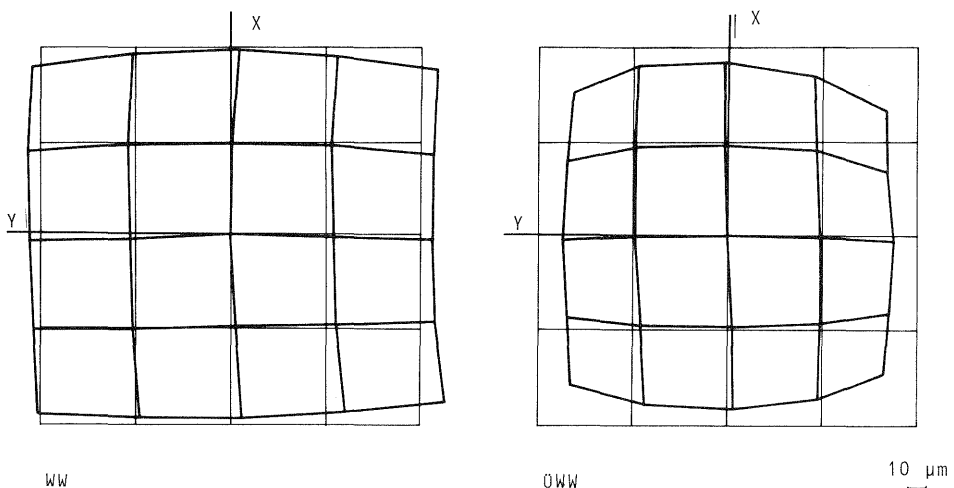


Abb. 2.8 Aus Testfeldkalibrierung bestimmte systematische Bilddeformationen (gemeinsame Ausgleichung; Vor- und Nachflug, nach KUPFER [33])

Der Deformationstyp ist für WW und ÖWW unterschiedlich. Während sich die Deformation bei den WW-Flügen aus einer tonnenförmigen Deformation, einer Maßstabaffinität und einer Durchbiegung in y-Richtung zusammensetzt, ist bei den ÖWW-Flügen eine tonnenförmige Deformation vorherrschend. Allerdings scheint die Deformation bei ÖWW aufgrund des Ansatzes mit dem Maßstab (z-Koordinate) korreliert zu sein.

Auffallend sind die großen Beträge der analysierten Bilddeformation, die vielfach $10\ \mu\text{m}$ überschreiten.

Mit den Testfeldkalibrierungen, die im Abstand von 1 - 2 Monaten (vor und nach dem Oberschwabenbildflug) durchgeführt wurden, kann die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Testfeldkalibrierung diskutiert werden. In Abbildung 2.9 ist die systematische Bilddeformation für die beiden Befliegungen mit der WW-Kammer dargestellt. Die Darstellung zeigt, daß der Deformationstyp gleich blieb (bei den meisten Polynomkoeffizienten ändert sich das Vorzeichen nicht) und nur der Betrag der Deformation sich änderte.

Für die 9 Schemapunkte, deren Lage aus den in Tabelle 2.7 angegebenen Koordinaten ableitbar ist, wurden der Korrekturbetrag der Bilddeformation berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2.7 dargestellt.

Wie aus Abbildung 2.9 und Tabelle 2.7 hervorgeht, sind die aus beiden Kalibrierungen ermittelten Bilddeformationen unterschiedlich. Die durchschnittliche Abweichung für die x-Koordinate beträgt $3\ \mu\text{m}$ und für die y-Koordinate $6\ \mu\text{m}$.

KUPFER hat in [33] den Einfluß der unterschiedlichen Ergebnisse der Testfeldkalibrierungen auf die Genauigkeit der Doppelpunkteinschaltung untersucht, indem er die Regressionspolynome aus beiden Kalibrierungen miteinander vertauscht und angewendet hat. Die Ergebnisse sind unterschiedlich, doch läßt sich ein Trend aufzeigen. Abgesehen von wenigen Ausnahmen konnte auch mit den vertausch-

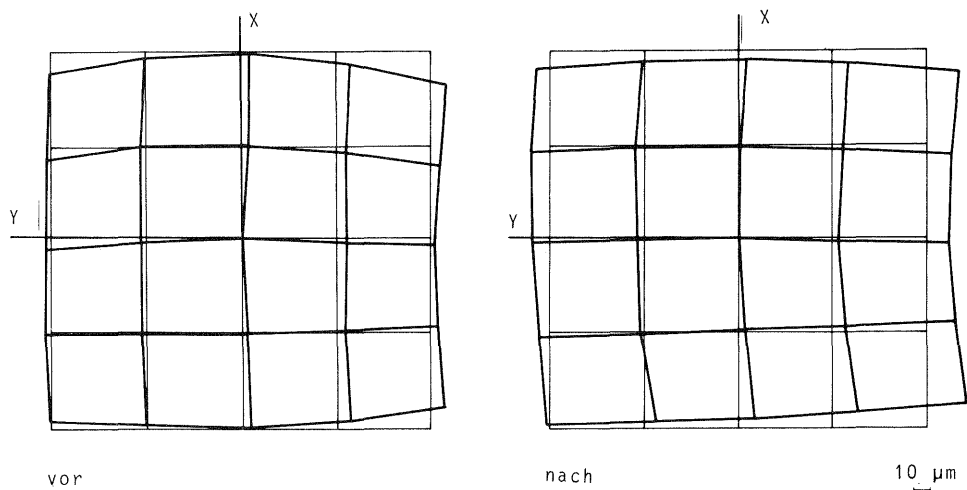


Abb. 2.9 Systematische Bilddeformationen aus Vorflug und Nachflug (WW-Kammer)

Pkt. Nr.	Koordinaten mm		WW-Vorflug		WW-Nachflug		Vor - Nach	
	x	y	V _x	V _y	V _x	V _y	d _x	d _y
1	+ 100	+ 100	-14.1	+0.2	-12.1	+ 6.7	-2.0	- 6.5
2	+ 100	± 0	- 1.2	-3.2	- 5.7	- 4.4	+4.5	- 0.8
3	+ 100	- 100	-21.5	-7.8	-13.3	-16.3	-8.2	+ 7.5
4	± 0	+ 100	- 5.8	+2.6	- 2.4	+10.8	-3.4	- 8.2
5	± 0	± 0	± 0	±0	± 0	± 0	±0	± 0
6	± 0	- 100	- 2.2	-2.6	- 2.2	-10.8	±0	+ 8.2
7	- 100	+ 100	+ 4.3	+0.6	+ 2.1	+ 0.3	+2.2	+ 0.3
8	- 100	± 0	+ 1.2	-4.4	+ 5.7	-10.2	-4.5	+ 5.8
9	- 100	- 100	+14.5	-7.0	+14.1	-19.9	+0.4	+12.9

Tabelle 2.7 Bilddeformationen aus Testfeldkalibrierung | μm |
WW-Vorflug und WW-Nachflug

ten Polynomen eine Verbesserung der Genauigkeit erzielt werden (Lage: Faktor 1.2, Höhe: Faktor 1.4). Allerdings ist die Genauigkeitssteigerung in der Regel geringer als bei der Korrektur mit den ursprünglichen Polynomen (Lage: Faktor 1.3, Höhe: Faktor 1.4).

Da die Oberschwabenbildflüge sich über einen längeren Zeitraum zwischen den beiden Kalibrierungsflügen erstreckt haben, werden zur Korrektur des Oberschwabenmaterials die aus der gemeinsamen Ausgleichung von Vor- und Nachflug ermittelten Regressionspolynome benutzt.

3.4 Anwendung der Testfeldkalibrierung in der Aerotriangulation

Mit den aus der gemeinsamen Ausgleichung von Vor- und Nachflug bestimmten Polynomen wurden die Bildkoordinaten der Blöcke Frankfurt (WW) und Den Haag (OWW) verbessert und die Blockausgleichungen nach der Bündelmethode und der Methode der unabhängigen Modelle erneut berechnet.

Die Ergebnisse mit und ohne Testfeldkalibrierung von den Paßpunktversionen 1 und 5 sind in den Tabellen 2.8 und 2.9 zusammengestellt. Die Paßpunktversionen sind in Kapitel I beschrieben (S. 20).

3.5 Beurteilung

Die Absolutgenauigkeit der Aerotriangulation wird durch die Korrektur systematischer Fehler aus der Testfeldkalibrierung, abgesehen von zwei Ausnahmen allgemein, aber unterschiedlich stark verbessert. Die Ausnahmen betreffen die Höhengenaugigkeit der Modellblöcke Den Haag (Version 5) und Frankfurt (Version 1)

Die verschiedenen Werte der Genauigkeitssteigerung lassen keine einheitliche Interpretation der Ergebnisse beider Blöcke zu. Während beim Block Frankfurt vor allem die Version 5 stark verbessert wurde (Bündel, Frankfurt, Version 5: in der Lage Faktor 1.5; in der Höhe Faktor 1.7), waren beim Block Den Haag die Genauigkeitssteigerungen allgemein nicht so groß und es wurde vor allem die Genauigkeit der Version 1 verbessert.

PP-Version	Testfeld- kalibrierung	B ü n d e l						M o d e l l e					
		1		Fak- tor	5		Fak- tor	1		Fak- tor	5		Fak- tor
		nein	ja		nein	ja		nein	ja		nein	ja	
μ_x	m	0.27	0.28	1.0	1.28	0.93	1.4	0.23	0.26	0.9	1.13	0.80	1.4
	μ m	9.6	9.7		44.9	32.5		8.2	9.3		39.8	28.2	
μ_y	m	0.51	0.38	1.3	1.35	0.88	1.5	0.42	0.26	1.6	1.40	0.80	1.8
	μ m	17.9	13.4		47.2	30.8		14.8	9.2		49.4	28.1	
$\mu_{x,y}$	m	0.41	0.33	1.2	1.30	0.91	1.5	0.34	0.26	1.3	1.27	0.80	1.6
	μ m	14.4	11.7		46.1	31.6		11.9	9.2		44.8	28.2	
μ_z	m	0.51	0.44	1.2	0.62	0.37	1.7	0.36	0.37	1.0	0.53	0.43	1.2
	μ m	17.8	15.3		21.8	13.0		12.8	12.9		18.8	15.2	
σ_{oL}	μ m	5.7	5.0	1.1	4.0	3.3	1.2	6.9	5.8	1.2	5.9	4.6	1.3
σ_o	μ m							8.3	8.3		8.3	8.2	
σ_{oH}	μ m							8.3	8.3		8.3	8.2	

Tabelle 2.8 Genauigkeitssteigerung durch Anwendung der Testfeldkalibrierung
WW-Block Frankfurt

PP-Version Testfeld- kalibrierung	M o d e l l e						B ü n d e l					
	1		Fak- tor	5		Fak- tor	1		Fak- tor	5		Fak- tor
	nein	ja		nein	ja		nein	ja		nein	ja	
μ_x m	0.35	0.35	1.0	1.01	1.02	1.0	0.36	0.32	1.1	1.15	1.55	0.7
μ_m	12.4	12.3		35.6	36.0		12.2	10.9		39.3	53.0	
μ_y m	0.50	0.37	1.4	1.51	1.24	1.2	0.88	0.53	1.7	1.77	1.19	1.5
μ_m	17.6	13.0		53.5	43.7		30.2	18.1		60.8	40.8	
$\mu_{x,y}$ m	0.43	0.36	1.2	1.28	1.13	1.1	0.65	0.44	1.5	1.45	1.38	1.1
μ_m	15.2	12.7		45.4	40.0		23.0	14.9		51.2	47.3	
μ_z m	0.42	0.39	1.1	0.64	0.66	1.0	0.48	0.43	1.1	0.82	0.45	1.8
μ_m	14.9	13.7		22.6	23.2		16.6	14.7		27.9	15.4	
σ_{oL} μ_m	8.6	8.3	1.0	7.6	7.9	1.0						
σ_o μ_m							7.9	7.1	1.1	6.3	6.7	0.9
σ_{oH} μ_m	7.6	8.0	1.0	7.4	7.7	1.0						

Tabelle 2.9 Genauigkeitssteigerung durch Anwendung der Testfeldkalibrierung
ÖWW- Block Den Haag

Die Gewichtseinheitsfehler wurden in geringerem Maße als die Absolutgenauigkeit verbessert und weisen noch große Unterschiede auf, vergleicht man die Paßpunktversion 1 und 5. Insgesamt hat die Testfeldkalibrierung ihre Bedeutung zur Erfassung und Korrektur systematischer Bildfehler und ihre Wirksamkeit zur Verbesserung der Genauigkeit der Aerotriangulation bewiesen. Im Vergleich mit den Genauigkeitssteigerungen durch verfeinerte a priori Korrekturen kann hier zum ersten Mal eine signifikante, deutliche Genauigkeitssteigerung erzielt werden. Offen bleibt hier noch der Vergleich mit der Selbstkalibrierung. Es muß damit gerechnet werden, daß noch systematische Fehler aufgrund des Zeitunterschiedes zwischen Bildflug und Kalibrierungsflug und der damit verbundenen Variation der systematischen Fehler verbleiben.

4. Zusammenfassung

Die Aufgabe der üblichen a priori Korrekturen besteht darin, die systematischen Fehler zu erfassen und zu korrigieren, von denen man annimmt sie seien dominierend und die mit einfachen Mitteln bestimmbar sind. Dies bedeutet gleichzeitig, daß von einer vollständigen Erfassung der systematischen Fehler keine Rede sein kann. Die Diskussion der a priori Korrekturen hat dies deutlich gemacht. Trotz dieser Mängel und der Möglichkeit, andere effektivere Methoden zur Korrektur systematischer Fehler anzuwenden, haben die a priori Korrekturen noch eine selbständige Bedeutung. Die Strategie zielt darauf ab, alle erfaßbaren Fehler vorab zu korrigieren.

Eine Verfeinerung der Korrekturen im Sinne einer vollständigeren Auswertung der vorhandenen Information bringt, wie in den Abschn. II.2 dargestellt wurde, keine wesentliche Steigerung der Leistungsfähigkeit der a priori Korrekturen. Die Ergebnisse von Phase 1, wo mit einfachen Korrekturansätzen gearbeitet wurde, sind nur gering modifiziert aber nicht signifikant geändert worden. Daher wird im folgenden die weitere Untersuchung mit dem ursprünglichen Material fortgeführt. Festzustellen ist, daß auch nach den a priori Korrekturen noch systematische Fehler von erheblichem Betrag verbleiben (siehe auch ACKERMANN [3]).

Die Testfeldkalibrierung hat sich bis jetzt als die wirksamste Methode zur Erfassung und Korrektur systematischer Fehler erwiesen. Problematisch und im allgemeinen Fall nicht exakt ableitbar bleibt die Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Kalibrierungsflug auf den eigentlichen Bildflug. Deshalb ist auch bei diesem Verfahren damit zu rechnen, daß dennoch systematische Fehler verbleiben.

Die Frage wird in den nachfolgenden Kapiteln zu beantworten sein, ob mit der Selbstkalibrierung ein weiterer Schritt zur vollständigen Erfassung und Korrektur systematischer Fehler möglich ist, und wie die Verfahren Testfeldkalibrierung und Selbstkalibrierung im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit zur Erfassung und Korrektur systematischer Fehler zu beurteilen sind.

III. ANALYSE UND BESCHREIBUNG DER SYSTEMATISCHEN BILD- UND MODELLDEFORMATIONEN

Die Betrachtungen und Untersuchungen in Kapitel II haben ergeben, daß die verfeinerte Berücksichtigung der a priori Korrekturen auf die Gesamtgenauigkeit der Oberschwabenblöcke keinen signifikanten Einfluß hat. Auf der anderen Seite war die Testfeldkalibrierung sehr wirksam. Die Testfeldkalibrierung ist nicht an die a priori Kenntnis der systematischen Fehler gebunden und ermöglicht eine globale Erfassung der systematischen Fehler, die die üblichen a priori Korrekturen übertrifft. Das Ergebnis ist jedenfalls, daß im Oberschwabenmaterial mit der Existenz beträchtlicher systematischer Fehler gerechnet werden muß. Der Ausgangspunkt der Überlegungen und die damalige Beurteilung der Ergebnisse von Phase 1 werden bestätigt. Ebenso zeigt sich, daß die systematischen Fehler, d.h. die Diskrepanzen mit der Theorie, nicht in der mangelnden Verfeinerung der a priori Korrekturen zu suchen sind. Daraus ergibt sich die Aufgabe der Bestimmung und der Analyse der systematischen Fehler. Die Ergebnisse werden in diesem Kapitel dargestellt und diskutiert.

Ausgegangen wird von dem gleichen Material, das schon in der ersten Bearbeitungsphase des Oberschwabenversuchs benutzt wurde. Die verfeinerten Korrekturen sind nicht angebracht worden, da diese keinen signifikanten Einfluß auf die Genauigkeit der Aerotriangulation haben und nicht Gegenstand der hier gesuchten Fehler sind.

Die Bestimmung der systematischen Fehler wird nach einem von de MASSON d'AUTUME in [35] beschriebenen Verfahren durchgeführt. Das Verfahren nach de MASSON d'AUTUME ist mit der Selbstkalibrierung vergleichbar, nur daß die Bestimmung der systematischen Fehler nach der Blockausgleichung durchgeführt wird, während dies bei der Selbstkalibrierung simultan mit der Blockausgleichung geschieht. Bei dem empirischen Verfahren nach de MASSON d'AUTUME ist eine iterative Berechnung der systematischen Bild- und Modelldeformationen notwendig [35].

1. Beschreibung des Verfahrens zur Bestimmung der systematischen Bild- und Modelldeformationen

1. Das Verfahren nach de MASSON d'AUTUME setzt nach der Standardblockausgleichung nach der Bündelmethode oder der Methode der unabhängigen Modelle an. Es wird angenommen, daß sich die Auswirkung der unbekanntenen ursächlichen Modellfehler des Funktionalmodells als systematische, d.h. über eine gewisse Anzahl von Bildern oder Modellen konstante Bild- oder Modelldeformationen darstellen läßt. Dann setzen sich die Restfehler der Triangulationspunkte aus einem systematischen und einem zufälligen Anteil zusammen. Die Aufgabe besteht nun darin, aus den tatsächlichen Restfehlern - im Fall der Bündelausgleichung ist das die Differenz zwischen den gemessenen und den ausgeglichenen Bildkoordinaten - die ursprünglichen Bilddeformationen zu erschließen. Die Voraussetzungen sind insofern gegeben, da die Bilder und Modelle in der Blockausgleichung nicht deformiert, sondern nur einer linearen orthogonalen Transformation unterzogen werden.

Für die nachfolgende Diskussion der Deformationen sind die Begriffe 'ursprüngliche' und 'bestimmbare' Deformation von Bedeutung. Die 'ursprüngliche' Deformation ist, um eine Hilfsvorstellung zu gebrauchen, die im Bild vorhandene De-

formation. Sie ist auf die Unzulänglichkeit des mathematischen, insbesondere des funktionalen Modells der Aerotriangulation zurückzuführen. Die 'bestimmbare' Deformation ist das Ergebnis der Berechnungen. Die bestimmbar Deformation ist abhängig von der Art der Berechnung und von einer Vielzahl anderer Parameter, wie Paßpunktbesetzung, Querüberdeckung, etc. Es ist anzustreben, die Ermittlung der Deformation so vorzunehmen, daß der Unterschied zwischen 'ursprünglicher' und 'bestimmbarer' Deformation möglichst gering wird. Unberührt davon sind die Gesichtspunkte der Durchführung in der Praxis.

2. Bei der Selbstkalibrierung wird die Bilddeformation durch eine analytische, vorgegebene Funktion beschrieben. Bei dem Verfahren nach de MASSON d'AUTUME kann die Bestimmung der Deformation direkt, ohne analytische Formulierung, erfolgen. Dazu werden die Bilder bzw. Modelle in Felder eingeteilt. Die Größe der Felder wird so gewählt, daß man mit hinreichender Genauigkeit die systematischen Fehler im Feld als gleich annehmen kann. Für den Oberschwabentest bietet sich die Methode der Feldeinteilung an, da die überwiegende Mehrzahl der Verknüpfungspunkte infolge gezielter Befliegung und einer regelmäßigen Signalisierung in bestimmten Bereichen im Bild oder Modell abgebildet werden.

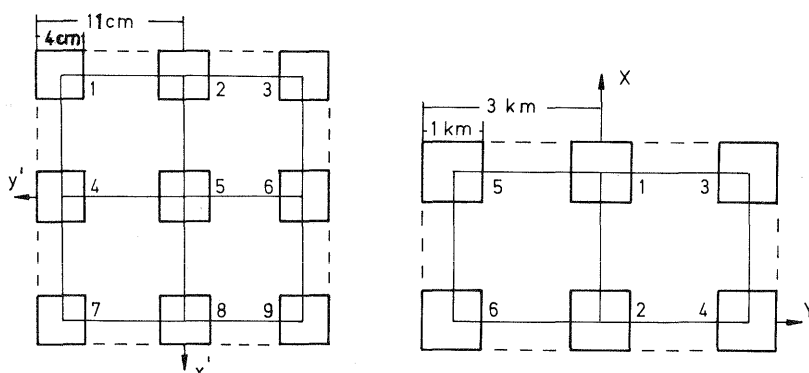


Abb. 3.1 Einteilen der Bilder und Modelle in Bereiche

Zur Bestimmung der Bild- und Modelldeformationen werden die Fehlervektoren der Verknüpfungspunkte nach den Feldern, in denen die Verknüpfungspunkte liegen, sortiert. Für eine bestimmte Anzahl von Bildern bzw. Modellen werden die Fehlervektoren, getrennt nach den einzelnen Feldern, aufsummiert und gemittelt (vgl. Abb. 3.2). Für die Bestimmung der Modelldeformation mußten sämtliche Modelle auf ein durch den Abstand der Projektionszentren definiertes, einheitliches Bezugsmodell transformiert werden. Bei den Bildern ist ein Bildkoordinatensystem durch die Rahmenmarken vorgegeben.

3. Die Analyse kann nun in der Weise modifiziert werden, daß man diese nicht für den gesamten Block, sondern für die einzelnen Streifen getrennt durchführt. Grundsätzlich ist die Wahl der einzelnen Bild(Modell-)gruppen von der Forderung nach einer genügenden Anzahl von Punkten zur sicheren Bestimmung der Bild- und Modelldeformationen abhängig. Darüber hinaus ist auch die Konstanz der Bild- und Modelldeformationen für die Größe der Bild- und Modellgruppen von Bedeutung.

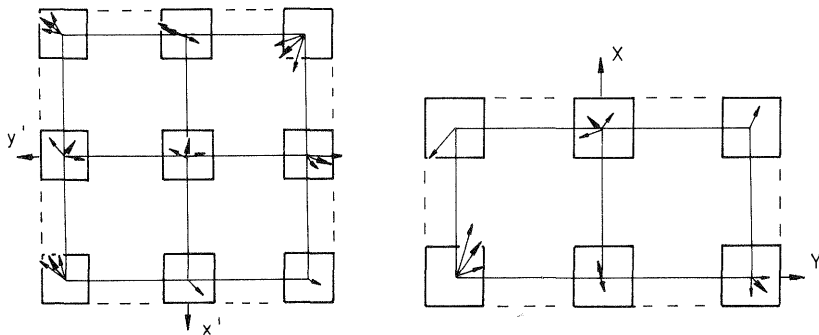


Abb. 3.2 Berechnung der systematischen Bild(Modell-)deformationen durch Mittelbildung

1.1 Durchführung

1. Die Analyse der Bild- und Modelldeformationen wird mit sämtlichen Oberschwabenblöcken, nämlich den WW-Blöcken Frankfurt, Wien und WW ($q = 60\%$) und den ÖWW-Blöcken Den Haag, Delft und ÖWW ($q = 60\%$) durchgeführt. Von diesen Blöcken werden die Paßpunktversionen 0, 1 und 5 bearbeitet. Das Datenmaterial der ersten Bearbeitungsphase wird ohne Änderungen als Ausgangsmaterial übernommen.

Zur Auswahl der PP-Versionen werden folgende Gesichtspunkte berücksichtigt. Die beste Bestimmung der Bild- und Modelldeformationen ist bei der PP-Version 0 möglich, wo alle bekannten terrestrischen Punkte als Paßpunkte eingeführt werden. Dieser Version gilt hier das primäre wissenschaftliche Interesse. Die PP-Version 1 hat in der Lage dichte Randbesetzung. Dieser Paßpunktbesetzung kommt als Standardfall besondere Bedeutung zu und wird deshalb in die Betrachtungen einbezogen. Da die Zahl der PP-Versionen aufgrund des hohen Arbeitsaufwandes beschränkt werden muß, wird zusätzlich nur noch die am schwächsten besetzte PP-Version, nämlich die PP-Version 5, bearbeitet.

Es ist offensichtlich, daß mit dieser Auswahl nicht das gesamte Spektrum der PP-Verteilungen behandelt werden kann. Doch erhält man mit den Ergebnissen einen Rahmen, in dem dann die anderen Fälle beurteilt werden können.

2. Bei dem Verfahren nach de MASSON d'AUTUME wird die simultane Analyse und Korrektur der systematischen Bild- und Modelldeformationen der Selbstkalibrierung in verschiedene Schritte zerlegt, nämlich in die Standardblockausgleichung und die nachfolgende Analyse und Korrektur der Deformation mit erneuter anschließender Standardblockausgleichung. Da in den Verbesserungen v der Bild- und Modellkoordinaten nur ein Teil der Deformation ersichtlich ist, wird eine iterative Berechnung notwendig. In der Regel waren bei den Berechnungen für das Oberschwabenmaterial zwei Iterationen ausreichend. Danach sind die aus den Restfehlern bestimmbaren systematischen Deformationen vernachlässigbar klein. In Tabelle 3.1 ist für den WW-Block Frankfurt, Bündel, PP-Version 0, ein Beispiel für die iterative Berechnung der Bilddeformation gegeben.

Bereich	1. Analyse	2. Analyse	3. Analyse	4. Analyse	Bild- deformation	
x	1	+1.1	+0.9	-0.1	-0.1	+1.8
	2	+0.6	+0.2	-0.1	-0.1	+0.6
	3	+6.0	+0.8	-0.3	-0.1	+6.4
	4	-3.8	-1.4	+0.2	+0.3	-4.7
	5	-1.1	-0.5	+0.1	+0.2	-1.3
	6	+3.4	+0.4	-0.2	-0.2	+3.4
	7	-7.4	-2.2	-1.4	-1.2	-12.2
	8	+0.6	+0.3	-0.1	-0.1	+0.7
	9	-0.3	+0.1	±0	+0.5	+0.3
y	1	+6.8	+1.7	±0	+0.2	+8.7
	2	+5.0	+0.7	+0.4	+0.4	+6.5
	3	+3.1	+0.7	+0.5	+0.5	+4.8
	4	+0.6	+0.7	+0.4	+0.4	+2.1
	5	-2.5	+0.1	-0.4	-0.3	-3.1
	6	-6.4	-1.5	-0.2	-0.2	-8.3
	7	+0.2	±0	+0.5	+0.8	+1.3
	8	-2.1	-0.8	±0	+0.3	-2.6
	9	-2.5	-0.2	-0.4	-0.3	-3.4

Tabelle 3.1 Iterative Berechnung der systematischen Bilddeformationen
Beispiel: WW-Frankfurt, Version 0, in μm

An dem in Tabelle 3.1 gegebenen Beispiel wird deutlich, daß der Hauptanteil der systematischen Deformation bei der ersten Analyse erfaßt wird, andererseits die Bestimmung der Deformation an einigen Punkten auch nach der dritten Iteration noch nicht gegen null konvergiert. Allerdings sind die Beträge der Bild- und Modelldeformationen nach der 2. Iteration schon so gering, daß diese nicht mehr signifikant sind. Durch Anbringen eines Überkorrekturfaktors bei der ersten Korrektur kann die Zahl der Iterationen verringert werden.

3. Bei der Analyse der Bilddeformationen hat sich ergeben, daß diese kammerfest sind. Die Bilddeformationen folgen somit der Drehung der Kammer bei einem Wechsel der Flugrichtung. Da andererseits das Bild- und das Modellsystem der Messung über den gesamten Block gleich ausgerichtet ist, muß die Drehung des Kammer-systems gegenüber dem Bild- bzw. Modellsystem bei der Bestimmung der Bild- und Modelldeformationen berücksichtigt werden. Insbesondere dann, wenn zur Bestimmung der Bild- und Modelldeformationen Bilder bzw. Modelle mehrerer Streifen mit unterschiedlichen Flugrichtungen zusammengefaßt werden.

4. Für das Oberschwabenmaterial wurden die Deformationen für die einzelnen Streifen getrennt und für den gesamten Block gemeinsam ermittelt. Ein Flugstreifen ist eine homogene Bildgruppe, da die Bilder in der Regel in kurzen Abständen nacheinander aufgenommen werden. Dies bedeutet, daß die äußeren atmosphärischen Bedingungen, die Prozesse der Filmentwicklung, das Filmmaterial, etc., ähnlich sind. Es ist daher zu erwarten, daß die systematischen Bild- und Modelldeformationen in einem Flugstreifen konstant sind. Da andererseits zur Bestimmung der Bild- und Modelldeformationen eine gewisse Anzahl von Bildern und Modellen notwendig sind, wird der Flugstreifen als kleinste Bild- bzw. Modellgruppe für die Bestimmung der systematischen Deformationen gewählt.

Die Bild- und Modelldeformationen der Streifen im Block werden zusammengefaßt und es wird das Blockmittel berechnet. Ergeben sich Deformationen, die über den gesamten Block konstant sind, so ist die Angabe des Blockmittels zur Beschreibung der systematischen Deformationen ausreichend.

2. Systematische Bild- und Modelldeformationen: Zusammenstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der empirisch nach dem im Abschnitt 1 beschriebenen Verfahren ermittelten Bild- und Modelldeformationen sind für alle Blöcke und alle Paßpunktversionen in den Tabellen 3.2 - 3.17 zahlenmäßig aufgeführt. Die Tabellen 3.2 - 3.13 findet man im Anhang im Anschluß an Kapitel V.

In einer stichwortartigen Zusammenfassung sei der Inhalt der Tabellen kurz beschrieben:

In den Tabellen 3.2 - 3.5 findet man die Streifenmittel der Bilddeformationen und in den Tabellen 3.6 - 3.9 die Streifenmittel der Modelldeformationen für die Paßpunktversion 0.

In den Tabellen 3.10 - 3.11 und 3.12 - 3.13 sind die Bild- und Modelldeformationen für die Streifen gleicher Flugrichtung gemittelt und zusammengefaßt worden. In den Tabellen 3.14 - 3.17 sind die Bild- und Modelldeformationen für den gesamten Block dargestellt (Paßpunktversion 0, 1 und 5).

Die graphische Darstellung der über den jeweiligen Gesamtblock gemittelten systematischen Bild- und Modelldeformationen für die Paßpunktversionen 0, 1 und 5 findet man in den Abbildungen 3.3 - 3.5.

3. Beschreibung der systematischen Bild- und Modelldeformationen

Für die Beschreibung und die Diskussion der Deformationen in diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der bestmöglichen Bestimmung benutzt. Die bestmögliche Analyse der Deformation ist bei den Blöcken mit Querüberdeckung $q = 60\%$ und Paßpunktversion 0 möglich. Diese Feststellung wird in Abschnitt 4 näher begründet.

Zur Beschreibung der Deformationen und deren Eigenschaften wird hier in der Regel auf die analysierten Werte an den Standardpunkten zurückgegangen. Für eine Untersuchung der Deformation auf bestimmte Deformationstypen, wie z.B. die Affinität, ist diese Darstellungsweise jedoch nicht geeignet. Deshalb wird zu diesem Zweck die Deformation als Polynom nach EBNER [19] dargestellt. Die Polynome beziehen sich ebenfalls auf die 6 Standardpunkte im Modell (bzw. 9 Punkte im Bild). Die Wirkung der einzelnen Parameter im Bild und im Modell ist in den Abbildungen 3.6 und 3.7 dargestellt. Die Formeln findet man in Kapitel IV, Abschnitt 1.2.

Block Paßpunkt- version	Frankfurt, q = 20 %			Wien, q = 20 %			WW, q = 60 %		
	0	1	5	0	1	5	0	1	5
Standard- punkt									
x									
1	+1.8	-0.1	-0.2	+6.0	+3.2	+0.1	+4.4	+4.4	+3.4
2	+0.6	+0.7	+0.8	+0.9	+0.8	+0.8	-0.7	-1.7	-4.1
3	+6.4	+8.5	+0.1	+6.8	+6.7	-0.1	+6.8	+6.2	+1.0
4	-4.7	-5.0	-0.5	-2.5	-2.6	-0.7	-3.9	-3.5	-0.7
5	-1.3	-1.5	-1.6	-1.7	-1.6	-1.6	-1.6	-2.2	-1.4
6	+3.4	+4.4	+0.5	+2.8	+2.3	+0.4	+2.8	+2.4	-0.1
7	-12.2	-7.7	±0.0	-7.7	-6.2	+0.5	-10.0	-9.8	-3.4
8	+0.7	+0.9	+0.7	+0.9	+0.8	+0.7	+2.7	+2.6	+5.6
9	+0.3	-0.8	-0.4	-2.3	-3.3	-0.4	-2.0	-2.5	-1.8
y									
1	+8.7	+7.7	+1.6	+7.2	+5.9	+0.7	+7.9	+6.1	+1.5
2	+6.5	+5.6	+1.7	+2.4	+2.2	+0.4	+3.6	+2.9	+0.1
3	+4.8	+3.2	+2.7	+1.4	+1.2	+2.8	+3.5	+4.1	+3.4
4	+2.1	+0.7	-2.1	+2.9	+1.6	-1.5	+2.1	+1.9	-1.2
5	-3.1	-2.8	-3.0	-2.4	-2.6	-2.2	-3.2	-3.5	-3.5
6	-8.3	-8.2	-5.8	-9.2	-9.1	-5.5	-8.3	-7.7	-5.1
7	+1.3	-0.4	+0.8	+3.0	+2.2	+0.8	+1.7	+2.7	+1.6
8	-2.6	-2.6	+1.6	+0.1	+0.7	+1.8	-1.8	-1.5	+1.1
9	-3.4	-2.7	+3.2	-1.3	-1.2	+3.5	-1.8	-1.6	+4.1

Tabelle 3.14 Systematische Bilddeformationen der Weitwinkelblöcke Frankfurt, Wien und WW-Gesamtblock (q = 60 %); (in µm)

Block	Paßpunkt- version	Den Haag, q = 20 %			Delft, q = 20 %			ÜWW, q = 60 %		
		0	1	5	0	1	5	0	1	5
	Standard- punkt									
x	1	+8.6	+7.4	+1.4	+4.9	+3.9	+1.8	+7.4	+6.7	+4.5
	2	+2.5	+2.6	+2.5	+1.4	+1.4	+2.4	-1.4	-2.2	-5.6
	3	+12.6	+11.3	+1.1	+9.4	+8.1	+1.2	+12.0	+10.5	+4.3
	4	-4.2	-4.1	-2.1	-3.7	-3.3	-2.7	-4.1	-3.9	-1.8
	5	-4.6	-4.8	-4.9	-2.9	-3.0	-4.8	-3.9	-3.8	-3.8
	6	+1.6	+0.8	-1.2	+3.5	+3.2	-1.2	+2.4	+2.2	+0.1
	7	-10.1	-7.8	+1.5	-9.9	-8.2	+0.8	-10.6	-9.3	-3.3
	8	+2.4	+2.5	+2.5	+1.6	+1.7	+2.7	+6.0	+7.0	+10.3
	9	-6.6	-6.0	-0.2	-4.3	-3.8	+0.3	-6.7	-5.8	-3.7
y	1	+7.2	+5.6	-1.7	+6.2	+5.3	+0.5	+5.9	+4.2	-1.1
	2	+1.8	+1.3	-0.6	+1.8	+1.7	-0.9	+2.1	+1.7	-0.7
	3	-3.6	-2.9	+0.0	-4.8	-4.3	-4.8	-3.6	-3.5	-2.0
	4	+13.3	+12.0	+7.1	+8.7	+7.8	+4.2	+10.3	+9.1	+5.2
	5	+1.6	+1.7	+1.6	+1.6	+1.8	+1.8	+1.6	+1.6	+1.7
	6	-7.7	-7.1	-1.9	-2.5	-1.1	+2.3	-4.2	-3.1	+0.8
	7	-2.6	-2.7	-5.7	-1.6	-1.9	-4.1	-2.6	-3.2	-4.8
	8	-3.6	-3.0	-1.1	-3.8	-3.6	-1.0	-4.3	-4.0	-1.4
	9	-6.5	-6.8	+1.3	-6.7	-5.5	+1.6	-6.2	-4.7	+0.9

Tabelle 3.15 Systematische Bilddeformationen der Oberweitwinkelblöcke
Den Haag, Delft und ÜWW-Gesamtblock (q = 60 %); (in µm)

Block Paßpunkt- version		Frankfurt, q = 20 %			Wien, q = 20 %			WW, q = 60 %		
		0	1	5	0	1	5	0	1	5
Projek- tions- zentren	x	-5.1	-5.1	-7.0	-3.1	-3.2	-4.3	-4.2	-4.5	-6.0
	y	+4.0	+4.3	-4.6	+0.9	+1.2	+0.3	+2.5	+2.6	+1.2
	z	-1.1	-1.2	+2.0	-2.7	-2.6	-2.3	-1.4	-1.3	-1.4
Standard- punkt										
x	1	-2.2	-3.2	-0.3	-1.8	-1.6	+0.3	-1.4	-1.2	+0.8
	2	+2.2	+3.2	+0.3	+1.8	+1.6	-0.3	+2.6	+2.6	+0.8
	3	-0.3	+0.4	+5.8	+2.6	+2.4	+4.8	+1.8	+1.9	+5.1
	4	-3.7	-4.4	-4.8	-3.8	-3.6	-5.0	-4.2	-4.2	-5.2
	5	-5.8	-6.0	-5.6	-5.9	-5.7	-4.5	-5.9	-5.9	-5.0
	6	+10.1	+9.5	+6.0	+7.5	+7.7	+4.6	+8.6	+8.6	+5.5
y	1	-2.8	-3.0	-0.6	-0.6	-1.1	-0.1	-3.8	-3.3	-1.9
	2	+2.8	+3.0	+0.6	+0.6	+1.2	+0.1	-0.5	-0.4	-1.8
	3	+0.8	+0.2	+0.2	+2.7	+1.0	+0.5	+2.8	+2.1	+2.2
	4	+6.1	+4.0	-0.2	+3.4	+1.8	-0.3	+5.4	+4.8	+1.6
	5	-3.4	-3.7	-0.4	-1.9	-3.4	-0.7	-2.0	-2.5	+0.8
	6	+2.1	+1.4	+0.4	+1.8	+0.4	+1.1	+2.4	+1.9	+1.8
z	1	-2.3	-2.3	-2.4	-2.2	-2.2	-2.0	+5.0	+5.0	+4.1
	2	+2.3	+2.3	+2.4	+2.2	+2.1	+2.0	+10.3	+10.0	+9.5
	3	+0.6	+0.5	+0.5	+1.7	+2.1	+2.2	-2.8	-2.7	-2.2
	4	-0.6	-0.7	-0.7	-2.3	-2.4	-2.8	-5.3	-5.2	-4.8
	5	+1.2	+1.3	+1.3	-0.7	-0.9	-1.0	-3.2	-3.4	-3.2
	6	-1.5	-1.3	-1.2	+2.1	+1.2	+1.5	-3.8	-3.8	-3.7

Tabelle 3.16 Systematische Modelldeformationen der Weitwinkelblöcke
Frankfurt, Wien und WW-Gesamtblock (q = 60 %); (in μm)

Block Paßpunkt- version		Den Haag, q = 20 %			Delft, q = 20 %			ÜWW, q = 60 %		
		0	1	5	0	1	5	0	1	5
Projek- tions- zentren	x	-0.1	-0.3	-8.4	-1.1	-1.3	-3.5	+0.6	-0.2	-3.6
	y	+0.5	+0.4	-0.2	+2.8	+2.5	+0.1	+1.3	+1.4	-0.5
	z	-3.1	-2.9	-5.2	-3.3	-3.4	-3.3	-2.8	-2.9	-3.1
Standard- punkt x	1	-4.0	-3.9	-0.5	-2.7	-2.6	-0.1	-2.2	-2.4	-0.4
	2	+4.0	+3.9	+0.5	+2.7	+2.5	±0.0	+4.1	+3.6	+0.8
	3	-8.5	-8.3	-3.6	-8.5	-8.6	-4.8	-8.4	-8.2	-4.1
	4	+5.5	+5.3	+3.1	+6.4	+6.1	+4.7	+6.4	+5.9	+4.2
	5	+0.8	+1.1	+3.2	+3.3	+3.9	+4.8	+2.7	+2.8	+4.2
	6	+1.9	+1.6	-2.7	-0.6	-1.1	-4.7	+1.2	+1.3	-3.5
y	1	-2.1	-1.9	-0.1	-1.7	-1.5	+0.7	-1.6	-2.3	-0.2
	2	+2.1	+1.9	+0.1	+1.7	+1.5	-0.7	+2.2	+1.5	-0.4
	3	+3.5	+3.1	+2.6	+1.5	+1.4	+2.0	+3.0	+2.5	+2.6
	4	+1.4	+0.8	-3.0	+3.4	+3.4	-0.7	+2.7	+2.1	-1.9
	5	-8.8	-8.1	-3.3	-7.1	-7.2	-3.0	-8.1	-8.1	-3.7
	6	+2.6	+2.8	+3.4	+2.2	+2.4	+1.7	+2.1	+2.2	+2.2
z	1	-4.0	-4.2	-4.3	-3.3	-3.2	-3.2	+5.0	+4.8	+3.4
	2	+4.0	+4.2	+4.3	+3.3	+3.1	+3.2	+12.2	+12.0	+10.2
	3	+0.8	+0.5	+0.6	+1.1	+1.3	+1.0	-3.4	-3.4	-2.6
	4	-0.4	-0.4	-0.2	-0.7	-0.9	-0.8	-4.9	-5.0	-4.3
	5	-0.6	-0.5	-0.4	+0.3	+0.4	+0.4	-4.6	-4.2	-3.2
	6	±0.0	+0.2	+0.4	-0.8	-1.3	-0.9	-4.9	-4.8	-4.0

Tabelle 3.17

Systematische Modelldeformationen der Überweitwinkelblöcke
Den Haag, Delft und ÜWW-Gesamtblock (q = 60 %); (in µm)

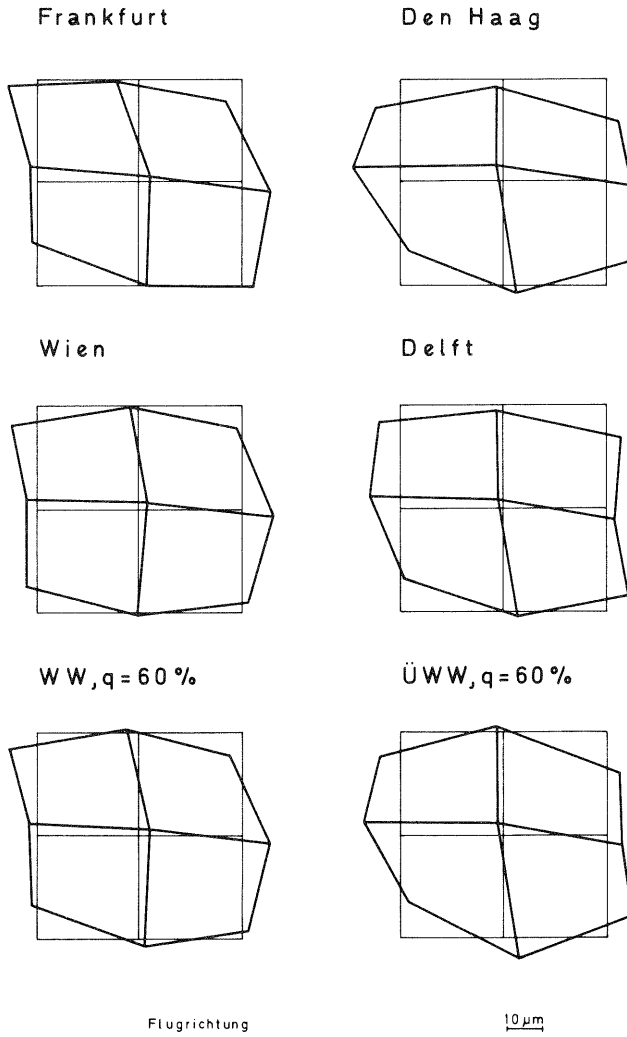


Abb. 3.3 Systematische Bilddeformationen
Mittel über den Gesamtblock

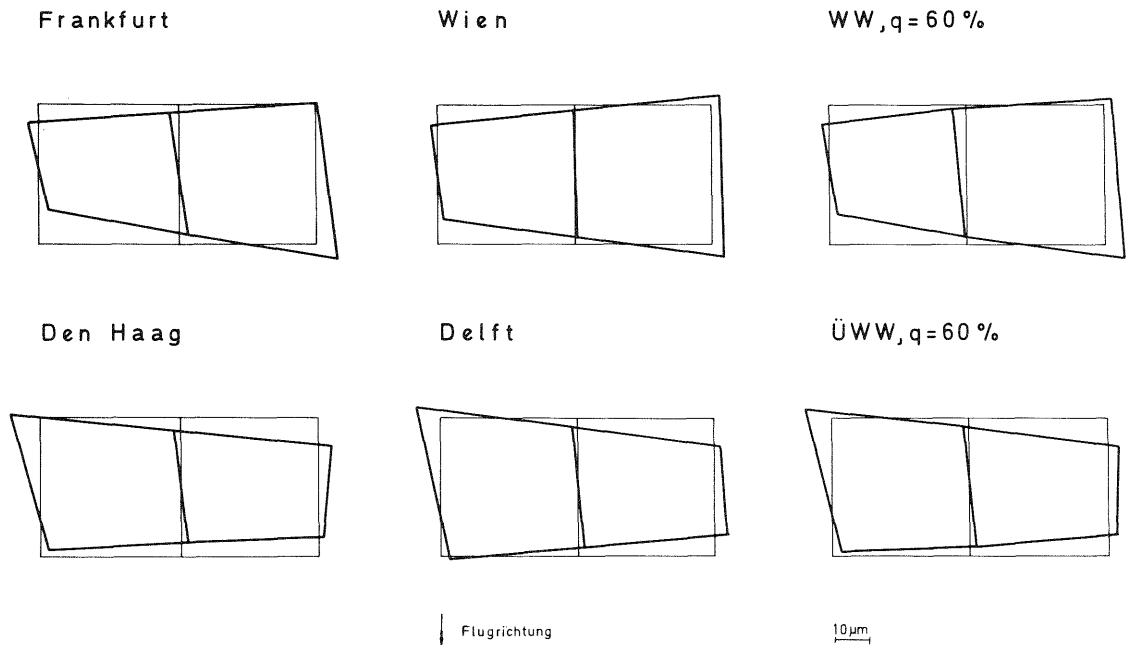
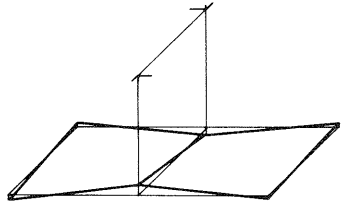
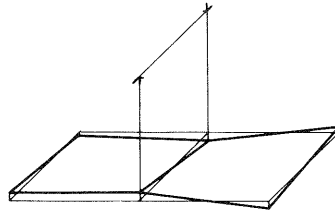


Abb. 3.4 Systematische Modelldeformationen - Lage Mittel über den Gesamtblock

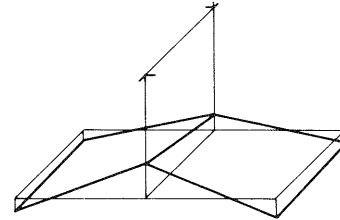
Frankfurt



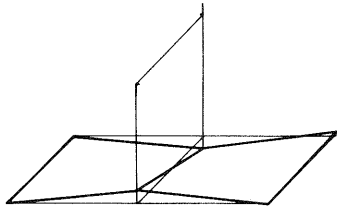
Wien



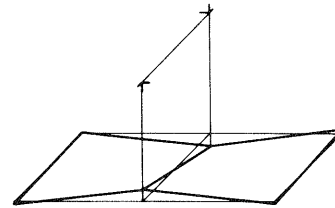
WW, $q=60\%$



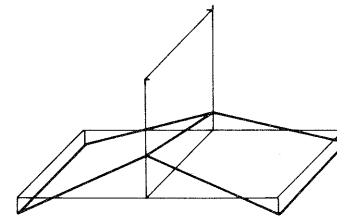
Den Haag



Delft



ÜWW, $q=60\%$



Flugrichtung

1,0 μm

Abb. 3.5 Systematische Modelldeformationen - Höhe Mittel über den Gesamblock

3.1 Typ und Betrag der systematischen Bild- und Modelldeformationen

Für die Bild- und Modelldeformationen des WW-Blockes und des ÜWW-Blockes mit $q = 60\%$ Querüberdeckung und Paßpunktversion 0 wurden die Polynomkoeffizienten der orthogonalen Polynome nach EBNER [19] berechnet. Um sich eine Vorstellung über die Wirkung der einzelnen Parameter im Bild und Modell machen zu können, wurde für jeden Parameter der maximale Korrekturbetrag berechnet. An welchem der Standardpunkte der Korrekturbetrag den maximalen Wert erreicht, ist einfach anhand der Abbildungen 3.6 und 3.7 feststellbar.

Polynomkoeffizienten	WW, $q = 60\%$, PP-Vers. 0		ÜWW, $q = 60\%$, PP-Vers. 0	
	Polynom-K.	max.Betrag $ \mu\text{m} $	Polynom-K.	max.Betrag $ \mu\text{m} $
b_1	$-3.53 \cdot 10^{-2}$	3.2	$-5.27 \cdot 10^{-2}$	4.7
b_2	$-3.15 \cdot 10^{-2}$	2.8	$-3.01 \cdot 10^{-2}$	2.7
b_3	$-5.45 \cdot 10^{-5}$	0.6	$-1.83 \cdot 10^{-4}$	2.0
b_4	$-1.12 \cdot 10^{-4}$	1.2	$1.71 \cdot 10^{-6}$	0.0
b_5	$-5.56 \cdot 10^{-5}$	0.3	$-2.06 \cdot 10^{-5}$	0.1
b_6	$6.56 \cdot 10^{-4}$	3.5	$-4.96 \cdot 10^{-4}$	2.7
b_7	$-1.03 \cdot 10^{-5}$	5.6	$1.77 \cdot 10^{-5}$	9.5
b_8	$-4.42 \cdot 10^{-6}$	2.4	$-5.45 \cdot 10^{-6}$	2.9
b_9	$1.03 \cdot 10^{-6}$	0.6	$1.54 \cdot 10^{-6}$	0.8
b_{10}	$-2.40 \cdot 10^{-7}$	0.1	$5.83 \cdot 10^{-7}$	0.3
b_{11}	$-3.43 \cdot 10^{-8}$	1.0	$-7.35 \cdot 10^{-8}$	2.1
b_{12}	$2.78 \cdot 10^{-8}$	0.8	$-3.01 \cdot 10^{-8}$	0.9

Tabelle 3.18 Polynomkoeffizienten der systematischen Bilddeformationen (Paßpunktversion 0)
(Die Polynomkoeffizienten beziehen sich auf die Korrektur in μm und auf die Bildkoordinaten in mm)

Anhand der Abbildung 3.3 erkennt man, daß die Bilddeformationen für den WW-Block und den ÜWW-Block vergleichbar sind. Bestimmende Deformationstypen sind eine tonnenartige Verformung (Parameter b_7, b_8), eine Affinität (Parameter b_1, b_2) und eine Durchbiegung in Richtung der Flugachse (Parameter b_6). Die Vorzeichen der Durchbiegung sind allerdings für WW und ÜWW verschieden.

Die Modelldeformationen der Lage stellen sich in erster Linie als affine (Parameter p_1 und p_2) und trapezförmige (Parameter p_3) Verformung der Modelle dar (siehe Abb. 3.4). Die Parameter p_8 beim WW-Block und p_4 beim ÜWW-Block sind noch besonders wirksam. Die charakteristische Gestalt der Höhendeformation der Modelle (siehe Abb. 3.5), eine zylindrische Durchbiegung, wird durch den Parameter h_3 beschrieben. Die Deformation der WW-Modelle und der ÜWW-Modelle sind sich nach Typ und Betrag ähnlich (ausgenommen ist die trapezartige Verformung, hier wechselt das Vorzeichen).

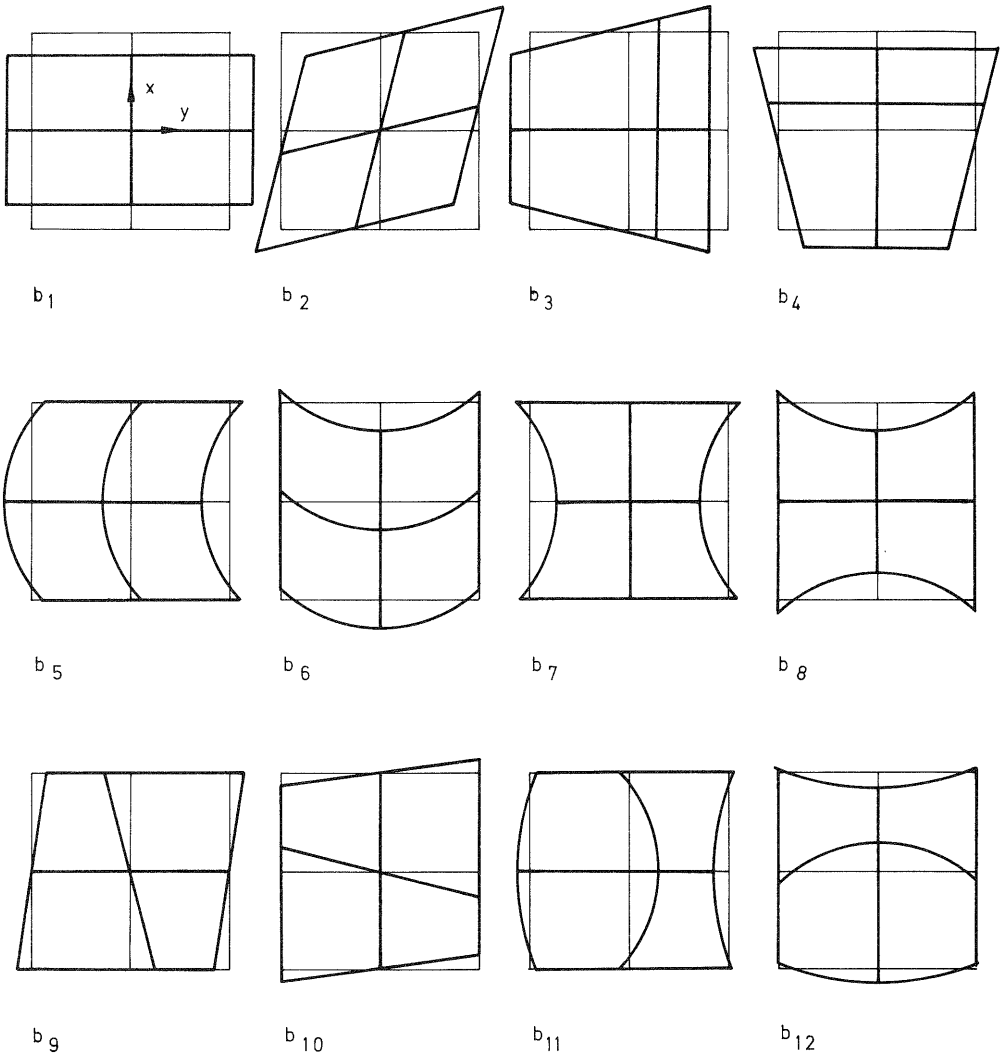


Abb. 3.6 Wirkung der zusätzlichen Parameter zur Beschreibung der Bilddeformationen, nach EBNER [19]

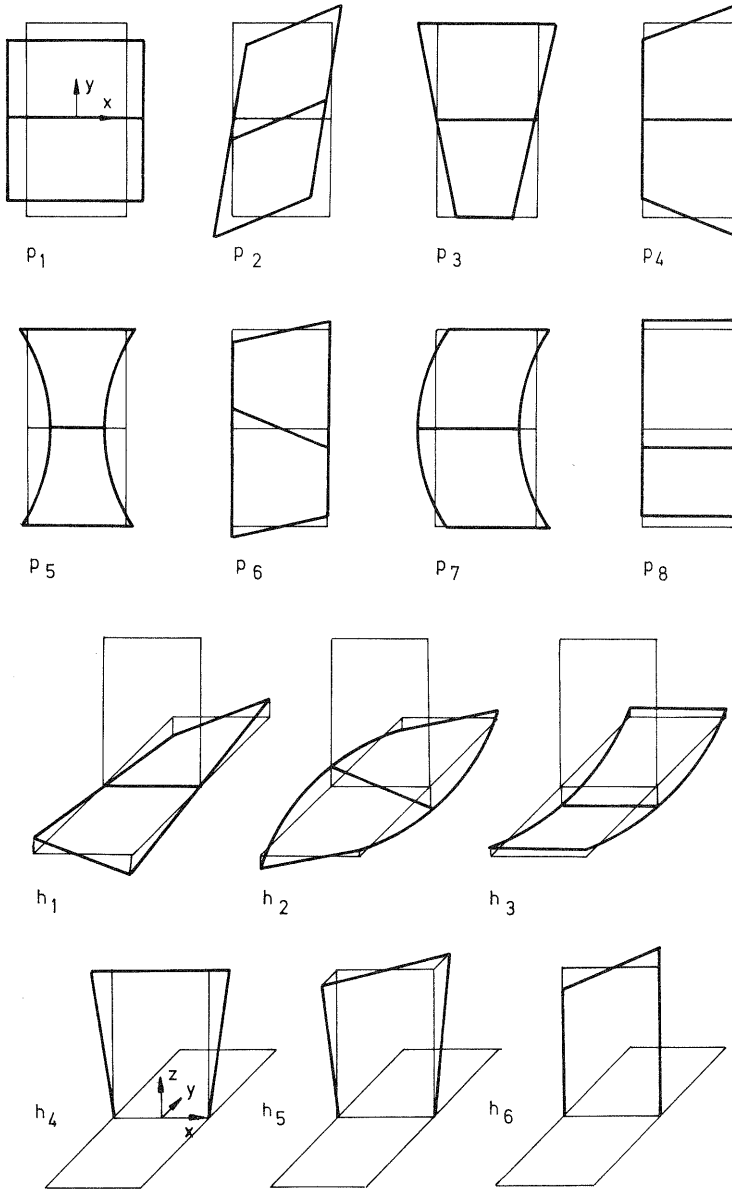


Abb. 3.7 Wirkung der zusätzlichen Parameter zur Beschreibung der Modelldeformationen, nach EBNER [19]

Polynom- koeffi- zienten	WW, q = 60 %, PP-Vers. 0		ÜWW, q = 60 %, PP-Vers. 0	
	Polynom-K.	max.Betrag μm	Polynom-K.	max.Betrag μm
p ₁	-5.38 10 ⁻⁵	2.2	-8.31 10 ⁻⁵	3.4
p ₂	-4.14 10 ⁻⁵	1.7	-5.31 10 ⁻⁵	2.2
p ₃	5.16 10 ⁻⁸	5.1	-4.10 10 ⁻⁸	4.1
p ₄	4.53 10 ⁻⁹	0.5	2.64 10 ⁻⁸	2.6
p ₅	-5.24 10 ⁻¹³	0.1	-7.34 10 ⁻¹³	0.1
p ₆	-4.20 10 ⁻¹³	0.1	-2.41 10 ⁻¹²	0.4
p ₇	-2.64 10 ⁻⁹	0.4	-2.39 10 ⁻⁹	0.3
p ₈	2.16 10 ⁻⁸	2.9	-1.89 10 ⁻⁹	0.2
h ₁	4.78 10 ⁻⁹	0.5	3.02 10 ⁻⁹	0.3
h ₂	1.44 10 ⁻¹¹	2.3	1.70 10 ⁻¹¹	2.7
h ₃	-5.75 10 ⁻⁸	7.6	-6.57 10 ⁻⁸	8.7
h ₄	-23.8	4.2	+3.4	0.6
h ₅	+14.2	2.5	+7.4	1.3
h ₆	-7.9	1.4	-15.9	2.8

Tabelle 3.19 Polynomkoeffizienten der systematischen Modelldeformationen (Paßpunktversion 0)

(Die Polynomkoeffizienten beziehen sich auf die Korrektur in μm und auf die Modellkoordinaten in mm)

Besonders auffallend beim Versuch Oberschwaben sind die relativ großen Beträge der Bild- und Modelldeformationen, die durchaus 10 μm übersteigen. So erhält man als maximale systematische Bilddeformation (das ist der maximale Betrag d_{max} der über den gesamten Block gemittelten Deformation an einem Standardpunkt, wobei die Deformation als Vektor aufzufassen ist) für die Blöcke

Frankfurt	$d_{\text{max}} = 12.3 \mu\text{m}$	Den Haag	$d_{\text{max}} = 14.0 \mu\text{m}$
Wien	$d_{\text{max}} = 9.6 \mu\text{m}$	Delft	$d_{\text{max}} = 10.6 \mu\text{m}$
WW, q = 60 %	$d_{\text{max}} = 10.1 \mu\text{m}$	ÜWW, q = 60 %	$d_{\text{max}} = 12.5 \mu\text{m}$

und die maximale Modelldeformation

Frankfurt	$d_{\text{max}} = 10.4 \mu\text{m}$	Den Haag	$d_{\text{max}} = 9.2 \mu\text{m}$
Wien	$d_{\text{max}} = 8.0 \mu\text{m}$	Delft	$d_{\text{max}} = 8.7 \mu\text{m}$
WW, q = 60 %	$d_{\text{max}} = 10.6 \mu\text{m}$	ÜWW, q = 60 %	$d_{\text{max}} = 13.1 \mu\text{m}$

Diese Werte überschreiten zum Teil deutlich die σ_0 -Werte der entsprechenden Blöcke, wie z.B. beim Bündelblock Den Haag ($\sigma_0 = 7.9 \mu\text{m}$ und $d_{\text{max}} = 14.0 \mu\text{m}$).

3.2 Bestimmungsgenauigkeit der systematischen Bild- und Modelldeformationen

Nach Abschnitt 1 wirken sich systematische Bild- und Modelldeformationen in systematischen Anteilen auf die Restfehler nach der Blockausgleichung aus. Die systematischen Anteile werden als konstant und im jeweiligen Bereich als gleich angenommen und können somit durch Berechnung des einfachen arithmetischen Mittels bestimmt werden. Die berechneten Werte wiederum dienen zur Beschreibung der Deformation. Analog der Berechnung wird dann die Bestimmungsgenauigkeit der Deformation durch den mittleren Fehler des arithmetischen Mittels beschrieben. Dazu die folgenden Gleichungen

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{[l]}{n} & l &= \text{Restfehler nach der Blockausgleichung} \\
 v_i &= x - l_i & x &= \text{systematischer Anteil der Restfehler} \\
 & & & \quad (\hat{=} \text{Deformation an einem Standardpunkt}) \\
 m(x) &= \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n(n-1)}} & m(x) &= \text{mittlerer Fehler des arithmetischen} \\
 & & & \quad \text{Mittels}
 \end{aligned}$$

Der mittlere Fehler des arithmetischen Mittels als Genauigkeitsangabe bezieht sich allerdings auf die berechnete, oder allgemeiner, auf die bestimmbare Deformation und nicht auf die wahre Deformation. Oder anders ausgedrückt: Der mittlere Fehler des arithmetischen Mittels gibt nur die Bestimmungsgenauigkeit wieder.

In Tabelle 3.20 ist die Bestimmungsgenauigkeit der systematischen Bild- und Modelldeformationen wiedergegeben, unterteilt nach der Art der Blockausgleichung und nach den verschiedenen Blöcken. Für die angegebenen Werte eines Gesamtblocks sind die mittleren Fehler der arithmetischen Mittel für jeden der Standardbereiche getrennt berechnet worden. Aus diesen Werten ist dann durch quadratische Mittelung ein für das gesamte Bild bzw. Modell einigermaßen repräsentative Wert gebildet. Die Werte für die Einzelstreifen entstanden auf gleiche Weise. Bei der angegebenen Bestimmungsgenauigkeit wurde auch berücksichtigt, daß die systematischen Bild- und Modelldeformationen durch Addition der Zwischenergebnisse der Iterationen berechnet wurden. Die in Tabelle 3.20 angegebenen Werte beziehen sich auf eine iterative Berechnung in zwei Schritten

$$m_x = \pm \sqrt{m_{x_1}^2 + m_{x_2}^2} \quad m_{x_i} = \text{Zwischenergebnisse nach den Iterationen}$$

Die Bestimmungsgenauigkeit der systematischen Bild- und Modelldeformationen ist ausreichend und für alle Blöcke relativ homogen. Im Durchschnitt liegt sie für die Blockmittel bei 0.3 μm und für die Streifenmittel zwischen 0.5 μm - 1.3 μm . Der Unterschied zwischen der Bestimmungsgenauigkeit der Streifenmittel und der Blockmittel liegt daran, daß die Zahl der Beobachtungen n bei der Berechnung der Blockmittel um ein Vielfaches höher sind als bei der Berechnung der Streifenmittel. Im folgenden wird die Bestimmungsgenauigkeit zur Signifikanzprüfung angewandt. Zum Beispiel bei der Untersuchung der Deformation auf Konstanz über den gesamten Block.

Ausgleichung	Frankfurt	Wien	WW, q=60%	Den Haag	Delft	ÜWW, q=60%	
Bündel	m_{x_B}	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	
	m_{y_B}	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	
	m_{x_S}	0.5	0.5	1.0	0.8	0.7	1.0
	m_{y_S}	0.6	0.6	1.0	0.9	0.8	1.0
unabh. Modelle	m_{x_B}	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
	m_{y_B}	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3
	m_{z_B}	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3
	m_{x_S}	0.6	0.6	0.7	0.9	0.8	0.9
	m_{y_S}	0.8	0.8	0.9	1.2	1.2	1.3
	m_{z_S}	1.1	0.9	1.2	1.0	0.8	1.2

Tabelle 3.20 Bestimmungsgenauigkeit der systematischen Bild- und Modelldeformationen in $|\mu_m|$ berechnet aus PP-Version 0 (= mittlerer Fehler des arithmetischen Mittels)

m_B = Blockmittel; m_S = Streifenmittel

3.3 Konstanz der systematischen Bild- und Modelldeformationen

Für die Bestimmung der Deformation wäre ein allgemeiner Ansatz notwendig, in dem die Deformation als eine Funktion in Abhängigkeit von der Lage im Bild und von der Lage des Bildes im Block beschrieben wird. Dieser allgemeine Fall wird in der Praxis dahingehend eingeschränkt, daß man die systematischen Fehler für eine Gruppe von Bildern, z.B. einen Flugstreifen, als konstant annimmt. Die Annahme von konstanten systematischen Fehlern innerhalb der Bildgruppe ist zulässig, da der Unterschied zu der allgemeineren Lösung, wie sich zeigen wird, klein ist. In praktischen Beispielen sollte immer geprüft werden, ob die Annahme von konstanten Bild- und Modelldeformationen innerhalb der gewählten Bild- und Modellgruppen gerechtfertigt ist.

3.3.1 Darstellung der systematischen Bilddeformationen im Streifen

Für die Darstellung der Bilddeformation im Streifen wird auf die Restfehler an den Verknüpfungspunkten zurückgegangen. Die Restfehler wurden für jedes Bild gemäß Abschnitt III. 1. den jeweiligen Bereichen zugeordnet und gemittelt. In der Regel sind in jedem Bereich zwei Werte gemessen worden. Die berechneten Werte können als die Bilddeformation eines Einzelbildes bezeichnet werden.

In den Abbildungen 3.8 und 3.9 sind die nach obigem Verfahren ermittelten 'Bilddeformationen' für den Streifen 5 des Blockes WW ($q = 60\%$) und Paßpunktversion 0 dargestellt. Die Werte sind aus den Restfehlern nach der ersten Standardblockausgleichung berechnet worden. Die Auswahl des Streifens erfolgte willkürlich.

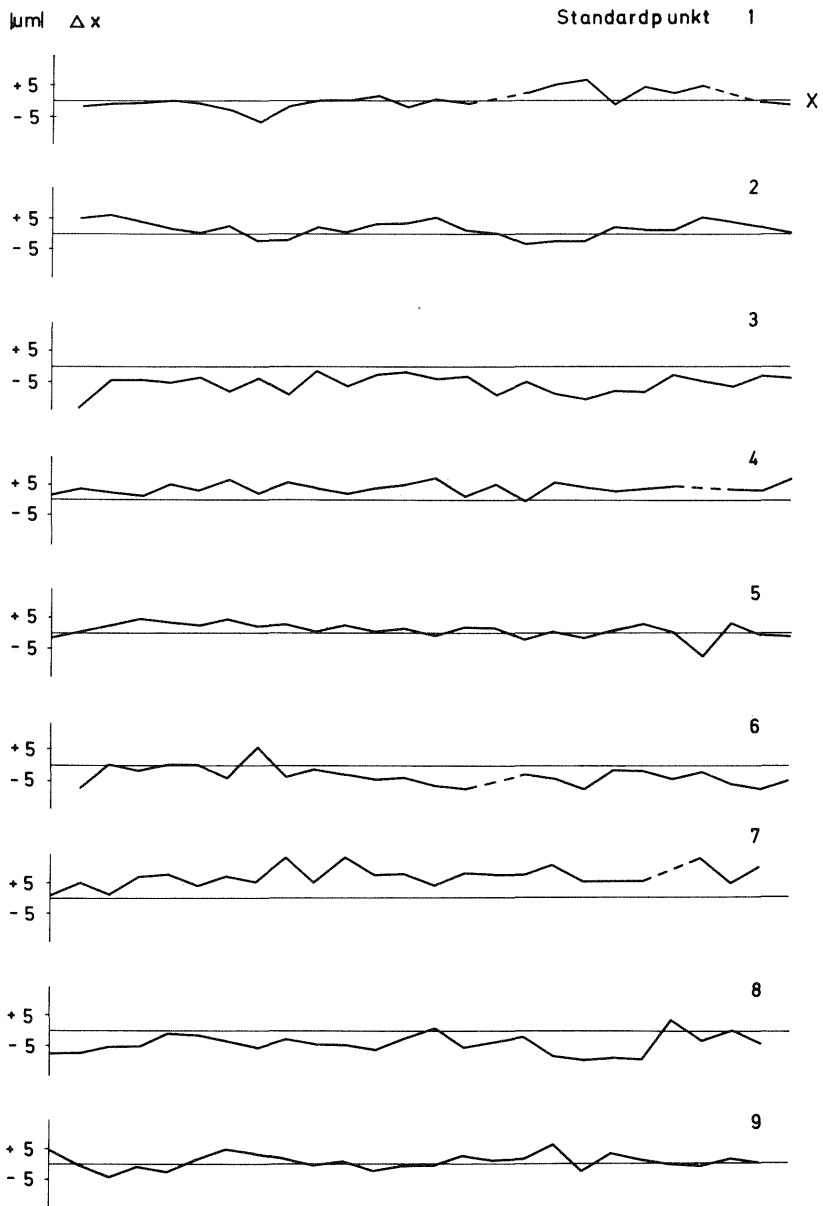


Abb. 3.8 Systematische Bilddeformationen im Streifen 5; WW ($q = 60\%$)
 Darstellung der Fehler Δx an den Standardpunkten 1 - 9
 über die Streifenlänge

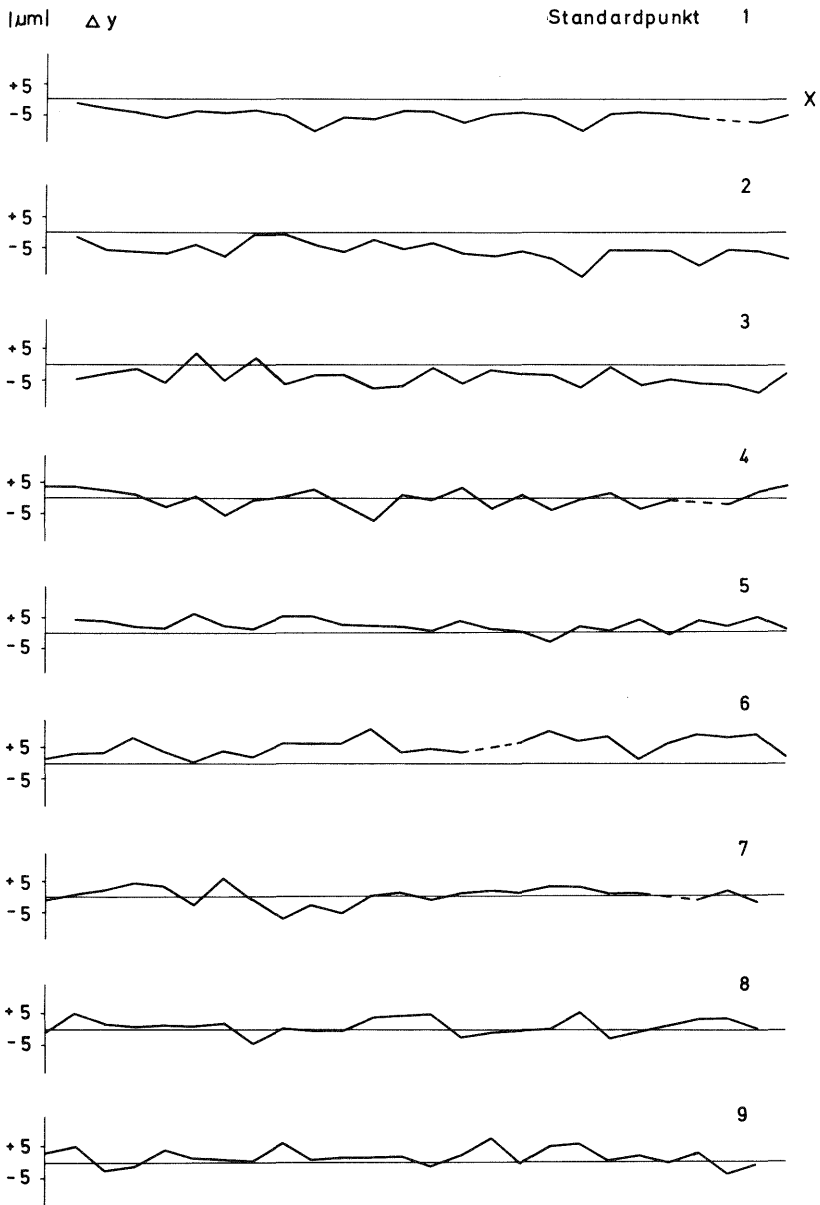


Abb. 3.9 Systematische Bilddeformationen im Streifen 5; WW ($q = 60\%$)
Darstellung der Fehler Δy an den Standardpunkten 1 - 9
über die Streifenlänge

Wie man in den Abbildungen 3.8 und 3.9 erkennt, ist die 'Bilddeformation', durch Fehlervektoren in den Standardpunkten dargestellt, in hohem Maße konstant. Zumal die einzelnen Fehlervektoren noch von zufälligen Anteilen überlagert sind, die in der Größenordnung den systematischen Anteilen entsprechen. Die Systematik ist fast stets durch eine horizontale Regressionsgerade darstellbar. Das bedeutet, daß die systematischen Bilddeformationen innerhalb des Streifens konstant sind.

3.3.2 Konstanz der systematischen Bild- und Modelldeformationen im Block

Um zu prüfen, ob die systematischen Fehler auch über den gesamten Block konstant sind, wurden die Streifenmittel mit dem Blockmittel verglichen. Es wurden die durchschnittlichen Abweichungen der Streifenmittel gegenüber dem Blockmittel berechnet, die in den Tabellen 3.21 und 3.22, nach Bereichen und Koordinaten getrennt, aufgeführt sind. Faßt man die Werte über die Standardbereiche und Koordinaten zusammen, so erhält man die Mittel für die durchschnittlichen Abweichungen t .

Bündelblöcke:

Frankfurt	$t = 0.5 \mu\text{m}$	Den Haag	$t = 0.8 \mu\text{m}$
Wien	$t = 1.2 \mu\text{m}$	Delft	$t = 1.0 \mu\text{m}$
WW, $q = 60 \%$	$t = 1.0 \mu\text{m}$	ÖWW, $q = 60 \%$	$t = 1.2 \mu\text{m}$

Modellblöcke:

Frankfurt	$t = 0.8 \mu\text{m}$	Den Haag	$t = 1.1 \mu\text{m}$
Wien	$t = 1.6 \mu\text{m}$	Delft	$t = 1.3 \mu\text{m}$
WW, $q = 60 \%$	$t = 1.3 \mu\text{m}$	ÖWW, $q = 60 \%$	$t = 1.4 \mu\text{m}$

Die durchschnittlichen Abweichungen $t = \pm \frac{1}{n} \sum |e|$ sind, mit Ausnahme des Blockes Wien, klein und, faßt man die Blöcke nach Ausgleichungsart und Bildwinkel in Gruppen zusammen, auch sehr homogen. Allerdings reicht dieses Fehlermaß nicht aus um zu prüfen, ob sich Streifendeformation und Blockdeformation signifikant unterscheiden.

Dazu wurde mit dem t-Test für unabhängige Zufallsstichproben normalverteilter Grundgesamtheiten die maximalen Differenzen d_{max} berechnet, für die die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte von Streifenmittel und Blockmittel mit einer statistischen Sicherheit von 90 % gilt. (Allerdings muß man bei der Anwendung dieser Werte Vorsicht walten lassen, da durch die großen Unterschiede der Stichprobenumfänge sich Abweichungen von der Normalverteilung auswirken können und dadurch möglicherweise ein sogenannter Fehler 2. Art gemacht wird, man also die Nullhypothese fälschlicherweise beibehält. Das heißt, zwischen dem Blockmittel und den Streifenmitteln kann ein signifikanter Unterschied bestehen, den man bei der Anwendung dieses Tests nicht erkennt [41].)

Aus dem Vergleich der maximalen Unterschiede mit den durchschnittlichen Fehlern geht hervor, daß die systematischen Bild- und Modelldeformationen der Streifen insgesamt sich nicht signifikant von dem Blockmittel unterscheiden. Der Betrag der durchschnittlichen Fehler t ist meist nur halb so groß wie die maximal mög-

Standard- bereich		Block	Frankfurt	Wien	WW q = 60 %	Den Haag	Delft	OWW q = 60 %
		x	1	0.5	2.1	1.5	1.2	2.3
	2	0.2	0.2	1.0	0.3	0.3	1.0	
	3	0.8	1.0	1.0	1.2	0.7	1.4	
	4	0.4	1.5	1.1	0.6	1.0	0.8	
	5	0.4	0.3	0.6	0.5	0.5	0.9	
	6	0.2	1.3	0.9	0.5	0.8	0.7	
	7	0.7	1.1	1.0	0.7	1.1	0.8	
	8	0.2	0.2	1.0	0.2	0.3	1.1	
	9	0.8	1.9	1.3	1.4	1.5	1.5	
	Mittel	0.5	1.1	1.0	0.7	0.9	1.2	
y	1	0.7	0.7	1.0	1.3	0.7	1.1	
	2	0.5	1.6	1.5	0.8	0.5	1.0	
	3	0.4	1.8	1.4	0.9	1.0	0.9	
	4	0.4	0.6	0.5	1.1	0.7	1.6	
	5	0.5	1.0	0.9	0.3	0.6	0.5	
	6	0.4	1.0	0.8	1.6	1.5	2.1	
	7	0.7	2.9	1.6	1.3	2.0	1.6	
	8	0.3	2.0	1.3	0.9	1.1	1.0	
	9	0.2	2.2	1.1	1.2	1.0	0.9	
	Mittel	0.5	1.5	1.1	1.0	1.0	1.2	

Tabelle 3.21 Vergleich von Block- und Streifenmittel der systematischen Bilddeformationen (durchschnittliche Abweichungen in μm)

Standard- bereich \ Block		Frankfurt	Wien	WW q = 60 %	Den Haag	Delft	ÖWW q = 60 %
		PZ	x	1.3	1.6	1.8	2.3
	y	1.4	1.1	1.6	1.4	1.5	2.1
	z	1.5	1.4	1.3	1.6	0.9	1.3
	Mittel	1.5	1.4	1.6	1.8	1.3	1.8
x	1	0.4	0.8	0.6	0.8	1.0	1.0
	2	0.4	0.8	0.9	0.8	0.8	1.3
	3	0.6	1.9	1.3	1.2	1.9	1.1
	4	0.7	0.9	0.9	0.6	1.2	1.0
	5	1.0	1.8	1.3	1.7	1.7	2.1
	6	1.2	1.2	1.4	1.5	1.9	1.4
	Mittel	0.7	1.2	1.1	1.1	1.4	1.3
y	1	0.4	1.8	1.0	1.0	0.6	1.2
	2	0.4	1.8	1.9	1.0	0.6	1.3
	3	0.9	3.0	1.4	1.6	1.5	1.7
	4	1.5	2.8	1.6	0.9	2.1	1.4
	5	0.8	2.8	1.2	1.5	1.7	1.2
	6	0.9	1.0	1.3	1.4	2.0	1.5
	Mittel	0.8	2.2	1.4	1.2	1.4	1.4
z	1	1.3	0.8	1.0	1.1	0.7	1.9
	2	1.3	1.4	1.4	1.1	0.7	1.9
	3	0.6	1.7	1.1	1.3	1.6	1.7
	4	0.9	1.4	1.3	1.1	1.3	1.0
	5	1.0	1.9	1.3	1.0	1.0	1.1
	6	1.0	1.9	1.5	1.1	0.9	1.4
	Mittel	1.0	1.5	1.3	1.1	1.0	1.4

Tabelle 3.22 Vergleich von Block- und Streifenmittel der systematischen Modelldeformationen (durchschnittliche Abweichungen in μm)

in m		Frankfurt	Wien	WW, q=60%	Den Haag	Delft	0WW, q=60%
Bündel	x	1.0	0.9	1.2	1.4	1.4	1.8
	y	1.1	1.1	1.2	1.7	1.5	1.7
unabh. Modelle	x	1.0	1.1	1.3	1.5	1.5	1.7
	y	1.5	1.5	1.7	2.1	2.0	2.2
	z	2.0	1.7	2.2	1.8	1.5	2.1

Tabelle 3.23 Maximal zulässiger Unterschied d_{\max} (in μm) zwischen Block- und Streifendeformation bei Gültigkeit der Nullhypothese nach t-Test (Signifikanzniveau 90 %)

lichen Differenzen, die mit dem t-Test berechnet wurden. Davon auszunehmen ist der Block Wien, bei dem die durchschnittlichen Fehler t deutlich größer sind und der t-Test die Ungleichheit der Mittelwerte ergibt.

Diese pauschalen Angaben dürfen allerdings nicht darüber hinwegtäuschen, daß sich die Bild- und Modelldeformationen einzelner Streifen signifikant vom Blockmittel unterscheiden. Deshalb mußte für die Korrektur der systematischen Fehler in jedem Falle geprüft werden, ob der Ansatz von blockinvarianten Parametern gerechtfertigt ist. War diese Voraussetzung nicht erfüllt, mußte streifenweise korrigiert werden.

3.3.3 Zusammenfassung

Allgemein weisen die kleinen Beträge der durchschnittlichen Fehler t in Tabelle 3.21 und 3.22 aus dem Vergleich Blockmittel/Streifenmittel auf die geringe Variation der systematischen Fehler hin. Diese Aussage wird gestützt durch die Darstellung der Bilddeformation im Streifen in den Abbildungen 3.8 und 3.9.

In guter Näherung kann man die systematischen Bild- und Modelldeformationen im Streifen und mit Einschränkungen auch im Block als konstant annehmen. Damit ist die Annahme bei dem Verfahren zur Analyse der systematischen Fehler, wo diese als konstant vorausgesetzt werden, im nachhinein hinreichend bestätigt worden.

3.4 Abhängigkeit der systematischen Fehler von den Projektparametern (Flugparameter)

Neben der Konstanz sind die Abhängigkeiten bzw. die Ursachen der systematischen Deformationen von besonderer Bedeutung, was die Kenntnis der systematischen Fehler betrifft. Die wesentlichen, möglichen Ursachen sind das Aufnahmesystem mit Kammer und Film, die Filmentwicklung und die Kopierprozesse, die atmosphärischen Einflüsse beim Bildflug, Flugzeugabgase und Turbulenzen im Bereich der Objektivöffnung der Kammer, die Fehler des Auswertesystems und die Genauigkeit der terrestrischen Paßpunktkoordinaten.

Die Möglichkeiten des Oberschwabenmaterials zur Untersuchung der Abhängigkeiten der systematischen Fehler sind, wie sich zeigen wird, beschränkt. Die Komponenten des photogrammetrischen Systems, die in die Untersuchungen miteinbezogen werden können, sind

- das Aufnahmesystem mit Kammer und Film einschließlich der Flugrichtung
- die atmosphärischen Bedingungen während der Aufnahme
(Datum, Wetter, Tageszeit, Ort)
- das Auswertesystem
- die terrestrischen Paßpunktkoordinaten
(Netzspannungen, systematische Fehler des geodätischen Netzes).

3.4.1 Aufnahmesystem und Filmverarbeitung

Beim Versuch Oberschwaben wurde ein dominierender Einfluß des Aufnahmesystems auf die systematischen Fehler festgestellt. Das bedeutet, auf das kammerfeste Bildkoordinatensystem (das Bildkoordinatensystem ist so definiert, daß die positive bzw. negative x-Richtung immer in Flugrichtung zeigt) bezogen keine, auf das Geländesystem bezogen eine starke Abhängigkeit der Bild- und Modelldeformationen von der Flugrichtung. Die Berechnung der Blockmittel der Bild- und Modelldeformationen durch Mittelung der Streifenmittel führt daher nur unter Berücksichtigung der Flugrichtung zu einem repräsentativen Ergebnis. Faßt man die systematischen Bild- oder Modelldeformationen der Streifen unter Berücksichtigung der Flugrichtung zusammen und vergleicht das Blockmittel, wiederum unter Berücksichtigung der Flugrichtung mit den Streifenmitteln, so erhält man durchschnittliche Abweichungen der entsprechenden Werte von rund $1.0 \mu\text{m}$ (PP-Version 0).

Da nicht mit einer Reseaukammer befliegen wurde, kann der Filmverzug nicht von der systematischen Bilddeformation abgespalten werden. Andererseits ist es auch nicht möglich, den Anteil der Kammer (nicht vollständig kompensierte Verzeichnung, Unebenheiten der Andruckplatte, usw.) an den analysierten Bild- und Modelldeformationen separat darzustellen.

3.4.2 Atmosphärische Bedingungen

Für die Prüfung des Einflusses der unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen an den verschiedenen Flugtagen auf die systematische Bilddeformation wurden die Werte des ÜWW-Blockes Den Haag herangezogen. Vom Block Den Haag wurden die ersten vier Streifen am 10.4.1969, die restlichen Streifen am 26.4.1969 befliegen.

Für den Vergleich der systematischen Bilddeformation an beiden Flugtagen wurde der t-Test angewandt. Dieser Test erlaubt die Prüfung von Stichproben auf Gleichheit der Mittelwerte. Für die Werte von Block Den Haag ergibt sich bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0.1$, bei zweiseitigem Test, die Gültigkeit der Nullhypothese (Gleichheit der Mittelwerte). Dies bedeutet, daß ein signifikanter Unterschied der systematischen Bilddeformation, in Abhängigkeit von den unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen, d.h. vom Flugdatum,

nicht nachgewiesen werden konnte. Bei den anderen Blöcken wurde die Frage der Abhängigkeit nicht geprüft, da das Datenmaterial für die Untersuchungen nicht geeignet ist. Es fanden sich aber auch dort keine Hinweise auf eine Abhängigkeit der systematischen Fehler vom Flugdatum.

3.4.3 Auswertesystem

Für die Prüfung der Abhängigkeit vom Auswertesystem wurden die Streifendeformationen vom Überweitwinkelblock mit 60 % Querüberdeckung (Paßpunktversion 0) betrachtet. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Flugtage wurden die Streifendeformationen entsprechend der Auswertung an den unterschiedlichen Komparatoren in Den Haag und Delft zusammengestellt und die Mittelwerte gebildet. Der Vergleich der Bilddeformationen der beiden Teilblöcke ergibt einen durchschnittlichen Unterschied von $1.6 \mu\text{m}$. Die Maximalwerte betragen allerdings $5.0 \mu\text{m}$ für die x-Koordinate (Standardpunkt 1) und $4.2 \mu\text{m}$ für die y-Koordinate (Standardpunkt 6). Eine statistische Prüfung mit dem t-Test ergab für die durchschnittliche Abweichung von $1.6 \mu\text{m}$ einen signifikanten Unterschied der Deformationen der Teilblöcke Den Haag und Delft mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5 \%$.

Die Gegenüberstellung der systematischen Deformationen der Blöcke Frankfurt und Wien ergab ebenfalls signifikante Unterschiede. Dies bedeutet, daß die systematischen Bilddeformationen in geringem Maße von den Auswertesystemen, in diesem Fall Stereokomparatoren, abhängig sind.

3.4.4 Geodätisches Netz

Zur Bestimmung des Einflusses des geodätischen Netzes auf die systematische Bilddeformation wurde in gleicher Weise die systematische Bilddeformation aus den Restfehlern der ausgeglichenen Bildkoordinaten der Paßpunkte bestimmt. Lediglich die bisherige Bereichseinteilung in neun Felder wurde geändert und die Zahl der Felder auf fünfundzwanzig erhöht. Der Grund dafür ist die zufällige Verteilung der Paßpunkte im Bild, im Gegensatz zu den Verknüpfungspunkten, die ja in der Nähe der neun Standardpunkte liegen.

Die systematische Bilddeformation wurde für den WW-Block ($q = 60 \%$) bestimmt. In Abbildung 3.10 sind die Blockmittel der systematischen Bilddeformationen aus Verknüpfungspunkten und Paßpunkten dargestellt. Wie sich aus der Abbildung ergibt, unterscheiden sich beide Deformationen nur wenig voneinander. Die mittlere Abweichung der beiden Deformationen beträgt $0.8 \mu\text{m}$. Allerdings konnten nur die entsprechenden Werte an den Standardpunkten miteinander verglichen werden.

Die aus den Verbesserungen der Paßpunkte streifenweise ermittelten Bilddeformationen wurden visuell nach örtlichen Abweichungen, die auf Netzspannungen zurückgeführt werden können, untersucht. Ein Einfluß von lokalen Netzspannungen auf die systematischen Bilddeformationen konnte dabei nicht festgestellt werden.

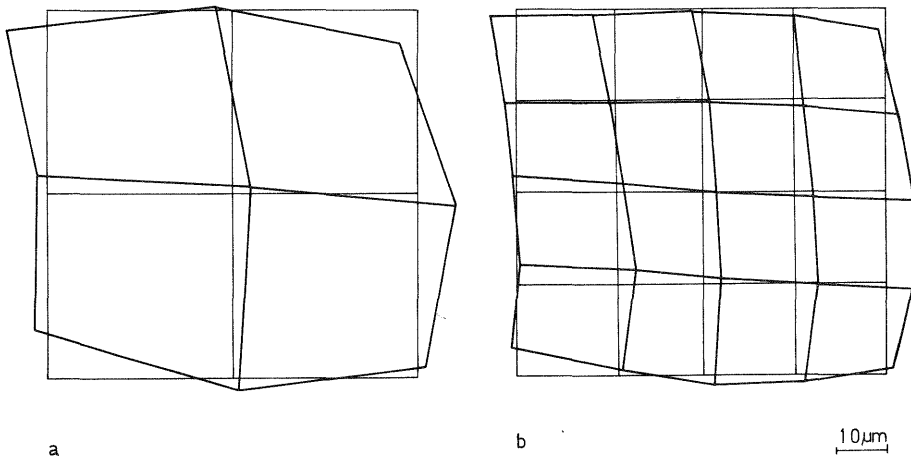


Abb. 3.10 Systematische Bilddeformationen, WW-Block, $q = 60\%$
 a) aus Verknüpfungspunkten, b) aus Paßpunkten

4. Bestimmbarkeit der systematischen Bild- und Modelldeformationen

In Abschnitt 3.4 wurden Parameter, wie das Aufnahmesystem, das Auswertesystem, usw., behandelt, die in Verbindung mit dem unzureichenden mathematischen Modell der Aerotriangulation als Ursache bzw. Ursachenkomplex der systematischen Fehler angesehen werden können. Diese Parameter sind nicht Bestandteil der Genauigkeitstheorie und bislang durch theoretische Genauigkeitsmodelle nicht erfassbar.

In diesem Abschnitt werden hingegen Parameter behandelt, die unmittelbar in die Genauigkeitstheorie eingehen. Die Querüberdeckung und die Paßpunktverteilung sind Parameter, die die Geometrie und die Stabilität des Blockes betreffen. Diese Parameter, einschließlich der Flugstreifenanordnung, entscheiden aber auch, wie im folgenden nachgewiesen wird, über die Bestimmbarkeit der systematischen Fehler.

Ausgangspunkt von Abschnitt 4 ist die Annahme, daß systematische Fehler im Bildmaterial vorhanden sind. Die Untersuchung soll klären, in welcher Art die Bestimmbarkeit der systematischen Fehler von der Querüberdeckung, der Paßpunkt- und der Flugstreifenanordnung abhängig ist.

4.1 Vergleich der Bild- und Modelldeformationen in Abhängigkeit von der Querüberdeckung

Die Oberschwabenblöcke mit $q = 60\%$ Querüberdeckung setzen sich aus zwei Teilblöcken mit $q = 20\%$ zusammen. Das Bildmaterial für die entsprechenden Streifen mit $q = 20\%$ und $q = 60\%$ ist also gleich. Unter der Voraussetzung, daß die Bestimmbarkeit der systematischen Bild- und Modelldeformationen unabhängig von der Querüberdeckung ist, müßten diese für die sich entsprechenden Streifen gleich sein. Andererseits ist eine unterschiedliche Deformation Indiz dafür, daß die Bestimmbarkeit der systematischen Bild- und Modelldeformationen von der Querüberdeckung abhängig ist.

Wie Abbildung 3.3 zeigt, sind die systematischen Bilddeformationen der Blöcke mit $q = 20\%$ und $q = 60\%$ dem Typ nach gleich. Auch der zahlenmäßige Unterschied ist, wie dies die Werte in Tabelle 3.24 zeigen, gering. Im Durchschnitt beträgt die Differenz d der systematischen Bilddeformationen (Blockmittel) bei Weitwinkel $d = 0.6 \mu\text{m}$ und bei Überweitwinkel $d = 0.8 \mu\text{m}$. Maximal betragen die Unterschiede $1.9 \mu\text{m}$ bei WW und 4.0 bei ÜWW.

Zum Vergleich der WW-Bilddeformationen wurde der Wilcoxon-Test für Paardifferenzen angewandt. Für die 9 Standardpunkte (x-Koordinate) erhält man folgendes Ergebnis: In 5 Punkten ergibt sich ein signifikanter Unterschied, in 4 Punkten mußte die Nullhypothese von der Gleichheit der Mittelwerte beibehalten werden. Für die y-Koordinate sind die entsprechenden Zahlen 4 und 5. Insgesamt konnte bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0.05$, bei zweiseitigem Test, zwar eine gewisse, aber nicht deutlich ausgeprägte Abhängigkeit der Bestimmbarkeit der systematischen Bilddeformation von der Querüberdeckung ermittelt werden.

Für die Modelldeformationen der Lage gilt ein ähnlicher Sachverhalt wie bei den Bilddeformationen. Der Deformationstyp, die affine und trapezförmige Deformation der Modelle bleibt beim Übergang von 20% auf 60% Querüberdeckung erhalten (siehe Abb. 3.4). Dazu kommt allerdings noch bei WW ($q = 60\%$) eine Verschiebung der Verbindungslinie der Standardpunkte 1 und 2, die bei $q = 20\%$ nicht analysiert werden konnte. Die durchschnittlichen Unterschiede d in den 6 Standardpunkten betragen $d = 0.8 \mu\text{m}$ bei WW und $d = 0.4 \mu\text{m}$ bei ÜWW (siehe Tabelle 3.25). Die Unterschiede bei der Deformation der WW-Blöcke sind signifikant.

Bei der Modelldeformation in der Höhe ist hingegen sofort ein deutlicher Unterschied festzustellen. Während sich die Höhendeformation bei $q = 20\%$ nur als eine geringe Verwindung darstellt, überwiegt bei $q = 60\%$ eine ausgeprägte zylindrische Durchbiegung (siehe Abb. 3.5). Die unterschiedlichen Deformationstypen spiegeln sich in der durchschnittlichen Abweichung in den Standardpunkten (siehe Tab. 3.25). Die bei dem Oberschwabenmaterial vorhandenen Deformationstypen für die Modellhöhen können nur bei einer Querüberdeckung von $q = 60\%$ vollständig bestimmt werden.

4.1.1 Bestimmbarkeit der systematischen Modelldeformation in Abhängigkeit von der Querüberdeckung und der Flugrichtung

In Abschnitt 4.1 wurde festgestellt, daß die Bestimmbarkeit der systematischen Modelldeformation von der Querüberdeckung abhängig ist. Diese Aussagen werden unter Berücksichtigung der Geometrie der Modellverknüpfungen geprüft und erläutert. Die nachfolgenden Überlegungen sind rein formal, d.h. es werden regelmäßige Blöcke vorausgesetzt, mit Verknüpfungspunkten in der Nähe der Standardpunkte. Die Auswirkung der Paßpunktbesetzung wird nicht berücksichtigt. Für die Überlegungen wird auf die orthogonalen Parameter zurückgegriffen (siehe Abb. 3.7).

Beim Vergleich der Modelldeformation der Lage in Abhängigkeit von der Querüberdeckung wurde festgestellt, daß der Parameter p_8 nur bei WW, $q = 60\%$ analysiert werden konnte. Bei $q = 20\%$ Querüberdeckung können die Modelle räumlich

Standard- bereich	Block	Frankfurt und Wien	WW	Differenz	Den Haag und Delft	ÖWW	Differenz
		q = 20 %	q = 60 %		q = 20 %	q = 60 %	
x	1	+3.9	+4.4	0.5	+6.8	+7.4	0.6
	2	+0.8	-0.7	1.5	+2.0	-1.4	3.4
	3	+6.6	+6.8	0.2	+11.0	+12.0	1.0
	4	-3.6	-3.9	0.3	-4.0	-4.1	0.1
	5	-1.5	-1.6	0.1	-3.8	-3.9	0.1
	6	+3.1	+2.8	0.3	+2.6	+2.4	0.2
	7	-10.0	-10.0	0.0	-10.0	-10.0	0.0
	8	+0.8	+2.7	1.9	+2.0	+6.0	4.0
	9	-1.0	-2.0	1.0	-5.4	-6.7	1.3
	Mittel			0.6			1.2
y	1	+8.0	+7.9	0.1	+6.7	+5.9	0.8
	2	+4.4	+3.6	0.8	+1.8	+2.1	0.3
	3	+3.1	+3.5	0.4	-4.2	-3.6	0.6
	4	+2.5	+2.1	0.4	+11.0	+10.3	0.7
	5	-2.8	-3.2	0.4	+1.6	+1.6	0.0
	6	-8.8	-8.3	0.5	-5.1	-4.2	0.9
	7	+2.2	+1.7	0.5	-2.1	-2.6	0.5
	8	-1.2	-1.8	0.6	-3.7	-4.3	0.6
	9	-2.4	-1.8	0.6	-6.6	-6.2	0.4
	Mittel			0.5			0.5

Tabelle 3.24 Vergleich der systematischen Bilddeformationen in Abhängigkeit von der Querüberdeckung, PP-Version 0 (in μm)

Standard- bereich	Block	Frankfurt und Wien	WW	Differenz	Den Haag und Delft	ÖWW	Differenz
		q = 20 %	q = 60 %		q = 20 %	q = 60 %	
PZ	x	-4.1	-4.2	0.1	-0.6	+0.6	1.2
	y	+2.4	+2.5	0.1	+1.6	+1.3	0.3
	z	-1.9	-1.4	0.5	-3.2	-2.8	0.4
	Mittel			0.2			0.6
x	1	-2.0	-1.4	0.6	-3.4	-2.2	1.2
	2	+2.0	+2.6	0.6	+3.4	+4.1	0.7
	3	+1.6	+1.8	0.2	-8.5	-8.4	0.1
	4	-3.8	-4.2	0.4	+6.0	+6.4	0.4
	5	-5.8	-5.9	0.1	+2.0	+2.7	0.7
	6	+8.3	+8.6	0.2	+0.6	+1.2	0.6
	Mittel			0.4			0.6
y	1	-1.7	-3.8	2.1	-1.9	-1.6	0.3
	2	+1.7	-0.5	2.2	+1.9	+2.2	0.3
	3	+1.8	+2.8	1.0	+2.5	+3.0	0.5
	4	+4.8	+5.4	0.6	+2.4	+2.7	0.3
	5	-2.6	-2.0	0.6	-8.0	-8.1	0.1
	6	+2.0	+2.4	0.4	+2.4	+2.1	0.3
	Mittel			1.2			0.3
z	1	-2.2	+5.0	7.7	-3.6	+5.0	8.6
	2	+2.2	+10.3	8.1	+3.6	+12.2	8.6
	3	+1.2	-2.8	4.0	+1.0	-3.4	4.4
	4	-1.4	-5.3	3.9	-0.6	-4.9	4.3
	5	+0.2	-3.2	3.4	-0.2	-4.6	4.4
	6	+0.3	-3.8	3.5	-0.4	-4.9	4.5
	Mittel			5.1			5.8

Tabelle 3.25 Vergleich der systematischen Modelldeformationen in Abhängigkeit von der Querüberdeckung, PP-Version 0 (in μm)

widerspruchsfrei aneinandergesetzt werden; somit ist p_8 nicht bestimmbar, oder $p_8 = 0$. Erst bei $q = 60\%$ Querüberdeckung und gleichbleibender Flugrichtung treten die Widersprüche an den Verknüpfungspunkten zutage.

Ein weiteres Beispiel für die Abhängigkeit der Bestimmbarkeit eines Deformationstyps von der Querüberdeckung ist die zylindrische Durchbiegung des Modells in der Höhe. Der Deformationstyp (h_3) kann ebenfalls nur bei einer Querüberdeckung von $q = 60\%$ anhand der Verbesserungen der Verknüpfungspunkte erfaßt werden, da bei $q = 20\%$ keine Widersprüche auftreten (siehe Abb. 3.11).

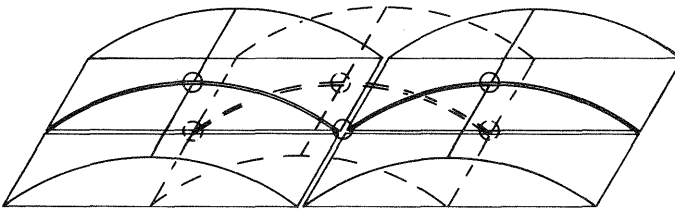


Abb. 3.11 Schematische Darstellung einer zylindrischen Modellverbiegung (Parameter h_3)

Wie man am Beispiel der Parameter p_7 und p_8 zeigen kann, ist die Bestimmbarkeit verschiedener Deformationstypen nicht nur von der Querüberdeckung, sondern auch von der Flugrichtung abhängig. Dies wird am Beispiel des Parameters p_7 verdeutlicht. Der Parameter p_7 kann bei $q = 20\%$ nicht anhand der Restfehler an den Verknüpfungspunkten analysiert werden. Geht man auf $q = 60\%$ Querüberdeckung über, so kann der Parameter p_7 nur dann bestimmt werden, wenn die Flugrichtung immer gleich bleibt. Wechselt die Flugrichtung regelmäßig nach jedem Streifen, so können die Modelle aneinander gefügt werden, ohne daß an den schematischen Verknüpfungspunkten Fehler auftreten. Die Deformation kann nicht bestimmt werden. Dies wird in Abbildung 3.12 verdeutlicht.

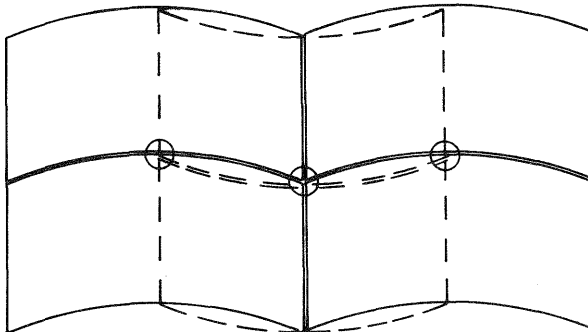


Abb. 3.12 Schematische Darstellung einer zylindrischen Modellverbiegung in y (Parameter p_7)

4.2 Vergleich der systematischen Bild- und Modelldeformationen in Abhängigkeit von der Paßpunktbesetzung

Die Bestimmbarkeit der Bild- und Modelldeformationen ist allgemein von der Paßpunktbesetzung abhängig, besonders aber mit der hier verwendeten Methode nach de MASSON d'AUTUME, wo die Deformationen ausschließlich anhand der Restfehler an den Verknüpfungspunkten analysiert werden, d.h. ohne Berücksichtigung der Paßpunkte.

Die beste Bestimmung der systematischen Deformationen ist offenbar bei großer Paßpunktdichte möglich, wo aufgrund der hohen Stabilität des Blockes die Deformationen an den Verknüpfungspunkten sichtbar werden. Bei schwacher Paßpunktbesetzung verformen die systematischen Fehler den Block und treten daher nicht oder nicht vollständig an den Verknüpfungspunkten zutage.

Auf das Oberschwabenmaterial übertragen bedeutet dies, daß mit der Paßpunktversion 0 die systematische Deformation am besten analysiert werden kann. Aufgrund der dichten Paßpunktbesetzung wird nahezu jedes Bild (Modell) einzeln absolut orientiert. Dadurch kann der Block nicht deformiert werden, und die systematischen Fehler treten an den Verknüpfungspunkten zutage. Deshalb wird im folgenden die mit Paßpunktversion 0 analysierte Deformation als (hinreichend) wahre Deformation angenommen.

Die Frage, wie sich die Bestimmbarkeit der Deformationen mit geringer werdender Paßpunktanzahl ändert, läßt sich aus dem Vergleich der Deformation der Paßpunktversion 0 mit den Deformationen der Paßpunktversionen 1 und 5 abschätzen. In den Tabellen 3.26 und 3.27 sind die Zahlenwerte aus dem Vergleich wiedergegeben.

Die systematischen Bild- und Modelldeformationen der Paßpunktversionen 0 und 1 unterscheiden sich nur gering voneinander. Die durchschnittlichen Differenzen der Modelldeformationen sind kleiner als $0.5 \mu\text{m}$, die der Bilddeformationen sind kleiner als $1.0 \mu\text{m}$. Die Unterschiede der Bilddeformationen sind trotzdem signifikant, lediglich die Modelldeformationen in der Lage sind nicht signifikant verschieden.

Bei den aus Paßpunktversion 5 bestimmten Deformationen sind die Unterschiede zu Version 0 deutlich größer, was auch in den durchschnittlichen Differenzen zum Ausdruck kommt, die bei den Modelldeformationen ungefähr $2.5 \mu\text{m}$ und bei den Bilddeformationen ungefähr $3.5 \mu\text{m}$ betragen. Insbesondere aber kann mit Version 5 der dominante Deformationstyp, vor allem die Affinität, aufgrund des mit 4 Eckpunkten nur schwach kontrollierten Blockes, nicht mehr bestimmt werden.

Auszunehmen von dieser Feststellung ist die Höhendedeformation der Modelle, die offenbar mit nur 3 Paßpunktketten im Abstand $i=12.5$ so gut bestimmt werden kann, daß die Differenzen zwischen Version 0 und Version 5 im Durchschnitt kleiner als $0.5 \mu\text{m}$ sind.

Die zwei berechneten Paßpunktversionen 1 und 5 reichen nicht aus, die Abhängigkeit der Deformationsbestimmung von der Paßpunktbesetzung lückenlos darzustellen. Es ist nicht Aufgabe dieser Arbeit, die möglichen Einflüsse theoretisch zu

Block PP-Version (Vergleich)	Frankfurt		Wien		WW, q = 60 %		Den Haag		Delft		ÜWW, q = 60 %	
	0/1	0/5	0/1	0/5	0/1	0/5	0/1	0/5	0/1	0/5	0/1	0/5
Standard- punkt												
x 1	1.9	2.0	2.8	5.9	0.0	1.4	1.2	7.2	1.0	3.1	0.7	2.9
2	0.1	0.2	0.1	0.1	1.0	3.4	0.1	0.0	0.0	1.0	0.8	4.2
3	2.1	6.3	0.1	6.9	0.6	5.8	1.3	11.5	1.3	8.2	1.5	7.7
4	0.3	4.2	0.1	1.8	0.4	3.2	0.1	2.1	0.4	1.0	0.2	2.3
5	0.2	0.3	0.1	0.1	0.6	0.2	0.2	0.3	0.1	1.9	0.1	0.1
6	1.0	2.9	0.5	2.4	0.4	2.9	0.8	2.8	0.3	4.7	0.2	2.3
7	4.5	12.2	1.5	8.2	0.2	6.6	3.3	11.6	1.7	10.7	1.3	7.3
8	0.2	0.0	0.1	0.2	0.1	2.9	0.1	0.1	0.1	1.1	1.0	4.3
9	1.1	0.7	1.0	1.9	0.5	0.2	0.6	6.4	0.5	4.6	0.9	3.0
Mittel	1.3	3.2	0.7	3.1	0.4	3.0	0.9	4.7	0.6	4.0	0.7	3.5
y 1	1.0	7.1	1.3	6.5	1.8	6.4	1.6	8.9	0.9	5.7	1.7	7.0
2	0.9	4.8	0.2	2.0	0.7	3.5	0.5	2.4	0.1	2.7	0.4	2.8
3	1.6	2.1	0.2	1.4	0.6	0.1	0.7	3.6	0.5	0.0	0.1	1.6
4	1.4	4.2	1.3	4.4	0.2	3.3	1.3	5.2	0.9	4.5	1.2	5.1
5	0.3	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.1	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1
6	0.1	2.5	0.1	3.7	0.6	2.3	0.6	5.8	1.4	4.8	1.1	5.0
7	1.7	0.5	0.8	2.2	1.0	0.1	0.1	3.1	0.3	2.5	0.6	2.2
8	0.0	4.2	0.6	1.7	0.3	2.9	0.6	2.5	0.2	2.8	0.3	2.9
9	0.7	6.6	0.1	4.8	0.2	5.9	0.3	7.8	1.2	8.3	1.5	7.1
Mittel	0.9	3.6	0.5	3.0	0.6	2.9	0.6	4.4	0.6	3.4	0.8	3.8

Tabelle 3.26 Differenzen der Bilddeformationen in Abhängigkeit von der Paßpunktbesetzung (in μm)

Block PP-Version (Vergleich)	Frankfurt		Wien		WW, q = 60 %		Den Haag		Delft		ÜWW, q = 60 %	
	0/1	0/5	0/1	0/5	0/1	0/5	0/1	0/5	0/1	0/5	0/1	0/5
Projek- x	0.0	1.9	0.1	1.2	0.3	1.8	0.2	8.3	0.2	2.4	0.8	4.2
tions- y	0.3	8.6	0.3	0.6	0.1	1.3	0.1	0.7	0.3	2.7	0.1	1.8
zentren z	0.1	3.1	0.1	0.4	0.1	0.0	0.2	2.1	0.1	0.0	0.1	0.3
Mittel	0.2	4.5	0.2	0.7	0.2	1.0	0.2	3.7	0.2	1.7	0.3	2.1
Standardpunkt												
x 1	1.0	1.9	0.2	2.1	0.2	2.2	0.1	3.5	0.1	2.6	0.2	1.8
2	1.0	1.9	0.2	2.1	0.0	2.2	0.1	3.5	0.2	2.7	0.5	3.3
3	0.2	5.2	0.2	2.2	0.1	3.3	0.2	3.9	0.1	3.7	0.2	4.3
4	0.7	1.1	0.2	1.2	0.0	1.0	0.2	2.4	0.3	1.7	0.5	2.2
5	0.2	0.2	0.2	1.4	0.0	0.9	0.3	2.4	0.6	1.5	0.1	1.5
6	0.6	4.1	0.2	2.9	0.0	3.1	0.3	4.6	0.5	4.1	0.1	4.7
Mittel	0.6	2.4	0.2	2.0	0.1	2.1	0.2	3.4	0.3	2.7	0.3	3.0
y 1	0.2	2.2	0.5	0.5	0.5	1.9	0.2	2.0	0.2	2.4	0.7	1.4
2	0.2	2.2	0.6	0.5	0.1	1.3	0.2	2.0	0.2	2.4	0.7	2.6
3	0.6	0.6	1.7	2.2	0.7	0.6	0.4	0.9	0.1	0.5	0.5	0.4
4	2.1	6.3	1.6	3.7	0.6	3.8	0.6	4.4	0.0	4.1	0.6	4.6
5	0.3	3.0	1.5	1.2	0.5	2.8	0.7	5.5	0.1	4.1	0.0	4.4
6	0.7	1.7	1.4	0.7	0.5	0.6	0.2	0.8	0.2	0.5	0.1	0.1
Mittel	0.7	2.7	1.2	1.5	0.5	1.8	0.4	2.6	0.1	2.3	0.4	2.3
z 1	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.9	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	1.6
2	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.8	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	2.0
3	0.1	0.1	0.4	0.5	0.1	0.6	0.3	0.2	0.2	0.1	0.0	0.8
4	0.1	0.1	0.1	0.5	0.1	0.5	0.0	0.2	0.2	0.1	0.1	0.6
5	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.4	1.4
6	0.2	0.3	0.9	0.6	0.0	0.1	0.2	0.4	0.5	0.1	0.1	0.9
Mittel	0.1	0.1	0.3	0.4	0.1	0.5	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	1.2

Tabelle 3.27 Differenzen der Modelldeformationen in Abhängigkeit von der Paßpunktbesetzung (in μm)

analysieren. Dennoch sind einige wichtige Folgerungen ableitbar. Der dichte Paßpunktrand in der Lage ist für eine recht sichere Bestimmung der Deformation hinreichend. Vier Eckpunkte, das entspricht einer durchschnittlichen Überbrückungsdistanz von $i=20$ Basiseinheiten, sind dagegen nicht mehr ausreichend. Bemerkenswert ist das Ergebnis der Analyse der Höhendeformation, wo bei einer Überbrückungsdistanz von $i=12.5$ Basiseinheiten die Höhendeformation der Modelle noch sicher bestimmt werden konnte.

5. Weitere Vergleiche

In dieser Arbeit wurden die systematischen Bild- und Modelldeformationen unabhängig voneinander empirisch bestimmt. Ein Vergleich der Bilddeformationen mit den Modelldeformationen zeigt an ob die Modelldeformation aus der Bilddeformation ableitbar und erklärbar ist, bzw. ob die Bilddeformation Ursache der Modelldeformation ist. Damit hat man die Blockdeformation bis auf die ursprünglichste Einheit, nämlich das Bild, zurückverfolgt. Es sollte so sein, da bei der relativen Orientierung kein zusätzlicher Einfluß dazugekommen ist.

Weiter ist der Vergleich der Bilddeformation, die nach dem Verfahren nach de MASSON d'AUTUME bestimmt wurde und der Bilddeformation aus Testfeldkalibrierung von Interesse.

Die hier abgeleiteten Bild- und Modelldeformationen werden außerdem noch den Ergebnissen von EBNER [19], GRÜN [23] und SCHILCHER [46] gegenübergestellt, die ebenfalls Teile des Oberschwabenmaterials untersucht bzw. mit dem gleichen Verfahren gearbeitet haben.

5.1 Vergleich der systematischen Bilddeformationen mit den systematischen Modelldeformationen

Um die Bild- mit der Modelldeformation vergleichen zu können wird die Bilddeformation in eine Modelldeformation übergeführt und mit der direkt bestimmten Modelldeformation verglichen. Dazu wird ein mit der Bilddeformation überlagertes Bildpaar relativ und absolut orientiert und die resultierende Modelldeformation ermittelt.

In der Tabelle 3.28 findet man die Ergebnisse. Und zwar in der Spalte s die Modelldeformationen, die sich nach der Simulation aus den Bilddeformationen ergeben haben, und in der Spalte e die Modelldeformationen aus der empirischen Analyse nach der Blockausgleichung. In den Abbildungen 3.14 - 3.15 findet man die graphische Darstellung der Ergebnisse.

Die Modelldeformationen (aus Bilddeformation simuliert) der Weitwinkelblöcke entsprechen in der Lage denen der Modellblöcke im wesentlichen. Trotzdem sind die Ergebnisse nicht identisch. Im Detail unterschiedlich sind die abknickenden Verbindungslinien der Punkte 5-1-3 und 6-2-4¹⁾, sowie die Verschiebung der Verbindungslinie 1-2, wie sie bei den Modelldeformationen (aus Modellblöcken) nur bei dem Block mit $q = 60 \%$ auftritt. Diese Verschiebung kann bei den Modellblöcken mit $q = 20 \%$ nicht bestimmt werden (siehe Abschnitt 4.1.1).

¹⁾ Bezeichnungen siehe Seite 56

Block Ausgleichungs- methode	Frankfurt		Wien		WW, q = 60 %		Den Haag		Delft		OWW, q = 60 %		
	s	e	s	e	s	e	s	e	s	e	s	e	
Standard- punkt x	1	-2.1	-2.2	-1.8	-1.8	-2.2	-1.4	-2.6	-4.0	-2.2	-2.7	-2.4	-2.2
	2	+3.0	+2.2	+4.2	+1.8	+3.5	+2.6	+7.0	+4.0	+5.9	+2.7	+6.5	+4.1
	3	+0.8	+0.6	-0.2	+2.6	+0.2	+1.8	-11.5	-8.5	-11.1	-8.5	-11.6	-8.4
	4	-5.3	-3.7	-4.3	-3.8	-4.8	-4.2	+5.2	+5.5	+5.2	+6.4	+5.5	+6.4
	5	-6.5	-5.8	-7.0	-5.9	-6.5	-5.9	-0.2	+0.8	+1.1	+3.3	+0.5	+2.7
	6	+10.1	+10.1	+9.0	+7.5	+9.8	+8.6	+2.1	+1.9	+1.1	-0.6	+1.5	+1.2
y	1	-9.2	-2.8	-6.8	-0.6	-7.5	-3.8	+3.2	-2.1	+3.7	-1.7	+3.3	-1.6
	2	-2.6	+2.8	-4.6	+0.6	-3.5	-0.5	+6.7	+2.1	+8.1	+1.7	+7.8	+2.2
	3	+2.0	+0.8	+3.3	+2.7	+2.5	+2.8	+2.0	+3.5	-1.2	+1.5	+0.5	+3.0
	4	+7.8	+6.1	+7.0	+3.4	+7.2	+5.4	+0.2	+1.4	+1.4	+3.4	+0.7	+2.7
	5	-0.9	-3.4	-3.0	-1.9	-2.9	-2.0	-13.5	-8.8	-10.5	-7.1	-11.9	-8.1
	6	+2.9	+2.1	+4.3	+1.8	+4.1	+2.4	+1.4	+2.6	-1.5	+2.2	-0.4	+2.1
z	1	+3.3	-2.3	+4.1	-2.2	+6.0	+5.0	+5.4	-4.0	+3.3	-3.3	+9.1	+5.0
	2	+8.3	+2.3	+8.8	+2.2	+11.0	+10.3	+15.9	+4.0	+13.0	+3.3	+20.0	+12.2
	3	-2.5	+0.6	+0.3	+1.7	-1.6	-2.8	-0.6	+0.8	-0.2	+1.1	-3.0	-3.4
	4	-3.2	-0.6	-6.8	-2.3	-6.9	-5.3	-10.1	-0.4	-8.0	-0.7	-11.6	-4.9
	5	-0.7	+1.2	-4.4	-0.7	-4.4	-3.2	-4.8	-0.6	-3.1	+0.3	-6.1	-4.6
	6	-5.0	-1.5	-2.0	+2.1	-4.1	-3.8	-5.8	+0.0	-5.0	-0.8	-8.5	-4.9

Tabelle 3.28 Vergleich der aus Bilddeformationen hochgerechneten mit den empirisch bestimmten Modelldeformationen

s = hochgerechnet, simuliert

e = empirisch bestimmt, aus Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen

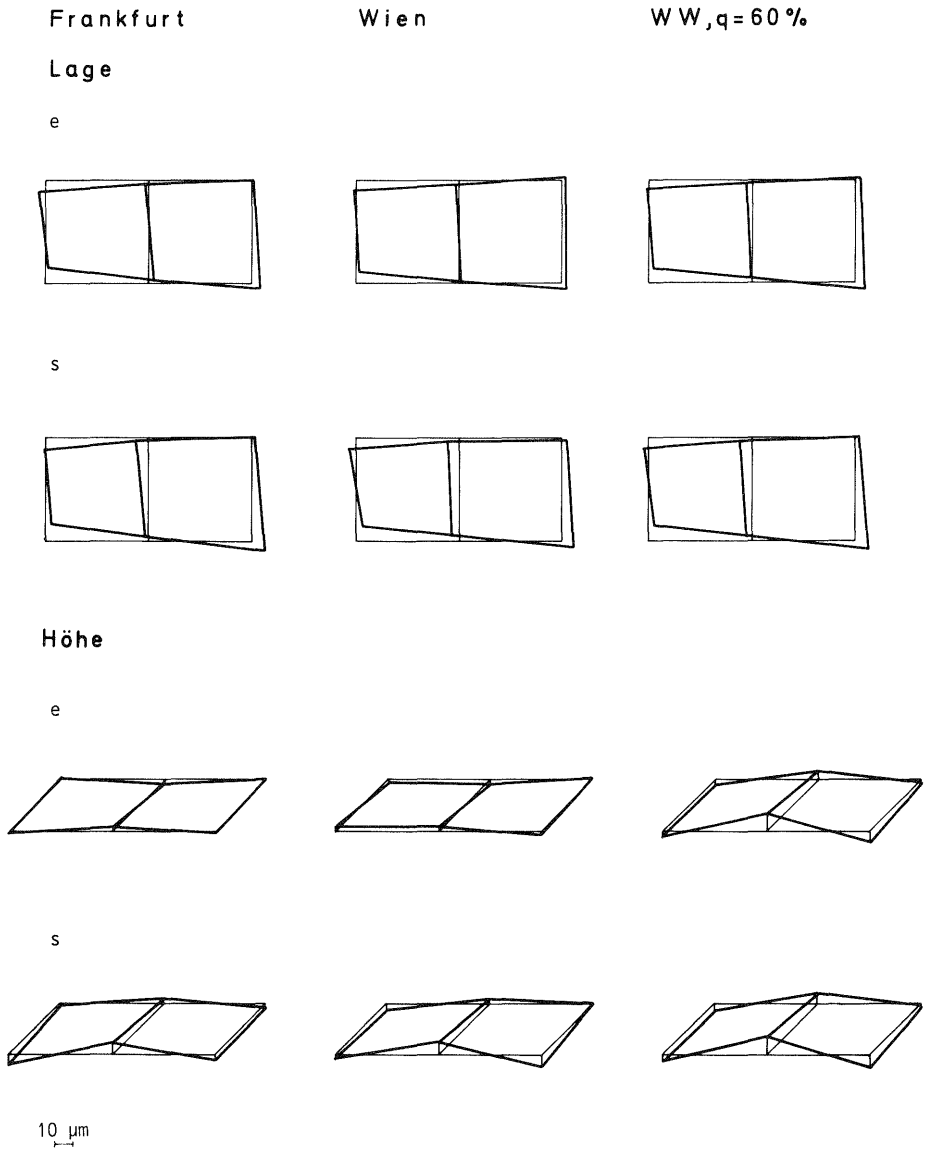


Abb. 3.14 Vergleich der aus Bilddeformationen hochgerechneten mit den empirisch bestimmten Modelldeformationen WW-Blöcke

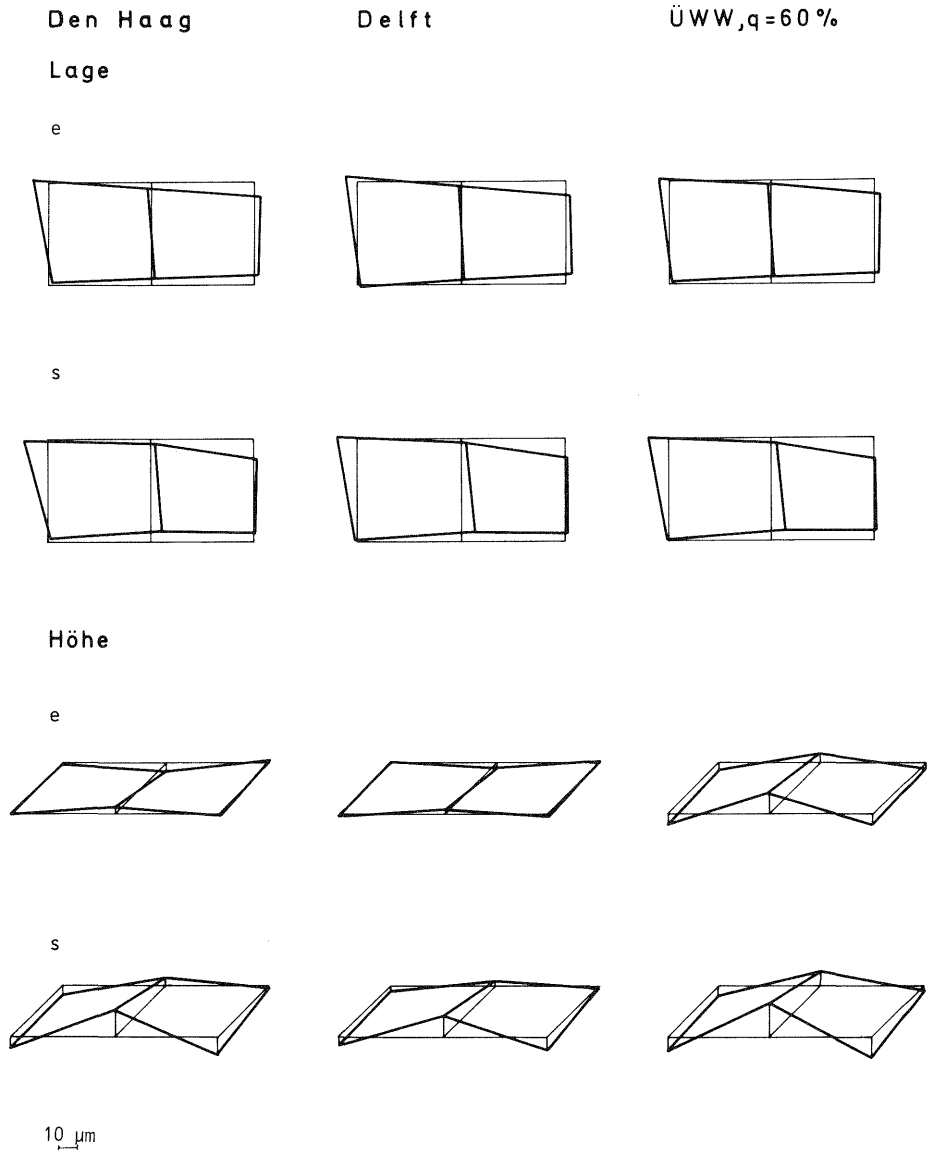


Abb. 3.15 Vergleich der aus Bilddeformationen hochgerechneten mit den empirisch bestimmten Modelldeformationen ÜWW-Blöcke

Bei der Modelldeformation der Höhe ist besonders zu beachten, daß die typische und wesentliche Deformation, nämlich die zylindrische Durchbiegung, offenbar schon in der Bilddeformation der Blöcke mit $q = 20 \%$ weitgehend erfaßt werden kann. Dies ist bei den Modellblöcken mit $q = 20 \%$ Querüberdeckung nicht möglich. Der Grund dafür ist die bereichsweise Mittelung bei der Bestimmung der Deformationen in dem Verfahren nach de MASSON d'AUTUME. Hinzu kommt, daß sich aufgrund der Geometrie der Modellverknüpfungen nur ein Teil dieses Deformationstyps in den Verbesserungen der Verknüpfungspunkte ausdrückt.

Auch die Modelldeformationen der ÖWW-Blöcke, aus der Bilddeformation bestimmt, gleichen zwar den nach der Blockausgleichung bestimmten Modelldeformationen, sind aber ebenfalls nicht identisch. Hier knicken die Verbindungslinien 5-1-3 und 6-2-4 noch deutlicher ab. Der Betrag der Verschiebung der Linie 1-2 bleibt in etwa gleich.

Die zylindrische Durchbiegung in der Höhe wird bei den Bündelblöcken (ÖWW) schon mit $q = 20 \%$ ebenfalls richtig analysiert. Auffallend bei der Höhendendeformation der ÖWW-Blöcke (aus Bilddeformation) sind die großen Beträge, welche die entsprechenden Werte der Modelldeformation (aus Modellblock $q = 60 \%$) fast um das Doppelte übertreffen.

Die Gegenüberstellung der Bild- und Modelldeformationen hat ergeben, daß sich diese zwar gleichen aber nicht identisch sind. Die unterschiedliche Bestimmbarkeit der Deformationstypen kann mit der Geometrie der Modellverknüpfungen und mit der angewandten Bestimmungsmethode erklärt werden. Die unterschiedlichen Beträge der Deformationen, die davon abhängig sind, ob die Deformation im Bild oder Modell ermittelt wurde, konnten dagegen nicht explizit begründet werden. Es genügt jedoch der allgemeine Hinweis, daß bei den Bildern zusätzliche Informationen verwendet wurden und deshalb hochgerechnete und empirische Modelldeformationen nicht übereinstimmen können. Hier zeigt sich wieder der Unterschied zwischen "wahrer" und "bestimbarer" Deformation. Offensichtlich sind aber diese Unterschiede nicht groß.

5.2 Vergleich der Bilddeformationen aus Selbstkalibrierung und Testfeldkalibrierung

Zum Vergleich der systematischen Bilddeformationen wird folgendes Material verwendet. Für die Selbstkalibrierung werden die systematischen Bilddeformationen der Blöcke mit $q = 60 \%$ Querüberdeckung und Paßpunktversion 0 herangezogen, die nach dem Verfahren nach de MASSON d'AUTUME bestimmt worden sind. Für die Testfeldkalibrierung werden die aus der gemeinsamen Ausgleichung von Vor- und Nachfeld ermittelten systematischen Bilddeformationen benutzt.

Die Ergebnisse der Testfeldkalibrierung von Testfeld 'Rheidt' wurden schon in Kapitel II. 3. beschrieben. Wie aus der Abbildung 2.8 auf Seite 49 hervorgeht, sind die Korrekturpolynome der Testfeldkalibrierung mit den Orientierungsparametern korreliert. Das bedeutet, daß bestimmte Anteile der in der Testfeldkalibrierung ermittelten Bilddeformationen durch die Orientierungsparameter beschrieben werden können. Mit einem räumlichen Rückwärtsschnitt werden diese Anteile ermittelt und von der ursprünglichen Bilddeformation abgezogen.

In Tabelle 3.29 und Abbildung 3.16 sind die systematischen Bilddeformationen aus Selbstkalibrierung und aus Testfeldkalibrierung dargestellt. Daraus geht hervor, daß die systematischen Bilddeformationen für WW nach Typ und Betrag zwar ähnlich, aber nicht identisch sind. Bei der Bilddeformation aus Testfeldkalibrierung ist die Maßstabsaffinität stärker ausgeprägt. Es fehlt hingegen die Scherung des Bildes. Die durchschnittliche Differenz d an den neun Standardpunkten zwischen der Bilddeformation aus Selbstkalibrierung und Testfeldkalibrierung beträgt $d = 3.2 \mu\text{m}$ ($d = |d_S - d_T|$).

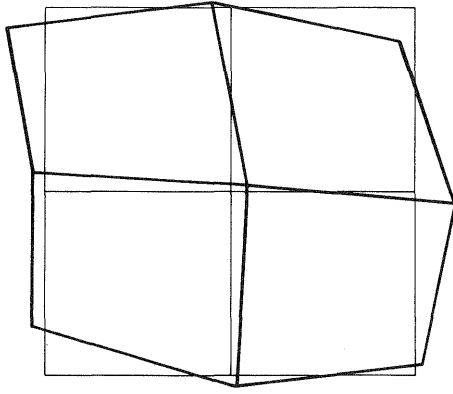
Die Bilddeformationen aus Selbstkalibrierung und Testfeldkalibrierung sind für ÖWW noch deutlicher unterschiedlich. Insbesondere ist die Affinität nach Vorzeichen und Betrag verschieden. Lediglich die tonnenförmige Verformung der Bilder ist gemeinsam. Die durchschnittliche Differenz d beträgt $d = 3.8 \mu\text{m}$. Hinzu kommt für die Deformation aus der (vollständigeren) Testfeldkalibrierung ein nichtlinearer Anteil, der aufgrund der Anzahl und Verteilung der Verknüpfungspunkte bei der Selbstkalibrierung nicht bestimmt werden kann.

Diese Feststellungen sind nicht überraschend, da es sich um systematische Bilddeformationen handelt, die aus zwei verschiedenen Flügen ermittelt wurden.

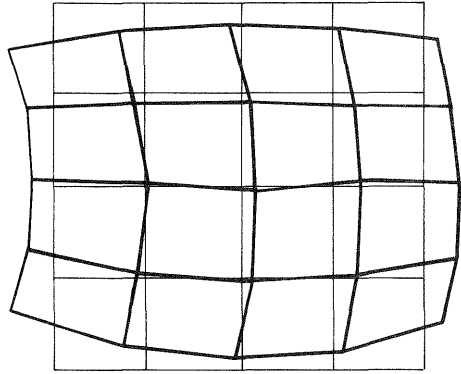
		S	WW T	Diff.	S	ÖWW T	Diff.
x	1	4.4	9.1	-4.7	7.4	8.2	-0.8
	2	-0.7	4.2	-4.9	-1.4	-4.8	3.4
	3	6.8	7.4	-0.6	12.0	7.4	4.6
	4	-3.9	-1.7	-2.2	-4.1	-1.9	-2.2
	5	-1.6	1.2	-2.8	-3.9	-1.4	-2.5
	6	2.8	-0.5	3.3	2.4	-0.8	3.2
	7	-10.0	-11.9	1.9	-10.6	-13.0	2.4
	8	2.7	-2.0	4.7	6.0	7.4	-1.4
	9	-2.0	-9.5	7.5	-6.7	-8.1	1.4
y	1	7.9	9.3	-1.4	5.9	-1.4	7.3
	2	3.6	2.0	1.6	2.1	+0.9	1.2
	3	3.5	-2.6	6.1	-3.6	+3.8	-7.4
	4	2.1	4.2	-2.1	10.3	+0.9	9.7
	5	-3.2	-2.9	-0.3	1.6	-1.3	2.9
	6	-8.3	-7.1	-1.2	-4.2	+0.6	-4.8
	7	1.7	8.7	-7.0	-2.6	-1.1	-1.5
	8	-1.8	1.0	-2.8	-4.3	-2.4	-1.9
	9	-1.8	-3.6	1.8	-6.2	4.0	-10.2

Tabelle 3.29 Vergleich der systematischen Bilddeformationen aus Selbstkalibrierung (S) und Testfeldkalibrierung (T) (in μm)

WW

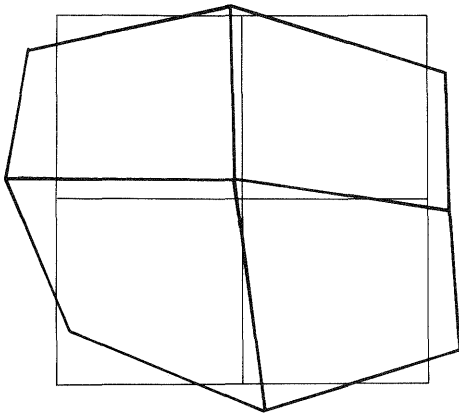


S

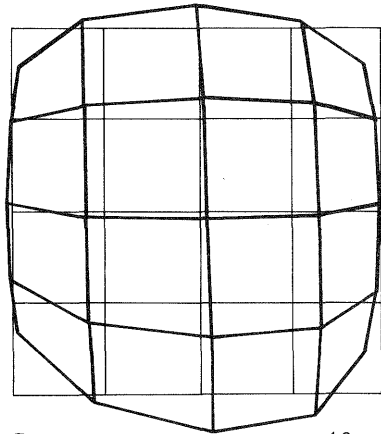


T

ÜWW



S



T

10 μm

Abb. 3.16 Vergleich der systematischen Bilddeformationen aus Selbstkalibrierung und Testfeldkalibrierung
S = Selbstkalibrierung, T = Testfeldkalibrierung

5.3 Vergleich der Bild- und Modelldeformationen mit anderen Ergebnissen

EBNER hat in anderem Zusammenhang ebenfalls das Oberschwabenmaterial bearbeitet [19], allerdings nur die vier mittleren Streifen des WW-Blockes Frankfurt. Die Blockausgleichung nach der Methode der unabhängigen Modelle wurde mit einem Programm mit zusätzlichen Parametern berechnet. Die bei der Selbstkalibrierung simultan bestimmte Modelldeformation ist in [19] ebenfalls dargestellt. Ein Vergleich dieser Deformationen mit den Ergebnissen dieser Arbeit bringt für die Lagedeformation nahezu völlige Übereinstimmung. Die Höhendeformation weicht insofern ab, als bei der Selbstkalibrierung die zylindrische Durchbiegung schon bei $q = 20 \%$ bestimmt wird. Der Grund dafür ist offenbar darin zu suchen, daß bei der Selbstkalibrierung der Parameter h_3 mit dem Glied $d_z = h_3 (y - 2b^2/3)$ wie alle Parameter in der Ausgleichung als Funktion angesetzt wird. Dieser Parameter erhält dabei eine gewisse Bestimmung, da die Verknüpfungspunkte nicht streng auf einem Punkt, sondern in einem Bereich verstreut liegen. Bei der Feldeinteilung geht dieser Effekt verloren, so daß h_3 dort nicht bestimmbar ist.

GRÜN hat für die gleichen Streifen des Oberschwabenblockes eine Bündelblockausgleichung mit zusätzlichen Parametern berechnet [23]. Die dabei ermittelte Bilddeformation ist ebenfalls in [19] dargestellt. Ein Vergleich dieser Bilddeformation mit der nach der Methode von MASSON d'AUTUME ermittelten Bilddeformation über den gesamten Block bringt eine weitgehende Übereinstimmung.

SCHILCHER gibt in [46] einige Beispiele für mit dem Verfahren nach de MASSON d'AUTUME bestimmten Modelldeformationen von verschiedenen Blöcken. Unter anderen hat er den Block 'Appenweier' (ACKERMANN [6]) bearbeitet, der mit einer WW-Kammer (Zeiss RMK) beflogen und am Komparator (Zeiss PSK) ausgewertet wurde. Der Block wurde vierfach beflogen mit zwei senkrecht aufeinander stehenden Flugrichtungen. Die Analyse des einfachen Blockes ergab eine affine und trapezförmige Verformung der Modelle. Beim zweifachen Block mit senkrecht aufeinander stehenden Flugrichtungen kommt eine Verschiebung der Verbindungslinien der Projektionszentren hinzu und ein Abknicken quer zur Flugrichtung. Die Modelldeformation in der Höhe stellt sich als zylindrische Durchbiegung dar. Beim Vierfachblock knickt die Deformation noch stärker ab; die zylindrische Durchbiegung der Höhendeformation ist ausgeprägter.

Die Modelldeformationen von Block Appenweier und dem Oberschwabenmaterial sind dem Typ nach gleich. Betragsmäßig sind die Deformationen von Block Appenweier jedoch geringer. Bezüglich der Bestimmbarkeit der Modelldeformation in Abhängigkeit von Querüberdeckung und Flugrichtung wurden die in Abschnitt 4.1 angeestellten Überlegungen bestätigt.

SCHILCHER hat in [46] auch Modelldeformationen aus anderen Blöcken, die z.T. mit Analoggeräten ausgewertet wurden, dargestellt. Bei der Messung mit Analoggeräten, kommen durch die Gerätefehler zusätzliche Effekte hinzu, die die Modelldeformationen im Typ und Betrag verändern. Von Bedeutung ist hier auch die Triangulationsrichtung. Bei den Ergebnissen von Komparatormessungen ist zu erkennen, daß die Modelldeformationen wesentlich nur vom Aufnahmesystem beeinflusst sind.

Insgesamt bestätigen die in [19], [23] und [46] gemachten Aussagen die Ergebnisse in dieser Arbeit. Die analysierten Deformationen, soweit vergleichbar, stimmen nach Typ und Betrag weitgehend miteinander überein.

Die genannten Arbeiten wurden etwa zur gleichen Zeit, aber unabhängig von der hier vorgelegten Untersuchung gefertigt.

6. Zusammenfassung

Die Analyse der verschiedenen Blockausgleichungen des OEEPE-Testgebietes Oberschwaben mit dem Verfahren nach de MASSON d'AUTUME hat ergeben, daß im Bildmaterial in allen Fällen deutliche systematische Bilddeformationen vorhanden sind. Die systematischen Fehler sind in hohem Maße konstant. Die bei der Analyse der Modellblöcke bestimmte Modelldeformation kann weitgehend, aber nicht vollständig, wie der Vergleich der Bilddeformation mit der Modelldeformation zeigt, auf die Bilddeformation zurückgeführt werden.

Die Bestimmbarkeit der Deformationen ist wesentlich von der Querüberdeckung und der Paßpunktbesetzung abhängig. Wie die Analyse der Höhendeformation der Paßpunktversion 5 gezeigt hat, reichen für die sichere Bestimmung der Bild- und Modelldeformationen drei Höhenpaßpunktketten aus. Damit kann das Verfahren auch in der Praxis angewendet werden, wo in der Regel dieser Fall vorliegt.

Aufgrund der Geometrie der Modellverknüpfungen ist die Bestimmbarkeit einiger Deformationstypen neben der Paßpunktbesetzung auch von der Querüberdeckung, der Anordnung der Flugstreifen und der Flugrichtung abhängig. Als Beispiel ist besonders die zylindrische Modellverbiegung in der Höhe zu nennen, die nur bei $q = 60\%$ Querüberdeckung bestimmt werden kann.

Die Ursache der systematischen Fehler ist in erster Linie im Aufnahmesystem¹⁾ zu suchen. Dies kommt in einer Abhängigkeit der Bild- und Modelldeformation von der Flugrichtung, bezogen auf das Geländesystem, zum Ausdruck. Die Abhängigkeit der systematischen Fehler vom Auswertesystem, sofern Komparatoren verwendet werden, ist nur gering. Eine Abhängigkeit von anderen Faktoren, z.B. atmosphärischen Einflüssen, konnte nicht festgestellt werden.

Aus der Analyse der systematischen Fehler in Kapitel III folgt: Wenn die systematischen Fehler so deutlich und konstant sind, muß ihre Erfassung in Ausgleichungen auch in der Praxis möglich und lohnend sein. Es ist durch die Korrektur der systematischen Fehler eine deutliche Genauigkeitssteigerung zu erwarten.

¹⁾ Siehe Kapitel I, Abschnitt 2.1

IV. KORREKTUR DER SYSTEMATISCHEN BILD- UND MODELLDEFORMATIONEN

Die Beurteilung der Ergebnisse in Kapitel I und II hat ergeben, daß im Oberschwabenmaterial vermutlich systematische Fehler vorhanden sind. Mit der Bestimmung der systematischen Fehler in Kapitel III, nach einer modifizierten Form der Selbstkalibrierung (de MASSON d'AUTUME [35]), konnte dies bestätigt werden. Die Untersuchungen erbrachten den Nachweis von großen und in hohem Maße konstanten Bild- und Modelldeformationen. Die Beschreibung und die Analyse der systematischen Fehler geben Aufschluß über deren Größe und deren Eigenschaften und haben damit eine selbständige Bedeutung.

In diesem Kapitel wird die Korrektur der systematischen Bild- und Modelldeformationen beschrieben und die Ergebnisse der Neuberechnungen der Blockausgleichungen im Sinne einer Selbstkalibrierung werden dargestellt und beurteilt. Wie die Diskussion der Testfeldkalibrierung gezeigt hat, ist die Testfeldkalibrierung für eine vollständige Korrektur der systematischen Bild- und Modelldeformationen nicht stets ausreichend. Es wird durch einen Vergleich der empirischen Ergebnisse der Selbstkalibrierung mit den theoretischen Genauigkeitserwartungen der Nachweis zu führen sein, ob die Selbstkalibrierung eine weitergehende Korrektur der systematischen Fehler gewährleistet.

1. Korrektur

Die Bild- und Modellkoordinaten der Verknüpfungspunkte und der Paßpunkte müssen für die Neuberechnung der Blockausgleichungen wegen der Bild- bzw. Modelldeformationen verbessert werden. Die Bild- und Modelldeformationen sind nach dem in Kapitel III erläuterten Verfahren der bereichsweisen Mittelung der Restfehler an den Verknüpfungspunkten bestimmt worden. Durch Fehlervektoren in 9 Punkten im Bild und 6 Punkten im Modell (siehe Abbildungen 3.1 und 3.2) sind die Bild- bzw. Modelldeformationen beschrieben. Zur Korrektur der Bild- und der Modellkoordinaten müssen, ausgehend von den ermittelten Stützwerten an den Standardpunkten, die jeweiligen Korrekturbeträge für die in dem gesamten Bild bzw. Modell verstreut liegenden Verknüpfungs- und Paßpunkte berechnet und angebracht werden.

1.1 Korrekturansätze

Die Korrekturformeln müssen die durch Fehlervektoren an den Stützpunkten beschriebenen Bild- und Modelldeformationen vollständig erfassen und die Korrekturbeträge zwischen den Stützpunkten interpolieren. Dafür sind einfache Polynome ausreichend. Da die Bestimmung der Deformationen nach der Blockausgleichung erfolgt ist, durch bereichsweise Mittelung getrennt nach Bereichen und getrennt für die x-, y- und z-Koordinaten der (Bild- und) Modellpunkte, kann auch die Korrektur für die Koordinaten getrennt durchgeführt werden. Anhand der Anzahl und der Verteilung der Stützpunkte sind dann die Polynome vorgegeben.

Für die Korrektur der Bildkoordinaten ergeben sich folgende Korrekturformeln:

$$\Delta x = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x y + a_4 x^2 + a_5 y^2 + a_6 x y^2 + a_7 x^2 y + a_8 x^2 y^2 \quad (1)$$

$$\Delta y = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x y + b_4 x^2 + b_5 y^2 + b_6 x y^2 + b_7 x^2 y + b_8 x^2 y^2$$

Für die Modelle lauten die Korrekturformeln wie folgt:

$$\begin{aligned} \Delta x &= a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x y + a_4 y^2 + a_5 x y^2 \\ \Delta y &= b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x y + b_4 y^2 + b_5 x y^2 \\ \Delta z &= c_0 + c_1 x + c_2 y + c_3 x y + c_4 y^2 + c_5 x y^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Ein anderer Korrekturansatz sind die orthogonalen Polynome, die EBNER für den Standardfall von 9 Punkten im Bild und 6 Punkten im Modell abgeleitet hat. Die Polynomkoeffizienten bei diesem Ansatz wurden so gewählt, daß diese unter sich und mit den Orientierungsparametern nicht korreliert sind. Die Gleichungen zur Korrektur der Bilddeformation, die durch Fehlervektoren an 9 Schemapunkten gegeben ist, lauten (nach EBNER [19]):

$$\Delta x = b_1 x + b_2 y - b_3(2x^2 - 4b^2/3) + b_4 x y + b_5(y^2 - 2b^2/3) + b_7 x(y^2 - 2b^2/3) + b_9(x^2 - 2b^2/3) y + b_{11}(x^2 - 2b^2/3)(y^2 - 2b^2/3) \quad (3)$$

$$\Delta y = -b_1 y + b_2 x + b_3 x y - b_4(2y^2 - 4b^2/3) + b_6(x^2 - 2b^2/3) + b_8(x^2 - 2b^2/3) y + b_{10} x(y^2 - 2b^2/3) + b_{12}(x^2 - 2b^2/3)(y^2 - 2b^2/3) \quad (4)$$

und für die Korrektur der Modelldeformation mit sechs Schemapunkten

$$\Delta x = p_1 x + p_2 3y/8 + p_3 x y + p_5 x(y^2 - 2b^2/3) + p_7(y^2 - 2b^2/3) \quad (5)$$

$$\Delta y = -p_1 3y/8 + p_2 x + p_4 x y + p_6 x(y^2 - 2b^2/3) + p_8(y^2 - 2b^2/3) \quad (6)$$

$$\Delta z = h_1 x y + h_2 x(y^2 - 2b^2/3) + h_3(y^2 - 2b^2/3) \quad (7)$$

für die Projektionszentren

$$\Delta x_{pZ} = h_4 x/b ; \quad \Delta y_{pZ} = h_5 x/b ; \quad \Delta z_{pZ} = h_6 x/b . \quad (8)$$

Die Wirkung der Parameter ist in den Abbildungen 3.6 und 3.7 dargestellt (Kapitel III).

Soweit die Korrekturpolynome die Deformationen vollständig erfassen, sind die verschiedenartigen Korrekturformeln gleichwertig. Dies trifft nur für das modifizierte Verfahren nach de MASSON d'AUTUME zu, wo die Standardblockausgleichung und die Bestimmung und die Korrektur der systematischen Fehler getrennt sind und die systematischen Fehler durch bereichsweise Mittelung berechnet werden. Für die Korrektur der Modellkoordinaten wurden die Polynome (2) angewandt. Die Bildkoordinaten wurden mit den orthogonalen Polynomen (3,4) verbessert.

Die Fehler der Projektionszentren Δx , Δy und Δz wurden ebenfalls zusammen mit der Modelldeformation bestimmt. Um diese Fehler werden die Projektionszentren, zusätzlich zu der Korrektur der Modellpunkte, verbessert.

1.2 Durchführung

Die Standardblockausgleichungen und die Bestimmung und Korrektur der systematischen Fehler wurde nach dem beschriebenen Verfahren durchgeführt. Zur Korrektur der systematischen Fehler wurde jeweils das Ergebnis der Bestimmung aus der bearbeiteten PP-Version herangezogen. Das bedeutet, daß z.B. für die Korrektur der Bildkoordinaten von PP-Version 1, die Ergebnisse der Bestimmung aus der gleichen PP-Version, nämlich PP-Version 1, zugrunde gelegt wurden.

Bei dem Verfahren nach de MASSON d'AUTUME erfolgt die Korrektur der systematischen Fehler iterativ. In der Regel sind 2 Iterationen ausreichend. In Tabelle 4.1 sind die Absolutgenauigkeit und die Gewichtseinheitsfehler des ÖWW-Blockes Den Haag für die einzelnen Iterationen aufgeführt.

	Stand. block- ausgl.	ÖWW-Block Den Haag						
		Bündel			Stand. block- ausgl.	Modelle		
		1.Iter.	2.Iter.	3.Iter.		1.Iter.	2.Iter.	3.Iter.
μ_x μm	12.2	8.8	8.2	7.9	12.4	10.1	9.5	9.5
μ_y μm	30.2	16.8	14.4	13.1	17.6	13.0	11.7	11.3
μ_{xy} μm	23.0	13.4	11.7	10.8	15.2	11.6	10.7	10.4
μ_z μm	16.6	12.7	12.4	12.4	14.9	14.9	14.9	14.9
σ_o μm	7.9	6.0	5.8	5.8	8.6	7.1	6.9	6.9
					7.6	7.4	7.4	7.4

Tabelle 4.1 Korrektur der systematischen Bild- und Modelldeformationen nach dem Verfahren nach de MASSON d'AUTUME - Konvergenz der Iterationen

2. Ergebnisse der Blockausgleichungen nach der Korrektur der systematischen Bild- und Modellfehler

Von dem Oberschwabenmaterial wurden für alle Blöcke Selbstkalibrierungen nach Verfahren nach de MASSON d'AUTUME berechnet. Es sind dies die WW-Blöcke Frankfurt, Wien und WW ($q = 60\%$) und die ÖWW-Blöcke Den Haag, Delft und ÖWW ($q = 60\%$). In Übereinstimmung mit Kapitel III wurden die Paßpunktversionen 0, 1 und 5 nach der Bündelmethode und der Methode der unabhängigen Modelle bearbeitet.

Durch die Korrektur der systematischen Fehler nach dem Verfahren nach de MASSON d'AUTUME wurde die Genauigkeit der Blockausgleichungen in den meisten Fällen verbessert. Dies macht eine Diskussion der neuen Ergebnisse und eine vergleichende Beurteilung notwendig.

2.1 Zusammenstellung der Blockausgleichungsergebnisse mit Selbstkalibrierung

Die Ergebnisse der Blockausgleichungen mit und ohne Korrektur der systematischen Bild- und Modelldeformationen sind in den Tabellen 4.2 bis 4.5 aufgeführt. Die Werte μ_x , μ_y , $\mu_{x,y}$ und μ_z geben die Absolutgenauigkeit wieder, die mit über 450 Kontrollpunkten in der Lage und 350 Kontrollpunkten in der Höhe beurteilt wurde. In einer zusätzlichen Spalte der Tabelle wird der Faktor angegeben um den die Genauigkeit durch die Korrektur der systematischen Deformationen verbessert worden ist.

Ein Auszug aus der Gesamtheit der Ergebnisse stellt sich wie folgt dar:

2.1.1 Gewichtseinheitsfehler

Nach der Korrektur der systematischen Fehler betragen die Gewichtseinheitsfehler für die PP-Version 1 im Mittel:

WW:

Modelle: $\sigma_{oL} = 4.6 \mu\text{m}$; $\sigma_{oH} = 7.6 \mu\text{m}$

Bündel: $\sigma_o = 3.4 \mu\text{m}$

ÜWW:

Modelle: $\sigma_{oL} = 6.8 \mu\text{m}$; $\sigma_{oH} = 6.9 \mu\text{m}$

Bündel: $\sigma_o = 5.5 \mu\text{m}$

2.1.2 Absolutgenauigkeit: Lage

Die Ergebnisse von Paßpunktversion 1 (dichter Rand) demonstrieren, daß die Blockausgleichungsergebnisse mit Korrektur der systematischen Fehler gegenüber den ursprünglichen Ergebnissen deutlich verbessert wurden. Die Genauigkeit der Bündelblöcke und der entsprechenden Modellblöcke ist in etwa gleich.

WW:

Modelle: $\mu_{x,y} = 8.4 \mu\text{m}$ (Frankfurt); $8.0 \mu\text{m}$ (Wien); $6.7 \mu\text{m}$ (q = 60 %)

Bündel: $\mu_{x,y} = 6.7 \mu\text{m}$ (Frankfurt); $9.2 \mu\text{m}$ (Wien); $5.8 \mu\text{m}$ (q = 60 %)

ÜWW:

Modelle: $\mu_{x,y} = 10.4 \mu\text{m}$ (Den Haag); $10.2 \mu\text{m}$ (Delft); $7.8 \mu\text{m}$ (q = 60 %)

Bündel: $\mu_{x,y} = 10.8 \mu\text{m}$ (Den Haag); $10.6 \mu\text{m}$ (Delft); $8.7 \mu\text{m}$ (q = 60 %)

2.1.3 Absolutgenauigkeit: Höhe

Durch die Korrektur der systematischen Deformationen wurde die Höhengenaugkeit unterschiedlich stark verbessert. Bemerkenswert sind besonders die Ergebnisse der PP-Version 5, wo bei einer Überbrückungsdistanz der Paßpunktketten von 12.5 Basislängen die unten angegebenen Höhengenaugkeiten erreicht werden. Für die WW-Blöcke erhält man demzufolge bei nur 40 Höhenpaßpunkten eine Genauigkeit von 0.1 % der Flughöhe. Demgegenüber fallen die Ergebnisse der ÜWW-Blöcke deutlich ab.

Bündel

Block	Frankfurt, q = 20 %										Wien, q = 20 %										WW, q = 60 %										
	0		1				5				0		1				5				0		1				5				
	nein	ja	nein	ja		nein	ja		nein	ja		nein	ja		nein	ja		nein	ja		nein	ja		nein	ja		nein	ja			
μ_x	$ \mu m $		9.6	5.7	1.7	44.9	36.1	1.2		13.3	10.7	1.2	40.0	24.2	1.7		10.8	6.5	1.7	19.9	21.1	0.9									
	$ cm $		27.2	16.1		127.1	102.2			37.6	30.3		113.2	68.5			30.6	18.4		56.3	59.7										
μ_y	$ \mu m $		17.8	7.6	2.3	47.2	32.1	1.5		16.2	7.4	2.2	24.1	27.0	0.9		10.8	5.0	2.2	27.1	23.7	1.1									
	$ cm $		50.6	21.5		133.6	96.8			45.8	20.9		68.2	76.4			30.6	14.2		76.7	67.1										
μ_{xy}	$ \mu m $		14.4	6.7	2.1	46.1	34.2	1.3		14.8	9.2	1.6	33.0	25.6	1.3		10.8	5.8	1.9	23.8	22.4	1.1									
	$ cm $		40.8	19.0		130.5	96.8			41.9	26.0		93.4	72.4			30.6	16.4		67.3	63.4										
μ_z	$ \mu m $		17.8	11.5	1.5	21.8	14.3	1.5		20.0	12.1	1.7	22.9	16.2	1.4		11.5	9.4	1.2	38.7	11.0	3.5									
	$ cm $		50.4	32.5		61.7	40.5			56.6	34.2		64.8	45.8			32.5	26.6		109.5	31.1										
σ_0	$ \mu m $	6.6	4.3	5.7	3.4	1.7	4.0	3.2	1.3	6.0	4.0	5.0	3.3	1.5	3.8	3.0	1.3	6.0	4.0	5.3	3.6	1.5	4.5	3.6	1.3						

Tabelle 4.2 Genauigkeitssteigerung durch Korrektur systematischer Bildfehler
Ergebnisse der WW-Blöcke (Bündel) Frankfurt, Wien, WW (q = 60 %)

Bündel

Block	Paßpunkt- version Korrektur	Den Haag, q = 20 %							Delft, q = 20 %							UWW, q = 60 %												
		0 nein ja		1 nein ja		5 nein ja			0 nein ja		1 nein ja		5 nein ja			0 nein ja		1 nein ja		5 nein ja								
μ_x	$ \mu $		12.1	7.9	1.5	39.3	30.9	1.3		13.6	10.1	1.3	74.7	52.1	1.4		11.7	7.1	1.6	18.3	19.1	1.0						
	$ \text{cm} $		35.1	22.7		112.8	88.7			39.0	29.0		214.4	149.5			33.6	20.4		52.5	54.8							
μ_y	$ \mu $		30.2	13.1	2.3	60.8	59.0	1.0		24.4	11.1	2.2	35.5	34.2	1.0		15.9	10.0	1.6	39.7	34.4	1.2						
	$ \text{cm} $		86.7	37.6		174.5	169.3			70.0	31.9		101.9	98.2			45.6	28.7		113.9	98.7							
μ_{xy}	$ \mu $		23.0	10.8	2.1	51.2	47.1	1.1		19.8	10.6	1.9	58.5	44.1	1.3		14.0	8.7	1.6	30.9	27.8	1.1						
	$ \text{cm} $		66.1	31.0		146.9	135.2			56.8	30.4		167.9	126.6			40.2	25.0		88.7	79.8							
μ_z	$ \mu $		16.6	12.4	1.3	27.9	19.7	1.4		17.5	11.7	1.5	15.6	13.4	1.2		11.3	9.8	1.2	35.6	13.0	2.7						
	$ \text{cm} $		47.6	35.6		80.1	56.5			50.2	33.6		44.8	38.5			32.4	28.1		102.2	37.3							
σ_o	$ \mu $	9.2	7.0		7.9	5.8	1.4	6.3	5.6	1.1	7.8	6.0		6.4	5.0	1.3	5.2	4.8	1.1	8.4	6.4		7.5	5.6	1.3	6.6	5.7	1.2

Tabelle 4.3 Genauigkeitssteigerung durch Korrektur systematischer Bildfehler
Ergebnisse der UWW-Blöcke (Bündel) Den Haag, Delft, UWW (q = 60 %)

Modelle

Block	Paßpunkt- version Korrektur	Frankfurt, q = 20 %									Wien, q = 20 %									ÖWW, q = 60 %								
		0		1		5		0		1		5		0		1		5		0		1		5				
		nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja			
μ_x	$ \mu m$	6.4	4.4	8.2	5.8	1.4	39.8	26.8	1.5	5.6	4.4	13.2	7.4	1.8	47.1	28.6	1.6	5.9	4.6	10.5	7.1	1.5	24.6	21.5	1.1			
	$ \text{cm}$	18.1	12.4	23.2	16.4		112.6	75.8		15.8	12.5	37.4	20.9		133.3	80.9		16.7	13.0	29.7	20.1		69.6	60.8				
μ_y	$ \mu m$	6.8	6.0	14.8	10.4	1.4	49.4	31.9	1.5	6.5	6.1	10.0	8.5	1.2	19.2	22.6	0.8	6.7	5.7	8.9	6.3	1.4	24.1	23.2	1.0			
	$ \text{cm}$	19.2	17.0	41.9	29.4		139.8	90.3		18.4	17.3	28.3	24.1		54.3	64.0		19.0	16.1	25.2	17.8		68.2	65.7				
μ_{xy}	$ \mu m$	6.6	5.3	12.0	8.4	1.4	44.9	29.5	1.5	6.1	5.3	11.7	8.0	1.5	35.6	25.8	1.4	6.3	5.2	9.7	6.7	1.4	24.4	22.4	1.1			
	$ \text{cm}$	18.7	15.0	34.0	23.8		127.1	83.5		17.3	15.0	33.1	22.6		100.7	73.0		17.8	14.7	27.5	19.0		69.1	63.4				
μ_z	$ \mu m$	9.7	9.6	12.8	12.8	1.0	18.8	14.7	1.3	8.8	8.8	13.4	13.1	1.0	26.9	20.5	1.3	9.8	8.8	11.5	10.0	1.2	54.1	13.8	3.9			
	$ \text{cm}$	27.4	27.2	36.2	36.2		53.2	41.6		24.9	24.9	37.9	37.1		76.1	58.0		27.7	24.9	32.5	28.3		153.1	39.1				
σ_{oL}	$ \mu m$	7.2	5.2	6.9	4.6	1.5	5.9	4.5	1.3	6.8	5.2	6.4	4.6	1.4	5.8	4.5	1.3	6.7	5.0	6.4	4.6	1.4	5.9	4.6	1.3			
σ_{oH}	$ \mu m$	9.1	8.9	8.3	8.1	1.0	8.3	8.1	1.0	8.4	8.0	7.7	7.2	1.1	7.5	7.0	1.1	9.5	8.0	9.1	7.4	1.2	8.8	7.4	1.2			

*) Genauigkeitsangabe bezieht sich auf Verbesserungen der Modellkoordinaten der Paßpunkte ($p = \infty$)

Tabelle 4.4 Genauigkeitssteigerung durch Korrektur systematischer Modellfehler
Ergebnisse der WW-Blöcke (Modelle) Frankfurt, Wien, WW (q = 60 %)

Modelle

Block Paßpunkt- version Korrektur	Den Haag, q = 20 %								Delft, q = 20 %								ÜWW, q = 60 %							
	0		1		5			0		1		5			0		1		5					
	nein	ja *)	nein	ja	nein	ja		nein	ja *)	nein	ja	nein	ja		nein	ja *)	nein	ja	nein	ja				
μ_x μ m	7.4	6.4	12.4	9.5	1.3	35.6	33.7	1.1	6.7	5.7	11.4	9.2	1.2	32.8	30.9	1.1	7.1	6.1	10.2	7.1	1.4	26.5	23.8	1.1
	cm	20.9	18.1	35.1	26.9		100.7	95.4		19.0	16.1	32.2	26.0		92.8	87.4		20.1	17.3	28.9	20.1		75.0	67.4
μ_y μ m	8.4	7.7	17.6	11.3	1.6	53.5	49.9	1.1	7.9	7.8	15.8	11.1	1.4	32.9	36.1	0.9	8.2	7.7	13.7	8.4	1.6	43.5	38.2	1.1
	cm	23.8	21.8	49.8	32.0		151.4	141.2		22.4	22.1	44.7	31.4		93.1	102.2		23.2	21.8	38.8	23.8		123.1	108.1
μ_{xy} μ m	7.9	7.1	15.2	10.4	1.5	45.4	42.6	1.1	7.3	6.8	13.8	10.2	1.3	32.9	33.6	1.0	7.7	6.9	12.1	7.8	1.5	36.0	31.8	1.1
	cm	22.4	20.1	43.0	29.4		128.5	120.6		20.7	19.2	39.0	28.9		93.1	95.1		21.8	19.5	34.2	22.1		101.9	90.0
μ_z μ m	9.7	9.7	14.9	14.9	1.0	22.6	22.4	1.0	8.9	8.9	14.6	14.5	1.0	32.5	31.1	1.0	10.1	8.5	13.1	11.4	1.1	78.4	26.4	3.0
	cm	27.5	27.5	42.2	42.2		64.0	63.4		25.2	25.2	41.3	41.0		92.0	88.0		28.6	24.1	37.1	32.3		221.9	74.7
σ_{OL} μ m	8.9	7.3	8.6	6.9	1.2	7.6	6.9	1.1	8.7	7.0	8.7	6.8	1.3	8.0	6.8	1.2	8.4	7.0	8.1	6.7	1.2	7.5	6.7	1.1
σ_{OH} μ m	8.7	8.3	7.6	7.4	1.0	7.4	7.1	1.0	7.7	7.2	6.7	6.0	1.1	6.4	5.6	1.1	9.6	7.3	9.2	7.3	1.3	8.7	6.6	1.3

*) Genauigkeitsangabe bezieht sich auf Verbesserungen der Modellkoordinaten der Paßpunkte ($p = \infty$)

Tabelle 4.5 Genauigkeitssteigerung durch Korrektur systematischer Modellfehler
Ergebnisse der ÜWW-Blöcke (Modelle) Den Haag, Delft, ÜWW (q = 60 %)

WW Modelle:	14.7 $\mu\text{m} \hat{=} 0.10 \text{ ‰ h}$	(Frankfurt)
	20.5 $\mu\text{m} \hat{=} 0.13 \text{ ‰ h}$	(Wien)
	13.8 $\mu\text{m} \hat{=} 0.09 \text{ ‰ h}$	(q = 60 %)
Bündel:	14.3 $\mu\text{m} \hat{=} 0.09 \text{ ‰ h}$	(Frankfurt)
	16.2 $\mu\text{m} \hat{=} 0.11 \text{ ‰ h}$	(Wien)
	11.1 $\mu\text{m} \hat{=} 0.07 \text{ ‰ h}$	(q = 60 %)
ÜWW Modelle:	22.4 $\mu\text{m} \hat{=} 0.26 \text{ ‰ h}$	(Den Haag)
	31.1 $\mu\text{m} \hat{=} 0.37 \text{ ‰ h}$	(Delft)
	26.4 $\mu\text{m} \hat{=} 0.31 \text{ ‰ h}$	(q = 60 %)
Bündel:	19.7 $\mu\text{m} \hat{=} 0.23 \text{ ‰ h}$	(Den Haag)
	13.4 $\mu\text{m} \hat{=} 0.16 \text{ ‰ h}$	(Delft)
	13.0 $\mu\text{m} \hat{=} 0.15 \text{ ‰ h}$	(q = 60 %)

2.2 Wirksamkeit der Korrektur der systematischen Fehler

Durch die Korrektur der systematischen Fehler werden die Gewichtseinheitsfehler und die Absolutgenauigkeit der Blöcke in fast allen Fällen deutlich verbessert. Ausnahmen bilden einige Modellblöcke mit q = 20 % Querüberdeckung, wo keine Steigerung der Höhengenaugkeit festgestellt werden kann.

Ob die Verbesserung der Genauigkeit statistisch signifikant ist, wird mit dem F-Test untersucht. Mit dem F-Test kann geprüft werden, ob zwei unabhängig gewonnene Zufallsstichproben einer gemeinsamen Grundgesamtheit entstammen. Die Nullhypothese ist bei der Gleichheit der Varianzen gültig. Wird diese abgelehnt, so gilt die Alternativhypothese, die besagt, daß die Varianzen keiner gemeinsamen Grundgesamtheit entstammen. Für die statistischen Tests wird ein 95 % - Vertrauensbereich gewählt.

1. Durch die Korrektur wurden die Gewichtseinheitsfehler in der Art verbessert, daß deren Abhängigkeit von der Paßpunktversion deutlich gemindert wurde. Dies bedeutet, daß bei den Versionen mit dichter Paßpunktbesetzung die Gewichtseinheitsfehler stärker reduziert worden sind. Ohne Korrektur der systematischen Fehler betragen die Unterschiede der Gewichtseinheitsfehler bei WW zwischen PP-Version 1 und 5 über 1.0 μm (Modelle, Lage: PP-Version 1, $\sigma_{oL} = 6.9 \mu\text{m}$; PP-Version 5, $\sigma_{oL} = 5.9 \mu\text{m}$ und Bündel: PP-Version 1, $\sigma_o = 5.7 \mu\text{m}$; PP-Version 5, $\sigma_o = 4.0 \mu\text{m}$). Nach der Neuberechnung mit der Selbstkalibrierung liegen die entsprechenden Werte, innerhalb eines Bereiches von 0.1 μm (Modelle) und 0.3 μm (Bündel), sehr eng zusammen. Die Unterschiede bei den Bündelblöcken sind signifikant.

Lediglich die Gewichtseinheitsfehler der PP-Version 0 nehmen im Vergleich zu den Paßpunktversionen 1 und 5 deutlich größere Beträge an. Die Erklärung dafür ist in der mit 10 cm anzusetzenden Ungenauigkeit der terrestrischen Paßpunktkoordinaten zu suchen (siehe Kapitel I, Abschn. 1.4.2).

Die Beträge der Gewichtseinheitsfehler sind um die Faktoren 1.4 (σ_{oL} , Modelle, WW), 1.5 (σ_o , Bündel, WW), 1.2 (σ_{oL} , Modelle, ÜWW) und 1.3 (σ_o , Bündel, ÜWW) verbessert worden. Die Gewichtseinheitsfehler der Modellblöcke mit q = 20 %

konnten in der Höhe im Durchschnitt nur um den Faktor 1.1 verbessert werden. Diese Verbesserung ist ebenfalls signifikant.

2. Die absolute Lagegenauigkeit konnte durch die Korrektur der systematischen Fehler, von drei Ausnahmen abgesehen (ÜWW-Block Den Haag, Version 0 und 5, ÜWW-Block Den Haag, Version 5), durchweg gesteigert werden und zwar um die Faktoren 1.5 (Modelle) bzw. 1.9 (Bündel) bei der Paßpunktversion 1.

Bei der Paßpunktversion 5 blieb die Genauigkeitssteigerung mit dem Faktor 1.2 (Modelle) und 1.2 (Bündel) bescheidener. Damit hat sich das Ergebnis aus Kapitel III Abschnitt 4.2 bestätigt, daß nur 4 Lagepaßpunkte für eine sichere Bestimmung des Gesamtbetrags der Bild- und Modelldeformationen, davon insbesondere der Affinität, unzureichend sind. Andererseits beeinflußt die Affinität die Genauigkeit der Blockausgleichung in besonderem Maße.

3. Die absolute Höhengenaugigkeit der ausgeglichenen Triangulationspunkte wird durch die Korrektur der systematischen Fehler ebenfalls deutlich gesteigert. Ausgenommen davon sind lediglich die Modellblöcke mit $q = 20\%$ Querüberdeckung, wo die Genauigkeit nicht oder nur geringfügig verbessert wird. Der Grund dafür ist die mangelhafte Erfassung der Höhendeformation der Modelle mit $q = 20\%$ Querüberdeckung. Die Höhengenaugigkeit bei Paßpunktversion 1 (dichte Ketten im Abstand $i=2$) wird bei den Bündelblöcken durchschnittlich um den Faktor 1.4 gesteigert.

Eine außerordentlich starke Verbesserung, nämlich um den Faktor 3.9 WW (bzw. 3.0 ÜWW), erfahren die Modellblöcke, Paßpunktversion 5, mit $q = 60\%$ Querüberdeckung. Die entsprechenden Werte für die Bündelblöcke liegen bei 3.5 (2.7). Der Grund für die große Verbesserung ist die Korrektur der offensichtlich bei $q = 60\%$ Querüberdeckung sehr wirksamen Deformation, die sich bei den Modellen als zylindrische Höhendurchbiegung darstellt.

Die Verbesserungen der Höhengenaugigkeit sind, abgesehen von den wenigen Modellblöcken mit $q = 20\%$ Querüberdeckung, ebenfalls signifikant.

4. Wie die Ergebnisse zeigen, ist die Korrektur der systematischen Fehler notwendig und lohnend. Die Genauigkeit der Aerotriangulation kann dadurch erheblich verbessert werden. Allerdings ist der Faktor der Genauigkeitssteigerung sehr unterschiedlich, abhängig von der Paßpunktversion und der Bestimmbarkeit der systematischen Fehler.

2.3 Korrektur der systematischen Fehler mit der bestmöglichen Bestimmung

1. Bei der Selbstkalibrierung werden die systematischen Bild- und Modelldeformationen aus den vorhandenen Daten bestimmt. Zusätzliche Informationen werden nicht in das System eingeführt, weil sie in der Regel auch nicht greifbar sind. Diese Ergebnisse der Selbstkalibrierung entsprechen den Bedingungen der Praxis. Wissenschaftlich interessant wäre darüber hinaus zu wissen, welches Ergebnis mit der bestmöglichen Bestimmung und Korrektur zu erzielen wäre.

Das Oberschwabenmaterial bietet hierfür einen Ansatzpunkt, da hier über die übliche Zahl der Paßpunkte hinaus eine große Anzahl von terrestrischen Vergleichs-

punkten bekannt sind. In der Paßpunktversion 0 werden alle bekannten Punkte als Paßpunkte in die Ausgleichung eingeführt. Bei dieser Paßpunktversion und bei einer Querüberdeckung von $q = 60\%$ ist die beste Bestimmung der systematischen Bild- und Modelldeformationen möglich (siehe Kapitel III, Abschn. 4.2). Nun werden mit dem Ergebnis dieser Bestimmung die systematischen Bildfehler korrigiert und Blockausgleichungen für die Paßpunktversionen 1 und 5 berechnet.

Die Ergebnisse der Blockausgleichungen sind in Tabelle 4.6 dargestellt.

2. Die Gewichtseinheitsfehler der Selbstkalibrierung und der Blockausgleichungen mit Korrektur der systematischen Fehler aus der besten Bestimmung sind gleich. Es konnte also auch durch die erneute Berechnung keine Verbesserung erzielt werden.

Gegenüber der regulären Selbstkalibrierung kann hier die absolute Lagegenauigkeit nochmals signifikant verbessert werden. Die absolute Lagegenauigkeit der Blöcke Frankfurt und Den Haag wurde um die Faktoren 1.2 (PP-Version 1) und 2.2 (PP-Version 5) gesteigert. Dem gegenüber konnte die absolute Höhengenaugigkeit nur in einem Fall signifikant verbessert werden. Dies betrifft die Paßpunktversion 5 vom Block Den Haag, wo die Höhengenaugigkeit um den Faktor 1.3 gesteigert wurde. In allen anderen Fällen blieb die Genauigkeit gleich.

3. Die Ergebnisse bestätigen die Überlegungen von Kapitel III, wo festgestellt wurde, daß bei der Selbstkalibrierung die Bilddeformationen insbesondere bei schwacher Paßpunktbesetzung nicht vollständig erfaßt werden können. Die verbleibenden Bilddeformationen beeinträchtigen zum Teil erheblich die Genauigkeit

PP-Version Korrektur	Frankfurt, $q = 20\%$						Den Haag, $q = 20\%$						
	1			5			1			5			
	nein	ja ¹⁾	ja ²⁾	nein	ja ¹⁾	ja ²⁾	nein	ja ¹⁾	ja ²⁾	nein	ja ¹⁾	ja ²⁾	
μ_x	μm	9.6	5.7	5.7	44.9	36.1	16.3	12.2	7.9	7.2	39.3	30.9	22.9
	cm	27.2	16.1	16.2	127.1	102.2	46.8	35.0	22.7	21.1	112.8	88.7	66.7
μ_y	μm	17.9	7.6	5.6	47.2	32.1	13.9	30.2	13.1	10.3	60.8	59.0	19.8
	cm	50.6	21.5	15.9	133.6	96.8	39.6	86.7	37.6	29.9	174.5	169.3	57.9
$\mu_{x,y}$	μm	14.4	6.7	5.7	46.1	34.2	15.2	23.0	10.8	8.9	51.2	47.1	21.4
	cm	40.8	19.0	16.0	130.5	96.8	43.4	66.1	31.0	25.9	146.9	135.2	62.5
μ_z	μm	17.8	11.5	10.9	21.8	14.3	14.5	16.6	12.4	11.7	27.9	19.7	15.6
	cm	50.4	32.5	31.3	61.7	40.5	41.5	47.6	35.6	34.3	80.1	56.5	45.6
σ_o	μm	5.7	3.4	3.4	4.0	3.2	3.2	7.9	5.8	5.7	6.3	5.6	5.5

1) Selbstkalibrierung

2) Korrektur mit der bestmöglichen Bestimmung

Tabelle 4.6 Genauigkeitssteigerung der Bündelblöcke durch Korrektur systematischer Bildfehler
- Korrektur mit der bestmöglichen Bestimmung

der Aerotriangulation. Dies gilt in umso stärkerem Maße, je geringer die Paßpunktdichte wird. Hier wirken nämlich zwei Faktoren zusammen. Zum einen wird die Bestimmbarkeit der Bilddeformationen mit abnehmender Paßpunktdichte ungünstiger; zum anderen wird der Block stärker deformiert, was unmittelbar die Genauigkeit der Aerotriangulation beeinflußt.

Dieser Versuch bestätigt noch einmal deutlich den Unterschied zwischen wahrer und bestimmbarer Deformation.

3. Vergleich der empirischen Ergebnisse mit der theoretischen Genauigkeit

1. Mit dem Vergleich von den empirischen Ergebnissen der Blockausgleichungen mit der abgeleiteten theoretischen Genauigkeit prüft man das angewandte mathematische Modell der Aerotriangulation. Als Ergebnis wird man eine Übereinstimmung oder eine Diskrepanz feststellen. Die Übereinstimmung bestätigt die Richtigkeit der Annahmen zur Herleitung des mathematischen Modells. Die Diskrepanz weist darauf hin, daß das mathematische Modell zumindest nicht ausreichend ist; oder darauf, daß die empirischen Daten die Voraussetzungen für die Gültigkeit des mathematischen Modells nicht erfüllen.

2. Der Vergleich der Ergebnisse der Blockausgleichungen ohne Selbstkalibrierung in der ersten Bearbeitungsphase mit den theoretischen Genauigkeitserwartungen brachte nur in wenigen Punkten eine Übereinstimmung. Insgesamt war die empirische Genauigkeit der Aerotriangulation, wie die Diskussion in Kapitel I, Abschnitt 4.4 zeigt, deutlich schlechter als die theoretischen Genauigkeitserwartungen. Dies bedeutet nach den oben angestellten Überlegungen, daß das mathematische Modell nicht ausreichend ist, bzw. die empirischen Daten die Voraussetzungen für die Gültigkeit der theoretischen Genauigkeit nicht erfüllt haben.

Durch die Korrektur der Bild- und der Modellkoordinaten wegen der systematischen Bild- und Modelldeformationen konnte die Genauigkeit der Aerotriangulation in der Mehrzahl der Fälle deutlich gesteigert werden. In einem erneuten Vergleich der empirischen und der theoretischen Genauigkeit soll nun die Übereinstimmung der neuen empirischen Ergebnisse mit den theoretischen Erwartungen geprüft werden.

3.1 Ableitung der theoretischen Genauigkeit durch Simulation zufälliger Fehler

Die theoretische Genauigkeit der Aerotriangulation mit Bündeln und mit Modellen als Einheiten ist schon verschiedentlich abgeleitet worden (ACKERMANN [1], EBNER [17]). Auf der Grundlage der bekannten mathematischen Modelle wurde die theoretische Genauigkeit durch Inversion der Normalgleichungsmatrizen berechnet. Dazu wurden schematische Blöcke benutzt. In die Ableitung der theoretischen Genauigkeit gehen verschiedene Parameter ein. Es sind dies die Genauigkeit der Bild- oder Modellkoordinaten, die Blockgröße, die Paßpunktbesetzung, die Paßpunktverteilung und die Querüberdeckung.

Eine präzisere Herleitung der theoretischen Genauigkeit von ausgeglichenen empirischen Blöcken, als das mit der allgemeinen Genauigkeitstheorie möglich ist, erlaubt die Simulation zufälliger Fehler. Insbesondere gehen bei dieser Methode die Eigenheiten des Blockes, vor allem die Blockform und die Lage und Anzahl der Verknüpfungs- und Paßpunkte in die Berechnung der theoretischen Genauigkeit ein. Die übrigen, die Genauigkeit beeinflussenden Parameter sind ebenfalls implizit in der Berechnung enthalten.

Ausgangsdaten für die Simulation sind die gemessenen Bild- und Modellkoordinaten der Blöcke des Oberschwabentests. Mit Blockausgleichungen werden die ausgeglichenen Bild- und Modellkoordinaten berechnet, wobei jeweils alle bekannten terrestrischen Punkte Paßpunkte sind. Durch die Berechnung der Blockausgleichung wird das photogrammetrische System widerspruchsfrei gemacht. Man hat also fiktive fehlerfreie terrestrische und photogrammetrische Daten ($\sigma_0 = 0$; $\mu_{x,y,z} = 0$). Die fehlerfreien photogrammetrischen Daten sind die ausgeglichenen Bild- und Modellkoordinaten.

Für die Simulation werden die ausgeglichenen und fehlerfreien Bild- und Modellkoordinaten mit zufälligen, normalverteilten Fehlern überlagert. Die zufälligen Fehler werden mit dem Systemprogramm 'FIMSL'¹⁾ generiert. Durch Änderung eines Parameters können mit dem Programm verschiedene Normalverteilungen erzeugt werden, die alle den Mittelwert $\mu = 0$ und die Standardabweichung $\sigma = 1$ gemeinsam haben. Die Eichung erfolgt in der Form, daß die zufälligen Fehler mit den empirischen Gewichtseinheitsfehlern aus den Blockausgleichungen multipliziert werden. Damit erreicht man, daß die Gewichtseinheitsfehler der empirischen und theoretischen Blöcke annähernd gleich sind. Dies ist insofern von Bedeutung, als die Absolutgenauigkeit und der Gewichtseinheitsfehler voneinander abhängig sind.

Mit diesen neuen, von zufälligen Fehlern überlagerten Bild- und Modellkoordinaten werden nun erneut Blockausgleichungen berechnet. Die Absolutgenauigkeit der ausgeglichenen Koordinaten μ_x , μ_y und μ_z gibt eine Schätzung der theoretischen Genauigkeit der Blockausgleichung in Bezug auf die vorgegebene Genauigkeit der Bild- und Modellkoordinaten an. Das Ergebnis einer Blockausgleichung ist als eine Stichprobe aufzufassen.

Für die Bündelblöcke und die Modellblöcke wurden die Paßpunktversionen 1 und 5 bearbeitet. Dabei wurden bei den Modellblöcken die beiden Blöcke mit 7 und 8 Streifen²⁾ berechnet und der Block mit $q = 60\%$ Querüberdeckung. Zwischen WW und ÖWW wurde nicht unterschieden, da die Absolutgenauigkeit der ausgeglichenen Blöcke nur eine Funktion der Gewichtseinheitsfehler in Lage und Höhe ist. Im Gegensatz dazu wurde bei den Bündelblöcken der Bildwinkel berücksichtigt. Wie die Modellergebnisse zeigen werden, ist die Auswirkung der unterschiedlichen Streifenanzahl²⁾ auf die Absolutgenauigkeit der Aerotriangulation vernachlässigbar klein. Deshalb wurden bei der Berechnung der Bündelblöcke nur die Querüberdeckung und der Bildwinkel in die Betrachtung miteinbezogen.

1) Rechenprogramm aus der Programmbibliothek des Rechenzentrums der Universität Stuttgart.

2) Die Blöcke Frankfurt und Den Haag haben 8 Streifen; die Blöcke Wien und Delft haben 7 Streifen.

Für jede Paßpunktversion und jeden Block wurden mehrere Blockausgleichungen berechnet, wobei der Anfangsparameter des Systemprogramms variiert wurde. Bei den ersten Serien für die unabhängigen Modelle und für die Bündel wurden jeweils zehn Blockausgleichungen berechnet. Dabei ergab sich, daß sich die Mittel der Absolutgenauigkeit der ersten fünf und der zweiten fünf Blockausgleichungen nicht signifikant unterschieden. Deshalb brauchten für die nächsten Serien nur noch jeweils fünf Blockausgleichungen berechnet werden.

Das Ergebnis der Simulation sind die Mittel und die mittleren Streuungen der Absolutgenauigkeit bezogen auf den vorgegebenen Gewichtseinheitsfehler. Die Absolutgenauigkeit wird aus den Verbesserungen der Vergleichspunkte bestimmt. Die mittleren Streuungen werden aus der Absolutgenauigkeit der verschiedenen Blockausgleichungen nach der Formel des mittleren Fehlers des arithmetischen Mittels berechnet.

3.2 Diskussion der theoretischen Genauigkeit

Die Ergebnisse der Simulation zufälliger Fehler sind in Tabelle 4.7 aufgeführt. Die theoretische Absolutgenauigkeit wird in der Tabelle mit μ_x , μ_y , $\mu_{x,y}$ und μ_z und ihre mittlere Streuung mit m_x , m_y , $m_{x,y}$ und m_z bezeichnet. Die Ergebnisse sind auf den Gewichtseinheitsfehler $\sigma_0 = 1.0 \mu\text{m}$ reduziert.

Aus der Simulation ergibt sich, daß die theoretische Lagegenauigkeit für die Modellblöcke mit $q = 20 \%$ und dichtem Lagepaßpunkttrand (PP-Version 1) dem Gewichtseinheitsfehler entspricht. Erhöht man die Querüberdeckung auf $q = 60 \%$, so verbessert sich die Genauigkeit um den Faktor 1.4. Die Höhengenaugkeit beträgt bei den Blöcken mit $q = 20 \%$ und Paßpunktversion 1 $1.1 \cdot \sigma_{0H}$ und wird durch die Erhöhung der Querüberdeckung ebenfalls um den Faktor 1.4 verbessert.

Bei Paßpunktversion 5, das sind in der Lage nur vier Eckpunkte und in der Höhe drei Paßpunktketten im Abstand $i=12.5$, verschlechtert sich die Genauigkeit auf den doppelten Betrag von Paßpunktversion 1. Die Absolutgenauigkeit beträgt nun $\mu_{x,y} = 2.2 \cdot \sigma_{0L}$ und $\mu_z = 2 \cdot \sigma_{0H}$. Die Ergebnisse von Paßpunktversion 5 sind unsicherer. Dies wird durch die mittleren Fehler m_x , m_y und $m_{x,y}$ der Absolutgenauigkeit ausgedrückt. Die mittleren Fehler der Höhengenaugkeit sind etwas gemildert.

Für die Bündelblöcke mit $q = 20 \%$ und Paßpunktversion 1 ergibt sich die Lagegenauigkeit zu $0.9 \cdot \sigma_0$. Die Höhengenaugkeit der Bündelblöcke ist abhängig vom Bildwinkel und beträgt für WW $2.1 \cdot \sigma_0$ und für ÖWW $1.2 \cdot \sigma_0$. Die Ergebnisse für Paßpunktversion 5 sind in der Lage um den Faktor 3 schlechter und in der Höhe um den Faktor 1.5. Erhöht man die Querüberdeckung auf $q = 60 \%$, so beträgt die Genauigkeit für Paßpunktversion 1 in der Lage $0.6 \cdot \sigma_0$ (WW und ÖWW) und in der Höhe $1.3 \cdot \sigma_0$ (WW) bzw. $0.7 \cdot \sigma_0$ (ÖWW).

Die Ergebnisse zeigen, daß man bei der Aerotriangulation, sofern die Bild- und Modellkoordinaten nur mit zufälligen Fehlern überlagert sind, eine sehr hohe mittlere Genauigkeit der Triangulationspunkte über den gesamten Block erreichen kann. Zwar sagen die mittleren Fehler nichts über die Genauigkeitsverteilung

Ausgleichung	Block	PP-Version	Gewichtseinheitsfehler		Absolutgenauigkeit				mittlere Streuung der Absolutgenauigkeit				n*)
			σ_{oH}	σ_{oL}	μ_x	μ_y	$\mu_{x,y}$	μ_z	m_x	m_y	$m_{x,y}$	m_z	
Unabhängige Modelle	Frankfurt	1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	0.04	0.09	0.06	0.07	10
		5	1.0	1.0	2.2	2.0	2.1	1.9	0.48	0.54	0.39	0.46	10
	Wien	1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	0.03	0.05	0.02	0.02	5
		5	1.0	1.0	2.3	2.1	2.3	2.0	0.83	0.76	0.66	0.21	5
	WW, q = 60 %	1	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7	0.8	0.04	0.02	0.02	0.02	5
		5	1.0	1.0	1.3	1.5	1.4	1.2	0.44	0.55	0.35	0.13	5
Bündel	Frankfurt	1	1.0	0.8	0.9	0.9	2.1	0.05	0.05	0.04	0.05	10	
		5	1.0	3.1	3.1	3.2	3.3	1.68	1.10	1.09	0.52	10	
	Den Haag	1	1.0	0.8	0.9	0.9	1.2	0.02	0.06	0.04	0.04	5	
		5	1.0	3.3	3.4	3.5	1.8	1.64	0.97	0.91	0.27	5	
	WW, q = 60 %	1	1.0	0.6	0.6	0.6	1.3	0.03	0.02	0.02	0.04	5	
		5	1.0	1.7	2.1	1.9	1.8	0.67	0.76	0.60	0.12	5	
	ÜWW, q = 60 %	1	1.0	0.6	0.6	0.6	0.7	0.02	0.01	0.01	0.02	5	
		5	1.0	1.1	1.4	1.3	1.2	0.35	0.34	0.24	0.14	5	

*) n = Anzahl der Blockausgleichungen

Tabelle 4.7 Simulation zufälliger Fehler - theoretische Genauigkeit der Blockausgleichungen
(alle Ergebnisse bezogen auf $\sigma_o = 1$)

aus, doch ist aus anderen Untersuchungen bekannt, daß diese nur gering variieren, sofern man die offenen Blockränder ausreichend mit Paßpunkten absichert.

Auch die Ergebnisse der Paßpunktversion 5 können noch als gut bezeichnet werden. Allerdings erhält man hier große Unterschiede in den Ergebnissen der einzelnen Blockausgleichungen, was in dem hohen mittleren Fehler m zum Ausdruck kommt. Davon sind insbesondere die Bündelausgleichungen betroffen.

3.3 Vergleich der empirischen Ergebnisse mit den theoretischen Genauigkeitserwartungen

Für den Vergleich von empirischer und theoretischer Genauigkeit wurde die theoretische Genauigkeit aus der Simulation zufälliger Fehler herangezogen. Die theoretische Absolutgenauigkeit, die auf den Gewichtseinheitsfehler $\sigma_0 = 1$ bezogen worden ist, muß an die empirischen Genauigkeitsergebnisse angepaßt werden. Diese Eichung erfolgt dadurch, indem man die theoretische Absolutgenauigkeit mit dem empirischen Gewichtseinheitsfehler als Faktor multipliziert.

In die Simulation wurden die terrestrischen Paß- und Kontrollpunkte als fehlerfrei eingeführt. Diese Annahme widerspricht den tatsächlichen Verhältnissen beim Oberschwabenmaterial. Deshalb müssen die Fehler der Paßpunkte und der Kontrollpunkte in die Genauigkeitsbetrachtungen miteinbezogen werden.

Nach den Untersuchungen, die in Kapitel I Abschnitt 1.4.2 besprochen sind, muß mit einer Ungenauigkeit der Paßpunkte und Kontrollpunkte von $\mu_{x,y} = 3 \mu\text{m}$ in der Lage und $\mu_z = 5 \mu\text{m}$ (im Bildmaßstab) in der Höhe gerechnet werden. Diese Fehler entsprechen größenordnungsmäßig in etwa den Gewichtseinheitsfehlern. Damit beeinflussen die Paßpunktfehler die Genauigkeit der Blockausgleichung nur gering. Der Genauigkeitsverlust beträgt den Faktor 1.04 in der Lage und 1.14 in der Höhe (EBNER [17]). Die Beeinträchtigung der Höhengenuauigkeit wird berücksichtigt, indem die aus der Simulation berechnete theoretische Genauigkeit mit dem Faktor 1.14 multipliziert wird.

Die Absolutgenauigkeit der Aerotriangulation wird durch den Vergleich der bekannten Koordinaten der Kontrollpunkte mit den in der Blockausgleichung bestimmten, photogrammetrischen Koordinaten ermittelt. Gemäß Fehlerfortpflanzung ergibt sich dann die empirische Absolutgenauigkeit der ausgeglichenen Koordinaten als Funktion der Genauigkeit der Blockausgleichung und der Genauigkeit der Kontrollpunkte. Da die Genauigkeit der Kontrollpunkte im Oberschwabenmaterial sehr wohl von Bedeutung ist, muß sie beim Vergleich berücksichtigt werden. Dies geschieht dadurch, indem man zur theoretischen Genauigkeit aus der Simulation zufälliger Fehler die Genauigkeit der Kontrollpunkte quadratisch addiert.

Die in der Blockausgleichung bestimmte empirische Absolutgenauigkeit und die in der Simulation zufälliger Fehler berechnete und um den Einfluß der Fehler der Paß- und Kontrollpunkte korrigierte theoretische Genauigkeit ist in den Tabellen 4.8 und 4.9 dargestellt. Als Fehler der Kontrollpunkte wurden $\mu_{x,y} = 3 \mu\text{m}$ und $\mu_z = 5 \mu\text{m}$ angenommen. Der in der letzten Spalte angegebene Faktor drückt das Verhältnis von empirischer zu theoretischer Genauigkeit aus. Bei völliger Über-

einstimmung von empirischer und theoretischer Genauigkeit beträgt der Faktor, der das Genauigkeitsverhältnis beschreibt 1.0.

3.3.1 Lagegenauigkeit

Das Verhältnis von empirischer zu theoretischer Genauigkeit für WW und ÖWW beträgt bei Paßpunktversion 1 für die Bündelblöcke 1.9 : 1 und für die Modellblöcke 1.4 : 1. Am Beispiel des Blockes Den Haag veranschaulicht, lauten die absoluten Zahlen: Bündel $\mu_{x,y \text{ emp}} = 10.8 \mu\text{m}$, $\mu_{x,y \text{ theo}} = 5.8 \mu\text{m}$; Modelle $\mu_{x,y \text{ emp}} = 10.4 \mu\text{m}$, $\mu_{x,y \text{ theo}} = 7.5 \mu\text{m}$.

Bei der Paßpunktversion 5 ist die Diskrepanz zwischen empirischer und theoretischer Genauigkeit noch größer. Das durchschnittliche Verhältnis von empirischer zu theoretischer Genauigkeit entspricht für die Bündelblöcke 2.8 : 1 und für die Modellblöcke 2.6 : 1. In absoluten Zahlen z.B. für den Block Den Haag heißt dies: Bündel $\mu_{x,y \text{ emp}} = 47.1 \mu\text{m}$, $\mu_{x,y \text{ theo}} = 19.0 \mu\text{m}$, Faktor 2.5; Modelle $\mu_{x,y \text{ emp}} = 42.6 \mu\text{m}$, $\mu_{x,y \text{ theo}} = 14.8 \mu\text{m}$, Faktor 2.9.

Die Zahlen für die Blöcke mit $q = 60 \%$ lauten ähnlich. Bei Paßpunktversion 1 wird bei den Bündelblöcken ein Genauigkeitsverhältnis von 1.7 : 1 und bei den Modellblöcken von 1.4 : 1 erreicht. Bei der Paßpunktversion 5 wird der Unterschied noch deutlicher als bei den entsprechenden Blöcken mit $q = 20 \%$, was in dem extremen Faktor 3.2 zum Ausdruck kommt, um den die empirischen Ergebnisse der Modellblöcke den theoretischen Genauigkeitserwartungen unterlegen sind.

Insgesamt konnte durch die Korrektur der systematischen Fehler eine gewisse Annäherung der empirischen Ergebnisse an die theoretische Genauigkeit erreicht werden. Dennoch kann von einer Übereinstimmung noch nicht gesprochen werden. Lediglich die Modellergebnisse von Paßpunktversion 1, wo die Unterschiede zwischen empirischer und theoretischer Genauigkeit ca. 30 % betragen, entsprechen den allgemeinen Erwartungen. Die fehlende Übereinstimmung kann hier mit den durch die Selbstkalibrierung nicht erfaßbaren systematischen Bild- und Modelldeformationen und mit dem offensichtlich zu einfachen stochastischen Modell der Aerotriangulation erklärt werden. Für die anderen Fälle wird deutlich, daß die Bestimmung und die Korrektur der systematischen Fehler in der Selbstkalibrierung ungenügend ist.

Zu beachten ist ferner die Diskrepanz zwischen empirischer und theoretischer Genauigkeit bei der Paßpunktversion 5¹⁾). Bei der Analyse der systematischen Bild- und Modelldeformationen in Kapitel III hat sich gezeigt, daß die vier Paßpunkte in den Ecken für eine Bestimmung der systematischen Fehler, insbesondere der Affinität, nicht ausreichend sind. Deshalb war auch keine wesentliche Verbesserung der Genauigkeit der Blockausgleichungen möglich.

¹⁾ Hinweis auf Ergebnisse auf Seite 128

Block	PP-Version	σ_0	empirische Genauigkeit				theoretische Genauigkeit + KP- und PP-Fehler				Verhältnis- faktoren	
			μ_x	μ_y	$\mu_{x,y}$	μ_z	μ_x	μ_y	$\mu_{x,y}$	μ_z	$\mu_{x,y}$	μ_z
Frankfurt	1	3.4	5.7	7.6	6.7	11.5	4.0	4.3	4.2	9.3	1.6	1.2
	5	3.2	36.1	32.1	34.2	14.3	10.3	10.3	10.3	12.7	3.3	1.1
Wien	1	3.3	10.7	7.4	9.2	12.1	4.0	4.2	4.1	9.1	2.2	1.3
	5	3.0	24.2	27.0	25.6	16.2	9.8	9.8	9.8	12.0	2.6	1.4
WW, q = 60 %	1	3.6	6.5	5.0	5.8	9.4	3.7	3.7	3.7	7.2	1.6	1.3
	5	3.6	21.1	23.7	22.4	11.0	6.8	8.2	7.4	8.7	3.0	1.3
Den Haag	1	5.8	7.9	13.1	10.8	12.4	5.5	6.0	5.8	9.2	1.9	1.4
	5	5.6	30.9	59.0	47.1	19.7	18.5	19.2	19.0	12.2	2.5	1.6
Delft	1	5.0	10.1	11.1	10.6	11.7	5.0	5.4	5.2	8.3	2.0	1.4
	5	4.8	52.1	34.2	44.1	13.4	16.8	17.3	17.1	11.1	2.6	1.2
ÜWW, q = 60 %	1	5.6	7.1	10.0	8.7	9.8	4.9	4.9	4.9	6.6	1.8	1.5
	5	5.7	19.1	34.4	27.8	13.0	7.0	8.5	7.8	9.0	3.6	1.4

Tabelle 4.8 Vergleich der empirischen mit der theoretischen Genauigkeit (Bündel)
- unter Berücksichtigung der Paßpunkt- und Kontrollpunktfehler

Block	PP-Version	σ_0	empirische Genauigkeit				theoretische Genauigkeit + KP- und PP-Fehler				Verhältnis- faktoren	
			μ_x	μ_y	$\mu_{x,y}$	μ_z	μ_x	μ_y	$\mu_{x,y}$	μ_z	$\mu_{x,y}$	μ_z
Frankfurt	1	3.4	5.7	7.6	6.7	11.5	4.0	4.3	4.2	9.3	1.6	1.2
	5	3.2	36.1	32.1	34.2	14.3	10.3	10.3	10.3	12.7	3.3	1.1
Wien	1	3.3	10.7	7.4	9.2	12.1	4.0	4.2	4.1	9.1	2.2	1.3
	5	3.0	24.2	27.0	25.6	16.2	9.8	9.8	9.8	12.0	2.6	1.4
WW, q = 60 %	1	3.6	6.5	5.0	5.8	9.4	3.7	3.7	3.7	7.2	1.6	1.3
	5	3.6	21.1	23.7	22.4	11.0	6.8	8.2	7.4	8.7	3.0	1.3
Den Haag	1	5.8	7.9	13.1	10.8	12.4	5.5	6.0	5.8	9.2	1.9	1.4
	5	5.6	30.9	59.0	47.1	19.7	18.7	19.2	19.0	12.2	2.5	1.6
Delft	1	5.0	10.1	11.1	10.6	11.7	5.0	5.4	5.2	8.3	2.0	1.4
	5	4.8	52.1	34.2	44.1	13.4	16.8	17.3	17.1	11.1	2.6	1.2
ÖWW, q = 60 %	1	5.6	7.1	10.0	8.7	9.8	4.9	4.9	4.9	6.6	1.8	1.5
	5	5.7	19.1	34.4	27.8	13.0	7.0	8.5	7.8	9.0	3.6	1.4

Tabelle 4.9 Vergleich der empirischen mit der theoretischen Genauigkeit (Modelle)
- unter Berücksichtigung der Paßpunkt- und Kontrollpunktfehler

3.3.2 Höhengenaugigkeit

Bei der Diskussion der Höhengenaugigkeit muß zwischen den WW-Blöcken und den ÖWW-Blöcken unterschieden werden. Das Verhältnis von empirischer zu theoretischer Genauigkeit bei Paßpunktversion 1 beträgt für die WW-Blöcke 1.2 : 1

(Block Frankfurt, Bündel: $\mu_z \text{ emp} = 11.5 \text{ } \mu\text{m}$, $\mu_z \text{ theo} = 9.3 \text{ } \mu\text{m}$;
 Modelle: $\mu_z \text{ emp} = 12.8 \text{ } \mu\text{m}$, $\mu_z \text{ theo} = 11.0 \text{ } \mu\text{m}$)

und für die ÖWW-Blöcke 1.5 : 1

(Block Den Haag, Bündel: $\mu_z \text{ emp} = 12.4 \text{ } \mu\text{m}$, $\mu_z \text{ theo} = 9.2 \text{ } \mu\text{m}$;
 Modelle: $\mu_z \text{ emp} = 14.9 \text{ } \mu\text{m}$, $\mu_z \text{ theo} = 10.2 \text{ } \mu\text{m}$)

Für die Paßpunktversion 5¹⁾ ist das Genauigkeitsverhältnis der einzelnen Blöcke uneinheitlich und ergibt im Mittel 1.5 : 1.

Für die Blöcke mit $q = 60 \%$ (Paßpunktversion 1) fällt die empirische Genauigkeit im Durchschnitt um den Faktor 1.4 gegenüber den theoretischen Genauigkeitserwartungen ab. Auch hier liegen die empirischen Ergebnisse für die WW-Blöcke mit Faktor 1.3 gegenüber Faktor 1.5 der ÖWW-Blöcke näher an der theoretischen Genauigkeit. Die Ergebnisse von Paßpunktversion 5 sind im Durchschnitt um den Faktor 1.3 der theoretischen Genauigkeit unterlegen. Eine Ausnahme davon bildet der ÖWW-Modellblock, wo die empirische Genauigkeit $\mu_z = 26.4 \text{ } \mu\text{m}$ beträgt und die theoretische Genauigkeit $\mu_z = 10.0 \text{ } \mu\text{m}$.

Die Übereinstimmung zwischen empirischer und theoretischer Höhengenaugigkeit ist relativ befriedigend. Dies gilt sowohl für die Ergebnisse von Paßpunktversion 1 als auch für die Ergebnisse der Paßpunktversion 5, sieht man von dem ÖWW-Modellblock, $q = 60 \%$ ab. Im Durchschnitt beträgt die Abweichung den Faktor 1.3. Dieser Unterschied ist durch in der Selbstkalibrierung nicht erfaßbare systematische Bild- und Modelldeformationen und durch das zu einfache stochastische Modell zu erklären.

4. Vorläufige Beurteilung der absoluten Ergebnisse und Vergleiche

Die Beurteilung der Ergebnisse der Phase 1 in ACKERMANN [5] und EBNER [16] hat gezeigt, daß die allgemeinen Erwartungen über die Genauigkeitsverhältnisse nur sehr selten zugetroffen haben. Ein Beispiel sind die Bündelresultate im Vergleich zu den Ergebnissen der unabhängigen Modelle. Auch der erwartete Genauigkeitsvorteil der Blöcke mit $q = 60 \%$ Querüberdeckung gegenüber den Blöcken mit $q = 20 \%$ hat sich bei den empirischen Ergebnissen damals nicht bestätigt. Als drittes Beispiel sei der Vergleich der WW-Ergebnisse mit den ÖWW-Ergebnissen angeführt. Die erwartete Überlegenheit der Höhengenaugigkeit der ÖWW-Blöcke konnte durch die empirischen Ergebnisse nicht bestätigt werden.

¹⁾ Hinweis auf Ergebnisse auf Seite 128

Durch die Korrektur der systematischen Fehler konnte die Genauigkeit der Aero-triangulation allgemein, im Einzelfall aber unterschiedlich stark verbessert werden. Ob die relativen Genauigkeitsverhältnisse geändert wurden, muß nun durch Methodenvergleiche erneut geprüft werden.

4.1 Vergleich der Bündelerggebnisse mit den Modellergebnissen

1. Von der Bündelmethode, als der direktesten und strengsten Methode der analytischen Aerotriangulation, wird die beste Genauigkeit erwartet. Entsprechend den Untersuchungen in EBNER [17] sollte die Überlegenheit der Bündelerggebnisse gegenüber den Ergebnissen der unabhängigen Modelle in der Lage bis zum Faktor 1.6 und in der Höhe bis zum Faktor 1.3 betragen.

Die Ergebnisse der ersten Bearbeitungsphase ohne die Korrektur der systematischen Fehler hatten keine Übereinstimmung mit den theoretischen Erwartungen gebracht. Vielmehr widersprachen die Ergebnisse in der Mehrzahl der Fälle deutlich der Theorie.

Durch die Korrektur der systematischen Fehler wird die Genauigkeit der Bündelblöcke durchschnittlich stärker verbessert als die Genauigkeit der Modellblöcke. Eine grundsätzliche Verschiebung der Genauigkeitsverhältnisse findet allerdings nicht statt.

2. Das theoretische Genauigkeitsverhältnis¹⁾ auf der Basis der Simulation zufälliger Fehler und unter Berücksichtigung von Paßpunkt- und Kontrollpunktfehlern stellt sich nun wie folgt dar. Bei $q = 20\%$ Querüberdeckung und Paßpunktversion 1 ist die Lagegenauigkeit der Bündelblöcke um den Faktor 1.3 überlegen. Bei $q = 60\%$ Querüberdeckung beträgt der Faktor 1.2. Das Genauigkeitsverhältnis für Paßpunktversion 5 ist uneinheitlich. Der Faktor beträgt zwischen 0.8 und 1.3 für die verschiedenen Blöcke, ohne daß eine Gesetzmäßigkeit zu erkennen wäre. Die Höhengenuigkeit ist bei Paßpunktversion 1 um den Faktor 1.2 und bei Paßpunktversion 5 um den Faktor 1.3 überlegen.

3. Die Lagegenauigkeit der Bündelblöcke konnte durch die Korrektur der systematischen Fehler der Genauigkeit der Modellblöcke angenähert, in einigen Fällen auch übertroffen werden. Vor einer generellen Überlegenheit der Bündelerggebnisse gegenüber den Modellergebnissen kann jedoch noch nicht gesprochen werden. Für Paßpunktversion 1 entsprechen nur die Ergebnisse von Block Frankfurt (Faktor 1.25) und WW $q = 60\%$ (Faktor 1.16) den theoretischen Erwartungen hinsichtlich der Relation der Genauigkeit der Bündelblöcke und der Modellblöcke. Bei allen anderen Blöcken sind die Bündelerggebnisse im Verhältnis zu den Modellergebnissen zu schlecht.

Für die Paßpunktversion 5 ist das Bild insgesamt sehr uneinheitlich. Deshalb werden die Genauigkeitsverhältnisse explizit dargestellt. Die Zahlen geben die Quotienten aus Genauigkeit der Modellblöcke dividiert durch die Genauigkeit der Bündelblöcke wieder. Sie zeigen insgesamt eine recht befriedigende Übereinstimmung.

¹⁾ Zwischen der Genauigkeit von Blockausgleichungen mit der Bündelmethode und der Methode der unabhängigen Modelle

	theoretisch	empirisch
Frankfurt	0.97	0.86
Wien	1.06	0.99
WW, q = 60 %	0.96	1.00
Den Haag	0.78	0.90
Delft	0.89	0.76
ÜWW, q = 60 %	1.27	1.14

4. Bei der Höhengenaugigkeit sind die Bündelerggebnisse mindestens gleich genau wie die Modellergebnisse. In der Mehrzahl der Fälle sind sie sogar signifikant besser. Im Durchschnitt sind die Bündelerggebnisse der WW-Blöcke um die Faktoren 1.1 (PP-Version 1) und 1.2 (PP-Version 5), und die Bündelerggebnisse der ÜWW-Blöcke um die Faktoren 1.2 (PP-Version 1) und 1.8 (PP-Version 5) den Ergebnissen der Modellblöcke überlegen. In der Mehrzahl der Fälle konnte das theoretische Genauigkeitsverhältnis erreicht, teilweise sogar noch übertroffen werden.

5. Bei der Diskussion des Vergleichs von Bündel- und Modellergebnissen sind verschiedene Tatsachen zu beachten. Als erstes muß man berücksichtigen, daß auch der getrennte Vergleich der empirischen Absolutgenauigkeit¹⁾ mit den theoretischen Erwartungen keine Übereinstimmung brachte. Alle Faktoren, die dazu beitragen haben, gehen auch in den Vergleich Bündel-Modelle mit ein und beeinflussen das Ergebnis. Es sind dies die systematischen Bild- und Modelldeformationen, die durch die Selbstkalibrierung nicht erfaßt werden können und die nicht beachteten Korrelationen. Offensichtlich wird die Genauigkeit der Aero-triangulation mit Bündeln durch die systematischen Fehler stärker beeinflußt (EBNER [16]). Dies hat sich unter anderem auch daran gezeigt, daß die bisherige Korrektur der systematischen Fehler, in Form der Selbstkalibrierung, die Genauigkeit der Bündelblöcke relativ stärker verbessert hat. Darüber hinaus ist auch die unterschiedliche Bestimmbarkeit der systematischen Fehler im Bild und im Modell von Bedeutung (siehe Kapitel III Abschn. 5.1).

Unabhängig davon mag auch die Art der Auswertung beim Oberschwabenmaterial ein Grund für die insgesamt noch unbefriedigenden Bündelerggebnisse sein. Die Bilder wurden nach der Art der unabhängigen Modelle nur zur Hälfte, die stereoskopisch überdeckt ist, ausgemessen. Für die Berechnung der Bündelblöcke mußten deshalb die 'Halbbilder' anhand der Rahmenmarken und der identischen Punkte auf beiden Bildhälften wieder zusammentransformiert werden. Die gelegentlich auftretenden größeren Restfehler bei der Transformation sind ein Hinweis auf die Verschlechterung der Genauigkeit der Bildkoordinaten durch diese Methode der Auswertung.

¹⁾ der Bündel- und der Modellblöcke

4.2 Vergleich der Genauigkeit der Weitwinkelblöcke und der Überweitwinkelblöcke

Für die Beurteilung und den Vergleich der WW- und der ÜWW-Ergebnisse werden zwei Kriterien herangezogen. Das sind die Absolutgenauigkeit ($\mu_{x,y}$, μ_z) und der Quotient aus der Absolutgenauigkeit dividiert durch den Gewichtseinheitsfehler ($\frac{\mu_{x,y}}{\sigma_{oL}}$, $\frac{\mu_z}{\sigma_{oH}}$). Bei der zweiten Prüfgröße wird die Absolutgenauigkeit in Beziehung zur Genauigkeit der Bildkoordinaten gesetzt. Damit kann bei unterschiedlicher Genauigkeit der Bildkoordinaten die relative Genauigkeitsleistung des Aufnahmesystems beurteilt werden.

Die Ergebnisse der ersten Bearbeitungsphase ohne die Korrektur der systematischen Fehler haben ergeben, daß die Absolutgenauigkeit der Überweitwinkelblöcke durchweg schlechter war als die der entsprechenden Weitwinkelblöcke. Dies gilt für die Lage als insbesondere auch für die Höhe (Ergebnisse siehe Tabelle 4.10).

Durch die Korrektur der systematischen Fehler wird nun die absolute Lagegenauigkeit der WW-Blöcke um den Faktor 1.4 gesteigert, während die Genauigkeit der ÜWW-Blöcke nur um den Faktor 1.2 verbessert wird (Modelle). Damit wird hier der Genauigkeitsunterschied noch weiter zuungunsten der ÜWW-Blöcke vergrößert. Im Mittel ist die Lagegenauigkeit der ÜWW-Blöcke um den Faktor 1.4 (Bündel und Modelle) und die Höhengenaugigkeit um den Faktor 1.4 (Modelle) bzw. 1.1 (Bündel) unterlegen. Die großen Unterschiede der Höhengenaugigkeit bei den Modellblöcken betreffen die Paßpunktversion 5. Auffallend ist die ebenfalls unterlegene absolute Höhengenaugigkeit der ÜWW-Blöcke. Zwar sind die σ_{oH} -Werte der ÜWW-Blöcke (Modelle) besser als die der WW-Blöcke, doch ist die absolute Höhengenaugigkeit geringfügig, aber signifikant schlechter. Drückt man die Absolutgenauigkeit der Höhe in ‰ der Flughöhe aus, so wird die Unterlegenheit der ÜWW-Blöcke noch deutlicher.

WW -Modelle	Version 1, q = 20 %	$\sigma_{oH} = 7.6 \mu\text{m}$	$\mu_z = 0.37 \text{ m} = 0.09 \text{ ‰ h}$
ÜWW-Modelle		$\sigma_{oH} = 6.5 \mu\text{m}$	$\mu_z = 0.42 \text{ m} = 0.17 \text{ ‰ h}$
WW -Modelle	Version 1, q = 60 %	$\sigma_{oH} = 7.4 \mu\text{m}$	$\mu_z = 0.33 \text{ m} = 0.08 \text{ ‰ h}$
ÜWW-Modelle		$\sigma_{oH} = 7.0 \mu\text{m}$	$\mu_z = 0.37 \text{ m} = 0.15 \text{ ‰ h}$

Für die Beurteilung nach dem zweiten Kriterium wurden die Quotienten aus der Division der Absolutgenauigkeit durch die Gewichtseinheitsfehler berechnet. Diese betragen für Paßpunktversion 1:

		WW	ÜWW
Modelle	Lage ($\mu_{x,y} / \sigma_{oL}$)	1.7	1.4
	Höhe (μ_z / σ_{oH})	1.6	2.0
Bündel	Lage ($\mu_{x,y} / \sigma_o$)	2.1	1.8
	Höhe (μ_z / σ_o)	3.2	2.1

Block	Korrektur	unabhängige Modelle								Bündel					
		nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja		
	PP-Version	σ_{oL} μ	σ_{oH} μ	μ_{xy} μ	μ_z μ	σ_o μ	μ_{xy} μ	μ_z μ							
WW, q = 20 %	1	6.6	4.6	8.0	7.6	11.8	8.2	13.1	13.0	5.4	3.4	14.6	8.0	18.9	11.8
ÜWW,q = 20 %		8.6	6.8	7.2	6.7	14.5	10.3	14.8	14.7	7.2	5.4	21.4	10.7	17.0	12.0
WW, q = 20 %	5	5.8	4.5	7.9	7.6	40.2	27.6	22.8	17.6	3.9	3.1	39.6	29.9	22.4	15.2
ÜWW,q = 20 %		7.8	6.8	6.9	6.4	39.2	38.1	27.6	26.8	5.8	5.2	54.8	45.6	21.8	16.6
WW, q = 60 %	1	6.4	4.6	9.1	7.4	9.7	6.7	11.5	10.0	5.3	3.6	10.8	5.8	11.5	9.4
ÜWW,q = 60 %		8.1	6.7	9.2	7.3	12.1	7.8	13.1	14.4	7.5	5.6	14.0	8.7	11.3	9.8
WW, q = 60 %	5	5.9	4.6	8.8	7.4	24.4	22.4	54.1	13.8	4.5	3.6	23.8	22.4	38.7	11.0
ÜWW,q = 60 %		7.5	6.7	8.7	6.6	36.0	31.8	78.4	26.4	6.6	5.7	30.9	27.8	35.6	13.0

Tabelle 4.10 Vergleich der Blockausgleichsergebnisse in Abhängigkeit vom Bildwinkel

Betrachtet man die Absolutgenauigkeit der ausgeglichenen Triangulationspunkte im Verhältnis zum Gewichtseinheitsfehler, so schneiden die ÖWW-Blöcke besser ab. Lediglich bei der Höhengenaugigkeit der Modellblöcke sind die WW-Blöcke den ÖWW-Blöcken überlegen.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Absolutgenauigkeit der WW-Blöcke, sowohl in der Lage als auch in der Höhe den ÖWW-Blöcken überlegen ist. Bezieht man jedoch die Absolutgenauigkeit auf den Gewichtseinheitsfehler, so sind die ÖWW-Ergebnisse überlegen. Ausgenommen ist die Höhengenaugigkeit der Modellblöcke.

Der Grund für die geringere Genauigkeit der ÖWW-Blöcke ist offensichtlich die schlechtere Genauigkeit der Ausgangsdaten, die deutlich in den σ_o -Werten zum Ausdruck kommt. Der Gewichtseinheitsfehler der WW-Bündelblöcke beträgt $\sigma_o = 4.1 \mu\text{m}$ und für die entsprechenden ÖWW-Blöcke $\sigma_o = 6.5 \mu\text{m}$. Die geringe Genauigkeit der Ausgangsdaten der ÖWW-Blöcke dürfte zwei Ursachen haben. Zum einen die von Anfang an festgestellte schlechtere Bildqualität der ÖWW-Aufnahmen (siehe BELZNER [10]) und zum anderen die offenbar geringere metrische Qualität des anspruchsvollen ÖWW-Systems. Dies wird deutlich bei der in Kapitel II, Abschnitt 2.1, festgestellten Instabilität der Kalibrierung der ÖWW-Kammer.

4.3 Vergleich der Absolutgenauigkeit in Abhängigkeit von der Querüberdeckung

Zur Beurteilung der Absolutgenauigkeit in Abhängigkeit von der Querüberdeckung wurden zunächst die theoretischen Genauigkeitsverhältnisse (Genauigkeit, $q = 20\%$ dividiert durch Genauigkeit, $q = 60\%$) abgeleitet. Dazu wurden die Ergebnisse der Simulation zufälliger Fehler unter Berücksichtigung der Fehler der Paßpunkte und Vergleichspunkte herangezogen. Die Eichung erfolgte über die empirisch ermittelten Gewichtseinheitsfehler. Zum Vergleich sind die empirischen Genauigkeitsverhältnisse in Tabelle 4.11 unmittelbar danebengestellt worden. Die absoluten Werte der empirischen Genauigkeit findet man in Tabelle 4.12.

		PP-Version 1		PP-Version 5	
		Lage	Höhe	Lage	Höhe
WW, Modelle	emp.	1.2	1.3	1.2	1.3
	theo.	1.2	1.3	1.4	1.6
WW, Bündel	emp.	1.4	1.3	1.3	1.4
	theo.	1.1	1.3	1.4	1.4
ÖWW, Modelle	emp.	1.3	1.3	1.2	1.0
	theo.	1.3	1.2	1.5	1.4
ÖWW, Bündel	emp.	1.2	1.2	1.6	1.3
	theo.	1.1	1.3	2.3	1.3

Tabelle 4.11 Verhältnis der Absolutgenauigkeit in Abhängigkeit von der Querüberdeckung

Block	Korrektur	unabhängige Modelle								Bündel					
	PP-Version	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja
		σ_{oL}	$ \mu m $	σ_{oH}	$ \mu m $	μ_{xy}	$ \mu m $	μ_z	$ \mu m $	σ_o	$ \mu m $	μ_{xy}	$ \mu m $	μ_z	$ \mu m $
WW, q = 20 %	1	6.6	4.6	8.0	7.6	11.8	8.2	13.1	13.0	5.4	3.4	14.6	8.0	18.9	11.8
WW, q = 60 %		6.4	4.6	9.1	7.4	9.7	6.7	11.5	10.0	5.3	3.6	10.8	5.8	11.5	9.4
WW, q = 20 %	5	5.8	4.5	7.9	7.6	40.2	27.6	22.8	17.6	3.9	3.1	39.6	29.9	22.4	15.2
WW, q = 60 %		5.9	4.6	8.8	7.4	24.4	22.4	54.1	13.8	4.5	3.6	23.8	22.4	38.7	11.0
OWW, q = 20 %	1	8.6	6.8	7.2	6.7	14.5	10.3	14.8	14.7	7.2	5.4	21.4	10.7	17.0	12.0
OWW, q = 60 %		8.1	6.7	9.2	7.3	12.1	7.8	13.1	11.4	7.5	5.6	14.0	8.7	11.3	9.8
OWW, q = 20 %	5	7.8	6.8	6.9	6.4	39.2	38.1	27.6	26.8	5.8	5.2	54.8	45.6	21.8	16.6
OWW, q = 60 %		7.5	6.7	8.7	6.6	36.0	31.8	78.4	26.4	6.6	5.7	30.9	27.8	35.6	13.0

Tabelle 4.12 Vergleich der Blockausgleichungsergebnisse mit 20 % und 60 % Querüberdeckung

Zunächst zu den theoretischen Genauigkeitsverhältnissen.

Nach den allgemeinen Erwartungen sollte die Absolutgenauigkeit durch die Erhöhung der Querüberdeckung um mehr als den Faktor $\sqrt{2}$ verbessert werden, sofern die Paßpunktfehler vernachlässigbar klein sind. Dies ist hier, zumindest für Paßpunktversion 1, nicht der Fall. Die Verbesserung beträgt im Durchschnitt nur den Faktor 1.25. Dafür sind zwei Gründe maßgebend: Im Oberschwabenmaterial müssen Paßpunkt- und Kontrollpunktfehler berücksichtigt werden, die sich auf die Genauigkeit der Paßpunktversion 1 und damit auf das Genauigkeitsverhältnis auswirken. Zweitens sind die Gewichtseinheitsfehler der Blöcke mit $q = 60\%$ größer als die Gewichtseinheitsfehler der Teilblöcke mit $q = 20\%$. Dies wirkt sich ebenfalls auf das Genauigkeitsverhältnis aus.

Die empirischen Genauigkeitsverhältnisse stimmen nur zum Teil mit den theoretischen Genauigkeitsverhältnissen überein. Bei Paßpunktversion 1 ist in 4 von 8 Fällen eine Übereinstimmung zu erzielen. In weiteren 3 Fällen ist die Abweichung nur gering. Bei Paßpunktversion 5 ist das empirische Genauigkeitsverhältnis zuungunsten der Blöcke mit $q = 60\%$ schlechter als das theoretische Genauigkeitsverhältnis. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei Paßpunktversion 5 die systematischen Deformationen nur unzureichend erfaßt werden können. Die verbleibenden Deformationen beeinträchtigen die Genauigkeit der Aerotriangulation, so daß die erwartete Genauigkeitssteigerung durch die Erhöhung der Querüberdeckung nicht erreicht werden kann.

Durch die mit der Korrektur der systematischen Bild- und Modelldeformationen verbundene überproportionale Genauigkeitssteigerung der Blöcke mit $q = 60\%$ Querüberdeckung kann eine gewisse Übereinstimmung mit der Theorie erzielt werden. Es verbleibt jedoch auch nach der Korrektur der systematischen Fehler eine Diskrepanz, die vor allem die Paßpunktversion 5 betrifft.

4.4 Vergleich der Blockausgleichungsergebnisse mit Selbstkalibrierung und Testfeldkalibrierung

In diesem Abschnitt wird die Leistungsfähigkeit der Selbstkalibrierung im Vergleich zur Testfeldkalibrierung beurteilt. Die Ergebnisse der Testfeldkalibrierung sind schon im Kapitel II besprochen worden. Zur Ergänzung dieser Ergebnisse wurde im Anschluß an die Testfeldkalibrierung eine Selbstkalibrierung nach dem beschriebenen Verfahren berechnet. Die gesamten Ergebnisse sind in Tabelle 4.13 dargestellt.

Wie Tabelle 4.13 zeigt, sind die Gewichtseinheitsfehler der Testfeldkalibrierung größer als die entsprechenden Werte der Selbstkalibrierung. Dies kann zwei Ursachen haben. Zum einen werden bei der Selbstkalibrierung, nach dem beschriebenen Verfahren, die Verbesserungen der Bild- und Modellpunkte in besonderem Maße minimiert, was bei der Testfeldkalibrierung nicht der Fall ist. Andererseits können die größeren Gewichtseinheitsfehler Ausdruck davon sein, daß die in der Testfeldkalibrierung bestimmten Bilddeformationen für das Bildmaterial der Aerotriangulation nicht repräsentativ sind. Beide Faktoren können auch zusammenwirken.

Frankfurt	Modelle						Bündel					
PP-Version Korrektur	1			5			1			5		
	S	T	TS	S	T	TS	S	T	TS	S	T	TS
$\mu_{x,y}$ μm	8.4	9.2	7.6	29.5	28.2	27.4	6.7	11.7	6.1	34.2	31.6	30.1
μ_z μm	12.8	12.9	13.1	14.7	15.2	15.4	11.5	15.3	11.4	14.3	13.0	15.1
σ_{oL} μm	4.6	5.8	4.6	4.5	4.6	4.6	3.4	5.0	3.5	3.2	3.3	3.2
σ_{oH} μm	8.1	8.3	7.8	8.1	8.2	8.2						
Den Haag												
$\mu_{x,y}$ μm	10.4	12.7	10.5	42.6	40.0	40.6	10.8	14.9	12.0	47.1	47.3	32.5
μ_z μm	14.9	13.7	13.9	22.6	23.2	21.6	12.4	14.7	14.1	19.7	15.4	16.2
σ_{oL} μm	6.9	8.3	7.0	6.9	7.9	6.8	5.8	7.1	6.0	5.6	6.7	5.8
σ_{oH} μm	7.4	8.0	7.0	7.1	7.7	6.7						

S = Selbstkalibrierung
T = Testfeldkalibrierung
TS = Testfeldkalibrierung mit
anschließender Selbstkalibrierung

Tabelle 4.13 Vergleich der Ergebnisse der Blockausgleichungen mit Selbstkalibrierung und Testfeldkalibrierung

Die absolute Lagegenauigkeit der Testfeldkalibrierung ist durchschnittlich um den Faktor 1.1 der Genauigkeit der Selbstkalibrierung unterlegen. Dabei zeigt sich, daß bei Paßpunktversion 5 die Genauigkeit der Testfeldkalibrierung gleich oder besser ist als die Genauigkeit der Selbstkalibrierung. Bei Paßpunktversion 1 hingegen sind die Ergebnisse der Selbstkalibrierung überlegen. Berechnet man im Anschluß an die Testfeldkalibrierung eine Selbstkalibrierung, so wird in der Mehrzahl der Fälle nur das ursprüngliche Ergebnis der Selbstkalibrierung ohne Testfeldkalibrierung erreicht. Eine deutliche Verbesserung über die Selbstkalibrierung hinaus, kann bei dem Bündelblock Den Haag, Paßpunktversion 5, erzielt werden (Selbstkalibrierung: $\mu_{x,y} = 47.1 \mu\text{m}$, Testfeldkalibrierung + Selbstkalibrierung: $\mu_{x,y} = 32.5 \mu\text{m}$).

Im Durchschnitt ist die absolute Höhengenauigkeit über alle berechneten Blöcke für die Selbstkalibrierung und Testfeldkalibrierung gleich. Bei der Höhengenaugigkeit der Bündelblöcke von Paßpunktversion 1 sind die Ergebnisse der Selbstkalibrierung und bei Paßpunktversion 5 sind die Ergebnisse der Testfeldkalibrierung überlegen. Die Unterschiede bei den Modellblöcken sind nicht signifikant. Durch eine im Anschluß an die Testfeldkalibrierung durchgeführte Selbstkalibrierung konnte keine über die ursprünglichen Ergebnisse der Selbstkalibrierung hinausgehende Verbesserung erzielt werden.

Die Ergebnisse zeigen, daß im Falle hoher Paßpunktdichte die Selbstkalibrierung, im Falle niederer Paßpunktdichte die Testfeldkalibrierung überlegen ist. Die Erklärung dafür ist einfach. Bei dichter Paßpunktbesetzung, z.B. dichter Lagepaßpunkttrand, ist eine gute Bestimmung der Bild- und Modelldeformationen möglich. Dem entsprechen die guten Ergebnisse der Selbstkalibrierung. Auf der anderen Seite sind die Möglichkeiten der Bestimmung bei schwacher Paßpunktbesetzung schlecht. Dies bedingt den Vorteil der Testfeldkalibrierung für diese Fälle. Durch eine Kombination von Testfeldkalibrierung und Selbstkalibrierung konnte teilweise eine zusätzliche Verbesserung über die ursprünglichen Ergebnisse der Selbstkalibrierung bzw. der Testfeldkalibrierung hinaus erreicht werden.

5. Zusammenfassung

Die Analyse der Oberschwabenergebnisse der ersten Bearbeitungsphase hat in vielen Punkten keine Übereinstimmung mit den theoretischen Genauigkeitserwartungen gebracht. Insbesondere war die empirische Absolutgenauigkeit den theoretischen Genauigkeitserwartungen auf der Basis zufälliger Fehler deutlich und in hohem Maße unterlegen. Bei den Methodenvergleichen konnte ebenfalls keine Übereinstimmung mit der Theorie erzielt werden.

Durch die Korrektur der systematischen Bild- und Modelldeformationen wurde die Absolutgenauigkeit in fast allen Fällen verbessert. Der Betrag der Verbesserungen ist unterschiedlich. Er ist abhängig von der Bestimmbarkeit der systematischen Fehler, den Projektparametern, wie Paßpunktbesetzung und Querüberdeckung und der Ausgleichsmethode. Die Korrektur der systematischen Fehler brachte für die Paßpunktversion 1 eine durchschnittliche Verbesserung der Absolutgenauigkeit in der Lage um den Faktor 1.5 für die Modellblöcke und um den Faktor 1.9 bei den Bündelblöcken.

Die absolute Höhengenaugigkeit der ausgeglichenen Blöcke wurde durch die Korrektur der systematischen Fehler ebenfalls deutlich gesteigert. Der Faktor der durchschnittlichen Verbesserung beträgt für die Modellblöcke 1.5 und für die Bündelblöcke 1.7. Lediglich bei den Modellblöcken mit $q = 20\%$ Querüberdeckung tritt keine, oder eine nur geringe Steigerung der Höhengenaugigkeit ein. Dagegen ist das Verfahren bei den Bündelblöcken allgemein und bei den Modellblöcken mit $q = 60\%$ Querüberdeckung recht wirksam.

Durch die Korrektur der systematischen Fehler wurde die Genauigkeit der Bündelblöcke durchschnittlich stärker verbessert. Dabei verschiebt sich das Genauigkeitsverhältnis zugunsten der Bündelmethode. In der Lage sind die Bündelergebnisse jetzt etwa gleich genau wie die Modellergebnisse; in der Höhe sind sie meist den Modellergebnissen überlegen. Der erwartete Genauigkeitsvorteil der Bündelmethode konnte jedoch noch nicht voll erreicht werden.

Die Absolutgenauigkeit der ÜWW-Blöcke war in der ersten Bearbeitungsphase schlechter als die der WW-Blöcke. Dies galt sowohl für die Lage als auch für die Höhe. Durch die Korrektur der systematischen Fehler wurde das Genauigkeitsverhältnis noch weiter zuungunsten der ÜWW-Blöcke verändert.

Mit der Korrektur der systematischen Fehler wurde erreicht, daß die Höhengenaugigkeit der Blöcke mit $q = 60\%$ und schwacher Paßpunktbesetzung wesentlich verbessert wurde. Damit ist die Genauigkeit der Blöcke mit $q = 60\%$ denen mit $q = 20\%$ durchweg überlegen. Im Durchschnitt beträgt der Genauigkeitsvorteil 20%. Insgesamt konnte das theoretische Genauigkeitsverhältnis nicht erreicht werden.

Für den Vergleich der empirischen Absolutergebnisse mit den theoretischen Genauigkeitserwartungen wurde die theoretische Genauigkeit durch Simulation zufälliger Fehler berechnet. Der Einfluß der Paßpunktfehler auf die Genauigkeit der Aerotriangulation, und die Fehler der Kontrollpunkte wurden berücksichtigt.

Nach der Korrektur der systematischen Bild- und Modelldeformationen ergibt sich das Verhältnis von empirischer zu theoretischer Genauigkeit für Paßpunktversion 1:

Lage	Modelle	q = 20 %	1.4 : 1	q = 60 %	1.4 : 1
	Bündel	q = 20 %	1.9 : 1	q = 60 %	1.7 : 1
Höhe	Modelle	q = 20 %	1.4 : 1	q = 60 %	1.4 : 1
	Bündel	q = 20 %	1.3 : 1	q = 60 %	1.4 : 1

Die Übereinstimmung von empirischer und theoretischer Höhengenaugkeit kann als einigermaßen befriedigend bezeichnet werden. Im Durchschnitt sind die empirischen Ergebnisse nur um 40 % schlechter als die theoretischen Genauigkeitserwartungen. Dies gilt, zwei Blöcke ausgenommen, auch für die Paßpunktversion 5.

Nicht befriedigend ist die Übereinstimmung von theoretischer und empirischer Lagegenauigkeit. Zumindest nicht für die Bündelblöcke, wo der Faktor 1.9 beiträgt. Insbesondere bei Paßpunktversion 5 wird eine erhebliche Diskrepanz der empirischen und theoretischen Ergebnisse deutlich. Dies ist ohne Zweifel auf die mangelhafte Erfassung der systematischen Fehler bei so wenig Paßpunkten zurückzuführen.

Diese Aussagen werden bestätigt durch die Blockausgleichungsergebnisse mit der besten Bestimmung und Korrektur der systematischen Bilddeformationen. Das Verhältnis von empirischer zu theoretischer Genauigkeit für die Bündelblöcke Frankfurt und Den Haag ist dann wie folgt:

		PP-Version 1	PP-Version 5
Frankfurt	Lage	1.4 : 1	1.5 : 1
	Höhe	1.2 : 1	1.1 : 1
Den Haag	Lage	1.5 : 1	1.1 : 1
	Höhe	1.3 : 1	1.2 : 1

Es erweist sich hier, daß auch bei geringer Paßpunktdichte eine hohe Genauigkeit erzielt werden kann. Das Verhältnis von empirischer zu theoretischer Genauigkeit bleibt in etwa konstant, unabhängig von der Anzahl der Paßpunkte.

V. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Diese Arbeit ist eine Weiterführung der Untersuchungen, die im Rahmen des OEEPE-Versuchsprogramms "Aerotriangulationstest Oberschwaben" durchgeführt worden sind. Der Inhalt dieser Arbeit ist die Behandlung der systematischen Fehler in der Aerotriangulation.

Der "Aerotriangulationstest Oberschwaben" war die erste umfassende Untersuchung über die empirische Genauigkeit der Aerotriangulation. Die Probleme sollten in zwei Programmen bearbeitet werden. Die Aufgabe von Programm I, mit dem sich diese Arbeit hauptsächlich beschäftigt, umfaßte drei Problemgruppen: Die Ableitung der empirischen Genauigkeit und die Gegenüberstellung der empirischen Ergebnisse mit den auf der Basis von zufälligen Fehlern abgeleiteten theoretischen Genauigkeitserwartungen. Die zweite Aufgabe betrifft den Vergleich der verschiedenen Verfahren in der Aerotriangulation. Drittens werden Vergleiche unternommen, die auf theoretischem Wege nur sehr mühsam durchzuführen sind (z.B. Vergleich der Genauigkeit der WW- und der ÖWW-Blöcke).

Programm II des Oberschwabentests befaßte sich hauptsächlich mit der Genauigkeit im Einzelbild und mit der Korrelation benachbarter Bilder. Dazu gehört auch die Testfeldkalibrierung.

Die ersten Ergebnisse, die anläßlich des Symposiums in Brüssel im Jahre 1973 von ACKERMANN [5] und STARK [48] vorgelegt wurden, bestätigten für damalige Verhältnisse ein hohes Genauigkeitsniveau der Aerotriangulation. Andererseits widersprachen die empirischen Ergebnisse den theoretischen Genauigkeitserwartungen in wesentlichen Punkten. Offenbar verschlechtern nicht kompensierte systematische Fehler und nicht beachtete Korrelationen die empirischen Ergebnisse. Diese Schlußfolgerung ergab sich auch aus den Untersuchungen von BAUER, CAMPS, KUPFER und WISER [8, 12, 33, 54], die sich hauptsächlich mit der Behandlung systematischer Bildfehler im Oberschwabenmaterial beschäftigten.

Die Tatsache, daß mit dem System der Aerotriangulation im Bildmaterial vorhandene systematische Fehler nicht erfaßt werden konnten, erforderte eine Verbesserung des mathematischen Modells der Aerotriangulation. Die konventionelle Methode dafür sind die a priori Korrekturen. Ein weitergehendes Verfahren stellt die Testfeldkalibrierung dar. Die derzeit aktuelle Methode ist die Selbstkalibrierung.

In diesen drei Ebenen - a priori Korrekturen, Testfeldkalibrierung, Selbstkalibrierung - wurde hier die Kompensation der systematischen Fehler in Angriff genommen. Eine Verfeinerung des stochastischen Modells der Aerotriangulation blieb außer Betracht, da man sich durch eine Verbesserung des Funktionalmodells einen bedeutenderen Fortschritt verspricht.

Nach der Hinführung auf das Thema in Kapitel I wurden in Kapitel II die a priori Korrekturen und die Testfeldkalibrierung behandelt. Die Kritik an den a priori Korrekturen betraf deren Beschränkung auf Fehler, von denen man bisher angenommen hat, sie seien dominierend. Weiter wurde festgestellt, daß die a priori Korrekturen stark vereinfacht sind und für deren Anwendung nur wenig Information mit beschränktem Wert vorliegt.

Diese Punkte der Kritik konnten beim Versuch Oberschwaben nicht verbessert werden, da die Datengewinnung abgeschlossen war und im nachhinein nicht ergänzt werden konnte. Deshalb mußten sich die Arbeiten auf die Untersuchung verfeinerter Korrekturansätze beschränken. Hauptsächlich sollte ausgeschlossen werden, daß der Genauigkeitsverlust zur Theorie damit erklärbar sei. Es wurden die a priori Korrekturen wegen Verzeichnung, Filmverzug, Erdkrümmung und Refraktion behandelt.

Bei der Verzeichnungskorrektur wurden der radialsymmetrische dem flächenhaften Korrekturansatz, bei dem die Unsymmetrie der Verzeichnung berücksichtigt werden kann, gegenübergestellt. Eine signifikante Verbesserung der Genauigkeit der Aerotriangulation konnte durch die flächenhafte Verzeichnungskorrektur nicht erreicht werden.

Zur Korrektur des Filmverzugs aus der Kalibrierung der Rahmenmarken wurde die Affintransformation angewandt, in Abweichung zur ersten Bearbeitungsphase, wo für die Rahmenmarkentransformation eine Helmerttransformation verwendet wurde. Im Ergebnis konnte keine Steigerung der Genauigkeit der Blockausgleichungen erreicht werden. Offenbar ist die Genauigkeit der Laborkalibrierung nicht ausreichend, den Filmschrumpfung oder die Filmdehnung richtig zu erfassen.

Die Verfeinerung der Korrektur wegen Refraktion und Erdkrümmung betraf die Berücksichtigung der Bildneigungen im Korrekturansatz. In der ersten Bearbeitungsphase waren die Bilder vereinfacht als Nadiraufnahmen behandelt worden. Mit einer Simulation wurde die Auswirkung dieser Vereinfachung im absolut orientierten Modell nachgewiesen. Aufgrund der geringen Bildneigungen im Oberschwabenmaterial, die im Durchschnitt nur $\omega = \phi = \pm 1^g$ betragen, sind die Auswirkungen des vereinfachten Korrekturansatzes vernachlässigbar klein und beeinflussen nicht das Genauigkeitsergebnis der Blocktriangulation.

Insgesamt wurden die Ergebnisse der ersten Bearbeitungsphase durch die verfeinerten Korrekturansätze nicht berührt und konnten deshalb auch für die weiteren Untersuchungen beibehalten werden. Der Nachweis war erbracht, daß die Ursachen der Diskrepanz zwischen empirischer und theoretischer Genauigkeit woanders zu suchen sind.

Mit der Anwendung der Testfeldkalibrierung auf die Bündel- und Modellblöcke 'Den Haag' und 'Frankfurt' konnte erstmals die Genauigkeit der Aerotriangulation signifikant gesteigert werden. Der Faktor, um den die Absolutgenauigkeit in Lage und Höhe gesteigert werden konnte, betrug im Durchschnitt 1.3. Die Verbesserung der Genauigkeit war in den meisten Fällen signifikant. Damit war die Existenz der systematischen Bilddeformationen im Oberschwabenmaterial indirekt nachgewiesen.

Die Untersuchungen in Kapitel II hatten ergeben, daß die üblichen a priori Korrekturen die systematischen Fehler nicht hinreichend erfassen. Andererseits war die Testfeldkalibrierung sehr wirksam. Damit war jedenfalls bestätigt, daß im Oberschwabenmaterial systematische Bild- und Modelldeformationen vorhanden sind. Deshalb wurde in Kapitel III und IV die Analyse und Korrektur der systematischen Fehler durchgeführt. Angewandt wurde die Selbstkalibrierung mit einem modifizierten Verfahren nach de MASSON d'AUTUME.

Kapitel III beinhaltet die Bestimmung und die Analyse der systematischen Bild- und Modelldeformationen. Für die Oberschwabenblöcke ergaben sich große und in hohem Maße konstante systematische Bild- und Modelldeformationen. Die Modelldeformationen können im wesentlichen auf die Bilddeformationen zurückgeführt werden. Die Bilddeformationen stellen sich primär als eine affine und tonnenförmige Verformung der Bilder dar. Die Bestimmbarkeit der systematischen Deformationen ist, soweit es die Modelldeformationen betrifft, wesentlich von der Querüberdeckung, im allgemeinen auch von der Paßpunktdichte und Paßpunktverteilung abhängig. Wie die Ergebnisse der Analyse der Modelldeformationen der Höhe von Paßpunktversion 5 beweisen, sind für die Bestimmung der systematischen Deformationen wenige Paßpunkte ausreichend. Vier Eckpunkte in der Lage, das bedeutet einen Paßpunktabstand von $i = 25$, sind allerdings zu wenig.

Die systematischen Bilddeformationen sind wesentlich vom Aufnahmesystem, im geringen Maße auch vom Auswertesystem, in diesem Fall Stereokomparatoren, abhängig. Andere Abhängigkeiten, z.B. von atmosphärischen Einflüssen oder von Netzspannungen des Paßpunktsystems, konnten nicht festgestellt werden.

Der Inhalt von Kapitel IV betrifft die Korrektur der systematischen Bild- und Modelldeformationen und die erreichte Genauigkeitssteigerung. Als Korrekturformeln wurden Polynome benutzt.

Durch die Korrektur der systematischen Bild- und Modelldeformationen konnte die Genauigkeit der Aerotriangulation in fast allen Fällen deutlich verbessert werden. Der Betrag der Genauigkeitssteigerung ist unterschiedlich. Er ist abhängig von der Bestimmbarkeit der Deformationen, der Paßpunktdichte und der Ausgleichsmethode. Im Durchschnitt konnte die Absolutgenauigkeit in der Lage um den Faktor 1.4 und in der Höhe um den Faktor 1.6 verbessert werden. Für Paßpunktversion 1 (Lage: dichter Rand, Höhe: dichte PP-Ketten) beträgt die Absolutgenauigkeit in der Lage zwischen

$$\mu_{x,y} = 5.8 \text{ mm (WW, } q = 60 \% \text{)} \quad \text{und} \quad \mu_{x,y} = 10.8 \text{ } \mu\text{m (Den Haag, } q = 20 \% \text{)}$$

und in der Höhe zwischen

$$\mu_z = 9.8 \text{ mm (WW, } q = 60 \% \text{)} \quad \text{und} \quad \mu_z = 14.9 \text{ } \mu\text{m (Den Haag, } q = 20 \% \text{)}.$$

Obwohl die Genauigkeit der Bündelblöcke wesentlich gesteigert wurde, noch stärker als die Genauigkeit der Modellblöcke, ist die Genauigkeit der Bündelblöcke nur in wenigen Fällen den Modellblöcken überlegen. Insgesamt konnte der theoretisch erwartete Genauigkeitsvorteil der Bündelmethode nicht erreicht werden.

Auch das Genauigkeitsverhältnis in Abhängigkeit von der Querüberdeckung entsprach nicht ganz den theoretischen Werten. Zwar konnte bei PP-Version 1 Übereinstimmung erzielt werden, doch war die Absolutgenauigkeit bei PP-Version 5 für die Blöcke mit $q = 60 \%$ um etwa 20% zu schlecht.

Die Absolutgenauigkeit der WW-Blöcke blieb auch nach der Korrektur der systematischen Fehler besser als die Genauigkeit der ÖWW-Blöcke. Dies gilt für die Lage und die Höhe.

Für den Vergleich von empirischer und theoretischer Genauigkeit wurde die theoretische Genauigkeit durch Simulation zufälliger Fehler abgeleitet. Die Gegenüberstellung ergab, daß die empirischen Ergebnisse in der Lage um den Faktor 1.8 (Bündel) bzw. 1.4 (Modelle) und in der Höhe um den Faktor 1.3 (WW) bzw. 1.4 (ÜWW) der theoretischen Genauigkeit unterlegen sind. Diese Zahlen betreffen die PP-Version 1. Die empirische Lagegenauigkeit von PP-Version 5 fällt gegenüber den theoretischen Erwartungen deutlich ab. Der Faktor ist größer als 2.5. Die Höhengenaugkeit ist durchschnittlich um den Faktor 1.5 unterlegen. Insgesamt ist die Übereinstimmung zwischen empirischer und theoretischer Genauigkeit nur für die Höhengenaugkeit zufriedenstellend.

Durch die Korrektur der systematischen Bilddeformationen mit der besten Bestimmung konnte die Genauigkeit der Blockausgleichungen gegenüber der ursprünglichen Selbstkalibrierung nochmals verbessert werden. Die empirische Lagegenauigkeit der Bündelblöcke ist nun um den Faktor 1.4, die Höhengenaugkeit um den Faktor 1.2 den theoretischen Genauigkeitserwartungen unterlegen. Die Zahlen betreffen PP-Version 1. Eine vollkommene Übereinstimmung mit der Theorie konnte also nicht erreicht werden. Die Unterschiede, drückt man sie in absoluten Zahlen aus, sind allerdings sehr klein. Sie betragen für den Block Frankfurt $d = 1.5 \mu\text{m}$ in der Lage und $d = 1.6 \mu\text{m}$ in der Höhe.

Tatsache ist jedenfalls, daß auch bei der Selbstkalibrierung nicht die gesamten systematischen Bild- und Modelldeformationen erfaßt werden können. Dazu kommen noch die Vernachlässigungen durch das vereinfachte stochastische Modell der Aero-triangulation. Dies sind die Ursachen für die Diskrepanz zwischen der empirischen und der theoretischen Genauigkeit.

Nachdem in dieser Arbeit sowohl die Selbstkalibrierung als auch die Testfeldkalibrierung zur Korrektur der systematischen Fehler angewandt worden ist, interessiert eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der beiden Verfahren. Dabei ergibt sich, daß die Selbstkalibrierung für die berechneten Blöcke der Testfeldkalibrierung geringfügig, nämlich um den Faktor 1.1, überlegen ist.

Mit der Berechnung einer Selbstkalibrierung im Anschluß an die Testfeldkalibrierung konnte die Lagegenauigkeit noch um den Faktor 1.3 gesteigert werden. Durch die Kombination der beiden Korrekturverfahren konnte in drei Fällen eine bessere Lagegenauigkeit als mit der Selbstkalibrierung alleine erzielt werden. Die Höhengenaugkeit war in keinem Fall signifikant besser. Für die berechneten Blöcke konnte nicht nachgewiesen werden, daß durch eine Kombination beider Verfahren die Absolutgenauigkeit der Blockausgleichungen wesentlich verbessert werden kann.

Die Ergebnisse der Untersuchungen haben gezeigt, daß die Selbstkalibrierung und die Testfeldkalibrierung geeignete Methoden sind, die Genauigkeit der Aero-triangulation durch die Korrektur der systematischen Bild- und Modelldeformationen zu verbessern. Andererseits erbrachte der Vergleich der empirischen Ergebnisse mit der theoretischen Genauigkeit insgesamt keine zufriedenstellende Übereinstimmung. Offenbar ist die Modellvorstellung noch immer nicht ausreichend. Es bleibt die Notwendigkeit einer weiteren Verbesserung des mathematischen Modells der Aero-triangulation.

Darunter ist in erster Linie die Weiterentwicklung der Selbstkalibrierung und die Abklärung einer Reihe von Fragen zu verstehen, die damit zusammenhängen. Insbesondere sollte auf eine gewisse Standardisierung der zusätzlichen Parameter hingearbeitet werden.

Die zusätzlichen Parameter wurden bisher zum Teil so gewählt, daß sie bestimmte physikalische oder mechanische Fehlereinflüsse, z.B. die Verbiegung der An-druckplatte, erfassen können. Andererseits war es gar nicht möglich, bestimmte Fehlerquellen explizit nachzuweisen und damit den Ansatz zu begründen. Als Alternative kann man den Ansatz sehen, der die Parameter nach ihrer geometrischen Bestimmbarkeit auswählt. Die Bestimmbarkeit der Parameter, bzw. der systematischen Bilddeformationen ist von verschiedenen Faktoren, wie Anordnung der Flugstreifen, Querüberdeckung, usw. abhängig, die zum Teil in dieser Arbeit behandelt wurden. Darüber hinaus sollte die Bestimmbarkeit der systematischen Fehler grundsätzlich untersucht und dargestellt werden.

Weiterhin sollte eine umfassende Abklärung über die Auswirkung der systematischen Deformationen auf den photogrammetrischen Block erfolgen. Im Zusammenhang mit der oben diskutierten Bestimmbarkeit der systematischen Deformationen, könnte man zu einer Optimierung durch eine spezielle Wahl der Projektparameter, wie Querüberdeckung usw., kommen.

Eine dritte Möglichkeit der Weiterentwicklung der Selbstkalibrierung betrifft die Erfassung der linearen und sonstigen Abhängigkeiten der systematischen Bild- und Modelldeformationen im Block. In der Arbeit wurde ein erster Ansatz in Form der streifenweisen Korrektur der systematischen Fehler gemacht. Auch in dieser Richtung könnten weitere Untersuchungen erfolgen.

Neben einer Verbesserung des Funktionalmodells sollte grundsätzlich auch eine Verfeinerung des stochastischen Modells in Betracht gezogen werden. Trotz der Tatsache, daß Verbesserungen des Funktionalmodells stärker die Genauigkeit der Aerotriangulation beeinflussen, sollte doch die Wirksamkeit der Berücksichtigung der Korrelation empirisch nachgewiesen werden.

Ist es doch bekannt, daß die Korrelationen im Bild und die Korrelationen zwischen benachbarten Bildern erheblich sein können. Sollte sich der durch die Berücksichtigung der Korrelationen wesentlich erhöhte Rechenaufwand als nicht lohnend erweisen, so kann man immerhin den zu erwartenden Genauigkeitsverlust abschätzen.

LITERATUR

- [1] ACKERMANN, F.: Fehlertheoretische Untersuchungen über die Genauigkeit photogrammetrischer Streifentriangulation. DGK, Reihe C, Nr. 87.
- [2] ACKERMANN, F.: Photogrammetrische Lagegenauigkeit streifenartiger Modellverbände. BuL 1966, 3/4, S. 119-124 und S. 178-184.
- [3] ACKERMANN, F.: Theoretische Beispiele zur Lagegenauigkeit ausgeglichener Blöcke. BuL 1967 / 3, S. 114-122.
- [4] ACKERMANN, F.: On Statistical Investigations into the Accuracy of Aerial Triangulation. The Test Project Oberschwaben. OEEPE Publication Officielle N° 8, S. 15-21.
- [5] ACKERMANN, F.: Testblock Oberschwaben. Program I - Results of Block Adjustment by Independent Models. OEEPE Publication Officielle N° 8, S. 87-148.
- [6] ACKERMANN, F.: Photogrammetrische Netzverdichtung - Projekt Appenweier. Lehrgang Numerische Photogrammetrie (III), 1975.
- [7] BAARDA, W.: Statistical Concepts in Geodesy, Netherlands Geodetic Commission, Vol. 2, No. 4, 1967.
- [8] BAUER, H.: Compensation of Systematic Errors by Analytical Block Adjustment with Common Image Deformation Parameters. OEEPE Publication Officielle N° 8, 1973, S. 319-331.
- [9] BAUER, H.: Bundle Adjustment with Additional Parameters - Practical Experiences. DGK, Reihe B, Heft Nr. 214, S. 83-89.
- [10] BELZNER, H.: The Planing, Establishing and Flying of the Test Field Oberschwaben. OEEPE Publication Officielle N° 8, 1973, S. 35-47.
- [11] D.C. BROWN: Bundle Adjustment with Strip- and Block-Invariant Parameters. DGK, Reihe B, Heft Nr. 214, S. 54-65.
- [12] CAMPS, F.: Resultats obtenues dans le cadre du projet Oberschwaben 2 A, OEEPE Publication Officielle N° 8, 1973, S. 183-206.
- [13] DIN 18716: Begriffe, Benennungen und Formelgrößen in der Photogrammetrie (Bildmessung) März 1959.
- [14] ACKERMANN, F., EBNER, H., KLEIN, H.: Ein Programm-Paket für die Aero-triangulation mit unabhängigen Modellen, BuL 1970, S. 218-224.
- [15] EBNER, H.: A posteriori Varianzschätzungen für die Koordinaten unabhängiger Modelle, ZfV 1972, S. 166-172.
- [16] EBNER, H.: Comparison of Different Methods of Block Adjustment. OEEPE Publication Officielle N° 8, S. 151-172.
- [17] EBNER, H.: Die theoretische Genauigkeitsleistung der räumlichen Blockausgleichung. Numerische Photogrammetrie, Sammlung Wichmann, Neue Folge, Band 5.
- [18] EBNER, H.: Zusätzliche Parameter in Ausgleichungen. ZfV 1973, S. 385-391.
- [19] EBNER, H.: Self Calibrating Block Adjustment. Invited Paper of Commission III, ISP-Congress, 1976.
- [20] FINSTERWALDER, R.: Die Berücksichtigung der Erdrückung bei der photogrammetrischen Auswertung. ZfV 1963, S. 190-196.
- [21] GRAFAREND, E.: Genauigkeitsmaße geodätischer Netze. DGK, Reihe A, Nr. 73, 1972.

- [22] GROSSMANN, W.: Geodätische Rechnungen und Abbildungen in der Landesvermessung, 1964.
- [23] GRÖN, A.: Die simultane Kompensation systematischer Fehler mit dem Münchener Bündelprogramm MBOP. Presented Paper of Commission III, ISP-Congress, 1976.
- [24] HALLERT, B.: Swedish Testfield for Aerial Photographs. The Photogrammetric Record, Oct. 1965, S. 82-94.
- [25] HALLERT, B.: Sources of Error on Photogrammetry, Jubilee Volume dedicated to Willem Schermerhorn on his seventieth anniversary. ITC Delft 1964, S. 163-176.
- [26] JERIE, H.G.: Block adjustment with analogue computer applying 'composed sections': Evaluation of the accuracy to be expected. ITC-Publications, Nr. A 2, 1960.
- [27] JERIE, H.G.: Height Precision after Block Adjustment. Photogrammetria 19/7, 1964, S. 348-353.
- [28] JERIE, H.G.: Theoretical Height Accuracy of Strip and Block Triangulation with and without use of Auxiliary Data. Photogrammetria 23/1, 1966, S. 19-44.
- [29] KRAUS, K.: Interpolation nach kleinsten Quadraten in der Photogrammetrie. BuL 40, 1972, S. 7-12.
- [30] KRAUS, K. und STARK, E.: Flächenhafte Verzeichnungskorrektur in der numerischen Photogrammetrie. BuL 2, 1973, S. 50-56.
- [31] KRONEBERG, H.: Untersuchungen über die Genauigkeit des gezielten Bildfluges 'Oberschwaben'. Selbst. Arbeit, 1973.
- [32] KUBIK, K.: Systematic Image Errors in Aerial Triangulation. Invited Paper of Commission III, ISP-Congress, Ottawa, 1972.
- [33] KUPFER, G.: Image Geometry as Obtained from Rheidt Test Area Photography. OEEPE Publication Officielle N° 8, 1973, S. 225-281.
- [34] KUPFER, G.: Zur Geometrie des Luftbildes. DGK, Reihe C, Heft Nr. 170.
- [35] MASSON d'AUTUME, G.: Le traitement des erreurs systématiques dans l'aérotiangulation. Presented Paper of Commission III, ISP-Congress, Ottawa, 1972.
- [36] MEIER, H.-K.: Über die geometrische Genauigkeit von Luftbildern. 35. Photogrammetrische Woche, Stuttgart, 1975, Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie, Heft 2.
- [37] MEIXNER, H.: Programmentwicklung und Genauigkeitsuntersuchungen zur Bündelmethode der Aerotriangulation. DGK, Reihe C, Nr. 206, 1975.
- [38] RINNER, K.: Einfluß der Definition der Landeskoordinaten auf die photogrammetrische Triangulation. DGK, Reihe A, Höhere Geodäsie, Heft Nr. 34, Nr. II.
- [39] RINNER, K. und BURKHARDT, R.: Handbuch der Vermessungskunde. Band III a/3, Photogrammetrie, § 129-133, S. 1629-2020, 1972.
- [40] RINNER, K., KILLIAN, K., MEISSL, P.: Zusammenfassung und Ausbau der inneren Fehlertheorie eines Punkthaufens. DGK, Reihe A, Nr. 61, 1969.
- [41] SACHS, L.: Statistische Auswertungsmethoden. Springer Verlag Berlin, 1968.

- [42] SALMENPERA, H., ANDERSON, J.M., SAVOLAINEN, A.:
Efficiency of the Extended Mathematical Model in Bundle Adjustment.
DGK, Reihe B, Heft Nr. 214, S. 66-75.
- [43] SCHENK, E.: Die Neutriangulierung von Württemberg.
LV Baden-Württemberg, 1956.
- [44] SCHENK, T.: Nochmals: Darstellung der Verzeichnungskurven mittels
Potenzreihen. BuL 39, 1971, S. 127-130.
- [45] SCHILCHER, M.: Ober die Genauigkeit der Lagepaßpunkte des Testgebietes
Oberschwaben. Unveröffentlicht.
- [46] SCHILCHER, M.: Some Practical Examples of Systematic Errors of Stereo
Models. Presented Paper of Commission III, ISP-Congress 1976.
- [47] SCHWIDEFSKY, K. und KELLNER, H.: Darstellung der Verzeichnungsfehler
photographischer Objektive durch Potenzreihen.
BuL 37, 1969, S. 39-47.
- [48] STARK, E.: Testblock Oberschwaben. Program I - Results of Strip
Adjustments. OEEPE Publication Officielle N° 8, 1973, S. 49-81.
- [49] STARK, E.: Die Genauigkeitsstruktur im photogrammetrischen Einzelmodell.
DGK, Reihe C, Heft Nr. 193.
- [50] STROBEL, A.: Die Grundlagenvermessung. 150 Jahre Württemberg.
Landesvermessung, S. 57-110.
- [51] TIENSTRA, J.M.: The Foundation of the Calculus of Observations and
the Method of Least Squares.
Bulletin géodésique, 1948, Heft Nr. 10, S. 289-306.
- [52] VERMEIR, P.A.: La triangulation aérienne, Propagation des erreurs et
compensation. Bull. Soc. Belge Photogramm., No. 35, 1954.
- [53] VISSER, J., LEBERL, F., KURE, J.: OEEPE Oberschwaben Reseau Investi-
gations. OEEPE Publication Officielle N° 8, S. 289-316.
- [54] WISER, P.: Proposition pour le traitement des erreurs non-accidentelles.
OEEPE Publication Officielle N° 8, 1973, S. 175-182.
- [55] ZIEMANN, H.: Untersuchungen an Reseauaufnahmen.
DGK, Reihe C, Heft Nr. 104.
- [56] GOTTHARDT, E.: Der Einfluß unregelmäßiger Fehler auf Luftbildtriangu-
lationen. ZfV 1944, S. 73-97.
- [57] ROELOFS, R.: Erreurs Systematiques ou Accidentelles ?
Photogrammetria 1949, S. 29-38.

LEBENS LAUF

Am 30. März 1948 wurde ich als Sohn des Willy Haug und seiner Ehefrau Berta, in Plochingen, Kreis Esslingen, geboren.

Nach dem Besuch der Volksschule von 1955 bis 1959 in Altbach wechselte ich auf das Schelztor-Gymnasium in Esslingen und legte dort im Juni 1967 die Reifeprüfung ab.

Nach dem Grundwehrdienst bei der Bundeswehr und nach einem viermonatigen vermessungstechnischen Praktikum begann ich das Studium der Geodäsie an der Universität Stuttgart im Oktober 1969. Nach 8 Semestern Studium legte ich die Diplomprüfung ab und erhielt im Frühjahr 1974 das Diplom. Daran anschließend war ich drei Jahre am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Seit Mai 1977 bin ich im Vorbereitungsdienst für den höheren vermessungstechnischen Verwaltungsdienst beim Landesvermessungsamt Baden-Württemberg.

A N H A N G

Tabellen 3.2 - 3.13

Streifen		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Standard- punkt x	1	+1.5	+4.5	+1.9	+2.1	+0.3	+3.7	+1.9	+7.2	+1.9	+7.8	+3.2	+7.6	+2.6	+8.2	+1.9
	2	+0.8	+0.6	+1.2	+1.0	+0.9	+0.7	+0.8	+0.7	+0.7	+0.8	+0.5	+1.2	+0.3	+0.9	+0.4
	3	+7.4	+8.5	+7.5	+6.6	+5.7	+7.8	+5.7	+8.3	+5.6	+6.5	+7.9	+5.1	+6.8	+8.0	+6.9
	4	-4.3	-4.7	-5.2	-4.7	-5.2	-3.5	-4.1	-2.0	-4.7	-0.8	-5.4	-1.2	-5.4	-0.8	-4.9
	5	-1.7	-1.4	-2.3	-2.3	-1.8	-1.2	-1.5	-1.4	-1.6	-1.7	-1.0	-2.2	-0.7	-1.8	-0.8
	6	+4.0	+2.1	+3.6	+4.3	+3.8	+4.1	+4.0	+3.9	+3.2	+1.0	+3.6	+0.8	+3.6	+3.3	+3.5
	7	-10.1	-9.8	-11.1	-7.7	-9.8	-9.4	-10.7	-6.5	-11.1	-8.1	-12.3	-6.5	-11.3	-7.1	-9.7
	8	+0.9	+0.8	+1.3	+1.2	+1.0	+0.6	+0.9	+0.5	+0.9	+0.9	+0.6	+1.1	+0.4	+0.9	+0.5
	9	+0.8	-3.3	+1.4	+0.8	+0.7	-0.9	-2.2	-1.0	-1.1	-5.6	-0.1	-4.0	-0.1	-4.1	-0.1
y	1	+8.9	+8.0	+9.1	+7.8	+7.8	+8.8	+7.1	+7.3	+7.9	+7.3	+10.2	+6.1	+9.1	+6.3	+8.6
	2	+5.8	+3.9	+6.6	+3.7	+6.6	+5.4	+5.5	+0.3	+5.8	+2.4	+7.0	+0.3	+5.2	+1.3	+6.1
	3	+4.6	+2.5	+4.6	+3.8	+4.8	+3.7	+3.7	-0.4	+3.7	+0.6	+4.0	-1.0	+5.0	-0.7	+4.3
	4	+2.0	+2.9	+1.1	+3.1	+1.5	+3.1	+1.9	+3.6	+2.2	+1.6	+1.6	+3.3	+2.0	+2.1	+0.9
	5	-2.1	-2.0	-2.6	-1.2	-3.4	-2.7	-2.3	-1.4	-2.7	-4.5	-4.0	-1.8	-1.8	-3.8	-2.9
	6	-7.9	-8.5	-7.1	-8.2	-8.1	-8.6	-7.5	-8.7	-8.0	-11.2	-8.9	-9.4	-8.6	-10.9	-7.9
	7	-0.8	-0.1	-0.3	-1.3	-0.5	-0.1	+0.5	+4.8	+1.2	+6.0	+1.0	+5.2	+1.6	+6.0	+0.5
	8	-3.4	-2.4	-3.6	-2.1	-2.7	-2.6	-2.8	+0.9	-2.7	+2.2	-2.6	+1.5	-3.0	+2.6	-2.8
	9	-3.8	-5.0	-3.0	-4.2	-2.9	-2.9	-3.4	+0.1	-3.0	+0.8	-3.1	+0.4	-3.0	+0.1	-3.2

Tabelle 3.2 Systematische Bilddeformationen der Weitwinkelblöcke, $q = 20 \%$, PP-Version 0 (in μm) - streifenweise Mittel bezogen auf die Flugrichtung NS

Streifen		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
x	Standardpunkt															
	1	+4.3	+4.2	+2.9	+3.0	+1.3	+3.8	+3.8	+6.3	+2.1	+7.8	+3.9	+6.8	+3.3	+7.6	+4.6
	2	-0.8	-1.1	-1.4	-1.3	-1.7	-2.9	-2.9	-0.4	+0.2	+0.5	+1.5	+0.9	-1.2	-1.1	-3.1
	3	+7.8	+7.9	+8.1	+7.0	+6.7	+8.2	+6.9	+7.6	+6.1	+6.0	+8.1	+3.5	+7.4	+6.1	+9.0
	4	-3.3	-4.9	-4.4	-4.3	-4.8	-3.7	-3.5	-3.2	-4.5	-1.0	-5.4	-1.6	-4.9	-1.4	-3.9
	5	-1.8	-1.5	-2.7	-1.6	-1.3	-1.4	-2.1	-1.2	-0.5	-2.0	-0.1	-1.2	-0.5	-1.0	-2.4
	6	+3.4	+2.7	+3.8	+3.5	+3.7	+3.3	+4.2	+2.5	+3.1	+0.7	+3.9	+0.5	+3.5	+1.7	+4.1
	7	-10.4	-10.5	-10.4	-9.6	-9.8	-10.4	-11.2	-8.3	-11.2	-8.8	-12.7	-7.7	-10.9	-8.2	-10.0
	8	+2.9	+1.9	+3.4	+3.3	+4.2	+4.1	+3.0	+2.3	+3.4	+1.2	+0.4	+1.8	+2.0	+4.3	+0.7
	9	-1.3	-2.1	+1.0	-1.7	-1.1	-1.7	-3.0	-3.0	-1.8	-5.7	-0.3	-4.2	-0.9	-4.7	-1.3
y	1	+8.3	+7.4	+9.2	+7.6	+7.6	+7.8	+7.3	+7.3	+8.3	+7.4	+11.5	+5.7	+9.1	+6.7	+9.1
	2	+3.4	+3.9	+5.5	+3.6	+6.4	+5.6	+3.9	+1.5	+6.0	+2.2	+5.4	-0.1	+4.4	+1.6	+5.0
	3	+3.4	+3.7	+5.2	+4.3	+5.6	+4.9	+4.5	+1.4	+4.2	+0.5	+4.2	+0.8	+5.6	+1.1	+4.8
	4	+2.8	+2.5	+1.4	+2.8	+1.4	+2.2	+1.9	+2.9	+2.2	+1.6	+2.5	+2.7	+2.0	+1.6	+1.6
	5	-2.7	-2.4	-3.5	-1.7	-3.5	-2.6	-3.3	-1.7	-2.5	-5.1	-5.6	-3.1	-1.2	-4.0	-3.3
	6	-8.3	-7.9	-7.0	-7.9	-7.8	-7.9	-7.7	-8.4	-8.2	-11.5	-9.4	-8.7	-8.5	-9.9	-7.9
	7	+1.0	-0.0	+0.4	-0.8	-0.6	-0.5	+0.6	+3.5	+1.2	+5.6	+1.9	+4.6	+1.5	+4.9	+1.4
	8	-2.0	-3.1	-3.9	-2.1	-2.2	-2.4	-3.2	-0.3	-2.2	+1.1	-4.0	-0.0	-2.8	+1.8	-2.6
	9	-2.6	-3.7	-2.5	-3.4	-2.1	-2.0	-2.9	-0.5	-2.5	+0.2	-3.3	+0.4	-2.7	+0.5	-2.6

Tabelle 3.3 Systematische Bilddeformationen der Weitwinkelblöcke, $q = 60\%$, PP-Version 0 (in μm) - streifenweise Mittel bezogen auf die Flugrichtung NS

Streifen		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Standardpunkt x	1	+8.5	+5.8	+9.6	+8.7	+9.4	+4.9	+11.6	+8.4	+8.7	+1.5	+7.2	+0.6	+6.2	+5.4	+8.2
	2	+2.9	+2.0	+2.2	+1.1	+2.3	+1.1	+2.3	+1.4	+2.6	+1.8	+3.1	+1.3	+2.3	+1.4	+2.2
	3	+11.2	+9.7	+13.2	+9.2	+14.5	+8.4	+11.6	+10.4	+14.5	+8.6	+11.7	+9.6	+11.3	+10.7	+13.3
	4	-3.7	-2.7	-4.9	-2.3	-4.3	-2.5	-4.2	-3.9	-3.0	-5.2	-5.8	-4.8	-3.7	-4.2	-4.3
	5	-5.1	-3.9	-4.1	-2.8	-4.2	-2.2	-4.3	-2.9	-4.9	-3.8	-5.8	-3.0	-4.4	-2.5	-4.0
	6	+1.9	+5.3	+1.5	+3.1	+0.7	+2.6	+1.7	+3.9	+2.0	+3.0	+1.8	+4.6	+0.7	+4.2	+2.4
	7	-11.6	-10.3	-9.2	-10.3	-10.2	-11.2	-10.9	-11.3	-10.4	-9.4	-9.7	-6.9	-10.1	-10.8	-8.5
	8	+2.6	+2.1	+2.2	+1.4	+2.2	+1.3	+2.3	+1.6	+2.5	+2.0	+3.1	+1.9	+2.3	+1.6	+2.1
	9	-6.7	-4.9	-8.7	-5.5	-9.0	-6.6	-7.9	-4.9	-5.9	-3.9	-3.9	-0.3	-5.4	-3.3	-6.1
	y	1	+9.8	+6.3	+6.2	+5.8	+7.6	+4.7	+6.3	+6.8	+9.1	+6.4	+7.4	+7.1	+5.1	+7.6
2		+0.9	+2.4	+2.1	+0.9	+1.4	+1.7	+2.2	+1.6	+1.8	+2.8	+4.6	+2.1	+1.3	+2.2	+0.7
3		-3.4	-6.4	-6.4	-4.8	-3.1	-5.0	-3.8	-6.1	-3.9	-3.9	-2.2	-2.2	-2.4	-5.2	-4.4
4		+16.8	+8.8	+16.9	+9.5	+14.9	+10.1	+15.2	+9.0	+18.7	+7.6	+15.1	+7.7	+15.1	+9.5	+15.8
5		+1.2	+1.4	+1.4	+1.2	+1.1	+0.8	+1.7	+1.5	+1.9	+2.5	+1.7	+2.3	+2.3	+2.4	+1.9
6		-6.0	-1.9	-7.2	-4.2	-11.6	-5.2	-10.2	-1.8	-6.0	-1.5	-6.4	+0.1	-6.1	+0.3	-7.6
7		-2.9	+0.5	-1.1	+0.8	-2.9	+0.4	+0.9	-0.6	-2.6	-4.0	-4.0	-4.8	-4.4	-2.8	-4.2
8		-2.1	-4.4	-3.5	-2.3	-2.5	-2.6	-4.0	-3.4	-3.9	-5.6	-6.1	-4.9	-3.6	-4.8	-2.7
9		-8.3	-6.5	-5.6	-5.4	-6.4	-5.6	-3.0	-6.8	-7.6	-9.5	-6.2	-6.6	-7.2	-5.2	-7.5

Tabelle 3.4 Systematische Bilddeformationen der Oberweitwinkelblöcke, $q = 20 \%$, PP-Version 0 (in μm) - streifenweise Mittel bezogen auf die Flugrichtung NS

Streifen		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Standardpunkt															
x	1	+7.8	+5.5	+10.8	+8.6	+9.9	+6.3	+13.0	+8.9	+8.9	+3.1	+6.9	+3.1	+7.3	+4.7	+10.2
	2	-0.6	-1.2	-2.2	-2.0	-1.2	-2.5	-2.3	-1.2	-0.2	-0.5	+0.2	+0.1	-2.8	-3.0	-2.9
	3	+11.6	+9.6	+12.9	+11.5	+15.6	+10.0	+11.3	+11.8	+15.2	+10.0	+12.8	+10.0	+13.0	+12.6	+12.7
	4	-4.2	-3.1	-4.8	-2.7	-5.5	-2.3	-3.5	-4.2	-3.6	-4.7	-5.8	-4.9	-3.7	-4.7	-4.1
	5	-5.2	-3.8	-4.8	-4.1	-4.5	-1.9	-4.2	-3.2	-5.3	-3.6	-5.3	-3.0	-4.5	-1.8	-4.7
	6	+2.3	+3.8	+0.8	+2.7	+1.4	+1.8	+2.1	+3.5	+2.7	+2.7	+2.3	+3.6	+1.3	+3.1	+2.8
	7	-11.1	-10.8	-9.9	-10.0	-11.4	-11.6	-9.9	-11.6	-10.4	-9.5	-10.0	-8.6	-11.0	-11.6	-9.3
	8	+5.9	+7.2	+5.7	+3.5	+5.0	+8.0	+7.3	+4.7	+5.6	+4.8	+5.0	+6.4	+7.0	+8.5	+5.0
	9	-7.8	-6.2	-9.1	-7.4	-9.5	-8.5	-8.2	-6.8	-7.6	-5.1	-3.9	-2.8	-6.0	-5.6	-6.9
y	1	+8.1	+4.7	+5.3	+5.1	+7.7	+3.5	+5.9	+6.8	+7.7	+6.0	+7.2	+5.8	+4.4	+6.1	+4.7
	2	+1.7	+3.7	+1.2	+2.0	+1.7	+2.4	+0.5	+1.4	+2.0	+2.9	+4.4	+1.6	+0.6	+2.9	-1.1
	3	-2.7	-4.5	-6.9	-3.9	-2.5	-4.1	-3.4	-5.0	-3.8	-3.3	-1.8	-2.2	-2.0	-3.7	-3.5
	4	+10.1	+8.5	+11.3	+9.6	+13.3	+9.2	+9.1	+9.2	+9.8	+7.9	+13.0	+7.3	+12.6	+8.7	+12.2
	5	+1.5	+2.3	+0.2	+1.8	+1.4	+1.3	+0.9	+1.2	+2.1	+2.5	+2.1	+1.5	+1.7	+2.0	+0.9
	6	-4.4	-1.8	-6.1	-4.1	-9.9	-4.8	-8.3	-1.7	-5.0	-1.6	-5.9	-0.3	-4.4	-0.4	-5.3
	7	-4.4	-1.2	-0.8	-0.3	-3.1	-1.6	±0	-1.6	-2.7	-3.8	-4.3	-5.3	-4.8	-4.0	-5.0
	8	-2.2	-4.6	-4.1	-2.6	-2.8	-3.2	-4.2	-3.9	-3.4	-5.5	-5.5	-5.5	-4.3	-5.6	-3.8
	9	-7.1	-6.3	-4.4	-6.0	-5.3	-5.2	-3.7	-7.5	-7.2	-8.4	-6.7	-6.2	-6.4	-6.6	-5.6

Tabelle 3.5 Systematische Bilddeformationen der Überweitwinkelblöcke, q = 60 %, PP-Version 0 (in μm) - streifenweise Mittel bezogen auf die Flugrichtung NS

Streifen		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Projek- tions- zentren	x	-7.3	-2.4	-2.4	-1.2	-7.6	-6.2	-6.0	-4.4	-4.2	-0.3	-4.6	-2.8	-5.0	-3.9	-4.3	
	y	+6.7	+2.4	+2.9	+2.0	+5.5	+2.4	+5.8	+0.6	+3.6	+0.5	+1.6	-0.1	+4.8	-0.7	+3.5	
	z	-1.4	-4.1	-2.5	-3.5	-0.7	-1.3	-0.2	-3.0	-2.4	-0.6	-4.5	-4.5	+0.3	-1.1	-4.8	
Standard- punkt	x	1	-1.9	-1.3	-2.0	-2.2	-1.5	-0.7	-2.1	-2.3	-3.4	-3.2	-2.2	-1.9	-1.9	-0.3	-2.4
		2	+2.0	+2.5	+2.0	+1.9	+1.5	+0.6	+2.2	+1.4	+3.4	+3.2	+2.2	+2.1	+1.9	+0.4	+2.4
		3	+0.1	+5.2	-0.2	+0.2	+2.2	+1.4	+0.1	-0.3	+0.7	+4.5	+1.6	+2.8	+0.6	+4.9	+0.4
		4	-4.0	-2.2	-4.0	-4.4	-5.2	-4.5	-2.7	-3.6	-3.3	-4.1	-5.4	-2.7	-4.5	-5.4	-3.5
		5	-5.3	-3.7	-4.8	-2.8	-4.9	-4.5	-5.1	-5.7	-6.7	-9.8	-8.0	-5.5	-5.1	-7.7	-7.1
		6	+8.0	+8.5	+8.4	+6.7	+8.7	+7.6	+7.9	+4.2	+10.4	+9.2	+12.2	+6.3	+8.8	+7.0	+9.9
	y	1	-3.3	-3.5	-3.5	-2.3	-2.8	-2.7	-3.0	-0.2	-2.1	-0.2	-2.8	+1.7	-2.2	+2.2	-2.3
		2	+3.2	+2.3	+3.5	+2.3	+2.8	+3.5	+3.1	+0.4	+2.1	-2.2	+2.8	+0.6	+2.2	-2.3	+2.3
		3	+0.1	-1.8	-0.1	-0.6	+0.2	+1.3	+0.4	+3.6	+1.2	+3.3	+1.7	+9.9	+1.2	-0.7	+3.4
		4	+4.0	+0.0	+2.8	+4.7	+3.7	+5.9	+7.2	-1.4	+8.0	+5.3	+5.2	+4.6	+6.5	-0.1	+5.7
		5	-3.7	-7.5	-5.7	-5.5	-2.9	-4.2	-2.1	+0.1	-2.4	-0.3	-3.3	-0.3	-3.9	+0.1	-3.7
		6	+1.7	+3.4	+2.7	+2.5	+2.3	+2.2	+0.8	+1.1	-0.4	-1.0	+3.2	+1.3	+2.4	+1.3	+2.1
	z	1	-2.9	-0.3	-3.7	-2.7	-3.5	-2.1	-3.6	-2.2	-3.6	-2.7	-0.8	-3.7	-0.2	-3.9	-1.1
		2	+2.6	-0.7	+3.7	+3.6	+3.5	+1.2	+3.6	+1.7	+3.6	+2.7	+0.8	+4.0	+0.2	+3.7	+1.1
		3	+1.0	-0.9	+0.2	+1.5	+0.4	-1.6	+1.2	+2.5	+2.2	+3.9	-0.4	+0.6	-0.1	+3.6	+0.5
		4	+0.1	+0.3	-1.4	-3.0	+0.0	-3.9	-2.4	-0.7	-1.4	-3.7	+1.6	-0.8	-0.6	-2.7	+0.0
		5	+1.8	-3.6	+0.8	+2.3	+3.4	+0.3	+1.9	-3.1	+1.3	-1.2	+1.0	+0.5	-0.7	-3.1	-0.4
		6	-2.1	+5.2	-1.5	+4.4	-2.1	-2.2	-2.1	+1.7	-2.6	+1.0	-0.2	+2.8	+0.0	+0.5	+0.4

Tabelle 3.6 Systematische Modelldeformationen der Weitwinkelblöcke, $q = 20 \%$, PP-Version 0 (in μm) - streifenweise Mittel bezogen auf die Flugrichtung NS

Streifen		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Projek- tions- zentren	x	-7.5	-1.8	-2.4	-1.2	-7.8	-6.4	-6.4	-4.4	-4.3	-0.3	-5.1	-2.4	-4.3	-3.5	-5.1	
	y	+5.3	+2.1	+2.9	+1.8	+5.6	+2.4	+5.7	+1.4	+3.8	+0.5	+1.6	+0.2	+4.1	-0.8	+3.1	
	z	-1.1	-3.8	-2.3	-2.8	-0.6	-1.3	+0.5	-2.4	+0.3	-0.2	-2.0	-4.0	+0.6	-0.7	-2.5	
Standard- punkt	x	1	-1,5	-1,1	-1,2	-1,5	-1,1	-0,8	-1,0	-1,4	-3,6	-2,1	-2,3	-1,7	-2,8	-0,1	-0,8
		2	+2,7	+1,3	+3,0	+2,2	+2,0	+1,2	+3,6	+1,6	+3,4	+4,1	+1,5	+3,5	+2,9	+0,4	+2,9
		3	+0,6	+2,6	-0,4	+0,7	+2,5	+1,6	-0,1	+1,4	+0,7	+3,9	+3,0	+2,2	+0,4	+5,5	+1,1
		4	-4,0	-4,2	-4,2	-4,1	-5,8	-4,7	-3,2	-2,5	-3,6	-4,7	-6,3	-1,7	-3,6	-5,7	-4,5
		5	-6,2	-4,0	-5,1	-3,2	-4,8	-4,2	-5,3	-5,2	-6,2	-10,2	-7,2	-7,1	-5,6	-7,3	-6,9
		6	+7,8	+9,2	+8,1	+7,2	+9,2	+8,1	+8,1	+4,9	+11,1	+9,4	+11,6	+6,9	+10,4	+6,8	+9,2
	y	1	-2,9	-3,4	-3,7	-2,5	-4,2	-4,3	-2,6	-2,7	-4,8	-0,5	-4,1	-2,3	-5,3	-1,7	-2,5
		2	+0,9	+1,5	+2,2	+1,6	+0,9	+1,4	+2,4	-1,7	-0,1	-2,3	+0,7	-2,7	-1,9	-5,8	+1,6
		3	+1,4	+1,7	+0,4	+0,4	+0,3	+0,8	+0,6	+4,5	+1,3	+3,2	+1,3	+7,6	+3,2	+2,2	+2,3
		4	+3,6	+2,5	+3,6	+4,9	+4,3	+4,6	+7,2	+1,0	+8,8	+5,7	+4,7	+2,9	+8,3	+3,1	+3,6
		5	-2,4	-5,5	-5,2	-4,7	-2,3	-3,2	-2,6	-0,2	-2,8	-0,4	-1,9	-1,0	-3,1	-1,5	-3,5
		6	+1,3	+4,5	+3,1	+2,4	+3,1	+3,1	+0,3	+1,9	-0,5	-0,9	+4,1	+0,0	+1,9	+3,2	+2,4
	z	1	+2,5	+5,5	+3,6	+4,2	+5,3	+6,6	+4,5	+5,9	+3,7	+3,8	+5,7	+3,3	+6,0	+4,0	+4,8
		2	+8,7	+6,8	+10,7	+10,2	+11,9	+10,3	+12,1	+9,4	+11,1	+9,8	+7,3	+9,6	+7,4	+10,8	+7,5
		3	-2,8	-2,7	-2,7	-1,4	-3,5	-4,3	-2,8	-1,8	-1,4	+0,4	-3,3	-1,4	-4,2	+0,2	-3,0
		4	-2,9	-3,8	-4,6	-6,7	-4,3	-6,7	-6,5	-6,0	-5,3	-6,9	-1,8	-5,0	-4,0	-6,8	-3,6
		5	-0,4	-5,7	-2,5	-3,1	-0,7	-3,7	-2,4	-5,6	-2,3	-4,7	-2,3	-3,2	-4,3	-5,2	-3,0
		6	-5,4	-0,2	-4,7	-2,3	-5,7	-5,3	-6,5	-2,2	-5,9	-3,0	-3,1	-2,0	-3,5	-2,8	-2,1

Tabelle 3.7 Systematische Modelldeformationen der Weitwinkelblöcke, q = 60 %, PP-Version 0 (in μm) - streifenweise Mittel bezogen auf die Flugrichtung NS

Streifen		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Projek- tions- zentren	x	-0.3	-0.4	+2.8	-1.2	-1.2	-3.5	+1.6	+2.0	+2.9	+0.1	+1.7	-1.7	-3.8	-3.3	-4.0	
	y	+1.4	+1.6	+1.9	+1.9	+5.2	-1.7	-1.1	+3.9	+2.9	+3.9	+2.3	+4.3	+2.5	+2.6	-0.5	
	z	-4.2	-3.6	-7.1	-3.3	-6.4	-0.8	-3.4	-2.7	-4.9	-3.2	-7.6	-5.4	-5.8	-3.9	-1.7	
Standard- punkt	x	1	-4.0	-1.5	-3.3	-1.8	-4.0	-0.7	-5.1	-5.0	-4.7	-1.8	-4.6	-2.5	-2.5	-3.0	-2.5
		2	+4.0	+2.7	+3.3	+3.3	+4.0	+2.7	+5.1	+4.8	+4.7	+1.4	+4.6	+2.7	+2.5	+1.2	+2.5
		3	-7.5	-6.7	-9.2	-11.4	-8.0	-7.2	-6.3	-11.7	-10.2	-6.2	-9.4	-7.5	-9.0	-9.4	-6.4
		4	+5.7	+8.6	+5.5	+5.7	+5.0	+5.8	+4.5	+8.9	+4.3	+6.7	+4.8	+5.8	+5.9	+4.9	+6.4
		5	+0.5	+4.0	+0.8	+0.1	-0.1	+2.3	-2.2	+0.8	-1.4	+5.8	+3.2	+5.1	+4.2	+3.1	+1.9
		6	-0.5	+1.1	+1.2	+0.6	+3.2	+0.6	+3.8	+0.3	+3.0	-2.3	+2.8	-1.4	+0.5	-5.9	-0.5
	y	1	-1.3	-2.2	-2.8	-1.7	-2.1	-0.9	-0.4	-0.7	-2.2	-2.7	-5.1	-2.7	-1.9	-1.7	-0.5
		2	+1.3	+0.8	+2.8	+1.1	+2.1	+1.0	+0.4	+0.9	+2.2	+2.9	+5.1	+3.0	+1.9	+2.7	+0.5
		3	+2.8	-2.1	+5.0	-0.1	+6.4	+2.0	+3.4	+2.7	+5.1	+1.1	+3.0	+3.6	+2.5	+2.1	-1.0
		4	+2.7	+0.2	-1.3	+5.1	+0.9	+6.2	+2.8	+3.2	+1.6	+6.3	+1.4	+2.3	+0.5	+1.0	+1.0
		5	-4.3	-7.9	-7.8	-9.0	-8.5	-5.6	-8.4	-5.6	-9.1	-8.5	-12.1	-9.6	-7.8	-4.8	-6.4
		6	+4.3	+1.7	+1.2	+0.9	+4.6	+0.7	-0.8	+0.7	+2.2	+2.7	+3.9	+6.3	+3.1	+6.2	+3.5
	z	1	-4.7	-5.3	-2.2	-2.8	-2.6	-4.2	-4.0	-4.2	-5.4	-4.2	-5.7	-4.1	-4.2	-2.7	-2.7
		2	+4.7	+5.2	+2.2	+2.9	+2.6	+4.0	+4.0	+4.0	+5.4	+3.8	+5.7	+4.4	+4.2	+2.2	+2.7
		3	+1.2	+2.3	-1.3	-2.0	+2.0	-1.8	+3.3	-1.8	+0.1	+2.2	+1.1	+0.5	+1.2	-0.7	+2.2
		4	-0.7	-2.3	-0.1	-1.2	+0.9	+0.9	-2.3	+0.9	-1.4	-0.8	+1.4	+1.8	+0.3	+0.9	-2.2
		5	+0.9	-1.5	+0.3	-2.0	+0.3	-1.0	-1.0	-1.0	-0.2	-2.2	+0.7	+1.2	-1.7	+0.8	-2.6
		6	-0.9	+0.8	-1.3	+1.5	+0.8	+0.7	+1.3	+0.7	-0.6	-2.0	+1.0	-0.4	-1.3	-0.6	+1.3

Tabelle 3.8 Systematische Modelldeformationen der Überweitwinkelblöcke, $q = 20 \%$, PP-Version 0 (in μm) - streifenweise Mittel bezogen auf die Flugrichtung NS

Streifen		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Projek- tions- zentren	x	+0.5	-0.1	+3.3	+0.2	-0.1	-4.9	+2.0	+5.1	+2.2	+0.5	+1.3	-3.8	-3.7	-1.2	-2.9	
	y	+2.4	+3.0	+3.3	+2.2	+7.8	+1.2	+1.2	+4.3	+1.9	+8.7	+1.5	+0.7	+4.8	+5.3	-2.4	
	z	-2.6	-3.7	-5.3	-2.4	-4.7	-0.5	-2.0	-0.7	-3.4	+3.0	-6.0	-4.2	-3.9	-2.5	-0.3	
Standard- punkt	x	1	-3.4	-0.8	-2.1	-1.5	-1.7	-1.8	-4.2	-5.2	-3.2	-0.1	-2.5	-1.6	-1.7	-2.0	-2.9
		2	+3.7	+2.9	+4.7	+5.7	+5.8	+3.0	+5.9	+4.7	+6.2	+2.8	+6.1	+2.9	+3.6	+2.0	+3.6
		3	-6.6	-8.6	-8.1	-10.5	-7.7	-6.6	-6.8	-10.8	-8.6	-7.2	-8.2	-6.7	-9.1	-9.7	-7.4
		4	+5.3	+5.8	+6.9	+7.0	+5.3	+7.0	+4.2	+10.1	+4.9	+6.9	+5.1	+6.4	+6.8	+7.4	+6.0
		5	+1.9	+4.7	+1.3	+1.6	+0.7	+1.6	-2.0	+2.0	-1.0	+6.4	+4.2	+6.1	+4.5	+5.5	+1.2
		6	+0.6	+1.2	+2.0	+1.9	+4.7	+0.7	+4.5	+1.3	+3.0	+0.0	+3.2	-0.9	+1.0	-1.7	+0.6
	y	1	-2.1	-1.0	-2.2	-0.2	-2.3	-0.1	-1.2	+0.4	-4.3	-1.6	-6.5	-2.9	-1.3	-1.8	-1.1
		2	+0.0	+2.7	+3.4	+2.8	+3.0	+2.7	+0.0	+2.9	+0.4	+3.9	+2.9	+2.7	+3.1	+2.5	-1.6
		3	+3.7	-0.4	+5.4	+0.6	+7.6	+2.4	+4.8	+2.9	+6.4	-0.5	+3.1	+3.0	+2.1	+2.8	+2.1
		4	+3.2	+2.7	-1.1	+5.9	+1.8	+5.8	+3.6	+3.0	+2.5	+4.6	+2.0	+1.4	+0.6	+1.3	+2.7
		5	-6.4	-8.3	-7.4	-9.3	-7.9	-4.9	-7.6	-7.7	-8.3	-9.2	-11.4	-9.4	-8.9	-9.0	-5.7
		6	+2.5	+2.1	+1.7	+1.1	+5.5	-2.7	+0.2	+0.8	+3.1	+1.6	+4.4	+6.3	+3.0	+1.4	+2.1
	z	1	+0.8	+3.9	+5.9	+5.5	+6.0	+10.5	+3.7	+6.5	+3.5	+4.3	+2.2	+5.1	-0.2	+6.7	+4.2
		2	+10.1	+14.2	+10.7	+10.9	+12.0	+15.1	+15.8	+12.5	+13.5	+12.1	+12.4	+11.4	+13.3	+10.3	+8.6
		3	-2.0	-0.1	-4.9	-2.7	-7.3	-4.0	-1.3	-6.1	-4.0	-2.2	-2.1	-3.7	-4.5	-5.6	-0.3
		4	-4.4	-5.4	-3.4	-6.5	-3.9	-6.4	-6.3	-5.8	-5.0	-4.5	-2.2	-3.1	-4.6	-5.3	-5.4
		5	-2.1	-5.3	-4.6	-6.1	-3.8	-3.7	-7.3	-4.5	-5.0	-4.9	-3.2	-3.2	-6.2	-3.1	-5.3
		6	-3.9	-3.7	-5.8	-3.2	-3.2	-8.0	-4.5	-6.3	-5.1	-6.5	-3.1	-7.1	-5.2	-5.7	-1.5

Tabelle 3.9 Systematische Modelldeformationen der Überweitwinkelblöcke, $q = 60 \%$, PP-Version 0 (in μm) - streifenweise Mittel bezogen auf die Flugrichtung NS

Block		Frankfurt, q = 20 %						Wien, q = 20 %						WW, q = 60 %					
PP-Version	Flugrichtung	0		1		5		0		1		5		0		1		5	
		NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN	NS	SN
Standardpunkt																			
x	1	+1.5	+2.2	-0.2	+0.0	-0.2	-0.1	+7.2	+5.5	+3.5	+3.1	+0.1	+0.2	+4.5	+4.4	+3.9	+4.9	+3.4	+3.4
	2	+0.7	+0.4	+0.8	+0.5	+0.9	+0.6	+0.8	+0.9	+0.9	+0.7	+0.8	+0.7	-0.9	-0.5	-1.9	-1.5	-4.0	-4.1
	3	+6.3	+6.5	+8.6	+8.3	+0.1	+0	+6.9	+6.8	+6.3	+6.9	-0.3	+0	+6.6	+7.0	+6.2	+6.3	+0.9	+1.1
	4	-4.6	-4.8	-4.8	-5.1	-0.4	-0.7	-1.9	-2.7	-2.3	-2.7	-0.5	-0.8	-3.8	-4.0	-3.4	-3.5	-0.3	-1.0
	5	-1.5	-1.0	-1.7	-1.3	-1.5	-1.8	-1.6	-1.8	-1.7	-1.5	-1.7	-1.5	-1.5	-1.6	-2.3	-2.1	-1.6	-1.3
	6	+3.6	+3.2	+4.4	+4.4	+0.5	+0.6	+2.8	+2.8	+2.4	+2.3	+0.6	+0.2	+2.8	+2.7	+2.5	+2.4	-0.2	-0.1
	7	-12.0	-12.4	-7.9	-7.6	+0.0	+0.1	-7.8	-7.7	-6.0	-6.3	+0.6	+0.5	-9.9	-10.0	-9.2	-10.4	-3.3	-3.4
	8	+0.8	+0.6	+1.0	+0.8	+0.9	+0.5	+0.8	+0.9	+0.9	+0.7	+0.8	+0.7	+2.8	+2.6	+2.3	+2.8	+5.7	+5.6
	9	+0.1	-0.4	-1.2	-0.2	-0.4	-0.3	-2.9	-2.0	-3.5	-3.2	-0.6	-0.3	-2.0	-2.0	-2.6	-2.5	-2.1	-1.6
y	1	+8.4	+8.9	+7.7	+7.7	+1.5	+1.8	+6.9	+7.3	+6.0	+5.6	+1.1	+0.5	+7.8	+8.0	+6.2	+6.1	-1.4	+1.5
	2	+6.3	+6.7	+5.4	+6.0	+1.5	+1.9	+2.1	+2.5	+2.6	+2.0	+0.8	+0.2	+3.6	+3.6	+3.1	+2.8	+0	+0.1
	3	+5.1	+4.5	+3.3	+3.0	+2.7	+2.6	+1.0	+1.5	+1.3	+1.1	+3.2	+2.7	+3.5	+3.5	+4.1	+4.1	+3.3	+3.4
	4	+2.1	+2.0	+0.9	+0.3	-1.9	-2.4	+2.9	+2.9	+0.4	+2.1	-2.6	-1.0	+2.1	+2.1	+1.6	+2.1	-1.5	-1.0
	5	-2.8	-3.6	-2.5	-3.3	-2.7	-3.5	-2.5	-2.3	-4.0	-2.0	-3.7	-1.8	-3.3	-3.1	-3.6	-3.4	-3.8	-3.2
	6	-8.1	-8.4	-8.2	-8.3	-5.7	-5.9	-9.5	-9.1	-10.3	-8.6	-6.6	-5.1	-8.2	-8.3	-7.4	-8.0	-5.4	-4.9
	7	+0.7	+1.4	-0.6	-0.1	+0.7	+1.0	+3.9	+2.7	+3.3	+1.8	+1.4	+0.5	+1.8	+1.6	+2.5	+2.9	+1.9	+1.3
	8	-2.6	-2.7	-2.7	-2.5	+1.4	+1.9	+0.5	-0.2	+1.1	-0.5	+2.9	+1.5	-1.8	-1.8	-1.4	-1.6	+1.4	+0.9
	9	-3.4	-3.5	-2.8	-2.5	+3.2	+3.3	-0.9	-1.5	-0.1	-1.6	+4.2	+3.2	-1.9	-1.8	-1.8	-1.5	+4.4	+3.9

Tabelle 3.10 Systematische Bilddeformationen der Weitwinkelblöcke Frankfurt, Wien, WW (q = 60 %) (in μm) - Mittelung von Streifen in gleicher Flugrichtung

Block		Den Haag, q = 20 %			Delft, q = 20 %			OWW, q = 60 %					
PP-Version		0	1	5	0	1	5	0		1		5	
Flugrichtung		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	SN	NS	SN	NS	SN
Standardpunkt													
x	1	+8.6	+7.4	+1.4	+4.9	+3.9	+1.8	+9.4	+5.7	+8.5	+5.2	+6.2	+2.8
	2	+2.5	+2.6	+2.5	+1.4	+1.4	+2.4	-1.5	-1.5	-2.4	-2.2	-5.5	-5.5
	3	+12.6	+11.3	+1.1	+9.4	+8.1	+1.2	+13.1	+10.8	+11.5	+9.3	+5.3	+3.1
	4	-4.2	-4.1	-2.1	-3.7	-3.3	-2.7	-4.4	-3.8	-4.1	-3.5	-1.9	-1.6
	5	-4.6	-4.8	-4.9	-2.9	-3.0	-4.8	-4.8	-3.1	-4.7	-3.0	-4.6	-3.0
	6	+1.6	+0.8	-1.2	+3.5	+3.2	-1.2	+2.0	+3.0	+1.8	+2.8	-0.4	+0.7
	7	-10.1	-7.8	+1.5	-9.9	-8.2	+0.8	-10.4	-10.5	-9.3	-9.2	-3.2	-3.1
	8	+2.4	+2.5	+2.5	+1.6	+1.7	+2.7	+5.8	+6.2	+7.0	+7.1	+10.0	+10.4
	9	-6.6	-6.0	-0.2	-4.3	-3.8	+0.3	-7.4	-6.1	-6.5	-5.1	-4.6	-3.0
y	1	+7.2	+5.6	-1.7	+6.2	+5.3	+0.5	+6.4	+5.4	+4.5	+3.8	-0.6	-1.5
	2	+1.8	+1.3	-0.6	+1.8	+1.7	-0.9	+1.4	+2.4	+0.9	+2.1	-1.4	-0.2
	3	-3.6	-2.9	+0	-4.8	-4.3	-4.8	-3.3	-3.8	-3.2	-3.5	-1.9	-1.9
	4	+13.3	+12.0	+7.1	+8.7	+7.8	+4.2	+11.4	+8.6	+10.7	+7.3	+6.9	+3.5
	5	+1.6	+1.7	+1.6	+1.6	+1.8	+1.8	+1.4	+1.8	+1.4	+1.7	+1.5	+1.9
	6	-7.7	-7.1	-1.9	-2.5	-1.1	+2.3	-6.2	-2.1	-5.1	-0.9	-1.2	+2.9
	7	-2.6	-2.7	-5.7	-1.6	-1.9	-4.1	-3.2	-2.5	-3.6	-3.1	-5.1	-4.8
	8	-3.6	-3.0	-1.1	-3.8	-3.6	-1.0	-3.8	-4.4	-3.4	-4.2	-0.8	-1.7
	9	-6.5	-6.8	+1.3	-6.7	-5.5	+1.6	-5.8	-6.6	-4.1	-5.1	+1.4	+0.3

Tabelle 3.11 Systematische Bilddeformationen der Überweitwinkelblöcke Den Haag, Delft,OWW (q = 60 %) (in μm) - Mittelung von Streifen in gleicher Flugrichtung