

Nr. 232

Ein rechnergestütztes Planungssystem für die digitale Nahbereichsphotogrammetrie

Vom Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

DOKTOR – INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Bernd Pollak

HANNOVER 1999

Referenten:

Prof. Dr.-Ing. mult. G. Konecny

Prof. Dr.-Ing. G. Seeber

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Juli 1999

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der grundlegenden Theorie zu einem rechnergestützten Planungssystem für photogrammetrische Aufnahmen im Nahbereich und dessen Implementation. Die Aufgabenstellung ergibt sich aus der Komplexität und Gerätevielfalt der Anwendungen in der Nahbereichsphotogrammetrie. Letztere wird thematisch und technisch umrissen.

Die theoretischen Grundlagen für die Planung von photogrammetrischen Aufnahmesystemen werden erarbeitet. Zugehörige Aspekte können mit Begriffen wie Geräteauswahl, Anordnungsgeometrie, Auswerteverfahren, Randbedingung und Handhabung sowie deren Grundkonfiguration und Optimierung charakterisiert werden. Die prinzipiell durch ein Planungssystem lösbaren Aufgaben sowie die dafür erforderlichen Grundlagen werden zusammengestellt. Aspekte der Implementierung werden erläutert und es werden Bezüge zur Theorie der Expertensysteme hergestellt. Als grundlegendes funktionales Konzept wird ein planungsunterstützendes Werkzeug definiert, welches über Datenstrukturen verfügt, die als Grundlage für ein Expertensystem geeignet sind.

Die Entwicklung eines neuen Planungssystems wird durchgeführt. Dazu gehört die interne Datenstruktur, die durch zwei miteinander verknüpfte Rahmensysteme charakterisiert werden kann. Diese erlauben eine gesonderte logische Untergliederung der Geräte-, Umgebungs- und Verfahrenskomponenten einerseits und der zugehörigen funktionalen Zusammenhänge andererseits. Die Abhängigkeiten der Systemparameter werden mit Hilfe von Vorwärtsverkettungen aus den Basisinhalten zu höheren Ordnungsniveaus formuliert. Die als wesentlicher Planungsvorgang anzusehende automatische Anpassung von untergeordneten Parametern, zum Beispiel nach dem Austausch einer Gerätekomponente, wird durch Methoden der Rückwärtsverkettung ermöglicht. Dabei zwangsläufig auftretende Mehrdeutigkeiten werden durch geeignete Strategien behandelt. Weitergehende konzeptionelle Untersuchungen zur Gewinnung von Basisdaten, zur automatischen Erstellung einer Kameraanordnungsgeometrie und einer Internet-Dienstleistung werden durchgeführt.

Der Ablauf einer Planung mit dem neuen System beginnt bei der Definition der Ordnungsstrukturen. Der erste aufgabenbezogene Schritt ist die Festlegung der Anforderungen der aktuellen Problemstellung. Es folgt die Wahl einer Grundkonfiguration von Systemparametern, die z.B. aus Standardwerten oder aus Daten bereits früher durchgeführter Planungen bestehen kann. Anschließend werden die Zielgrößen berechnet. Ihre höchste Ebene ist logisch identisch mit den Anforderungswerten. Ein direkter Vergleich der Inhalte liefert die Beurteilung der Konfiguration. Eine Optimierung wird entweder iterativ durch die Variation von Einflußgrößen oder durch gezielte Rückwärtsverkettung von erwünschten Inhalten erreicht.

Abschließend erfolgt neben einer beispielhaften Anwendung die Verifizierung der Ergebnisse des Planungssystems anhand von in der Praxis durchgeführten photogrammetrischen Aufnahmen. Die Resultate aus diesen Tests belegen die Einsetzbarkeit des Planungssystems sowie die daraus resultierenden Vorteile. Bei guter Modellierung der Planungsaufgabe ergeben sich korrekte Resultate. Bei hoher Bearbeitungsgeschwindigkeit ist die Präzision der Ergebnisse besser und die Anfälligkeit gegen grobe Fehler geringer.

Abstract

This thesis deals with the basic theory of a computer-aided planning system for photogrammetric close-range data acquisition and its implementation. The aim results from the complexity and variety of applications in close-range photogrammetry, which is outlined thematically and technically.

The theoretic fundamentals of planning a photogrammetric data acquisition system are developed. The most important aspects can be characterised by terms as equipment choice, geometry layout, evaluation procedures, special conditions and handling as well as their initial configuration and optimization. The tasks which can be solved principally by a planning system and their basics are described. Implementation aspects are discussed and relations to the theory of expert systems are shown. A planning tool is defined as the main functional concept, which uses data structures which are suitable also for an expert system.

The development of a new planning system is carried out. This includes the internal data structure, which can be characterized by two linked frame systems. These allow a separate logical arrangement of the components of equipment, surrounding and procedures on one side and the related functional connections on the other side. The dependencies of system parameters are formulated using a forward-chaining method from basic values to aiming values of higher order levels. An essential operation is the automatic adjustment of subordinate parameters, for example after the changing to another camera system, which is possible by methods of backward-chaining. Resulting ambiguities are treated with suitable strategies. Additional conceptional tests are made concerning the acquisition of basic data, the automatic construction of geometry layout, and the presentation of a consulting service in the network.

The planning process using the new system starts with the layout of logical data structures. The first task-related step is the definition of the demands of the actual surveying problem. The choice of an initial configuration of system parameters follows, which is consisting of either default values or of a data set used in a previous planning process. Then the aiming values are calculated. Their highest level is logically identical with the required values representing the task. Optimization is realized by an iterative variation of parameters or by specific backward-chaining from required values.

Finally a verification of the results of the planning system is done using a theoretic example as well as real photogrammetric applications. These tests prove the applicability of the planning system and its advantages. Suitable modelling of the task yields correct results. The high calculation speed leads to a better planning precision. The risk of large errors is greatly reduced.

Inhalt

	Seite
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung	2
3 Die Situation in der Nahbereichsphotogrammetrie	4
3.1 Thematische Einordnung	4
3.1.1 Einteilung der Photogrammetrie in Spezialgebiete	4
3.1.2 Weitere Ordnungsbegriffe	9
3.1.3 Komponentenspezifische Begriffe	11
3.2 Abgrenzung des Spezialbereichs	16
3.3 Die digitale Nahbereichsphotogrammetrie	17
3.3.1 Geräte	17
3.3.2 Techniken und Verfahren	20
3.3.3 Nutzerkreis und Anwendungen	22
3.3.4 Standardisierung und Normung	24
4 Grundlagen der Planung photogrammetrischer Aufnahmesysteme	25
4.1 Voraussetzungen für eine Planung	25
4.2 Systemparameter und ihre funktionalen Zusammenhänge	25
4.2.1 Anordnungsgeometrie	26
4.2.2 Gerätekonfiguration	26
4.2.3 Auswerteverfahren	27
4.2.4 Randbedingungen	27
4.2.5 Handhabung	28
4.3 Grundkonfiguration und Optimierung	28
4.4 Problemstellungen und ihre Lösbarkeit mit einem Planungssystem	28
4.4.1 Erstellung einer Grundkonfiguration	29
4.4.2 Ermittlung der Leistungsdaten	29
4.4.3 Beurteilung der Leistungsdaten	29
4.4.4 Anpassung und Optimierung	30
5 Realisierungsmöglichkeiten eines Planungssystems	31
5.1 Aktuelle Situation	31
5.1.1 Wie plant der Mensch ein Aufnahmesystem ?	31
5.1.2 Expertensysteme und das vorliegende Problem	31
5.1.3 Vorhandene Planungs- und Expertensysteme	34

5.2	Aspekte der Implementierung	35
5.2.1	Computersystem	35
5.2.2	Entwicklungssystem	36
5.2.3	Bedienungskonzept	38
5.2.4	Datenorganisation	40
5.2.5	Logistik	40
6	Das Photogrammetrische Planungssystem PPS	41
6.1	Interne Strukturen	42
6.1.1	Datenrepräsentation	42
6.1.2	Ordnungsstrukturen der Wissensbasis	44
6.1.2.1	Theorie der Rahmensysteme	44
6.1.2.2	Gruppierung nach Systemkomponenten	47
6.1.2.3	Gruppierung nach Funktionalität	47
6.1.2.4	Zusammenhang der Ordnungsstrukturen	47
6.1.3	Datenverknüpfung	48
6.1.3.1	Abhängigkeitseigenschaften	48
6.1.3.2	Formulierung von Abhängigkeiten	50
6.1.3.3	Verwendung von Zielgrößen	50
6.1.3.4	Algorithmische Strukturen	50
6.2	Ablaufschema einer Planung	51
6.2.1	Vorwärtsverkettung der Parameter	51
6.2.2	Parameteranpassung durch Rückwärtsverkettung	52
6.3	Die Implementierung	53
6.3.1	Bedienungsoberfläche	53
6.3.2	Einrichten des Systems und Ablauf einer Planung	58
6.4	Schaffung einer Wissensbasis	60
6.4.1	Informationsquellen	60
6.4.2	Standardwerte	62
6.5	Behandlung der Anordnungsgeometrie	62
6.5.1	Einordnung im Planungssystem	62
6.5.2	Ausstattungsmerkmale	63
6.5.3	Automatische Positionierung von Aufnahmestandpunkten	64
6.5.4	Beurteilungskriterien	68
6.5.5	Erweiterung auf komplexe Aufnahmesysteme	69
6.5.6	Verwendung von Standardsystemen	69

6.6	Konzept einer netzwerkbasierten Dienstleistung	70
6.6.1	Grundidee	70
6.6.2	Komponenten	70
6.6.3	Betreiber, Regelwerk und Finanzierung	73
7	Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Planungssystems	74
7.1	Methodik der Überprüfung	74
7.1.1	Leistungsfähigkeit des technischen Konzepts	74
7.1.2	Schlüssigkeit der photogrammetrischen Zusammenhänge	75
7.1.3	Aspekte der Modellbildung	76
7.1.4	Korrektheit der Implementierung	76
7.1.5	Experimentelle Überprüfung	76
7.1.6	Optimale Testbedingungen	77
7.2	Exemplarischer Aufbau einer Konfiguration	77
7.2.1	Aufgabenstellung	77
7.2.2	Parametrisierung	78
7.2.3	Ergebnisse	85
7.3	Anwendung des Planungssystems	86
7.3.1.	Form eines Stahlkonverters	86
7.3.1.1	Aufgabenstellung	86
7.3.1.2	In der Praxis verwendete Lösung	87
7.3.1.3	Ergebnisse der Messung	89
7.3.1.4	Einsatz des Planungssystems	89
7.3.1.5	Bewertung der Planungsergebnisse	100
7.3.1.6	Fazit	101
7.3.2.	Langfristige Deformation eines Kirchenbauwerks	102
7.3.2.1	Aufgabenstellung	102
7.3.2.2	In der Praxis verwendete Lösung	102
7.3.2.3	Ergebnisse der Messung	104
7.3.2.4	Einsatz des Planungssystems	104
7.3.2.5	Bewertung der Planungsergebnisse	112
7.3.2.6	Fazit	113
8	Zusammenfassung und Ausblick	114
Literatur		117

1 Einleitung

Ein großer Teil der Nahbereichsphotogrammetrie beschäftigt sich mit industriellen Anwendungen in Produktion und Anlagenbau. Die Bedeutung dieses Gebietes wird aus der Sicht der konventionellen Abgrenzung gelegentlich unterschätzt, weil sowohl Betreiber als auch Verfahren oft im Sprachgebrauch nicht der Photogrammetrie zugeordnet werden. Darunter fallen z.B. Inspektionsaufgaben im Bereich der „machine vision“ oder Sonderverfahren wie Streifenprojektion oder Moiré-Technik.

Die industrielle Produktionskontrolle ist ein Wachstumsmarkt. Einerseits steigen generell die Anforderungen an die Fertigungsqualität. Andererseits hat in den letzten Jahren eine Umstrukturierung der Beziehung von Zulieferern und Abnehmern dahingehend stattgefunden, daß die Zulieferfirmen die einwandfreie Ausführung ihrer Produkte garantieren müssen. Damit verlagert sich die Kontrolle der Teile von der Verwendbarkeit bei der Montage hin zu geeigneten Verfahren im Zulieferbetrieb. In diesem Zusammenhang sind auch die Intentionen der ISO 9000 - Vorschriften zu sehen.

Photogrammetrische Verfahren können aus mehreren Gründen auf dem oben beschriebenen Gebiet zunehmend eingesetzt werden. Sie bieten von Natur aus die Bestimmung dreidimensionaler Abmessungen, sie haben ein großes Genauigkeitspotential, und sie sind - speziell in der digitalen Ausprägung - zu hohen Arbeitsgeschwindigkeiten und teilweise vollständiger Automation fähig. Auf dem Gerätemarkt ist ein für die Vermessungstechnik unüblicher Entwicklungsschub und damit einhergehend eine positive Kostenentwicklung zu registrieren. Die Ursache dafür liegt in einer guten Konformität der Anforderungen mit denen der Multi-Media-Szene, deren Zielgruppe die der Meßtechnik Anwender zahlenmäßig selbstverständlich um ein Vielfaches übersteigt, und deren Hintergrund eine finanzkräftige Werbeindustrie bildet.

Vielfalt und Unterschiedlichkeit von Anwendungen der digitalen Photogrammetrie sind im Nahbereich unvergleichlich groß. Dazu kommt eine in der konventionellen Aufnahme- und Auswertetechnik nicht gekannte Variationsbreite von verwendbaren Geräten. Diese Tatsachen führen zu einer nur noch schwer überschaubaren Komplexität. Besonders fachfremde (potentielle) Nutzer stehen oft vor einem Problem, wenn sie beurteilen müssen, ob eine gestellte Meßaufgabe photogrammetrisch lösbar ist oder ob ein angebotenes System die geforderten Leistungsdaten besitzt bzw. besser oder schlechter als ein alternatives arbeitet. Fehlende Definitionen von Leistungskriterien und uneinheitlicher Sprachgebrauch tragen nicht zur positiven Einschätzung der photogrammetrischen Meßmethode bei.

Es ist daher dringend erforderlich, Schritte zu unternehmen, um das große Potential photogrammetrischer Vermessungsmethoden im Nahbereich und besonders in der Industrie besser zum Einsatz zu bringen.

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Bereitstellung der theoretischen Grundlagen für eine effiziente Planung bei photogrammetrischen Aufnahmen. Das Ergebnis wird dargestellt durch ein detailliertes Konzept für ein rechnergestütztes Planungssystem, das in der Lage ist, die komplexen Zusammenhänge formal zu

repräsentieren und den Nutzer durch geeignete Werkzeuge bei der Lösungsfindung zu unterstützen.

2 Zielsetzung

Die Planung von photogrammetrischen Aufnahmesystemen soll rechnerunterstützt durchgeführt werden. Die Komplexität dieser Aufgabe entsteht aus der im Nahbereich typischen Variationsbreite von Anwendungen und verfügbaren Geräten, wie im folgenden kurz beschrieben werden soll.

Die im Nahbereich zu vermessenden Objekte sind sowohl hinsichtlich ihrer Größe als auch ihrer Form sehr viel unterschiedlicher, als dies im Luftbild der Fall ist. So kann es z.B. erforderlich sein, nicht nur äußere Abmessungen zu bestimmen, sondern auch innerhalb eines Gebildes Koordinaten zu ermitteln. Allgemein kann die Geometrie eines terrestrischen Objektes beliebig komplex sein. Als Beispiel mag hier die Vermessung von Rohrleitungssystemen. Je nach Aufgabenstellung ist zusätzlich die Beschaffenheit der Oberfläche von Bedeutung, z.B. aus beleuchtungstechnischen Gründen, welches zu einer weiteren Variablen, nämlich der Lichtsituation, überleitet, die im Luftbild nur eine untergeordnete Rolle spielt. Weitere durch das Objekt oder die vorhandenen Randbedingungen gegebenen Aspekte können charakterisiert werden durch die Begriffe Zeit, Geschwindigkeit, Umgebungsraum und Umgebungsbedingungen.

Der Vielzahl der (potentiellen) Anwendungen steht eine nur schwer überschaubare Anzahl verwendbarer Geräte gegenüber. Im Gegensatz zur Luftbildphotogrammetrie ist außerdem die Variationsbreite der Genauigkeitsanforderungen enorm groß, so daß die in Frage kommenden Kameras und Objektive nicht zwangsläufig besonderen Ansprüchen genügen müssen. In dieselbe Richtung weist die Tatsache, daß im Nahbereich fehlendes Genauigkeitspotential seitens der eingesetzten Geräte einfacher als im Luftbildfall durch eine Vergrößerung des Abbildungsmaßstabs oder ähnliche konfigurationsrelevante Parameter aufgefangen werden kann. Die Folge ist, daß die einsetzbaren Geräte nicht einer kleinen und überschaubaren Gruppe intensiv getesteter spezialisierter Kameras entstammen müssen, wie es in der klassischen Photogrammetrie der Fall ist. Dieser Zusammenhang gilt allerdings hauptsächlich für digitale Aufnahmesysteme, weil sie durch die Verwendung von CCD-Bildsensoren von Haus aus meistens stabile und reproduzierbare innere Orientierungen besitzen.

Weitere Unterschiede zwischen Luftbildanwendungen und solchen im Nahbereich ergeben sich durch die andersartige Struktur des Einsatzes. Während bei ersteren sowohl die Handhabung der Geräte als auch die Durchführung der Auswertungen jeweils in photogrammetrischen Unternehmen oder Abteilungen geschieht, liegt die Verantwortung dafür im Nahbereich oft bei fachfremdem Personal. Damit kommen Kriterien wie Bedienbarkeit und Wartung ins Spiel. Weitere Aspekte sind die Flexibilität des Meßsystems in bezug auf neue Anforderungen, wie sie z.B. durch Objektvariationen gegeben sein können, und die Mobilität der eingesetzten Geräte. In diesem Zusammenhang muß auf Kalibrierung und Überprüfung von Meßeinrichtungen planerisch eingegangen werden.

Die aus den obengenannten Gründen entstehende unübersichtlich große Anzahl systembestimmender Parameter in eine handhabbare Ordnungsstruktur zu gliedern, ist das Ziel der vorliegenden Arbeit. Dabei kommt es hauptsächlich darauf an, dem Nutzer ein Werkzeug an die Hand zu geben, das ihn bei der Ermittlung von Auswirkungen unterstützt, die durch die Variation von Systemeigenschaften hervorgerufen werden. Als einfaches Beispiel sei der Austausch eines Objektives genannt. Angenommen, das neue Objektiv besitzt eine kürzere Kammerkonstante, so ändert sich dadurch der nutzbare Bildwinkel, außerdem als Folge davon gegebenenfalls die Anzahl erforderlicher Bilder, damit wiederum die Anzahl der zu signalisierenden Verknüpfungspunkte und zusätzlich die Reduzierung der zu ermittelnden Orientierungsparameter. Die neuen Verzeichnungseigenschaften wirken sich je nach Auswertemethode auf die erreichbare Genauigkeit aus, und eventuell sind wegen anderer mechanischer Gegebenheiten noch weitere Effekte zu erwarten. Die Kalkulation aller Auswirkungen ist an sich nicht schwierig, aber sehr zeitaufwendig und unübersichtlich. Das Planungssystem soll genau diese Aufgabe übernehmen und damit die Optimierung einer Meßkonfiguration vereinfachen.

Ein gesondert zu betrachtender Schwerpunkt ist die rechnergestützte Ermittlung der geometrischen Konfiguration eines Meßsystems. Die vollautomatische Bestimmung von Aufnahmeorten und -richtungen ist für das hier verfolgte Ziel nicht erforderlich. Lediglich die Folgen veränderter Systemparameter auf eine bestehende Anordnung muß berechnet werden können.

Die Entwicklung eines Planungssystems setzt eine Beschreibung der aktuellen Situation in der Nahbereichsphotogrammetrie und der photogrammetrischen Grundlagen voraus. Ferner soll diskutiert werden, inwieweit das vorliegende Problem in den Bereich der Expertensystemtheorie eingeordnet werden kann und welche methodischen Elemente gegebenenfalls daraus verwendet werden können. Weiterhin muß geklärt werden, welche Plattformen und Werkzeuge geeignet sind für die Entwicklung eines Planungssystems.

3 Die Situation in der Nahbereichsphotogrammetrie

Im folgenden soll beschrieben werden, was in dieser Arbeit unter Nahbereichsphotogrammetrie verstanden wird, welche verwandten Gebiete ausgegrenzt werden und wie der aktuelle Stand der Verfahren und der Gerätetechnik ist. Des weiteren sollen Begriffe geklärt werden, die für die vorliegende Aufgabe von zentraler Bedeutung sind. Die in diesem Zusammenhang zu treffenden Definitionen sind zunächst nur für die vorliegende Arbeit gültig. Darüber hinaus können sie als Vorschläge für eine allgemeine Terminologie dienen.

3.1 Thematische Einordnung

3.1.1 Einteilung der Photogrammetrie in Spezialgebiete

Die Einteilung kann durch verschiedene Kriterien erfolgen. Als solche kommen z.B. der Anwendungsbereich, die Kameraposition, das verwendete Verfahren, Objektgröße und Entfernung oder auch die Objektart in Frage. Im Prinzip erzeugt jeder dieser Systemparameter eine mehr oder weniger differenzierte Gruppierung. Dabei gibt es allerdings kein Kriterium, das für alle Bereiche der Photogrammetrie gleich gut geeignet ist. Die aktuell tatsächlich verwendete Untergliederung, wie sie in Abbildung 1 skizziert ist, wird deshalb auch durch rein praktische Gründe bestimmt. Sie verwendet alle fünf der obengenannten Unterscheidungen. Zu der Darstellung ist zu bemerken, daß die kursiv gedruckten Bezeichnungen Spezialgebiete beschreiben, für die keine eigene Sparte der Photogrammetrie begrifflich spezifiziert ist. Die hervorgehobenen Kästen enthalten die für die vorliegende Arbeit relevanten Gebiete.

Photogrammetrie

Es handelt sich hierbei um ein aus griechischen Stämmen zusammengesetztes Wort. Dabei bedeutet „*photos*“ das „Licht“, „*gramma*“ etwas „Geschriebenes oder Gezeichnetes“ und „*metron*“ das „Messen“, oder vollständig übersetzt: „Etwas mit Licht Gezeichnetes messen“.

Eine sehr umfassende Definition des Gebietes „Photogrammetrie“ gibt das „Manual of Photogrammetry“ [Thompson et al, 1980]:

Photogrammetry is the art, science and technology of obtaining reliable information about physical objects and the environment through processes of recording, measuring, and interpreting photographic images or patterns of electromagnetic radiant energy and other phenomena.

Damit sind alle Meß- und Interpretationsmethoden einbezogen, die Informationen aus Abbildungen gewinnen können, welche in irgendeiner physikalischen Art und Weise von Objekten entstanden sind. Allerdings ist der Wortlaut damit so allgemein gefaßt, daß genau genommen sogar das öffentliche Fernsehen zur Photogrammetrie gerechnet werden müßte. Eine einschränkendere Definition gibt Konecny [Konecny, 1984]:

Die Photogrammetrie ist ein Verfahren zur Vermessung von Objekten nach Lage und Form. Dabei werden die Messungen nicht direkt am Objekt, sondern indirekt auf Bildern des Objektes vorgenommen. Die Photogrammetrie ist deshalb ein Verfahren der Fernerkundung.

Hierbei wird die Photogrammetrie auf das geometrische Messen beschränkt, und Inhalte der Bildinterpretation bleiben dem übergeordneten Bereich der Fernerkundung vorbehalten. Damit ist diese Definition dem Sprachgebrauch in Industrieanwendungen

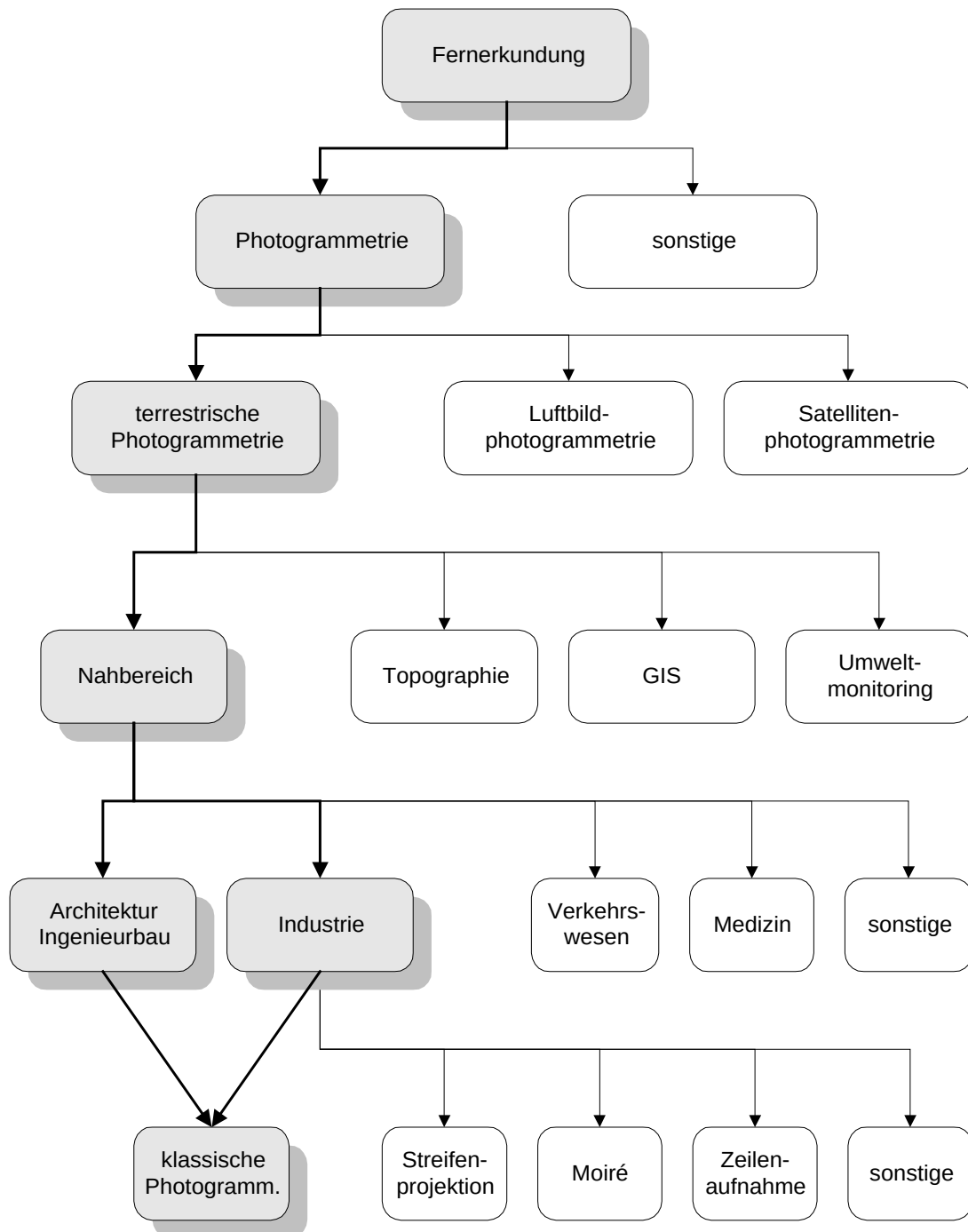


Abb.1: Gliederung der Photogrammetrie und hier relevante Teilgebiete

näher, wo rein qualitative Inspektionsaufgaben der Machine Vision von den quantitativ-geometrischen Meßverfahren getrennt werden.

Das in der vorliegenden Arbeit behandelte Teilgebiet wird von den obengenannten Definitionen vollständig abgedeckt. Weitergehende Abgrenzungen werden durch die Art der Anwendungen und Verfahren vorgenommen.

Terrestrische Photogrammetrie

Dieses Gebiet beinhaltet prinzipiell alle photogrammetrischen Aufnahmen, bei denen sich die Kamerapositionen auf oder nahe der Erdoberfläche befinden. Im Grenzbereich muß die Zugehörigkeit nach der Art des Objektes oder nach der typischen Aufnahme-konfiguration entschieden werden. Eine grundsätzliche Zweiteilung der Anwendungen der terrestrischen Photogrammetrie in geoinformationsbezogene auf der einen und technische auf der anderen Seite ist sinnvoll. Für letzteres hat sich der Begriff „Nahbereich“ etabliert.

Nahbereichsphotogrammetrie

Die Bezeichnung „Nahbereich“, die international mit „close-range“ übersetzt wird, bedeutet die Beschäftigung mit Aufnahmeanordnungen, bei denen vorzugsweise die Form und die lokale Lage der Objekte von Interesse ist. Im Gegensatz dazu sind oben-geannte topographische und verwandte Anwendungen zu sehen, die umgebungs-bezogen und in einem Landeskoordinatensystem arbeiten. Die Vielfalt der Aufgaben-stellungen im Nahbereich ist erheblich und daher weiter unterteilt in spezialisierte Richtungen. Dabei nimmt die „Industriephotogrammetrie“ den größten Raum ein. Außer dem festen Begriff der „Architekturphotogrammetrie“ gibt es in den restlichen Bereichen keine etablierten Bezeichnungen. Die früher häufiger begrifflich verwendete „Ingenieurphotogrammetrie“ entspricht in etwa der „Nahbereichsphotogrammetrie“. Sie ist von der Wortwahl heute nicht mehr sinnvoll und deshalb auch nicht in der Grafik aufgelistet.

Architekturphotogrammetrie

Dieses Gebiet beschäftigt sich in erster Linie mit Anwendungen in der Baudokumen-tation, Denkmalpflege und Stadtplanung. Typische Ergebnisse sind entzerrte Bilder und präzise maßstäbliche Strichzeichnungen. Sie ist eine traditionelle Sparte der Photo-grammetrie und wurde bereits früh mit den klassischen Auswertemethoden realisiert. Andere Aufgaben in der Bauindustrie, wie etwa die Deformationsmessungen zur Bauwerksüberwachung, werden klassisch dem Gebiet der „Ingenieurphotogrammetrie“ zugerechnet, gehören aber begrifflich zur „Architekturphotogrammetrie“, obwohl ihre Methoden häufig in der „Industriephotogrammetrie“ wiederzufinden sind.

Industriephotogrammetrie

Unter diesem Begriff werden Aufgabenstellungen verstanden, die unmittelbar mit der industriellen Produktion zu tun haben. Dieses beinhaltet die Forschung und Entwick-lung, die Einrichtung und Überprüfung des Fertigungsprozesses und die Kontrolle bzw. Abnahme von Produkten. Charakteristisch für dieses Gebiet sind Schlagworte wie hohe Genauigkeit, Online-Vermessung und Automatisierung. Die Industriephotogrammetrie umfaßt von der Definition her einige Spezialgebiete, die jedoch im Sprachgebrauch

nicht immer dazugerechnet werden. Neben der „klassischen Photogrammetrie“ gibt es die „Streifenprojektion“ oder den „Kodierten Lichtansatz“, die „Lichtschnittverfahren“, die „Moiré-Verfahren“ und verschiedene Variationen der „Zeilaufnahme“. Eine gewisse Eigenständigkeit dieser Bereiche wird dadurch erlangt, daß Entwicklung und Einsatz oft nicht durch explizite Photogrammetriefirmen oder –einrichtungen erfolgen, sondern in der Optikbranche oder in der Meßtechnik des Maschinenbaus angesiedelt sind. Die Anbieter solcher Meßsysteme sehen teilweise eine Konkurrenz zur klassischen Photogrammetrie.

Klassische Photogrammetrie

Die folgenden Kriterien bilden die Abgrenzung dieses Teilgebiets gegen die im vorigen Absatz genannten oder andere alternative Verfahren innerhalb der Photogrammetrie:

- Es werden Bilder mit Hilfe sichtbaren und nicht kodierten Lichts erzeugt.
- Die Bilder haben eine zweidimensionale Ausdehnung.
- Als Abbildungsgeometrie wird nur die Zentralperspektive zugelassen.
- Gemessen werden Bildkoordinaten in mindestens zwei Bildern.
- Zur Bildorientierung und Objektpunktberechnung werden räumliche Rückwärts- bzw. Vorwärtsschnitte verwendet.

Der Ausdruck „klassische Photogrammetrie“ wird in der Praxis hin und wieder auch für Aufnahmen mit konventionellem photographischen Filmmaterial als Gegensatz zu den modernen digitalen Techniken benutzt.

Streifenprojektion oder Kodierter Lichtansatz

Bei diesem Verfahren werden Streifenmuster ggf. mit örtlichen und zeitlichen Variationen optisch auf das Objekt projiziert und mit einer Kamera abgebildet. Mit Hilfe der

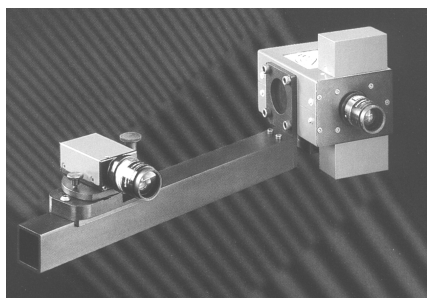


Abb.2: Kamera und Projektor
[Breuckmann, 1996]

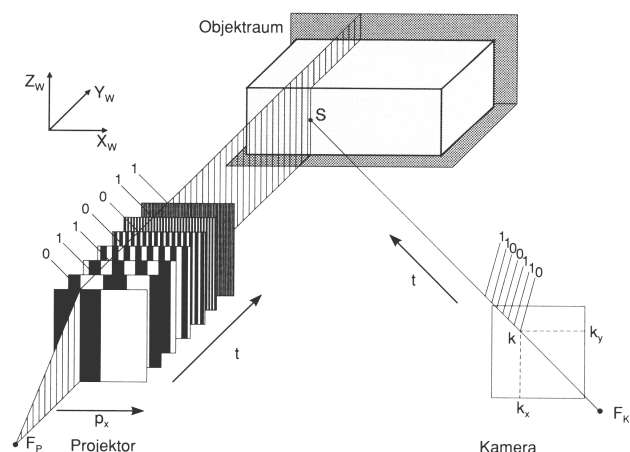


Abb.3: Kodierter Lichtansatz
[Schwarz, 1995]

Orientierung des Projektors und der Kamera lassen sich so sehr schnell dreidimen-

sionale Koordinaten bestimmen. Die mathematischen Modelle der Streifenprojektionsverfahren und der klassischen Photogrammetrie sind vom Ansatz her identisch, jedoch unterscheiden sich die originären Messungen sowie die Leistungsdaten voneinander.

Moiré-Verfahren

Die Projektion zweier Gitter auf ein Objekt mit unterschiedlichen Projektionszentren verursacht bei Nichtebenheit des Objektes eine Interferenzbildung, die zu einem

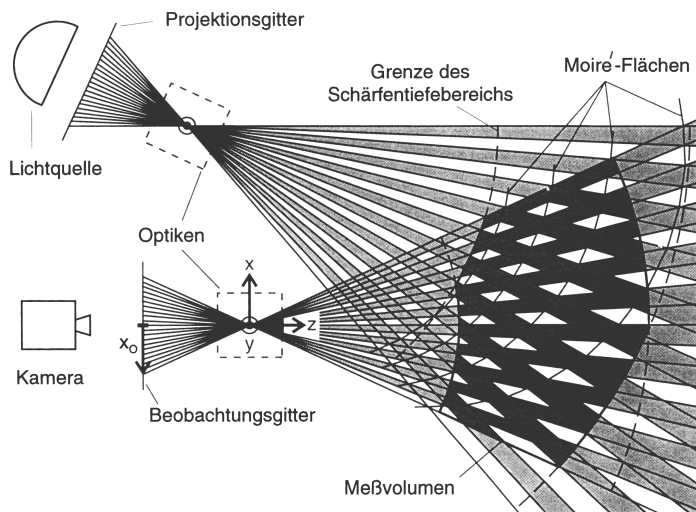


Abb.4: Beispiel eines Moiré-Meßsystems
[Rathjen, 1996]

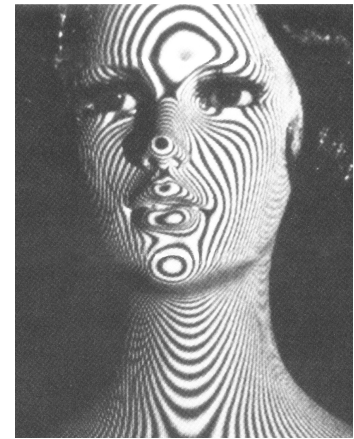


Abb.5: Moiré-Bild
[Pekelsky et al, 1989]

sogenannten „Moiré“-Muster führt [z.B. Rathjen, 1996]. Dieses optische Muster enthält Informationen, die zu einer dreidimensionalen Koordinatenbestimmung verwendet werden können. Eine Variante des Verfahrens ist die Projektion eines Gitters, dessen Auflösung dem CCD-Sensor der aufnehmenden Kamera entspricht.

Zeilenaufnahme

Häufig werden zu Inspektionszwecken Kameras eingesetzt, die nur eine eindimensionale Abbildung in Form einer Pixelzeile liefern können. Flächenhafte Bilder werden gegebenenfalls – wie in Abbildung 6 dargestellt – durch die kontinuierliche Bewegung des Objektes relativ zur Kamera erzeugt. Der zentralperspektivische Ansatz gilt hier nur innerhalb der Zeile. Die Orientierung der Zeilen zueinander bedarf zusätzlicher Informationen. Die dreidimensionale Koordinatenbestimmung ist mit einer Stereuanordnung zweier Zeilenkameras bei bekannter Position quer zur Zeilenrichtung realisierbar.

Sprachgebrauch

Die Zuordnung bestimmter Anwendungen oder auch Techniken zu Spezialgebieten ist in der Praxis nicht eindeutig. Dasselbe gilt für die Einordnung in das Fach Photo-

grammetrie. Die Gründe dafür sind - wie schon oben erwähnt - hauptsächlich darin zu suchen, auf welchem technischen Gebiet die jeweilige Interessenvertretung der Verfahren angesiedelt ist. Überspitzt formuliert könnte es heißen: Ob ein Verfahren als zur Photogrammetrie zugehörig bezeichnet wird, hängt manchmal davon ab, wer mißt.

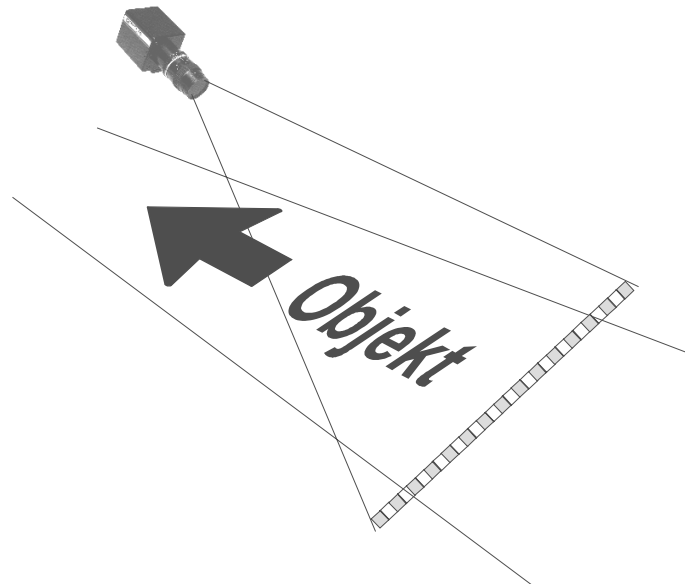


Abb.6: Zeilenaufnahme

3.1.2 Weitere Ordnungsbegriffe

Eine weitere Reihe von Kriterien kann zur genaueren Abgrenzung von Verfahren und Anwendungen herangezogen werden. Im folgenden sollen solche Begriffe näher diskutiert werden.

„**Online**“ bedeutet, daß ein kontinuierlicher Datenfluß von der Bildaufnahme bis zur Auswertung und Ergebnispräsentation aufgebaut wird. Wenn die Datenübermittlung interaktive Schritte erfordert, etwa die manuelle Entnahme von Bilddatenträgern aus der Kamera und Transport zum Auswerterechner, wird von „**Offline**“-System gesprochen. Daraus leitet sich ein wesentliches Merkmal für die Automatisierungsfähigkeit eines Systems ab. Dagegen bedeutet dieses Kriterium keine zeitliche Definition in irgendeiner Form, außer dem vagen Zusammenhang, daß ein „real-time“-System ab einer bestimmten Prozeßgeschwindigkeit sicherlich nur noch „online“ realisiert werden kann.

Der Begriff „**Echtzeit**“ oder „**Real-Time**“ wird in der Literatur sehr unterschiedlich definiert. So wird zum Beispiel die zeitliche Auflösungsfähigkeit des Auges von 15 Hz in [Jordan/Eggert/Kneissl, 1972] verwendet, wogegen in [Atkinson, 1996] die Bildrate von Standard-Video-Systemen (25 Hz CCIR bzw. 30 Hz EIA) als Grenze angegeben wird. Im Maschinenbau und in der Computertechnik existieren je nach Bereich noch andere Bezugsgeschwindigkeiten. Deshalb soll an dieser Stelle mit „Echtzeit“ nur eine relative Grenze gemeint sein, die prinzipiell nichts über die tatsächliche Arbeitsgeschwindigkeit eines Systems aussagt. Lediglich die Relation zwischen dem Zeittakt der Meßvorgänge und dem Objektwechseltakt wird hier definiert. Ein System, das in

„Real-Time“ arbeitet, kann damit schneller Meßergebnisse liefern, als die Anforderung, also z.B. der Produktionstakt, vorgibt. Ob die Zeitspanne dabei ein Tag oder eine Sekunde beträgt, soll hier nicht von Bedeutung sein.

Idealerweise als „***mobil***“ zu bezeichnen ist ein Aufnahmesystem, das auf einer frei beweglichen Kamera beruht, deren Aktionsradius weder durch Kabel noch durch irgendwelche Systemeigenschaften begrenzt wird. Auf der anderen Seite bedeutet „***stationär***“, daß es sich um ein System handelt, bei dem alle Komponenten ihren festen Standort haben und sowohl während als auch zwischen den Meßvorgängen nicht bewegt werden. Dieses Kriterium ist jedoch insofern nicht gut zur Abgrenzung eines Spezialgebietes geeignet, weil der Übergang zwischen mobilen und stationären Systemen fließend ist, und es damit schwierig wird, die trennende Grenze festzulegen.

Die Bezeichnungen „***Mikro***“ und „***Makro***“ werden aus der Photographie übernommen. Dort bedeutet „Makro“ laut Definition, daß die Abbildungen einen Maßstab größer oder gleich Eins besitzen. Im Sprachgebrauch werden jedoch auch hin und wieder schon Aufnahmeentfernungen unterhalb ungefähr eines Meters in diese Kategorie eingeordnet. Klarer abgegrenzt ist der „Mikro“-Bereich, der gekennzeichnet ist von der Verwendung eines Mikroskops für die Aufnahmen.

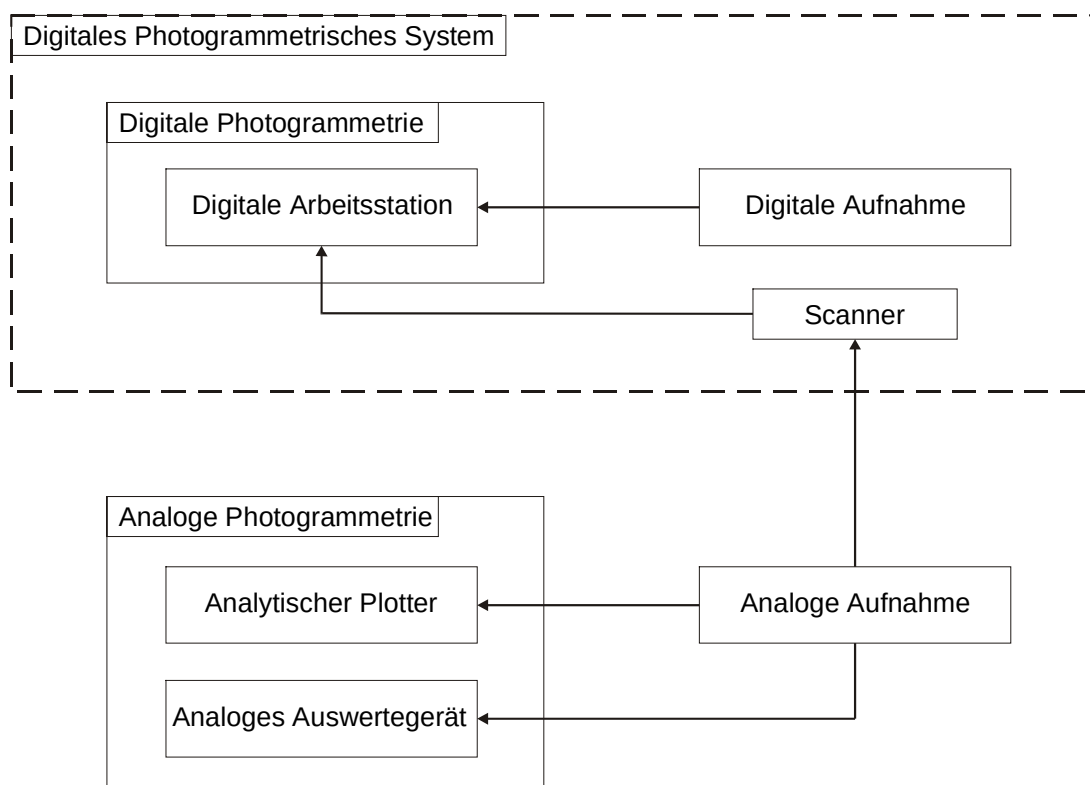


Abb.7: Digitales Photogrammetrisches System

Namengebend ist im Sprachgebrauch der Photogrammetrie der Bildinformationsträger. Als „***analog***“ bezeichnet wird die photographische Emulsion, als „***digital***“ jede zahlen-kodierte elektronische Aufzeichnungsweise. Dabei ist auch dann von „digitaler Photo-grammetrie“ die Rede, wenn analoge Bilder als primäre Datenträger nachträglich

digitalisiert und dann gemessen werden (siehe Abbildung 7). Dies ist z.B. beim Einsatz von Filmscannern, aber auch bei der Verwendung eines Videorekorders für die Aufzeichnung von CCD-Kameraaufnahmen der Fall. Damit greift dieses Kriterium streng genommen erst bei der Bildmessung. In der vorliegenden Arbeit soll jedoch als „digitales System“ nur jenes bezeichnet werden, welches als primären Bildträger ein digitales Aufzeichnungsverfahren besitzt und dessen Auswerteverfahren auf der digitalen Bildverarbeitung basiert. Analoge Komponenten der Bilddatenübertragung zwischen Sensor und Aufzeichnungsgerät werden dabei außer acht gelassen.

Systeme, die als Zwischenspeicherung der Bildinformationen analoge (chemische, elektronische, ...) Aufzeichnungsverfahren verwenden, bei denen jedoch Bildmessung und Auswertung digital erfolgen, sollen als „**digital-hybrid**“ bezeichnet werden.

Als „**analog-elektronische Systeme**“ sollen photogrammetrische Meßeinrichtungen bezeichnet werden, die zwar einen vollständig elektronischen Datenfluß realisieren, dabei aber keine digitalen Bilddaten verwenden. Als Beispiel seien die sogenannten Fadenkreuzgeneratoren genannt, die durch die elektronische Einblendung einer positionierbaren Meßmarke die geometrische Auswertung eines analogen Videobildes ermöglichen.

Im Gegenteil zu „**automatisch**“ wird ein System als „**interaktiv**“ bezeichnet, wenn es während des Meßbetriebs den Eingriff eines Operators erfordert. Je nach Automatisierungsgrad kann die Interaktion mehr oder weniger umfangreich sein.

Als „**vollautomatisch**“ soll ein System bezeichnet werden, das während des Meß- und Auswerteablaufs ohne jede Interaktion seitens eines Operators auskommt. Von dieser Forderung unberührt bleiben sollen die Arbeiten der Wartung, des Auf- und Umbaus sowie der Kalibrierung, auch wenn hier unter bestimmten Umständen eine Automation möglich ist.

3.1.3 Komponentenspezifische Begriffe

An dieser Stelle sollen Begriffe diskutiert werden, die Systemteile oder Gruppen betreffen. Dabei wird nur auf Bezeichnungen eingegangen, deren genaue Einordnung für die Belange der vorliegenden Arbeit wichtig erscheint.

Geräte

Unter dieser Obergruppierung sollen prinzipiell alle Hardware-Komponenten verstanden werden, die an einem photogrammetrischen Aufnahmesystem beteiligt sind. Es ist jedoch nicht notwendig bzw. sinnvoll, alle vorkommenden Bezeichnungen vollständig zu erwähnen. Wichtig ist an dieser Stelle die Unterscheidung von Grundtypen der Aufnahmesysteme:

Unter „**Standard-Video**“ versteht man Kamerasysteme, die das Bilddatenformat (Kodierung, Auflösung, Bildfrequenz) der aktuellen Fernsehnormen nutzen [z.B. Atkinson, 1996]. Dabei wird das von der Kamera gewonnene Bild auf analoge Weise per Kabel zum angeschlossenen Rechner übertragen und dort digitalisiert.



Abb.8: Standard-Video-Kamera [Sony, 1996]

„**High-Resolution-Video**“ wird für Kamerasysteme verwendet, die eine höhere Bildauflösung liefern, als es für normgerechte Fernsehqualität erforderlich ist [z.B. Atkinson, 1996]. Gelegentlich werden in Herstellerangaben auch Standardkameras als hochauflösend bezeichnet, obwohl deren nutzbare Bildqualität durch die Datenübertragungsmethode begrenzt wird.

Kamera	Typ	Anzahl Pixel
Sony XC-77CE	Standard-Video	752 × 582
Dalsa CA-D4	High-Resolution-Video	1024 × 1024
Sony XCH-1125	High-Resolution-Video (HDTV)	1920 × 1035
Kodak DCS 460	Still-Video	3060 × 2036
Rollei Q16	Still-Video	4096 × 4096

Tab.1: Beispiele für Kameratypen

Eine „**Digitale Kamera**“ besitzt eine im Gehäuse integrierte Bilddigitalisierung. Die Bilddaten werden in digitaler Form zum weiterverarbeitenden Rechner übertragen. Unter „**Computer-Kameras**“ versteht man vollständig integrierte Systeme, bei denen Bildaufnehmer, Digitalisiereinrichtung und Auswerterechner in einem Gehäuse untergebracht sind. Solche Einheiten können vorverarbeitete Bilder oder direkt Meßergebnisse liefern. Eine Kamera, die über DSP-Technik auf dem A/D-Wandler verfügt, wird jedoch nicht zwangsläufig in diese Kategorie eingeordnet. Mit „**Still-Video-Kameras**“ sind Geräte gemeint, die zwar nach dem gleichen Aufnahmeprinzip wie Video arbeiten, dabei aber nur Einzelbilder erzeugen und keine laufenden Sequenzen liefern können. Laut Atkinson [Atkinson, 1996] ist außerdem die interne Datenspeicherung eine klassifizierende Eigenschaft. Der Begriff „still video“ wird heute zunehmend durch den Ausdruck „digitale Kamera“ ersetzt. Entsprechend der Definition des Begriffes „online“ werden unter „**Online-Kameras**“ solche eingeordnet, die zum



Abb.9: Still-Video-Kamera [Kodak, 1996]

Betrieb die direkte Rechneranbindung erfordern. Namengebend für „**Offline-Kameras**“ ist die Fähigkeit einer Kamera, ohne Rechneranbindung Bilder aufnehmen und zwischenspeichern zu können. Dabei ist nicht von Bedeutung, ob eine solche Kamera zusätzlich online betrieben werden kann. Bei „**Scanning-Kameras**“ wird eine Auflösungssteigerung durch das Bewegen des Sensors im Kameragehäuse erreicht. Dabei wird der Sensor entweder im Bereich der Pixelgrößen verschoben (micro scanning) oder über eine seine Abmessungen um ein Vielfaches übersteigende Bildfläche bewegt (macro scanning). Die klassische Einteilung der photogrammetrischen Aufnahme-geräte in „**metrische**“, „**teilmetrische**“ und „**nicht-metrische**“ Kameras geht von der mechanischen Definition der Parameter der inneren Orientierung aus [z.B. Kraus, 1993]. Danach ist eine „metrische“ Kamera gegeben, wenn ihre innere Orientierung bekannt und stabil genug für eine photogrammetrische Auswertung ist. Damit wird implizit eine Genauigkeitsklasse gefordert, die nur für Standardanwendungen in der konventionellen analogen Photogrammetrie definiert ist. Die vergleichsweise enorme Variationsbreite der Aufgabenstellungen in der modernen Nahbereichsphotogrammetrie kennt keine Mindestgenauigkeit von Aufnahmesystemen. Die Eignung einer bestimmten Kamera muß immer in Zusammenhang mit der aktuellen Konfiguration geprüft werden. Deshalb soll dieses Schema der Kameraklassifizierung hier nicht weiter verwendet werden. Als „**Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen**“ werden Computersysteme bezeichnet, welche die (stereoskopische) Betrachtung, Bearbeitung und Messung von digitalen Bildern ermöglichen. Hierbei handelt es sich nicht zwangsläufig um spezielle Hardware. Viele photogrammetrische Aufgaben lassen sich mit den entsprechenden Programmen auf Standardrechnern durchführen, woraus sich der Begriff der „Softcopy“-Arbeitsstation entwickelt hat.



Abb.10: Scanning-Kamera [Leica, 1996]

Verfahren

Die heute in der Nahbereichsphotogrammetrie gebräuchlichen Verfahren werden im folgenden begrifflich geklärt.

Wenn Objektinformationen aus einem einzelnen Bild gewonnen werden, spricht man von „**Einzelbildauswertung**“. Dabei ist nicht von Bedeutung, ob das Objekt mit mehreren voneinander unabhängigen Bildern aufgenommen wurde. Mit „**Stereoauswertung**“ wird prinzipiell die klassische photogrammetrische Auswertemethode bezeichnet, bei der zwei Bilder so aufgenommen sein müssen, daß im Auswertegerät für den Operateur ein Stereomodell sichtbar wird, in dem er dreidimensional messen kann. Es gibt moderne automatische Auswerteverfahren, die ähnliche Bedingungen erfordern

und deshalb auch unter diesen Begriff fallen sollen. Die „**Einzelbildmessung**“ unterscheidet sich von der „**Stereomessung**“ lediglich durch die Charakteristik des reinen Meßvorganges. Die Einzelbildmessung ist selbstverständlich bei der Einzelauswertung gegeben. Sie ist jedoch außerdem als Meßmethode für die Mehrbildauswertung geeignet. Die Stereomessung erfordert immer ein geeignetes Bildpaar. Von „**Mehrbildauswertung**“ ist dann die Rede, wenn zwei oder mehr Bilder miteinander geometrisch verknüpft werden können. Dabei ist die Stereokonfiguration nicht zwangsläufig gefordert. Der Bildverband wird auch als „**Photogrammetrischer Block**“ bezeichnet. Ausgenommen davon sind Bildsequenzen, bei deren einzelnen Aufnahmen sowohl die Projektionszentren als auch die Aufnahmerichtungen identisch sind. Grundsätzlich ist für jeden Meßvorgang in einem Bild auch die Interpretation des Inhaltes erforderlich, nämlich um Meßziele zu identifizieren. Trotzdem soll von „**Bildinterpretation**“ nur dann die Rede sein, wenn die qualitative Deutung des Bildinhaltes die Hauptaufgabe ist.

Ergebnistypen

Im Gegensatz zu vielen anderen Meßverfahren kann die Photogrammetrie eine vergleichsweise breite Palette mit Ergebnistypen liefern. An dieser Stelle soll eine kurze begriffliche Einordnung gegeben werden.

Ein „**Orthophoto**“ ist gegeben, wenn es mit einer im Einzelfall festzulegenden Genauigkeit möglich ist, Maße des Objektes an beliebigen im Bild sichtbaren Stellen durch einen einfachen Bildkoordinatenvergleich zu ermitteln. Der zulässige Meßbereich im Objekt kann eingeschränkt werden, um nicht handhabbare Tiefenausdehnungen des Objektes auszuschließen. Dies hat durch eine grafische Maske im Bild zu geschehen. Größe und Auflösung werden sowohl für digital vorliegende als auch für Papierbilder in Form von Pixelanzahlen in X und Y und dem Bildmaßstab der entzerrten Objektebene angegeben. Die Zusammensetzung eines Orthobildes aus mehreren Teilphotos wird „**Orthophoto-Mosaik**“ genannt. Die äußere Form entspricht dem Orthophoto. Dreidimensionale kartesische Koordinaten mit den Komponenten X, Y und Z und einem Punktnamen für die eindeutige Zuordnung zu einer ausgezeichneten Objektstelle werden einzeln oder als beliebig lange Liste als „**Einzelpunktkoordinaten**“ bezeichnet. Sie können zusätzlich den individuellen oder mittleren Helmert'schen Punktfehler oder die Standardabweichungen der einzelnen Koordinatenkomponenten enthalten. Hierbei handelt es sich um den einfachsten Ergebnistyp. Von Interesse sind nur die Koordinaten eines klar definierten Objektpunktes innerhalb eines vorgegebenen Koordinatensystems. Es existieren im Rahmen der Meßaufgabe keine Abhängigkeiten von anderen Objektpunkten. Eine „**Strecke**“ wird als kürzeste räumliche Entfernung zwischen zwei koordinatenmäßig bekannten Objektpunkten definiert. Entsprechend werden Strecken aus Einzelkoordinaten durch Differenzbildung abgeleitet. Eine „**Fläche**“ wird durch mindestens drei nicht auf einer Raumgeraden liegenden Punkte definiert. Als Variable anzusehen ist die Unterscheidung, ob die Fläche der Objektform folgt oder frei im Raum definiert ist. Im ersteren Fall ist sie durch Strecken begrenzt, die - der Objektoberfläche folgend - die kürzeste Entfernung zwischen den Eckpunkten darstellen, im zweiten Fall durch die direkten räumlichen Punktverbindungsgeraden. Ebene Flächen können rechnerisch aus Einzelpunktkoordinaten abgeleitet werden. Gekrümmte Objektflächen erfordern entweder die Kenntnis der Krümmungsfunktion

oder eine ausreichend genaue Approximation durch Punktwolken oder Punktraster. Zusätzlich können geometrische Regelflächen wie Kreise, Rechtecke usw. verwendet werden, indem ihre Bestimmungselemente aus der entsprechenden Anzahl von Einzelpunktkoordinaten ermittelt werden. Die Definition eines „**Volumens**“ folgt der gleichen Unterscheidung wie die der Fläche nach der Anlehnung an die Objektform. Die Beschreibung eines unregelmäßigen Volumens ist ungleich aufwendiger als bei Flächen und soll daher inklusive aller notwendigen Größen als Variable gelten. Für Regelkörper gilt die gleiche Aussage wie bei Regelflächen. Als „**Punktwolke**“ wird eine Ansammlung von Objektkoordinaten bezeichnet, deren Verteilung auf der Objektoberfläche zufälligen Charakter hat, die also nicht ausgezeichneten bzw. reproduzierbaren Positionen zugeordnet sind. Eine explizite Bezeichnung, z.B. in Form einer Numerierung, ist nicht zwangsläufig erforderlich. Die typische Punktwolke stellt ein Stützpunktfeld für die Oberflächenmodellierung dar und besteht deshalb aus einer großen Anzahl Punkte. Dagegen wird z.B. bei einer Verknüpfungspunktsignalisierung mit ähnlichem Charakter üblicherweise nicht von einer Punktwolke gesprochen, womit die Anwendungsbezogenheit dieses Begriffes belegt ist. Ein „**Punktraster**“ unterscheidet sich von einer Punktwolke durch die Anordnung der Punkte in einem regelmäßigen Gitter mit bekanntem Punktabstand. Ein „**Profil**“ enthält Punkte auf der Schnittlinie einer definierten Ebene und des Objektes. Variablen sind die Anzahl der Punkte bzw. deren Abstand voneinander. Es muß klar definiert sein, ob sich der Abstand auf die räumliche oder die in eine Ebene projizierte Entfernung bezieht. Die Form der Datentypen „**Interpoliertes Punktraster**“ oder „**Interpoliertes Profil**“ entspricht der des originären Punktrasters oder Profiles. Es ist zusätzlich zu kennzeichnen, daß die endgültigen Koordinaten durch eine Interpolation zustande gekommen sind. Bei Datensätzen vom Typ Wolke oder Raster ist es möglich, Differenzen zu bilden und diese als „**Differenzwolke**“ oder „**Differenzraster**“ anzugeben. Auch hier entspricht die Form den Ausgangsdaten. Die erfolgten Rechenoperationen und ggf. verwendete Interpolationen müssen ausgewiesen sein. Eine traditionelle photogrammetrische Ausgabe ist die Isoliniendarstellung von Geländehöhen bzw. hier Objektiefen, namentlich die „**Höhenschichtlinien**“. Es handelt sich um eine zweidimensionale Darstellung der Projektion des Objektes in eine Ebene. Die tatsächlichen Abweichungen von Objektpunkten von dieser Ebene werden durch Linien gleicher Entfernung dargestellt. Sie werden entweder durch direkte Stützpunktmessung gewonnen oder aus einer Punktwolke oder einem Raster interpoliert. Das Entfernungsintervall ist als Variable anzusehen. Die rechnergestützte Repräsentation einer Objektoberfläche kann durch eine Stützpunktwolke gegeben sein. Zum „**Digitalen Oberflächenmodell**“ können außerdem noch ein regelmäßiges Raster und die Beschreibung von Unstetigkeiten (Bruchkanten) kommen. Unter dem Begriff „**CAD-Daten**“ sollen vektororientierte Datensätze verstanden werden, die in einer für ein CAD-System lesbaren Form vorliegen. Zusätzlich zu Punktkoordinaten können CAD-Daten Informationen wie Verbindungslinien, Flächendefinitionen und Objektklassifizierungen und -beschreibungen enthalten. Als „**Deformationsanalyse**“ wird eine Aufgabenstellung bezeichnet, bei der dasselbe Objekt mindestens zweimal aufgenommen und in bezug auf Veränderungen der Form untersucht wird. Welches Verfahren zur Ermittlung von Deformationen angewendet wird, ist damit nicht festgelegt. Im einfachsten Fall ist dies eine Differenzbildung. Die geometrische Beschreibung von Objekten kann außer durch diskrete Stützpunkte auch durch kontinuierliche mathematische Funktionen gegeben sein, nämlich durch sogenannte

„**Geometrieparameter**“. Der „**Soll-Ist-Vergleich**“ von Objektmessungen als „Ist-Werte“ und von außen vorgegebenen Zielgrößen als „Soll-Werte“ kann direkt vom Meßsystem vorgenommen werden. Als Ergebnis liegt dann keine Meßgröße, sondern eine Entscheidung vor, die z.B. in einer Teilefertigung als „**Prozeß-Feedback**“ auch automatisch in Form von Steuerungsinformationen an beteiligte Maschinen weitergegeben werden kann.

3.2 Abgrenzung des Spezialbereichs

Aufbauend auf den Ausführungen zur Terminologie wird hier für die ins Auge gefaßte Entwicklung eines Planungssystems das zu behandelnde Themengebiet „digitale Nahbereichsphotogrammetrie“ abgesteckt. Damit ist gewährleistet, daß das Arbeitsspektrum des Systems überschaubar bleibt und sich nicht in Verallgemeinerungen, die zur Einbeziehung aller Randgebiete erforderlich wären, verliert. Die Realisierung eines allgemeinen und allumfassenden photogrammetrischen Planungssystems ist schon deshalb nicht sinnvoll, weil sich die potentielle Anwenderschaft in praktisch nur wenig übergreifende Spezialbereiche aufteilt. Anders ausgedrückt würde jeder Nutzer immer nur einen kleinen Bereich des Gesamten verwenden. Ein weiterer Grund ist die in einigen Teilgebieten der Photogrammetrie fehlende Notwendigkeit für ein Planungssystem. Eine genaue Abgrenzung ist jedoch hauptsächlich deshalb erforderlich, weil die Komplexität der Materie im vorgegebenen Zeitrahmen sonst nicht zu bewältigen wäre.

Zunächst werden Satelliten- und Luftbildphotogrammetrie ausgeklammert. Diese Bereiche haben sehr eigenständige Aufgabenstellungen. Heraus fallen aus demselben Grund auch topographische und verwandte Anwendungen der terrestrischen Photogrammetrie. Das Planungssystem wird sich ausschließlich mit der oben definierten „klassischen Photogrammetrie“ auseinandersetzen. Spezialgebiete wie die Streifenprojektion, die Moiré- und Lichtschnittverfahren, die Behandlung von Zeilenkameraaufnahmen und ähnliches werden nicht abgedeckt. Im Vordergrund stehen soll die Bestimmung von metrischen Größen der Objekte. Damit entfallen bildhaft dokumentarische und interpretative Aufgabenstellungen.

In der Praxis der Industriephotogrammetrie deutet sich an, daß Aufnahmesysteme mit dem konventionellen photographisch-chemischen Bildaufzeichnungsverfahren in naher Zukunft fast vollständig verschwinden werden. Diese Tatsache ist auf Nachteile bei der Geschwindigkeit, der Handhabung und der Automatisierungsfähigkeit zurückzuführen. Deshalb sollen hier nur die oben beschriebenen vollständig digitalen Systeme behandelt werden.

3.3 Die digitale Nahbereichsphotogrammetrie

Die folgende Zusammenstellung soll eine Übersicht über die in der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie häufig verwendeten Techniken und Geräte geben. Sie verdeutlicht dabei außerdem die Komplexität dieses Spezialgebietes.

3.3.1 Geräte

Unter der Gruppe „Geräte“ werden alle Hardwarekomponenten zusammengefaßt. Sie soll unterteilt werden in:

- Kameras
- Optik
- Analog-Digital-Bilddatenwandlung
- Rechner
- Objektbeleuchtung
- Zielpunktsignalisierung

Kameras

Fast alle eingesetzten Kameras verwenden einen CCD-Sensor als Bildaufnehmer. X/Y-adressierte CID- oder CMOS-Sensoren werden in Zukunft jedoch einen größeren Raum einnehmen. Die Auflösung zur Zeit verfügbarer CCD-Chips liegt zwischen 16000 und 16 Mio. Pixel, die nächstgrößere Generation ist jedoch schon in Sicht (*Philips*: ca. 9000 * 7000 Pixel). Niedrige Auflösungen werden entweder aus Kostengründen oder wegen ihrer höheren Lichtempfindlichkeit und ggf. ihrer schnelleren Bildfolge verwendet.

Kameras sind in mehreren Bauformen mit unterschiedlichen Grundeigenschaften erhältlich. Ein wesentliches Kriterium ist der Online- bzw. Offline-Betrieb. Offline-Kameras bestehen zur Zeit bis auf wenige Ausnahmen aus Gehäusen, die auch in der konventionellen Photographie verwendet werden. Namhafte Hersteller sind z.B. *CANON* und *NIKON* mit einem *KODAK*-Chip oder *ROLLEI* mit einem CCD von *LORAL FAIRCHILD*. Diese Kameras tragen – wie oben schon beschrieben – auch die Bezeichnung „still-video“, werden aber im Umgangssprachegebrauch zunehmend einfach als „digitale Kameras“ bezeichnet. Bei den Online-Kameras wird im Prinzip nach der Art und Weise der Bilddatenübertragung zum Rechner unterschieden. Standardkameras genügen dabei den gängigen Fernsehnormen, während echte hochauflösende Kameras zwar grundsätzlich das gleiche Übertragungsverfahren nutzen können, dabei jedoch andere Parameterwerte verwenden. Auch in dieser Kameragruppe gibt es die Bezeichnung „digitale Kamera“. Namensgebend ist hier die digitale Bilddatenübermittlung an den Steuercomputer, die Analog-Digital-Wandlung ist in das Kameragehäuse integriert. Diese Signalübertragung hat den Vorteil, daß sie aufgrund von redundanten, fehlererkennenden Verfahren nahezu ohne Ausfall und frei von geometrischen Bildfehlern ist. Der Nachteil ist eine geringere Bandbreite und damit eine geringere Übertragungsgeschwindigkeit. Bekannte Hersteller von Online-Kameras sind z.B. *SONY*, *DALSA*, *PHILIPS*, *HITACHI*, *JAI* und *PULNIX*.

Eine weitere separat zu behandelnde Gerätegruppe ist die der sogenannten Scanning-Kameras. Sie erreichen eine faktische Auflösungssteigerung durch die Bewegung des CCD-Sensors im Bildraum. Beim Mikro-Scanning erreicht man dies durch piezo-angetriebene Bewegungen im Subpixelbereich, bei denen man die Freiräume zwischen den einzelnen lichtempfindlichen Flächen auf dem CCD-Chip zusätzlich abscannt. Beim Makro-Scanning sind die Abmessungen des Sensors wesentlich kleiner als die verwendbare Bildfläche, welche dann durch entsprechendes Positionieren des Chips

z.B. mit Hilfe von Linearantrieben abgescannt wird. Der Vorteil der sehr großen Pixelanzahlen des resultierenden digitalen Bildes wird erkauft mit einer sehr geringen Arbeitsgeschwindigkeit, die zur Folge hat, daß bewegte Objekte nicht verzerrungsfrei abgebildet werden können. Hersteller solcher Kameras sind z.B. *RHEINMETALL-JENOPTIK*, *PRAKTIKA*, *ZEISS* und *ROLLEI*. Die Bedeutung dieser Kameragruppe ist nicht sehr groß und wird durch die aktuell stattfindende Entwicklung der hochauflösenden CCD-Chips noch verringert.

Eine relativ neue Gattung stellen die sogenannten Computerkameras dar. In einem Gehäuse werden Sensor, A/D-Wandlung, Steuer- und Auswerterechner und teilweise sogar Massenspeicher untergebracht. Das bedeutet, daß sowohl Bildaufnahme, Digitalisierung, Bildvorverarbeitung und Bildmessung direkt vor Ort durchgeführt werden können. Die Vorteile dieser Integration sind der Wegfall der aufwendigen und teilweise fehleranfälligen Bilddatenübertragung, die Kompaktheit der Geräte und die Parallelisierung und damit Beschleunigung der Bildmessungen bei der Verwendung von mehreren Kameras. Als Nachteil sind die hohen Kosten zu sehen, wenn viele Kameras zum Einsatz kommen müssen. Geräte dieser Art sind erhältlich bei *DBS* oder *KODAK*.

Verfügbare Ausstattungsmerkmale von Kameras sind z.B. die elektronischen Verschlüsse (shutter) mit Verschlusszeiten von 1/100.000 s und kürzer, die radiometrische Anpassung mit Hilfe der elektronischen Empfindlichkeitseinstellung (AGC = Automatic Gain Control) und der Gradationskurvenveränderung (Gamma-Adjust), die externe Triggerung von Ereignissen und die Bereitstellung der internen Synchronisationsfrequenz für eine genauere Bilddigitalisierung (Pixel-Clock oder auch Strobe-Signal).

Die Farbfähigkeit von Aufnahmesystemen ist für die Photogrammetrie von untergeordneter Bedeutung. Je nach verwendeter Technik und Fertigungspräzision kann eine Farbkamera bei gleicher Grundauflösung eine geringere geometrische Genauigkeit aufweisen als ein Schwarz-Weiß-Gerät. Besonders bei der Ein-Chip-Technik, bei der die Farbzusammenordnung verschiedener Pixel mit Hilfe von Farbmusterfiltern realisiert wird, ist die Definition abgebildeter Objektkanten nicht mehr eindeutig. Die Drei-Chip-Technik verwendet ein Prismensystem zur Aufteilung der Farbinformation in die drei Grundfarben Rot-Grün-Blau und für jeden dieser Kanäle einen eigenen Sensor. Die geometrisch kritische Problemstelle hierbei ist die Justierung der drei Chips zueinander.

Optik

Die Variationsbreite der für digitale Kameras eingesetzten Objektive ist sehr groß. Bei den Offline-Kameras (Still-Video-Kameras), die auf den Gehäusen für die konventionelle Photographie basieren, werden die entsprechend dafür entwickelten Objektivserien ohne weitere Anpassung verwendet. Online-Kameras greifen meistens auf den speziell für den Videobereich entwickelten „C/CS-Mount“ - Anschlußtyp zurück. Besondere Anforderungen, die durch den Einsatz mit CCD-Kameras entstehen, sind z.B. die in einigen Anwendungen erforderliche Kompaktheit der Abmessungen, die Fernsteuerbarkeit der Bedienelemente und die Korrektur der Fokusdifferenz im Infrarotbereich aufgrund der erweiterten Empfindlichkeit von CCD-Sensoren gegenüber dem menschlichen Auge bzw. der in der konventionellen Photographie verwendeten lichtempfindlichen Emulsionen. Die funktionelle Ausstattung reicht vom

festbrennweitigen Fixfokus-Objektiv ohne Blendenverstellung bis zum Zoom-Objektiv, bei dem die Irisblende, die Brennweitenveränderung und der Fokus rechnergesteuert sind. Telezentrische Objektive, die für zweidimensionale Inspektionsaufgaben inzwischen weit verbreitet sind, finden wegen ihrer von der Zentralperspektive abweichenden Bildgeometrie in der klassischen Photogrammetrie keine Verwendung.

Analog-Digital-Bilddatenwandlung (FrameGrabber)

Die Digitalisierung der als analoge Spannungszustände vorliegenden Bilddaten erfolgt mit den sogenannten FrameGrabbern. Diese können direkt in eine Kamera eingebaut, als Stand-Alone-Geräte betrieben oder als Steckkarte für einen Computer konzipiert sein. Erstere sind auf die Anforderungen der jeweiligen Kamera genau optimiert und deshalb von außen normalerweise nicht beeinflussbar. Die anderen beiden Typen sind in bezug auf die Anschlußmöglichkeit von unterschiedlichen Kameras flexibel und bieten daher je nach individueller Ausstattung die Programmierung einer Reihe veränderlicher Parameter. Dazu gehören die Abtastfrequenz, die Niveau- und Bereichsanpassung der Eingangsspannung („gain“ und „offset“), die Auswertung unterschiedlicher Synchronisationsarten, Eingangssignalfilter, Grauwerttabellenoperationen („Lookup-Tables“) und Trigger-Funktionen. In einigen Fällen sind Datenbanken verfügbar, die aus Parametersätzen für viele Kameras von führenden Herstellern bestehen. Für die visuelle Kontrolle der Bilddaten gibt es eigene Monitor-Anschlußmöglichkeiten oder die Bild-in-Bild-Technik, welche die Darstellung des Kamerabildes auf dem Monitor des Steuercomputers erlaubt. Die Zwischenspeicherung der Bilddaten erfolgt bei konventionellen Geräten in einem eigenen RAM-Speicher, der je nach Schwarz-Weiß- oder Farbdarstellung über eine unterschiedliche Anzahl Bits pro Pixel verfügt. Es gibt kaskadierbare FrameGrabber, die jeweils für sich nur einfarbig arbeiten, die aber in einer Kombination von drei Geräten in einem Rechner die Repräsentation je eines RGB-Farbkanals übernehmen können und damit als Gesamtsystem echtfarbfähig sind. Im lokalen Speicher lassen sich teilweise schon Bildverarbeitungsfunktionen ausführen, so daß eine Übertragung der Bilddaten in den Hauptspeicher des Computers nicht immer notwendig ist. Letztere wird bei den Steckkartentypen über das BUS-System des Rechners realisiert. Moderne PC's verfügen mit dem PCI-BUS über Datenraten im Bereich von 100 Mbyte pro Sekunde, womit die Weitergabe von Standard-Video in den Hauptspeicher in Real-Time (hier: 25 Bilder/s) realisiert werden kann. Aus diesem Grund kommen einige neuere FrameGrabber ohne eigenen Speicher aus.

Eine aktuelle Entwicklung auf dem Sektor der FrameGrabber ist die Verwendung von DSP's („Digital Signal Processor“) zur Durchführung von Bildverarbeitungsoperationen direkt während der Digitalisierung. Auf diese Weise lassen sich Auswertungen im günstigsten Fall vollständig vornehmen oder aber erheblich beschleunigen.

Rechner

Die minimalen Anforderungen an einen Steuer- und Auswertecomputer sind sehr niedrig, wenn nicht bestimmte Geschwindigkeiten eingehalten werden müssen. Ein aktuell am Markt erhältlicher Personalcomputer der untersten Leistungsklasse ist bereits in der Lage, Video-Bildaufnahme und -Vermessung durchzuführen. Die große Variationsbreite der Ausstattung, die inzwischen guten Rechengeschwindigkeiten und

die konsequente Kompatibilität innerhalb der Geräteklasse der aus den sogenannten „IBM-Kompatiblen“ hervorgegangenen *INTEL*-basierten PC's sowie die vergleichsweise geringen Kosten haben dazu geführt, daß dieser Rechnertyp in der Industrie die weiteste Verbreitung gefunden hat. Die technische Ausstattung solcher Geräte ist für die weitaus meisten Anwendungen in der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie kein limitierender Faktor. Die einzige Grenze ist bei der Rechengeschwindigkeit zu finden, wenn besondere Anforderungen gestellt werden. Alternativen zur Klasse der *INTEL*-PC's sind gegeben mit den als „Workstations“ bezeichneten Computern höherer Leistungsklasse, wie sie beispielsweise von Firmen wie DEC, HP, SUN oder SGI angeboten werden. Vorteile dieser Systeme für den Einsatz als Meßrechner sind hauptsächlich in der Rechengeschwindigkeit von Haupt- und Graphikprozessor zu suchen. Die Flexibilität und die Verfügbarkeit von Erweiterungskomponenten sind dagegen eingeschränkt und die Kosten deutlich höher als bei den *INTEL*-PC's. Wenn die Geschwindigkeitsanforderungen mit PC's oder Workstations nicht erfüllt werden können, stehen spezielle Stand-Alone-Bildverarbeitungsrechner zur Verfügung, die ihrerseits wieder eine Schnittstelle zu Standardcomputern besitzen, von denen sie programmiert und gesteuert werden. Mit Hilfe von Spezialprozessoren mit hohen Taktfrequenzen, Pipeline-Technik und Parallelisierung erreichen solche Systeme sehr hohe Datendurchsätze. Entsprechend hoch sind Kosten und Aufwand für den Einsatz.

Objektbeleuchtung und Zielpunktsignalisierung

Unter anderem ist von der Art der Signalisierung abhängig, welche Beleuchtungstechnik verwendet wird. Bei ausschließlicher Verwendung natürlicher Punkte entspricht die Anforderung an die Beleuchtung photographischen Gesichtspunkten. Wenn Signale mit kontraststarker Reflexion verwendet werden, kann die Intensität des Lichtes erheblich verringert werden. Im Extremfall („Retrotargets“) sind auf den Bildern nur noch die Signale auf dem Objekt zu erkennen und nicht mehr das Objekt selbst. Wird die Signalisierung durch die Projektion von Mustern auf das Objekt realisiert, darf nicht zusätzlich beleuchtet und der Einfluß von Umgebungslicht muß vermieden werden.

Für den Einsatz von Online-Kameras mit laufenden Kontrollbildern ist kontinuierliches Licht erforderlich, wohingegen bei Still-Video-Kameras die Blitzbeleuchtung oft bevorzugt wird. Sie hat den Vorteil des geringen Energiebedarfs und einer vernachlässigbaren Wärmeentwicklung. Mit Hilfe von um das Kameraobjektiv angeordneten Ringblitzen können vollständig schattenfreie Aufnahmen erreicht werden.

3.3.2 Techniken und Verfahren

Die möglichen Arbeitsweisen in der Nahbereichsphotogrammetrie und die zugehörigen Problemstellungen sollen hier kurz erläutert werden. Es tauchen dabei die folgenden Begriffe auf:

- Konfigurationen
- Bildkoordinatenmeßmethoden
- Punktidentifikation
- Punktzuordnung
- Orientierungsverfahren

- Kalibrierung

Konfigurationen

Außer der Zwei-Kamera-Konfiguration, die nicht zwangsläufig die Stereobedingungen erfüllt und nur deshalb häufig ist, weil sie die Minimallösung für die Ermittlung von dreidimensionalen Koordinaten darstellt, lassen sich keine bestimmten Konfigurationstypen hervorheben. Allerdings sind systematische Tendenzen in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Kamerasystemen erkennbar. Mit mobilen Offline-Kameras werden erheblich mehr Aufnahmen und damit eine größere Redundanz verwendet, als dies bei Online-Systemen der Fall ist, wo jede Aufnahme normalerweise eine eigene Kamera erfordert und damit vergleichsweise hohe Kosten verursacht. Je anspruchsvoller die Kameratechnik wird, weil z.B. die Geschwindigkeitsanforderungen hoch sind, desto geringer wird aus Kostengründen die Anzahl der verwendeten Aufnahmen.

Bildkoordinatenmeßmethoden

Die sicherste, allerdings auch die ungenaueste Methode ist die manuelle Messung am Bildschirm. Bei guten Zielen und der Möglichkeit der vergrößerten Bildbetrachtung (Zoom) ist eine Meßgenauigkeit von etwa 0,1 - 0,05 Pixel realistisch. Häufig werden teilautomatische Verfahren verwendet, bei denen die Punktidentifikation vom Operateur in Form einer Angabe eines Näherungswertes vorgenommen wird und die genaue Ermittlung der Lage des Zieles durch Bildverarbeitungsfunktionen des Meßprogrammes erfolgt. Dabei verwendete Operatoren sind z.B. die Ellipsenausgleichung, die Schwerpunktbildung oder die Korrelation mit Mustermatrizen. Unter optimalen Umständen lassen sich Meßgenauigkeiten von etwa 0,02 Pixel erreichen.

Punktidentifikation

Diese geschieht in den meisten Anwendungsfällen nach wie vor durch einen Operateur. Je nach Situation sind vereinzelt automatische Erkennungsverfahren im Einsatz. Dazu gehört z.B. die bereits erwähnte Korrelation mit Mustermatrizen. Einfache Schwellwertverfahren sind verwendbar, wenn die Meßziele einen sich vom Objekt abhebenden Helligkeitswert besitzen. Dies ist beispielsweise bei Retrotargets gegeben. Kombinierte Methoden mit mehreren, im einzelnen nicht hinreichenden Operatoren werden ebenfalls eingesetzt.

Punktzuordnung

Das Problem der Erkennung homologer Punkte und deren korrekte Zuordnung zum Objekt stellen allgemein in der Photogrammetrie einen zeitintensiven Faktor dar. Üblicherweise wird dieser Arbeitsschritt vom Operateur durchgeführt. Automatisiert werden kann er unter bestimmten Umständen durch die Kodierung der signalisierten Punkte, durch die Ausnutzung von Kernstrahleninformationen oder durch die Optimierung von Koordinatentransformationen. In stationären Systemen kann die Schwierigkeit umgangen werden, indem man Näherungswerte zur Verfügung stellt.

Orientierungsverfahren

Die Orientierung der Kameras erfolgt überwiegend durch Bildkoordinatenmessungen und anschließendem räumlichen Rückwärtsschnitt mit Hilfe der bekannten Kollinearitätsgleichungen. Dabei wird eine bessere Genauigkeit und Fehlerkontrolle

durch den Einsatz der Bündelblockausgleichung erzielt, wenn die verwendete Konfiguration eine ausreichende Redundanz der Beobachtungen aufweist. Die Referenzinformationen werden mit Hilfe von Paßpunkten, Prüfkörpern oder geodätischen Meßelementen zur Verfügung gestellt. Vereinzelt wird auch die DLT (Direkte Lineare Transformation) angewandt, die den Vorteil der nicht notwendigen Kenntnis der inneren Orientierung der Kamera mit einer höheren Anzahl erforderlicher Paßpunkte erkaufte. Orientierungsverfahren, die nicht auf der Bildinformation der photogrammetrischen Aufnahmen basieren, werden z.B. durch die modernen Video-Theodolitsysteme repräsentiert, die vom Prinzip her den altbekannten Phototheodoliten entsprechen. Die direkte Einmessung einer Kamera mit unabhängigen Einrichtungen stößt dagegen wegen der hohen geforderten Winkelgenauigkeit auf Schwierigkeiten.

Kalibrierung

Zunächst muß unterschieden werden zwischen Geräte- und Systemkalibrierung. Letztere beinhaltet unter bestimmten Umständen auch die Kameraorientierungen. Die aufwendigen Testverfahren, die bei der Herstellungskontrolle der verschiedenen Gerätekomponenten zum Einsatz kommen, stehen dem Entwickler photogrammetrischer Systeme nur selten und dem Anwender faktisch nie zur Verfügung. In der Praxis hat sich deshalb die sogenannte Feldkalibrierung durchgesetzt, die die Behandlung aller systematischen Effekte des Gesamtsystems erlaubt, diese jedoch nicht immer voneinander trennen kann. Sie verwendet hauptsächlich Bildinformationen und basiert auf der Ausgleichung redundanter Aufnahmekonfigurationen, in die zusätzliche Kalibrierungsparameter eingeführt werden. Je nach Situation kann sie in Form einer Simultankalibrierung während des normalen Meßbetriebes erfolgen.

3.3.3 Nutzerkreis und Anwendungen

Die meisten Anwendungen der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie liegen im industriellen Bereich. Schwerpunkte sind erstens Forschung und Entwicklung und zweitens die Fertigungskontrolle. Damit ist der Nutzerkreis dieser Meßtechnik zur Zeit weitgehend auf große Industrieunternehmen beschränkt. Weitere Begriffe sind:

- Konkurrenzsituation
- Potential
- Entwicklungstendenzen
- Standardisierung und Normung

Konkurrenzsituation

Direkte Konkurrenz zur klassischen Photogrammetrie in den überwiegenden Industrieanwendungen sind die bereits genannten Verfahren wie die Streifenprojektion, die Moiré-Technik, die Zeilenkameraaufnahme und die Lichtschnittverfahren. Je nach Aufgabenstellung treten außerdem Theodolitsysteme, Laserinterferometer, Laserscanner und Koordinatenmeßmaschinen in Erscheinung. Die Leistungsdaten photogrammetrischer Systeme sind bei einem Großteil der Aufgabenstellungen konkurrenzfähig und in vielen Fällen sogar weit überlegen. Trotzdem gibt es Akzeptanzprobleme, die einerseits mit der Komplexität der Materie zu begründen sind

und die andererseits dadurch entstehen, daß das Fach Photogrammetrie nicht im Maschinenbau, sondern im geodätischen Vermessungswesen angesiedelt ist und damit grundsätzlich Informationsdefizite bei den in Frage kommenden Anwendern bestehen.

Potential

Auf dem Feld der industriellen Qualitätskontrolle kann der Zuwachs der Anwendungen der photogrammetrischen Verfahren in Zukunft sehr groß sein, denn diese besitzen alle dafür erforderlichen technischen Eigenschaften. Die Realisierung dieses Ziels basiert im wesentlichen darauf, daß die allgemeine Akzeptanz bei den aus anderen technischen Bereichen als dem Vermessungswesen stammenden Entscheidungsträgern erhöht wird. Zu diesem Zweck ist erstens Öffentlichkeitsarbeit erforderlich, und zweitens muß die Komplexität der Materie in übersichtliche Kanäle gelenkt werden. Die Standardisierung von Terminologie und Qualitätskriterien, wie sie vom Verein Deutscher Ingenieure (VDI) und von der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF) betrieben wird, ist ein wichtiger Schritt in diese Richtung, und die Tatsache, daß solche Einrichtungen sich mit dieser Problematik verstärkt befassen, deutet auf ein gestiegenes Interesse an diesem Gebiet hin.

Entwicklungstendenzen

Die Weiterentwicklung photogrammetrischer Systeme im Industriebereich teilt sich in zwei grundsätzliche Richtungen. Auf der einen Seite stehen Speziallösungen mit genau optimierten und teilweise sehr komplexen Konfigurationen, auf der anderen versucht man mit möglichst hochwertigen Geräten eine große Flexibilität bei einfachen Aufnahmeanordnungen zu erreichen. Beide Bereiche haben ihre Daseinsberechtigung, denn einerseits gibt es immer sehr individuelle Anwendungen, die nicht mit einem Standard-system lösbar sind, und andererseits ist an vielen Stellen eine flexible Aufnahmeausrüstung die kostengünstigere Lösung.

Auf der gerätetechnischen Seite ist in naher Zukunft, wie auch nach wie vor generell auf dem Computermarkt, mit höheren Verarbeitungs- und Übertragungsgeschwindigkeiten der Daten bei fallenden Preisen zu rechnen. Die bereits verfügbaren hochauflösenden Sensoren werden in absehbarer Zeit zu wesentlich geringeren Kosten verfügbar sein. Die DSP-Technik wird einen größeren Raum einnehmen als bisher. Mit der Einführung des HDTV wird eine Umstellung der Standard-Video-Technik auch im Industriebereich stattfinden.

3.3.4 Standardisierung und Normung

Man hat zu unterscheiden zwischen der Standardisierung im industriellen Gerätebau und der in der photogrammetrischen Verfahrenstechnik. Während die erstgenannte in Form von Normen und Richtlinien der DIN, ISO, VDI, EIA, CCIR, usw. sehr umfassend bei der Herstellung von Geräten – auch denen, die in der Photogrammetrie zum Einsatz kommen – verwendet wird, steckt die letztgenannte – zumindest für Nahbereichsanwendungen – noch in den Kinderschuhen. Die vorhandene, im Normenausschuß Bauwesen angesiedelte DIN 18716 „Photogrammetrie und Fernerkundung“ beschäftigt sich mit allgemeinen Grundlagen, die größtenteils auch im Nahbereich gültig sind, geht jedoch auf diesen nicht sehr detailliert ein. Ein

erfolgversprechender Vorstoß besteht in der Aktivität des Arbeitskreises „Ingenieurphotogrammetrie“ der DGPF in Zusammenarbeit mit dem Fachausschuß „Koordinatenmeßtechnik“ im VDI. Der zu diesem Zweck neugebildete Fachunterausschuß heißt „Optische 3D-Koordinatenerfassung“ und hat zum Ziel, für photogrammetrische Verfahren im Nahbereich Richtlinien nach dem bekannten Schema des VDI zu entwickeln.

4 Grundlagen der Planung photogrammetrischer

Aufnahmesysteme

Um die Situation bei der Planung von Aufnahmesystemen zu beschreiben, sollen die folgenden Fragen diskutiert werden:

- Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein ?
- Welche Systemparameter gibt es und wie sind sie funktional voneinander abhängig?
- Wie kommt es zu einer Grundkonfiguration und wie kann diese optimiert werden?
- Welche Probleme ergeben sich aus dem Planungsablauf und wie kann ein rechnergestütztes Planungssystem Abhilfe schaffen ?

4.1 Voraussetzungen für eine Planung

Eine Voraussetzung für die Planung ist die Zusammenstellung aller Informationen über Objekte, gewünschte Art der Ergebnisse, erforderliche Genauigkeiten und zusätzliche Randbedingungen. Die Gewinnung dieser Daten ist an dieser Stelle nicht relevant und soll daher als bereits erfolgt angesehen werden. Außerdem müssen selbstverständlich die Leistungsdaten aller in Betracht kommenden Arbeitsmittel zur Verfügung stehen.

4.2 Systemparameter und ihre funktionalen Zusammenhänge

Systemparameter sind Größen, deren Inhalte den Zustand eines Systems beschreiben. Sie können unterschiedliche Detailtiefen aufweisen. So zum Beispiel ist der „Bildwinkel“ eines verwendeten Objektivs ein für die Planung der Anordnungsgeometrie ausreichender Parameter. Wenn jedoch die Gerätekonfiguration variiert wird, ist es unter Umständen notwendig, ihn in die Komponenten „Sensorgröße“ und „Kammerkonstante“ zu unterteilen. Um das Beispiel weiterzuführen, kann bei Bedarf die „Sensorgröße“ tiefer aufgegliedert werden in „horizontal“ und „vertikal“. Rein hypothetisch könnte an dieser Stelle sogar die Beschreibung eines nicht rechteckigen Sensors erfolgen, woran gleichzeitig zu erkennen ist, daß die tatsächlich verwendete Detailtiefe einerseits eine sinnvolle Begrenzung erfahren muß und andererseits je nach Aufgabenstellung flexibel sein darf. Eine weitere Konsequenz ist die alternative Verwendung von Systemparametern auf der einen Seite als Basisinformation und auf der anderen als Zielgröße einer Verkettung von Einflußgrößen.

Die folgenden Begriffe charakterisieren die wesentlichen Parametergruppen bei einer Planung:

- a) Anordnungsgeometrie
- b) Gerätekonfiguration

- c) Auswerteverfahren
- d) Randbedingungen
- e) Handhabung

Diese Bereiche können wegen ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten planerisch nicht getrennt betrachtet werden. Ihre wichtigsten Eigenschaften sollen hier kurz beschrieben werden (Vollständigkeit würde dabei den Rahmen sprengen). Sie finden sich im Planungssystem als funktionale Zusammenhänge wieder.

4.2.1 Anordnungsgeometrie

Die Beschreibung der Anordnungsgeometrie geschieht im wesentlichen durch die **Bildorientierungen** (X,Y,Z, Φ , Ω , K) und den bzw. die **Bildwinkel**. Darin enthalten sind Größen wie **Aufnahmeentfernungen** und **Abbildungsmaßstäbe**, effektive **Basislängen** und damit die resultierenden **Strahlenschnittbedingungen**, die entscheidenden Einfluß auf die Genauigkeitsverhältnisse bei der dreidimensionalen Koordinatenbestimmung besitzen. Die für eine Einschätzung der Stabilität und Zuverlässigkeit wichtigen statistischen Werte wie die Anzahl der **Bilder pro Zielpunkt** und **Meßpunkte pro Bild** können hieraus abgeleitet werden. Die **Objektgröße** ist ebenfalls ein Parameter mit elementarer Bedeutung. Zusammen mit der geforderten **Meßgenauigkeit** skaliert er die obengenannte Anordnung der Meßbilder. Dabei ist zu differenzieren zwischen dem Objekt als Gegenstand an sich und dem zu vermessenden Bereich des Objektes. Letzterer ist primär planungsrelevant, jedoch muß gegebenenfalls mit störenden Effekten des übrigen Objektes gerechnet werden. Bei komplexen Gegenständen ist unter Umständen auch die besondere geometrische **Objektform** zu berücksichtigen. Häufig ist für die Planung der zur Verfügung stehende **Umgebungsraum** des Objektes einschließlich eventuell vorhandener und die Sichten störender Einrichtungen und Gegenstände wichtig, weil dies einschränkend auf die nutzbaren Aufnahmeorte wirken kann. Weitere geometrische Elemente sind gegeben mit der Position von **Paßinformationen** und der Anbringung von **Zielsignalen** für die Verknüpfung der Bilder. Die Eigenschaften eventuell künstlicher **Beleuchtung** sind zu berücksichtigen. In ungünstigen Fällen, zum Beispiel bei der Vermessung spiegelnder Oberflächen, muß hier mit ähnlichen Parametern wie für die Bilder gearbeitet werden (**Lampenposition**, **Leuchtwinkel**, **Lichtstärke**, ...).

4.2.2 Gerätekonfiguration

Die Auswahl der Geräte für eine bestimmte Meßaufgabe hat häufig enge organisatorische Grenzen. Gründe dafür sind unter anderen der Zwang der Verwendung vorhandener Ausrüstung, zu hohe Kosten oder zu großer Einführungsaufwand für neue oder zusätzliche Systeme, fehlende Auswertemöglichkeiten für bestimmte Bildtypen und fehlende Informationen über geeignete Alternativen. Trotzdem soll hier davon ausgegangen werden, daß a priori die gesamte Palette vorhandener Geräte prinzipiell zur Verfügung steht.

Als Kern einer Konfiguration können die verwendeten Kameras und Objektive angesehen werden. Die Parametrisierung enthält die wesentlichen Größen **Kammerkonstante**, **Sensorgröße** und **Sensorauflösung**. Die übrigen Parameter der inneren

Orientierung (**Verzeichnung**, **Hauptpunktlage**, ...) sind planungstechnisch nur sekundär relevant, nämlich wenn eine sehr genaue Einschätzung der zu erwartenden Genauigkeiten erforderlich ist, weil zum Beispiel eine verwendete Komponente an der Grenze ihrer diesbezüglichen Leistungsfähigkeit betrieben werden soll. Ebenfalls seltener von Bedeutung sind weitere optische und mechanische Eigenschaften wie die **kürzeste einstellbare Aufnahmeentfernung** oder die **Abmessungen** und das **Gewicht** der Aufnahmeeinheiten. Weitere funktionale Gruppen bilden die radiometrischen Eigenschaften wie die **Sensorempfindlichkeit**, die **Objektivlichtstärke** und die **Lichtleistung** der verwendeten Lampen oder Blitze als auch Zeitfaktoren wie die maximale **Bildfolgezeit**, die **Bildintegrationszeit** und auch gegebenenfalls die **Rechengeschwindigkeit** des verwendeten Computers.

Entscheidend für die Funktionsfähigkeit eines Systems ist die **Kompatibilität** der eingesetzten Geräte zueinander. In der klassischen Photogrammetrie trat an dieser Stelle kein Problem auf, weil, wie weiter oben schon erwähnt, nur spezialisierte und in sich geschlossene Aufnahmeeinheiten verwendet wurden, deren Ergebnisse zudem auf die vorhandenen Auswertegeräte abgestimmt waren. Dagegen existieren beispielsweise in einem Standard-Video-System Schnittstellen, an denen die Konfiguration variiert werden kann. Dazu gehören im wesentlichen der **Objektivanschluß**, der **Bilddatenanschluß** der Kamera und das **Rechnerinterface**.

Art und Abfolge der zu vermessenden Objekte bestimmen, ob ein System **mobil** oder **stationär** arbeiten soll. Folgen dieser Entscheidung sind zum Beispiel der Typ der Bilddatenübertragung bzw. der Zwischenspeicherung der Kamera. Außerdem kann ein stationäres System nach einer Grundkalibrierung bei entsprechender mechanischer Stabilität mit weniger zu bestimmenden Orientierungselementen und Paßinformationen auskommen.

4.2.3 Auswerteverfahren

Der gewünschte Ergebnistyp erfordert entsprechende Auswerteverfahren, welche wiederum die Aufnahmekonfiguration erheblich beeinflussen können. So zum Beispiel ist für die Erfassung der Oberflächenform eines Objektes üblicherweise mehr Aufwand notwendig als für die Bestimmung von Koordinaten ausgewählter Einzelpunkte. Die charakterisierenden Parameter sind die **Paß-**, **Verknüpfungs-** und **Ziel-** bzw. **Stützpunktverteilungen**. Bei Auswertungen im Stereomodus, für bestimmte digitale Operatoren oder für die Herstellung von Orthophotos ist außerdem eine konkrete relative Position jeweils mindestens zweier Bilder vorgegeben. Ein wichtiger durch die Art der Auswertung beeinflusster Systemparameter ist die erreichbare **Genauigkeit**. Weitere Aspekte sind die Auswertegeschwindigkeit oder Kompatibilitätsparameter wie Rechnertyp, Softwareausstattung und verfügbare Verfahren.

4.2.4 Randbedingungen

Photogrammetrische Vermessungsaufgaben im Nahbereich unterscheiden sich vom Luftbildfall gerade durch die Fülle von planerisch einzubeziehenden Randbedingungen. An dieser Stelle kann nicht auf Details eingegangen werden, weil die Abhängigkeit von der konkreten Problemstellung sehr groß ist. Die wichtigen Parametergruppen sind

Zeitverhältnisse, Raumbedingungen, Störeffekte und Anforderungen an **Flexibilität** bzw. **Mobilität** und enthalten eine Vielzahl von Einflußgrößen.

4.2.5 Handhabung

Durch die speziellen Anforderungen insbesondere in der Industriephotogrammetrie werden Parametergruppen wie **Einrichtung, Bedienung, Kalibrierung** oder **Wartung** leistungsbestimmend für ein Meßsystem und beeinflussen selbst Größen wie die Anordnungsgeometrie oder – zum Beispiel im Fall des verwendeten Kalibrierungsverfahrens – auch die tatsächlich erreichbare Genauigkeit. An der Einteilung einiger Parameter in die unterschiedlichen Bereiche kann man bereits erkennen, daß die Zuordnungen nicht immer eindeutig sind. So zum Beispiel kann die Objektbewegung nicht nur den Randbedingungen, sondern auch der Anordnungsgeometrie zugerechnet werden. Diese Tatsache ist jedoch nicht maßgeblich für das zu planende System, solange ein Parameter mit gleicher Aussage nicht mehrfach definiert wird.

4.3 Grundkonfiguration und Optimierung

Zwei Vorgehensweisen sind bei der Planung eines Meßsystems prinzipiell möglich, nämlich die konsequente Berechnung aller Konfigurationsdaten direkt aus den Einflußgrößen einerseits oder aber die Optimierung eines Grundsystems durch die Modifikation seiner Parameter. In der bisherigen Praxis wird die zweite Variante angewendet, weil eine vollständige algorithmische Beschreibung speziell der Anordnungsgeometrie schwierig und bis jetzt nicht praxisreif verfügbar ist. Die Arbeiten von Mason und Këpuska [Mason et al, 1992] versuchen dieses Problem mit Hilfe der Expertensystemtechnik zu lösen. Es sind sehr viele teilweise konkurrierende Einflußgrößen zu einem Kompromiß zu vereinigen. Ähnlich verhält es sich bei der Auswahl der Geräte. Die Ermittlung der erforderlichen Ausstattung ist nicht eindeutig und daher auf komplexe Strategien angewiesen, welche heute noch nicht existieren. Weiterhin von Bedeutung ist die Tatsache, daß oftmals eine Basiskonfiguration durch die aktuell vorhandene Geräteausstattung gegeben ist. Zudem wird oft auf Erfahrungswerte aus bereits gelösten Meßaufgaben zurückgegriffen.

4.4 Problemstellungen und ihre Lösbarkeit mit einem Planungssystem

Die bei einer Planung auftretenden Problemstellungen lassen sich in die folgenden Gruppen zusammenfassen:

- a) Erstellung einer Grundkonfiguration
- b) Ermittlung der Leistungsdaten
- c) Beurteilung der Leistungsdaten
- d) Anpassung und Optimierung

Im folgenden sollen die einzelnen Aspekte kurz diskutiert werden.

4.4.1 Erstellung einer Grundkonfiguration

Prinzipiell ist die Ermittlung einer Grundkonfiguration nur dann ein Problem, wenn die Berechnung vollautomatisch und ohne Vorgaben ablaufen soll. Ein für die anschließende Optimierung geeigneter Parametersatz kann dagegen mit großem Spielraum angelegt werden. Deshalb soll hier immer von einem existierenden Basissystem ausgegangen werden. Das Planungssystem hält verschiedene solcher Anfangszustände für unterschiedliche Aufgabenstellungen bereit.

4.4.2 Ermittlung der Leistungsdaten

Für die Beurteilung einer Konfiguration können je nach Situation geeignete Kriterien definiert werden. In der Regel werden zum Beispiel Größen wie die Genauigkeit, der Zeitaufwand, die Gerätekosten und der Ergebnistyp von Bedeutung sein. Die geeignete rechnerische Verknüpfung der aktuellen systembeschreibenden Parameter ergibt diese Leistungsdaten. Die Geometrie ist dabei der zentrale Aspekt. Ihre Eigenschaften können je nach Situation durch eine mit Hilfe einer Blockausgleichung durchgeführten Simulationsrechnung oder aber durch geeignete Schätzverfahren ermittelt werden. Die Systemleistung der Geräte dagegen zeichnet sich durch einfache mathematische Zusammenhänge aus, so zum Beispiel die Kompatibilität der Komponenten in Form einer Vergleichsabfrage oder die simple Addition der Einzelkosten. Statt dessen ist hier die große Komplexität eine Schwierigkeit.

Die schnelle Ermittlung dieser Leistungsdaten ist die zentrale Aufgabenstellung für das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Planungssystem. Dazu gehört die Bereitstellung der dazu erforderlichen Daten und der funktionalen Zusammenhänge einschließlich geeigneter Verkettungsstrategien, die vor allem später bei der Optimierung von Konfigurationen ihre Bedeutung haben.

4.4.3 Beurteilung der Leistungsdaten

Die Beurteilung der Leistungsdaten eines Meßsystems geschieht durch den Vergleich mit den gestellten Anforderungen. Werden letztere befriedigt, ist die Konfiguration einsetzbar. Häufig treten jedoch Zustände auf, in denen die Realisierung eines einzelnen Kriteriums die Übererfüllung anderer zur Folge hat. So zum Beispiel könnte ein einzelner weit entfernter und mit der geforderten Genauigkeit erfaßter Meßpunkt dazu führen, daß die größere Anzahl nähergelegene Ziele viel zu genau und damit gegebenenfalls viel zu teuer bestimmt würde. Solche und ähnliche Zusammenhänge sind abhängig einerseits von der gewählten Konfiguration und andererseits von möglicherweise unscharfen Aufgabenstellungen, zum Beispiel in Form von nicht klar definierten Genauigkeitsforderungen. Die Bewertung der Leistungsdaten eines Meßsystems ist deshalb nur schwierig zu automatisieren. Das Planungssystem kann jedoch mit Hilfe entsprechender Strategien Hinweise geben, an welchen Stellen sehr folgenschwere Zwänge entstehen oder ob gegebenenfalls ein Meßsystem am Rand seiner prinzipiellen Möglichkeiten betrieben wird.

4.4.4 Anpassung und Optimierung

Wenn die Leistungsdaten eines Meßsystems nicht befriedigend ausfallen, müssen entsprechende Systemparameter angepaßt werden. Meistens werden sich schnell die geeigneten Ausgangsgrößen finden und ändern lassen. Jedoch können die Abhängigkeiten anderer Parameter sehr komplex sein, so daß dann erst nach einer vollständig neuen Kalkulation feststeht, ob das Planungsziel erreicht wurde. Dabei können sich völlig neue Probleme ergeben, die möglicherweise soweit führen, daß die eingesetzten Geräte komplett ausgetauscht werden müssen, womit die gesamte Planung neu aufgezogen werden muß.

Die weiter oben erwähnte Fähigkeit des Planungssystems, Konfigurationen schnell durchzurechnen, kann bei der Optimierung sehr gewinnbringend eingesetzt werden. Die Wirkungen selbst von kleinen Veränderungsschritten lassen sich verfolgen und bis an vorgegebene Grenzen führen. Wichtig ist, daß dabei eventuell gravierende Folgen von Randeffekten nicht übersehen werden können. Ein weiterer Vorteil des Planungssystems ist die Möglichkeit, von verschiedenen Grundzuständen ausgehend sehr verschiedenartige Konfigurationen zu entwickeln und zu optimieren und auf diese Weise Konzeptvergleiche unter identischen Bedingungen durchzuführen.

5 Realisierungsmöglichkeiten eines Planungssystems

5.1 Aktuelle Situation

5.1.1 Wie plant der Mensch ein Aufnahmesystem ?

Alle Informationen über die Meßaufgabe werden gesammelt. Daraus ergibt sich die Einordnung in grobe und nicht exakt abgegrenzte Kategorien wie z.B. Online/Offline, Standard-Video, Still-Video, High-Resolution, High-Speed. Dazu kommen Begriffe wie Mobilität, grobe Meßgenauigkeitseinschätzungen und erste Überlegungen zum Aufwand.

Schon die ersten Überlegungen werden stark beeinflusst von bekannten oder bereits zur Verfügung stehenden Meßsystemen. Die Zuordnung der Aufgabe zu einem bestimmten Meßsystem wird meist schon in diesem Planungsstadium vorgenommen, ohne daß elementare Systemparameter ermittelt wurden. Dabei ergibt sich oft der Effekt, daß die Meßaufgabe mit aller Gewalt in den Leistungsumfang des Meßsystems gedrängt wird, was besonders drastisch dort der Fall ist, wo z.B. eine kleine Firma nicht über alternative Techniken verfügt. Ein Übergang auf eine andere und bessere Lösung wird deshalb manchmal völlig verhindert oder aber viel zu spät vollzogen.

Im folgenden wird damit begonnen, Schritt für Schritt eine geometrische Konfiguration zu erstellen, die nach den vorhandenen Erfahrungen eine brauchbare Lösung liefern soll. Dabei wird gleichzeitig Wissen über Grundzusammenhänge, Randbedingungen und Sonderfälle eingebracht. Immer beteiligt sind Überlegungen zur Reduzierung des erforderlichen Aufwandes. Als Hilfsmittel sind z.B. Programme zur grafischen Skizzen-erstellung oder Blockausgleichungsprogramme mit Möglichkeiten zur Simulationsrechnung verfügbar. Es erfolgt eine abschließende Überprüfung der Einhaltung aller geforderten Parameter. Damit einher geht eine konkrete Kostenabschätzung. Der letzte Schritt ist die Optimierung des Systems. Es wird üblicherweise versucht, die Kosten zu senken, ohne die Qualität der Meßresultate zu beeinträchtigen.

5.1.2 Expertensysteme und das vorliegende Problem

Ist die menschliche Vorgehensweise auf den Computer übertragbar? Es handelt sich hier um das bekannte Problem der Adaptierung menschlicher Denkweise auf algorithmisch arbeitende Maschinen, und damit befindet man sich mitten in der Expertensystementwicklung. Dieses Gebiet der „Künstlichen Intelligenz“ (abgekürzt: KI) befindet sich noch in einem sehr frühen Stadium, wenngleich bereits in einigen Fachgebieten effektiv arbeitende Expertensysteme eingesetzt werden können.

Was ist ein Expertensystem? Die folgende Definition entstammt dem Lexikon [Meyers, 1995]:

„Programmsystem eines Computers mit umfangreichem Datenbestand, in dem die Kenntnisse von Experten gesammelt sind; zeichnet sich durch einfache Bedienung aus und ermöglicht im Dialogbetrieb Auskünfte über Sachverhalte und deren Beziehungen.“

Diese zwangsläufig sehr oberflächliche Beschreibung deutet zwar ungefähr den Charakter von Expertensystemen an, sie eignet sich jedoch bei weitem nicht zur thematischen Einordnung von Software. Im folgenden soll deshalb eine kurze begriffliche Präzisierung gegeben werden.

Nach [Hartmann/Lehner, 1990] besteht ein einfaches Expertensystem aus den zwei Hauptkomponenten „Wissensbasis“ und „Schlußfolgerungs“- oder auch „Inferenzmechanismus“. Im Gegensatz dazu stehen die „Daten“ und der „Algorithmus“, die ein „normales“ Computerprogramm ausmachen. Als Hauptcharakteristikum für die Einstufung eines Programmes als Expertensystem wird die klare Trennung von Problemwissen einerseits und Problemverarbeitungsoperationen andererseits angesehen, welche in der konventionellen Programmier Technik nicht gegeben ist, weil die dort verwendete Form von Algorithmen selbst bereits Wissenskomponenten enthält. Wie der begriffliche Übergang zu Expertensystemen skizziert werden kann, zeigt Abbildung 12.

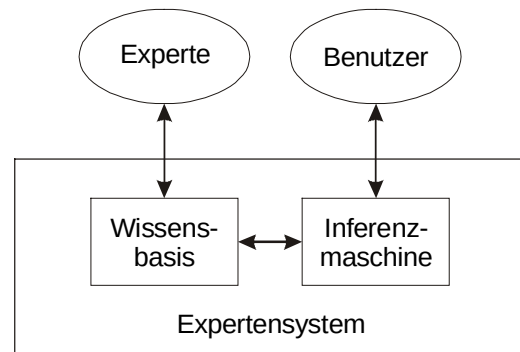


Abb.11: Einfaches Expertensystem [Hartmann/Lehner, 1990]

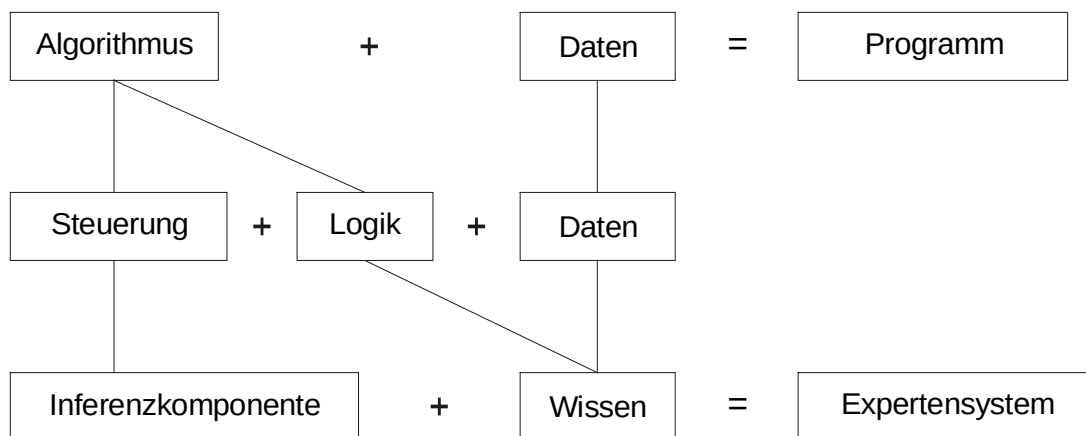


Abb.12: Entwicklung eines Expertensystems [Hartmann/Lehner, 1990]

Als weitere Unterscheidungskriterien werden Ausstattungsmerkmale der Software in Form von funktionalen Komponenten herangezogen. Das in Abbildung 13 skizzierte Schema enthält die folgenden bisher noch nicht erklärten Elemente: Die Wissenserwerbskomponente enthält wichtige Hilfsmittel, um Wissen zu akquirieren, aufzubereiten, zu modifizieren und zu warten. Die Erklärungskomponente macht den Lösungsweg, den das Expertensystem für eine bestimmte Aufgabenstellung eingeschlagen hat, dem Benutzer transparent, indem es verwendete Fakten und Regeln bis ins Detail offenlegt. Die Dialogkomponente stellt die interaktive Schnittstelle zum Benutzer dar. Sie ist für die Steuerung des Systems, die Problemdefinition und die Ergebnispräsentation zuständig. Die Kontextkomponente sammelt Fakten und

Zwischenergebnisse einer aktuellen Problembehandlung und kann als eine Art Notizblock aufgefaßt werden. Weiterhin existieren in einem Expertensystem Schnittstellen zur „Außenwelt“, welche in Form von anderen Computerprogrammen wie Datenbanken, Präsentationssoftware oder ähnlichem in einer Datenverarbeitungsumgebung vorhanden sind.

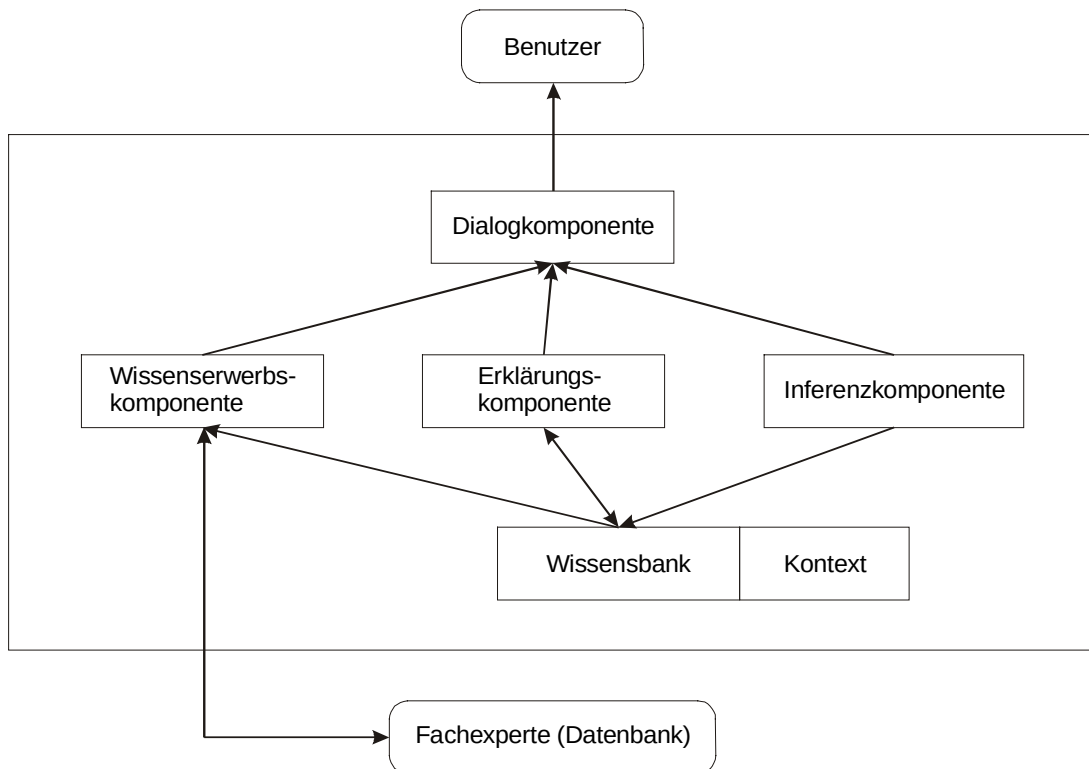


Abb.13: Komponenten eines Expertensystems [Hartmann/Lehner, 1990]

Weitere Kriterien eines Expertensystems liegen in bestimmten Fähigkeiten begründet. Die Inferenzkomponente muß in der Lage sein, den Dialog mit dem Benutzer so aufzubauen, daß das gegebene Problem mit der Wissensbasis in Einklang gebracht werden kann. Es muß dabei fehlendes Wissen abfragen können. Ferner sollten Schlußfolgerungen unter Unsicherheit, d.h. unter Zuhilfenahme von Wahrscheinlichkeiten, durchführbar sein. In Zukunft wird sicher auch die aktive Lernfähigkeit eines Systems als klassifizierendes Kriterium gelten, jedoch befinden sich Entwicklungen in dieser Richtung noch in einem sehr frühen Forschungsstadium.

Zweifelloos ist die für die vorliegende Arbeit gestellte Aufgabe der rechnergestützten Planung von photogrammetrischen Aufnahmekonfigurationen eine geeignete Problemstellung für die Realisierung in einem Expertensystem. Das hier entwickelte Planungssystem genügt jedoch noch nicht den oben genannten Kriterien. Vorhanden sind die Wissensbank, die Dialogkomponente und ein in seiner Funktionalität auf das Minimum der reinen Datenverknüpfung reduzierter Inferenzmechanismus, der nur dort, wo es unbedingt erforderlich ist, mit Hilfe von Strategien Mehrdeutigkeiten und Planungsalternativen behandelt. Unscharfe Schlußfolgerungen und aktive Lernfähigkeit sind

nicht vorhanden, Wissenserwerb und Lösungserklärung stehen ebenfalls im Hintergrund. Die Implementierung dieser Dinge ist an dieser Stelle nicht von primärem Interesse, sondern nur die Schaffung der Grundlagen für eine leistungsfähige Wissensbasis und die übersichtliche Bereitstellung der darin enthaltenen Daten. Es soll deshalb auch weiterhin von einem photogrammetrischen Planungs- und nicht von einem Expertensystem die Rede sein. Gleichwohl werden, wie weiter unten näher beschrieben, Organisationstechniken aus der Expertensystementwicklung verwendet.

5.1.3 Vorhandene Planungs- und Expertensysteme

Der Aufwand, der bisher bei der Adaption von KI-Techniken auf die Konfigurationsplanung in der Nahbereichsphotogrammetrie getrieben wurde, ist vergleichsweise gering. Der Grund dafür ist offensichtlich nicht die fehlende Notwendigkeit dieses Entwicklungsschrittes, sondern eher die Komplexität der Aufgabenstellung und die Tatsache, daß sich die Implementationskosten nicht unmittelbar durch direkten Verkauf zurückgewinnen lassen. Erst mittel- bis langfristig ist eine Amortisierung durch die Vereinfachung des Einsatzes und damit einhergehend die Steigerung der allgemeinen Akzeptanz photogrammetrischer Meßsysteme zu erwarten.

Die vorhandenen Ansätze befassen sich zum einen mit der automatischen Anordnungs- bzw. Netzkonfiguration sowie deren Optimierung und zum anderen mit der Zusammenstellung der gerätetechnischen Komponenten. So zum Beispiel haben Bammeke und Baldwin [Bammeke et al, 1992] ein experimentelles Expertensystem erstellt, das ausgehend von einer manuell definierten Startkonfiguration eine Aufnahmeanordnung beurteilen und in begrenztem Umfang Vorschläge für die Verwendung von Kameras geben kann. Interessant ist die Entwicklung eines Algorithmus, der „Accuracy Predictor“ genannt wird und in der Lage ist, abhängig von Kamera- und Konfigurationsdaten eine Genauigkeitsabschätzung der Meßergebnisse zu treffen, ohne dabei eine Simulationsrechnung im herkömmlichen Sinn durchzuführen. Mason und Këpuska [Mason et al, 1992] beschränken sich noch konsequenter auf die reinen Geometrieaspekte einer Netzanlage. Sehr gründlich wird untersucht, wie die Anordnungs- und Qualitätsparameter auf geeignete Weise mit einer Wissensbasis im Sinne der Expertensystemtechnik repräsentiert werden können. Das Ergebnis ist ein Rahmensystem (siehe unten), in dem die Struktur der Daten die logische Netzgeometrie darstellt. Auch hier sind die innerhalb dieser Datenordnungsmethode zwischen den Komponenten trotz prinzipieller Objektorientierung zulässigen Querverknüpfungen das ausschlaggebende Ausstattungsmerkmal. Des weiteren werden Untersuchungen zur Vorgehensweise und zu den beteiligten Kriterien beim Prototyping-Prozeß durchgeführt. Eine konkrete Implementation wird allerdings nur ansatzweise beschrieben. Novini [Novini, 1992] stellt ein Programm vor, das einen nicht speziell ausgebildeten Benutzer bei der Auswahl von Objektiven und Lichtquellen für Inspektionsaufgaben unterstützen soll. Die zugrundeliegende Intention ist die Vermeidung von in der Vergangenheit oft aufgetretenen groben Fehlern beim Systemdesign. Novini kommt zu dem Schluß, daß die Expertensystemtechnik ein leistungsfähiges Werkzeug für die gestellte Aufgabe sein kann. Praktische Einsatz-erfahrungen liegen allerdings noch nicht vor.

Ein Planungssystem, das bereits operationell einsetzbar ist, wird von Luhmann [Luhmann, 1994] beschrieben. Es wird nicht als Expertensystem bezeichnet, sondern als ein den Konfigurationsprozeß unterstützendes Werkzeug dargestellt. Es enthält eine Datenbasis mit Parametern von verwendbaren Geräten sowie algorithmische Strukturen zu deren Verknüpfung. Letztere können mit Hilfe von Prüfbedingungen verifizieren, ob ein gestecktes Planungsziel erreicht wurde. Eine umfassende Funktionalität zur graphischen Darstellung der geometrischen Sachverhalte steht als Übersichts- und Beurteilungshilfe zur Verfügung. Das System ist erweiterbar durch benutzerdefinierbare Parametergruppen, wobei allerdings die Ordnungsstruktur wenig flexibel erscheint. Es ist ein Optimierungsverfahren implementiert, das eine festlegbare Anzahl von zufalls-gesteuerten Variationen der Parameterinhalte durchführt und prüft. Die Beurteilung der Ergebnisse liegt allerdings wieder beim Benutzer. Diese letztere Tatsache sowie das Fehlen einer dialogbasierten Benutzerführung und Entscheidungsfindung unterscheidet dieses Programm von einem vollständigen Expertensystem. Es kommt damit dem in dieser Arbeit beschriebenen Planungssystem von der Aufgabenstellung her am nächsten.

5.2 Aspekte der Implementierung

Grundsätzliche Unterschiede bei der Auslegung der Software, die das Planungssystem repräsentiert, entstehen durch die Platzierung entweder im Netzwerk oder konventionell auf lokalen Computern. Vor- und Nachteile ergeben sich dabei nicht nur aus markt-technischen Überlegungen, sondern auch aus verfügbarer Funktionalität, Performance und Kompatibilität. An dieser Stelle sollen zunächst die grundlegenden Überlegungen zur Datenbehandlung und Programmbedienung ausgeführt werden. Anschließend werden die Auswirkungen auf die jeweilige Variante beschrieben.

5.2.1 Computersystem

Das verwendete Computersystem ist maßgeblich an der möglichen Verbreitung der Software beteiligt, wogegen die Leistungsfähigkeit der Rechner für den angestrebten Zweck nicht mehr nennenswert von Bedeutung ist.

Grundsätzlich zu unterscheiden sind – wie oben beschrieben – die sogenannte PC-Welt, die aus *INTEL*-basierten Personalcomputern besteht, und die UNIX-Welt, die sich aus firmenabhängigen sogenannten „Workstations“ mit mehr oder weniger zueinander kompatiblen UNIX-Systemen zusammensetzt. Letztere zeichnen sich üblicherweise durch deutlich höhere Prozessor- und Grafikgeschwindigkeiten und größere Speicherkapazitäten aus. Die Kosten für solche Anlagen sind entsprechend hoch, die Mehrleistung für das Planungssystem nicht erforderlich. Die PCs bieten hohe Flexibilität bei guter Kompatibilität untereinander, ausreichender Rechenleistung und sehr niedrigen Preisen.

Die PC-Welt wird dominiert von Betriebssystemen der Firma *MICROSOFT*, nämlich dem DOS- und den WINDOWS-Systemen. Daneben gibt es die Alternativen des OS/2 von *IBM*, verschiedener UNIX-Varianten und einiger Systeme für Spezialanwendungen. Im Workstationbereich überwiegt das UNIX, es sind aber auch firmeneigene Betriebssysteme wie z.B. das VMS von *DEC* und auch das WINDOWS-

NT von *MICROSOFT* im Einsatz. Als Nutzerschnittstelle bieten inzwischen alle Betriebssysteme (außer DOS und einigen Spezialsystemen) eine fensterorientierte, multitasking-fähige Oberfläche, deren Bedienungsfreundlichkeit sehr hoch ist, deren zusätzlicher Programmieraufwand jedoch zu erheblichen Kosten führen kann. Die Vor- und Nachteile der Systemdetails im Vergleich untereinander sind für das hier vorliegende Ziel nicht von Wichtigkeit. Entscheidend ist allerdings, ob und zu welchen Kosten geforderte Entwicklungswerkzeuge verfügbar sind. Auch in diesem Punkt sind die PCs eindeutig im Vorteil, denn sie können das mit Abstand größte Software-Angebot bieten.

Netzwerkunterstützung ist für alle verbreiteten Systeme vorhanden. Zu unterscheiden ist dabei die lokale Vernetzung der Rechner zum Zweck der Datenübertragung oder der gemeinsamen Nutzung von Ressourcen in LANs (Local Area Network) von der überregionalen Einbindung in sogenannte WANs (Wide Area Network).

5.2.2 Entwicklungssystem

Unter Entwicklungssystem ist sowohl das Werkzeug, das die Herstellung von eigenen Anwendungen erlaubt, als auch die grundlegende Organisationsform der Datenbehandlung zu sehen. Die Leistungsfähigkeit der jeweiligen Werkzeuge (Compiler, Makrosprachen, Assistentensysteme, ...) stellt kein prinzipielles Problem dar und wird deshalb hier auch nicht näher diskutiert. Die Organisation der Datenstrukturen sowie der Zugriffs- und Verknüpfungsmöglichkeiten ist dagegen entscheidend für die Realisierung des Planungssystems. Die folgenden Typen sind verfügbar:

- Direkte Programmierung
- Datenbanken
- Tabellenkalkulation
- Hypertextsystem
- Expertensystemshell
- Netzwerkprotokoll

Unter **direkter Programmierung** wird hier verstanden, daß die Implementierung mit einer üblichen Hochsprache wie C/C++, FORTRAN, BASIC, PASCAL, COBOL, ... erfolgt. Solche Programme setzen direkt auf die Betriebssystemebene auf und sind damit nicht abhängig von zusätzlicher Grundsoftware. Die erreichbare Funktionalität ist praktisch nur von theoretischen Aspekten des Ansatzes und vom eingesetzten Entwicklungsaufwand abhängig. Als Nachteil gegenüber anderen Methoden ist zu sehen, daß alle komplexeren Datenbehandlungsfunktionen, wie z.B. die Verknüpfungslogik in Tabellenkalkulationen, selbst entworfen und implementiert werden müssen. Die Kompatibilität zu den verschiedenen Computersystemen ist begrenzt und Portierungen können aufwendig werden.

Der Begriff **Datenbank** umfaßt primär nur die Bereitstellung einer Ordnungsstruktur, die es erlaubt, Daten zu einem bestimmten Thema zu speichern und einem Nutzer zugänglich zu machen. Genaugenommen handelt es sich bereits bei einer einfachen Textliste im ASCII-Format um eine Datenbank. Allerdings verfügen moderne Systeme über sehr komfortable Werkzeuge zur Selektion, Modifikation, Präsentation und dem Transport von Daten, so daß üblicherweise erst bei Vorhandensein einer solchen

Ausstattung von einer „Datenbank“ gesprochen wird. Die verfügbaren Programmpakete sind optimiert für organisatorische Aufgaben in der Unternehmensplanung. Ihre Datenverknüpfungsstrukturen passen deshalb nicht gut zum hier vorliegenden Problem.

Unter **Tabellenkalkulation** wird eine Anwendung verstanden, die als Datenstruktur eine (mehrdimensionale) Tabelle besitzt, zwischen deren Elementen Verknüpfungen mit numerischem oder logischem Charakter definiert werden können. Die Programmierung erfolgt durch die Strukturierung der Daten. Ein- und Ausgabehilfen sowie komplexe Funktionsabläufe können meistens mit Hilfe einer Makro-Sprache realisiert werden. Neben einer sehr umfangreichen mathematischen Grundausrüstung sind auch Datenbankmechanismen verfügbar. Als pauschaler Nachteil einzuordnen ist die Notwendigkeit, daß die Tabellenkalkulation beim Anwender vorhanden sein oder extra für den speziellen Zweck beschafft werden muß. Dabei entsteht außerdem eine zusätzliche Abhängigkeit vom Hersteller dieser Grundsoftware in bezug auf Verfügbarkeit und Wartung.

Bildschirmtexte, die mit interaktiven Elementen versehen sind, werden als **Hypertext** bezeichnet. Im einfachsten Fall werden hervorgehobene Textstellen sensibilisiert und positionieren bei entsprechender Betätigung den Betrachter auf eine verknüpfte Textstelle. Ergänzt wird diese Funktionalität durch grafische Bedienelemente und Texteingabemöglichkeiten. Breite Anwendung finden solche Systeme in allen Bereichen der Informationsdarstellung auf dem Computer. Die Programmierung ist einfach, jedoch ist es normalerweise nicht vorgesehen, komplexere Berechnungen oder Abläufe durchzuführen. Auch hier ist die zusätzliche Abhängigkeit vom Hersteller der Grundsoftware gegeben.

Eine **Expertensystemshell** beinhaltet sowohl sogenanntes Expertenwissen für ein bestimmtes Fachgebiet als auch Methoden zur Aufbereitung und Weitergabe an weniger qualifizierte oder fachfremde Nutzer. Im Prinzip kommt dies deshalb dem in der vorliegenden Arbeit angestrebten Planungssystem sehr nahe. Als Expertensystem wird aber oft auch schon das Entwicklungswerkzeug für entsprechende Aufgaben bezeichnet, weshalb hier begrifflich unterschieden werden soll. Dabei handelt es sich um eine Arbeitsumgebung mit speziell für diesen Zweck konzipierter Programmiersprache, welche den besonderen Anforderungen der Datenverknüpfung und Benutzerführung gerecht wird.

Die Datenaufbereitung für die überregionalen Netzwerke erfordert spezialisierte **Netzwerkprotokolle**. Die Gründe dafür sind die durch die Art der Nutzung entstehenden besonderen Anforderungen bei den zur Zeit noch sehr geringen Übertragungsraten. Als Beispiel sei das HTML-Protokoll genannt, das im WWW (World Wide Web) zur Anwendung kommt. Eine zunehmend an Bedeutung gewinnende Programmiersprache ist JAVA. Im wesentlichen handelt es sich hierbei um Hypertextanwendungen. Die Funktionalität darauf basierender netzwerkorientierter Entwicklungssysteme ist hauptsächlich ausgerichtet auf die Präsentation von Informationen, weniger auf die Berechnung und Verknüpfung von Daten, wie sie für ein photogrammetrisches Planungssystem erforderlich sind.

5.2.3 Bedienungskonzept

Die vorstehend beschriebenen Entwicklungssysteme bzw. Datenrepräsentationen haben zum Teil typische Bedienungskonzepte. Einige weitere kommen hinzu und ergeben die folgenden Möglichkeiten:

- Kommandozeilenparameter und Piping
- Listen
- Tabellen
- Masken
- Dialogführung
- Menüsystem
- Fenster-System
- Assistenten-System
- Hypertext
- Ikonisierte Oberfläche
- Makroprogrammierung

Die Verwendung von Programmen, die ohne eigene Bildschirmeingabe („Batch“-Programme) auskommen und ihre Steuerinformationen aus dem Aufrufbefehl auf Betriebssystemebene beziehen und die sich in langen Ketten aneinanderreihen lassen (**Piping** mit **Kommandozeilenparametern**), haben vor allem auf textorientierten UNIX-Systemen weite Verbreitung gefunden. Sie verwenden meistens zusätzliche Dateien für Steuerbefehle, Eingabedaten und Ergebnisse. Ihre strenge Modularität bedeutet große Flexibilität bei Wartung und Weiterentwicklung, jedoch ist ihre Bedienung bisweilen umständlich und erfordert einen hohen Einarbeitungsaufwand.

Die Zusammenstellung aller für einen Programmablauf notwendigen Daten kann in Form von **Listen** geschehen. Dieser Eingabetyp wurde zur Zeit der textorientierten Bildschirmarbeitsplätze verwendet, wenn die Programmierung einer Dialogführung als zu komplex erschien. Solche Listen wurden üblicherweise als Textdateien mit unterschiedlichem Kommentierungsaufwand repräsentiert. Die Handhabung ist zwar sehr flexibel, aber umständlich, fehleranfällig und ohne geeignete Funktionalität zur Datenorganisation. Der Vorteil des direkten und schnellen Zugriffs auf einzelne Steuerparameter wird verschenkt durch die Unübersichtlichkeit bei komplexen Systemen.

Die Organisation von Daten in **Tabellen** hat einen ähnlichen Charakter wie eine Liste, jedoch bestehen durch die formellere Struktur mehr Möglichkeiten der Bearbeitung. Die einzelnen Tabellenelemente können mit Hilfe von mathematischen oder logischen Funktionen miteinander verbunden werden, so daß die Wirkung der Änderung eines Parameters sofort in den damit verknüpften Werten sichtbar wird. Auf diese Weise kann die Durchführung einer Optimierungsaufgabe sehr erleichtert werden, jedoch kann mangelnde Kenntnis der Zusammenhänge auch zu planlosem Ausprobieren und so zu geringer Effizienz führen. Die Übersichtlichkeit einer Tabelle mit sehr vielen Einträgen ist begrenzt.

Als **Maske** wird ein Bildschirmaufbau bezeichnet, der sowohl veränderliche als auch feste Bestandteile besitzt. In genau definierten und durch fixe Texte kommentierten Feldern - meistens in Tabellenform - können Daten eingegeben oder verändert werden. Ein gut konzipiertes Maskensystem kann die Übersichtlichkeit der Bedienung und die Fehleranfälligkeit erheblich verbessern.

Die Führung des Benutzers eines Programmes mit Hilfe von kommentierten Eingabeaufforderungen (**Dialogführung**) erleichtert den Umgang mit komplizierten Abläufen erheblich und reduziert die Fehleranfälligkeit. Ein Nachteil ist die ständige Wiederholung von nicht problemrelevanten Abfragen bei Optimierungsaufgaben, welche teilweise umgangen wird durch hierarchische Verzweigungen und das Bereitstellen von Standardwerten. Die Handhabung komplexerer Systeme kann dabei sehr unübersichtlich werden.

Als **Menü** bezeichnet man eine textorientierte Auswahlmaske. Sie kann Teil einer konventionellen Dialogführung sein oder als sogenanntes Roll-Up in einem Fenstersystem zur Verfügung stehen. Oft werden solche Menüs zusätzlich zu Dialogfenstern mit identischen Befehlen verwendet. Sie können in mehrere Ebenen gestaffelt sein. Die Funktionalität beschränkt sich auf die Auswahl von Programmoptionen, das Starten von Unterprogrammen und das Verzweigen zu Untermenüs. Der Hauptvorteil besteht in der einfachen und manchmal schnelleren Tastatursteuerung gegenüber der sonst üblichen Maus.

Ein **Fenstersystem** erlaubt die mitunter gleichzeitige Darstellung mehrerer unterschiedlicher Eingabemasken auf dem Bildschirm. Aussehen und Platzierung dieser Fenster können der jeweiligen Aufgabenstellung flexibel angepaßt werden. Der Inhalt der Fenster kann aus Listen, Dialogen, Tabellen, Bildern und Zeichnungen oder grafischen Steuer- und Eingabeelementen bestehen und bildet daher eine übergeordnete Organisationsform des Bedienungskonzepts. Die Verwendung eines Fenstersystems ist wegen der großen Flexibilität immer zu empfehlen. Nachteile ergeben sich nur bei schlecht konzipiertem Einsatz und durch einen erhöhten Installations- und Wartungsaufwand.

Bei einem **Assistentensystem** handelt es sich um ein modernes, fensterorientiertes Eingabesystem, das die Handhabung komplexer Abläufe bei der Behandlung von Daten erleichtert, indem Wertfelder, Auswahllisten und Steuerelemente in einer zielgerichteten Dialogführung mit mehreren aufeinanderfolgenden Masken angeordnet sind. Dabei erfolgt eine ausführliche Kommentierung der einzelnen Schritte. Oftmals stellen die Assistenten (eng. „Wizard“) eine Zusammenfassung von auch einzeln verfügbaren Befehlen dar. Sie gruppieren dabei die ansonsten über mehrere Fenster oder Menüs verteilten Funktionen, die zu einem logischen Zusammenhang gehören. Es steht damit dem Benutzer frei, ob er sich durch einen Assistenten leiten lassen will, oder ob er effektiver in der Lage ist, die Einzeloperationen selbst durchzuführen.

Ein Text, der hervorgehobene Worte besitzt, die, wenn sie mit der Computermaus bedient werden, zu anderen Textstellen verzweigen, wird als **Hypertext** bezeichnet. Auf diese Weise lassen sich Informationsketten mit einer Baumstruktur darstellen, die eine zielgerichtete und effektive Suche ermöglichen.

Überall dort, wo es hauptsächlich auf die Kombination mehrerer Funktionen zu komplexen Abläufen ankommt, können Oberflächen eingesetzt werden, bei denen die Steuerung auf der Plazierung und Verknüpfung von grafischen Objekten basiert. Diese **ikonisierten Oberflächen** sind nur geeignet, um vorhandene Daten und Funktionen in Zusammenhänge zu überführen, nicht jedoch, um Eingaben vorzunehmen oder Funktionsdefinitionen durchzuführen. Die sogenannte Drag & Drop - Steuerung von Fensteroberflächen gehört ebenfalls in diese Kategorie.

Innerhalb von Applikationen kann ein Mechanismus zur Verfügung gestellt werden, der es erlaubt, mehrere Aktionen und Befehle zusammenzufassen zu einem komplexen und wiederkehrenden Ablauf (**Makroprogrammierung**). Dieses kann durch explizite Programmierung mit einer speziell dafür vorgesehenen Syntax erfolgen oder durch die Aufzeichnung von Bedienungsvorgängen mit einem „Makrorekorder“ genannten Programmteil realisiert werden.

5.2.4 Datenorganisation

Die Art und Weise der Bereitstellung von Daten für den Programmablauf kann erhebliche Konsequenzen für die Leistungsfähigkeit einer Software haben, wenn die zu verwaltende Datenmenge groß ist. Der Maßstab hierfür ist die Verarbeitungsgeschwindigkeit des verwendeten Rechnersystems. Trotz der thematischen Komplexität der vorliegenden Problemstellung ist der Umfang der Datenbasis mit maximal einigen hundert Parametern so gering, daß selbst auf einem langsamen PC keine nennenswerten Verzögerungen des Programmablaufs durch Zugriffszeiten entstehen.

5.2.5 Logistik

Logistische Funktionen eines Computerprogrammes besitzen u.a. die folgenden Inhalte:

- Installationsunterstützung
- Projektmanagement
- Zugriffsregelung
- Nutzerrouineneinbindung
- Datenschnittstellen
- Datensicherung
- Netzwerkfähigkeit
- Administration

Da diese Funktionalität allgemeiner Natur ist und keine spezifischen Auswirkungen auf die Realisierung eines photogrammetrischen Planungssystems hat, sollen die Begriffe hier zwar erwähnt, aber nicht näher beleuchtet werden. Zu beachten ist, daß die Implementierung je nach Nutzungskomfort einen erheblichen Aufwand bedeuten kann.

6 Das Planungssystem PPS

Gegenstand der Betrachtungen ist hier die Planung der Lösung einer meßtechnischen Aufgabenstellung mit Hilfe eines digitalen photogrammetrischen Systems im Nahbereich. Die mit dieser Definition einhergehenden Einschränkungen des Anwendungsspektrums sind jedoch nur dann erforderlich, wenn es um konkrete Systemparameter geht. Die strukturellen Überlegungen sind voraussichtlich in der großen Mehrzahl übertragbar auf allgemeine Meßsysteme, was jedoch im einzelnen unbedingt zu prüfen ist.

Das vorliegende Problem besteht demnach aus drei Komponenten:

- a) Die **Aufgabenstellung** ist eine von außen vorgegebene Situation, die innerhalb des für ein Planungssystem relevanten Aktionsbereiches nur indirekt beeinflussbar ist¹⁾. Die Aufgabenstellung enthält einen Satz von Kriterien, welche durch die Lösung zu erfüllen sind.
- b) Die **Lösung** bzw. die Erfüllung der Aufgabenstellung hält für jedes in letzterer enthaltene Kriterium ein Gegenstück bereit, dessen Inhalt die Vorgabe mehr oder weniger gut erfüllt. Daraus ergibt sich, daß an dieser Stelle die Werte gerichtet sein müssen, d.h. es sind Aussagen über bessere bzw. schlechtere Erfüllung notwendig. Die den Vorgabekriterien entsprechenden Lösungsparameter sind untergliedert in viele beteiligte Komponenten auf mehreren Ebenen. Die theoretische Detailtiefe ist dabei unendlich. Sie ist jedoch ab einem bestimmten Punkt nicht mehr relevant für eine praxisnahe Planung, so daß ein quasi geschlossenes Lösungsschema realisierbar ist. Die darin enthaltenen Informationen in Form von Parametern kann man in Analogie zu einer Methode der Wissensrepräsentation einiger Expertensysteme in einem sogenannten Rahmensystem [Stede, 1987] oder [Hartmann/Lehner, 1990] organisieren. Die Einzelheiten hierzu werden weiter unten beschrieben. Im Prinzip stellt ein vollständiger Parametersatz bereits eine Lösung dar, die jedoch auf ihre Konformität mit der aktuellen Aufgabenstellung überprüft werden muß. Vollständigkeit kann bei nicht vorhandenen Detailinformationen auch über Standardinhalte – neuerdings auch auf deutsch „Default-Werte“ genannt – erreicht werden.

1) Einflußnahme eines Planungssystems auf die Aufgabenstellung:

Tatsächlich ist es in der Praxis durchaus üblich, aufgrund von Schwierigkeiten bei der Realisierung oder von Aufwandsüberlegungen die festgesetzten Vorgaben zu relativieren. Das ist vor allem dann möglich, wenn letztere (Sicherheits-)reserven enthalten, die entweder aus Vorsicht, fachlicher Unkenntnis oder ungenügender Sorgfalt bei der Konzeption zustande gekommen sind. Ein Planungssystem könnte auf Extremwerte in Parameterinhalten hinweisen, deren Berücksichtigung außergewöhnliche Maßnahmen zur Folge hätte und damit den erforderlichen Realisierungsaufwand unverhältnismäßig in die Höhe treiben würde. Ferner ist es möglich, die Forderungen an das System soweit zurückzunehmen, daß vorher nur teilweise erfüllte Kriterien angepaßt werden.

- c) Die **Planung** bzw. der Weg zur hinreichenden Lösung besteht in der Veränderung von Dateninhalten durch den Benutzer, bis ein zufriedenstellender Zustand erreicht ist. Da jedoch sehr komplexe Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Parametern bestehen, kann eine Manipulation sehr unübersichtliche und langwierig nachzuvollziehende Auswirkungen haben. An dieser Stelle unterstützt das Planungssystem den Anwender durch das Bereitstellen und automatische Umsetzen der Funktionalität der Abhängigkeiten. Eine Schwierigkeit bei der Implementation dieser Fähigkeit ist die Tatsache, daß sich kein eindeutiger Zuordnungsbaum der Einflüsse finden läßt (siehe unten: Rahmensystem), denn es existieren Mehrdeutigkeiten, Alternativen und Querverbindungen. Es ist also die Bewertung bzw. Gewichtung von Zusammenhängen erforderlich, auf deren Grundlage Verknüpfungsstrategien erarbeitet werden können.

6.1 Interne Strukturen

6.1.1 Datenrepräsentation

Die folgenden Abschnitte beschreiben den Aufbau der für die Planungsvorgänge notwendigen Datenstrukturen. Im wesentlichen handelt es sich dabei um einen Katalog der Systemparameter und die Zusammensetzung der Parameter selbst.

Parameterkatalog

Die Wissensbasis des Systems besteht aus den Daten bzw. den Systemparametern und deren Verknüpfungsmethoden. Letztere dürfen im Sinne der Expertensystemtechnik nicht mit Inferenzmechanismen verwechselt werden. Auf der untersten Ebene, welche durch die jeweilige Begrenzung der Detailtiefe gegeben ist, stehen als kleinste verwendete Elemente die Basisparameter. Deren Inhalte repräsentieren die Systemdaten, und ihre Gesamtheit ergibt einen Katalog von Basiseigenschaften der Konfiguration. Zu den Systemparametern werden auch Zielgrößen gezählt, welche durch die Verknüpfung von Basisparametern und/oder anderen Zielgrößen entstehen.

Organisatorischer Aufbau eines Parameters

Ein Parameter entspricht in der weiter unten genauer beschriebenen Theorie der Rahmensysteme einem Attribut. Ein Attribut enthält mehrere Facetten, die in der Abbildung 14 zusammengestellt sind.

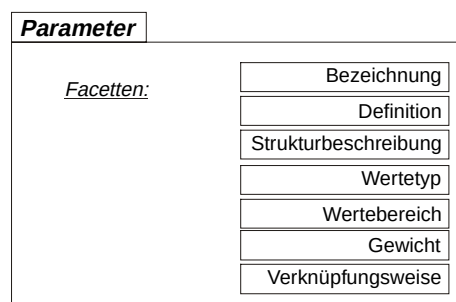


Abb.14: Aufbau eines Parameters

Die „**Bezeichnung**“ oder der Name des Parameters gewährleistet seine Eindeutigkeit. In der vollständigen Bezeichnung ist der gesamte Pfad der Gruppierung nach Systemkomponenten enthalten, also z.B. „Aufnahmesystem / Kamera / Sensor / Lichtempfindlichkeit“. Damit wird erreicht, daß der Begriff „Lichtempfindlichkeit“ auch für andere Komponenten verwendet werden kann (z.B. „Aufnahmesystem / Belichtungsmesser / Lichtempfindlichkeit“).

Die „**Definition**“ ist die genaue Beschreibung des Parameters. Dazu kann je nach Typ eine exakte mathematische und physikalische Definition gehören, ein zugelassener Kontext, Abgrenzungen gegenüber verwandten Begriffen oder auch erläuternde Kommentare. Von dieser Beschreibung kann die Wirkungsweise eines Parameters in erheblichem Maße abhängen.

Die „**Strukturbeschreibung**“ eines Parameters kann komplex sein. So ist es z.B. nicht möglich, den Verlauf einer Verzeichnung bei der Abbildung durch ein Objektiv mit einem einzelnen Wert zu beschreiben. Es sind mehrere Koeffizienten oder sogar ein Stützpunktfeld erforderlich, deren Wertetypen unterschiedlich sein können. Diese Untergliederung hat jedoch die Eigenschaft, daß sichergestellt ist, daß alle Elemente nur gemeinsam wirken und es keine vereinzelt Querverbindungen nach außen geben kann, wie sie das weiter unten beschriebene Rahmensystem zulassen würde. Folglich kann ein Parameter auch aus Feldern oder Tabellen bestehen. Kombinationen sind ebenfalls zulässig. Die Strukturbeschreibung stellt also die Zusammensetzung des Parameters aus einem oder mehreren Wertetypen dar.

Die Parameter können unterschiedlichste Erscheinungsformen besitzen, welche durch den „**Wertetyp**“ näher spezifiziert werden. Das Spektrum reicht von simplen Zahlenwerten bis hin zu komplexen funktionalen Zusammenhängen oder qualitativen Beschreibungen. Der Wertetyp ist ein wichtiges Kriterium für die Eigenschaften des Parameters bei der Beschreibung von Abhängigkeiten und Wirkungen. In Tabelle 2 sind die verwendeten Wertetypen aufgeführt und näher beschrieben. Für jeden Parameter sind mehrere Wertetypen möglich, wenn eine komplexe Struktur vorliegt (siehe oben).

Der „**Wertebereich**“ eines Parameters definiert die theoretischen Grenzen seines Inhaltes. Es kann sich dabei um einen oder mehrere kontinuierliche Bereiche handeln, oder es kann eine Liste mit konkreten Zustandsformen vorgegeben sein. Der Wertebereich kann einerseits durch grundsätzliche – z.B. physikalische – Zusammenhänge festliegen, er kann aber auch durch aktuelle Geräte oder Randbedingungen zusätzlich eingeschränkt sein. Für das Planungssystem hat die explizite Verwendung von Wertebereichen nicht nur unterstützenden Charakter bei der Dateneingabe. Die Bereichsgrenzen können als Zwangspunkte für die Berechnung von Zielgrößen dienen, und es können ohne die Kenntnis alternativ möglicher Parameterinhalte Aussagen über die Realisierbarkeit getroffen werden. Die Verknüpfung von Parametern zu Zielgrößen ist oft nicht eindeutig. Die Wirkung auf letztere kann in solchen Fällen durch mehrere Parameter gleichzeitig erfolgen. Nicht alle beteiligten Größen haben dabei die gleiche Wichtigkeit.

Zahl	numerischer Zahlenwert als direkte Einflußgröße
Relation	Verhältnis zweier Einflußgrößen
Faktor	Faktor für die Wirkung eines anderen Parameters oder für eine Gruppenwirkung
Typ	Auswahl eines Eigenschaftstyps aus einer Liste vorgegebener Möglichkeiten
Feld (Feld / 2D-Feld / 3D-Feld / ...) (+ Maßstab)	ein (u.U. mehrdimensionales) Feld mit identischen Wertetypen; Der eventuell vorhandene Maßstab definiert die inhaltliche Schrittweite zwischen den Feldelementen
Tabelle	zweidimensionales Feld mit einer Bezeichnungsspalte und einer oder mehreren Wertespalten
Liste	a priori definierte und nicht veränderbare Zustände des Parameters (auch numerisch)
geschlossene Liste	a priori definierte und nicht veränderbare Zustände eines Parameters, die durch prinzipielle Zusammenhänge festliegen
Beschreibung	qualitative Beschreibung der Aussage eines Parameters
Funktion	mathematischer, funktionaler Zusammenhang
Algorithmus	algorithmische Beschreibung einer Parameteraussage
Existenz	Der Inhalt kann „ja“, „nein“ („vielleicht“) sein

Tab.2: Mögliche Wertetypen der Systemparameter

Mit der Einführung eines „**Parametergewichtes**“ wird dieser Überlegung Rechnung getragen. Diese Maßnahme stellt im Prinzip bereits eine einfache Verknüpfungsstrategie dar. Sie hat außerdem zur Folge, daß der Aufwand zur Bestimmung von Parameterinhalten in vielen Fällen wegen geringer Wichtigkeiten stark reduziert werden kann.

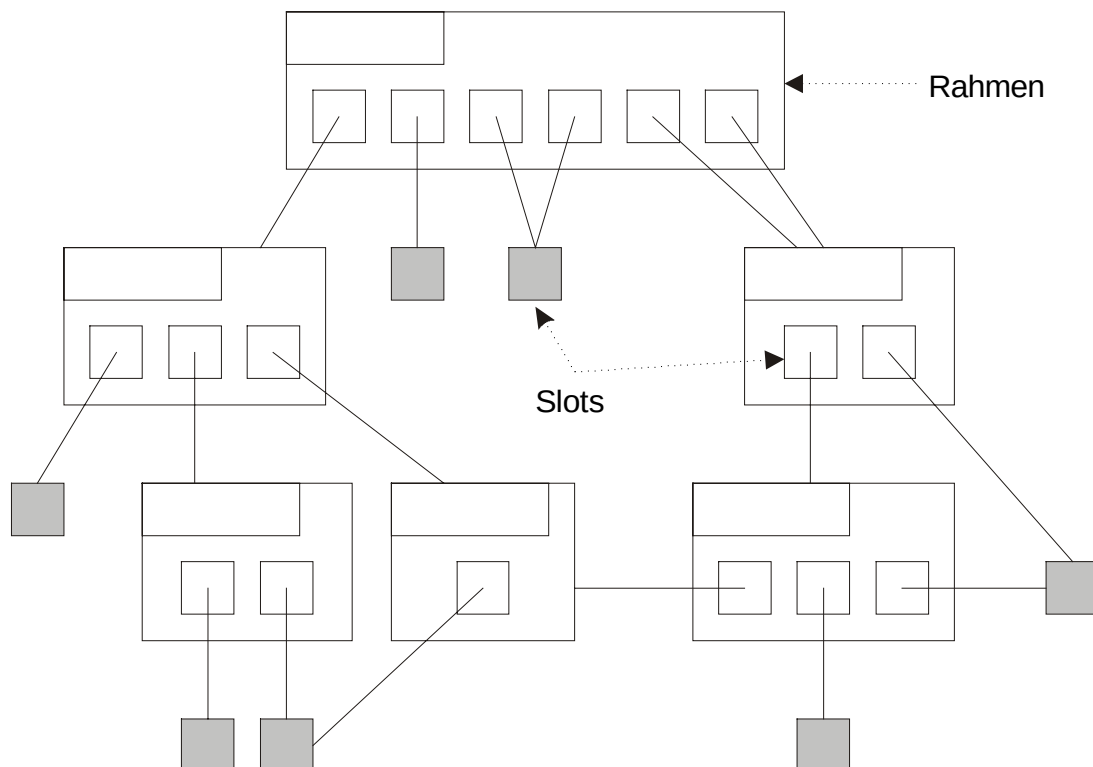
Jeder Parameter enthält Informationen über Art und Ziele seiner „**Verknüpfungen**“ und Abhängigkeiten. Damit ist bei einer Anpassung der Datenbasis durch Veränderung, Ergänzung oder Wegfall von Parametern die Möglichkeit der leichteren Integration in die Verknüpfungsstrukturen gegeben.

6.1.2 Ordnungsstrukturen der Wissensbasis

Wichtig für die Verwendbarkeit für die gestellten Aufgaben ist nicht nur ein möglichst umfassender Datenbestand, sondern auch die Art und Weise seiner Untergliederung. Von den dafür benutzten Ordnungsstrukturen hängt zum großen Teil die Verknüpfungsfunktionalität ab. Deshalb muß darauf näher eingegangen werden.

6.1.2.1 Theorie der Rahmensysteme

Die Struktur der für die Lösung erforderlichen Daten entspricht, wie oben bereits angedeutet, einem sogenannten Rahmensystem aus der Expertensystemtechnik nach [Stede, 1987] oder [Hartmann/Lehner, 1990]. Die Informationen sind in einem „Rahmen“ untergebracht, der eine Abgrenzung des interessierenden Themas oder Gegenstandes darstellt und der Attribute in sogenannten „Slots“ enthält, welche entweder einen beschreibenden Inhalt oder aber einen weiteren untergeordneten Rahmen besitzen können. Die beschreibenden Inhalte stellen im vorliegenden Fall des Planungssystems die Systemparameter dar. Die Verwendung von Default-Werten ist ein explizit definiertes Feature, ebenso wie Typdefinitionen und Wertebereichsgrenzen. Sie stellen „Facetten“ der Attribute dar. Die Vererbung von Attributen eines Rahmens auf seine Komponenten ist in KI-Realisierungen von erheblicher Bedeutung. Ausschlaggebend für die Eignung als Grundlage für das vorliegende Planungssystem waren jedoch die Kombinationsfähigkeit von deklarativen und prozeduralen Datenrepräsentationen und – von ganz erheblicher Bedeutung – die beliebigen Quer-Verbindungsmöglichkeiten von Slots aus verschiedenen Rahmen und Hierarchiestufen.



Letzteres wird gefordert durch die Tatsache, daß mehrere Gruppierungsmöglichkeiten bestehen. So erscheint z.B. die Einteilung des Aufnahmesystems nach Gerätekomponten sinnvoll, denn mit einer Kamera würde man üblicherweise auch den Sensor und damit dessen Lichtempfindlichkeitseigenschaft austauschen. Andererseits ist es nicht zwangsläufig erforderlich, die Kamera auszutauschen, wenn der Sensor zu lichtschwach ist, sondern es reicht u.U. die Verwendung eines Objektivs mit höherer

Lichtstärke oder die Erhöhung der Beleuchtungsleistung. Daraus folgt, daß eine Einteilung auch nach funktionalen Zusammenhängen erfolgen kann. Da beide hier genannten Gruppierungen ihre Berechtigung haben, muß ein System verwendet werden, das beide Abhängigkeitsketten realisieren kann. Folglich wird die anschaulichere Einteilung, nämlich die nach Systemkomponenten, in den Vordergrund gestellt und bildet das eigentliche Rahmensystem. Die funktionellen Abhängigkeitsketten werden in einem weiteren Rahmensystem aus Forderungs- und Zielgrößen bzw. deren logischen Gruppierungen repräsentiert. Beide Systeme besitzen dabei dieselben Basisparameter, die lediglich unterschiedlich geordnet sind. Als grundlegende Strategie wird eine Kombination aus Vorwärts- und Rückwärtsverkettung verwendet.

Das Funktionsprinzip des Planungssystems basiert auf einem ausgeglichenen Zustand von Forderungs- und Zielgrößen, wobei letztere die Anforderungen im einzelnen übertreffen dürfen, nicht jedoch umgekehrt. Forderungsgrößen werden mittels Vorwärtsverkettung aus den Parametern der Aufgabenstellung definiert, Zielgrößen aus denen der Lösung. Die Aufgabenstellung wird von außen vorgegeben und ist für ein konkretes Planungsproblem – wie bereits erwähnt – invariant. Die Parameter der Lösungsseite sind a priori nicht leer, sondern enthalten eine Grundlösung aus Default-Werten, welche einer standardisierten, einer situationstypischen oder einfach der in einer vorangegangenen Problemstellung verwendeten Konfiguration entnommen werden.

Alternativen zum Rahmensystem sind aus der Expertensystemtechnik das semantische Netz, die Prädikatenlösung, das Scriptensystem oder allgemein die Kreuztabelle oder die strukturlose Definition von Abhängigkeiten. Sie sollen im folgenden kurz angesprochen werden.

Der Anspruch eines Expertensystems wird – wie schon oben erwähnt – von dem hier vorliegenden Planungssystem nicht erfüllt. Im einzelnen bedeutet das, daß der Schwerpunkt auf der Definition von funktionalen Zusammenhängen und Parameterinhalten liegt, nicht auf deren automatischer Verkettung. Die Aufstellung der Parameter und ihrer Abhängigkeiten entspricht von der Anlage her der Wissensbasis in einem Expertensystem. Jedoch wird die Verknüpfung der Wissenskomponenten und die Beurteilung der Resultate nicht vollständig übernommen, sondern nur organisatorisch unterstützt. Deshalb sind die Verkettungsmechanismen, die als wesentliche Eigenschaften z.B. der semantischen Netze, der Prädikatenschreibweise oder der Scriptentechnik gelten können, bei der vorliegenden Problemstellung nur von untergeordneter Bedeutung.

Es wäre auch denkbar, eine strukturlose Auflistung aller Parameter zu verwenden. Der Vorteil wäre der Wegfall des organisatorischen Aufwandes der Einteilungsdefinitionen. Jedoch wird die Übersichtlichkeit stark beeinträchtigt, was sich besonders störend auf die ohnehin schwierige Erarbeitung der Abhängigkeiten auswirkt. Außerdem ergeben sich bei einer Erweiterung oder Veränderung des Parametersystems Vorteile, wenn Funktionalitäten oder Komponenten zu logischen Gruppen zusammengefaßt sind.

Die Beschreibung von Abhängigkeiten zwischen den Parametern mit Hilfe einer Kreuztabelle liegt zunächst sehr nahe. Das dabei entstehende Hauptproblem ist die Festlegung von Abhängigkeitsketten und die Trennung von Originär- und Zielpara-

metern. Die durch die Einfachheit der Struktur scheinbar gegebene Übersichtlichkeit geht schnell verloren, weil die Abhängigkeiten teilweise sehr komplex sind. Eine Gruppierung von Parametern ist nur eindimensional möglich.

6.1.2.2 *Gruppierung nach Systemkomponenten*

Allein schon der praktische Umgang mit einem photogrammetrischen Meßsystem erzwingt eine planerische Gruppierung nach Systemkomponenten. Es ist in den seltensten Fällen möglich, ein Gerät – z.B. eine Kamera – mit unzureichenden Eigenschaften durch eines zu ersetzen, welches genau die fehlenden Leistungskriterien erfüllt, ansonsten aber identisch zum Vorgänger ist. In der Praxis ist ohnehin die Auswahl der Geräte oft sehr stark eingeschränkt, sei es durch den Zwang der Verwendung firmeneigener Ausrüstung, die Festlegung auf einen bestimmten Hersteller beziehungsweise Zulieferer oder durch beliebige andere organisatorische Randbedingungen.

Das Ziel bei der Einführung einer Ordnungsstruktur für die Systemkomponenten ist also die Gewährleistung der Austauschbarkeit von Geräten oder Komponenten und damit der gemeinsamen Behandlung aller davon betroffenen Systemparameter, obwohl diese den unterschiedlichsten Funktionalitätsgruppen zugeordnet sein können.

6.1.2.3 *Gruppierung nach Funktionalität*

Zunächst erscheint es naheliegend, die nach Systemkomponenten geordneten Parameter mit Hilfe der dafür vorgesehenen Eigenschaften eines Rahmensystems einfach untereinander und rahmenübergreifend funktional zu verbinden. Dabei stellt sich jedoch schnell heraus, daß bestimmte Zusammenhänge auf diese Weise nicht sinnvoll beschrieben werden können und daß es Größen gibt, mit denen in der Praxis konkret gearbeitet wird, die aber keiner Systemkomponente allein zuzuordnen sind. Ein einfaches Beispiel ist der Bildwinkel (korrekter: Feldwinkel). Er wird begrifflich üblicherweise einem Objektiv zugeordnet. Dabei wird implizit davon ausgegangen, daß dieses Objektiv für ein bestimmtes Bildformat konzipiert ist, denn letzteres ist neben der Brennweite und der Auszugsverlängerung eine bestimmende Größe für den Bildwinkel, obwohl diese eindeutig zu den Sensoreigenschaften gehört. Der Bildwinkel ist deshalb als Zielgröße zu verstehen. Es wäre grundsätzlich denkbar, solche Zielgrößen auf höherer Ebene im Rahmensystem der Systemkomponenten anzuordnen, in diesem Fall beispielsweise unter dem Oberbegriff „Aufnahmesystem“. Da jedoch die Ordnungsstruktur flexibel sein muß in bezug auf Ergänzungen, könnte der Fall eintreten, daß durch das Hinzufügen von Einflußparametern in einem anderen Ordnungszweig die Zielgröße auf eine andere Hierarchieebene verlegt werden muß. Im konkreten Fall des Bildwinkels könnte eine Einschränkung des nutzbaren Bildformats durch die Auswertesoftware den realen Wert verringern. Damit müßte diese Zielgröße auf das höchste Ordnungsniveau auf der Lösungsseite angehoben werden. Da jedoch der Bildwinkel wiederum ein Einflußparameter für andere Zielgrößen wie zum Beispiel der abgebildeten Objektfläche ist, ergibt sich schon in diesem einfachen Fall keine sinnvolle Struktur mehr. Aus diesem Grund wird ein eigenes Rahmensystem für alle funktionalen Zusammenhänge und deren Zielgrößen erstellt.

6.1.2.4 *Zusammenhang der Ordnungsstrukturen*

Primär laufen alle Planungsschritte zunächst im System der Funktionalitäten ab. Erst wenn Modifizierungen der Lösungsstruktur nicht mehr mit den aktuellen Geräten realisierbar sind, wird der Austausch im System der Komponenten vorgenommen, wobei dort alle betroffenen Parameter ermittelt werden. Mit dieser Information werden die damit verbundenen funktionalen Zusammenhänge auf den neuesten Stand gebracht. Diese Vorgehensweise entspricht einer hintereinander geschalteten Kombination aus Vorwärts- und Rückwärtsverkettung.

6.1.3 *Datenverknüpfung*

In bezug auf die Mechanismen der funktionellen Verknüpfung von Parameterinhalten zum Zweck der Zielgrößenberechnung (Vorwärtsverkettung) und der automatischen Werteanpassung (Rückwärtsverkettung) lassen sich die folgenden grundlegenden Betrachtungen anstellen.

6.1.3.1 *Abhängigkeitseigenschaften*

Systemparameter können auf- oder absteigend mit anderen verknüpft sein, welches einer Vorwärts- bzw. Rückwärtsverkettung entspricht. Da die Basisparameter in der Hierarchie beider verwendeten Rahmensysteme an unterster Stelle stehen, kann ihre Verknüpfungsrichtung nur aufsteigend sein (Vorwärtsverkettung), d.h. ihre Inhalte beeinflussen ausschließlich übergeordnete Zielgrößen. Wenn dem System Konfigurationsänderungen mitgeteilt werden, geben die Zielgrößen neue Forderungen nach unten an die Basisparameter weiter (Rückwärtsverkettung). Zusätzlich werden auch Zielgrößen zu höheren Hierarchieebenen aufsteigend und damit vorwärts verknüpft.

Sowohl die Ab- als auch die Aufwärtsverknüpfung kann mehrere Ziele aufweisen. Es ist also z.B. eine Zielgröße u.U. von mehr als einem Basisparameter abhängig, oder ein Parameter wirkt auf verschiedene Zielgrößen ein. Je höher die Komplexität dieser Abhängigkeiten ist, desto umfangreicher muß das ordnende Rahmensystem gestaltet werden und desto aufwendiger ist es, strukturelle Änderungen einzubringen.

Aus den komplexen Abhängigkeiten entstehen zwei Schwierigkeiten, nämlich erstens die Existenz von Alternativen bei der Rückwärtsverkettung von Forderungen und zweitens die Auslösung von Vorwärtsverkettungsoperationen in anderen funktionalen Zweigen des von einer Rückwärtsverkettung betroffenen Basisparameters. Der letztgenannte Effekt ist besonders kritisch, wenn er sich bei hoher Komplexität der beteiligten Parameter über mehrere Verzweigungen des Rahmensystems fortsetzt. Kreuzbezüge müssen dabei unbedingt vermieden werden, denn sie stellen Endlosschleifen bei den Verkettungsoperationen dar. Es ist deshalb bei der Realisierung eines Planungssystems eine entsprechende Kontrollmöglichkeit zu implementieren.

Um die zahlreichen Mehrdeutigkeiten in den Griff zu bekommen, müssen Behandlungsstrategien entwickelt werden. Die organisatorisch einfachste Methode der Anpassung von Parameterwerten ist die „Gleichbehandlung“ in Form einer prozentual zum jeweiligen Wertebereich identischen Veränderung. Jedoch trägt dies der zwangsläufig unterschiedlichen Bedeutung der Einflußgrößen keinerlei Rechnung. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Vergabe von Prioritäten für alle Parameter. Genau betrachtet

muß es sich hier um Veränderungsprioritäten handeln, d.h. die Größe mit der höchsten Priorität wird als erstes angepaßt, solange ihr Wertebereich es zuläßt. Erst dann folgt die nächste. Der Nachteil dieser Arbeitsweise liegt darin, daß immer erst der Spielraum eines Parameters vollständig ausgenutzt wird, obwohl dies im Grenzbereich sehr ungünstig sein kann. Der Vorteil liegt darin, daß die Anzahl der zu bearbeitenden Verknüpfungen klein gehalten wird, was sich besonders bei hoher aufwärts gerichteter Komplexität der beteiligten Parameter positiv auswirkt. Um die Regelbereiche der betroffenen Parameter klein zu halten, können anstelle der Prioritäten Gewichte eingeführt werden. Damit wird bei einer Anpassung jede der Größen mit unterschiedlichem Prozentanteil verändert.

Die Wertebereiche vieler Parameter weisen bedeutende Unproportionalitäten bezüglich einiger Leistungskriterien auf. Als Beispiel sei die Pixelanzahl eines CCD-Chips genannt. Innerhalb oder in der Nähe des Videostandards sind die Kosten und die geräte-technischen Folgeinvestitionen gering, wohingegen im High-End-Sektor mit einigen Megapixeln der Aufwand dramatisch in die Höhe schnellte. Solchen Effekten kann mit angepaßten Gewichtsfunktionen entgegengetreten werden, die außerdem nicht zwangsläufig stetig sein müssen. Nachteilig ist hier der große Realisierungsaufwand sowohl bei der Implementation als auch bei der Parameterdefinition

Gewichtsfunktionen stellen den Allgemeinfall der Parameterbewertung dar. Alle vorher genannten Ordnungskriterien sind darauf zurückführbare Sonderfälle und ihre Wirkungsweise ist dementsprechend durch bestimmte Funktionsdefinitionen erreichbar. Ein wichtiger Aspekt bei der Vergabe von Gewichten ist die Tatsache, daß je nach Applikation sehr unterschiedliche Randbedingungen existieren, die eine individuelle Justierung der Kriterien erfordern. Als Beispiele seien die nicht veränderbare Hardware-Ausstattung eines Anwenders oder die Vorgabe von höchster Geschwindigkeit bei der Bildaufnahme genannt. Ein Benutzer des Systems muß also in der Lage sein, die Reaktionsweise der Verknüpfungen für seine Zwecke zu optimieren. Es existieren dabei einige globale Tendenzen:

- Hardwarefixierung
- Zeitoptimierung
- Kostenoptimierung
- Genauigkeitsoptimierung
- Automatisierung
- Anpassung an Umgebungsbedingungen

Solche Zusammenhänge lassen sich mit einer höheren Instanz von Gewichtsfunktionen ausdrücken, welche jeweils gruppenweise auf Parametergewichte einwirken. Die Implementation einer solchen Funktionalität kann jedoch äußerst komplexe Verknüpfungen zur Folge haben. Es ist deshalb noch zu prüfen, wie groß die Effektivität dieser Art von Strategien ist und ob die Realisierung lohnt.

Eine einfachere Methode ist die Verwendung von Varianten. Zu jeder Lösung werden Alternativen mit unterschiedlichen Gewichtsansätzen geliefert. Die Auswahl und damit die Optimierung geschieht durch Vergleich der Leistungsdaten der Resultate. Solche Varianten müssen nicht absolut konform mit einer gegebenen globalen Tendenz sein

und kommen daher mit weniger komplizierten Gewichtsvariationen aus. Deshalb werden sie auch nicht optimale Lösungen, sondern nur gute Näherungen liefern.

In jedem Fall ist es notwendig, besondere Anforderungen an bestimmte Parameter durch deren Fixierung mit höchster Priorität unabhängig von andersgerichteten Tendenzen garantieren zu können.

Eine weitere übergeordnete Funktionalität besteht in der Beurteilung des Systemzustandes. Dieser wird repräsentiert durch die Parameterwahl und deren aktueller Ausnutzung ihrer Gewichtsfunktion. Als kritisch anzusehen wäre dabei zum Beispiel eine hohe Anzahl von Parametern, deren Extremwerte erreicht sind. Ungünstig wäre auch verschwendetes Potential in Form von vielen überdimensionierten Parameterinhalten. Die Aufdeckung von einzelnen und besonders wirksamen Extremwerten gehört ebenfalls dazu. Das System sollte in solchen Fällen Warnungen an den Benutzer generieren können. Es muß dazu geeignete Statistiken führen und bewerten. Da es sich hierbei um Informationen handelt, die oberhalb der technischen Parameterinhalte angeordnet sind, kann der Begriff ‚Meta-Wissen‘ aus der Expertensystemtheorie verwendet werden, der soviel wie „Wissen über das Wissen“ bedeutet.

6.1.3.2 *Formulierung von Abhängigkeiten*

Die Wirkungsweise eines Parameters im technischen Sinn ist durch seinen Wertetyp vorbestimmt. Dabei kann es sich um eine einfache Existenz, um mehrere Alternativen, um einen Wertebereich oder um eine mathematische Funktion handeln. Die Implementation muß so geschehen, daß sowohl aus einem Parameterinhalt der Einfluß auf eine Zielgröße bestimmt als auch durch die Forderung einer Zielgröße ein Parameterwert ermittelt werden kann.

6.1.3.3 *Verwendung von Zielgrößen*

Eine Zielgröße entsteht aus dem gemeinsamen Einfluß verschiedener Parameter. Streng gesehen sind immer mindestens zwei Parameter erforderlich, um eine sinnvolle Zielgröße zu bilden, denn wenn nur ein Parameter vorhanden ist, könnte man diesen und seine Zielgröße zusammenfassen. Weil jedoch erstens ein Parametersystem aus logischen Gründen nie vollständig sein kann, und weil zweitens eine ständige Neukonfiguration zulässig sein muß, ist es aus praktischen Gründen sinnvoll, Zielgrößen, die momentan nur von einem einzigen Parameter abhängen, trotzdem als solche bestehen zu lassen. Durch spätere Ergänzung des Systems können ja möglicherweise weitere hinzukommen. Ein Beispiel könnte das Bildrauschen eines CCD-Bildes sein, das in einer momentanen Parameterkonfiguration zunächst nur durch die Kameraeigenschaften bestimmt wird, weil die Informationen über einen Framegrabber nicht vorhanden sind und dieser deshalb als fehlerfrei angenommen wird. Kommen diesbezüglich neugewonnene Informationen hinzu, wird die Zielgröße als solche sinnvoll. Zielgrößen wirken selbst ebenfalls wieder als Parameter und Einflußgrößen für übergeordnete Ebenen. Sie gipfeln in den Leistungsdaten eines Systems.

6.1.3.4 Algorithmische Strukturen

Algorithmische Strukturen existieren im Planungssystem zwangsläufig in der Funktionalität der Datenverknüpfung. Auf unterster Ebene sind sie erforderlich zur Formulierung der direkten Abhängigkeiten zwischen Parametern und Zielgrößen. Außerdem ist der Vorgang bzw. das Schema der Weitergabe von Änderungen in Parametern oder Forderungen als Algorithmus zu bezeichnen.

Ein weiteres Einsatzgebiet von Algorithmen entsteht bei der Automatisierung von Teilaufgaben der Planung. Als Beispiel soll hier die automatische Standpunkt- und Aufnahmerrichtungsbestimmung dienen. Sie ist für die vorgesehene Funktionalität des Planungssystems nicht zwangsläufig erforderlich. Wenn man jedoch bedenkt, daß mit einer neuen Kamerawahl und eventuell daraus folgenden Änderungen von Bildmaßstäben, Aufnahmeentfernungen, Bildanzahlen und anderen geometrischen Parametern u.U. eine vollständig neue Standpunktanordnung erforderlich wird, kann man sich vorstellen, daß eine automatisierte Lösung dieser Aufgabe erhebliche Vorteile für die effektive Verwendbarkeit eines Planungssystems hat. Deshalb soll an späterer Stelle noch sehr genau auf eine solche algorithmische Komponente eingegangen werden.

6.2 Ablaufschema einer Planung

6.2.1 Vorwärtsverkettung der Parameter

Die Ablaufskizze in Abbildung 16 zeigt die globale Wirkungsweise des Planungssystems. Die beiden ersten Schritte sind dabei getrennt von dem Bereich „Planung auf Anwenderebene“ zu betrachten. Die „Bereitstellung der Funktionalitäten“ entspricht der

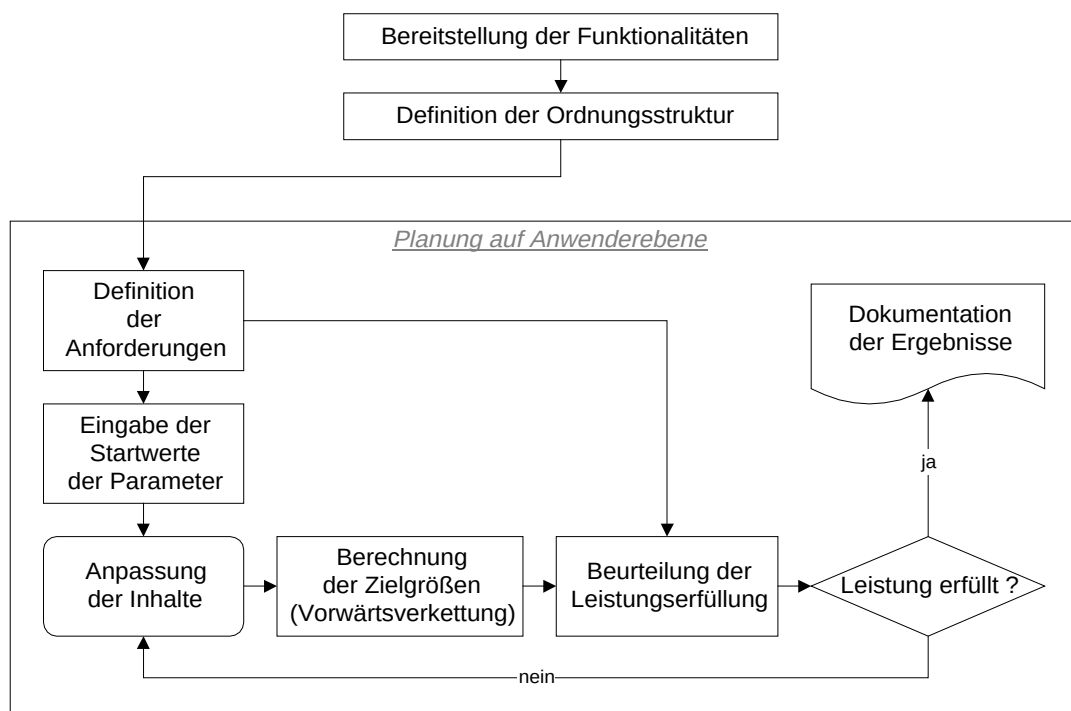


Abb.16: Ablauf der Planung

Implementation seitens des Entwicklers. Die „Definition der Ordnungsstruktur“ kann je

nach Bedarf oder Kenntnisstand auch beim Anwender erfolgen. Im Idealfall deckt eine Ordnungstruktur alle vorkommenden Problemstellungen und Konfigurationen ab und wird nur noch durch den Inhalt ihrer Parameter an die jeweilige Aufgabe angepaßt.

6.2.2 Parameteranpassung durch Rückwärtsverkettung

Eine wesentliche Aufgabe des Planungssystems ist die automatische Verfolgung der

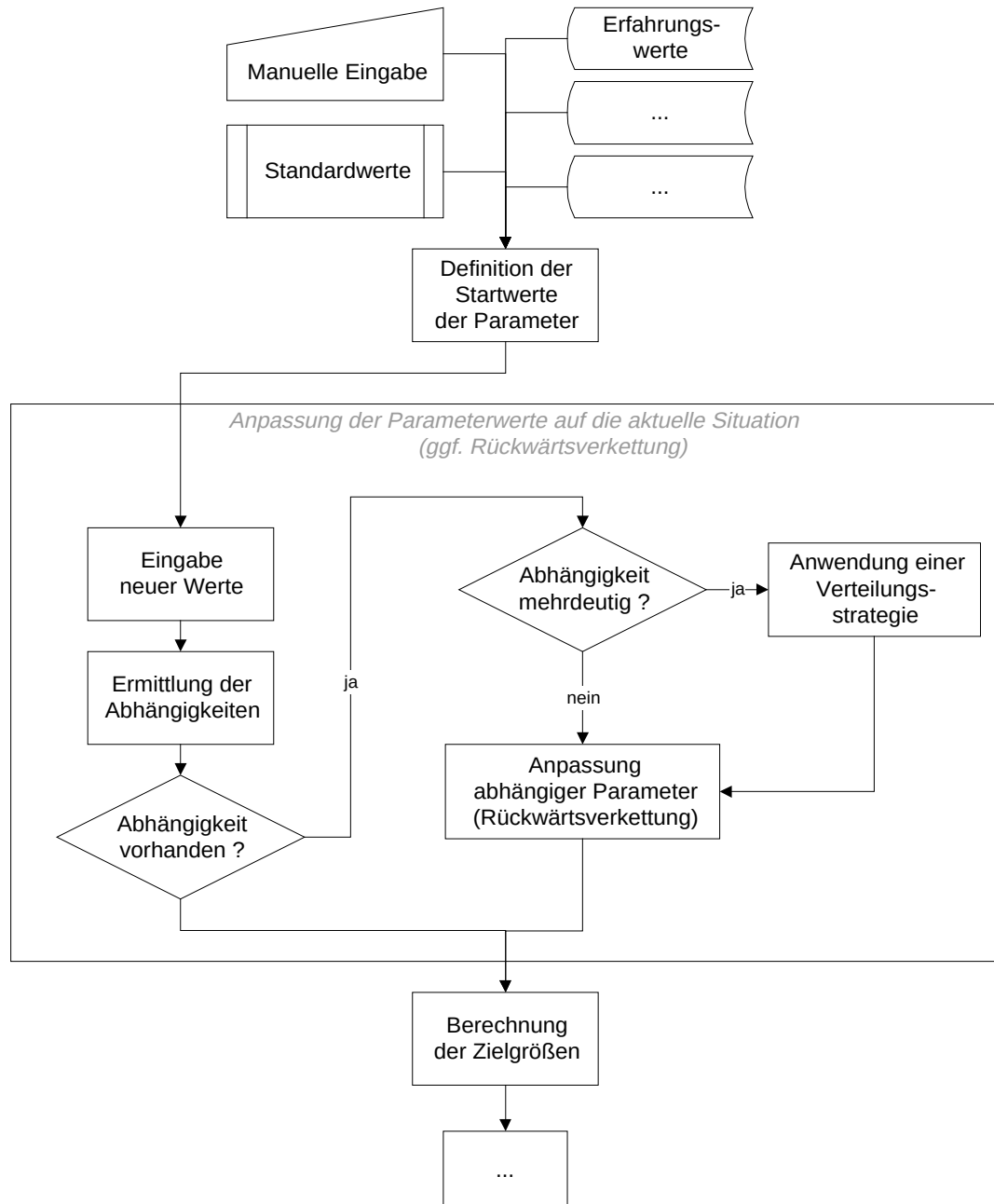


Abb.17: Automatische Anpassung abhängiger Parameter

sehr komplexen Abhängigkeiten von Parametern verschiedenster Ordnungsstufen. Die Abbildung 17 zeigt den Ausschnitt aus dem gesamten Ablauf, der diese Funktionalität

enthält. Die Startwerte der Parameter können auf verschiedene Weise gesetzt werden. Die „Anpassung der Parameterwerte auf die aktuelle Situation“ beginnt mit der Modifikation der dafür primär charakteristischen Größen wie beispielsweise der Sensorauflösung der verfügbaren Kamera. Dem Benutzer wird der Arbeitsschritt abgenommen, die mitunter rekursiven Auswirkungen einer solchen Änderung auf andere Inhalte nachzuvollziehen und einzugeben, indem solche Abhängigkeiten erkannt und automatisch aufdatiert werden. Da hier im Gegensatz zur Berechnung der Zielgrößen die umgekehrte Richtung der Verknüpfung innerhalb der komponentenorientierten Ordnungsstruktur verwendet wird, entspricht dieser Vorgang einer Rückwärtsverkettung. Dabei entstehende mehrdeutige Abhängigkeiten werden mit Hilfe der bereits erwähnten Strategien behandelt.

6.3 Die Implementierung

Die Arbeitsweise und das Erscheinungsbild der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entstandenen Implementierung des Planungssystems soll hier kurz demonstriert werden. Dabei ist zu beachten, daß aus Aufwandsgründen bisher nicht alle theoretisch beschriebenen Funktionalitäten in vollem Umfang realisiert werden konnten.

6.3.1 Bedienungsoberfläche

Beim Programmstart von PPS erscheint die in Abbildung 18 dargestellte Oberfläche. Das linke große Fenster enthält die einheitenorientierte Datenstruktur mit den Systemparametern, das rechte das System der Zielgrößen und funktionellen Abhängigkeiten. Beide sind im Grundzustand leer und werden entweder mit Hilfe der dafür vorgesehenen Dialogfenster oder durch das Laden von bereits auf Datei vorhandenen Definitionen mit Inhalt versehen.

Es sind die heute in fensterorientierten Oberflächen üblichen Standardbedienelemente und Funktionalitäten vorhanden, zu denen neben den Aufklappmenüs, den positionierbaren Werkzeugleisten und der Statuszeile auch eine dynamische Größenanpassung gehört. Das aktuell definierte Erscheinungsbild des Planungssystems einschließlich aller einstellbaren Optionen wird in einer Initialisierungsdatei gespeichert und steht bei erneutem Programmstart automatisch wieder zur Verfügung.

Die Aufklappmenüs haben im wesentlichen den gleichen Inhalt wie die Werkzeugleisten, weshalb hier die Beschreibung letzterer ausreichend ist. Die Standardleiste enthält die üblichen Funktionen der Dateibehandlung, des Druckens und der Online-Hilfe (Abbildung 19).

So zum Beispiel öffnet der zweite Schalter von links das standardisierte Dialogfenster für die Dateiauswahl. Die für das Planungssystem gültigen Datensätze besitzen als Endung das Kürzel „BPS“ und werden bevorzugt angezeigt.

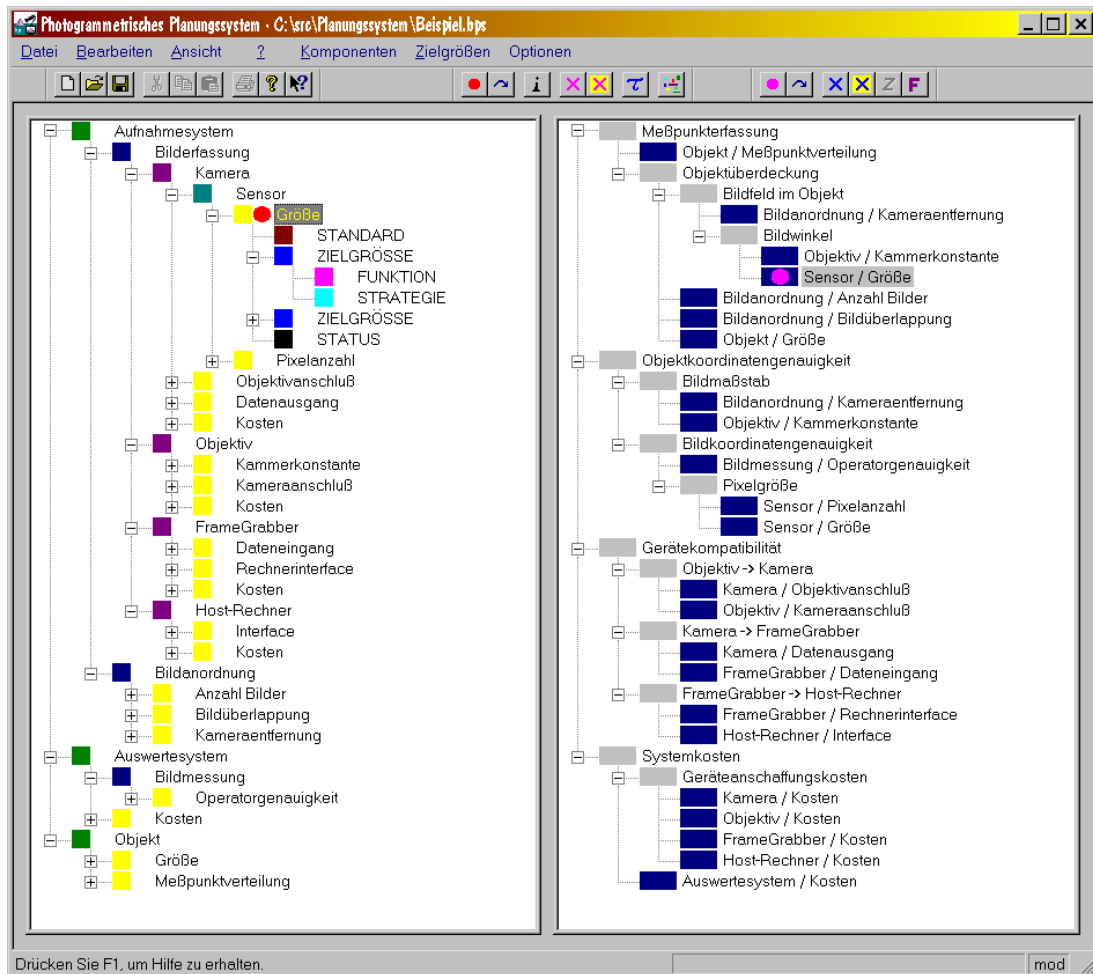


Abb.18: Hauptfenster



Abb.19: Standardfunktionen

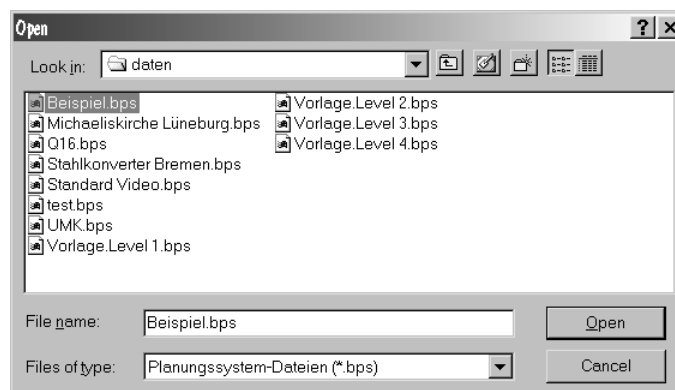


Abb.20: Dateiauswahl

Einheitenorientierte Datenstruktur

Für die Erstellung und Modifikation des Inhaltes der links angeordneten Baumstruktur ist die folgende Werkzeugleiste zuständig:



Abb.21: Bearbeitung der Komponenten

Der Reihe nach von links nach rechts enthält sie die Schalter für „(Element) Hinzufügen“, „Bearbeiten“, „Information“, „Löschen“, „Alle löschen“, „Typdefinition“ und „Positionsänderung“. Wichtig im Detail sind hier die Dialoge zum Hinzufügen neuer Elemente, mit dem der Aufbau der Datenstruktur durchgeführt wird und zur Typdefinition, dessen Inhalt den logischen Zusammenhang der einzelnen Elemente veranschaulicht. Ersterer erlaubt die Angabe eines Namens und die Auswahl des gewünschten Ordnungstyps aus der Reihe der vorhandenen Definitionen, die zur besseren Übersicht farblich gekennzeichnet sind. Nur beim Typ „Parameter“ sind das Eingabefeld „Inhalt“ und die Auswahlbox „Einheit“ aktiv. Mit den Schaltern der Gruppe „relativ zur Markierung“ kann die Position des neuen Elementes in der Baumstruktur bestimmt werden. Dieses Dialogfenster ist als „nicht modal“ angelegt, was bedeutet, daß es beim Aufruf keine Sperrung des Hauptfensters bewirkt und so mit diesem gleichzeitig aktiv ist. Dies bedeutet einen höheren Bedienungskomfort und findet sich auch bei verschiedenen anderen Fenstern im Planungssystem.

Jede Änderung oder Ergänzung, die mit diesem Dialogfenster oder auf irgendeine andere Art und Weise am Datenbestand vorgenommen wird, erzeugt in der Statuszeile des Hauptfensters den Indikator „ mod “, der dem Benutzer die Modifikation signalisiert und der nach einer Speicherung der Inhalte auf einen Datenträger wieder verschwindet.



Abb.22: Definition von Komponenten

Die Schaltfläche „Definition“ startet den Dialog der Abbildung 23, der für eine spätere Implementationsstufe nicht mehr zur Bearbeitung freigegeben wird. Es handelt sich in

dieser Liste um die oben erwähnten Ordnungstypen, deren Eingabe an dieser Stelle erfolgt. Nicht alle der für eine vollständige Parameterbeschreibung notwendigen Typen (siehe Abschnitt 3.2.1) sind bereits vorhanden. Insbesondere die Implementierung eines komplexen Wertebereichs für jeden Parameter sei hier erwähnt.

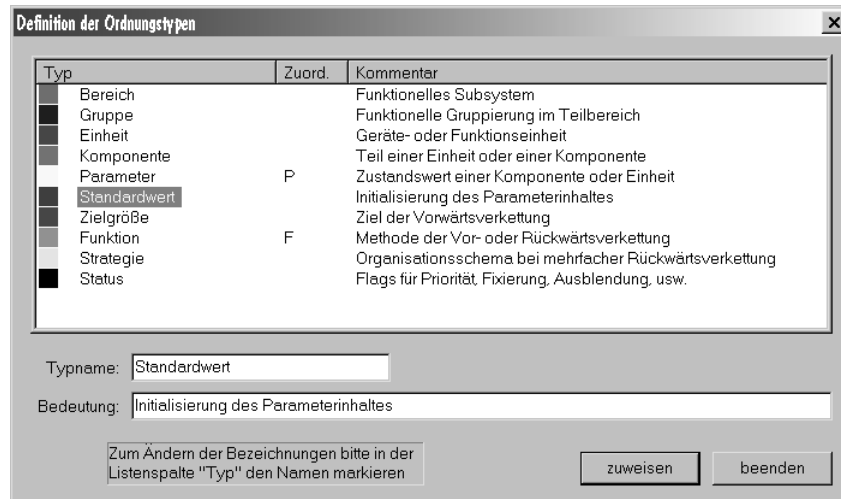


Abb.23: Definition der Ordnungstypen

Struktur der Zielgrößen

Die zur rechts angeordneten Baumstruktur der Zielgrößen gehörende Werkzeugleiste sieht folgendermaßen aus:



Abb.24: Bearbeitung der Zielgrößen

Die Schaltflächen, die mit oben bereits beschriebenen äußerlich identisch sind, entsprechen diesen auch inhaltlich mit Unterschieden nur im Detail. So zum Beispiel gibt es bei den Zielgrößen keine Ordnungstypen:



Abb.25: Definition der Zielgrößen

Hinzu kommen zwei Funktionen zur Verknüpfung von Parametern mit Zielgrößen („Z“), welche weiter unten bei der Beschreibung der Datenstrukturen noch genauer beleuchtet werden, und zur Eingabe von Formeldefinitionen („F“):

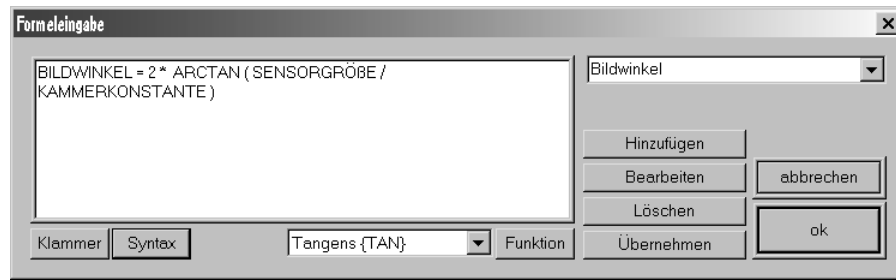


Abb.26: Eingabe funktioneller Zusammenhänge

Mit Hilfe dieses Formeleditors können die mathematischen Zusammenhänge der Datenverknüpfungen definiert werden. Es wird eine zur Programmiersprache C kompatible Syntax verwendet, welche vor der Abspeicherung mit der entsprechenden Schaltfläche geprüft werden kann.

Einige verfügbare Funktionalitäten besitzen keine expliziten Schalter oder Menü-einträge, sondern werden automatisch – zum Beispiel bei Verknüpfungsoperationen – aufgerufen.

Funktionsweise der Datenstrukturfenster

Die Grundlage bildet ein Standardbedienelement zur Darstellung von rekursiv verschachtelten Ordnungsstrukturen. Tatsächlich handelt es sich bei der Organisation und Verknüpfung der Daten im Planungssystem nicht um einen echten Baum. Es gibt jedoch keine geeignetere Methode für die Visualisierung der Systeminhalte.

Wie schon erwähnt, sind alle Einträge auf der linken einheitenorientierten Seite gemäß ihrer Typzugehörigkeit farblich gekennzeichnet. Hierdurch wird die Übersichtlichkeit erhöht, welches durch die Tatsache erforderlich ist, daß gleiche Ordnungstypen nicht zwangsläufig und sogar eher selten auf ein und derselben Hierarchiestufe des Baumes stehen, was auch in der Abbildung 18 zu sehen ist. Die Anordnung der Parameter bzw. Gruppierungselemente geschieht mit dem oben beschriebenen Dialogfenster in Abhängigkeit der aktuellen Markierung, welche durch einen großen roten Punkt neben dem Farbsymbol gekennzeichnet ist. Die Kästen mit den Zeichen „ + “ und „ - “ sind Schaltflächen und bedeuten, daß ein Element weiter unterteilt ist. Mit ihnen lassen sich die untergeordneten Baumstufen ein- und ausblenden. Die mit Großbuchstaben ausgeführten Bezeichner werden immer mit demselben Namen vergeben, weil sie für alle Parameter jeweils analoge Informationen enthalten.

Das rechts angeordnete Fenster der Zielgrößen unterscheidet sich in seiner Bedienung nicht von dem oben beschriebenen linken. Jedoch hat hier die farbliche Kennzeichnung eine andere Bedeutung. Sie trennt Zielgrößen (grau) von Parametern (blau). Letztere werden nicht als Bestandteile der Zielgrößen neu eingegeben, sondern sie werden aus dem einheitenorientierten Baum übernommen. Die Zuordnung geschieht durch die Markierung einer Zielgröße rechts und eines Parameters links mit anschließendem Betätigen der Schaltfläche „ Z “ in der Werkzeugleiste für die Zielgrößen, welche nur aktiviert ist, wenn die markierten Elemente vom Typ korrekt zusammenpassen. Die Namen der Parameter werden dabei vollständig, d.h. einschließlich ihrer übergeordneten Gruppierungsbezeichner, mitgeführt. Ihre Anzeigenlänge im

Zielgrößenfenster kann festgelegt werden und besitzt im Beispiel in Abbildung 18 zwei Stufen.

Rückwärtsverkettung und Strategien

Mit dem folgenden Dialogfenster werden Strategien erstellt, indem deren Elementanzahl und Reihenfolge sowie Gewichte, Limits und Vorzüge an die jeweilige Zielgröße angepaßt werden.

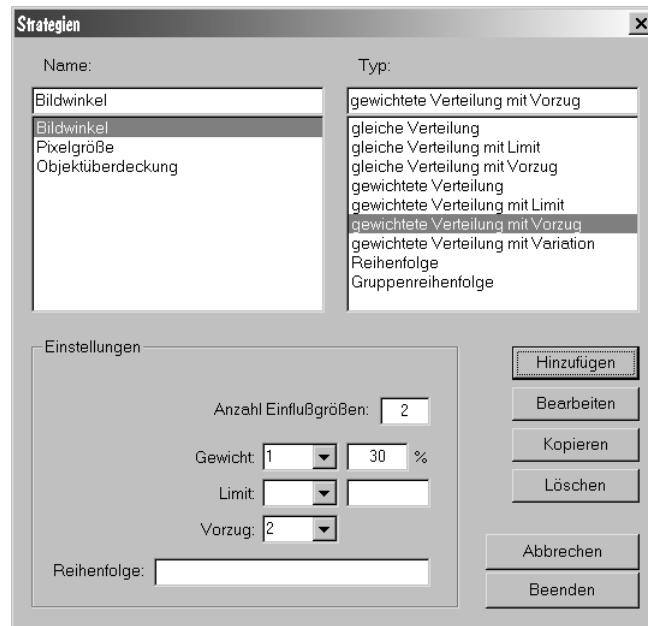


Abb.27: Auswahl und Anpassung von Strategien

Die interne Grundlage bildet je Strategie und Zielgröße ein Vektor der Einflußfaktoren und ihrer Prioritätswerte mit derselben Reihenfolge der Parameter, wie sie auch im Zielgrößenfenster sichtbar ist. Bei einer nicht eindeutigen Rückwärtsverkettung wird auf diese Inhalte zugegriffen, womit sich die jeweiligen Einflußanteile berechnen lassen.

6.3.2 Einrichten des Systems und Ablauf einer Planung

An dieser Stelle soll die Reihenfolge der Arbeitsschritte kurz beschrieben werden, welche für die Erstellung der Ordnungs- und Datenbasis einerseits und für die Durchführung einer Planung andererseits erforderlich sind. Sie entsprechen dem Ablaufschema, wie es in Abschnitt 3.3 auch graphisch beschrieben ist.

Zunächst werden mit den oben beschriebenen Hilfsmitteln sowohl die einheitenorientierte Datenstruktur als auch die der Zielgrößen eingegeben. Dieser Schritt ist nur notwendig, wenn nicht bereits ein für die Aufgabenstellung verwendbares Schema vorhanden ist. Gegebenenfalls kann ein existierendes System durch leichte Modifikationen auf den aktuellen Stand gebracht werden. Die durch die Durchführung der Planung zur Verfügung zu stellenden Leistungsparameter des Systems werden hier mit Hilfe des folgenden Dialogs festgelegt:

Übergeordnete Zielgröße	Wert
Meßpunkterfassung	100 %
Objektkoordinatengenauigkeit	0.005 m
Gerätekompatibilität	100 %
Systemkosten	45000 DM

Abb.28: Eingabe der Anforderungen

Das Fenster enthält eine Reihe von Eingabefeldern, deren Anzahl prinzipiell nicht begrenzt ist. Bei Nichtsichtbarkeit wegen eines zu kleinen Anzeigebereichs können sie mit dem rechts neben ihnen angeordneten Rollbalken entsprechend positioniert werden. Hier definierte Begriffe werden automatisch auf die höchste Ebene des Zielgrößenfensters übernommen und sind dort formal geschützt gegen Modifikationen. Mit der Ausführung dieser Aufgabe geschieht die eigentliche Definition des Systems. Auch hier gilt, daß schon in der ersten Iteration ein bereits vorhandener Datensatz benutzt werden kann.

Abb.29: Modifikation von Parameterinhalten

Das System führt auf der Basis seiner Parameterinhalte und der Verknüpfungsmethoden die Berechnung der Zielgrößen durch, welche in der Bestimmung der auf höchster Ebene angeordneten Anforderungsgegenstände gipfelt.

Die Anzeige der Ergebnisse erfolgt zunächst auf höchster Ebene (siehe Abbildung 30). Wird eine detaillierte Ansicht z.B. des Zweigs der nicht erfüllten Anforderungen gewünscht, kann sie mit Hilfe der Schaltfläche „Ergebnisse im Detail“ erhalten werden. Zusätzlich kann mit „Kritische Parameter“ zu Parametern gesprungen werden, deren aktueller Inhalt an der Grenze seines Wertebereichs liegt. Die „Variationsvorschläge“ zeigen genau die gegenteiligen Situationen an und offerieren so die nach Systemmeinung verfügbaren Spielräume.

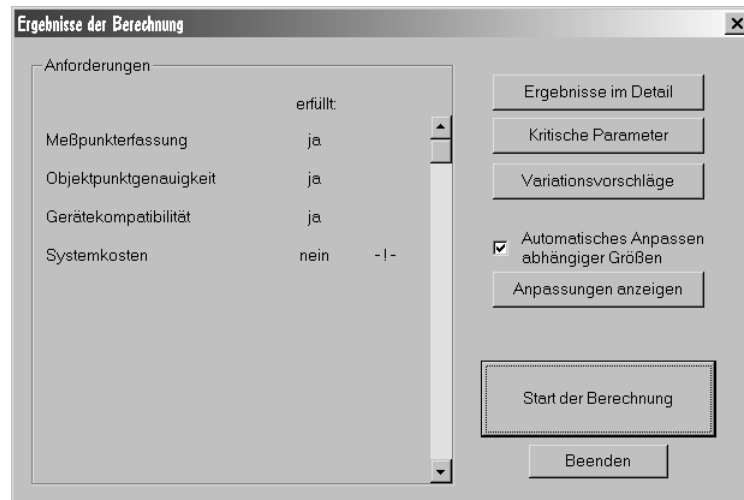


Abb.30: Ergebnisdarstellung

Bei Aktivierung der Option „Automatisches Anpassen abhängiger Größen“ im Dialogfenster der Ergebnisse treten die Mechanismen der Rückwärtsverkettung in Erscheinung. Bei der Durchführung der Berechnung wird vom System festgestellt, an welchem Punkt die Anforderungen nicht erreicht werden konnten und paßt selbständig unter Zuhilfenahme der vorhandenen Strategien sowie der zulässigen Wertebereiche die Parameterinhalte an. Dieser Vorgang läuft gegebenenfalls iterativ und rekursiv ab. Die vom System vorgenommenen Modifikationen können angezeigt werden. Alternativ können die Iterationen auch manuell vorgenommen werden, um eine Feinabstimmung des Planungsergebnisses durchzuführen oder um kritische Situationen abzufangen. Sie erlauben auch eine Teilerfüllung der Anforderungen, die besonders während der Angebotsphase eines Projektes von Bedeutung sein kann.

Alle Ergebnisse einschließlich ihres Zustandekommens können in der endgültigen Ausbaustufe des Planungssystems dokumentiert und auf Datenträger gespeichert oder ausgedruckt werden.

6.4 Schaffung einer Wissensbasis

Dieser Abschnitt befaßt sich mit der Gewinnung von Parameterinhalten, die zur Beschreibung eines photogrammetrischen Aufnahmesystems notwendig sind. Darunter fallen nicht die Eigenschaften von Objekten, weil sie von der jeweiligen Situation abhängig sind. Die Erarbeitung von prinzipiellen Zusammenhängen (z.B. in Form von photogrammetrischen Verfahren) gehört ebenfalls zur Erstellung der Wissensbasis. Diese Zusammenhänge finden sich in den Verknüpfungseigenschaften der Parameter wieder.

6.4.1 Informationsquellen

Die Inhalte der Parameter sind von sehr unterschiedlicher Natur, welches sich – wie oben beschrieben – einerseits durch die Vielfalt von Wertetypen und andererseits durch die große Anzahl der vertretenen technischen Spezialgebiete ausdrückt. Entsprechend vielschichtig sind die verfügbaren Informationsquellen. Die folgenden (vom Parametertyp abhängigen) Informationsgrundarten kann man unterscheiden:

- Theoretische Werte
- Herstellerangaben
- Erfahrungswerte
- Drittinformationen
- Kalibrierungsergebnisse

Es gibt Parameter, deren mögliche Zustände a priori in Form von „**theoretischen Werten**“ feststehen. Dafür ist ein prinzipieller (z.B. physikalischer) Zusammenhang verantwortlich, bei dem alle Werte gegeben sind. In diesem Fall handelt es sich um eine geschlossene Werteliste oder um den Wertetyp der „Existenz“. Darüber hinaus gibt es Wertelisten, deren Inhalt zum Teil feststeht und zum Teil durch aktuelle Entwicklungen neu definiert wird. Dabei sind die ergänzten Werte nicht abhängig von der jeweiligen Aufgabenstellung, sondern allgemeingültig für alle folgenden Anwendungen. Oft sind viele technische Informationen zu Geräten in der Begleitliteratur in Form von „**Herstellerangaben**“ zu finden. Die Problematik besteht in der Zuverlässigkeit solcher Daten, insbesondere dann, wenn sie zu den preisbildenden Leistungskriterien gehören. Zudem ist es häufig schwierig, die bei der Ermittlung der Werte verwendeten Testbedingungen zu erfahren oder nachzuvollziehen. Das Thema der Standardisierung kommt hier sehr stark zum Tragen. Bei längerem Einsatz eines photogrammetrischen Aufnahmesystems bekommt der Benutzer ein Gefühl dafür, welche Parameter kritisch sind und welche Inhalte die wenigsten Probleme verursachen. Solche „**Erfahrungswerte**“ sind u.U. wertvoller als auf andere Weise erhaltene Informationen, auch wenn keine ausreichende theoretische Absicherung existiert. Sie berücksichtigen möglicherweise übergeordnete Wirkungen ohne die tatsächliche Kenntnis der genauen Zusammenhänge. Dies ist selbstverständlich nur in einem nicht perfekt gestalteten Parametersystem denkbar. Jedoch ist wegen der theoretisch nur begrenzt realisierbaren Detailtiefe und aus Effektivitätsgründen bei der Verknüpfungsfunktionalität jedes System zwangsläufig unvollkommen. Informationen über Geräte und Zusammenhänge können auch beispielsweise aus der Fachliteratur oder aus Veröffentlichungen und Forschungsberichten stammen. Besonders bei Gerätebewertungen ist mit realistischeren Leistungsabschätzungen aus „**Drittinformationen**“ zu rechnen als z.B. aus den Herstellerangaben. Wenn Parameter nicht oder nicht ausreichend präzise bekannt sind, müssen sie gegebenenfalls mit geeigneten „**Bestimmungs- und Kalibrierverfahren**“ ermittelt werden. Genaugenommen muß man einen solchen Vorgang immer als Kalibrierung bezeichnen, was jedoch im Sprachgebrauch vor allem in trivialen Fällen nicht unbedingt üblich ist. Für die in einem photogrammetrischen Aufnahmesystem verwendeten Geräte gibt es eine Reihe von Kalibrierverfahren. Dabei sind zwei grundlegende Typen zu unterscheiden. Die Hersteller führen teilweise aufwendige Labortests durch (z.B. im Optikbau). Diese erfordern meistens einen hohen gerätetechnischen und damit auch finanziellen Aufwand und sind deshalb normalerweise nicht von Anwendern realisierbar. Außerdem sind nicht alle Ergebnisse in jedem Anwendungsfall relevant. Auf der Benutzerseite gibt es anwendungsbezogene Testverfahren wie zum Beispiel die photogrammetrische Feldkalibrierung von Kameras. Besonders diese sind in keiner Weise standardisiert. Diese Tatsache erschwert die Vergleichbarkeit von Resultaten erheblich und ist deshalb sehr ungünstig für ein Planungssystem, denn zwei auf gleiche Weise „falsch“ bestimmte Parameter schaden bei einer vergleichenden Planung nicht so sehr.

6.4.2 Standardwerte

Alle Parameterwerte können mit Standardinhalten versehen werden, welche Werte sind, die besonders häufig in Anwendungen zum Einsatz kommen. Der Hintergrund ist die Ermöglichung einer Planung auch in Situationen, in denen nicht alle Detailinformationen vorliegen. Als Nebeneffekt ergibt sich in vielen Fällen eine erhebliche Vereinfachung der Handhabung des Planungssystems. Die Standardwerte sind anpassungsfähig und damit auch für verschiedene Szenarien adaptierbar. Je nach Parameter ist die Festlegung des günstigsten Inhaltes mehr oder weniger schwierig und wird deshalb endgültig erst anwendungsabhängig und während des Einsatzes des Planungssystems erfolgen können.

Auf höherer Ebene sind logische Hilfskonstruktionen in Form von Standardsystemen oder -teilen an verschiedenen Stellen im Parametersystem nützlich. Sie erleichtern einige Definitionen, sie ermöglichen einen effektiveren Alternativenvergleich, sie vereinfachen die Systembeschreibung, und sie sind in vielen Fällen sogar als Lösung selbst geeignet. In Frage kommen:

- Standardgeräte
- Standardobjekte
- Standardverfahren
- Standardkonfigurationen
- Standardanwendungen

Die Definition von Standards ist sehr vielschichtig und hat nicht nur technische, sondern auch marktpolitische Aspekte. Deshalb lohnt es sich, dieses Thema gesondert zu behandeln.

6.5 Behandlung der Anordnungsgeometrie

6.5.1 Einordnung im Planungssystem

Wesentlicher Bestandteil einer photogrammetrischen Planung ist die Entwicklung einer geeigneten geometrischen Konfiguration. Dabei ergeben sich Aufnahmeposition und -richtung aus den Parametern Bildwinkel, Abbildungsmaßstab, Bildverknüpfung und Strahlenschnittwinkel sowie aus den speziellen Objekt- und Umgebungsbedingungen. Die Anordnung der Aufnahmen wiederum bestimmt Größen wie Geräte-, Orientierungs-, Zeit- und Auswerteaufwand.

Die übliche Vorgehensweise basiert auf der Erfahrung des geübten Planers, der die Grundkonfiguration einer Aufnahmesituation meistens sofort intuitiv aufstellen kann und sie anschließend nur in Details anpassen muß. Damit ist in den meisten Fällen ein individuelles Schema vorgegeben, das nicht zwangsläufig immer die beste Lösung darstellt. Mit den teilweise in Blockausgleichungsprogrammen zur Verfügung gestellten Möglichkeiten zur Simulationsrechnung können zwar Schwachstellen aufgedeckt werden, jedoch erfolgt kein Lösungsvorschlag. Es ist schwierig zu beurteilen, wann eine

nicht zufriedenstellende Konfiguration in Details angepaßt werden kann und wann sie durch eine radikal neue Grundanordnung ersetzt werden muß.

Ein Rechnerprogramm zur Anordnungsentwicklung kann ein effektives Hilfsmittel zur Lösung der oben genannten Aufgabe sein. Einerseits ist es möglich, Konfigurationen automatisch und damit schnell zu ermitteln, wobei von vornherein alle gegebenen Randbedingungen eingehalten werden. Andererseits können bestehende Anordnungen im Detail mit Hilfe von grafischen Werkzeugen angezeigt und modifiziert bzw. optimiert werden.

Im Konzept des photogrammetrischen Planungssystems ist ein Werkzeug zur automatischen Anordnungserstellung als ein Algorithmus zu sehen, der einerseits die Abhängigkeit von Zielgrößen wie beispielsweise Aufnahmezeitbedarf oder Auswerteaufwand von den geometrischen Parametern des Aufnahmesystems beschreibt und der andererseits Zielgrößen wie Aufnahmeorte und -richtungen direkt liefert. Streng gesehen ist nur das (komplizierte) Schema zur Beurteilung von Konfigurationen wirklich notwendig für das Planungssystem, die betroffenen Parameter können nach Anmeldung der Notwendigkeit durch die jeweilige Abhängigkeit auch manuell angepaßt werden. Der Entwicklungsschritt zur vollständigen Automatisierung scheint jedoch erheblich kleiner zu sein als der des Schemas selbst.

In der Literatur sind verschiedene Ansätze zur Optimierung und automatischen Generierung von Netzkonfigurationen zu finden. Wie schon oben erwähnt, beschreibt Mason [Mason et al, 1992] ein Expertensystem, das ausschließlich für diesen Zweck konzipiert ist. Oft zitiert wird Fraser [z.B. Fraser, 1989] zum Thema der Optimierung von Anordnungen und deren Beurteilung. Im folgenden soll ein eigener Ansatz entwickelt werden.

6.5.2 Ausstattungsmerkmale

Die folgenden Ausstattungsmerkmale kennzeichnen eine effiziente Entwicklungsumgebung für photogrammetrische Konfigurationen im Nahbereich:

- 3D-Darstellung von CAD-Daten mit Datenimport
- grafische Benutzeroberfläche mit Assistenten
- Intelligente Objekt- und Umgebungsmodellierung
- Multi-Layer-Darstellung (Objekt / Meßpunkte / Paßpunkte / ...)
- Datenbanken: Kameras / Objektive / Lichtquellen
- Visualisierung von Bildflächen im Objekt
- Positionierungsvorschläge: Standpunkte / Verknüpfungspunkte / Paßpunkte
- Simulationsrechnung durch Blockausgleichung
- Automatisches Kennzeichnen von Schwachstellen oder Extremwerten

6.5.3 Automatische Positionierung von Aufnahmestandpunkten

An dieser Stelle wird ein Vorschlag erarbeitet, wie die automatische Bestimmung von Kamerastandpunkten bewerkstelligt werden kann. Dazu müssen zunächst Voraussetzungen und Einschränkungen festgelegt werden. Es folgen Überlegungen zu Objekten und Sichten sowie zu Abbildungseigenschaften, geometrischen Aspekten und Wirtschaftlichkeitsbedingungen.

Voraussetzungen

Als gegeben sollen für dieses Teilproblem die folgenden Informationen angenommen werden:

- Form des Objektes als CAD-Modell
- Lage des Objektes im Umgebungsraum
- Ausgestaltung des Umgebungsraumes
- Lage und Form von Sichtbegrenzungen im Umgebungsraum
- Koordinaten der Zielpunkte
- ggf. Informationen über gemeinsam abzubildende Zielpunkte
- Oberflächennormale in jedem Zielpunkt, Kanten- oder Eckeninformationen
- Abbildungsgeometrie des zur Verfügung stehenden Aufnahmesystems

Das Fehlen von Informationen führt nicht zur Unlösbarkeit der Planungsaufgabe, sondern zur Vereinfachung und damit zu geringerer Präzision der Lösung im Sinne der Effizienz. Die fehlenden Details werden dabei durch Standarddefinitionen ersetzt. Im Einzelfall muß beurteilt werden, ob die jeweilige Vereinfachung zulässig ist oder die Planung insgesamt gefährden kann.

Einschränkungen

Grundsätzlich wird hier von statischen Konfigurationen ausgegangen, auch wenn die Erweiterung auf bewegte Systeme an einigen Stellen trivial ist. Besondere Randbedingungen werden außer acht gelassen. Andere Medien als die Umgebungsluft oder auch spezielle Klimaeffekte werden nicht berücksichtigt.

Komplexe Objekte und Sichtbegrenzungen

Die Berechnung von Sichtstrahlen durch Objekte hindurch ist am einfachsten möglich, wenn ein Volumenmodell erstellt werden kann. Der Umgebungsraum wird je nach Situation in mehr oder weniger große Voxel eingeteilt. Jedes dieser kleinsten Raumelemente wird auf seine Zugehörigkeit zum Objekt oder zu Sichtbegrenzungen überprüft und ggf. logisch gefüllt. Für Sichtstrahlen gilt die einfache Bedingung, daß kein gefülltes Voxel auf ihrem Weg vom Projektionszentrum bis zum Zielpunkt liegen darf. Die Schwierigkeit besteht bei diesem Detailproblem in der Generierung des Volumenmodells aus CAD-Daten. Mit Hilfe von modernen 3D-Konstruktionsprogrammen lassen sich möglicherweise viele Objekte für die angestrebte Planungsaufgabe ausreichend genau und sehr effektiv auch ohne CAD-Daten modellieren. Außerdem ist es für viele Meßaufgaben nicht erforderlich, eine eventuell vorhandene komplexe Objektstruktur auch wirklich detailgetreu zu berücksichtigen. Es kann aber auch vorkommen, daß eine einfache Lösung des Meßproblems nicht so effizient ist, wie unter Berücksichtigung der komplexen Objektstruktur möglich wäre.

Definition von Abbildungseigenschaften

Die Abbildungseigenschaften des zur Verfügung stehenden Aufnahmesystems werden für den hier angestrebten Zweck im wesentlichen durch den Bildwinkel modelliert, welcher bei nicht-quadratischen Bildformaten aus zwei Werten besteht. Weitere eingrenzende Parameter sind die kürzeste Einstellentfernung, die Tiefenschärfe und der Abbildungsmaßstab. In letzterem ist das Kriterium der Zielerkennbarkeit – repräsentiert z.B. durch die Signalgröße – bereits enthalten. Für die photogrammetrische Praxis kann i.d.R. von einer Fokusfixierung der Objektive ausgegangen werden, die aus Gründen der Kamerakalibrierung oft vorgezogen wird. Damit ist der Objektschärfebereich nur von der gewählten Blendenöffnung und nicht zusätzlich von einer variablen Fokussierung abhängig. Als Abbildungsgeometrie wird vereinfachend die ideale Zentralperspektive angenommen. Sonderbauformen wie z.B. „Fish-Eye“ - oder telezentrische Objektive werden nicht berücksichtigt. Es finden ausschließlich flächig abbildende Systeme Verwendung, d.h. es sind keine Zeilenkameras oder scannenden Systeme zulässig.

Bestimmung von möglichen Standpunkten

Der gesamte Umgebungsraum wird in ein regelmäßiges Raster eingeteilt, dessen Dichte manuell bestimmt oder iterativ verändert wird, bis eine Lösung gefunden oder die Nichtlösbarkeit festgestellt ist. Es kann dabei zunächst von einer Ebene ausgegangen werden, die zum einen durch den Untergrund (z.B. Hallenboden) und zum anderen z.B. durch die übliche Aufbauhöhe der verwendeten Kamera definiert wird. Erst wenn in dieser Standardebene keine Lösung gefunden werden kann, muß dreidimensional gearbeitet werden. Die Rasterpunkte, die in einem Objekt oder einer Sichtbegrenzung zu liegen kommen, werden eliminiert. Von jedem Rasterpunkt ausgehend wird zu jedem Zielpunkt ein Sichtstrahl berechnet. Sichtstrahlen, die das Objekt oder eine Sichtbegrenzung berühren, ehe sie den Zielpunkt erreichen, werden eliminiert. Standpunkte ohne Zielsicht werden ebenfalls verworfen. Anschließend werden die begrenzenden Bedingungen der Abbildungseigenschaften überprüft. Sichtstrahlen, auf denen die jeweiligen Zielpunkte nicht innerhalb der Schärfzone liegen, fallen weg. Das gleiche gilt für zu große Entfernungen des Zieles vom Standpunkt, womit der vorgeschriebene minimale Abbildungsmaßstab nicht eingehalten wird. Ein weiteres Kriterium entsteht aus der Art der Punktdefinition bzw. der Signalisierung. In den meisten Fällen sind Zielmarken nur bis zu einem von der Frontalabbildung abweichenden Maximalwinkel meßbar. Daraus folgt, daß eine Bewertung der Objektoberflächennormalen erforderlich ist, deren Richtung ein weiteres Ausschlußkriterium bildet. Anschließend wird für jeden Zielpunkt und die verbleibenden Sichtstrahlen festgestellt, ob er von mindestens zwei Standpunkten aus zu sehen ist. Wird diese Bedingung nicht eingehalten, generiert das System eine Unterbrechung. (Die Behandlung solcher Unterbrechungen wird später detailliert beschrieben.) Die Anzahl erforderlicher Sichten kann durch eine vorgegebene höhere Redundanz – z.B. zum Zweck der Erhöhung der Fehlertoleranz oder der Steigerung der Genauigkeit – größer als zwei sein.

Zielflächen

Die Erweiterung von zu vermessenden Punktkoordinaten auf flächenhafte Informationen läßt sich für das hier vorliegende Konzept des Planungssystems einfach realisieren durch die Aufrasterung einer Objektfläche in ein mehr oder weniger dichtes Punktnetz. Anschließend kann noch definiert werden, daß die zu einer speziell ausgewiesenen Punktgruppe gehörigen Elemente für bestimmte Operationen nur gemeinsam behandelt werden dürfen.

Einteilung der Bilder

Durch die bekannten Bildwinkel kann für eine bestimmte Aufnahmerichtung festgestellt werden, ob ein Zielpunkt innerhalb des Bildformats abgebildet wird oder nicht. Das Problem besteht darin, die auf einem Standpunkt vorhandenen Sichten möglichst effektiv, d.h. mit einer minimierten Anzahl Aufnahmerichtungen zu bündeln. Dabei sind verschiedene Strategien denkbar, welche Gegenstand genauerer Untersuchungen sein müssen und auf die deshalb an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll. Der einfachste Fall ist die sequentielle Einteilung in unmittelbar aneinander gereihte Bilder, ggf. in mehreren übereinanderliegenden Ebenen und mit einer mehr oder weniger willkürlich festgesetzten Startrichtung.

Reduzierung der Bildanzahl

Mit dem bis hier beschriebenen Verfahren wird bei entsprechender Rasterdichte eine Unzahl von Strahlenbündeln erzeugt, die normalerweise nicht alle zur Lösung der Meßaufgabe erforderlich sind. Zu ihrer Reduzierung können Kriterien wie Redundanz oder Korrelationen der Bilder untereinander verwendet werden. Zunächst ist jedoch die Definition von Qualitätskriterien für Bildinhalte erforderlich. Anders ausgedrückt muß beurteilt werden, welches Bild besonders wertvoll für den Block ist und welches ohne Einbußen eliminiert werden kann. Dieses Problem ist nicht trivial und bedarf weiterer Untersuchungen. Ein erster Ansatz geht von der hohen Korrelation von Bildinhalten mit ähnlichen Aufnahmerichtungen auf benachbarten Standpunkten aus. Ein anderer optimiert die an jedem Zielpunkt eintreffenden Sichtstrahlen mit Hilfe ihrer gegenseitigen Schnittwinkel. Es sind weiterhin iterative Lösungen denkbar, die von einem kleinen Grundsystem ausgehend versuchen, wachsend alle Bereiche zu integrieren.

Verknüpfungspunkte

Die als Resultat erhaltene Bildeinteilung deckt zwar alle angeforderten Meßziele ab, sie ist aber geometrisch noch nicht stabil, weil nicht zwangsläufig die erforderlichen Bildverknüpfungen gewährleistet sind. Letzteres ist nur in den Situationen gegeben, in denen Anzahl und Verteilung der zu messenden Objektpunkte zur vollständigen Orientierung aller beteiligten Bilder zufällig ausreichend sind. In allen anderen Fällen müssen zusätzliche Verknüpfungspunkte bereitgestellt werden. In einem dem Normalfall nahekommenden Bildpaar ist es nicht schwierig, ideale Verknüpfungspunktpositionen zu bestimmen: Sie sind bekannt als die „Gruber-Punkte“. Bei stark konvergenten Aufnahmen und sehr unterschiedlicher Objektabdeckung muß von der gemeinsam abgebildeten Objektfläche ausgegangen werden. Kompliziert wird es durch die Tatsache, daß zur Orientierung eines Bildes nicht nur ein Nachbarbild,

sondern u.U. eine ganze Reihe überlappender Bilder herangezogen werden können. Als geeignete Strategie, welche jedoch im Detail noch näher untersucht werden muß, erscheint die Definition eines gleichmäßigen Rasters von Objektpunkten, für die ebenso wie für die Meßziele zu jedem in Frage kommenden Standpunkt die Sichtstrahlen nach der oben genannten Methode berechnet werden. Ihre Anzahl wird in einem ersten Schritt reduziert durch die Tatsache, daß sie in mindestens zwei Bildern sichtbar sein müssen. Die Lageübereinstimmung mit bereits vorhandenen Meßzielen führt zu weiteren Ausschlüssen. Anschließend wird für jedes Bild überprüft, welche der erfaßten Punkte zur Orientierung am besten geeignet sind. Diese werden markiert, und am Schluß der Prozedur fallen alle von keinem Bild verwendeten Punkte heraus. Um zu vermeiden, daß im Objektraum dicht nebeneinanderliegende Punkte gleichzeitig benutzt werden, obwohl einer davon ausreichen würde, kann mit gewichteter Markierung gearbeitet werden. Das bedeutet, daß der optimale Punkt z.B. mit einer „1“ markiert wird und ein benachbarter und etwas weniger gut geeigneter z.B. proportional zu seinem Abstand mit „0,7“ belegt wird. Eine Strategie hat zu entscheiden, ob zwei Punkte mit je einer „1“ oder lieber ein Punkt mit einer „0,7“ verwendet werden sollen. Dabei ist zu beachten, daß es günstiger ist, einen Punkt in vielen Bildern zu verwenden als viele Punkte in jeweils wenigen Bildern. Die geometrische Stabilität ist grundsätzlich bei einer höheren Anzahl Verknüpfungspunkte besser, aber die Signalisierung kann sehr aufwendig oder teilweise unmöglich sein und der Auswerteaufwand steigt ggf. erheblich an. Eine sehr große Schwierigkeit besteht unabhängig von der Geometrie in der korrekten Einschätzung der Signalisierbarkeit des Objektes. Von Bedeutung sind hierbei die physikalischen Eigenschaften der Oberfläche ebenso wie deren Struktur und Kleinformen oder auch allgemein die räumliche und zeitliche Erreichbarkeit.

Paßpunkte

Die Bestimmung von Paßpunkten hat grundsätzlich den Zweck, das durch die photogrammetrische Modellierung entstehende lokale Koordinatensystem in eine übergeordnete Referenz einzubinden, oder – geodätisch ausgedrückt – das Datum zu bestimmen. Je nach Aufgabenstellung ist eine vollständige Lagerung erforderlich, oder es kann bereits die Maßstabsermittlung ausreichend sein. In ersterem Fall sind sieben Transformationsparameter – nämlich drei Translationen, drei Rotationen und eine Skalierung – zur Verfügung zu stellen, welche durch die vollständigen dreidimensionalen Koordinaten von drei nicht auf einer Geraden liegenden Objektpunkten bereits überbestimmt gegeben sind. Für den Maßstab reicht bereits eine bekannte Strecke zwischen zwei photogrammetrisch meßbaren Objektpunkten aus. Ein sogenanntes freies Netz kann verwendet werden, wenn die Aufgabenstellung maßstabs- und lageunabhängige Aussagen fordert, wie es beispielsweise bei relativen und prozentual definierten Lageänderungsmessungen der Fall sein kann. Die Vorteile liegen in einer von inneren Spannungen der Paßinformationen freien und damit u.U. genaueren Punktbestimmung. Andererseits können Paßpunkte mit hohem Genauigkeitsniveau durch die Stabilisierung der Blockgeometrie zur Genauigkeitssteigerung der Ergebnisse beitragen oder aber als Kontrollmechanismus dienen. Paßinformationen stellen also einen wesentlichen Bestandteil des Gesamtsystems dar. Die automatische Generierung von Positionierungsvorschlägen ist jedoch nicht praktikabel. Die Bestimmungsmethoden von Paßelementen sind sehr unterschiedlich und in ihrer Methodik und Anlage stark abhängig von den

verwendeten Meßtechnologien, die oft nicht aus dem photogrammetrischen Bereich stammen. Deshalb kann das Planungssystem zwar Vorschläge für optimale Paßpunktlagen erstellen, aber ob diese bei der Realisierung tatsächlich verwendbar sind, ist mehr als fraglich.

6.5.4 Beurteilungskriterien

Die Frage, ob eine aus den obengenannten Methoden hervorgegangene Konfiguration den gestellten Anforderungen entspricht, führt zur Definition von geeigneten Beurteilungskriterien und damit erneut zu einem Kernthema der vorliegenden Arbeit. Geeignete geometrische Parameter für das hier vorliegende Problem sind die Redundanz, der Abbildungsmaßstab und die Strahlenschnittwinkel, wobei jeweils die erreichten Minimalwerte ausschlaggebend sind. Diese Kriterien sind streng ermittelbar. Zusätzlich können Optimierungsbedingungen aufgestellt werden, welche nur iterativ bzw. durch den Vergleich von mehreren Alternativlösungen umgesetzt werden können. Dazu gehören z.B. die Bild- und Standpunktanzahlen, die üblicherweise aus Aufwandsgründen zu minimieren sind. Sie sind allerdings zum Teil auch schon in der Redundanzberechnung enthalten, wenn diese die erforderlichen Orientierungsparameter für jedes Bild berücksichtigt. Aus der unten näher erläuterten Simulationsrechnung können Genauigkeitsangaben für die Objektkoordinaten gemacht werden. In sehr vielen Anwendungsfällen ist dieses Kriterium zusammen mit einer Zuverlässigkeitsangabe ausreichend für die Konfigurationsbeurteilung.

Simulationsrechnung

Die zuverlässigste Methode der Beurteilung einer Konfiguration ist zweifellos die Simulationsrechnung mit Hilfe einer Bündelblockausgleichung. Sie kann die zu erwartenden Genauigkeiten der Objektkoordinaten in Form von Standardabweichungen liefern und Aussagen über deren Zuverlässigkeit treffen. Indirekt ist eine Kontrolle über die Vollständigkeit der Konfiguration gegeben. Jedoch erfordert die Durchführung einer Simulationsrechnung die zusätzliche Bereitstellung aller Paß- und Verknüpfungsinformationen, deren automatische Generierung, wie bereits weiter oben beschrieben wurde, durchaus problematisch sein kann. Die übliche Schwierigkeit der Näherungswertbestimmung beim Einsatz einer Bündelblockausgleichung ist bei der hier vorliegenden Problemstellung nicht vorhanden, weil alle zu behandelnden Elemente durch das System selbst berechnet wurden. Dagegen kann ein Nachteil aus der vergleichsweise aufwendigen und damit langsamen Berechnungsmethode erwachsen: Trotz moderner Rechentechnik kann die Überprüfung sehr vieler Alternativen leicht den Zeitrahmen sprengen.

Problembehandlung

Während der oben beschriebenen Aktionen kann es zu Zuständen kommen, die die automatische Lösbarkeit der gestellten Aufgabe in Frage stellen. Dabei wird es Situationen geben, die die angestrebte Lösung nur knapp verfehlen, und solche, die ein grundsätzliches Scheitern darstellen. An jeder kritischen Stelle wird vom Planungssystem eine Unterbrechung der Abläufe generiert und der jeweilige „Fehler“ in eine Kategorie eingeordnet. Es werden Strategien verwendet, die eine spezialisierte Behandlung der unterschiedlichen Fehlerklassen ermöglichen, ohne gleich das gesamte

System zu kippen. Man kann dabei mit Prioritäten, Spielräumen und Extremwertdefinitionen arbeiten. Spielräume können z.B. bei der Einhaltung von Redundanzen angegeben werden, wenn es mehr auf die Vollständigkeit des Ergebnisses als auf die Zuverlässigkeit des Details ankommt. Unterschiedliche Prioritäten können zum Einsatz kommen, wenn die Minimierung der Bildanzahl gegenüber der Vollständigkeit der Objekterfassung im Hintergrund steht. Bei zwei mit Spielraum versehenen und sich gegenseitig bedingenden Parametern ist eine differenzierte Prioritätenvergabe ebenfalls sinnvoll. In den logischen Bereich der Spielräume fällt auch die Definition von Extremwerten von Systemparametern. Darunter sind Inhaltswerte zu verstehen, die aufgrund ihrer Größe eine besondere Behandlung erfordern. Diese sind an anderer Stelle bereits begrifflich beschrieben worden. Im vorliegenden Fall der Geometrieplanung sei als Beispiel die Erfassung eines einzelnen vom Hauptobjekt vergleichsweise weit entfernten Punktes erwähnt, dessen meßtechnische Erfassung z.B. den Orientierungsaufwand unverhältnismäßig stark erhöhen kann. Das Planungssystem kann durch die Erkennung solcher Spitzen erheblich effektiver arbeiten, jedoch bedarf es komplexer Definitionen zur Einordnung von bestimmten Größen als Extremwerte und deren detaillierter Behandlung. Grundsätzlich gibt es verschiedene organisatorische Möglichkeiten für das System, auf Unterbrechungen zu reagieren. Die einfachste ist die Feststellung der Unlösbarkeit und ein darauf folgender Abbruch des gesamten Vorganges, wenn ein Kriterium trotz Anwendung aller oben aufgezählten Möglichkeiten nicht erfüllt werden kann. Eine Alternative ergibt sich aus der Zulässigkeit von Teil- oder Näherungslösungen. Erklärt das Programm die Unlösbarkeit des Gesamtsystems und geht zu einem reduzierten Zustand über, muß es den Benutzer über diesen Schritt in geeigneter Weise informieren. An dieser Stelle existiert selbstverständlich auch die Möglichkeit, den Benutzer zu einer manuellen Interaktion aufzufordern.

6.5.5 Erweiterung auf komplexe Aufnahmesysteme

Bisher wurde nicht explizit darauf eingegangen, daß Aufnahmekonfigurationen aus mehreren und sehr unterschiedlichen Kameras und Objektiven bestehen können. Grundsätzlich sind auch für diese Problemstellung Strategien denkbar. Es wäre beispielsweise möglich, bei festgestellter Unlösbarkeit der Aufgabe durch ein zugrundeliegendes Ausgangssystem an den kritischen Stellen Vorschläge für alternative Hardware-Parameter zu berechnen und auszugeben bzw. zu verwenden. Allerdings sind die Kombinationsmöglichkeiten so umfangreich, daß eine Systematik immer nur im Rahmen bestimmter Standards gefunden werden kann. An dieser Stelle vermischen sich die Aufgaben der reinen Standpunktsuche mit denen des eigentlich übergeordneten Planungssystems. Daraus folgt, daß im Idealfall einer automatischen und vollständigen Konfigurationserstellung beide genannten Komponenten nicht mehr voneinander trennbar sind.

6.5.6 Verwendung von Standardsystemen

Eine übergeordnete Strategie bei der Bestimmung von Standpunkten und Bildeinteilungen ist realisierbar durch die Verwendung von standardisierten Systemen. Dabei gilt für alle oben beschriebenen Aktionsschritte, daß zunächst geprüft wird, ob die

momentane Problemstellung durch einen bereits vorhandenen Standard gelöst werden kann. Ein Standard kann ein Gesamtsystem sowie logische, geometrische und organisatorische Komponenten daraus repräsentieren. Als Beispiel kann die Anordnung von zwei Kameras nach dem photogrammetrischen Normalfall dienen. Auch an dieser Stelle ist die Einführung von Spielräumen sinnvoll, welche geringfügige Abweichungen von den idealen Bedingungen zulassen. Der Vorteil des Einsatzes von Standards an dieser Stelle kann das Resultat einer automatischen Planung beschleunigen und übersichtlicher gestalten. Zusätzlich können interne Entscheidungsvorgänge vereinfacht und damit die Gefahr von Sackgassen vermindert werden.

6.6 Konzept einer netzwerkbasierten Dienstleistung

6.6.1 Grundidee

Das Forum auf Basis des Internet soll sowohl Anwendern als auch Entwicklern und Systemanbietern ein Hilfsmittel für die fachbezogene Kommunikation und für die Erarbeitung von Problemlösungen auf dem Gebiet der Nahbereichs- und Industrie-photogrammetrie sein.

Aus Anwendersicht kann es dazu dienen, die Marktübersicht zu verbessern. Bei entsprechender Ausbaustufe können interaktiv Planungsaufgaben durchgeführt oder vorhandene Systeme miteinander verglichen sowie auf ihre Eignung für eine bestimmte Aufgabe überprüft werden. Die ständige und sofortige Verfügbarkeit von Informationen und Angeboten kann Planungsphasen erheblich verkürzen.

Für Entwickler besteht die Möglichkeit, Anforderungen der Anwender zu sammeln und Feedbacks von vorhandenen Lösungen in neue Entwicklungen einfließen zu lassen.

Anbieter können das Forum für eine sehr zielgerichtete Darstellung ihrer Produkte und Dienstleistungen nutzen. Interaktive Anforderungskataloge ermöglichen sehr präzise und schnelle Angebotsformulierungen.

6.6.2 Komponenten

Das Programm besteht in der endgültigen Ausbaustufe aus den folgenden Komponenten:

- **Informationssystem** mit Hintergrund- und Detailwissen
- **Warenkatalog** (Hardware/Software/Dienstleistungen)
- Stellenforum
- teilweise offener **Anforderungskatalog** der (potentiellen) Anwender
- offene **Foren der Nutzergruppen** für die Kommunikation untereinander
- **Feedback-Kanäle** zu den Anbietern, Entwicklern und Publizisten
- offener Katalog mit **Links** in alle Richtungen

- **Parameterkatalog** für die Klassifizierung und Beurteilung von Systemen und Komponenten mit weitestgehender Berufung auf DIN und VDI
- **Planungssoftware** für die Umsetzung der komplexen Parameterzusammenhänge in eine aktuelle Applikation
- automatische **Statistikführung** über alle Bewegungen im Forum

Das **Informationssystem** enthält Grundwissen über Verfahren sowie Detailwissen über Komponenten von photogrammetrischen Systemen. Der Basisteil besitzt Lehrbuchcharakter. Zusätzlich bietet er mit Hypertextfunktionen und einem Assistentensystem eine gezielte Suche, Zusammenstellung und Reduktion von Informationen. Im erweiterten Teil können aktuelle Veröffentlichungen publiziert werden, die entweder von Veranstaltungen stammen oder speziell für das Forum konzipiert sind. Mit einer entsprechend offenen Gestaltung dieses Bereichs ist die Möglichkeit einer zügigen und unbürokratischen Präsentation von Forschungsergebnissen gegeben. Über Feedback-Kanäle können von Lesern unmittelbar Kommentare abgegeben oder Kontakte geknüpft werden. Eine ständig aktualisierte Tagungsliste, die vom jeweiligen Veranstalter mit Informationsseiten und interaktiven Registrierungsdialogen versehen werden kann, vereinfacht Planung und Anmeldung erheblich.

Im **Warenkatalog** kann sich ein Anbieter per Link eintragen und Informations- sowie Angebotsseiten zur Verfügung stellen. Interaktive Anforderungseingaben können zu einer erheblichen Vereinfachung und damit Beschleunigung und Präzisierung von Angeboten führen, die im Idealfall sogar in Echtzeit aufgestellt werden können. Anbieter haben den Vorteil, den Bekanntheitsgrad des Forums zu nutzen. Des weiteren sind die entstehenden Kosten niedrig im Vergleich zu anderen Werbeträgern. Anwendern ermöglichen die an einer Stelle konzentrierten Präsentationen vieler verschiedener Anbieter einen besseren Überblick über vorhandene Systeme und Lösungsmöglichkeiten. Der Warenkatalog kann außerdem sehr schnell durch die Anbieter selbst auf den jeweils neuesten Stand gebracht werden. Offene Stellen und Stellengesuche werden in einem **Stellenforum** fachgebunden und überregional konzentriert.

Anwendern oder potentiellen Kunden wird mit dem offenen Teil dieses Forums ermöglicht, **Anforderungskataloge** zu erstellen und allen Anbietern zugänglich zu machen, die daraufhin Lösungsangebote abgeben können. Anwender haben dabei den Vorteil, daß sie nicht mehr selbst nach geeigneten Partnern suchen müssen. Anbieter können je nach Kompetenz und Kapazität auf Anfragen reagieren. Sie haben außerdem eine gute Übersicht über die Häufigkeit und Wichtigkeit von Problemstellungen. Der nicht-offene Teil ist für Anwender konzipiert, die aus betrieblichen Gründen eine öffentliche Ausschreibung vermeiden wollen. Ihre Anforderungslisten können nur von dafür lizenzierten Anbietern eingesehen werden. Auf diese Weise ist auch ein individueller Kontakt zwischen zwei Geschäftspartnern realisierbar.

Nachrichtenforen mit mehrfacher Untergruppierung, aber mit für alle Forumsnutzer offener Zugriffsmöglichkeit dienen zur allgemeinen öffentlichen Kommunikation. An dieser Stelle können Erfahrungsberichte, ungelöste Problemstellungen, Kommentare, kontroverse Diskussionen usw. enthalten sein.

Direkte Links zwischen den Anwendern auf der einen Seite und den Anbietern, Entwicklern und Publizisten auf der anderen sind konzipiert, um Anwendern die Möglichkeit zu geben, fehlende Informationen nachzufragen, Mängel aufzuzeigen und Verbesserungsvorschläge zu geben. Der Betreiber des Forums selbst richtet einen **Feedback-Kanal** ein, um Anregungen für Verbesserungen und aktuelle Tendenzen in die Weiterentwicklung der Forumsgestaltung einfließen lassen zu können. Ein offener Katalog mit **Links** in allen nur denkbaren Richtungen deckt Informationsbedürfnisse ab, die im jeweils aktuellen Entwicklungsstand des Forums nicht enthalten oder fachlich nur für Randgruppen von Interesse sind.

Als entscheidende fachliche Kommunikationsgrundlage dient ein in freier wissenschaftlicher Arbeit erstellter **Katalog mit Systemparametern**. Er wird ergänzt durch eine Zusammenstellung von Begriffsdefinitionen. Es wird - soweit vorhanden - auf die Terminologie und fachliche Normierung der DIN und der VDI-Richtlinien zurückgegriffen. Die Systemparameter sind in verschiedenen Detailtiefen hierarchisch gegliedert, so daß je nach Anforderung die verwendete Komplexität und damit der Benutzungsaufwand angepaßt werden kann. Ein wesentlicher Bestandteil des Kataloges ist eine Tabelle der Parameterverknüpfungen, welche die Wirkungsweise der Einträge untereinander beschreibt. Da es sich hierbei in sehr vielen Fällen um mehrdeutige Zusammenhänge handelt, wird ein System von zielgerichteten Strategien bereitgestellt. Wegen der stetigen Entwicklung der Anwendungen und Systeme muß eine ständige Anpassung des Kataloginhaltes vorgenommen werden, welche in erster Instanz durch freie, nutzerdefinierbare Parameter temporär geschieht und in Intervallen durch den Betreiber ggf. übernommen und festgeschrieben wird. Der Parameterkatalog wird auch außerhalb des Netzes zur Verfügung gestellt und kann allgemein der Systemevaluation und -planung dienen.

Die Repräsentation des Parameterkatalogs geschieht durch speziell dafür entwickelte **Planungssoftware**. Diese verwaltet die Parameterlisten, realisiert die Verknüpfungen und stellt die Planungsstrategien bereit. Letztere werden u.a. in der Form sogenannter Assistenten realisiert, die unter fachlicher Kommentierung der einzelnen Schritte eine dialoggeführte sequentielle Arbeitsweise zur Verfügung stellen. Die Benutzeroberfläche ist wie der Parameterkatalog hierarchisch in verschiedene Detailtiefen gegliedert. Für unbekannte Parameter bei der Eingabe von Systemdefinitionen stellt sie Standardwerte zur Verfügung. Konfigurationen können gespeichert und deren Entwicklungsverlauf anhand einer Logbuchdatei zurückverfolgt werden. Viele Parameterzusammenhänge können graphisch dargestellt werden. Die Software erlaubt die Gegenüberstellung der Leistungsdaten mehrerer Konfigurationen. Die Eingabe von Konfigurationen geschieht manuell oder über ein Austauschdatenformat, so daß Anbieter komplette Konfigurationsdatensätze oder auch Auszüge für ihre Systeme zusammenstellen und potentiellen Kunden zur Verfügung stellen können. Anwender können ihrerseits Datensätze erstellen, die im obengenannten Anforderungskatalog erscheinen und von den Anbietern in Systeme umgesetzt werden. Zusätzlich zu den Planungsstrategien stehen unterschiedlich komplexe Standardsystemkonfigurationen zur Verfügung, die entweder direkt übernommen oder als Ausgangsbasis verwendet werden können.

Das Forum verfügt über Mechanismen zur Erfassung aller Datenbewegungen in Form einer **Statistikführung**. Diese werden klassifiziert und in einer Datenbank gesammelt. Die Informationen stehen allen Nutzern zur Verfügung. Einerseits können sie zur

Verbesserung des Forums selbst dienen. Andererseits sind damit Marktanalysen realisierbar.

6.6.3 Betreiber, Regelwerk und Finanzierung

Die Beteiligung am Forum sollte in möglichst vielen Bereichen so frei wie möglich gestaltet werden. Jedoch ist es an einigen Stellen erforderlich, Nutzungsregeln aufzustellen und zu kontrollieren, um groben Mißbrauch, Zweckentfremdung und Ausuferungen zu unterbinden. Welche Operationen reglementiert werden müssen, wird wahrscheinlich erst der Betrieb des Forums endgültig klären.

Der Betreiber des Forums muß unabhängig sein. Er kann durch eine öffentliche Einrichtung gestellt werden. Ein Hochschulinstitut bietet sich für diese Aufgabe an. Es wäre auch ein durch ein Gremium aus Anwendern und Anbietern beauftragter fachunabhängiger Netzanbieter denkbar. Ein Gremium könnte beispielsweise durch eine VDI-, DIN- oder DGPF-Arbeitsgruppe konstituiert sein.

Der größte Teil des Inhaltes des Forums ist auf Anwender und Entwickler verteilt, die selbst dafür sorgen müssen, daß ihre Daten in geeigneter Form dem Forum zur Verfügung gestellt werden. Das eigene Interesse dürfte dabei ausreichend groß sein, zumal bereits viele der in Frage kommenden Nutzer Internet-Seiten betreiben. Trotzdem entstehen Kosten für Entwicklung, Organisation und Wartung des Forums. Langfristig gesehen kann sich ein gut akzeptiertes System durch Gebührenerhebung für die Dienstleistungen selbst finanzieren. In der Startphase darf auf keinen Fall die Hemmschwelle der Erstnutzung durch irgendwelche dadurch entstehenden Kosten heraufgesetzt werden, da das System nur mit einer großen Zahl Beteiligter effektiv arbeiten kann. Deshalb muß die Entwicklung und Etablierung des Forums vorfinanziert werden. Neben der grundsätzlichen fachlich-wissenschaftlichen Arbeit, die von Hochschulen geleistet werden kann, ist eine professionelle Gestaltung der Dienste mit Hilfe des Werbebetriebs von Anbietern realisierbar. Wie die Beteiligung daran in einen Vorteil während des späteren Betriebs umgesetzt werden kann, ist mit potentiellen Interessenten zu verhandeln.

7 Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Planungssystems

7.1 Methodik der Überprüfung

Die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit war die Schaffung eines rechnergestützten Systems zur Planung von Aufnahmekonfigurationen digitaler photogrammetrischer Systeme im Nahbereich. An dieser Stelle seien noch einmal die angestrebten Ziele im einzelnen aufgezählt:

- a) Verbesserung der Übersichtlichkeit über die äußerst komplexe Gerätevielfalt
- b) Bereitstellung und automatische Anwendung der funktionalen Zusammenhänge
- c) Beschleunigung der Planung
- d) Erhöhung der Planungsgenauigkeit
- e) Vermeidung von Planungsfehlern
- f) Bessere Optimierung durch mehr berechenbare Varianten

Im folgenden soll das neu entstandene Planungssystem unter jedem dieser Aspekte geprüft werden. Voraussetzung für die Beurteilung der prinzipiellen Leistungsfähigkeit ist jedoch der Nachweis der rein technischen Funktionsfähigkeit und Korrektheit der Software, welcher zunächst erbracht werden soll. Anschließend wird anhand eines einfachen Planungsbeispiels untersucht, wie die Leistungsfähigkeit des hier entwickelten Systems in bezug auf die obengenannten Ziele ist und welche Verbesserungen zur bisherigen Planungspraxis erreicht wurden. Diese Überprüfung soll auf komplexere photogrammetrische Vermessungsaufgaben ausgedehnt werden, die praktisch durchgeführt wurden und mit deren Ergebnissen das Planungssystem zusätzlich verifiziert werden kann.

7.1.1 Leistungsfähigkeit des technischen Konzeptes

Die übergeordneten Komponenten eines Planungssystems finden sich in der Ordnungsstruktur der Datenbasis, der Verknüpfungsfunktionalität für die Systemparameter und der Kommunikation mit dem Benutzer.

Die Datenbasis enthält, wie oben im Detail erläutert, einerseits die systembeschreibenden Parameter selbst und andererseits deren Gliederung in funktionale oder organisatorische Gruppen. Die dafür verwendeten Strukturen sind entscheidend wichtig für die Effizienz bei der Anwendung. Es dürfen bei der Parametrisierung von Meßsystemen keine Engpässe auftreten, die bestimmte Konfigurationsvarianten behindern, sei es durch einen zu starren Parameteransatz oder durch ein unflexibles Ordnungssystem. Bei allen praktisch durchgeführten Anwendungen hat sich gezeigt, daß zu keiner Zeit Probleme auftraten, welche auf die Strukturierung des Planungssystems zurückzuführen waren.

Ein weiterer Aspekt ist die Bereitstellung der technischen Möglichkeiten für die funktionale Verknüpfung der Systemparameter und Zielgrößen. Auch hier gilt, daß

keine Einschränkungen in bezug auf die Realisierbarkeit von Zusammenhängen vorhanden sein dürfen. Die Vorwärtsverkettung, also die Berechnung von Zielgrößen aus untergeordneten Parametern folgt in der Regel einfachen mathematischen Formeln, die dem Grundwissen der Photogrammetrie entstammen. Deshalb konnte auf eine Implementation a priori verzichtet werden. Die Definition der für eine Lösung erforderlichen Abhängigkeiten mit Hilfe des weiter oben beschriebenen Formeleditors ist die flexibelste Lösung dieser Problemstellung. In der Praxis hat sich gezeigt, daß zunächst der Aufwand für die Eingabe hoch ist. Genaue Zeiten lassen sich praktisch nicht angeben, weil der Einfluß der Komplexität des Systems und auch die fachliche Qualifikation des Benutzers von entscheidender Bedeutung sind. Jedoch werden einmal verwendete Formeln immer wieder genutzt, so daß insgesamt die Effizienz nicht leidet. In der Praxis können mit der Software auch vordefinierte Konfigurationen geliefert werden, die für einen Nutzer den Einstieg erleichtern.

Bei der Rückwärtsverkettung, also bei der Berechnung von Auswirkungen veränderter Zielgrößen auf die erforderlichen Parameter, werden dieselben funktionalen Zusammenhänge genutzt wie bei der Vorwärtsverkettung. Jedoch ist wegen der häufig auftretenden Mehrdeutigkeiten dieses umgekehrten Berechnungsweges der Einsatz gewichtender Strategien erforderlich. Die diesbezüglich bisher vorhandenen Möglichkeiten reichen für die meisten Zusammenhänge aus, jedoch wäre eine flexiblere und feiner abgestimmte Definition von Gewichtungsverteilungen wünschenswert. In der Praxis kommt es hin und wieder zu der Situation, daß die durch die Rückwärtsverkettung angepaßten Parameter manuell wieder verändert werden müssen, weil offensichtliche Extremsituationen bei den Inhalten nicht ausreichend berücksichtigt wurden. Dieser Effekt beeinträchtigt nicht die Funktionsfähigkeit des Planungssystems, zumal das System solche kritischen Parameterinhalte bemerkt und meldet, sondern er reduziert die Effizienz des Planungsvorganges.

Die Kommunikation mit dem Benutzer besteht aus mehreren Komponenten, nämlich der Eingabe von Parametern, Formeln und Strategien sowie der Ausgabe von Hinweisen, Warnungen und Ergebnissen. Die Implementation einer Bedieneroberfläche ist erfahrungsgemäß mit dem weitaus größten zeitlichen Aufwand bei der Programmentwicklung verbunden. Deshalb wurde zunächst weniger Wert auf Komfort und ansprechendes Äußeres gelegt, und es wurde dafür die erforderliche Funktionalität weitgehend vollständig zur Verfügung gestellt (siehe weiter oben).

7.1.2 Schlüssigkeit der photogrammetrischen Zusammenhänge

Die photogrammetrischen Zusammenhänge werden mit den Verknüpfungsformeln und den Strategien ausgedrückt. Die diesbezüglichen Ablaufketten der Berechnungen sind auf ihre korrekte Verarbeitung zu prüfen. Geht man davon aus, daß das System keine Modellfehler (siehe unten) enthält, so ist eine Verknüpfungskette insgesamt richtig, wenn alle ihre Einzelverknüpfungen richtig sind. Die Überprüfung und der Nachweis der theoretischen Richtigkeit der Einzelverknüpfungen kann geschehen mit Hilfe von Literatur, mathematischen Ableitungen und Definitionen. Ist die Detailtiefe der Parametrisierung einer Konfiguration nicht extrem, handelt es sich, wie weiter oben schon erwähnt, praktisch immer um einfache, dem Grundwissen der Photogrammetrie

entstammende Formeln (siehe Beispielsystem), deren Richtigkeit an dieser Stelle nicht nachgewiesen werden muß. Ein entsprechender Systemtest ist schon deshalb a priori nicht möglich, weil die erforderliche Funktionalität erst beim Einsatz des Systems endgültig festgelegt wird. Das gleiche gilt für die Strategien der Rückwärtsverkettung. Ein weiterer Aspekt ergibt sich aus der Tatsache, daß nicht nur die Richtigkeit der Verknüpfungsfunktionen selbst, sondern die sinnvolle Auswahl der jeweiligen Einflußgrößen über die korrekte Arbeitsweise des Systems entscheidet. Damit kommt man zum Begriff der Modellbildung bzw. der Modellfehler.

7.1.3 Aspekte der Modellbildung

Die durch eine Planung ermittelte Konfiguration stellt ein Modell der realen Verhältnisse bei einer photogrammetrischen Aufnahme dar. Wie gut die aktuelle Situation durch das Planungssystem mit seinen Parametern und deren funktionalen Zusammenhängen abgebildet werden kann, hängt von zwei Faktoren ab. Der erste ist die Bereitstellung der Planungsfunktionalität, welche sich durch die Handhabung und Flexibilität der Daten und deren Verknüpfungen ausdrückt. Der zweite ist die konkrete Auswahl der zu verwendenden Parameter, wobei hier die korrekte Verknüpfung ihrer Wirkungen vorausgesetzt wird. Die Beschreibung von Systemteilen kann, wie schon erwähnt, mit sehr unterschiedlichen Detailtiefen geschehen, welches zu mehr oder weniger starken Vereinfachungen führt. Diese wiederum können gerechtfertigt sein oder aber zu Planungsergebnissen führen, die den Anforderungen nicht entsprechen. Im letzteren Fall handelt es sich um Modellfehler. Das Planungssystem kann solche Effekte erkennen, wenn es über entsprechendes Wissen verfügt. Damit kommt man zu einer Anwendungsmöglichkeit der Expertensystemtechnik, die mit der hier favorisierten Planungstechnik nur indirekt zu tun hat. Sie ist deshalb hier nur rudimentär vorhanden, ließe sich jedoch prinzipiell ergänzen, weil die Datenstruktur über alle notwendigen Zugriffsmöglichkeiten verfügt.

7.1.4 Korrektheit der Implementierung

Die Funktionsprüfung der entwickelten Software auf unterstem Niveau kann durch gezieltes Testen aller Bedienungselemente und der Kontrolle jeder einzelnen Programmfunktion erfolgen, wobei üblicherweise das Problem besteht, daß die enorme Menge unterschiedlicher Betriebszustände praktisch nicht vollständig erfaßt werden kann. Deshalb wird meistens an praktischen Anwendungen eine abschließende Fehlerkontrolle vorgenommen. Das Ziel dieses Schrittes ist die Prüfung der Richtigkeit der Implementierung. Es handelt sich also hierbei nicht um ein für die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit prinzipiell relevantes, sondern um ein für Softwareentwicklungen allgemein typisches Problem. Es soll deshalb hier nicht näher darauf eingegangen werden.

7.1.5 Experimentelle Überprüfung

Die Überprüfung der Effizienz des Planungssystems läßt sich endgültig nur anhand von Ergebnissen praktisch durchgeführter Vermessungen bewerkstelligen, deren Konfigurationen vom ihm ermittelt wurden.

7.1.6 Optimale Testbedingungen

Zunächst hätte eine Auswahl von Objekten zu erfolgen, die eine Beurteilung aller Leistungskriterien (siehe oben) zuließe. Anschließend müßten geeignete Testumgebungen bereitgestellt werden, die außerdem die Simulation unterschiedlicher Randbedingungen ermöglichen. Weiterhin müßte aus jeder am Markt verfügbaren Kamerakategorie mindestens ein Aufnahmesystem zur Verfügung stehen. Für die geeigneten Auswerteverfahren wäre ebenfalls zu sorgen. Jede vom Planungssystem ermittelte Konfiguration ließe sich damit in die Praxis umsetzen und anhand der Ergebnisse wäre eine sehr präzise Einschätzung der Funktionsfähigkeit realisierbar.

Kosten- und Zeitaufwand für ein so angelegtes Testverfahren sind weder im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit noch prinzipiell tragbar und sinnvoll. Denn erstens ist die Behandlung aller bei einer Planung auftretenden Eventualitäten selbst unter günstigsten Testbedingungen nicht möglich und zweitens kann eine Verifikation der entscheidenden Kriterien auch an wenigen Beispielen erfolgen.

7.2 Exemplarischer Aufbau einer Konfiguration

Als Demonstration der Wirkungsweise des Planungssystems soll exemplarisch anhand einer konkreten und einfachen Planungsaufgabe die vollständige und nachvollziehbare Parametrisierung einer Konfiguration vorgeführt werden. Anschließend werden zwei in der Praxis bereits durchgeführte photogrammetrische Aufnahmen mit dem Planungssystem durchgerechnet.

7.2.1 Aufgabenstellung

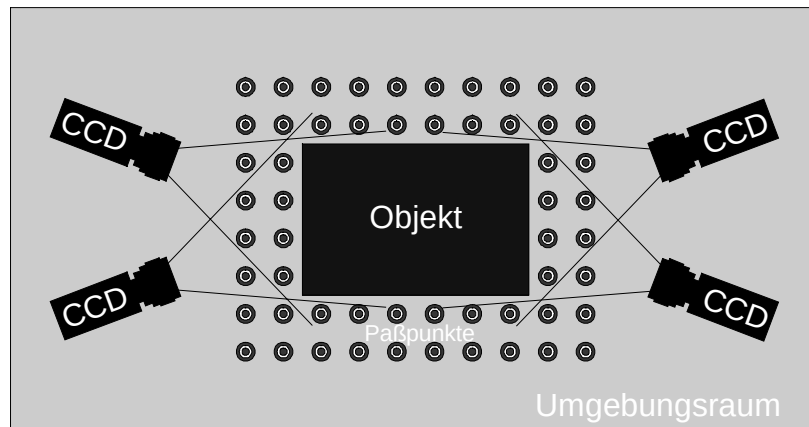
Der Schwerpunkt dieses Planungsbeispiels liegt auf der Nachvollziehbarkeit der verwendeten Zusammenhänge und Ergebnisse. Die entsprechenden Werte der Parameter und Zielgrößen wurden mit dem Planungssystem ermittelt und in eine Tabellenform gebracht. Alle angewandten Formeln werden erläutert. Auf die Darstellung von Varianten wird hier aus Platzgründen verzichtet.

Objekt

Das Beispielobjekt soll einfache Formen aufweisen: Es soll sich um einen Quader mit 3m Länge, 2m Breite und 1m Höhe handeln. Die Beschaffenheit der Oberfläche ist nicht von Bedeutung, weil von signalisierten Zielpunkten ausgegangen werden soll. Diese befinden sich auf den Stirnflächen des Quaders, jeweils an den vier Ecken und zentral in der Mitte. Der für Vermessungsarbeiten zur Verfügung stehende Umgebungsraum beträgt in allen Richtungen 5m zusätzlich zur Objektgröße.

Weitere Randbedingungen wie Sichthindernisse oder Verkehrswege sind nicht zu berücksichtigen. Die hier vorausgesetzten Lichtverhältnisse erfordern keine besondere Berücksichtigung. Als geometrische Referenzinformationen stehen Paßpunkte mit einer

Standardabweichung von $\pm 0,1$ mm zur Verfügung, die rasterförmig mit 0,5 m Abstand auf dem Boden neben dem Objekt verteilt sind.



Vorderansicht:



Abb.31: Anordnungsskizze

Planungsziel

Die signalisierten Zielpunkte sollen mit einer Standardabweichung aller Koordinatenkomponenten von ± 1 mm innerhalb desselben lokalen Koordinatensystems bestimmt werden. Der einzuhaltende Zeitrahmen für die Aufnahme soll 5 Minuten betragen und das Ergebnis soll spätestens 15 Minuten nach dem Beginn der Verfügbarkeit des Objektes vorliegen.

7.2.2 Parametrisierung

Die Konfiguration ist in der Tabelle 3 enthalten. Die Textzeile in der ersten Spalte indizieren die Staffelung der Detailtiefe und ergeben die Gruppierung der Inhalte. Die tatsächlichen Strukturen von Parametern, Zielgrößen und Verknüpfungsfunktionen, deren Kern das Planungssystem ausmacht, lassen sich wegen ihrer mehrdimensionalen Anlage nicht in der ursprünglichen Form zu Papier bringen. Aus diesem Grund erscheinen in der Tabelle einige Komponenten zwangsläufig mehrfach.

Die Anordnungsgeometrie wird als gegeben angenommen und nicht weiter aufgeschlüsselt.

Zielgröße / Parameter	Anford.	Wert	Einheit	Typ
Objekterfassung	10 Punkte	15,0000	Punkte	F1
erfaßte Objektfläche	-	6,0000	m ²	F2
Bildfeld im Objekt (horizontal)	2 m	2000,0000	m	F3
Bildwinkel horizontal	-	48,4476	gon	F4
Kammerkonstante	-	10,0000	mm	Parameter
Sensorgröße	-	8,0000	mm	Parameter
Entfernung zum Objekt	-	2500,0000	mm	Geometrie
Bildfeld im Objekt (vertikal)	1 m	1500,0000	mm	F3
Bildwinkel vertikal	-	37,1094	gon	F4
Kammerkonstante	-	10,0000	mm	Parameter
Sensorgröße	-	6,0000	mm	Parameter
Entfernung zum Objekt	-	2500,0000	mm	Geometrie
Anzahl Bilder	-	4,0000	Anzahl	Geometrie
Überdeckung		2,0000	Anzahl	Geometrie
Punkte pro Fläche	-	2,5000	1/m ²	Parameter
Bildorientierung	-	ok	-	Folgerung
Paßpunkte / Bild	-	>3	1/Bild	Geometrie
Verknüpfungspunkte / Bild	-	0	1/Bild	Geometrie
Umgebungsraum	< 5 m	2500,0000	mm	Folgerung
Entfernung zum Objekt	-	2500,0000	mm	Geometrie
Genauigkeit parallel	< 1 mm	0,2500	mm	F5
Bildmessgenauigkeit	-	0,0010	µm	F6
Pixelgröße	-	0,0100	µm	F7
Anzahl Pixel	-	800,0000	Anzahl	Parameter
Sensorgröße	-	8,0000	mm	Parameter
Subpixelgenauigkeit	-	0,1000	Verhältn.	Parameter
Bildmaßstab	-	250,0000	Verhältn.	F8
Entfernung zum Objekt	-	2500,0000	mm	Geometrie
Kammerkonstante	-	10,0000	mm	Parameter
Genauigkeit senkrecht	< 1 mm	0,2778	mm	F9
Bildmessgenauigkeit	-	0,0010	µm	F6
Pixelgröße	-	0,0100	µm	F7
Anzahl Pixel	-	600,0000	Anzahl	Parameter
Sensorgröße	-	6,0000	mm	Parameter
Subpixelgenauigkeit	-	0,1000	Verhältn.	Parameter
Bildmaßstab	-	250,0000	Verhältn.	F8
Entfernung zum Objekt	-	2500,0000	mm	Geometrie
Kammerkonstante	-	10,0000	mm	Parameter
Basis		2250,0000	mm	Geometrie
Gesamtzeit bis zum Ergebnis	< 15 min	54,0400	s	F10
Aufnahmezeit	< 5 min	1,0400	s	F11
Positionierung der Kamera(s)	-	0,0000	s	Parameter
Bilderfassungszeit	-	1,0400	s	F12
Integrationszeit	-	0,0400	s	Parameter
Speicherzeit	-	1,0000	s	Parameter
Auswertezeit	-	53,0000	s	Parameter
Gesamtkosten	-	11000,0000	DM	F13
Kamerakosten	-	1200,0000	DM	Parameter
Kameras stationär	-	1,0000	DM	Parameter
Interfacekosten	-	800,0000	DM	Parameter
Rechnerkosten	-	3000,0000	DM	Parameter

Tab.3: Konfiguration des Beispielsystems

Erklärungen zur Tabelle:

- Spalte 1:Parameter- bzw. Zielgrößenname und Gruppierung
- Spalte 2:Anforderungen der Aufgabenstellung
- Spalte 3:Inhalte der Parameter bzw. Zielgrößen
- Spalte 4:für die Berechnungen verwendete Einheiten
- Spalte 5:„F...“
 - Zielgröße mit zuständiger Formel
 - „Folgerung“ → logische Verknüpfung der Einflußgrößen
 - „Geometrie“ → Größe der Anordnungsgeometrie
 - „Parameter“ → Eingabewert (unterste Detailstufe)

Wichtig ist, daß es bei diesem Planungsbeispiel nicht wirklich auf eine photogrammetrisch absolut einwandfreie und vollständige Modellierung der Situation ankommt, sondern daß die Konsistenz der Parametrisierung im Vordergrund steht. Deshalb sind viele Annahmen in Auswahl und Inhalt der beteiligten Parameter enthalten, deren Erwähnung im einzelnen hier nicht notwendig ist.

Beschreibung der Parameter

Die Tabelle 4 enthält die Beschreibung und die Formelzeichen aller in der Konfiguration dieses Beispiels verwendeten Parameter und Zielgrößen.

Parameter	Formelzeichen	Kommentar
Bildwinkel	γ	Der Bildwinkel wird hier nicht über die Formatdiagonale, sondern horizontal und vertikal definiert.
Kammerkonstante	c	Die Kammerkonstante kann meistens näherungsweise durch die Brennweite ersetzt werden.
Entfernung zum Objekt	D	Vereinfachend wird angenommen, daß die relevante Objektfläche näherungsweise parallel zur Bildebene liegt.
Basis	B	Entfernung der Kameras voneinander
Subpixelgenauigkeit	σ_s	Je nach Meßmethode sind Werte zwischen 0,3 und 0,02 Pixel möglich.
Bildmeßgenauigkeit	σ	Im analogen Fall wird diese Größe durch das Auswertegerät bestimmt, im digitalen von der Subpixelgenauigkeit und der Pixelgröße (siehe

		Formel F6).
Objektkoordinatengenauigkeit (parallel / senkrecht)	σ_{pr}, σ_{sk}	Die Bestimmungsgenauigkeit der Objektkoordinaten wird je nach Ausrichtung zur Kamera unterschiedlich definiert (siehe Formeln F5 und F9).
Maßstab	m	Es wird hier vereinfachend von einem einheitlichen Abbildungsmaßstab ausgegangen (siehe Formel F8).
Sensorgröße	S_H, S_V	Die Sensorgröße wird hier in Form der horizontalen und vertikalen nutzbaren Seitenlängen angegeben.
Pixelgröße	S_{Pixel}	Die Pixelform wird als quadratisch angenommen (siehe auch Formel F7).
Anzahl Pixel	P	Die Anzahl der nutzbaren Pixel ist den technischen Daten der Kamera zu entnehmen.
erfaßte Objektfläche	F_{Objekt}	Hierbei handelt es sich um die durch die Bilder erfaßte Fläche des Objektes.
Punkte pro Objektfläche	P_{Objekt}	Es wird vereinfachend eine gleichmäßige Verteilung der Zielpunkte im Objekt angenommen.
Objekterfassung	E_{Objekt}	Die Objekterfassung setzt sich nach Formel F1 aus der Flächendefinition und der Punktverteilung zusammen.
Anzahl Bilder	N_{Bilder}	Die Anzahl der Bilder ist vor allem für Betrachtungen der Effektivität relevant.
Überdeckungsfaktor	$\ddot{U}$	Hier ist nur in horizontaler Richtung eine Überdeckung der Bilder für die Herstellung der Verknüpfungen erforderlich. (Überdeckung = 60% ergibt $\ddot{U} = 60$)
Aufnahmezeit	T_A	Diese Größe wird definiert als Zeitabstand zwischen dem jeweiligen Belichtungsbeginn zweier aufeinanderfolgender Bilder.
Auswertezeit	T_R	Die Auswertezeit beginnt mit der Bereitstellung des Bildes in einem meßbaren Zustand und endet mit der Bereitstellung der Meßergebnisse.
Gesamtzeit	T_G	Die Gesamtzeit faßt nach Formel F10 alle

		Zeitkomponenten zusammen.
Positionierzeit	T_P	Die Positionierzeit beginnt unmittelbar nach dem Ende der Integrationszeit eines Bildes und endet, sobald die Aufnahmerichtung des folgenden Bildes feststeht.
Bilderfassungszeit	T_B	Die Bilderfassungszeit entspricht der Aufnahmezeit, wenn die Aufnahmerichtung konstant ist und keine weiteren Randbedingungen zum Tragen kommen.
Integrationszeit	T_I	Die Integrationszeit kann auch als Belichtungszeit bezeichnet werden. Sie ist vor allem wichtig für Stillstandszeiten des Objektes oder für dynamische Effekte bei der Aufnahme.
Speicherzeit	T_S	Die Speicherzeit der Bildinformationen vom Sensor in einen Arbeitsspeicher kann vor allem bei hochauflösenden Kameras ein konfigurationsbestimmender Faktor sein.
Anahl Kameras	N_K	Die Anzahl der verwendeten gleichartigen Kameras ändert sich von einer auf eine der Bildanzahl entsprechenden Menge, wenn ein stationärer Aufbau einer mobilen Konfiguration vorgezogen wird.
Kameras stationär	e_{KS}	Dieser Parameter sagt mit einem ja/nein – Inhalt aus, ob eine stationäre oder eine mobile Konfiguration vorhanden ist.
Gesamtkosten	K_G	Die Gesamtkosten sind hier vereinfachend definiert für jeweils ein Objekt.
Kamerakosten	K_K	Die Kosten für die Kameras werden relativ geringer mit einer größeren Anzahl Objekte.
Interfacekosten	K_I	Das Interface für die digitalen Bilddaten (FrameGrabber o.ä.) ist eine Hardware-Komponente, die u.U. beim Einsatz vieler Kameras größere Auswirkungen zeigt.
Rechnerkosten	K_R	Der verwendete Computertyp wird erst bei extremen Geschwindigkeitsvorgaben zu einer variablen Größe.
Bildfeld im Objekt	$S_{\text{Objekt},H,V}$	Dies ist die Projektion der Bildfläche ins Objekt.

Tab.4: Parameter des Beispielsystems

Verwendete Formeln

F1 Objekterfassung

$$E_{\text{Objekt}} = F_{\text{Objekt}} \cdot P_{\text{Objekt}}$$

Die Objekterfassung setzt sich zusammen aus der erfaßten Objektfläche und der Anzahl Zielpunkte pro Objektfläche. Dies setzt eine gleichmäßige Verteilung der Zielpunkte auf dem Objekt voraus, wobei es sich um eine starke Vereinfachung handelt.

F2 Erfaßte Objektfläche

$$F_{\text{Objekt}} = S_{\text{Objekt},H} \cdot S_{\text{Objekt},V} \cdot \frac{N_{\text{Bilder}}}{\dot{U}}$$

Die erfaßte Objektfläche ergibt sich aus den Seitenlängen der Bilder, deren Anzahl und dem Überdeckungsverhältnis.

F3 Bildfeld im Objekt
(horizontal und vertikal)

$$S_{\text{Objekt},H,V} = 2 \cdot D \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)$$

Das Bildfeld im Objekt hängt vom Bildwinkel und von der Entfernung der Kamera zum Objekt ab.

F4 Bildwinkel
(horizontal und vertikal)

$$\gamma = 2 \cdot \arctan\left(\frac{S_{H,V}}{2c}\right)$$

Der Bildwinkel wird für jede Formatseite getrennt über den Arcustangens der halben Sensorgröße und der Kammerkonstante berechnet. Wie oben erwähnt, ist diese Definition nicht typisch im Bereich der allgemeinen Fotografie.

F5 Genauigkeit parallel zum Bild

$$\sigma_{pr} = \sigma' \cdot m$$

Die Genauigkeit parallel zur Bildebene entspricht der Definition der Lagegenauigkeit im Luftbildfall und setzt sich zusammen aus dem Aufnahmemaßstab und der Bildkoordinatenmeßgenauigkeit. Es handelt sich hierbei um eine Näherungsformel.

F6 Bildmeßgenauigkeit

$$\sigma' = s_{\text{Pixel}} \cdot \sigma'_S$$

Die Bildmeßgenauigkeit für digitale Bilder setzt sich zusammen aus der Pixelgröße auf dem Sensor und der Subpixelmeßgenauigkeit.

F7 Pixelgröße

$$S_{\text{Pixel}} = \frac{S_{H,V}}{P}$$

Die Pixelgröße des Sensors ist meistens bekannt aus den technischen Unterlagen. Sie wird hier jedoch berechnet aus der Sensorgröße und der Anzahl verfügbarer Pixel. Sie kann auch horizontal und vertikal getrennt definiert werden.

F8 Maßstab

$$m = \frac{d}{c}$$

Der Abbildungsmaßstab ist streng genommen nur für ebene Objekte parallel zur Bildebene konstant. Die hier verwendete Definition ist ein mittlerer Maßstab.

F9 Genauigkeit senkrecht zum Bild

$$\sigma_{sk} = \sigma' \cdot m \cdot \frac{B}{D} \quad \text{für } B/D < 1$$

$$\sigma_{sk} = \sigma' \cdot m \cdot \frac{D}{B} \quad \text{für } B/D \geq 1$$

Die Genauigkeit senkrecht zur Bildebene, also in Aufnahmerichtung, enthält zusätzlich zur Formel F5 als maßgeblichen Faktor das Basis-Entfernungs-Verhältnis. Auch diese Funktion stellt eine Näherung dar, die bei großen Objektentfernungen ausreichend gut ist und mit abnehmender Distanz ab etwa $B/D \geq 1$ kritischer wird.

F10 Gesamtzeit

$$T_G = T_A + T_R$$

Die gesamte Zeit vom Start der Aufnahme bis zum Erhalten des Ergebnisses wird hier unterteilt in die Komponenten der Aufnahme und der Auswertung.

F11 Aufnahmezeit

$$T_A = T_p + T_B$$

Die Aufnahmezeit setzt sich zusammen aus der Bilderfassungszeit und der Positionierzeit für die Kameras.

F12 Bilderfassungszeit

$$T_B = T_I + T_S$$

Die Bilderfassungszeit wird dominiert von der für die Bilddatenspeicherung notwendigen Komponente. Die Integrationszeit ist üblicherweise eher für dynamische Effekte bei der Bildaufnahme relevant.

F13 Gesamtkosten

$$K_G = (K_K + K_I) \cdot N_K \cdot e_{KS} + K_R$$

Die Kosten werden hier beeinflusst von der Frage, ob der Aufbau stationär oder mobil ist (Parameter e_{KS}). Im stationären Fall entspricht die Anzahl der Kameras derjenigen der Bilder, was zu erheblich höheren Kosten führt.

7.2.3 Ergebnisse

Die eingesetzte Konfiguration erfüllt die in der Aufgabenstellung definierten Anforderungen in jedem Detail. Die Berechnungszeit der Zielgrößen nach der Eingabe der Parameterinhalte ist so kurz, daß sie kaum wahrgenommen wird. Da alle verwendeten Einflußgrößen in der Tabelle angegeben sind, kann ein manuelles Durchrechnen vom Leser jederzeit selbst durchgeführt und auf den Geschwindigkeitsvorteil geprüft werden.

7.3 Anwendung des Planungssystems

7.3.1 Form eines Stahlkonverters

7.3.1.1 Aufgabenstellung

Die Form eines Stahlkonverters von 9 m Höhe und 7 m maximalem Durchmesser war mit ± 5 mm Standardabweichung und einem Stützpunktabstand von ca. 20 cm zu vermessen. Wegen umfangreicher Sichtverdeckungen der Außenfläche mußte die Innenwand aufgenommen werden. Die äußere Form ergab sich aus der Hypothese, daß die Wandstärke konstant 70mm betrug. Eine weitere wesentliche Vorgabe war die

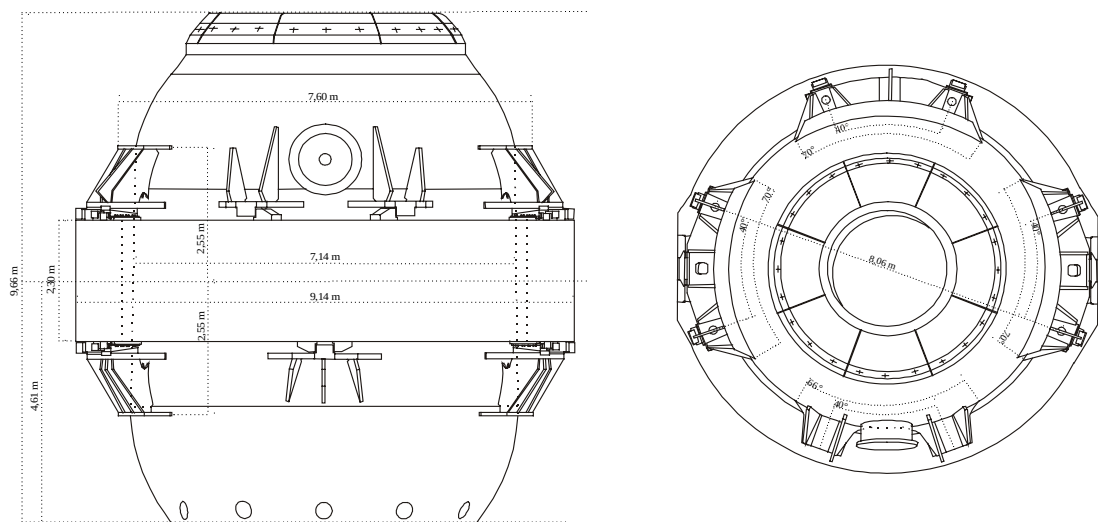


Abb.32: Konstruktionszeichnung eines Stahlkonverters

Minimierung der für die Aufnahme benötigten Zeit, welche sich aus den hohen Stillstandskosten der Anlage ergab.

Als Maßstabs- und Lagereferenz wurden Paßpunkte verwendet, die in zwei Ringen nahe der Kippachse des Konverters angeordnet waren (Abbildung 33) und tachymetrisch an ein übergeordnetes Koordinatensystem angeschlossen wurden. Ihre Genauigkeit konnte besser als ± 1 mm angenommen werden.

Randbedingungen

Es war mit Schmutz (bes. Metallstaub) und Umgebungsvibrationen zu rechnen. Eine Arbeitsbühne stand zur Verfügung, welche jede Arbeitshöhe im senkrecht gestellten Konverter ermöglichte. Das Umgebungslicht war selbst für hochempfindliches Filmmaterial nicht ausreichend. Die zu erfassende Oberfläche besaß eine für photogrammetrische Vermessungen geeignete Struktur.

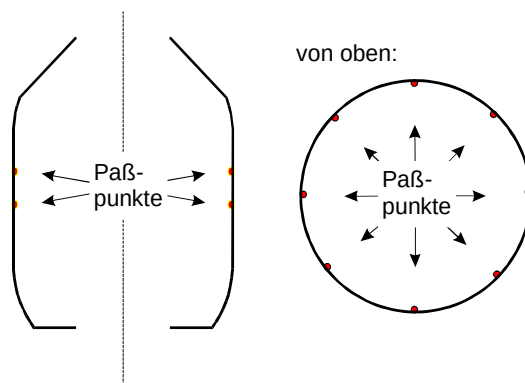


Abb.33: Paßpunktverteilung (schematisch)

7.3.1.2 In der Praxis verwendete Lösung

Gerätekonfiguration

Die Geräteauswahl beschränkte sich aus Gründen der Verfügbarkeit auf drei analoge Kameras. Als Alternativen zur später verwendeten ROLLEI 6006 standen eine ROLLEI

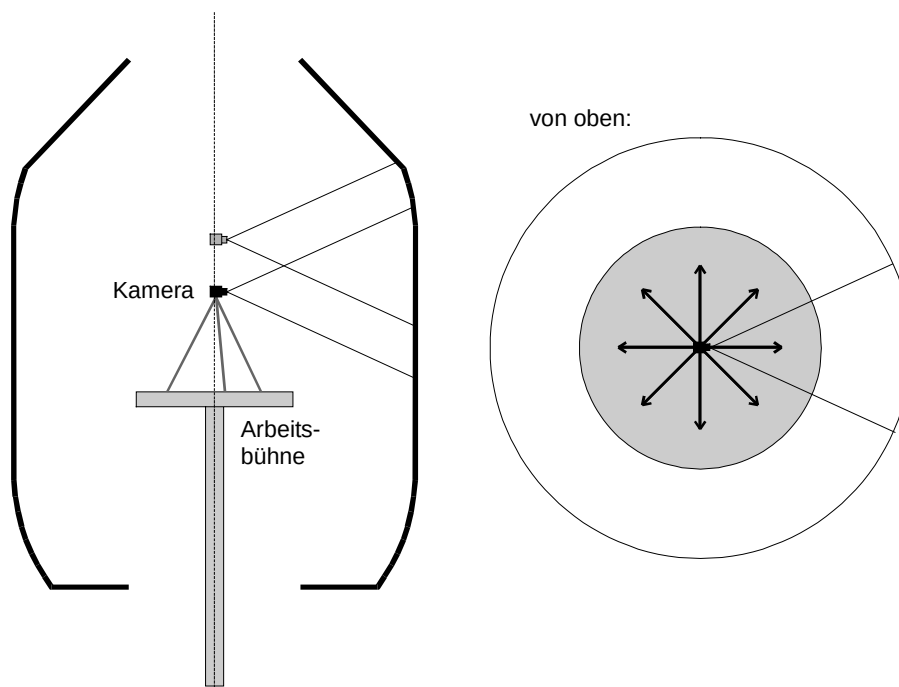
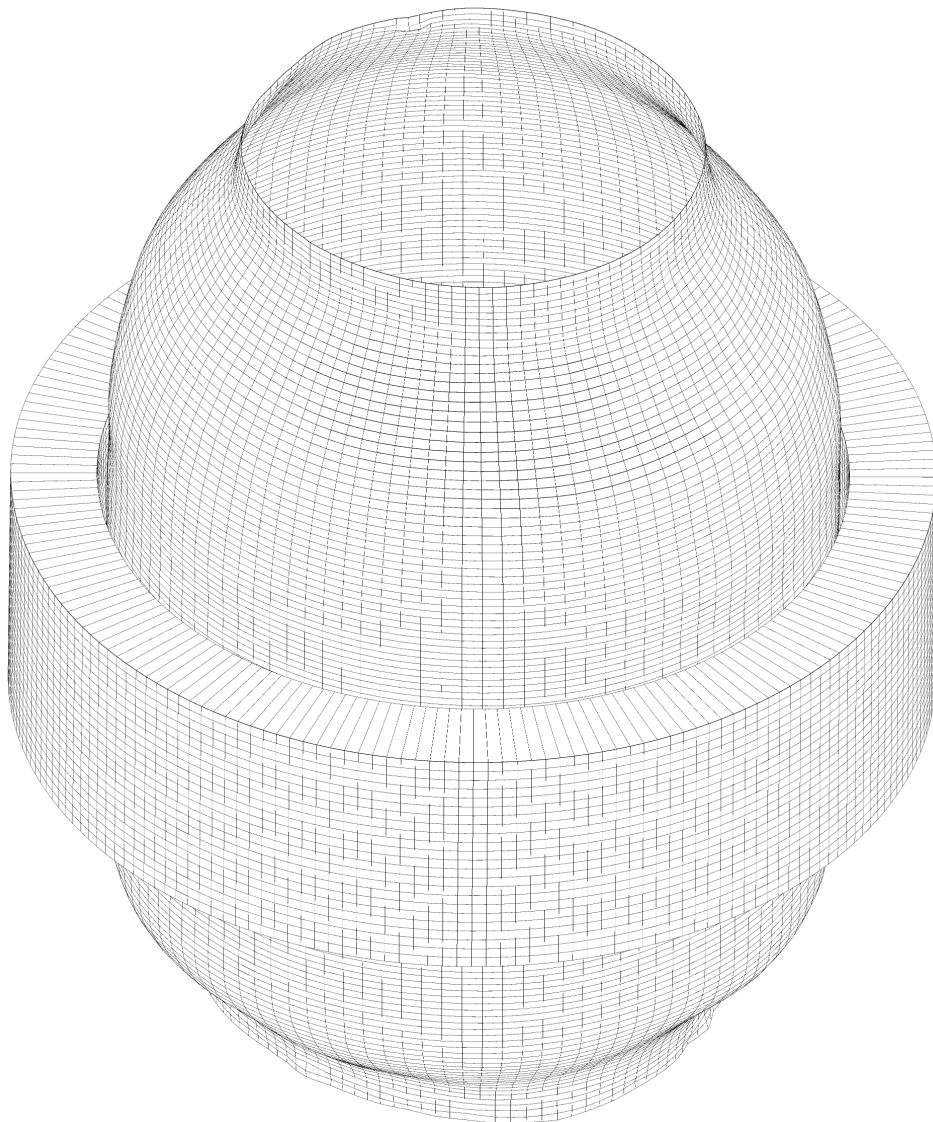


Abb.34: Kameraanordnung

3003 (zu geringe relative Genauigkeit) und eine ZEISS UMK (zu unhandlich und langsam) zur Verfügung. Dem 40mm-Weitwinkel wurde der Vorzug gegenüber dem 80mm-Normalobjektiv gegeben, weil die Bildanzahl bei ausreichendem Abbildungsmaßstab wesentlich geringer war. Der Forderung nach einer möglichst schnellen Objekterfassung wurde zusätzlich entsprochen durch die Verwendung eines speziellen Langfilmmagazins, welches sämtliche Aufnahmen ohne Filmwechsel ermöglichte.



**Abb.35: Netzdarstellung der Objektkoordinaten
(mit gerechnetem Tragring)**

Geometrieconfiguration

Die Kamera wurde auf einem Stativ in der Mitte der Arbeitsbühne, welche ungefähr der Mittelachse des Konverters entspricht, positioniert. Auf 9 Ebenen wurden jeweils 8 horizontal ausgerichtete Bilder aufgenommen. Die Höhenunterschiede zwischen den Ebenen entsprechen den Basislängen. Sie wurden durch das Verfahren der Arbeitsbühne realisiert. Die seitliche Überdeckung diente ausschließlich der Streifenverknüpfung. Die Beleuchtung in Form zweier Halogen-Fotolampen war fest mit der Kamera verbunden.

7.3.1.3 Ergebnisse der Messung

Die 6×6 cm großen Negative wurden im analytischen Plotter ZEISS Planicomp P1 gemessen. Alle Paß-, Verknüpfungs- und Formstützpunktkoordinaten wurden in einer gemeinsamen Blockausgleichung (BLUH, IPI, Universität Hannover) ermittelt. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit lag bei $\sigma_0 = 13 \mu\text{m}$. Mit einem mittleren Bildmaßstab von 1:75 lag die Standardabweichung der Objektkoordinaten bei rechnerischen $\sigma_{H,V} = 2,0 \text{ mm}$. Es standen leider keine unabhängigen Vergleichsmessungen zur Verfügung und die Anzahl der Paßpunkte reichte für eine zuverlässige Genauigkeitsanalyse nicht aus. Die Form des Konverters wurde durch ein interpoliertes Gitter mit einer regelmäßigen Punktanordnung und durch ebenfalls interpolierte Profile an ausgezeichneten Positionen dargestellt. Wie schon erwähnt, wurde die Außenform durch das Aufaddieren einer Materialstärke von 70mm auf die an der Innenwand bestimmten Koordinaten ermittelt. Dabei wurde die interpolierte Neigung der Wand gegen die Vertikalachse des Konverters berücksichtigt. Außerdem war bekannt, daß die Wandstärke durch Verschleiß im Laufe der Jahre mehrere Millimeter geringer sein konnte als angenommen. Vergleiche der photogrammetrisch gewonnenen Daten mit stichprobenartigen Messungen des Abstandes zum umgebenden Tragring ergaben Übereinstimmungen mit maximal 5 mm Differenz. Damit wurde die Genauigkeitsanforderung eingehalten.

7.3.1.4 Einsatz des Planungssystems

Die oben beschriebene Aufgabenstellung wird auf das Planungssystem übertragen, indem zunächst alle Anforderungen als übergeordnete Zielgrößen definiert werden. Dazu gehören die „Objekterfassung“, die hier einfacherweise 100% bei gleichmäßiger Punktverteilung beträgt, die „Objektkoordinatengenauigkeit“ mit $\leq \pm 5,0 \text{ mm}$ und die „Kosten je Objekt“. Die letztgenannte Zielgröße wird in dieser Form verwendet, weil die Stillstandszeit des Stahlkonverters unbedingt berücksichtigt werden muß. Die sonst häufiger übergeordnet benutzte Größe „Systemkosten“ reicht hier deshalb nicht aus.

Anschließend werden alle Objektdaten, soweit es sich als notwendig erweist, parametrisiert. Die Form des Konverters ist rotationssymmetrisch und kann für planerische Zwecke mit einem durchschnittlichen Radius angegeben werden. Dazu kommt die Objekthöhe. Die Modellierung der Wandstärke könnte mit dem Planungssystem dann sinnvoll sein, wenn mehrere unterschiedlich genaue Berechnungsverfahren zur Verfügung stehen. Ihr Einfluß auf die Gesamtgenauigkeit ist jedoch offensichtlich so gering, daß darauf verzichtet werden soll.

Als Randbedingungen planerisch wichtig sind die Ausrichtung des Konverters und die Möglichkeiten der Positionierung der Arbeitsbühne. Diese Parameter gehen in die Berechnung der Anordnungsgeometrie ein. Die Eigenschaften der Objektoberfläche äußern sich in der Bildkoordinatenmeßgenauigkeit. Das für normale Empfindlichkeiten nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung stehende Umgebungslicht wird hier als nicht konfigurationsbeeinflussend vernachlässigt.

Die Referenzinformationen in Form der verfügbaren Paßpunkte befinden sich auf der zu vermessenden Objektoberfläche und erfordern daher keine weiteren Vorkehrungen. Es

wird davon ausgegangen, daß ihre Signalgröße in jedem Fall ausreichend für ihre genaue Bestimmung ist.

Anordnungsgeometrie

Eine Randbedingung ist, daß sich die möglichen Kamerastandpunkte immer auf der Arbeitsbühne mit dem Durchmesser von 4 m befinden. Damit wird außerdem die vertikale Ausrichtung des Konverters festgelegt. An dieser Stelle könnte man die Planung auch auf andere Objektlagen ausdehnen, indem die Positioniereinrichtungen parametrisiert werden.

Der Algorithmus zur Anordnungsgeometrie ist so ausgelegt, daß er gleichmäßig bzw. symmetrisch angelegte Kamerastandpunkte bevorzugt. Außerdem wird versucht, nahe beieinanderliegende Aufnahmeorte zusammenzufassen. Dadurch wird erreicht, daß der Zeitaufwand für die Einrichtung der Standpunkte reduziert wird.

Bei den Bildverknüpfungen sind die Basislängen, also die Entfernungen der beteiligten Kamerastandpunkte, maßgebend für die Stabilität und die Genauigkeit eines Bildverbandes. Aus der oben erwähnten gleichmäßigen Verteilung der Aufnahmeorte ergeben sich zwei mögliche Basisrichtungen, nämlich die horizontale und die vertikale, welche außerdem miteinander kombiniert werden können.

Da von gleichen Überdeckungsverhältnissen ausgegangen wird, kommt die vertikale Variante mit weniger Standpunkten aus, weil die Kamera auf der Bühne nur gedreht, nicht aber umgestellt werden muß. Dies setzt voraus, daß alle Standpunkte in der Konverterachse liegen, welches wiederum geeignete Bildwinkel der Objektive verlangt.

Die tatsächlich verwendete geometrische Konfiguration beruht zusätzlich auf der Tatsache, daß nur genau eine Kamera verfügbar ist. Der Einsatz mehrerer gleichartiger Geräte ergibt andere Verhältnisse, die hier aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht weiter verfolgt werden sollen.

Verwendete Parameter und Grundkonfiguration

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sollen an dieser Stelle nicht alle tatsächlich verwendeten Parameter, sondern nur die für die spezielle Aufgabenstellung besonders hervorzuhebenden aufgeführt werden. Auch ist es unmöglich, alle Zwischenschritte und Variationsrichtungen aufzuführen. Daraus ergibt sich die Beschränkung auf wenige charakteristische Konfigurationszustände.

Um eine Abhängigkeit der Planungsergebnisse von der tatsächlich durchgeführten Vermessung bereits im Anfangszustand zu vermeiden, wird eine Grundkonfiguration gewählt, die möglichst weit entfernt von der realisierten liegt. Dies ist bei der Verwendung von Standard-Video-Kameras der Fall. Die folgende Tabelle zeigt die entscheidenden Parameter und ihre Ausgangswerte.

Parameter	Standard-Video Querformat	Bemerkung
Auflösung (Pixel)	752×582	Hierbei handelt es sich um eine häufig bei CCIR / RS170 Kameras vorkommende Pixelanzahl.
Pixelgröße	10 µm	Es werden quadratische Pixel vorausgesetzt.
Kammerkonstante	10 mm	Für die verwendete Sensorgröße stellt diese Kammerkonstante ein Objektiv mit Normalwinkel dar, welches üblicherweise noch tolerierbare Verzeichnungen aufweist.
Meßgenauigkeit der Bildkoordinaten	3 µm	Die Meßgenauigkeit bezieht sich hier auf unsignalisierte Punkte, die manuell unter Vergrößerung gemessen werden.
horizontale Überdeckung	30 %	Diese Überdeckungskomponente stellt die Verknüpfung der Vertikalstreifen untereinander sicher.
vertikale Überdeckung	60 %	Diese Überdeckungskomponente liefert die Basislängen und damit die Genauigkeit in Aufnahmerrichtung.
Bildfolgezeit (Kamera)	0,04 s	Der Wert entstammt der CCIR-Norm. Er ist nur dann zu berücksichtigen, falls er größer ist als die Zeit, die für die Ausrichtung der Kamera benötigt wird.
Positionierzeit (Kamera)	30 s	Mit dieser Durchschnittsgröße werden einerseits die horizontale Ausrichtung der Kamera und andererseits eventuell auszuführende Aufbauarbeiten (Licht,...) erfaßt.
Positionierzeit (Bühne)	300 s	Die Zeit zur Positionierung der Arbeitsbühne für eine vorgegebene Aufnahmeebene ist stark abhängig von der sehr geringen verfügbaren Verfahrensgeschwindigkeit.
Gerätekosten	7000.- DM	In diesem Parameter werden die Kosten für Kameras, Framegrabber, Computer und Zubehör zusammengefaßt.
Betriebskosten	300.- DM / h	Die Betriebskosten ergeben sich praktisch vollständig aus dem benötigten Personal, hier ein Anhaltswert für 2 Personen.
Kosten Bildmessung	50.- DM / Bild	Der Aufwand für die Bildmessung ist hier vereinfachend als linear abhängig von der Bildanzahl angenommen. Im Fall von wenigen Bildern oder einem hohen Automationsgrad entstehen Ungenauigkeiten.
Kosten Blockausgleichung	2000.- DM	Die Kosten für die Blockausgleichung beinhalten die Aufdeckung von Fehlern bei der Bildkoordinatenmessung.
Kosten Datenhandling	5000.- DM	Unter Datenhandling werden im wesentlichen Arbeitsschritte der Formatkonversion, der Interpolation von Oberflächenmodellen und Profilen sowie der Ergebnisdarstellung zusammengefaßt.
Stillstandskosten	1000.- DM / h	Der Konverter kostet diesen Betrag für die Zeit, in der er für die Produktion ausfällt.
Vorbereitungszeit	30 min	Für den Aufbau der Kamerastandorte und die Bereitstellung von Ressourcen (Stromversorgung,...) ist diese Pauschale vorgesehen.
Anzahl Objekte	1	Die vorrangige Zielsetzung geht zunächst von nur einem Objekt aus. Es bestehen jedoch Optionen seitens des Auftraggebers für weitere Einsätze.

Tab.5: Wichtige Parameter der Grundkonfiguration

Kommentare zur Tabelle:

- Die Bildmeßgenauigkeit wird hier auch für digitale Kameras in Mikrometern angegeben, weil die sonst üblichen Pixelbruchteile als Parametrisierung für die ebenso in dieser Konfiguration eingesetzten analogen Kameras nicht ausreichen würden.
- Die Planung ist für das Angebot einer Dienstleistung ausgelegt. Andernfalls, also beim Verkauf eines vollständigen Meßsystems, wären zum Beispiel die laufenden Kosten je Objekt für die Blockausgleichung wesentlich geringer anzusetzen. Trotzdem wird von der Notwendigkeit ausgegangen, daß die Geräteausstattung komplett neu angeschafft werden muß.
- Die Verzeichnung der verwendeten Objektive wird hier planerisch nicht gesondert berücksichtigt. Sie wird bei der Bildkoordinatenmessung rechnerisch behandelt.
- Die horizontale Blockverknüpfung enthält zwei unterschiedliche Aspekte. Einerseits ist die Stabilität des Blockes auch bei geringer Überdeckung der Bilder gut, weil es sich um einen räumlich geschlossenen Verband handelt, der in seiner Form auch durch die Anordnung der Paßpunkte gestützt wird. Andererseits ist es bei der Blockausgleichung sehr schwierig, bei ungünstiger Verknüpfung der Vertikalstreifen untereinander zu dieser geschlossenen Form zu gelangen beziehungsweise ausreichend gute Näherungskordinaten für die Bildorientierungen zu bestimmen.
- Es wird grundsätzlich davon ausgegangen, daß die Oberflächenstruktur der Konverterwand genug Informationen enthält, um auch in kleinen Bildfeldern eine ausreichende Anzahl von Stütz- und Verknüpfungspunkten messen zu können. Andernfalls müßte die Dichte natürlicher Ziele oder die Punktsignalisierung parametrisiert werden.

Die Tabelle 6 enthält die im aktuellen Beispiel besonders relevanten Zielgrößen.

Zielgröße	Bemerkung
Sensorgröße	Die Sensorgröße ist nur eine Zwischenzielgröße für die Berechnung des Bildwinkels.
Bildwinkel (horizontal)	Bildwinkel innerhalb der Aufnahmeebene
Bildwinkel (vertikal)	Bildwinkel in Basisrichtung
Bildfeld im Objekt	Die Konverterwand kann genähert als eben betrachtet werden. Damit ist ein mittleres Bildfeld im Objekt ausreichend für die Beschreibung der Objekterfassung.
Basis	In Richtung der Vertikalachse wird hier eine mittlere Basis festgelegt.
Anzahl Ebenen	Jede dieser Aufnahmeebenen ist mit dem Bewegen der Arbeitsbühne verbunden.
Anzahl Bilder pro Ebene	Die Bilder einer Ebene werden nach der Optimierung der Anordnungsgeometrie von der Konverterachse aus rotationssymmetrisch aufgenommen.

Anzahl Bilder	Die Gesamtanzahl der Bilder ist hier weniger entscheidend für die Aufnahmekosten, sondern mehr für die Auswertung.
Aufnahmezeit für alle Bilder	Hier geht besonders die Anzahl der Aufnahmeebenen ein. Der Grund dafür ist die langsame Arbeitsbühne.
maximale Pixelgröße (Objekt)	Die maximale Pixelgröße im Objekt ist für die Einhaltung der Genauigkeitsforderung erforderlich.
Standardabweichung parallel (Objekt)	Unter dieser Größe werden hier die jeweiligen Komponenten der Objektkoordinatengenauigkeit parallel zur Bildebene bzw. zur Konverteroberfläche verstanden.
Standardabweichung senkrecht (Objekt)	Die Entfernungskomponente der Objektkoordinatengenauigkeit (senkrecht zur Bildebene) ist zusätzlich abhängig vom Basis-Entfernungs-Verhältnis.
Auswertekosten	Die Auswertekosten sind am stärksten abhängig von der Anzahl der zu messenden Bilder.
Gesamtkosten	Die Gesamtkosten werden unter der Voraussetzung der Notwendigkeit der Neuanschaffung der Meßausrüstung berechnet.
Gesamtkosten ohne Geräte	Geht man bei nur einem zu vermessenden Objekt von einer Dienstleistung aus, bei der vorhandene Geräte verwendet werden, so ist diese die entscheidende Zielgröße für die wirtschaftliche Kalkulation.

Tab.6: Wichtige Zielgrößen der Grundkonfiguration

Kommentare zur Tabelle:

- Alle mittleren Werte beziehen sich auf die gemittelten Radien des Konverters aus den verschiedenen Höhen der Aufnahmeebenen. Für die Genauigkeiten der Objektkoordinaten wird dagegen der maximale Radius verwendet, weil die Anforderungen an jeder Stelle des Meßbereiches eingehalten werden müssen.
- Der Bildwinkel wird jeweils über die lange oder kurze Bildformatseite angegeben und nicht, wie in der Fotografie üblich, über die Formatdiagonale. Die Zuordnung „horizontal“ und „vertikal“ bezieht sich auf die Position im Konverter und nicht auf die Lage innerhalb der Kamera.

Planungsschritte und -ergebnisse

Das erste Ergebnis des Planungssystems ist bereits die Berechnung der Zielgrößen der Grundkonfiguration. Diese stehen sofort mit der Eingabe des letzten Parameters zur Verfügung.

Parameter	Wert	Zielgröße	Wert
Auflösung (Pixel)	752×582	Sensorgröße	7,52 × 5,82 mm
Pixelgröße	10 µm	Bildwinkel (horizontal)	46 gon
Kammerkonstante	10 mm	Bildwinkel (vertikal)	36 gon
Meßgenauigk. im Bild	3 µm	mittleres Bildfeld (Objekt)	2,25 × 1,74 m
horizontale Überdeckung	30 %	mittlere vertikale Basis	0,7 m

vertikale Überdeckung	60 %	Ebenen	13
Bildfolgezeit (Kamera)	0,04 s	Bilder pro Ebene	13
Positionierzeit (Kamera)	30 s	Anzahl Bilder	169
Positionierzeit (Bühne)	300 s	Aufnahmezeit für alle Bilder	150 min
Gerätekosten	7000.- DM	maximale Pixelgröße (Objekt)	3,5 mm
Betriebskosten	300.- DM / h	Standardabw. parallel (Objekt)	$\pm 1,05$ mm
Kosten Bildmessung	50.- DM / Bild	Standardabw. senkr. (Objekt)	$\pm 4,53$ mm
Kosten Blockausgl.	2000.- DM	Auswertekosten	15450.- DM
Kosten Datenhandling	5000.- DM	Gesamtkosten	26190.- DM
Stillstandskosten	1000.- DM / h	Gesamtkosten ohne Geräte	19190.- DM
Vorbereitungszeit	30 min		
Anzahl Objekte	1		

Tab.7: Standard-Video, Querformat

Die Anlage der Konfiguration ist so definiert, daß in jedem Fall die vollständige Objektfläche erfaßt wird. Da, wie oben beschrieben, die Anordnung der Kameras immer in der Vertikalachse des Konverters als besonders günstig angenommen wird, bleiben als maßgebliche Planungszielgrößen die Kosten und die Genauigkeit übrig.

In dieser Ausgangslage ist mit den verwendeten Geräten bereits eine Lösung der Meßaufgabe mit ausreichender Genauigkeit möglich. Es ist jedoch zu bedenken, daß die Genauigkeit der Objektkoordinaten in Aufnahmerichtung sehr dicht an der zulässigen Grenze liegt. Diese Tatsache wird je nach eingestelltem Toleranzbereich vom Planungssystem gemeldet. Im vorliegenden Fall muß man jedoch davon ausgehen, daß die Modellierung der Einflußgrößen (Bildmeßgenauigkeit, Blockverknüpfung, Aufnahmeabstände, ...) nicht ausreichend ist, um auf der sicheren Seite zu sein.

Durch die hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit des Planungssystems lassen sich die Wirkungen von Wertänderungen einzelner Parameter schnell verfolgen. Es läßt sich auf diese Weise durch die Variation der Inhalte in kleinen Schritten testen, ob die Anpassung eines bestimmten Wertes zum Ziel führen kann. Die folgende Grafik in Abbildung 36 zeigt exemplarisch den Zusammenhang zwischen der durch das Objektiv festgelegten Kammerkonstanten und der Genauigkeit der Objektkoordinaten in („Entfernung“) und quer zur Aufnahmerichtung („Lage“).

Die Lagegenauigkeit läßt sich danach durch eine Änderung der Kammerkonstanten beeinflussen, während die Entfernungsgenauigkeit davon unter den gegebenen Umständen (!) vollständig unabhängig ist. Letztere läßt sich durch die Anpassung des Überdeckungsverhältnisses in Basisrichtung ändern, wie die Abbildung 37 zeigt.

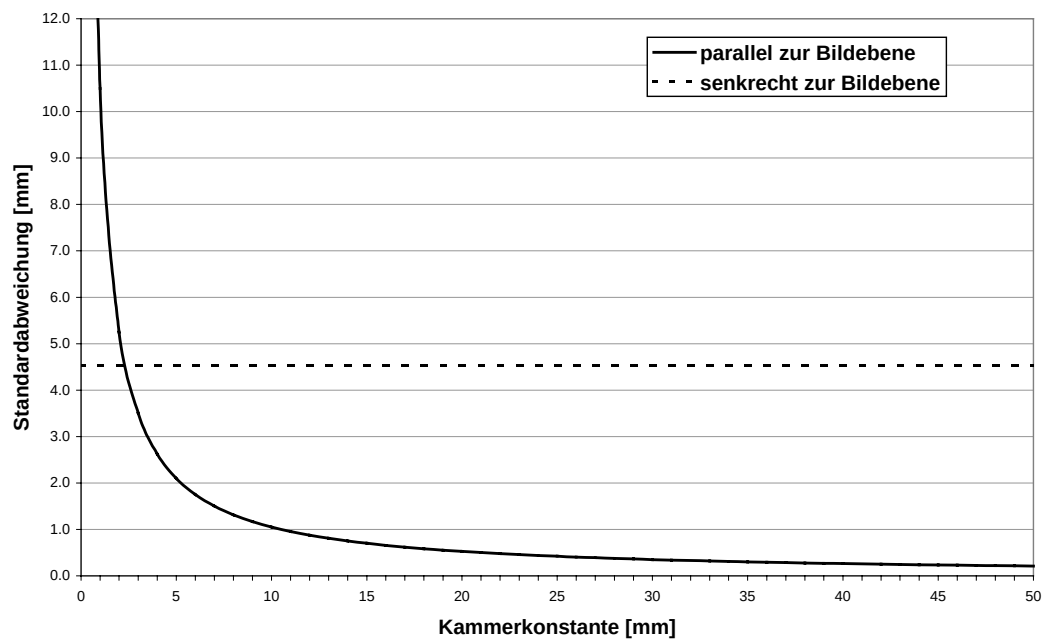


Abb.36: Standardabweichung der Objektkoordinaten in Abhängigkeit von der Kammerkonstanten

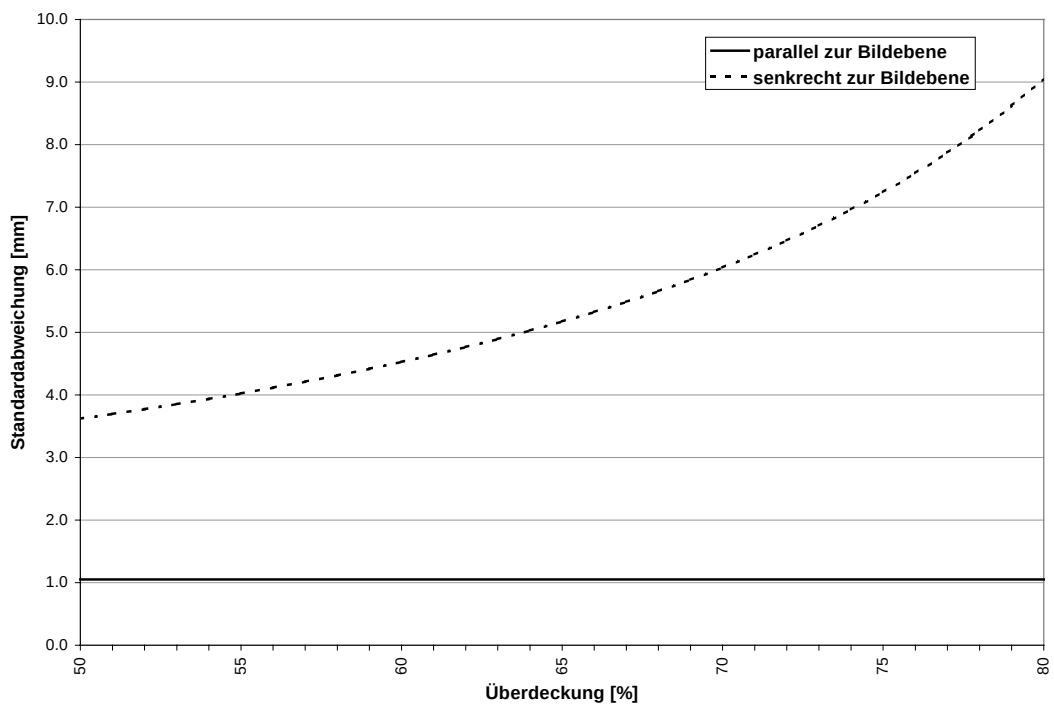


Abb.37: Standardabweichung der Objektkoordinaten in Abhängigkeit von der Bildüberdeckung

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Vergrößerung des Bildformats. Allein die Ausrichtung der Kameras im Hochformat, also diesmal mit der langen Bildseite in Basisrichtung, ergibt ein günstigeres Genauigkeitsverhalten der Objektkoordinaten, wie die folgende Tabelle zeigt.

Parameter	Wert	Zielgröße	Wert
Auflösung (Pixel)	582×752	Sensorgröße	5,82 × 7,52mm
Pixelgröße	10 µm	Bildwinkel (horizontal)	36 gon
Kammerkonstante	10 mm	Bildwinkel (vertikal)	46 gon
Meßgenauigk. im Bild	3 µm	mittleres Bildfeld (Objekt)	1,74 × 2,25 m
horizontale Überdeckung	30 %	mittlere vertikale Basis	0,9 m
vertikale Überdeckung	60 %	Ebenen	10
Bildfolgezeit (Kamera)	0,04 s	Bilder pro Ebene	16
Positionierzeit (Kamera)	30 s	Anzahl Bilder	160
Positionierzeit (Bühne)	300 s	Aufnahmezeit für alle Bilder	130 min
Gerätekosten	7000.- DM	maximale Pixelgröße (Objekt)	3,5 mm
Betriebskosten	300.- DM / h	Standardabw. parallel (Objekt)	± 1,05 mm
Kosten Bildmessung	50.- DM / Bild	Standardabw. senkr. (Objekt)	± 3,50 mm
Kosten Blockausgl.	2000.- DM	Auswertekosten	15000.- DM
Kosten Datenhandling	5000.- DM	Gesamtkosten	25316.- DM
Stillstandskosten	1000.- DM / h	Gesamtkosten ohne Geräte	18316.- DM
Vorbereitungszeit	30 min		
Anzahl Objekte	1		

Tab.8: Standard-Video, Hochformat

Zusätzlich ergibt die geringere Anzahl Bilder und Aufnahmeebenen eine Zeit- und Kostenersparnis. Als Folge ergibt sich die Frage, ob ein anderer Kamerateyp mit wesentlich größerem Sensor und einer höheren Pixelanzahl die gestellte Aufgabe noch besser erfüllt. Deshalb soll mit dem Einsetzen der Daten einer Kodak DCS 460 fortgefahren werden, deren charakteristische Daten sich aus der Tabelle 9 ergeben. Auch hier ergibt das Hochformat die günstigeren Verhältnisse.

Parameter	Wert	Zielgröße	Wert
Auflösung (Pixel)	2000×3000	Sensorgröße	23,3 × 35,0 mm
Pixelgröße	11,7 µm	Bildwinkel (horizontal)	80 gon
Kammerkonstante	24 mm	Bildwinkel (vertikal)	58 gon
Meßgenauigk. im Bild	3 µm	mittleres Bildfeld (Objekt)	2,92 × 4,37 m
horizontale Überdeckung	30 %	mittlere vertikale Basis	1,75 m
vertikale Überdeckung	60 %	Ebenen	6
Bildfolgezeit (Kamera)	1 s	Bilder pro Ebene	10
Positionierzeit (Kamera)	30 s	Anzahl Bilder	60
Positionierzeit (Bühne)	300 s	Aufnahmezeit für alle Bilder	60 min
Gerätekosten	40000.- DM	maximale Pixelgröße (Objekt)	1,7 mm
Betriebskosten	300.- DM / h	Standardabw. parallel (Objekt)	± 0,44 mm
Kosten Bildmessung	100.- DM / Bild	Standardabw. senkr. (Objekt)	± 0,75 mm

Kosten Blockausgl.	2000.- DM	Auswertekosten	13000.- DM
Kosten Datenhandling	5000.- DM	Gesamtkosten	54800.- DM
Stillstandskosten	1000.- DM / h	Gesamtkosten ohne Geräte	14800.- DM
Vorbereitungszeit	30 min		
Anzahl Objekte	1		

Tab.9: Kodak DCS 460, Hochformat

Tatsächlich ermittelt das Planungssystem trotz des höheren Aufwandes für die Messung eines Bildes (mehr Punkte pro Bild) niedrigere Gesamtkosten (ohne Geräte) und ein erheblich höheres Genauigkeitsniveau in allen Koordinatenrichtungen. An dieser Stelle wäre eine detailliertere Modellierung der Objektiveigenschaften – speziell der Verzeichnung – interessant, weil die technisch mögliche Vergrößerung des Bildwinkels zu weiteren Kosteneinsparungen führen könnte. Eine weitere Steigerung der Sensorgröße und –auflösung ist durch den Einsatz einer Rollei Q16 realisierbar, wie die Tabelle 10 zeigt.

Parameter	Wert	Zielgröße	Wert
Auflösung (Pixel)	4000×4000	Sensorgröße	50,0 × 50,0 mm
Pixelgröße	12 µm	Bildwinkel (horizontal)	71 gon
Kammerkonstante	40 mm	Bildwinkel (vertikal)	71 gon
Meßgenauigk. im Bild	3 µm	mittleres Bildfeld (Objekt)	3,75 × 3,75 m
horizontale Überdeckung	30 %	mittlere vertikale Basis	1,5 m
vertikale Überdeckung	60 %	Ebenen	6
Bildfolgezeit (Kamera)	60 s	Bilder pro Ebene	9
Positionierzeit (Kamera)	30 s	Anzahl Bilder	54
Positionierzeit (Bühne)	300 s	Aufnahmezeit für alle Bilder	84 min
Gerätekosten	150000.- DM	maximale Pixelgröße (Objekt)	1,05 mm
Betriebskosten	300.- DM / h	Standardabw. parallel (Objekt)	± 0,26 mm
Kosten Bildmessung	120.- DM / Bild	Standardabw. senkr. (Objekt)	± 0,53 mm
Kosten Blockausgl.	2000.- DM	Auswertekosten	13480.- DM
Kosten Datenhandling	5000.- DM	Gesamtkosten	165800.- DM
Stillstandskosten	1000.- DM / h	Gesamtkosten ohne Geräte	15800.- DM
Vorbereitungszeit	30 min		
Anzahl Objekte	1		

Tab.10: Rollei Q16

Aus dem Planungssystem ergibt sich ein weiterer Genauigkeitsgewinn, jedoch kein Kostenvorteil. Der Grund ist im wesentlichen die langsamere Bildfolge der Kamera, die eine längere und teure Stillstandsauer des Konverters verursacht.

Die Eigenschaften der Q16 sind – ausgehend von der aktuellen Situation – denen der Rollei 6006 metric sehr nahe. Deshalb soll hier zum Vergleich auch die mit analogem Bildträger ausgestattete Kamera in das Planungssystem eingeführt werden. Dabei sind die für digitale Sensoren typischen Parameter gegen gleichwertige auszutauschen, welches wie in Tabelle 11 beschrieben geschehen ist.

Parameter	Wert	Zielgröße	Wert
Auflösung (lp/mm)	50 lp/mm	Sensorgröße	50,0 × 50,0 mm
Pixelgröße	-	Bildwinkel (horizontal)	71 gon
Kammerkonstante	40 mm	Bildwinkel (vertikal)	71 gon
Meßgenauigk. im Bild	13 µm	mittleres Bildfeld (Objekt)	3,75 × 3,75 m
horizontale Überdeckung	30 %	mittlere vertikale Basis	1,5 m
vertikale Überdeckung	60 %	Ebenen	6
Bildfolgezeit (Kamera)	1 s	Bilder pro Ebene	9
Positionierzeit (Kamera)	30 s	Anzahl Bilder	54
Positionierzeit (Bühne)	300 s	Aufnahmezeit für alle Bilder	57 min
Gerätekosten	20000.- DM	maximale Auflösung (Objekt)	0,57 lp/mm
Betriebskosten	300.- DM / h	Standardabw. parallel (Objekt)	± 1,14 mm
Kosten Bildmessung	120.- DM / Bild	Standardabw. senkr. (Objekt)	± 2,28 mm
Kosten Blockausgl.	2000.- DM	Auswertekosten	13480.- DM
Kosten Datenhandling	5000.- DM	Gesamtkosten	35215.- DM
Stillstandskosten	1000.- DM / h	Gesamtkosten ohne Geräte	15215.- DM
Vorbereitungszeit	30 min		
Anzahl Objekte	1		

Tab.11: Rollei 6006 metric (analog)

Die analoge Kamera ist wegen der anderen Meßmethode der Bildkoordinaten (analytischer Plotter mit natürlichen Zielen) nicht so genau wie die Q16, jedoch immer noch unterhalb der Anforderungen. Die mit dieser Konfiguration erreichte Genauigkeit resultiert aus der in der Blockausgleichung der realen Aufnahme ermittelten Standardabweichung der Gewichtseinheit von $\sigma_0 = 13 \mu\text{m}$, die hier in etwa der Bildmeßgenauigkeit entspricht. Die Kosten sind vergleichbar. Interessant ist der Unterschied in der Bildanzahl verglichen mit der real durchgeführten Aufnahme, der auf andere Basislängen und Bildüberdeckungen schließen läßt. Durch den Mechanismus der Rückwärtsverkettung kann auf die entsprechenden Einflußgrößen eingewirkt werden. Die Eingabe der Werte der tatsächlichen Vermessung in die Zielgrößen „Ebenen“ und „Bilder pro Ebene“ führt unter anderen zu den Einflußgrößen der Bildüberdeckung und paßt deren Inhalte entsprechend der Tabelle 12 an. Die Überprüfung der Bildorientierungen aus der Blockausgleichung ergibt, daß tatsächlich die vom Planungssystem ermittelten Überdeckungsverhältnisse denen des vorhandenen Datensatzes näher kommen als die Planungsvorgaben. Der Grund dafür ist in der konventionellen Planung zu suchen, die mit Hilfe einer Skizze des Objektes grafisch vorgenommen und – wie üblich – reichlich mit Sicherheitsfaktoren ausgestattet wurde. Eine Kontrolle der

Meßbilder ergab, daß die Überdeckung erheblich hätte reduziert werden können, ohne die Verknüpfungen zu gefährden.

Parameter	Wert	Zielgröße	Wert
Auflösung (lp/mm)	50 lp/mm	Sensorgröße	50,0 × 50,0 mm
Pixelgröße	-	Bildwinkel (horizontal)	71 gon
Kammerkonstante	40 mm	Bildwinkel (vertikal)	71 gon
Meßgenauigk. im Bild	13 µm	mittleres Bildfeld (Objekt)	3,75 × 3,75 m
horizontale Überdeckung	28 %	mittlere vertikale Basis	1,05 m
vertikale Überdeckung	72 %	Ebenen	9
Bildfolgezeit (Kamera)	1 s	Bilder pro Ebene	8
Positionierzeit (Kamera)	30 s	Anzahl Bilder	72
Positionierzeit (Bühne)	300 s	Aufnahmezeit für alle Bilder	81 min
Gerätekosten	20000.- DM	maximale Auflösung (Objekt)	0,57 lp/mm
Betriebskosten	300.- DM / h	Standardabw. parallel (Objekt)	± 1,14 mm
Kosten Bildmessung	120.- DM / Bild	Standardabw. senkr. (Objekt)	± 3,25 mm
Kosten Blockausgl.	2000.- DM	Auswertekosten	13480.- DM
Kosten Datenhandling	5000.- DM	Gesamtkosten	37895.- DM
Stillstandskosten	1000.- DM / h	Gesamtkosten ohne Geräte	17895.- DM
Vorbereitungszeit	30 min		
Anzahl Objekte	1		

Tab.12: Rollei 6006 metric (analog), aus der realen Vermessung

Die Folge dieser ungenauen konventionell erarbeiteten Auslegung ist laut Planungssystem ein nicht unerheblicher Kostennachteil, der aus einer längeren Aufnahmezeit und aus der aufwendigeren Bildmessung resultiert.

In der Tabelle 13 sind die Ergebnisse des vorangegangenen Beispiels zusammengefaßt.

Kamerasystem	Auflösung	Kammerkonstante	Standardabw. (parallel/senkrecht)	Kosten ohne Geräte
Standard-Video Querformat	752×582 Pixel	10 mm	± 1,05 mm ± 4,53 mm	19190.- DM
Standard-Video Hochformat	582×752 Pixel	10 mm	± 1,05 mm ± 3,50 mm	18316.- DM
Kodak DCS 460 Hochformat	2000×3000 Pixel	24 mm	± 0,44 mm ± 0,75 mm	14800.- DM
Rollei Q16	4000×4000 Pixel	40 mm	± 0,26 mm ± 0,53 mm	15800.- DM
Rollei 6006 metric	50 lp/mm	40 mm	± 1,14 mm ± 2,25 mm	17895.- DM

Tab.13: Zusammenfassung der Ergebnisse

Aus dieser Auflistung kann man ableiten, daß die günstigste Variante mit der Kodak DCS 460 gegeben ist. Wie oben erwähnt, werden die Anschaffungskosten dabei außer acht gelassen. Die in der Praxis verwendete Lösung mit der Rollei 6006 metric wird auch vom Planungssystem als akzeptabel erkannt.

7.3.1.5 Bewertung der Planungsergebnisse

Zur Erfüllung der einzelnen weiter oben erwähnten Anforderungen durch das Planungssystem soll im folgenden Stellung genommen werden.

a) Verbesserung der Übersichtlichkeit

Es hat sich bereits beim vorliegenden Beispiel gezeigt, daß die Gerätedaten nach ihrer Definition im Planungssystem größtenteils im Hintergrund bleiben und nur die für eine Aufgabenstellung relevanten Parameter angefaßt werden. Damit wird der Benutzer bei der Planung deutlich entlastet. Durch die Möglichkeit der Gruppierung von Parametern und den Austauschmechanismen für solche Gruppen muß ein Anwender in diesem Punkt nicht mehr selbst für die Vollständigkeit seiner Konfiguration Sorge tragen. Während der Bearbeitung der Testplanung hat sich gezeigt, daß die Reduzierung eines großen Parametersatzes trotz der hohen Komplexität sicherer ist als eine aktive Zusammenstellung, die zur gleichen Auswahl führen müßte. Es handelt sich hierbei um einen Aspekt der Fehlervermeidung.

b) Bereitstellung und automatische Anwendung der funktionalen Zusammenhänge

Ähnliches wie unter a) gilt auch für die Verknüpfungsfunktionen. Sie werden einmal definiert und treten danach nicht wieder offen in Erscheinung. An keiner Stelle ist im aktuellen Beispiel des Stahlkonverters während der Berechnungen ein Eingreifen notwendig gewesen.

c) Beschleunigung der Planung

Im vorliegenden Beispiel des Konverters beträgt die manuelle Ermittlung aller Zielgrößen bei Vorhandensein aller Ausgangswerte ungefähr 10 – 30 Minuten, abhängig von verwendeten Hilfsmitteln, durchgeführten Kontrollrechnungen, und ähnlichem. Das gleiche Ergebnis ist auf einem handelsüblichen Computer mit dem Planungssystem unmittelbar nach der letzten Eingabe ohne nennenswerte Verzögerung verfügbar. Damit reduziert sich der Zeitaufwand auf die Zusammenstellung der für die jeweilige Konfiguration notwendigen Parameter und auf den Vergleich und die Bewertung der Varianten.

d) Erhöhung der Planungsgenauigkeit

Im Beispiel des Konverters hat sich gezeigt, daß die rechnergestützte Planung wesentlich näher an den Ergebnissen der Vermessung lag als die ursprüngliche Planung. Der Grund dafür ist in der Ungenauigkeit der grafischen Bestimmung der Bildfelder in der konventionellen Planung zu suchen, die zu unnötigen Sicherheitsfaktoren geführt hat.

e) Vermeidung von Fehlern

Der aktuelle Planungsablauf ergab keinen signifikanten Unterschied in bezug auf das Fehlerverhalten. Die Anlage des Beispiels ist jedoch für einen solchen Test nicht geeignet.

f) Bessere Optimierung durch mehr berechenbare Varianten

Im vorliegenden Planungsfall des Stahlkonverters ist die größere Anzahl schnell ermittelbarer Varianten sehr hilfreich für die Beurteilung auch vergleichsweise kleiner Änderungen der Konfiguration, wie sie zum Beispiel durch den Wechsel vom Hoch- zum Querformat derselben Kamera gegeben sind.

7.3.1.6 Fazit

Das vorliegende Beispiel belegt die Anwendbarkeit des Planungssystems. Bereits in dieser Ausbaustufe der Datenbasis und der Verknüpfungsfunktionalität sind die Vorteile des Systems, im wesentlichen basierend auf der hohen Berechnungsgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Berücksichtigung einer großen Anzahl von Einflußgrößen, offensichtlich.

7.3.2 Langfristige Deformation eines Kirchenbauwerkes

7.3.2.1 Aufgabenstellung

Für die Beurteilung von Bewegungstendenzen waren die Veränderungen von Objektpunktkoordinaten in Epochen mit einjährigen Intervallen zu ermitteln. Die angestrebte Standardabweichung war ± 1 mm in jeder Koordinatenkomponente. Die ca. 100 repräsentativen Objektpunkte waren in drei Ebenen bei 1m, 7m und 14 m Höhe über dem Boden angeordnet.

Randbedingungen

Die organisatorisch aufwendige Signalisierung bestand aus 3 cm großen schwarzen Zielen mit 1 cm großer weißer Innenfläche. Ausreichend Raum und günstige Klimabedingung sowie die Vermeidung von Störungen des Aufnahmeproganges konnten gewährleistet werden. Die Lichtverhältnisse waren nicht ausreichend, um ohne Zusatzbeleuchtung auskommen zu können.

7.3.2.2 In der Praxis verwendete Lösung

Gerätekonfiguration

Als Meßkamera wurde eine ZEISS UMK 13/18 verwendet, deren großes Aufnahmeformat (13×18 cm) einen günstigen Abbildungsmaßstab bei gleichzeitig großem Bildfeld im Objekt bietet. Die einzige Alternative war gegeben mit einer Rollei 6006 metric, deren relative Genauigkeit jedoch als zu gering bewertet wurde. Digitale Kameras standen zu Beginn des Projektes noch nicht zur Verfügung.

Geometriekonfiguration

Die Anordnung der Kamerastandpunkte kann der Abbildung 38 entnommen werden. Die in der Skizze angedeuteten Aufnahmerrichtungen wurden mit jeweils zwei Neigungseinstellungen der UMK auf 15° und 30° abweichend von der Horizontalen ausgeführt. Zusätzlich wurde die Kamera senkrecht nach oben ausgerichtet, um Verknüpfungen über die Decke zu erhalten. Es wurde während der Aufnahme konsequent eine Zwangszentrierung auf den Kamerastativen durchgehalten. Damit wurde es möglich, die Kamerastandpunkte mit Hilfe von benachbarten Bildern einzumessen und zusätzliche geodätische Richtungsbeobachtungen in die anschließende Blockausgleichung einzubringen, um die Blockstabilität im ansonsten nicht signalisierten Bodenbereich zu erhöhen. Außerdem wurde ein Feinnivellement durchgeführt. Es wurde ohne Paßpunkte gearbeitet. Der Maßstab wurde durch präzise Streckenmessungen zwischen den Kamerastandpunkten und zum kleinen Teil durch das Nivellement definiert.

Die notwendige Beleuchtung wurde mit mehreren Scheinwerfern unterschiedlicher Leistung realisiert. Dabei wurde ausschließlich Wert auf die Erkennbarkeit der Zielpunkte gelegt und deshalb keine gute Ausleuchtung im Sinne dokumentierender Photographie erreicht.

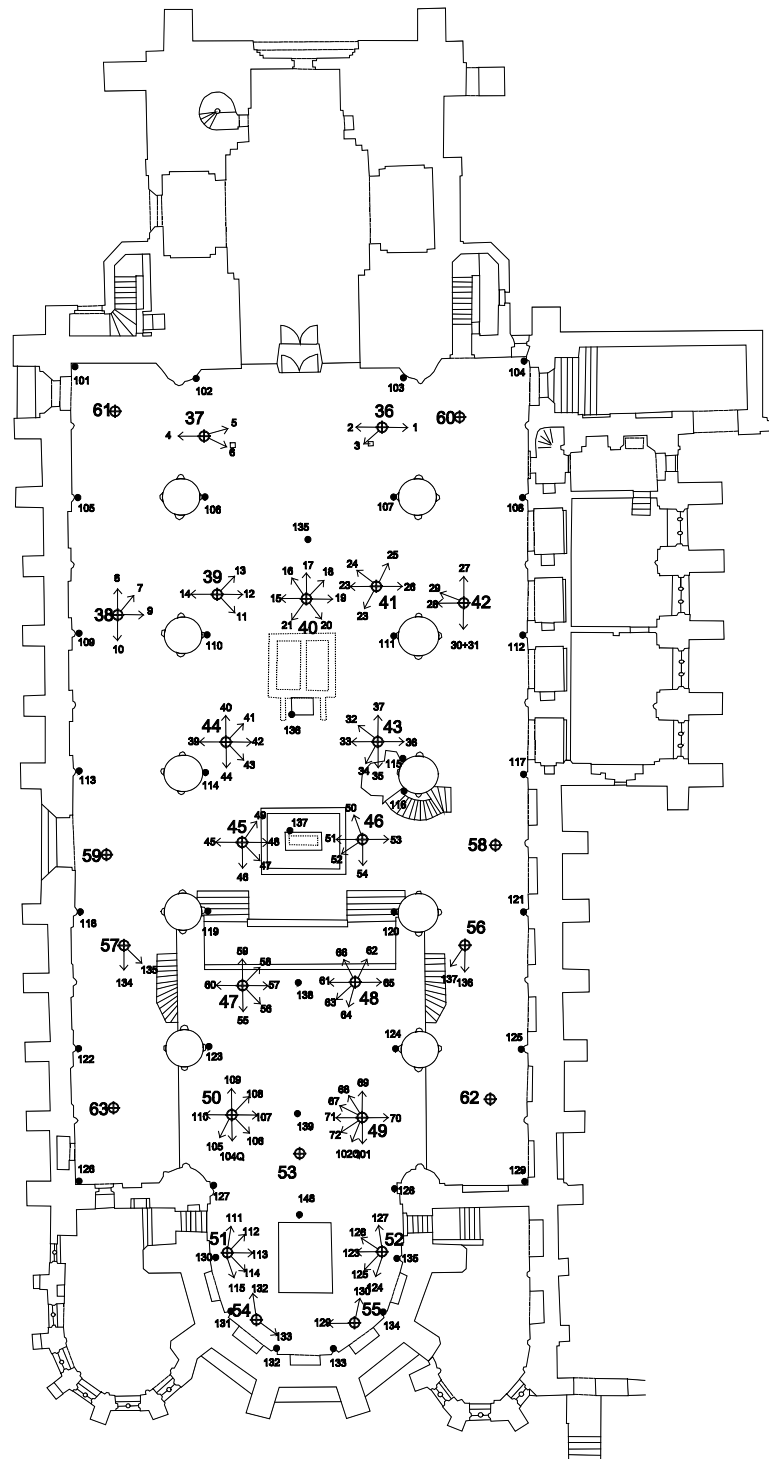


Abb.38: Grundriß mit Standpunkten und Aufnahmerichtungen

Die gesamte Konfiguration ist von vornherein auf die ZEISS UMK zugeschnitten. Der Umfang der Arbeiten ist mit den Epochen gewachsen und resultiert wegen des wissenschaftlichen Aspekts des Projektes (Test eines Blockausgleichsprogrammes) nicht zwangsläufig aus Notwendigkeiten. Die Maßstabsdefinition ist von untergeordneter Bedeutung, weil der Epochenvergleich, der durch eine dreidimensionale

Transformation der verschiedenen Datensätze aufeinander realisiert wird, das Hauptziel darstellt.

7.3.2.3 Ergebnis der Messung

Die erreichte Standardabweichung der Koordinaten der Objektpunkte liegt in allen bisher aufgenommenen Epochen durchschnittlich bei $\pm 0,5$ mm und ist damit wesentlich besser als gefordert. Signifikante Bewegungstendenzen (Abbildung 39) konnten ermittelt werden.

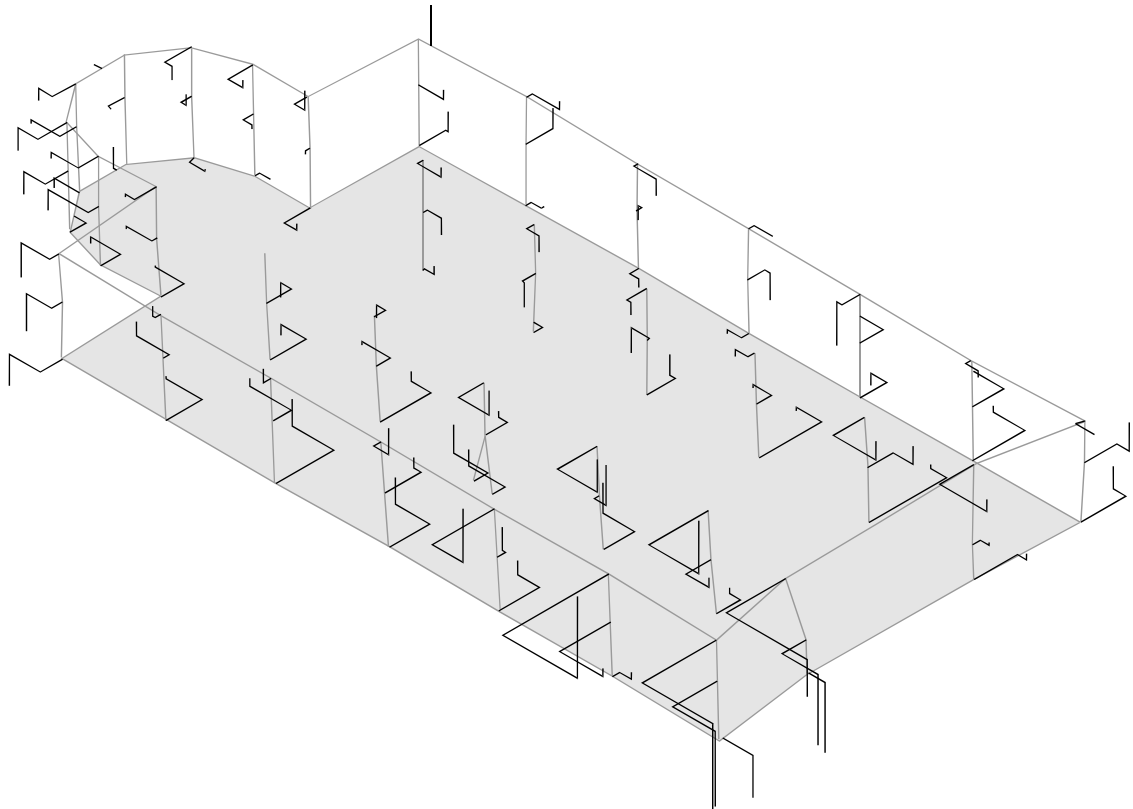


Abb.39: Isometrische Darstellung der Verschiebungskomponenten (schematisch)

7.3.2.4 Einsatz des Planungssystems

Die Modellierung der hier vorliegenden Aufgabenstellung ist erheblich schwieriger als die des vorangegangenen Beispiels. Der Grund dafür ist die wesentlich komplexere Zielpunktverteilung mit Sichtverdeckungen und eine kompliziertere Einschätzung der Genauigkeiten. Letztere läßt sich zum Beispiel mit Hilfe von Simulationsrechnungen bewerkstelligen, die aber hier nicht durchgeführt werden sollen, weil sie für die planungsrelevanten Aspekte nicht unbedingt erforderlich sind.

Das Schwergewicht der Planung soll auf dem Austausch des analogen Kamerasystems durch ein geeignetes digitales liegen. Dabei ist das primäre Ziel die Einhaltung der

Standardabweichung von ± 1 mm der Objektkoordinaten. Der zeitliche und finanzielle Aufwand steht im Hintergrund.

Aus diesem Grund kann die Anforderung an die Objekterfassung – oder indirekt die Form des Objektes bzw. die Verteilung der Zielpunkte –hier vereinfacht werden.

Von den obengenannten Randbedingungen sind die Signalisierung der Zielpunkte und die Lichtverhältnisse prinzipiell von Interesse. Letztere sind jedoch lediglich für den zu leistenden Aufwand maßgeblich und können deshalb hier vernachlässigt werden. Dagegen ist besonders die Größe der Punktsignale entscheidend für die Genauigkeit der Bildkoordinaten bei der digitalen Messung. Es ist außerdem damit zu rechnen, daß der Abstand der Punkte zu groß für die Bildfelder bestimmter digitaler Kameras werden kann und deshalb möglicherweise mit zusätzlicher Signalisierung gearbeitet werden muß.

Die Bereitstellung von Referenzinformationen soll auf die gleiche Weise wie in der realen Vermessung gehandhabt werden und ist hier planerisch von untergeordneter Bedeutung.

Anordnungsgeometrie

Wie oben begründet, kann die Punktverteilung im Objekt vereinfacht werden. Als erster Schritt kann auf die Berücksichtigung der Ziele an den Säulen im Innenraum verzichtet werden, denn die Verhältnisse der Außenwand lassen sich hierauf mit zusätzlichen Aufnahmen angepaßten Abstands übertragen. Sie sind gegebenenfalls bei einer Aufwandsabschätzung zu berücksichtigen. Für die Außenwand wird in der Horizontalen von einer gleichmäßigen Punktverteilung ausgegangen.

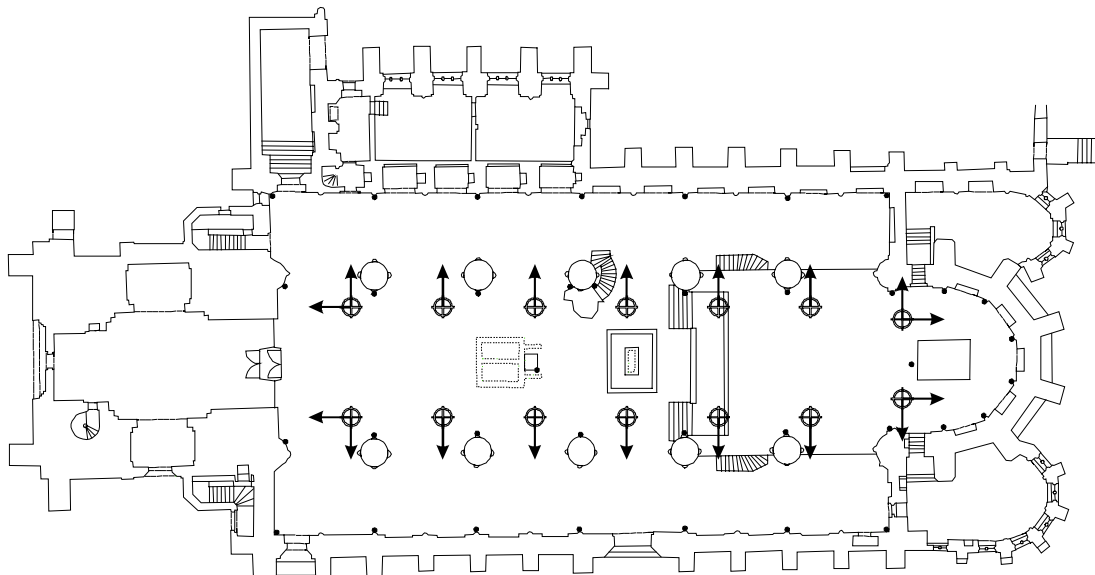


Abb.40: Anordnung der Standpunkte

In der Vertikalen muß zwischen den drei übereinanderliegenden Punktreihen unterschieden werden, weil durch die ausschließlich am Boden mögliche Positionierung der Kamera unterschiedliche Maßstäbe die Folge sind. Damit kommt man zu einer regelmäßigen Anordnung der Standpunkte entlang der Außenwand des Bauwerkes, wie dies schematisch in der Abbildung 40 dargestellt ist. Auf Sichtverdeckungen wird hier keine Rücksicht genommen. Sie können durch zusätzliche Aufnahmen ausgeglichen werden.

Verwendete Parameter und Grundkonfiguration

Die Konzentration des Beispiels auf die Einhaltung der geforderten Genauigkeit der Objektkoordinaten führt zur folgenden Aufstellung wichtiger Systemparameter und Zielgrößen in Tabelle 14 und 15. Dabei soll – anders als im vorigen Beispiel – zunächst die ursprüngliche für die reale Vermessung eingesetzte Konfiguration unter den vereinfachten Bedingungen möglichst gut angenähert werden.

Parameter	ZEISS UMK 13/18	Bemerkung
Auflösung (Pixel)	---	Die Angabe der Pixelauflösung ist nur für digitale Kameras sinnvoll.
Pixelgröße	---	Es werden quadratische Pixel vorausgesetzt.
Sensorgröße horizontal	130 mm	Die Kamera wurde im Hochformat betrieben.
Sensorgröße vertikal	180 mm	Die Sensorgröße könnte auch als Zielgröße definiert werden.
Kammerkonstante	100 mm	Für die UMK mit ihrem großen Bildformat handelt es sich bei diesem Wert um ein Weitwinkelobjektiv.
Bildmessgenauigkeit	3 µm	Ausgegangen wird hier von der Bildmessung mit einem guten analytischen Plotter. Für die digitalen Kameras wird in diesem Beispiel dieser Parameter zu einer Zielgröße (siehe Tabelle 16 der Zielgrößen)
horizontale Überdeckung	60 %	Dieser Wert ist maßgeblich für die Basislänge und bezieht sich auf die Objektentfernung zur untersten Punktreihe. Die vertikale Überdeckung ist hier nur von untergeordneter Bedeutung.
Entfernung zum Objekt	10 m	Die Objektentfernung bezieht sich auf die unterste Punktreihe, die sich etwa in Höhe der Kamera befindet.
Signalgröße im Objekt	10 mm	Die nutzbare Zielpunktgröße ist der Innendurchmesser der vorhandenen Kunststoffmarken.
konvergente Basis	---	Diese Basislänge kann frei festgesetzt werden und ist nicht von der horizontalen Überdeckung abhängig (nähere Beschreibung weiter unten im Text)

Tab.14: Wichtige Parameter der Grundkonfiguration

Die nächste Tabelle enthält die entsprechenden Zielgrößen.

Zielgröße	Bemerkung
Standardabweichung der Objektkoordinaten parallel / senkrecht unten / mitte / oben	Die Betrachtung der Genauigkeiten wird hier aufgeteilt auf die drei unterschiedlich hoch gelegenen Punktreihen und in die Koordinatenkomponenten parallel und senkrecht zur Bildebene.

Basis (u.U. konvergent)	Entweder ist dieser Wert identisch mit dem des Parameters „konvergente Basis“ oder es handelt sich um eine Zielgröße aus der Entfernung und Überdeckung.
Basis-Entfernungs-Faktor unten / mitte / oben	Das Verhältnis der Aufnahmebasis zur Objektentfernung bestimmt erheblich die Genauigkeit in Aufnahmerichtung.
Maßstab unten / mitte / oben	Ausgegangen wird von einer optimal geneigten Kamera und den daraus resultierenden unterschiedlichen Maßstäben für die drei Punktreihen. Optimal geneigt heißt in diesem Zusammenhang, daß die mittlere Punktreihe durch die Bildmitte verläuft.
Signalgröße in Pixel unten / mitte / oben	Diese Zielgröße ist entscheidend wichtig für die Bildmeßgenauigkeit, jedoch nur bei digitalen Aufnahmen.
Bildmeßgenauigkeit unten / mitte / oben	Für analoge Bilder entspricht der Wert dem Ausgangsparameter und ist für alle drei Punktreihen näherungsweise konstant. Die Formel gilt ausschließlich für digitale Bilder.

Tab.15: Wichtige Zielgrößen der Grundkonfiguration

Planungsschritte und -ergebnisse

Die Berechnung der Grundkonfiguration liefert die in Tabelle 16 dargestellten Ergebnisse.

Parameter	Wert	Zielgröße	Wert
Auflösung (Pixel)	---	Standardabweichung im Objekt parallel zur Bildebene	unten: $\pm 0,30$ mm
Pixelgröße	---		mitte: $\pm 0,35$ mm oben: $\pm 0,49$ mm
Sensorgröße horizontal	130 mm	Standardabweichung im Objekt senkrecht zur Bildebene	unten: $\pm 0,58$ mm
Sensorgröße vertikal	180 mm		mitte: $\pm 0,78$ mm oben: $\pm 1,55$ mm
Kammerkonstante	100 mm	Basis-Entfernungs-Faktor	unten: 1,92
Bildmeßgenauigkeit	3 μm		mitte: 2,24 oben: 3,15
horizontale Überdeckung	60 %	Maßstab	unten: 100
Entfernung zum Objekt	10 m		mitte: 117 oben: 164
Signalgröße im Objekt	10 mm	Signalgröße in Pixel	unten: ---
konvergente Basis	---		mitte: --- oben: ---
		Bildmeßgenauigkeit	unten: 3 μm mitte: 3 μm oben: 3 μm
		Basis	5,2 m

Tab.16: Zeiss UMK 13/18, Hochformat

Die getrennte Behandlung der drei unterschiedlich hoch gelegenen Punktreihen erweist sich als sinnvoll, denn die oberste von ihnen zeigt ein deutlich ungünstigeres Genauigkeitsverhalten in der Aufnahmerichtungskomponente als die anderen beiden. Es liegt nahe, daß die Kameraanordnung im Hochformat, wie sie in der Praxis überwiegend verwendet wird, mit der kürzeren Formatseite in Basisrichtung nachteilig ist. Die Tabelle 17 zeigt die Querformatvariante.

Parameter	Wert	Zielgröße	Wert
Auflösung (Pixel)	---	Standardabweichung im Objekt parallel zur Bildebene	unten: $\pm 0,30$ mm mitte: $\pm 0,35$ mm oben: $\pm 0,49$ mm
Pixelgröße	---		
Sensorgröße horizontal	180 mm	Standardabweichung im Objekt senkrecht zur Bildebene	unten: $\pm 0,42$ mm mitte: $\pm 0,57$ mm oben: $\pm 1,12$ mm
Sensorgröße vertikal	130 mm		
Kammerkonstante	100 mm	Basis-Entfernungs-Faktor	unten: 1,39 mitte: 1,62 oben: 2,28
Bildmeßgenauigkeit	3 μm		
horizontale Überdeckung	60 %	Maßstab	unten: 100 mitte: 117 oben: 164
Entfernung zum Objekt	10 m		
Signalgröße im Objekt	10 mm	Signalgröße in Pixel	unten: --- mitte: --- oben: ---
konvergente Basis	---		
		Bildmeßgenauigkeit	unten: 3 μm mitte: 3 μm oben: 3 μm
		Basis	7,2 m

Tab.17: Zeiss UMK 13/18, Querformat

Die in der Aufgabenstellung geforderte Genauigkeit von ± 1 mm wird nach wie vor nicht in allen Punkten erreicht. Der kritische Parameter ist die Basis zwischen den Aufnahmeorten. Sie wird von der Bildüberdeckung in horizontaler Richtung und der Aufnahmeentfernung beeinflusst. Erstere müßte, um eine längere Basis zu erreichen, reduziert werden. Die nutzbare Bildfläche wird dabei jedoch sehr gering und uneffektiv.

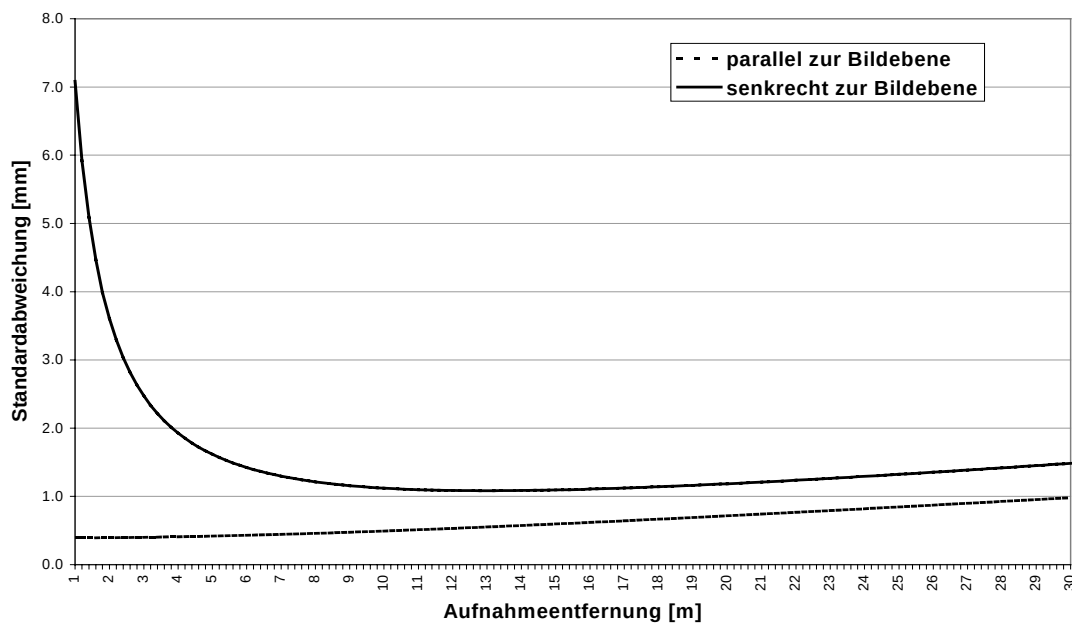


Abb.41: Standardabweichung der Objektkoordinaten in Abhängigkeit von der Aufnahmeentfernung

Eine Änderung der Aufnahmeentfernung führt, wie die Abbildung 41 zeigt, auch nicht zum gewünschten Ergebnis. Erst die Einführung von Konvergenzaufnahmen mit unabhängig wählbarer Basislänge löst das Problem, wie die Tabelle 18 zeigt. Die in der Praxis verwendete Konfiguration benutzt, wie in Abbildung 39 zu sehen ist, ebenfalls konvergente Aufnahmerichtungen.

Parameter	Wert	Zielgröße	Wert
Auflösung (Pixel)	---	Standardabweichung im Objekt parallel zur Bildebene	unten: $\pm 0,30$ mm
Pixelgröße	---		mitte: $\pm 0,35$ mm oben: $\pm 0,49$ mm
Sensorgröße horizontal	180 mm	Standardabweichung im Objekt senkrecht zur Bildebene	unten: $\pm 0,30$ mm
Sensorgröße vertikal	130 mm		mitte: $\pm 0,41$ mm oben: $\pm 0,81$ mm
Kammerkonstante	100 mm	Basis-Entfernungs-Faktor	unten: 1,00
Bildmeßgenauigkeit	3 μm		mitte: 1,17 oben: 1,64
horizontale Überdeckung	100 %	Maßstab	unten: 100
Entfernung zum Objekt	10 m		mitte: 117 oben: 164
Signalgröße im Objekt	10 mm	Signalgröße in Pixel	unten: ---
konvergente Basis	10 m		mitte: --- oben: ---
		Bildmeßgenauigkeit	unten: 3 μm mitte: 3 μm oben: 3 μm
		Basis	10 m

Tab.18: Zeiss UMK 13/18, Querformat, konvergente Basis

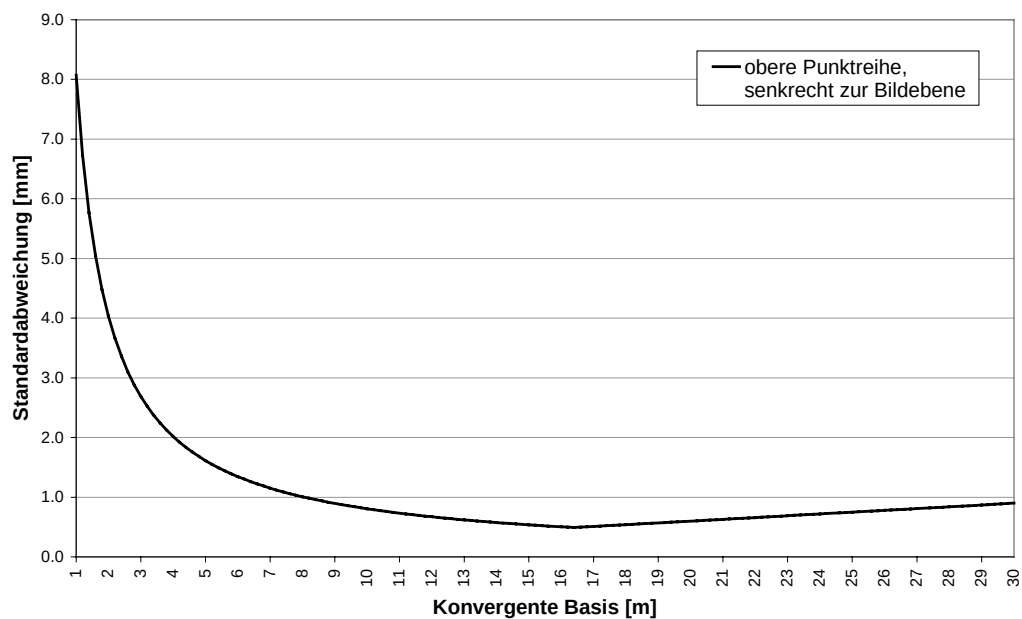


Abb.42: Standardabweichung der Objektkoordinaten in Abhängigkeit von der Länge der konvergenten Basis

Die Kurve in Abbildung 42 beschreibt das Verhalten der Objektkoordinatengenauigkeit der obersten Punktreihe in Abhängigkeit der gewählten konvergenten Basis. Bei etwa 10 m sinkt die Standardabweichung deutlich genug unter die geforderte Grenze. Je größer der Abstand wird, desto ungünstiger wirkt sich das auf die Effektivität der Anordnung aus. Der Knick in der Kurve ist auf die Unstetigkeit der Funktion (siehe Formel 9) zurückzuführen, die bei einem Basis-Entfernungsverhältnis von 1:1 zum Tragen kommt und sich hier auf die Distanz der Kamera zur oberen Punktreihe bezieht. Der Übergang zu digitalen Systemen geschieht zunächst mit der Kodak DCS 460 (Tabelle 19). Die Zwischenschritte, die zu diesem Resultat geführt haben, werden aus Platzgründen übergangen.

Parameter	Wert	Zielgröße	Wert
Auflösung (Pixel)	3000 × 2000	Standardabweichung im Objekt parallel zur Bildebene	unten: ± 0,10 mm
Pixelgröße	11,7 µm		mitte: ± 0,22 mm oben: ± 0,64 mm
Sensorgröße horizontal	35 mm	Standardabweichung im Objekt senkrecht zur Bildebene	unten: ± 0,19 mm
Sensorgröße vertikal	23,33 mm		mitte: ± 0,28 mm oben: ± 0,89 mm
Kammerkonstante	50 mm	Basis-Entfernungs-Faktor	unten: 2,00
Bildmeßgenauigkeit	---		mitte: 1,28 oben: 1,39
horizontale Überdeckung	100 %	Maßstab	unten: 100
Entfernung zum Objekt	5 m		mitte: 156 oben: 279
Signalgröße im Objekt	10 mm	Signalgröße in Pixel	unten: 9
konvergente Basis	10 m		mitte: 5 oben: 3
		Bildmeßgenauigkeit	unten: 1,0 µm mitte: 1,4 µm oben: 2,3 µm
		Basis	10 m

Tab.19: Kodak DCS 460, Querformat, konvergente Basis

Zu bedenken ist bei der Einschätzungen der Genauigkeiten, daß das Bildfeld bei einem 50 mm – Objektiv im Abstand von 5 m sehr klein ist und deshalb bei der großen Basis die Signale nicht mehr symmetrisch sind. Die Ergebnisse sind daher zu optimistisch. Der Basis-Entfernungs-Faktor zeigt für die untere Punktreihe die Auswirkung der bereits weiter oben beschriebenen Unstetigkeit. Eine weitere Variante mit größerem Bildformat soll in Form der Rollei Q16 auf ihre Eignung geprüft werden (Tabelle 20).

Parameter	Wert	Zielgröße	Wert
Auflösung (Pixel)	4000 × 4000	Standardabweichung im Objekt parallel zur Bildebene	unten: ± 0,15 mm
Pixelgröße	12,0 µm		mitte: ± 0,20 mm oben: ± 0,38 mm
Sensorgröße horizontal	50 mm	Standardabweichung im Objekt senkrecht zur Bildebene	unten: ± 0,15 mm
Sensorgröße vertikal	50 mm		mitte: ± 0,24 mm oben: ± 0,63 mm

Kammerkonstante	80 mm	Basis-Entfernungs-Faktor	unten: $\pm 1,00$ mitte: $\pm 1,17$ oben: $\pm 1,64$
Bildmeßgenauigkeit	---		
horizontale Überdeckung	100 %	Maßstab	unten: 125 mitte: 146 oben: 205
Entfernung zum Objekt	10 m		
Signalgröße im Objekt	10 mm	Signalgröße in Pixel	unten: 7 mitte: 6 oben: 4
konvergente Basis	10 m		
		Bildmeßgenauigkeit	unten: $1,2 \mu\text{m}$ mitte: $1,4 \mu\text{m}$ oben: $1,9 \mu\text{m}$
		Basis	10 m

Tab.20: Rollei Q16, konvergente Basis

Mit doppelter Entfernung zum Objekt, gleicher konvergenter Basis und ebenfalls der Verwendung eines Normalobjektivs werden bereits bessere Genauigkeiten erzielt. Außerdem meldet das Planungssystem eine günstigere Ausnutzung des Wertebereichs der beteiligten Parameter, d.h. es besteht ein größerer Abstand zu den Grenzwerten. Abschließend soll gezeigt werden, daß der Durchmesser der verwendeten Punktsignale maßgeblichen Einfluß auf die erzielbaren Genauigkeiten hat und daß die Konfiguration damit erheblich in ihrer Effizienz gesteigert werden kann.

Parameter	Wert	Zielgröße	Wert
Auflösung (Pixel)	4000×4000	Standardabweichung im Objekt parallel zur Bildebene	unten: $\pm 0,22 \text{ mm}$ mitte: $\pm 0,29 \text{ mm}$ oben: $\pm 0,55 \text{ mm}$
Pixelgröße	$12,0 \mu\text{m}$		
Sensorgröße horizontal	50 mm	Standardabweichung im Objekt senkrecht zur Bildebene	unten: $\pm 0,22 \text{ mm}$ mitte: $\pm 0,34 \text{ mm}$ oben: $\pm 0,89 \text{ mm}$
Sensorgröße vertikal	50 mm		
Kammerkonstante	40 mm	Basis-Entfernungs-Faktor	unten: 1,00 mitte: 1,17 oben: 1,64
Bildmeßgenauigkeit	---		
horizontale Überdeckung	100 %	Maßstab	unten: 250 mitte: 292 oben: 410
Entfernung zum Objekt	10 m		
Signalgröße im Objekt	30 mm	Signalgröße in Pixel	unten: 10 mitte: 9 oben: 6
konvergente Basis	10 m		
		Bildmeßgenauigkeit	unten: $0,9 \mu\text{m}$ mitte: $1,0 \mu\text{m}$ oben: $1,3 \mu\text{m}$
		Basis	10 m

Tab.21: Rollei Q16, konvergente Basis, größere Zielpunktsignale

Mit diesem Ergebnis sind die planerischen Grundlagen für die hier vorliegende Aufgabenstellung erarbeitet. Eine weitere Optimierung ist in Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit der Konfiguration möglich und wäre durch die Parametrisierung

entsprechender Einflußgrößen realisierbar, wie es im vorangegangenen Beispiel des Stahlkonverters geschehen ist.

Auch hier soll die zusammenfassende Tabelle 22 eine Übersicht über die Planungsergebnisse geben. Betrachtet wird bei den Genauigkeitsangaben nur die kritische oberste Punktreihe.

Kamerasystem	Sensorgröße	Kammerkonstante	Basis	Standardabw. (parallel/senkrecht)
Zeiss UMK 13/18 Hochformat	130 × 180 mm	100 mm	4,2 m	± 0,49 mm ± 1,55 mm
Zeiss UMK 13/18 Querformat	180 × 130 mm	100 mm	7,2 m	± 0,49 mm ± 1,12 mm
Zeiss UMK 13/18 Querformat	180 × 130 mm	100 mm	10 m konvergent	± 0,49 mm ± 0,81 mm
Kodak DCS 460 Querformat	35 × 23 mm	50 mm	10 m konvergent	± 0,64 mm ± 0,89 mm
Rollei Q16	50 × 50 mm	80 mm	10 m konvergent	± 0,38 mm ± 0,63 mm
Rollei Q16 30 mm Signalgröße	50 × 50 mm	40 mm	10 m konvergent	± 0,55 mm ± 0,89 mm

Tab.22: Zusammenfassung der Ergebnisse

Wegen ihrer im vorliegenden Fall höheren Bildmeßgenauigkeit haben die digitalen Kameras gegenüber der in der Praxis eingesetzten UMK keine Nachteile in bezug auf die prinzipiell erreichbare Genauigkeit, allerdings bei teilweise kleinen Bildfeldern im Objekt. Das Optimum bei den vorliegenden Kriterien stellt die Rollei Q16 dar. Der Übergang zu größeren Punktsignalen erhöht bei den digitalen Kameras die Flexibilität bei der Wahl der Anordnungsgeometrie.

7.3.2.5 Bewertung der Planungsergebnisse

Es folgt die ebenfalls vom vorigen Anwendungsbeispiel bekannte Diskussion der anfangs festgelegten Kriterien.

a) Verbesserung der Übersichtlichkeit

Die im aktuellen Fall verwendbaren Geräte entstammen einer vergleichsweise kleinen in Frage kommenden Gruppe. Deshalb tritt der Vorteil der vorhandenen Gerätedatenbasis nicht so sehr in den Vordergrund. Trotzdem ist auch hier der Anwender von der manuellen Anpassung aller relevanten Geräteparameter entlastet.

b) Bereitstellung und automatische Anwendung der funktionalen Zusammenhänge

Besonders die Berechnung der für jede Konfiguration mit digitalen Kameras jeweils unterschiedlichen Bildmessgenauigkeiten der einzelnen Punktgruppen hat sich als sehr hilfreich erwiesen. Besonders die Möglichkeit, Kurven von Abhängigkeiten der

Einflußgrößen zu erstellen, erleichtert die Auffindung der richtigen Tendenz bei der Anpassung der Parameter.

c) Beschleunigung der Planung

Der schon im vorangegangenen Beispiel beschriebene Zeitvorteil konnte auch hier größenordnungsmäßig bestätigt werden. Die Tatsache, daß alle verwendeten Geräte bereits integriert waren, reduzierte den Neueingabeaufwand auf die Definition der dynamischen Bildmeßgenauigkeit und die Anforderungen der aktuellen Aufgabenstellung, insbesondere die Trennung der Zielpunktgruppen nach der Objekthöhe.

d) Erhöhung der Planungsgenauigkeit

Besonders die Modellierung der maßstabsabhängigen Bildmeßgenauigkeit, aber auch die Möglichkeit der Berechnung von Abhängigkeitskurven und deren Extremwerten konnte dazu beitragen, daß die Bereiche der besten Optimierung der Parameter wesentlich gezielter eingesetzt werden konnten. Insbesondere bei der Relation der Basislängen zu den Objektkoordinatengenauigkeiten in Aufnahmerichtung wurde dieser Vorteil ausgespielt.

e) Vermeidung von Fehlern

Bei der bereits durchgeführten konventionellen Planung der nächsten Epoche der Bauwerksaufnahme wurde ebenfalls überlegt, ob der Einsatz von digitalen Kameras in Frage käme. Die Überschlagsrechnungen ergaben eine zu geringe Signalgröße im Bild, um die hohen Genauigkeitsforderungen einzuhalten. Hierbei handelt es sich offensichtlich um einen Planungsfehler, denn die manuelle Überprüfung der Ergebnisse des Planungssystems ergab deren Korrektheit.

f) Bessere Optimierung durch mehr berechenbare Varianten

Wie schon in der Beschreibung der einzelnen Planungsschritte erwähnt, wurde eine Vielzahl von zusätzlichen Varianten und Abhängigkeiten geprüft, um die aktuellen Ergebnisse zu erhalten. Dabei spielte hier jedoch die Bestimmung der korrekten Tendenzen eine größere Rolle als die Optimierung selbst.

7.3.2.6 Fazit

Auch mit dieser Aufgabenstellung konnten die Anwendbarkeit des Planungssystems und die Vorteile seines Einsatzes belegt werden. Die notwendige starke Vereinfachung der Behandlung der Anordnungsgeometrie allerdings führt zu der Forderung nach einem leistungsfähigeren Algorithmus, welches jedoch kein grundsätzliches, sondern lediglich ein aufwandsabhängiges Problem darstellt.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der grundlegenden Theorie zu einem rechnergestützten Planungssystem für photogrammetrische Aufnahmen im Nahbereich und dessen Implementation. Zunächst wird die Aufgabenstellung definiert, die aus der Komplexität und Gerätevielfalt der Anwendungen in der Nahbereichsphotogrammetrie entsteht.

Die darauf folgende thematische Abgrenzung, die vor allem der Übersichtlichkeit der zu behandelnden Systemparameter dienen soll, ergibt sich mit der als sinnvoll erscheinenden Beschränkung auf terrestrische und nicht-topographische Problemstellungen, insbesondere im Bereich der Industrie und der Architektur. Dieser Bereich wird mit „Nahbereichsphotogrammetrie“ bezeichnet. Ausschließlich die geometrische Datenerfassung wird behandelt, bildliche Dokumentations- und Interpretationsaufgaben nicht. Dabei wird nur auf „klassische“ Methoden eingegangen, Verfahren wie der Kodierte Lichtansatz oder die Moiré-Technik gehören nicht dazu. Digitale Aufnahmesysteme stehen im Vordergrund.

Anschließend werden typische Geräte und Verfahren vorgestellt, die in der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie häufig verwendet werden.

Die theoretischen Grundlagen für die Planung von photogrammetrischen Aufnahmesystemen werden erarbeitet. Zugehörige Aspekte können mit Begriffen wie Geräteauswahl, Anordnungsgeometrie, Auswerteverfahren, Randbedingung und Handhabung sowie deren Grundkonfiguration und Optimierung charakterisiert werden. Die prinzipiell durch ein Planungssystem lösbaren Aufgaben werden zusammengestellt.

Der nächste Abschnitt befaßt sich mit den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten der Realisierung eines Planungssystems. Dabei wird die konventionelle Art der Planung untersucht. Es folgen Überlegungen, wie das dazu notwendige Wissen und die Vorgehensweise gegebenenfalls durch ein Expertensystem repräsentiert werden kann. In der Literatur vorhandene Ansätze zu Geräte- und Netzkonfigurationsplanungen werden geprüft. Als Schlußfolgerung ergibt sich die Einschätzung, daß das vorliegende Problem eine typische Anwendung für Methoden der „Künstlichen Intelligenz“ darstellt. Die Realisierung soll wegen des zu erwartenden hohen Aufwandes zunächst als ein die Planung unterstützendes Werkzeug ausgeführt werden. Die Anlage der verwendeten Datenstrukturen wird so gewählt, daß sie als Wissensbasis für ein echtes Expertensystem geeignet ist. Die existierenden Möglichkeiten für eine Implementierung werden zusammengestellt und kritisch bewertet.

Die Entwicklung eines neu konzeptionierten Planungssystems wird durchgeführt. Begonnen wird mit der Festlegung der internen Strukturen. Dazu gehört der logische Aufbau der Systemparameter. Deren Anordnung in zwei miteinander verknüpften Rahmensystemen ist als der Kern dieser Neuentwicklung anzusehen. Charakteristisch ist die Untergliederung derselben Basisgrößen zum einen in Geräte-, Umgebungs- und Verfahrenskomponenten und zum anderen in durch geometrische und logistische Funktionalitäten verbundene Zielgrößen. Die Abhängigkeiten werden in einem ersten

und auch strukturgebenden Schritt mit Hilfe von Vorwärtsverkettungen von unten aus den Basisinhalten heraus zu höheren Ordnungsniveaus formuliert. Die als wesentlicher Planungsvorgang anzusehende automatische Anpassung von untergeordneten Parametern, zum Beispiel nach dem Austausch einer Gerätekomponekte, wird durch Methoden der Rückwärtsverkettung ermöglicht. Dabei zwangsläufig auftretende Mehrdeutigkeiten werden durch geeignete Strategien und die damit verbundene Einführung von Gewichtsfunktionen behandelt.

Der Ablauf einer Planung mit dem neuen System ergibt sich aus der internen Datenstruktur. Je nach fachlichem Niveau des Anwenders können Ordnungsstrukturen selbst festgelegt oder aber vorhandene verwendet werden. Der erste echte Planungsschritt ist die Festlegung von Anforderungen, die durch die aktuell gestellte Vermessungsaufgabe gegeben sind. Es folgt die Definition eines initialen Systems durch die Verwendung entweder bekannter Parametersätze oder mitgelieferter Standardwerte. Die anschließende Berechnung der Zielgrößen, deren höchste Ebene durch die Gegenstücke zu den Anforderungswerten repräsentiert wird, ermöglicht dem Benutzer durch direkte Gegenüberstellung eine Beurteilung der aktuellen Konfiguration. Das System schlägt Variationen vor, die gegebenenfalls das Erreichen der Anforderungen oder eine Verbesserung der Effektivität zum Ziel haben. Dem Anwender ist überlassen, ob er diese nutzt oder aber eigene Modifikationen vornimmt, deren Folgeanpassungen dann wiederum das System durchführt. Dieser Vorgang läuft iterativ ab, bis das gewünschte Ergebnis erreicht ist. Das Erscheinungsbild des Planungssystems während dieser Vorgänge wird exemplarisch dargestellt mit Hilfe von Bildschirmausdrucken der wichtigsten Fenster.

Weitergehende konzeptionelle Untersuchungen werden durchgeführt. Dazu gehören grundsätzliche Überlegungen zu den verschiedenen Methoden der Gewinnung von Basisdaten sowie die Entwicklung eines Ansatzes zur automatischen Erstellung einer Kameraanordnungsgeometrie. Die wichtigsten Ausstattungsmerkmale einer effektiven Implementation werden aufgezählt, ebenso wie erforderliche Voraussetzungen und Einschränkungen in bezug auf Objektdaten und Umgebungsbedingungen. Es folgen Betrachtungen zu Effekten von Sichtverdeckungen, zur Abbildungsgeometrie, zu initialen Standpunktverteilungen sowie zu den photogrammetrischen notwendigen Elementen wie Verknüpfungs- und Paßpunkten. Vorschläge zur Optimierung gefundener Anordnungen und entsprechende Beurteilungskriterien werden diskutiert.

Ein weiteres Kapitel beschäftigt sich mit einer neuartigen Nutzungsmöglichkeit. Dieses basiert auf der Platzierung des Planungssystems im globalen Computer-Netzwerk. Ein umfassendes Konzept einer derartigen Dienstleistung wird vorgestellt.

Zur Verdeutlichung der Arbeitsweise des neuen Planungssystems wird ein beispielhafter Datensatz einschließlich der zugehörigen Zielgrößen aufgestellt. Die einzelnen Parameter werden erläutert und in die dafür vorgesehenen Strukturen eingeordnet. Den Schluß bilden zwei Anwendungen, die konkret als photogrammetrische Aufnahmen in der Praxis durchgeführt wurden. Die tatsächlich verwendeten Konfigurationen werden neu geplanten gegenübergestellt. Variationen einiger maßgeblicher Parameter und die Berechnung von Abhängigkeiten werden mit dem Planungssystem durchgeführt.

Die Resultate aus diesen Tests belegen die Einsetzbarkeit des Planungssystems sowie die daraus resultierenden Vorteile. Als Schlußfolgerungen ergeben sich mehrere Aspekte:

Definitionsgemäß muß die rechnergestützte Planung dieselben Ergebnisse liefern, die auch bei einer konventionell durchgeführten manuellen Vorgehensweise erhalten werden, wenn alle verwendeten Einflußgrößen und deren Verknüpfungsfunktionen exakt identisch sind. Es hat sich gezeigt, daß Unterschiede bei der Auswahl der verwendeten Parameter häufig auftreten, womit unterschiedliche Detailtiefen und Realitätstreuen die Folge sind. Ab einem bestimmten Niveau ändert eine detailliertere Modellierung des Systems nichts mehr an der Tendenz der Planung. Lediglich die Präzision der Ergebnisse wird damit verbessert. Eine fehlende Modellierung wichtiger Größen jedoch ist nach den Erfahrungen mit dem Planungssystem kritisch.

Der Ablauf einer Planung wird erheblich beschleunigt, besonders wenn dem Planungssystem ein ausreichender Parametersatz und ein großer Bestand an funktionalen Zusammenhängen bereits zur Verfügung steht. Dies bedeutet auch, daß mit zunehmender Nutzungsdauer bei immer wieder unterschiedlichen Aufgabenstellungen die Effizienz zunimmt. Daß eine denkbare Überladung mit Details dieser Tatsache wieder entgegenwirkt, konnte bisher noch nicht festgestellt werden. Der Zeitvorteil der computergestützten Berechnung der Konfiguration gegenüber der manuellen Methode wird allerdings nicht vollständig ausgenutzt, weil viel mehr Varianten zur Optimierung herangezogen werden.

Die Präzision einer Planung wird durch das Einbeziehen vieler Parameter erhöht. Bei einer konventionellen Planung stößt man dabei schnell an Aufwandsgrenzen. Für das Planungssystem ist die Anzahl der verwendeten Einflußgrößen von untergeordneter Bedeutung. Ein weiterer Grund für die höhere Planungsgenauigkeit ist die Vermeidung der übermäßigen Aufsummierung von Sicherheitsfaktoren bei den einzelnen Planungsschritten, die aus der Unübersichtlichkeit des Vorgangs entsteht.

Nach den Erfahrungen mit den Testplanungen kann außerdem die Aussage getroffen werden, daß die Fehleranfälligkeit bei rechnergestützten Planungen erheblich geringer ist als bei konventionellen. Folglich reduziert sich der Aufwand für Kontrollen und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse steigt.

Mit der vorliegenden Arbeit wurde die Grundlage für ein leistungsfähiges Planungssystem geschaffen und gleichzeitig die Realisierbarkeit der Implementation demonstriert. Die jetzt erforderlichen Schritte bestehen in der Optimierung der Operationalität des bestehenden Programmes und in der Erweiterung der Datenbasis. Darauf folgend kann die Ergänzung durch eine Erklärungs- sowie Inferenzkomponente im Sinne der Expertensystemtheorie vorgenommen werden.

Literatur

- Atkinson, K.B.: „Close Range Photogrammetry and Machine Vision“, Whittles Publishing, 1996
- Bammeke, A.A., Baldwin, R.A.: „Designing and Planning of Close-Range Photogrammetric Networks: Is an Expert System Approach feasible?“, ISPRS Comm.V Washington, 1992
- Bosetti: „Einführung in die Künstliche Intelligenz“, Data Becker, 1987
- Breuckmann: „Modulares optisches 3D-Meßsystem“, Breuckmann GmbH, 1996
- Chibunichev, A.: „Network Optimization in Industrial Photogrammetry“, ISPRS Comm. V Washington, 1992
- Dalsa: „Dalsa Databook 1996-1997“, Dalsa Inc., 1996
- Fraser, C.S.: „Optimization of Networks in Non-Topographic Photogrammetry“, ASPRS: Non-Topographic Photogrammetry, 1989
- Hartmann, D., Lehner, K.: „Technische Expertensysteme“, Springer, 1990
- Hehn, A.: „C-Toolbox zur Datenbankentwicklung“, tewi, 1990
- Hofmann, G.R.: „Imaging – Bildverarbeitung und Bildkommunikation“, Springer, 1993
- Holst, G.C.: „CCD Arrays, Cameras, and Displays“, JDC Publishing und SPIE Press, 1996
- Inglis, A.F., Luther, A.C.: „Video Engineering“, McGraw-Hill, 1996
- Jordan, Eggert, Kneissl: „Handbuch der Vermessungskunde“, Bd.III/a2 – Photogrammetrie, Metzlersche Verlagsbuchhandlung, 1972
- Kodak: Firmenprospekt, 1996
- Konecny, G., Lehmann, G.: „Photogrammetrie“, de Gruyter, 1984
- Kraus, K.: „Photogrammetry Vol.1“, Verlag Dümmler, 1993
- Krisch, L.: „Fernsehtechnik“, Vieweg, 1993
- Leica: Firmenprospekt, 1996

- Luhmann, T.: „Rechnergestützte Planung und Berechnung von Aufnahmekonfigurationen für CCD-Bildsensoren“, Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 3/1994
- Mason, S., Képuska, V.: „On the Representation of Close-Range Network Design Knowledge“, ISPRS Comm.V Washington, 1992
- Meyers Grosses Taschenlexikon, B.I. Taschenbuchverlag, 1995
- Novini, A.R.: „The Lighting and Optics Expert System for Machine Vision“, ISPRS Comm.V Washington, 1992
- Pekelsky, J.R., van Wijk, M.C.: „Moiré-Topography: Systems and Applications“, ASPRS: Non-Topographic Photogrammetry, 1989
- Rathjen, Ch.: „Untersuchungen zu Mehr-Wellenlängen-Verfahren und deren Anwendungen auf Projektionsmoirés zur absoluten Formerfassung“, VDI, 1996
- Reinken, A.: „Automatische Auswerteverfahren in der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie am Beispiel eines Stahlkonverters“, Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, 1998
- Schlemmer, H.: „Grundlagen der Sensorik“, Wichmann, 1996
- Schneider, N.: „Kantenhervorhebung und Kantenverfolgung in der industriellen Bildverarbeitung“, Vieweg, 1990
- Schnupp, P., Nguyen Huu, C.T.: „Expertensystem-Praktikum“, Springer, 1987
- Schwarz, W.: „Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau“, Wittwer, 1995
- Sedgewick, R.: „Algorithmen“, Addison-Wesley, 1992
- Soll, H.-J.: „KI-Expertensysteme programmieren“, Franzis, 1988
- Sony: Firmenprospekt, 1996
- Stede, M.: „Einführung in die künstliche Intelligenz“, Heise, 1987
- Thompson, M.M., Gruner, H.: „Foundations of Photogrammetry“, Manual of Photogrammetry, American Society of Photogrammetry, 1980
- Wong, K.W., Obaidat, M.T.: „A Knowledge Based System for Stereo Video Measurement“, ISPRS Comm V Melbourne, 1994
- Zavodnik, R., Kopp, H.: „Graphische Datenverarbeitung“, Hanser, 1995

Lebenslauf

21.09.1960	geboren in Rössing, Kreis Springe, Niedersachsen
August 1967 – Juli 1971	Grundschule in Rössing
August 1971 – Juli 1973	Gymnasium Himmelsthür
August 1973 – Juli 1980	Gymnasium Sarstedt
Juni 1980	Abitur am Gymnasium Sarstedt
Juli 1980 – September 1981	Grundwehrdienst als Radartiefflugmelder bei der Luftwaffe in Faßberg
Oktober 1981 – Juli 1983	Maschinenbau-Studium an der Universität Hannover
Oktober 1983 – August 1990	Studium des Vermessungswesens an der Universität Hannover
August 1990	Diplom Vermessungswesen an der Universität Hannover
seit September 1990	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen an der Universität Hannover

Dank

Zunächst möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. mult. G. Konecny und Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Seeber für die Übernahme der Referate und die Betreuung meiner Promotion danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Chr. Heipke danke ich für die konsequente Bereitstellung des erforderlichen Freiraumes in der Endphase der Arbeiten.

Meiner Lebensgefährtin Anja möchte ich besonders danken, weil sie mit viel Geduld und Verständnis immer wieder für neue Motivation gesorgt hat. Meinen Eltern danke ich dafür, daß sie mir teilweise unter eigenen persönlichen Einschränkungen den Ausbildungsweg bis zu diesem Abschluß ermöglicht haben.

Schließlich bin ich meinen Kollegen und Kolleginnen am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen sehr dankbar für die durchweg positive Stimmung in der Arbeitsumgebung und natürlich auch für die konkrete Unterstützung bei der Verwirklichung dieser Dissertation.

Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover

(Eine vollständige Liste der Wiss. Arb. ist beim Geodätischen Institut (<http://130.75.74.60/gihwww/publikat.htm>), Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, Tel. +49-511-762 2473, Fax. +49-511-762 2468, e-mail massow@gih.uni-hannover.de erhältlich.)

- | | | |
|---------|---|--|
| Nr. 206 | TEGUH, H.: | Untersuchungen zur Stereoauswertung von SPOT-Satellitenaufnahmen mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung (Diss. 1994) |
| Nr. 207 | WANG, Y: | Strukturzuordnung zur automatischen Oberflächenrekonstruktion (Diss. 1994) |
| Nr. 208 | HEUNECKE, O: | Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver KALMAN-Filterung (Hannoversches Filter) (Diss. 1995) |
| Nr. 209 | FESTSCHRIFT: | Festschrift für Univ.-Prof. Dr.-Ing.habil. Dr.h.c.mult. Hans Pelzer zum 60. Geburtstag (1996) |
| Nr. 210 | ROMAO, V. M. C.: | Der Beitrag von GPS zur Bereitstellung des Raumbezugs für Geoinformationssysteme in kartographisch wenig erschlossenen Gebieten(Diss. 1995) |
| Nr. 211 | FRÖHLICH, M.: | Zur Entwicklung eines Hochpräzisen Permanenten Positionierungsservice (HPPS) (Diss. 1995) |
| Nr. 212 | GROTE, Th: | Regionale Quasigeoidmodellierung aus heterogenen Daten mit „cm“-Genauigkeit (Diss. 1996) |
| Nr. 213 | ARDIANSYAH, M: | Auswertung von SPOT-Daten mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden zur Untersuchung der Anwendungsmöglichkeit für das indonesische Kartenwerk (1996) |
| Nr. 214 | POHL, Chr.: | Geometric Aspects of Multisensor Image Fusion for Topographic Map Updating in the Humid Tropics (Diss.1996) |
| Nr. 215 | GOLDAN, H.-J.: | Beiträge zur GPS-gestützten Höhenbestimmung im Küstenbereich (Diss. 1996) |
| Nr. 216 | KRAUTER, E.,
PELZER, H.,
SPELLAUGE, R.: | Ingenieurgeologische und ingenieurgeodätische Methoden zur Erfassung und Beschreibung von Hangrutschungen am Beispiel eines Großrutschareals nordöstlich von Quito (Seminarbeiträge Quito, 1994) |
| Nr. 217 | HEER, R.,
PELZER, H.: | Proceedings of the 6th International FIG-Symposium on Deformation Measurements, 24-28 February, 1992 |
| Nr. 218 | KUHLMANN, H.: | Ein Beitrag zur Überwachung von Brückenbauwerken mit kontinuierlich registrierten Messungen (Diss. 1996) |
| Nr. 219 | KNIPP, K.: | Untersuchungen zur Verwaltung und Verarbeitung von abbildenden Radardaten des Fernerkundungssatelliten ERS-1(Diss. 1996) |
| Nr. 220 | LEE, J. O.: | Untersuchung von Verfahren zur kombinierten Aerotriangulation mittels integrierten GPS/INS (Diss. 1996) |
| Nr. 221 | SIEBE, E.: | Komponenten einer digitalen photogrammetrischen Stereo-Arbeitsstation und Auswertungen von Scanner-Daten (Diss. 1997) |
| Nr. 222 | SCHIEWE, J.: | Geo-Modellierungen mit Daten des Weltraumsensors MOMS-02 (Diss. 1997) |
| Nr. 223 | WILLEKE, U.: | Zur Anwendung von Expertensystemen in der Grundstückswertermittlung (Diss. 1997) |
| Nr. 224 | GÜLAL, E.: | Geodätische Überwachung einer Talsperre; eine Anwendung der KALMAN-Filtertechnik (Diss. 1997) |
| Nr. 225 | SCHMITZ, M.: | Untersuchungen zur strengen GPS Parametrisierung in der gemeinsamen Ausgleichung von kinematischem GPS und Aerotriangulation (Diss. 1998) |
| Nr. 226 | GENS, R.: | Quality assessment of SAR interferometric data |
| Nr. 227 | FESTSCHRIFT | Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Gottfried Konecny zur Emeritierung (1998) |
| Nr. 228 | FOPPE, K.: | Abschlußbericht DFG-Projekt Pe 187/9 "Geotechnisches Informationssystem" |
| Nr. 229 | BEHREND, D.: | Untersuchungen zur Schwerefeldbestimmung in den europäischen Randmeeren (Diss. 1999) |
| Nr. 230 | SANTITAMNONT, Ph. | Interferometric SAR Processing for Topographic Mapping (Diss. 1998) |
| Nr. 231 | SCHWIEGER, V. | Ein Elementarfehlermodell für GPS-Überwachungsmessungen - Konstruktion und Bedeutung interepochaler Korrelationen (Diss. 1998) |
| Nr. 232 | POLLAK, B. | Ein rechnergestütztes Planungssystem für die digitale Nahbereichsphotogrammetrie (Diss. 1999) |

Die Arbeiten werden im Rahmen des wissenschaftlichen Schriftenaustausches verteilt und sind nicht im Buchhandel erhältlich. Der Erwerb ist zu einem Stückpreis zwischen DM 30,-- und DM 50,-- bei den herausgebenden Instituten möglich.