

KfK 4943
Oktober 1991

GMS — ein Fernvermessungssystem zur Korrektur von CAD-Modellen

B. Köhler
Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Kernfusion

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Institut für Reaktorentwicklung

Projekt Kernfusion

KfK 4943

**GMS - ein Fernvermessungssystem zur
Korrektur von CAD-Modellen**

B. Köhler

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für
Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH)

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

GMS - ein Fernvermessungssystem zur Korrektur von CAD-Modellen

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Vermessungssystem GMS (Geometry Measurement System) entwickelt. Die Auslegung des Systems orientierte sich an den Vermessungsaufgaben in dem geplanten Fusionsreaktor NET (Next European Torus), und deshalb war die komplette Fernbedienbarkeit eine der wichtigsten Vorgaben bei der Systementwicklung. Ein Auflösungsvermögen von 10^{-4} und eine Reichweite von mindestens 20 m waren weitere Systemanforderungen. Zur Korrektur von CAD-Modellen sollen die Meßergebnisse ferner auf ein CAD-System transferiert werden. Basierend auf diese Vorgaben hat eine Untersuchung verschiedener Meßprinzipien ergeben, daß die Triangulation mit Theodoliten das geeignetste Verfahren ist, die gestellten Anforderungen zu erfüllen.

Das konzipierte GMS-System besteht aus mindestens zwei elektronischen Theodoliten. Die Horizontal-, die Vertikal- und die Fokusantriebe der Instrumente sind mit rechnergesteuerten Motoren ausgestattet. Mit Kameras, die jeweils am Theodolitfernrohr angebracht sind, können die Zielungen an Monitoren beobachtet werden. Um zu demonstrieren, daß die gestellten Anforderungen mit dem konzipierten Systementwurf erfüllbar sind, wurde ein GMS-Prototypsystem aufgebaut. Dieser GMS-Prototyp ist bisher nur mit einem einzelnen motorisierten Kameratheodoliten ausgerüstet.

Für den geforderten Datenaustausch CAD \leftrightarrow GMS wird die systemneutrale IGES-Schnittstelle verwendet, die fast von allen CAD-Systemen unterstützt wird. Die Positionen und die Reihenfolge der GMS-Zielpunkte können am CAD-Modell des Vermessungsobjekts festgelegt werden. Der implementierte IGES-Postprozessor des GMS-Systems interpretiert die vom CAD-System erstellte IGES-Datei und erzeugt automatisch die erforderlichen Eingabedateien für das GMS-Programm. Nach der Vermessung werden die errechneten Meßpunktkoordinaten wieder auf das CAD-System transferiert. Der IGES-Präprozessor des GMS-Systems erstellt eine IGES-Datei, in welcher die GMS-Ergebnisse eingetragen sind.

Entsprechend den vorgegebenen Zielpunktpositionen, wird der GMS-Theodolit automatisch auf diese Punkte ausgerichtet. Die exakte Einstellung auf die Zielpunkte wird aber vom Operateur gesteuert. Bei dieser Zielausrichtung orientiert sich der Operateur am Monitorbild des Kameratheodoliten. Dieser Einstellvorgang wird vom GMS-Programm durch zahlreiche Funktionen unterstützt. Besonders die GMS-Graphikunterstützung, die direkt dem Bild der Theodolitkamera überlagert werden kann, bietet eine breite Palette unterschiedlicher Einstellhilfen. Der Operateur kann sich z.B. das Vermessungsobjekt in einer Drahtmodellardarstellung einblenden lassen und an dieser überlagerten Graphik die Positionen der Zielpunkte anschaulich erkennen.

Zur Kompensation der Instrumentenneigung werden bei Präzisionstheodoliten elektronische Libellen verwendet. Diese Kompensatoren haben aber einen eingeschränkten Arbeitsbereich und die Theodolite müssen innerhalb dieses Bereichs durch Stellspindeln am Gerät bisher manuell horizontiert werden. Zur Realisierung der geforderten Fernbedienbarkeit wurde deshalb die automatische Horizontierungsplattform ALF (Automatic Levelling Facility) entwickelt. Mit der motorisch angetriebenen ALF-Plattform kann der GMS-Theodolit nun ferngesteuert horizontiert werden.

Durch zahlreiche Tests mit dem GMS-Prototypen konnte nachgewiesen werden, daß das System die gestellten Anforderungen erfüllt. Auch bei mehreren praktischen Einsätzen hat sich das GMS-Prototypsystem bereits bewährt.

GMS - a remote-controlled surveying system to update CAD models

Abstract

The surveying system GMS (Geometry Measurement System) has been developed within the framework of this thesis. GMS was designed to meet the requirements imposed by application in the future fusion reactor NET (Next European Torus). Hence, completely remote operability was one of the most important criteria in systems development. A resolution of 10^{-4} and a minimum range of 20 m were further requirements. In addition, the measured results need to be transferred to a CAD system for correction the CAD models. On the basis of these criteria a study of various surveying principles indicated triangulation with theodolites to be the most suitable technique.

The concept of GMS calls for the use of at least two electronic theodolites. The horizontal, the vertical and the focusing drives of the instruments are equipped with computer-controlled motors. Cameras attached to the theodolite telescopes allow targeting to be observed on monitors. To demonstrate that the requirements can be met by this conceptual systems design, a GMS prototype has been built. So far, this GMS prototype has been equipped with only one motor-operated camera theodolite.

The standardized IGES interface, which is supported by nearly all CAD systems, is used for the required CAD↔GMS data exchange. The positions and the sequence of GMS target points can be defined in the CAD model of the surveying object. The implemented IGES postprocessor of GMS interprets the IGES data of the CAD system and generates automatically the required input data files for the GMS program. After surveying, the coordinates calculated for the points of measurement are transferred back to the CAD system. For this purpose, the IGES preprocessor of GMS compiles an IGES data file, which contains the GMS results.

Based on the preset target point positions, the GMS theodolite is automatically aligned to these points. However, exact aiming at these target points is controlled by the operator. For exact target pointing, the operator uses the monitor image of the camera theodolite. This aiming process is supported by the GMS program in different ways. Especially the graphic support of the GMS system, which is displayed together with the image of the theodolite camera on the same screen, offers a wide range of different aiming aids. The operator can call, e.g., a wire-frame model of the surveying object; this superimposed graph will clearly indicate the positions of the target points.

To compensate for any inclination of the instrument, precision theodolites use electronic leveling systems. However, these compensators have only limited working ranges, and hence, the theodolites up to now had to be leveled by manual driven adjusting screws. To achieve the required remote operability the automatic horizon adjustment platform ALF (Automatic Leveling Facility) has been developed. With the motor-driven ALF platform the GMS theodolite can be leveled under remote control.

Numerous tests with the GMS prototype have demonstrated that the system meets the requirements. The prototype GMS has even proved to work satisfactorily in a number of field applications.

| | |
|---|-----------|
| 1.0 Einleitung | 1 |
| 2.0 Geometry Measurement System (GMS) | 7 |
| 2.1 Triangulation mit Theodoliten | 7 |
| 2.2 Konzeption des GMS-Systems | 9 |
| 3.0 GMS-Prototypsystem | 13 |
| 3.1 Motorisierter Kameratheodolit | 14 |
| 3.1.1 Aufbau des Kameratheodoliten | 15 |
| 3.1.2 Optik des Kameratheodoliten | 16 |
| 3.1.3 Steuerung der motorisierten Theodolitantriebe | 18 |
| 3.2 Anvisieren der Zielpunkte | 22 |
| 3.3 Erfassen der Beobachtungswinkel | 25 |
| 3.3.1 Eingabedateien | 26 |
| 3.3.2 Initialisierung | 28 |
| 3.3.3 Bestimmen der Theodolitkoordinaten | 30 |
| 3.3.4 Registrierung der Beobachtungswinkel | 32 |
| 3.3.5 Datensicherung | 33 |
| 3.4 Auswertung der Beobachtungswinkel | 34 |
| 4.0 Datenaustausch CAD-GMS | 37 |
| 4.1 Systemneutrale CAD-Schnittstellen | 38 |
| 4.2 IGES-Datenformat | 39 |
| 4.3 Festlegen der Zielpunkte am CAD-Modell | 44 |
| 4.4 IGES-Postprozessor des GMS-Systems | 45 |
| 4.5 IGES-Präprozessor des GMS-Systems | 49 |
| 5.0 Bedienerunterstützende GMS-Graphik | 53 |
| 5.1 Aufbereiten der Modelldateien | 54 |
| 5.2 Perspektivische Transformation der Drahtmodellgraphik | 55 |
| 5.2.1 Zentralprojektion der Theodolitkamera | 55 |
| 5.2.2 Berechnung der Bildkoordinaten | 56 |
| 5.3 Ablauf und Aufbau des GMS-Graphikprogramms | 59 |
| 5.3.1 Graphikbefehle des GMS-Steuerrechners | 59 |
| 5.3.2 Befehlsmenü des GMS-Graphikprogramms | 65 |
| 6.0 Automatische Horizontierungsplattform | 67 |
| 6.1 Mechanischer Aufbau der Horizontierungsplattform | 67 |
| 6.2 Elektronik und Steuerung der Horizontierungsplattform | 70 |
| 7.0 Vermessungen mit dem GMS-Prototypsystem | 75 |
| 7.1 Testmessungen mit dem GMS-Prototypsystem | 75 |
| 7.2 Praktische Einsätze des GMS-Prototypsystems | 79 |
| 8.0 Schlußbetrachtung | 85 |
| Anhang A. Räumlicher Rückwärtsschnitt | 87 |
| Anhang B. Der Linearencoder des Fokusantriebs | 91 |

| | |
|--|------------|
| Anhang C. Korrektur der Beobachtungswinkel | 93 |
| Anhang D. Freie Netzausgleichung mit dem Programm NETZ3D | 95 |
| Anhang E. IGES-Elemente die der GMS-Postprozessor interpretieren kann | 97 |
| E.1 DE-Parameter | 97 |
| E.2 PD-Parameter | 98 |
| Anhang F. GMS-Eingabedateien | 103 |
| F.1 CAD-IGES-Datei | 103 |
| F.2 Zielpunktdatei | 107 |
| F.3 Maßstabdatei | 107 |
| F.4 Geometriedatei | 107 |
| F.5 Kofaktorendatei der Referenzpunkte | 110 |
| Anhang G. Ausrichten des Theodoliten auf vorgegebene Zielpunktpositionen .. | 111 |
| Anhang H. Die Berechnung des Hilfspunktes eines Kreisbogens | 113 |
| Anhang I. GMS-Ausgabedateien | 115 |
| I.1 Beobachtungswinkeldatei | 115 |
| I.2 Meßergebnisdatei | 115 |
| I.3 Die GMS-IGES-Datei | 118 |
| Anhang J. Mensch/Maschine-Schnittstelle des GMS-Programms | 123 |
| J.1 Graphikbefehle | 123 |
| J.2 Befehle zur Theodolitsteuerung | 124 |
| Anhang K. Umwandlung der Kreisbögen in Liniensegmente | 127 |
| Anhang L. Parameter für das GMS-Graphikprogramm | 129 |
| Anhang M. Größe des erfaßten Bildausschnitts | 131 |
| Anhang N. Der Zielpunktversatz im Weitwinkelbild | 133 |
| Anhang O. Schnittstelle des GMS-Graphikprogramms | 135 |
| Literaturverzeichnis | 139 |

| | |
|---|-----|
| 1. Entwurf für den Fusionsreaktor NET (Next European Torus) | 1 |
| 2. Vermessungssystem mit CAD-Ankopplung (vereinfachte Darstellung) | 2 |
| 3. Systemkonfiguration beim Vorwärtseinschneiden | 8 |
| 4. Systemkonfiguration des GMS | 9 |
| 5. Datenaustausch über eine neutrale Schnittstelle | 10 |
| 6. Basislatte aus Invarmaterial | 11 |
| 7. Systemkonfiguration des GMS-Prototypen | 13 |
| 8. Der motorisierte Kameratheodolit des GMS-Prototypsystems | 15 |
| 9. Theodolitfernrohr mit CCD-Kamera und motorisiertem Fokusantrieb | 17 |
| 10. Bildfeld des CCD-Chips | 18 |
| 11. Parallaxe des Weitwinkelbildes | 18 |
| 12. Motorisierter Vertikaltrieb (Theodolitgehäuse geöffnet) | 19 |
| 13. Bedienpanel zur Theodolitsteuerung | 21 |
| 14. Arbeitsablaufdiagramm für GMS-Vermessungen | 25 |
| 15. Möglichkeiten der GMS-Kopplung an CAD-Systeme | 37 |
| 16. CAD-Modell mit markierten Meß- und Referenzpunkten | 45 |
| 17. Datenfluß CAD → GMS → CAD | 46 |
| 18. CAD-Modell mit dem GMS-Meßergebnis | 52 |
| 19. Modell mit Markierung aller Zielpunkte | 55 |
| 20. Das Kamerakoordinatensystem $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ | 57 |
| 21. Der Darstellungsbereich der GMS-Graphik | 57 |
| 22. Die Zentralprojektion einer Linie | 58 |
| 23. Modell mit Markierung aller Zielpunkte (Kamerabild ausgeblendet) | 60 |
| 24. Verkleinerte graphische Darstellung des Vermessungsobjekts | 61 |
| 25. Parallaxenskala | 62 |
| 26. Parallaxenkorigiertes Fadenkreuz | 62 |
| 27. Graphische Markierung des Fadenkreuzentrums | 63 |
| 28. Konstruktionszeichnung für die automatische Horizontierungsplattform | 68 |
| 29. Automatische Horizontierungsplattform mit aufgesetztem Theodoliten | 69 |
| 30. Prinzip der Horizontierelektronik für eine Achse | 71 |
| 31. Automatische Horizontierungsplattform mit Horizontierelektronik | 71 |
| 32. Standardzielmarke (rechts) und selbstentwickelte Retroreflexmarke (links) | 76 |
| 33. Aluminiummodell für die Genauigkeitsuntersuchung | 76 |
| 34. Vermessung des Testfelds mit dem IMS-System | 77 |
| 35. Zentraler Leitstand des GMS-Prototypsystems | 78 |
| 36. GMS-Vermessung am EMIR (Extended Multi-joint Robot) | 79 |
| 37. Das CATROB-Fernhandhabungssystem | 80 |
| 38. CAD-Modell des CATROB-Portalkrans für die GMS-Vermessung | 81 |
| 39. Manipulator für den TFTR-Reaktor | 82 |
| 40. Systemkonfiguration beim Rückwärtseinschneiden | 87 |
| 41. Ebener Rückwärtsschnitt für die Lagebestimmung | 88 |
| 42. Abbildungsgeometrie der CCD-Kamera (Lochkameramodell) | 93 |
| 43. Strahlengang der Weitwinkel- und Fernrohroptik (Draufsicht) | 133 |
| 44. Strahlengang der Weitwinkel- und Fernrohroptik (Seitenansicht) | 134 |
| 45. Protokoll der GMS-Graphikschnittstelle | 137 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 1. | Einsatzbedingungen für ein Vermessungssystem bei NET | 3 |
| 2. | Die fünf vereinbarten Konstantentypen des IGES-Formates | 40 |
| 3. | Die Parameter der Global Section | 42 |
| 4. | Die Elementattribute der Directory Entry Section | 43 |
| 5. | Technische Daten der Horizontierungsplattform ALF | 73 |
| 6. | Die zulässigen DE-Einträge der Elemente die vom GMS-Postprozessor interpretiert werden können | 97 |
| 7. | PD-Satz des Elements Punkt | 98 |
| 8. | PD-Satz des Elements Gerade | 98 |
| 9. | PD-Satz des Elements Kreisbogen | 99 |
| 10. | PD-Satz des Elements Zusammengesetzte Kurve | 99 |
| 11. | PD-Satz des Elements Transformationsmatrix | 100 |
| 12. | PD-Satz des Elements Text | 100 |
| 13. | PD-Satz des Elements Teilbild | 101 |
| 14. | PD-Satz des Elements Beziehung (Bauteilgeometrie) | 101 |
| 15. | PD-Satz des Elements Beziehung (Punkt-Textverbindung) | 101 |
| 16. | Befehle zur interaktiven Graphiksteuerung | 123 |
| 17. | Tastenbelegung des numerischen Tastaturblocks (VT100-Terminal) | 124 |
| 18. | Befehle zur Cursor/Maussteuerung | 125 |
| 19. | Die implementierten Befehlssequenzen der GMS-Graphik | 136 |

1.0 Einleitung

Im Rahmen eines europäischen Forschungsprogramms für NET (Next European Torus, s. Abb. 1) sollen auch die speziellen Handhabungstechniken für Fusionsreaktoren entwickelt werden /1/. Ein zentraler Punkt bei diesen Entwicklungsarbeiten ist die Zielsetzung, daß möglichst alle während des Betriebs durchzuführenden Wartungs- und Montagearbeiten komplett fernbedient erfolgen sollen. Um den Zeitaufwand zu verringern, sollte der Automatisierungsgrad bei diesen Arbeiten möglichst hoch sein. Damit Handhabungsvorgänge zum Teil oder komplett automatisiert werden können, muß die aktuelle Istgeometrie der Handhabungsobjekte und ihrer Umgebung bekannt sein. Auch für eine rechnergesteuerte Kollisionsvermeidung bzw. geschickte Hindernisumfahrung kann diese Information genutzt werden. Da durchaus damit gerechnet werden muß, daß sich die Objektgeometrien während des Reaktorbetriebs verändern, soll bei NET ein Fernvermessungssystem eingesetzt werden, das bei Bedarf die aktuelle Istgeometrie vor Ort vermessen kann. Ziel dieser Arbeit ist es, ein Vermessungssystem zu entwickeln, das für diesen Einsatzzweck geeignet ist.

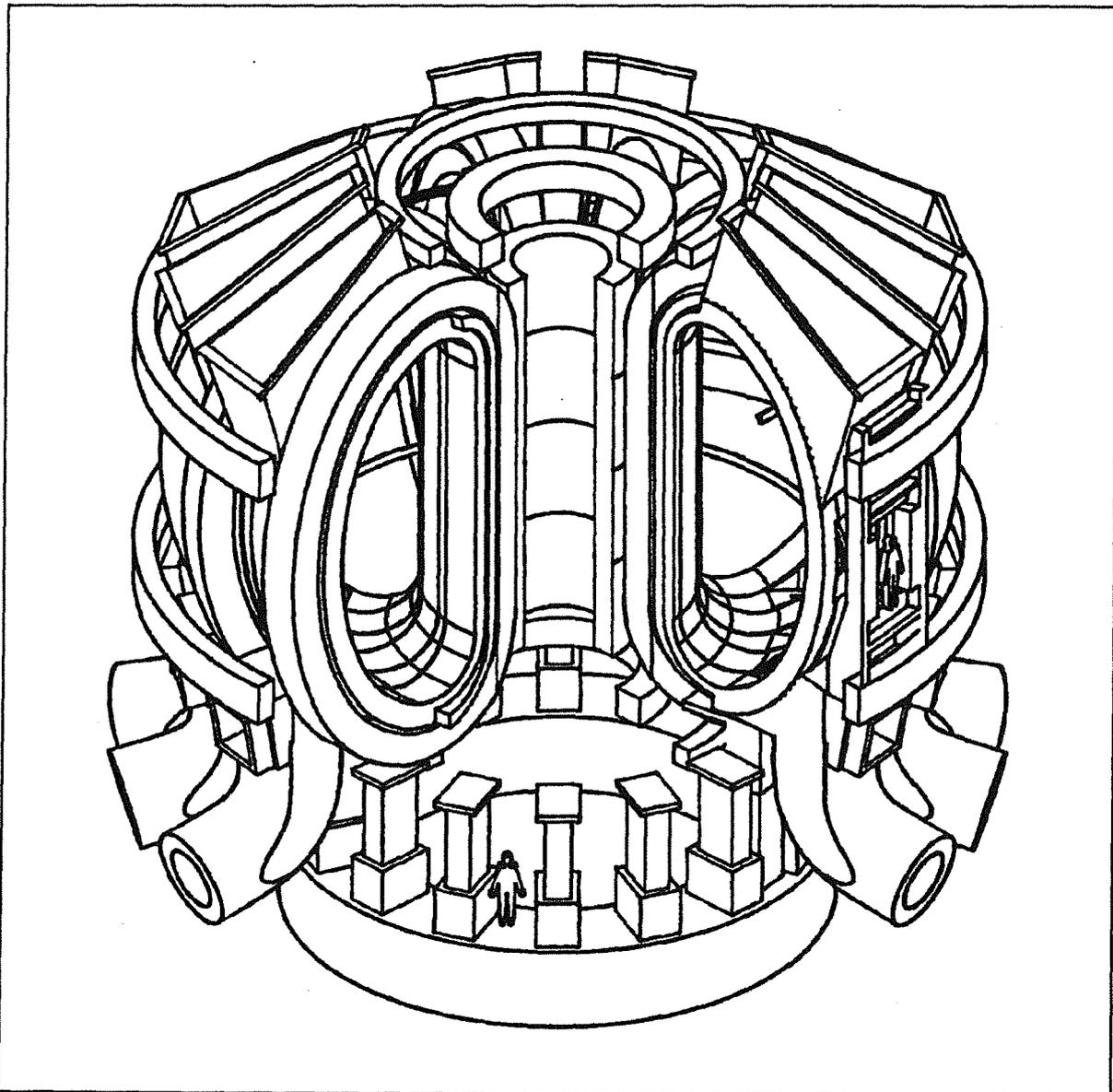


Abbildung 1. Entwurf für den Fusionsreaktor NET (Next European Torus)

Da konkrete Vermessungsaufgaben für NET noch nicht genau spezifiziert werden konnten, wurden die folgenden Anforderungen für ein geeignetes Fernvermessungssystem formuliert:

1. Datenaustausch mit CAD-Systemen

Die Sollpositionen der Meßpunkte werden am CAD-Modell festgelegt und an das Vermessungssystem übertragen (s. Abb. 2). Dieses ermittelt die aktuellen Istpositionen und die Ergebnisse werden wieder auf das CAD-System transferiert. Anhand der gemessenen Istkoordinaten der Meßpunkte kann dann die CAD-Modellgeometrie korrigiert werden, und die festgestellten geometrischen Veränderungen können von den übrigen CAD-gestützten Systemen (Roboter, Simulationssysteme, ...) berücksichtigt werden.

2. Komplett fernbedient

Um Gesundheitsgefährdungen für Menschen auszuschließen, sollen sämtliche Arbeiten im Reaktorgebäude möglichst fernbedient durchgeführt werden. Da auch das Vermessungssystem direkt vor Ort eingesetzt werden soll, muß auch dieses System komplett fernbedienbar sein; deshalb auch die Bezeichnung Fernvermessungssystem.

3. Auflösungsvermögen: 0,01 %

Diese Forderung entspricht einer Meßpunktgenauigkeit von einem Millimeter bei einer Objektentfernung von 10 m. Die hohe Genauigkeit ist erforderlich, da verschiedene Maschinenteile nach einer gewissen Betriebszeit ausgetauscht und die neu eingesetzten Teile genau eingepaßt werden müssen.

4. Reichweite: 20 m

Entsprechend der Größe der geplanten Fusionsmaschine (Durchmesser ca. 10 m) ist die Zielentfernung eines Vermessungsobjekts maximal ca. 10 m. Da auch Markierungen an den Gebäudewänden angezielt werden sollen, wurde eine erforderliche Reichweite von 20 m festgelegt.

Für NET ist geplant, daß Vermessungen sowohl innerhalb als auch außerhalb des Torus durchgeführt werden sollen. Da die Einsatzbedingungen für ein Vermessungssystem im Innern des Reaktors sehr viel härter sind (s. Tabelle 1 auf Seite 3), wurde beschlossen, zunächst ein Vermessungssystem für den Einsatz außerhalb des Torus zu entwickeln. Bis auf die relativ geringe Strahlenbelastung sind diese Bedingungen außerhalb des Torus ähnlich einer Industriehalle. Bei der Vermessung im Innern ist neben der hohen Strahlen- und Temperaturbelastung zu beachten, daß der Vermessungsvorgang ohne Abbau des Vakuums durchgeführt werden sollte, da das erneute Evakuieren sehr zeit- und aufwendig ist. Die Entwicklungen in diesem Bereich beschränken sich zur Zeit auf den

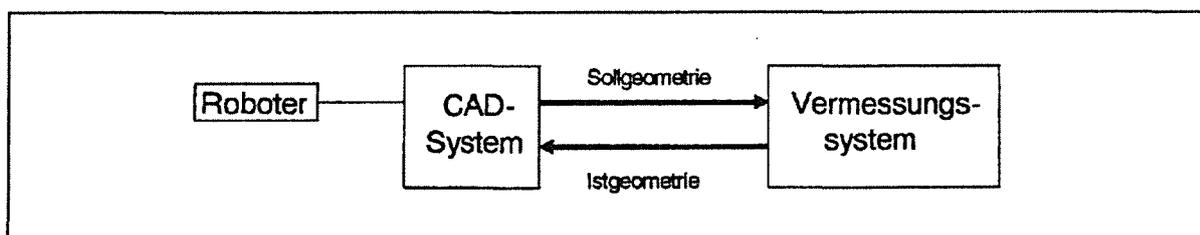


Abbildung 2. Vermessungssystem mit CAD-Ankopplung (vereinfachte Darstellung)

| | Strahlung [rad/h] | Temperatur [°C] | Druck |
|---------------------|--------------------|------------------|--------|
| außerhalb des Torus | ≈ 10 | ≈ 25 | normal |
| innerhalb des Torus | ≈ 10 ⁶ | ≈ 300 | Vakuum |

Tabelle 1. Einsatzbedingungen für ein Vermessungssystem bei NET

skizzierten Entwurf eines Theodolit-Periskops /2/ und sollen hier nicht näher erläutert werden.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Geometry Measurement System (GMS) wurde entsprechend den obigen Anforderungen konzipiert und ist für einen Einsatz außerhalb des Reaktors geeignet. Beim Aufbau eines GMS-Prototypsystems wurde bisher auf einen besonderen Schutz gegen die auch außerhalb des Torus auftretende radioaktive Strahlung verzichtet. Für einen Einsatz bei NET müßten die vor Ort eingesetzten elektronischen Bauteile speziell abgeschirmt werden. Die GMS-Entwicklungen orientierten sich zwar an den NET-Forderungen, aber auch für zahlreiche industrielle Vermessungsaufgaben sind die mit dem GMS-System erzielten Genauigkeiten und Reichweiten ausreichend.

Zu Beginn der Entwicklungsarbeiten (1984) wurden in einer früheren Studie die Eigenschaften unterschiedlicher Meßprinzipien (mechanisches Abtasten, Interferometrie, Laufzeitmessungen, Triangulationverfahren) untersucht /3/. Das Ergebnis dieser Arbeit war, daß die Triangulation mit Theodoliten (s. Kap. 2.1) das geeignetste Meßverfahren ist, um die von NET gestellten Anforderungen zu erfüllen. Durch zahlreiche bereits durchgeführte Vermessungen im industriellen Bereich /4/,/5/,/6/ war bereits nachgewiesen, daß mit Theodolitmeßsystemen die geforderte Genauigkeit und Reichweite erfüllt werden kann. Aufgrund der geforderten Fernbedienbarkeit des GMS-Systems müssen die Antriebe der eingesetzten Theodolite motorisiert sein. Zusätzlich ist es erforderlich, daß die Theodolitzielungen über Kameras beobachtet werden können. Für den Aufbau eines GMS-Prototypsystems wurde 1985 ein speziell modifizierter Theodolit vom Typ T 2000S /7/ beschafft, dessen beide Achsen mit rechnergesteuerten Schrittmotoren bestückt sind. Dieses Instrument wurde 1988 vom Hersteller mit einer integrierten CCD-Kamera und einem motorisierten Fokusantrieb nachgerüstet.

Auch von der Industrie wurden die Theodolitmeßsysteme weiterentwickelt. Bei den mittlerweile verfügbaren Systemen SPACE /8/ und ATMS /9/ werden, wie beim GMS-System, motorisierte Kameratheodolite eingesetzt. Die Entwicklungsziele waren jedoch bei diesen Systemen andere als bei dem GMS, auch wenn deren Aufbau äußerlich sich nur wenig von der GMS-Konfiguration (s. Kap. 2.0) unterscheidet. Während SPACE und ATMS dafür ausgelegt sind, spezielle Zielmarkierungen vollautomatisch zu erkennen und zu vermessen, wird bei dem GMS-Prototypsystem die Feineinstellung auf die Zielpunkte durch den Operateur vorgenommen. Ein wesentliches Leitmotiv bei der GMS-Programmentwicklung war nicht die komplette Automatisierung, sondern daß der Operateur bei der bedienergesteuerten Zielausrichtung des Theodoliten durch eine breite Palette unterschiedlicher Einstellhilfen von der GMS-Software unterstützt wird. Der Automatisierungsgrad des GMS ist zwar geringer, aber durch die Ausnutzung der flexiblen optischen Fähigkeiten des Menschen können mit dem GMS-System auch Ziele angepeilt werden, die bildverarbeitungstechnisch nicht oder nur schwer erkennbar sind, wie z.B. konventionelle Zielmarkierungen oder natürliche Ziele (Ecken, Bohrungen, ...). Im Gegensatz zu SPACE und ATMS kann das GMS-System somit auch überall dort einge-

setzt werden, wo bisher manuelle Theodolitsysteme im Einsatz sind; die bestehenden Zielmarken können weiterhin verwendet werden.

Der GMS-Theodolit wird von dem erstellten Rechnerprogramm automatisch auf vorgegebene Zielpunktpositionen ausgerichtet. Bei der anschließenden bedienergesteuerten Feineinstellung wird der Operateur vom GMS-Programm in vielfältiger Art und Weise unterstützt (s. Kap. 3.0). Die implementierte Mensch/Maschine-Schnittstelle des GMS-Systems bietet dem Operateur die Möglichkeit, alle relevanten Vermessungs- und Theodolitparameter interaktiv dem aktuellen Meßprogramm anzupassen. Bei der bedienergesteuerten Zielausrichtung kann der Operateur individuell wählen, ob er die Theodolit-antriebe über den Joystick, die Maus oder die Cursortasten steuern will. Die Implementierung des kompletten GMS-Programms zur Steuerung des Kameratheodoliten und zur Registrierung der Beobachtungswinkel ist Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

Drei Merkmale des GMS sind besonders hervorzuheben, die bei den Industriemeßsystemen SPACE und ATMS nicht vorzufinden sind, die aber für die gestellte Zielsetzung notwendig bzw. hilfreich sind. Diese speziellen GMS-Fähigkeiten wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und sind in der nachfolgenden Liste aufgeführt:

1. Anbindung an CAD-Systeme

Über die neutrale IGES-Schnittstelle kann das GMS-System mit allen CAD-Systemen Daten austauschen, welche diese systemneutrale Schnittstelle unterstützen (s. Kap. 4.0). Am CAD-Modell des Vermessungsobjekts können die Meßpunkte markiert und die daraus erstellte IGES-Datei kann vom GMS-System interpretiert werden. Nach der Vermessung generiert die implementierte GMS-Software eine neue IGES-Datei, in der zusätzlich noch die gemessenen Istpositionen der Meßpunkte eingetragen sind. Mit diesen Meßergebnissen können dann die CAD-Modelle auf dem CAD-System korrigiert werden.

2. Bedienerunterstützende Graphiküberlagerung

Zur Unterstützung des Operateurs kann dem Videobild des Theodoliten eine bedienerunterstützende Graphik überlagert werden (s. Kap. 5.0). Basierend auf den vom CAD-System bereitgestellten Daten wird die Drahtmodell-darstellung des Vermessungsobjekts eingeblendet und die Zielpunkte werden speziell markiert. Dadurch vereinfacht sich das Auffinden der anzuzielenden Punkte und die Gefahr einer Punktverwechslung wird stark verringert. Neben der Einblendung des Drahtmodells bietet das implementierte GMS-Graphikprogramm eine breite Palette weiterer Unterstützungsfunktionen (mausgesteuertes Einstellen der Bildhelligkeit und des Bildkontrasts, graphisches Fadenkreuz als Zielhilfe, ...).

3. Automatische Horizontiereinrichtung

Zur Steigerung der Meßgenauigkeit sind Präzisionstheodolite mit elektronischen Feinlibellen ausgestattet, mit denen eine Instrumentenneigung bzgl. der Lotrichtung (Stehachsschiefe) kompensiert werden kann. Der Spielbereich dieser Kompensatoren ist, je nach Ausführung, zwischen $\pm 0,2$ gon und $\pm 0,06$ gon. Bei allen Theodolitmeßsystemen müssen die Instrumente bisher durch Stellspindeln am Gerät manuell horizontalisiert werden. Da aber der Vermessungsvorgang beim GMS-System komplett fernbedient durchgeführt werden muß, wurde die automatische Horizontierungsplattform ALF (Automatic Levelling Facility) entwickelt; ein wesentlicher Teil der Entwicklungsarbeiten für das ALF-System wurde am Kernforschungszentrum Karlsruhe von Dipl.-Ing. Kornelson durchgeführt (s. Kap. 6.0). Mit der ALF-Plattform

werden Instrumentenneigungen von maximal ± 6 gon mit einer Genauigkeit von ± 20 mgon ausgeglichen und die verbleibende Stehachsschiefe kann somit vom internen Theodolitkompensator korrigiert werden.

Tests und konkrete Vermessungsaufgaben, die mit dem GMS-System durchgeführt wurden (s. Kap. 7.0), haben gezeigt, daß dieses Prototypsystem die gestellten Anforderungen erfüllt. Aufgrund der positiven Erfahrungen wird die Weiterentwicklung des GMS-Systems am Kernforschungszentrum Karlsruhe als eigenständiges Forschungsvorhaben fortgeführt. Auch die Industrie zeigt Interesse an den GMS-Entwicklungen und es werden derzeit Gespräche mit Herstellerfirmen über eine Zusammenarbeit geführt.

2.0 Geometry Measurement System (GMS)

In diesem Kapitel soll das gewählte Meßverfahren und die Konzeption des Geometry Measurement Systems (GMS) zusammenfassend dargestellt werden. Bei dem GMS-System werden die Meßpunkte mit Theodoliten angezielt, und die Punktkoordinaten können aus den registrierten Beobachtungswinkeln berechnet werden. Das Prinzip dieses Triangulationsverfahrens ist in Kap. 2.1 erläutert.

Eine Besonderheit des GMS-Systems ist die Anbindung an CAD-Systeme. Gestützt auf die vom CAD-System bereitgestellten Daten werden die Zielpunkte mit zwei komplett rechnergesteuerten Theodoliten anvisiert. Anschließend werden die aktuellen Zielpunktkoordinaten errechnet und auf das CAD-System zurücktransferiert. Die konzipierte Gesamtkonfiguration des GMS-Systems und der prinzipielle Ablauf der GMS-Vermessungen sind in Kap. 2.2 beschrieben.

2.1 Triangulation mit Theodoliten

Bei Triangulationsmeßverfahren werden aus gemessenen Winkeln die Punktkoordinaten berechnet. Zur Beobachtung und Bestimmung der Winkel sind schon seit dem 18. Jahrhundert Theodolite im Einsatz /10/. Mit einem dreh- und schwenkbaren Fernrohr werden die Punkte mit einem Fadenkreuz angezielt, und die horizontalen und vertikalen Beobachtungswinkel werden gemessen. Die Winkelmeßeinrichtungen von elektronischen Sekundentheodoliten erreichen derzeit ein Auflösungsvermögen von 0,1 mgon; weitere technische Einzelheiten sind in /11/ und /12/ aufgeführt.

Zur Bestimmung der Punktpositionen müssen die Meßpunkte von mindestens zwei Theodolitstandpunkten aus angezielt werden. Mit einem räumlichen Vorwärtsschnitt können die relativen Meßpunktkoordinaten aus den registrierten Beobachtungswinkeln berechnet werden. Dieses klassische Meßverfahren wird nachfolgend beschrieben.

Für einen räumlichen Vorwärtsschnitt werden zwei Theodolite und ein Referenzmaßstab (Basislatte) benötigt (s. Abb. 3 auf Seite 8). Bei der Aufstellung der Theodolite ist zu beachten, daß die Genauigkeit des Verfahrens auch vom Instrumentenabstand u_{T_2} abhängig ist. Als Anhaltswerte für die Praxis sind die Theodolite so zu positionieren, daß für sämtliche Objektpunkte M der Winkel m_{12} im Bereich $100 \text{ gon} \leq m_{12} \leq 130 \text{ gon}$ liegt. Detaillierte Aussagen sind in /13/, /14/ und /15/ dokumentiert.

Definitionsgemäß liegt beim Vorwärtseinschneiden der Koordinatenursprung im Zentrum des Theodoliten T_1 und die Richtung der w-Achse wird durch die physikalische Lotrichtung festgelegt (s. Abb. 3 auf Seite 8). Da die u-Achse in Richtung von T_2 zeigt ($v_{T_2} \equiv 0$), ist somit das rechtsdrehende, kartesische Theodolitkoordinatensystem eindeutig orientiert. Nach der Horizontierung der Instrumente werden die Theodolite so ausgerichtet, daß der Theodolit T_1 das Fadenkreuz des Theodoliten T_2 anzielt und T_2 auf das Fadenkreuz von T_1 ausgerichtet ist (gegenseitige Kollimation). Durch diese Einstellung werden die beiden Teilkreise der Theodolite gegenseitig orientiert. Nach der relativen Orientierung werden die Basislattenpunkte B_1 und B_2 angezielt. Mit diesen Beobachtungswinkeln können die Theodolitkoordinaten u_{T_2} und w_{T_2} berechnet werden /12/, /16/.

Wird zur Initialisierung die Bündelausgleichung /17/ eingesetzt, so ist eine gegenseitige Kollimation nicht erforderlich. Bei diesem Verfahren müssen, neben den Marken des

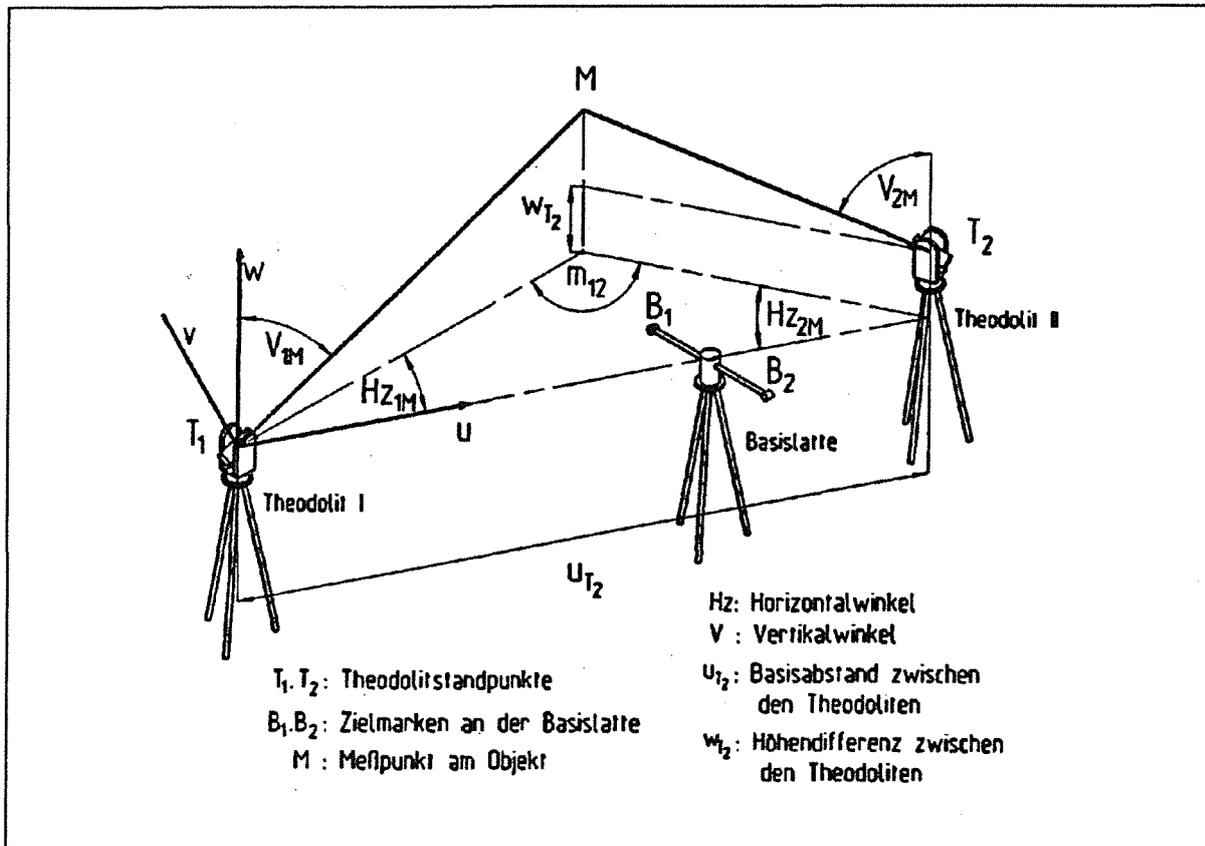


Abbildung 3. Systemkonfiguration beim Vorwärtseinschneiden

Referenzmaßstabs, noch zusätzliche Punkte angezielt werden, deren Koordinaten unbekannt sein können. Die Theodolite sind jeweils das perspektivische Zentrum einer Zentralprojektion, und die gemessenen Theodolitwinkel beschreiben die Projektionsstrahlen. Aus diesen perspektivischen Strahlenbündeln können die Koordinaten und die Orientierung der Theodolite dann iterativ berechnet werden /18/.

Nach der Kalibrierung werden die Objektpunkte M angezielt, und deren Koordinaten können aus den registrierten Theodolitwinkeln berechnet werden:

$$u_M = u_{T_2} \frac{\cos Hz_{1M} \sin Hz_{2M}}{\sin(Hz_{1M} + Hz_{2M})} \quad [2.1.1]$$

$$v_M = u_{T_2} \frac{\sin Hz_{1M} \sin Hz_{2M}}{\sin(Hz_{1M} + Hz_{2M})} \quad [2.1.2]$$

Mit den beiden vertikalen Beobachtungswinkeln V_{1M} und V_{2M} kann die w -Koordinate von M ausgleichend berechnet werden:

$$w_M = \frac{1}{2} \left[u_{T_2} \frac{\sin Hz_{2M} \cot V_{1M} + \sin Hz_{1M} \cot V_{2M}}{\sin(Hz_{1M} + Hz_{2M})} + w_{T_2} \right] \quad [2.1.3]$$

Mit dem oben beschriebenen räumlichen Vorwärtsschnitt können die relativen Meßpunktkoordinaten berechnet werden. Sollen die Punkte in einem vorgegebenen Koordinatensystem vermessen werden, müssen mindestens drei Punkte vorhanden sein, deren Positionen in diesem Referenzkoordinatensystem exakt bekannt sind. Durch das An-

zielen der Referenzpunkte mit den Theodoliten können die Theodolitpositionen in dem vorgegebenen Koordinatensystem mit einem räumlichen Rückwärtsschnitt bestimmt werden (s. Anhang A); das Anzielen einer Basislatte ist nicht erforderlich. Da die Theodolitkoordinaten somit in dem Referenzkoordinatensystem bekannt sind, können die mit den Gleichungen [2.1.1] - [2.1.3] berechneten relativen Meßpunktpositionen in das vorgegebene Koordinatensystem transformiert werden.

Neben diesen klassischen Berechnungsverfahren werden bei Industriemeßsystemen mit Theodoliten die Koordinaten immer häufiger durch eine dreidimensionale Netzausgleichung berechnet /19/. Dieses Verfahren wird auch bei der Auswertung der GMS-Beobachtungen eingesetzt (s. Kap. 3.4).

2.2 Konzeption des GMS-Systems

Als Vermessungssensoren werden bei dem im Rahmen dieser Arbeit konzipierten GMS-System (s. Abb. 4) zwei elektronische Präzisionstheodolite eingesetzt /20/. Zur Realisierung der geforderten Fernbedienbarkeit sind der Horizontal-, der Vertikal- und der Fokusantrieb der GMS-Theodolite mit rechnergesteuerten Elektromotoren ausgerüstet. Für die Fernbeobachtung der Zielpunkte werden CCD-Kameras eingesetzt, und der Operateur kann die Theodolitzielungen am Monitor beobachten. Um die Zielpunkte zu markieren, kann optional in das Theodolitfernrohr ein Laserstrahl eingekoppelt werden.

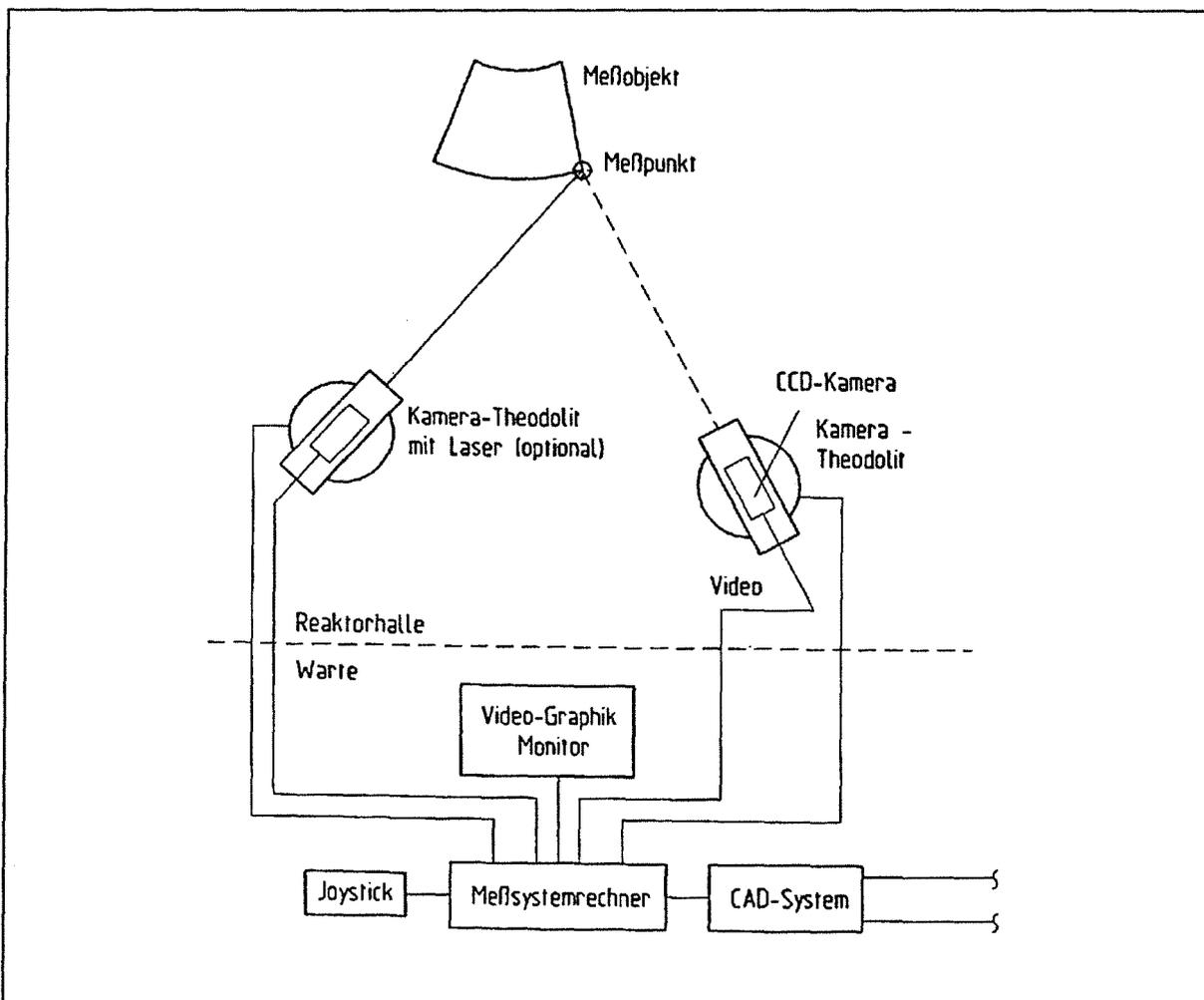


Abbildung 4. Systemkonfiguration des GMS

Ausgangspunkt für eine GMS-Vermessung ist das CAD-Modell des Meßobjekts. Für die Vermessung werden am CAD-Modell noch die Positionen der Referenzpunkte und die Sollpositionen der Meßpunkte markiert. Der Datentransfer CAD-GMS erfolgt über eine systemneutrale Schnittstelle (s. Abb. 5 auf Seite 10). Dadurch können die Modelle für das GMS auf unterschiedlichen CAD-Systemen erstellt werden - vorausgesetzt, die CAD-Systeme unterstützen diese neutrale Schnittstelle. Der Präprozessor des CAD-Systems erstellt aus der rechnerinternen Modelldarstellung eine Datei in einem systemneutralen Format. Ein auf dem GMS-Rechner installierter Postprozessor setzt diese systemneutrale Modelldarstellung um in ein für das Vermessungssystem geeignetes Format.

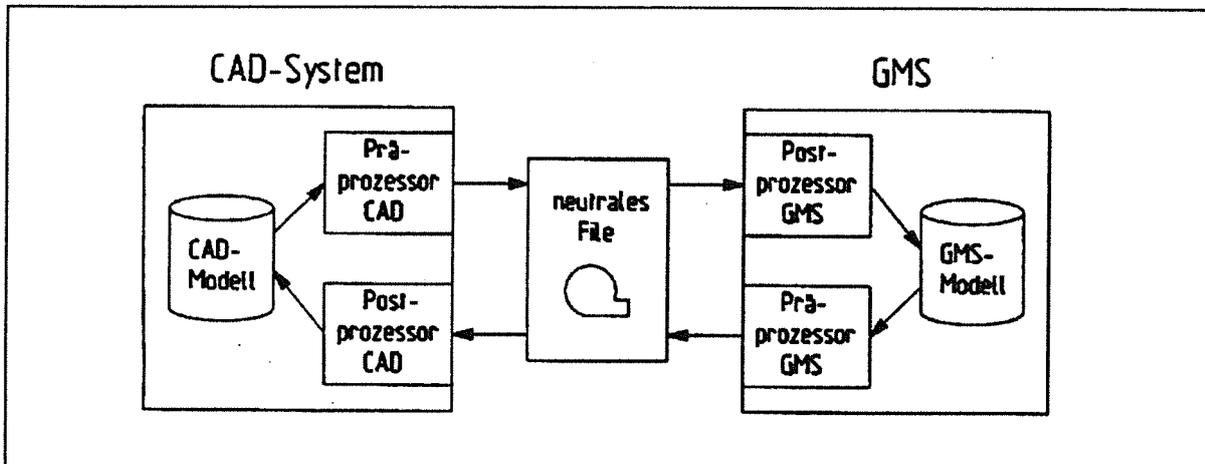


Abbildung 5. Datenaustausch über eine neutrale Schnittstelle

Gestützt auf die aufbereiteten CAD-Daten werden die Zielpunkte mit den Theodoliten anvisiert und die Beobachtungswinkel werden registriert. Die Initialisierung der Theodolite erfolgt durch das Anzielen von mindestens 3 Referenzpunkten. Mit einem räumlichen Rückwärtsschnitt werden aus diesen Beobachtungswinkeln die Koordinaten der Theodolitstandpunkte berechnet (s. Anhang A). Mit den so bestimmten Standpunktkoordinaten können die Theodolite nun automatisch auf vorgegebene Zielpunktpositionen ausgerichtet werden. Sind zusätzlich noch weitere Referenzpunkte vorhanden, kann die Genauigkeit der Theodolitkoordinaten durch ausgleichende Berechnungen noch gesteigert werden. Die Lage, der Maßstab und die Orientierung des Koordinatensystems sind durch die Referenzpunkte eindeutig festgelegt. Durch den zusätzlichen Einsatz eines bzw. mehrerer Referenzmaßstäbe (Basislatte aus Invarmaterial, s. Abb. 6 auf Seite 11) kann die Genauigkeit bei der Bestimmung des Maßstabs gesteigert werden, da die Abstände zwischen den Referenzpunkten in der Regel nicht so genau bekannt sind wie die interferometrisch bestimmten Längen der Basislatten.

Nach der Initialisierung werden die Theodolite automatisch auf die Sollpositionen der Messpunkte ausgerichtet. Die Registrierung der Beobachtungswinkel kann entweder halb- oder vollautomatisch durchgeführt werden:

- Im halbautomatischen Betrieb überprüft der Operateur die eingestellten Theodolitzielungen am Monitor und korrigiert gegebenenfalls mit einem Joystick. Bei der bedienergesteuerten Anzielung wird der Operateur durch unterschiedliche Einstellhilfen von der GMS-Software unterstützt. Die halbautomatische Zieleinstellung ist das Verfahren, welches bisher bei dem GMS-Prototypsystem implementiert ist (s. Kap. 3.3).

- Im vollautomatischen Betrieb werden die Positionen der Zielpunkte durch den Einsatz digitaler Bildverarbeitungstechniken erkannt /21/ und die gemessenen Horizontal- und Vertikalwinkel der Kameratheodolite werden entsprechend korrigiert. Die Industriemeßsysteme SPACE und ATMS sind besonders für die vollautomatische Vermessung konzipiert.

Selbst bei der vollautomatischen Registrierung müssen die Theodolite bei der Systeminitialisierung durch den Operateur ausgerichtet werden. Bei dem manuellen Anvisieren der Zielpunkte ist es für den Operateur schwierig, den aktuellen Zielpunkt anhand von Punktnummern bzw. Koordinatenangaben zu erkennen. Wesentlich anschaulicher ist es, wenn an einem graphischen Modell der aktuelle Zielpunkt (z.B. linke obere Ecke eines Bauteils) speziell markiert ist. Diese graphische Drahtmodell-darstellung kann beim GMS-System auf Wunsch dem Videobild der Theodolitkamera überlagert werden (s. Abb. 19 auf Seite 55).

Aus den registrierten Beobachtungswinkeln werden die aktuellen Meßpunktkoordinaten berechnet. Der Präprozessor des GMS-Systems erstellt aus den Vermessungsergebnissen eine systemneutrale Datei, die vom Postprozessor des CAD-Systems interpretiert werden kann (s. Abb. 5 auf Seite 10). Mit den von dem GMS-System bestimmten aktuellen Meßpunktkoordinaten kann nun die Modellgeometrie auf dem CAD-System korrigiert und von den übrigen CAD-gestützten Systemen berücksichtigt werden.

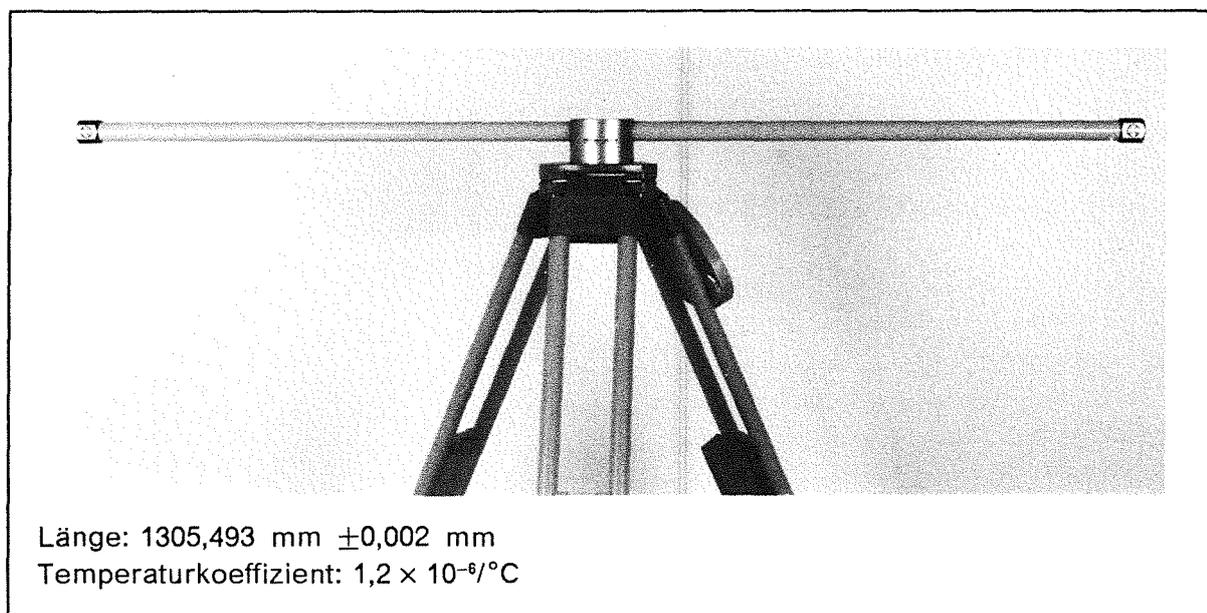


Abbildung 6. Basislatte aus Invarmaterial

3.0 GMS-Prototypsystem

Um nachzuweisen, daß das konzipierte Vermessungssystem (s. Kap. 2.2) die gestellten Anforderungen erfüllt, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Prototypsystem aufgebaut. Der GMS-Prototyp (s. Abb. 7) ist aus Kostengründen bisher nur mit einem einzelnen Kameratheodoliten ausgerüstet (s. Kap. 3.1). Sämtliche Zielpunkte werden zuerst von einem Standpunkt aus anvisiert, und die Beobachtungen werden in einer Datei auf der Festplatte des GMS-Steurrechners (INTEL SYS-310) abgespeichert. Anschließend wird der Theodolit auf dem zweiten Standpunkt aufgebaut und auch diese Zielpunktbeobachtungen werden in einer Datei abgespeichert. Zur Steigerung der Genauigkeit können die Beobachtungen noch von einem dritten und vierten Standpunkt aus durchgeführt werden.

Der GMS-Theodolit wird vom erstellten Programm automatisch auf die vorgegebenen Sollpositionen der Zielpunkte ausgerichtet. Die exakten Zielungen werden durch den Operateur gesteuert (s. Kap. 3.2). Die Zielpunktkoordinaten werden beim GMS-System erst dann berechnet (s. Kap. 3.4), wenn die Beobachtungen (s. Kap. 3.3) von sämtlichen Standpunkten aus abgeschlossen sind.

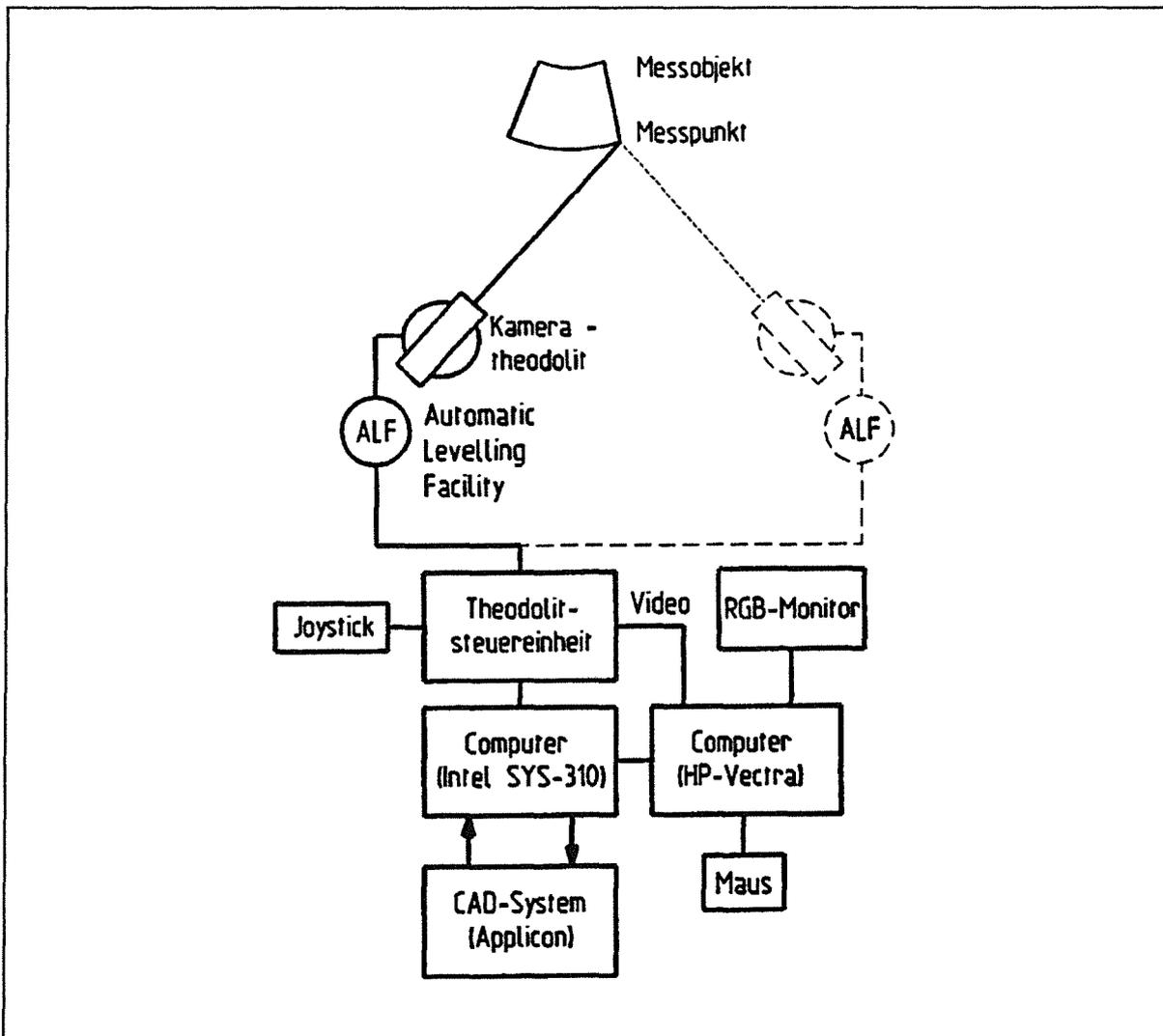


Abbildung 7. Systemkonfiguration des GMS-Prototypen

Das GMS-Vermessungsprogramm (s. Kap. 3.3), die GMS-Auswertesoftware (s. Kap. 3.4) und die GMS-Schnittstellensoftware (s. Kap. 4.4 und Kap. 4.5) sind auf einem INTEL-Rechner implementiert. Der Einsatz dieses Systems ist historisch begründet, da der Rechner am Institut bereits vorhanden war. Mit Ausnahme der zum Teil vom Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe zur Verfügung gestellten Auswerteprogramme (s. Kap. 3.4), deren Quelltext in FORTRAN übernommen wurde, ist sämtliche auf dem INTEL-Rechner implementierte GMS-Software in der Programmiersprache PASCAL geschrieben.

Für den Ausbau des GMS-Systems mit einer bedienerunterstützenden Graphik (s. Kap. 5.0) wurde ein zusätzlicher IBM-kompatibler Rechner (HP-Vectra RS/20, 386-CPU, 20 MHz) angeschlossen, da für den INTEL-Rechner keine geeignete Hardware verfügbar ist. Zur Realisierung der Graphiküberlagerung ist dieser PC mit einer entsprechenden Bildverarbeitungskarte (Imaging Technology VS-100 /24/) ausgerüstet. Die für die bedienerunterstützende Graphik erstellte Software ist in der Programmiersprache C geschrieben.

Der IBM-kompatible Rechner wird beim GMS-Prototypen bisher ausschließlich für das Erstellen der Graphikunterstützung eingesetzt. Diese Graphikunterstützung wird über eine RS232-Schnittstelle vom INTEL-Rechner gesteuert. Die Kommunikation zwischen dem Theodoliten und dem INTEL-Rechner erfolgt über vier weitere RS232-Schnittstellen. Da die speziellen Fähigkeiten des INTEL-Rechners und seines iRMX-Betriebssystems (Echtzeit, Multitasking) bei den GMS-Programmen nicht benötigt und eingesetzt werden, ist es geplant, alle GMS-Programme in Zukunft auf einem einzigen IBM-kompatiblen Rechner zu installieren.

Als CAD-System wird bisher für den GMS-Prototypen das System BRAVO3 /22/ eingesetzt. Da der Datenaustausch zwischen dem CAD- und dem GMS-System über eine neutrale Schnittstelle erfolgt, können prinzipiell auch andere CAD-Systeme an das GMS-System angekoppelt werden. Weitere Einzelheiten sind im Kap. 4.0 beschrieben.

Zur Realisierung der geforderten kompletten Fernbedienbarkeit des GMS-Systems wurde die Horizontierungsplattform ALF (Automatic Levelling Facility) entwickelt. Diese automatische Horizontiereinrichtung ist in Kap. 6.0 näher erläutert.

3.1 Motorisierter Kameratheodolit

Bei dem GMS-Prototypensystem wird ein modifizierter elektronischer Theodolit vom Typ T2000S /23/ der Firma Wild eingesetzt (s. Abb. 8 auf Seite 15). Sowohl der horizontale als auch der vertikale Theodolitantrieb ist jeweils mit einem Schrittmotor (Hz- und V-Motor) ausgerüstet, und der Theodolit kann somit ferngesteuert ausgerichtet werden (s. Kap. 3.1.3). Zur Beobachtung der Theodolitzielungen am Bildschirm ist auf dem Theodolifferrrohr eine CCD-Kamera installiert (s. Kap. 3.1.2). Über eine am Fernrohr angebrachte Antriebseinheit mit Gleichstrommotor kann das erfaßte Bild fokussiert werden.

3.1.1 Aufbau des Kameratheodoliten

Die absolute Winkelmeßeinrichtung des T2000S basiert auf einem dynamischen Kreisabgriffsystem mit opto-elektronischer Abtastung nach dem Phasenvergleichsverfahren /12/. Die Standardabweichung nach DIN 18723 beträgt für die gemessenen Horizontal- und Vertikalwinkel 0,15 mgon. Zur gleichzeitigen Messung von Horizontal- und Vertikalwinkel benötigen die dynamischen Kreisabgriffssysteme 0,9 Sekunden. Für die Kompensation der Stehachsschiefe in Fernrohrrichtung ist der Höhenindex mit einem Flüssigkeitskompensator /25/ ausgestattet, dessen Einspielgenauigkeit mit $\pm 0,03$ mgon ange-

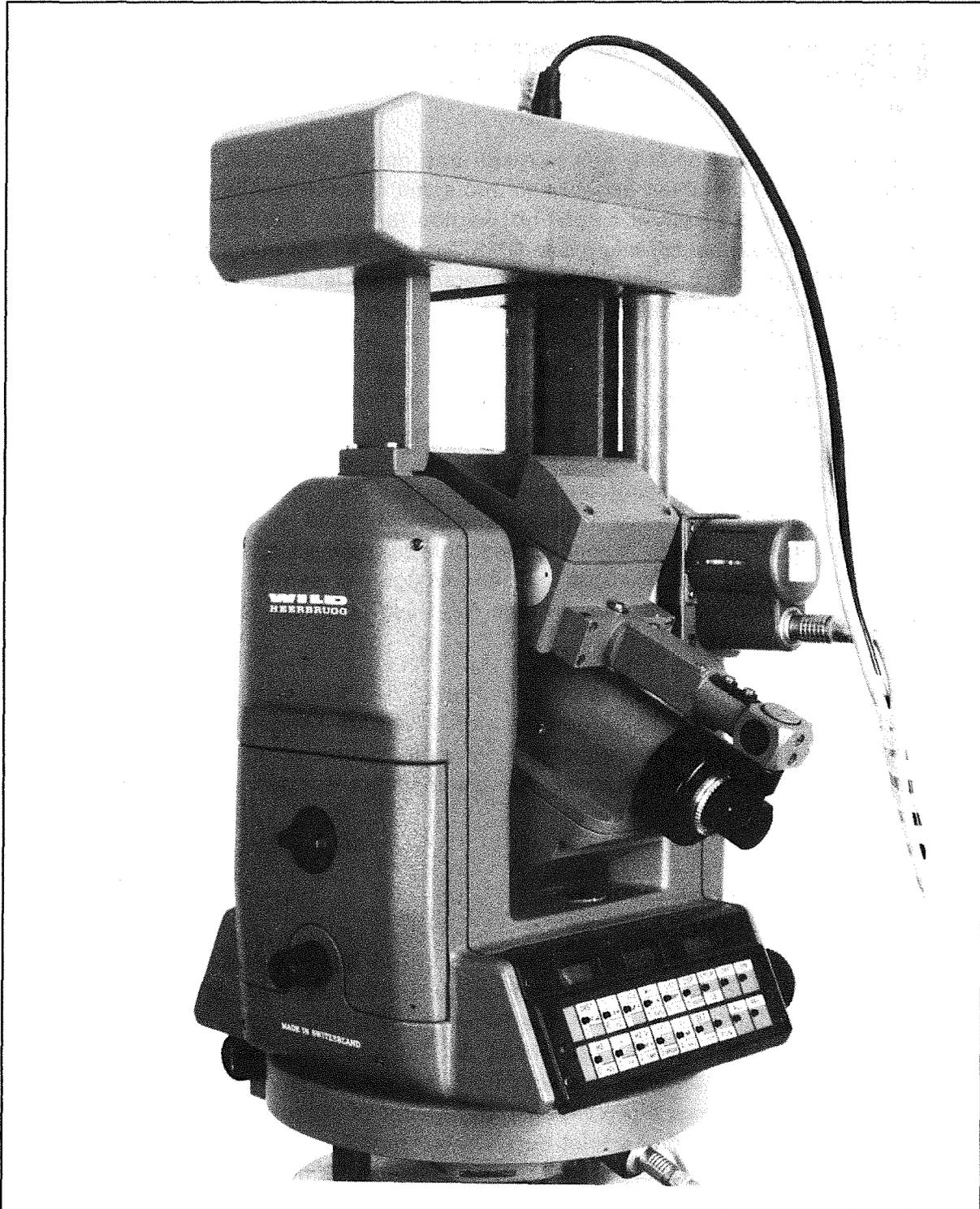


Abbildung 8. Der motorisierte Kameratheodolit des GMS-Prototypsystems

geben wird /7/. Der Einspielbereich dieses Flüssigkeitskompensators beträgt $\pm 0,2$ gon; d.h. der Theodolit muß in diesem Toleranzbereich horizontalisiert sein (s. Kap. 6.0). Ist diese Bedingung nicht erfüllt, erfolgt unmittelbar nach dem Einschalten des Instruments eine entsprechende Fehlermeldung.

Eine korrekte Kompensation der Stehachsschiefe kann nur bei ruhender Kompensatorflüssigkeit durchgeführt werden. Da aber eine Winkelmessung oftmals unmittelbar nach einem Positioniervorgang erfolgt, muß gewartet werden, bis sich die Kompensatorflüssigkeit wieder beruhigt hat. Die Zeitdauer für diesen Beruhigungsvorgang hängt von der durchgeführten Bewegung ab und kann beim GMS-Theodoliten bis zu 6 Sekunden (Meßwert) dauern. Deshalb wird im GMS-Programm eine Winkelmessung so lange wiederholt durchgeführt, bis die Abweichung vom vorherigen Meßwert nur noch 0,05 mgon beträgt. Durch diese Vorgehensweise wird mit hoher Wahrscheinlichkeit gewährleistet, daß die registrierten Winkelwerte nicht aufgrund unruhiger Kompensatorflüssigkeit verfälscht sind.

Die Anschlüsse für die Kamera, den Vertikal- und den Fokusbildmotor sind an dem drehbaren Oberteil des Theodoliten angebracht und somit müssen die Zuleitungen bei Drehbewegungen um die Stehachse mitgeführt werden (s. Abb. 8 auf Seite 15). Die Länge und Führung der Kabel beschränken den GMS-Theodoliten auf einen horizontalen Drehbereich von 600 gon. Wird dieser Bereich überschritten, ist eine Weiterfahrt durch den Kabelzug blockiert (Strangulation), und eine lastabhängige Rutschkupplung verhindert ein Abreißen der Kabel bzw. eine Überlastung des Hz-Motors. Der Horizontalkreis des GMS-Theodoliten ist so initialisiert, daß der Nullpunkt ($H_z = 0$) die linke Grenze des Drehbereichs markiert. Diese Einstellung des Nullpunktes bleibt auch nach dem Abschalten des Instruments erhalten. Bei einem horizontalen Drehbereich von 600 gon kann aber im Bereich $0 \text{ gon} \leq H_z \leq 200 \text{ gon}$ die Theodolitausrichtung nicht eindeutig durch eine Winkelmessung bestimmt werden. Es wird deshalb im GMS-Programm zusätzlich die aktuelle Drehlage des Theodoliten registriert und bei der Positionierung berücksichtigt. Befindet sich der Theodolit zwischen dem linken Anschlag und dem Horizontalwinkel $H_z = 300 \text{ gon}$, wird diese Theodolitlage mit dem Wert 0 gekennzeichnet. Ist dagegen der Theodolit näher am rechten Anschlag, wird der Theodolitlage der Wert 1 zugewiesen.

Die Kippachse des Instruments ist so angeordnet, daß Vertikalwinkel (Zenitdistanzen) im Bereich $48,5 \text{ gon} \leq V \leq 337,5 \text{ gon}$ eingestellt werden können ($V=0$: Fernrohr zeigt zum Zenit). Diese Bereichsgrenzen sind durch den mechanischen Anschlag des Theodolitfernrohres am Gehäuse festgelegt. Weitere Einschränkungen sind in Kap. 3.1.2 erläutert.

3.1.2 Optik des Kameratheodoliten

Das Fernrohr des T2000S ist mit einer panfokalen Optik ausgestattet /26/, d.h. mit wachsender Entfernung verringert sich der Sehfeldwinkel. Bei der kürzesten Zielentfernung von 0,6 m beträgt der Sehfeldwinkel des Fernrohres 4,2 gon, während sich bei der Fokussierung auf unendlich der Sehfeldwinkel auf 1,3 gon reduziert. Über verschiedene Linsen und Umlenkprismen wird das vom Fernrohr erfaßte Bild auf den CCD-Chip der installierten Kamera (Panasonic WV-CD50) abgebildet (s. Abb. 9 auf Seite 17). Die Fokussierung des Fernrohrbildes erfolgt durch einen rechnergesteuerten Gleichstrommotor, der über eine Getriebespindel die Fokussierlinse mit einer Genauigkeit von $10 \mu\text{m}$ positioniert /27/. Die Position der Fokussierlinse kann rechnergesteuert auf eine vorgegebene Zielpunktposition eingestellt werden (s. Anhang B). Durch einen Linearencoder

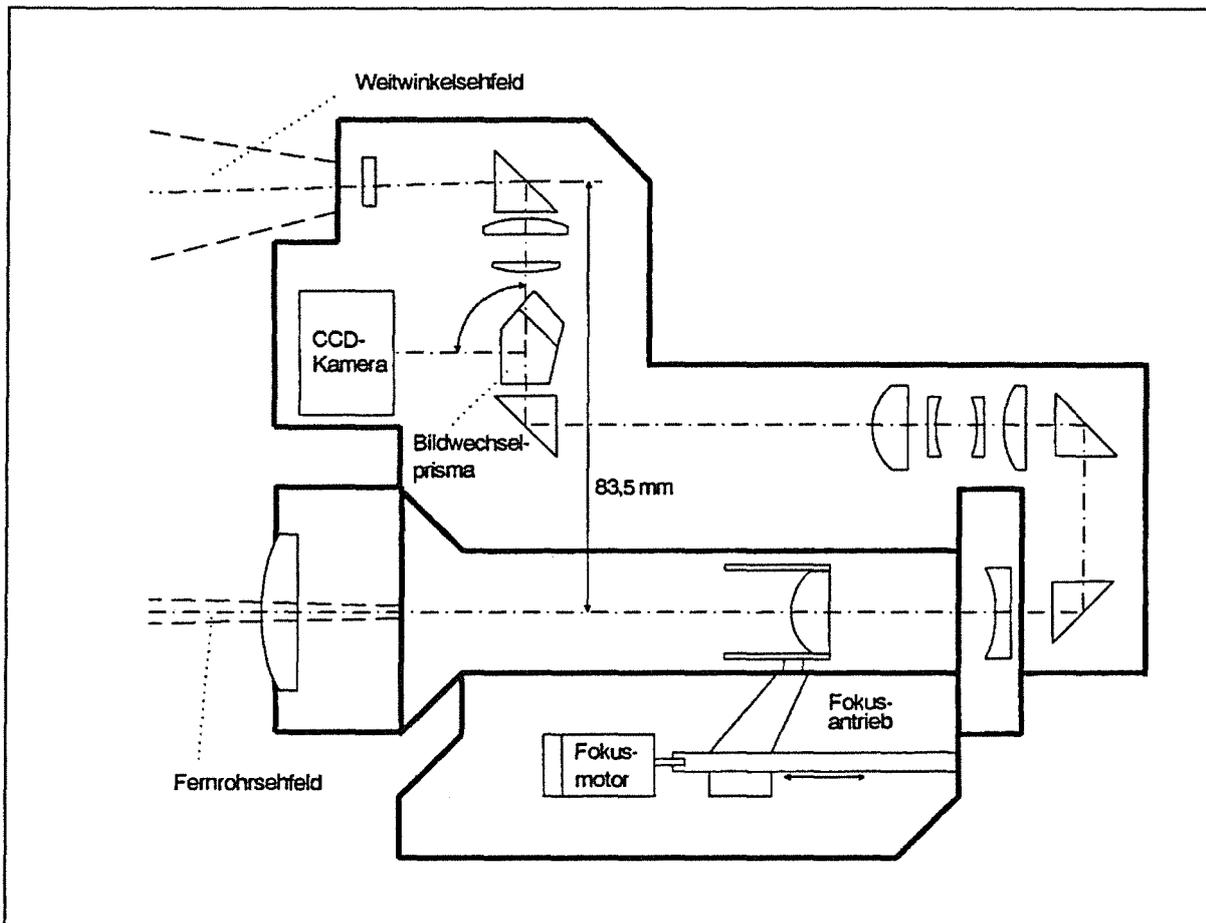


Abbildung 9. Theodolitenfernrohr mit CCD-Kamera und motorisiertem Fokusantrieb

auf der Getriebespindel kann auch die aktuell eingestellte Fokulentfernung vom Rechner gelesen werden.

Die panfokale Fernrohroptik und die zur Erhöhung der Auflösung eingesetzte 10fache Nachvergrößerung erzeugen auf dem CCD-Chip (Breite: 8,8 mm; Höhe: 6,6 mm) die in Abb. 10 auf Seite 18 dargestellten abstandsabhängigen Bildausschnitte. Wegen der starken Vergrößerungswirkung der Fernrohroptik ist es sehr schwierig, einen vorgegebenen Zielpunkt aufzufinden. Deshalb kann zur Grobanpeilung der Zielpunkte das Bildwechselprisma rechnergesteuert um 90° gedreht werden. Anstatt des Fernrohrbildes wird dann das Bild des Weitwinkelsehfelds (s. Abb. 9) auf den CCD-Chip abgebildet. Mit dem wesentlich größeren Szenenausschnitt des Weitwinkelbildes (s. Abb. 10 auf Seite 18) ist es erheblich einfacher einen Zielpunkt aufzufinden. So beträgt z.B. bei einer Zielentfernung von 10 m das vom CCD-Chip erfaßte Bildfenster 13 m^2 im Weitwinkelsehfeld und $11,5 \text{ cm}^2$ im Fernrohresehfeld.

Der senkrechte Abstand zwischen der optischen Fernrohrachse und der optischen Achse der Weitwinkeleingangsoptik beträgt 83,5 mm. Diese Weitwinkeloptik ist so ausgerichtet, daß sich die optischen Achsen bei einer Zielentfernung von 4,5 m schneiden (s. Abb. 11 auf Seite 18). Aufgrund dieser Parallaxe können Zielpunkte, deren Entfernung kleiner als 84,3 cm ist, im Weitwinkelbild nicht mehr erfaßt werden. Zur Unterstützung des Operateurs kann dem Weitwinkelbild eine graphische Markierung überlagert werden, bei der die abstandsabhängige Parallaxe berücksichtigt wird (s. Kap. 5.0).

Bei Zenitdistanzen kleiner als 68 gon wird das Weitwinkelsehfeld durch die auf dem Theodolit angeordnete Elektronikbox (s. Abb. 8 auf Seite 15) eingeschränkt. Der von

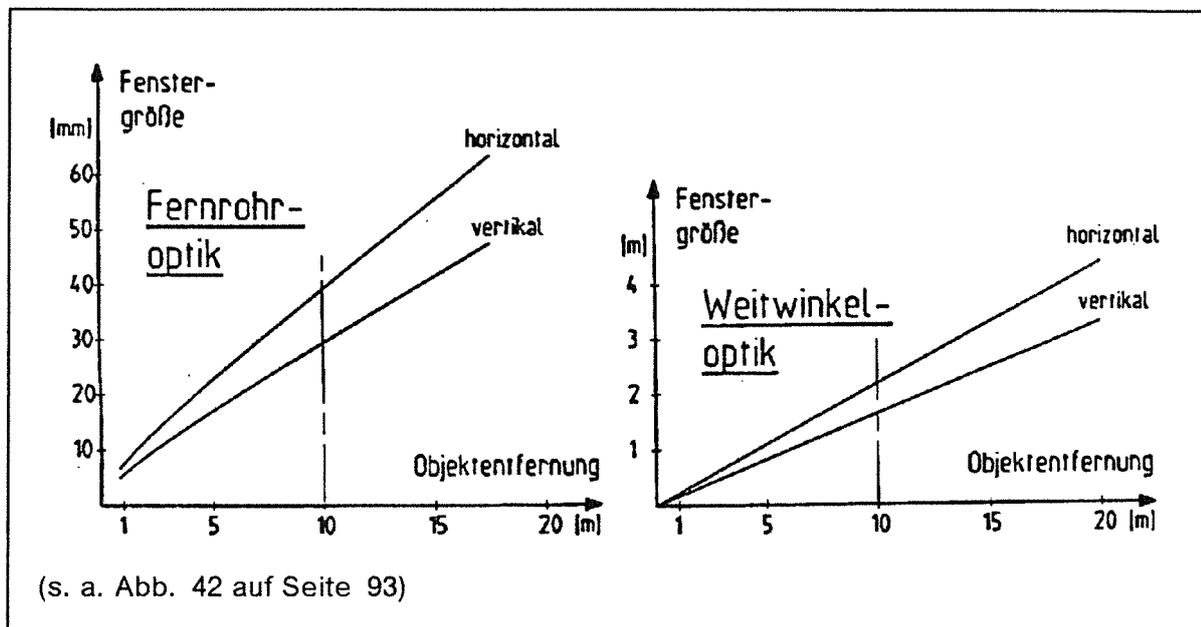


Abbildung 10. Bildfeld des CCD-Chips

der Elektronikbox verdeckte Bereich vergrößert sich bei steileren Zielungen, und bei einem Vertikalwinkel von $V = 52 \text{ gon}$ ist die Sicht im Weitwinkeltbild durch den Aufsatz komplett verdeckt. Zusätzlich können im Bereich $161 \text{ gon} \leq V \leq 239 \text{ gon}$ keine Zielpunkte angezielt werden, da das untere Theodolitgehäuse die Sicht blockiert.

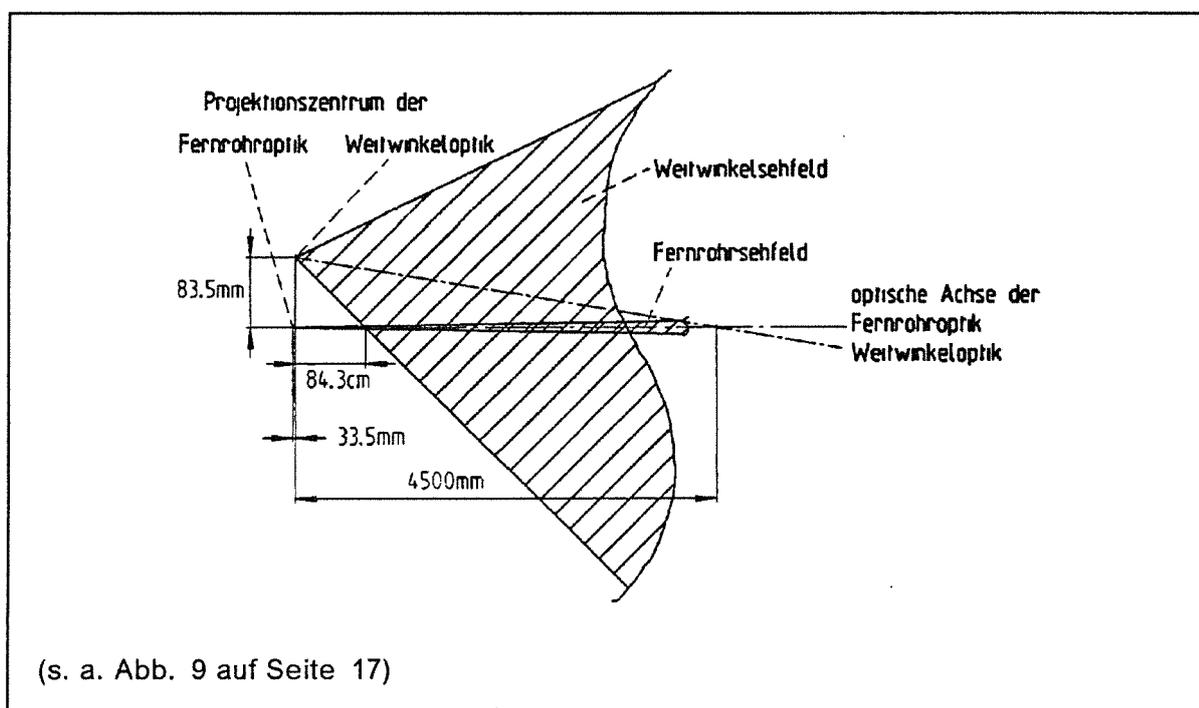


Abbildung 11. Parallaxe des Weitwinkeltbildes

3.1.3 Steuerung der motorisierten Theodolitantriebe

Um den Theodolit rechnergesteuert ausrichten zu können, sind der Horizontal- und der Vertikaltrieb mit spielfrei verspannten Schneckengetrieben ausgerüstet (s. Abb. 12 auf Seite 19). Als Antriebe werden Schrittmotoren eingesetzt, und über eine program-

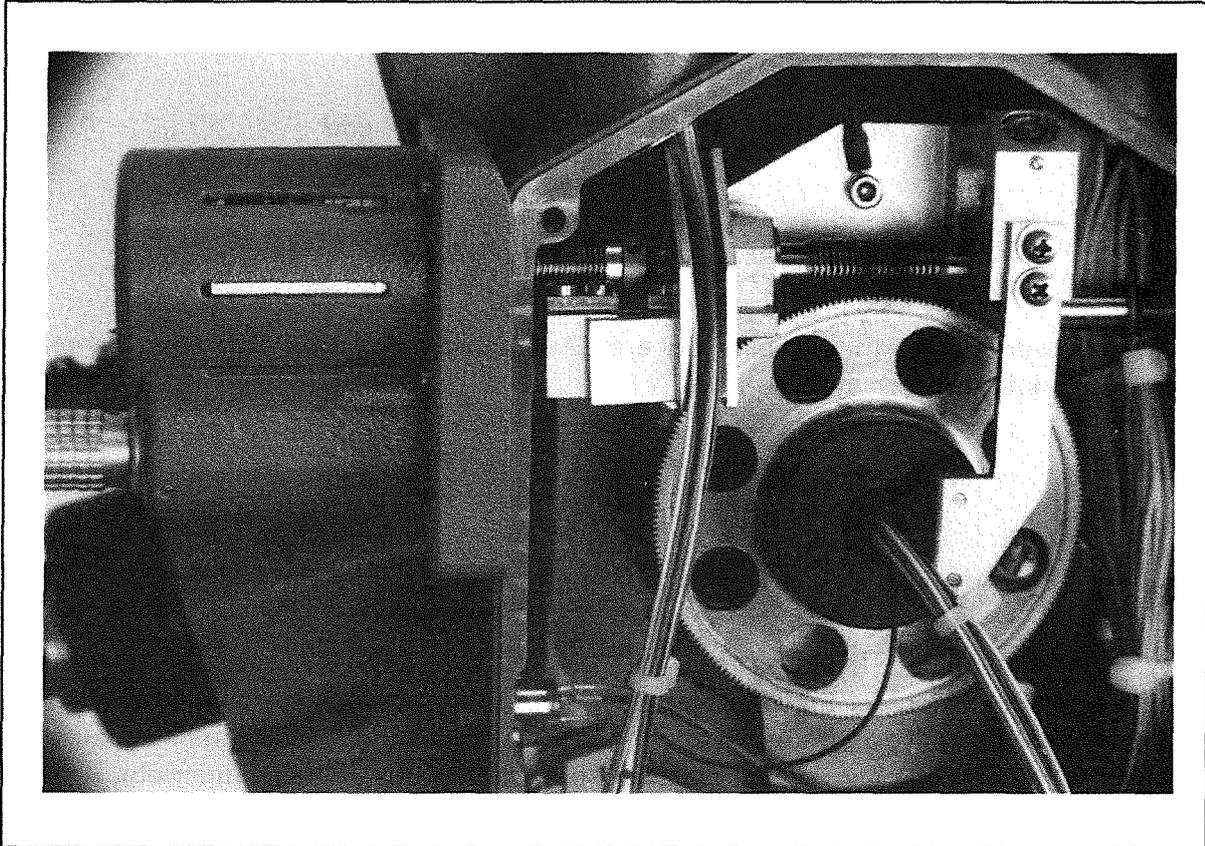


Abbildung 12. Motorisierter Vertikaltrieb (Theodolitgehäuse geöffnet)

mierbare Steuerung können die Motoren wahlweise im Hochlaufbetrieb (trapezförmiger Geschwindigkeitsverlauf $v(t)$) oder auch im Start/Stop-Betrieb (rechteckförmiger Geschwindigkeitsverlauf $v(t)$) positioniert werden. Die Maximalgeschwindigkeiten v_{\max} werden beim Hochlaufbetrieb erreicht. Mit der eingesetzten Getriebeübersetzung (vertikal: $i_v = 216$, horizontal: $i_h = 576$) können die Theodolitantriebe mit den gemessenen Maximalgeschwindigkeiten

$$\text{horizontal: } v_{H,\max}(1) = 42 \frac{\text{gon}}{\text{sec}} \text{ und}$$

$$\text{vertikal (durch max. Drehmoment begrenzt): } v_{V,\max}(1) = 46 \frac{\text{gon}}{\text{sec}}$$

bewegt werden. Werden die Schrittmotoren um einen einzelnen Vollschritt bewegt, ergeben sich die minimalen Verstellwinkel:

$$\text{horizontal: } \Delta H_{\min}(1) = 3,5 \text{ mgon und}$$

$$\text{vertikal: } \Delta V_{\min}(1) = 9,5 \text{ mgon}$$

Diese Auflösung reicht aber nicht aus, um Punkte exakt anzuzielen. Die eingesetzte Motorsteuerung bietet aber die Möglichkeit, die Schrittmotoren auch um Bruchteile ($1/4$, $1/5$, $1/10$, $1/20$) eines Vollschrittes zu verstellen. Um die feinste Winkelverstellung zu erzielen, kann die Steuerung der Motoren so eingestellt werden, daß die Schrittmotoren

sich pro Impuls nur um einen 1/20-Bruchteil eines Schrittes drehen. Es können somit die Theodolitwinkel in Schrittweiten von

$$\text{horizontal: } \Delta H_{\min}\left(\frac{1}{20}\right) = 0,17 \text{ mgon und}$$

$$\text{vertikal: } \Delta V_{\min}\left(\frac{1}{20}\right) = 0,46 \text{ mgon}$$

eingestellt werden. Aufgrund dieser höheren Auflösung reduzieren sich aber die maximalen Theodolitgeschwindigkeiten auf:

$$\text{horizontal: } v_{H,\max}\left(\frac{1}{20}\right) = 3,5 \frac{\text{gon}}{\text{sec}} \text{ und}$$

$$\text{vertikal: } v_{V,\max}\left(\frac{1}{20}\right) = 9,3 \frac{\text{gon}}{\text{sec}} .$$

Bei diesen hinsichtlich der Einstellbarkeit optimierten Steuerungsparametern ist das Anfahren eines Punktes wegen der geringen Geschwindigkeit $v_{H,\max}(1/20)$ sehr zeitaufwendig. In der Praxis hat sich gezeigt, daß die Ansteuerung des Horizontalantriebs im 1/10 Schrittbetrieb einen guten Kompromiß zwischen Schnelligkeit und Einstellbarkeit darstellt. Im 1/10 Schrittbetrieb verringert sich zwar die horizontale Einstellbarkeit auf

$$\Delta H_{\min}\left(\frac{1}{10}\right) = 0,34 \text{ mgon}$$

aber die maximale horizontale Drehgeschwindigkeit erhöht sich auf

$$v_{H,\max}\left(\frac{1}{10}\right) = 7 \frac{\text{gon}}{\text{sec}} .$$

Wird der Horizontalantrieb im 1/10 Schrittbetrieb und der Vertikaltrieb im 1/20 Schrittbetrieb angesteuert, ist sowohl die maximale Winkelgeschwindigkeit als auch die Einstellbarkeit für beide Theodolitantriebe annähernd gleich.

Während die Wahl des Schrittbetriebs mit einem drehbaren Vorwahlschalter manuell eingestellt werden muß, können die Motordrehzahlen im Hochlauf- und Start/Stop-Betrieb vom Programm aus gesetzt werden. Durch die Angabe der Drehrichtung (+/-), der Schrittzahl und des Geschwindigkeitsprofils (Hochlauf- oder Start/Stop-Positionierung) können vorgegebene Winkeldifferenzen am Theodolit vom Rechner eingestellt werden. Die Genauigkeit des Anfahrens auf eine vorgegebene Position sinkt, je höher die Schrittzahl ist und je größer die Verfahrensgeschwindigkeit gewählt wird. Ist eine bestmögliche Ausrichtung des Theodoliten erforderlich, muß nach der ersten Positionierung eine Theodolitwinkelmessung ausgelöst werden. Die verbleibende Sollwertabweichung kann wieder in Motorschritten umgerechnet und korrigiert werden. Dieser iterative Einstellvorgang ist jedoch sehr zeitaufwendig, da eine exakte Winkelmessung erst dann durchgeführt werden kann, wenn die Kompensatorflüssigkeit nach der Positionierung wieder zur Ruhe gekommen ist. Da bei dem GMS-Prototypsystem die exakte Anzielung vom Operateur durchgeführt wird, wurde wegen des hohen Zeitaufwands auf diese Iteration beim Positionieren verzichtet.

Neben dem rechnergesteuerten Positionierbetrieb kann die Schrittmotorsteuerung vom Programm aus auf "Handbetrieb" gestellt werden. In diesem Betriebsmodus fahren die Motoren, solange die entsprechenden Schalter betätigt werden. Zur einfacheren Bedienbarkeit wurde im Rahmen dieser Arbeit für den "Handbetrieb" ein eigenes Bedienpanel entwickelt (s. Abb. 13). Mit einem Kreuzknüppelschalter kann der Operateur den Horizontal- und Vertikaltrieb je nach Auslenkung sowohl einzeln als auch gemeinsam bewegen. Durch gleichzeitiges Drücken eines Tasters auf dem Steuerknüppel kann der Bediener umschalten vom Start/Stop-Betrieb auf Hochlaufpositionierung. Die Motorendrehzahl kann für die beiden Fahrbetriebe individuell eingestellt werden, und somit kann dieser Taster zum Umschalten von langsamer auf schnelle Fahrgeschwindigkeit eingesetzt werden (s. Kap. 3.3). Zur Aktivierung der Joysticksteuerung muß der Operateur einen Entriegelungsschalter am Bedienpanel dauernd betätigen. Man benötigt also beide Hände, um den Theodoliten mit dem Steuerknüppel bewegen zu können. Das schützt einerseits vor ungewolltem Ansteuern der Motoren und andererseits kann im Joystickbetrieb keine unerlaubte Rechnertastatureingabe (z.B. Ändern der Motordrehzahl) erfolgen.

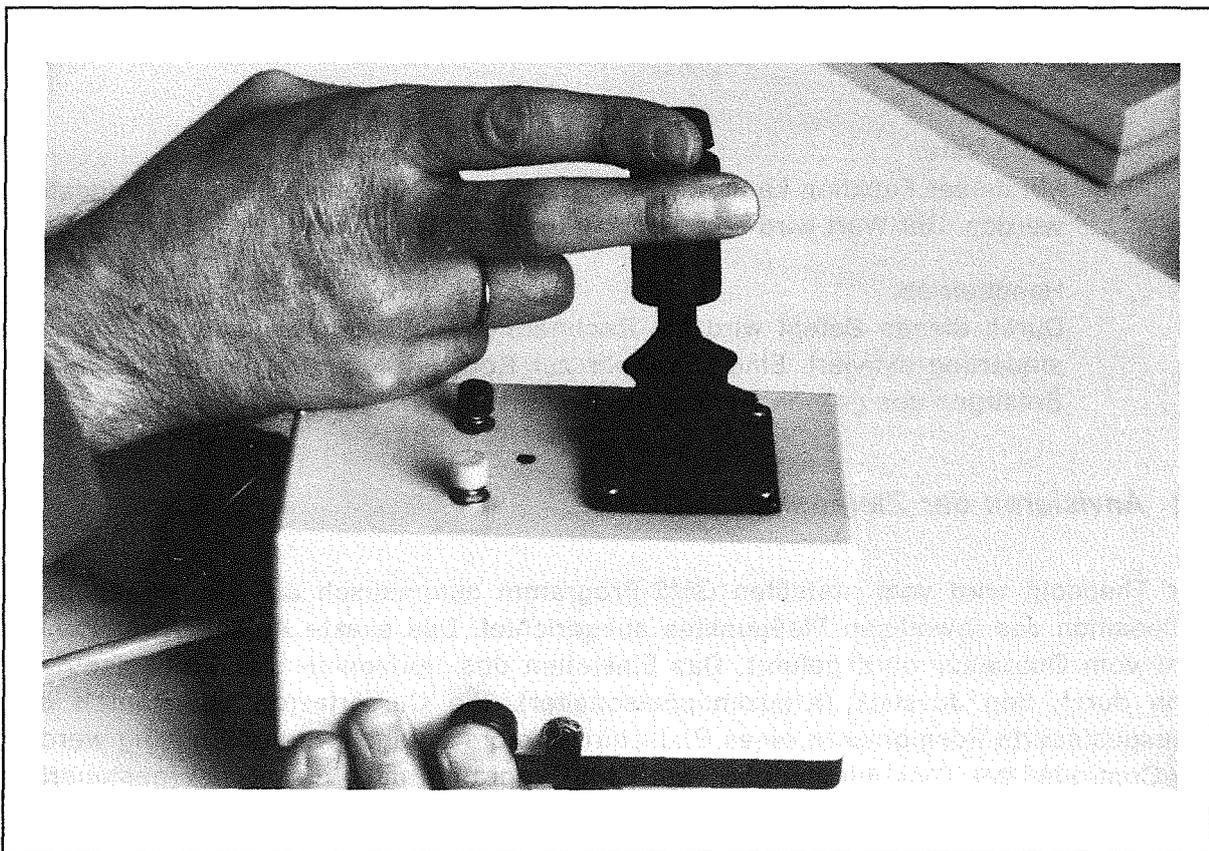


Abbildung 13. Bedienpanel zur Theodolitsteuerung

Neben dem Kreuzknüppelschalter sind auf dem Bedienpanel noch ein gelber und ein grüner Taster angebracht. Durch das Drücken der gelben Taste wird die Motorsteuerung auf Joystickbetrieb eingestellt, und die Schrittmotorsteuerung sendet an den INTEL-Rechner die Quittung 'HAND'. In diesem Betriebsmodus können die Theodolittriebe mit dem Kreuzknüppelschalter gesteuert werden, und die Schrittmotorcontroller können keine Befehle vom Rechner bearbeiten. Mit dem grünen Taster kann der "Handbetrieb" beendet werden. Die Schrittmotorsteuerung springt dadurch in die Hauptkommandozeile und schickt an den Rechner die Zeichenfolge 'M,P,L,S,H ?'. In diesem Status kann die Theodolitmotorsteuerung nur über die Rechnerschnittstelle an-

gesprochen werden. Die gesendeten sechs Buchstaben stehen für die vom Controller bereitgestellten Funktionen:

- 'M' Modifizieren der Parameter.
Es können die Werte für die Beschleunigung (kHz/s) im Hochlaufbetrieb, für die Maximalfrequenz (Hz) im Hochlaufbetrieb und für die Frequenz (Hz) im Start/Stop-Betrieb verändert werden.
- 'P' Positionieren.
Durch die Angabe der Fahrweise (Start/Stop- oder Hochlaufbetrieb), der Fahrrichtung (+/-) und der Anzahl der Motorschritte kann der Theodolit rechnergesteuert ausgerichtet werden.
- 'L' Lesen der Parameter.
Es werden die eingestellten Werte für die Beschleunigung, der Maximalfrequenz und der Start/Stop-Frequenz aus dem nicht-flüchtigen EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) gelesen.
- 'S' Speichern der Parameter.
Es werden die aktuell eingestellten Motorfrequenzen in den EEPROM geschrieben.
- 'B' Baud-Rate.
Mit dieser Funktion kann die Baud-Rate für die Datenübertragung eingestellt werden. Der Wert wird automatisch im EEPROM gespeichert.
- 'H' Handbetrieb.
Durch diesen Befehl wird die Rechnersteuerung beendet und die Joysticksteuerung aktiviert. Eine Rückkehr zur Rechnersteuerung ist nur durch das Betätigen des grünen Tasters am Bedienpanel möglich.

3.2 Anvisieren der Zielpunkte

Der Theodolit wird vom erstellten GMS-Programm automatisch auf die vorgegebene Sollposition des jeweiligen Meßpunktes ausgerichtet. Das exakte Anzielen der Punkte wird vom Operateur durchgeführt. Das Einstellen des Horizontal- und Vertikaltriebs kann durch den Joystick (Kreuzknüppelschalter), die Cursortasten oder durch das mausgesteuerte Positionieren eines Bildschirmcursors erfolgen. Standardmäßig werden die Controller der Theodolitantriebe vom GMS-Programm nach der rechnergesteuerten Voreinstellung auf Joysticksteuerung gestellt (Quittung: 'HAND', s. Kap. 3.1). Mit dem Joystick am Bedienpanel können die Ziele vom Operateur am schnellsten angefahren werden.

Soll ein Zielpunkt maus- oder cursortastengesteuert angefahren werden, müssen die Schrittmotorcontroller zuerst auf Rechnersteuerung umgeschaltet werden. Für diese Umschaltung wird der Operateur vom GMS-Programm aufgefordert, die grüne Taste zu drücken (Quittung: 'M,P,L,S,H ?', s. Kap. 3.1). Der aktuell eingestellte Steuerungsmodus (Joystick- oder Cursor/Maussteuerung) wird auf dem Terminal des GMS-Rechners permanent angezeigt. Da aber die als spielfrei bezeichneten Getriebe des Theodoliten trotzdem einen toten Bereich aufweisen (gemessene Werte, horizontal: $\delta H_{tot} = 3$ Inkremente; vertikal $\delta V_{tot} = 12$ Inkremente), werden die Theodolitmotoren in positiver Drehrichtung um die in einer Datei gespeicherten Werte δH_{tot} bzw. δV_{tot} bewegt. Diese

definierte Motorendrehung ist beim Umschalten auf cursor- bzw. mausgesteuerte Theodolitausrichtung erforderlich, da im Joystickbetrieb die Drehrichtungen der Theodolit-antriebe vom Rechner nicht registriert werden können. Das vorhandene Getriebespiel kann aber bei der rechnergesteuerten Theodolitausrichtung nur dann kompensiert werden, wenn die Richtung der vorhergehenden Fahrbewegung bekannt ist.

Hat der Operateur die mausgesteuerte Theodolitausrichtung gewählt (s. Anhang J), wird dem GMS-Graphikprogramm ein entsprechender Befehlssatz geschickt, und im Kamerabild des Theodoliten wird ein Fadenkreuz eingeblendet, das mit der Maus auf den Zielpunkt positioniert werden kann (s. Kap. 5.0). Durch das Drücken der rechten Maustaste wird der Zielvorgang beendet und das Graphikprogramm schickt dem INTEL-Rechner den horizontalen- und vertikalen Versatz bezüglich des Theodolitifadenkreuzes δx_w bzw. δy_w . Die daraus berechneten Winkelkorrekturen δH_z und δV (s. Anhang C) werden in Motorschritte umgerechnet, und abhängig von der vorherigen Fahrtrichtung wird diese Schrittzahl zur Kompensation des Getriebespiels bei einem Richtungswechsel noch um $\delta H_{z_{tot}}$ bzw. δV_{tot} erhöht. Das GMS-Programm schickt an die Schrittmotorcontroller den entsprechenden Fahrbefehl, und während des Positioniervorgangs erscheint auf dem Terminal eine blinkende Nachricht: *'!!! Bitte warten, Theodolit wird positioniert !!!'*.

Die feinstmögliche Theodolitausrichtung kann über die Cursortasten vorgenommen werden. Entsprechend der Pfeilrichtung wird der Horizontal- bzw. Vertikalmotor in gewählter Fahrtrichtung um die aktuell eingestellte Schrittzahl gedreht. Auch beim cursorgesteuerten Fahrbetrieb wird das Getriebespiel berücksichtigt. Die Anzahl der Schritte die bei einem Tastendruck gefahren werden, kann mit den Tasten ' $<$ ' bzw. ' $>$ ' eingestellt werden (s. Anhang J.2). Ist die Schrittzahl auf den Minimalwert eins gesetzt (Standardeinstellung), werden die Motoren im Einzelschrittbetrieb bewegt.

In der Praxis hat es sich bewährt, beim Anzielen eines Punktes folgendermaßen vorzugehen:

1. Zuerst den Zielpunkt mit der **Joysticksteuerung** finden und grob anzielen, so daß der Zielpunkt vom Fernrohrbild erfaßt wird. Dieser Schritt ist nur dann erforderlich, wenn durch die programmgesteuerte automatische Theodolitausrichtung der Zielpunkt vom Fernrohrbild noch nicht erfaßt wird (Theodolitstandpunkt noch nicht exakt bekannt, größere Abweichung zwischen Soll- und Istposition des Zielpunktes).
2. Anschließend mit der **Maussteuerung** den Theodolit auf das Ziel ausrichten. Ist die Abweichung zwischen dem Zielpunkt und dem Theodolitifadenkreuz noch größer als ca. 1 cm am 14"-Bildschirm, so empfiehlt sich eine verbesserte Ausrichtung durch eine wiederholte mausgesteuerte Positionierung.
3. Die exakte Visur wird mit der **Cursorsteuerung** durchgeführt. Die Theodolitantriebe werden hierbei vom GMS-Programm so gesteuert, daß sich das Theodolitifadenkreuz in Pfeilrichtung der betätigten Cursortaste bewegt.

Die Fokuseinstellung wird über die Tasten '1' und '4' (Feineinstellung) bzw. '2' und '5' (Grobeinstellung) gesteuert (s. Anhang J.2). Wird der Fokusmotor durch Betätigen einer dieser Tasten in Bewegung gesetzt, wird die Fokussierlinse solange verschoben, bis der Operateur durch die Eingabe von ' $<Enter>$ ' ein Stoppen des Motors auslöst. Zusätzlich wird durch die $<Enter>$ -Taste die aktuell eingestellte Fokulentfernung gemessen und am Bildschirm angezeigt. Die Wahl dieser Tasten für die Fokussteuerung ist ergonomisch günstig, da diese Zeichen im numerischen Tastaturblock vom Operateur leicht einhändig und ohne Blick auf die Tastatur eingegeben werden können. Der Bediener kann sich somit voll auf das zu fokussierende Videobild konzentrieren. Sollen die

vom GMS-Programm standardmäßig gesetzten Geschwindigkeiten des Fokussierantriebs geändert werden, kann der Operateur die Geschwindigkeit der Fein- und der Grobeinstellung (Taste '7' und '8') menügeführt modifizieren.

Auch die Geschwindigkeit der Theodolitantriebe kann vom Bediener (Taste '9') interaktiv verändert werden. Bei der Einstellung der Geschwindigkeiten wird berücksichtigt, daß der Horizontal- und der Vertikaltrieb unterschiedlich übersetzt sind. Die Parameter werden vom GMS-Programm immer so eingestellt, daß die horizontalen und vertikalen Drehgeschwindigkeiten annähernd gleich sind. Der vom Bediener einstellbare Bereich reicht von 0,01 gon/sec bis 1 gon/sec im Start/Stop-Betrieb und von 0,2 gon/sec bis 7 gon/sec im Hochlaufbetrieb.

Die vom GMS-Programm standardmäßig eingestellten Theodolitgeschwindigkeiten sind dem gewählten Bildfeld angepaßt. So ist im Weitwinkelsehfeld die langsame Fahrgeschwindigkeit (Start/Stop-Betrieb) auf 1 gon/sec und die schnelle Fahrgeschwindigkeit (Hochlaufbetrieb) auf 7 gon/sec eingestellt (Maximalwerte). Für eine kontrollierte Ausrichtung des Theodoliten im Fernrohrsehfeld sind diese Fahrgeschwindigkeiten aber zu schnell. Bei der Einstellung der Schrittmotorfrequenzen für das Fernrohrsehfeld wird deshalb die Start/Stop-Geschwindigkeit auf 0,01 gon/sec (minimale Einstellung) und die schnelle Fahrgeschwindigkeit auf 0,2 gon/sec eingestellt. Bei dieser Geschwindigkeitseinstellung kann ein geübter Bediener die Zielausrichtung des Theodoliten komplett mit dem Joystick durchführen. Es ist allerdings gewöhnungsbedürftig, da wegen des vorhandenen Getriebespiels bei einem Richtungswechsel eine Totzeit auftritt, die sich insbesondere bei der Ausrichtung des Vertikaltriebs bemerkbar macht.

Das Wechseln des Sehfelds bei gleichzeitiger Anpassung der Theodolitgeschwindigkeiten kann mit den Tasten '-' bzw. ',' erfolgen (s. Anhang J.2). Ein Drehen des Bildwechselprismas ohne Geschwindigkeitsanpassung (Taste ',') ist z.B. dann sinnvoll, wenn der Operateur nur zur Orientierung kurz auf das Weitwinkelbild umschalten möchte. Bei der Umschaltung des Sehfelds werden auch die Parameter für die Bildverstärkung (Gain) und für die Bildhelligkeit (Offset) dem Sehfeld angepaßt (s. Kap. 5.0).

Zur Information kann der Operateur mit der Taste '6' eine Winkelmessung durchführen. Die aktuell gemessenen Theodolitwinkel werden dann am Terminal angezeigt.

Ist der Theodolit exakt auf den Zielpunkt ausgerichtet, erwartet das erstellte GMS-Programm, daß das Zeichen '0' eingegeben wird. Zur Bestätigung dieser Tasteneingabe wird der Operateur vom GMS-Programm anschließend aufgefordert, bei Joysticksteuerung den grünen Taster bzw. bei Cursor/Maussteuerung die <Enter>-Taste zu betätigen. Wird die Tasteneingabe bestätigt, werden die Theodolitwinkel gemessen und als Beobachtungen auf den aktuellen Zielpunkt registriert. Der Theodolit wird anschließend automatisch auf die angegebene Sollposition des nächsten Zielpunktes ausgerichtet. Wird durch das Betätigen einer beliebigen anderen Taste angezeigt, daß der Punkt doch noch nicht genau angezielt ist, geht das Programm wieder zur bedienergesteuerten Theodolitausrichtung zurück. Die notwendige Bestätigung bei Eingabe der Taste '0' wurde implementiert, da ansonsten bei einer unbeabsichtigten Tasteneingabe falsche Winkelwerte registriert werden; dieser Punkt müßte dann noch einmal komplett neu angezielt werden.

Neben den Befehlen zur Theodoliteinstellung, stehen dem Operateur bei der bedienergesteuerten Anzielung sämtliche Funktionen der GMS-Graphik zur Verfügung (s. Kap. 5.0). Die gewünschte Graphikfunktion kann durch entsprechende Tastatureingabe (s.a. Anhang J.1) aufgerufen werden.

3.3 Erfassen der Beobachtungswinkel

Mit einem im Rahmen dieser Arbeit implementierten Programmpaket werden die Zielpunkte mit dem Theodoliten angezielt und die Beobachtungswinkel werden registriert. Der Vermessungsablauf ist in Abb. 14 übersichtlich dargestellt und in den Kapiteln 3.3.1 - 3.3.4 detailliert beschrieben. Dieser Vorgang ist für alle Standpunkte gleich, nur die Beobachtungsdaten werden für jeden Standpunkt in einer separaten Datei (S1.GMS - S4.GMS) abgespeichert. Die Reihenfolge der Theodolitstandpunkte ist bei der GMS-Vermessung beliebig. Sind n Theodolitstandpunkte vereinbart, so ist mit dem Erstellen der Dateien S1.GMS - Sn.GMS das Beobachten der Zielpunkte abgeschlossen. Die Berechnung der Zielpunktkoordinaten aus diesen Beobachtungswinkeln wird in Kap. 3.4 beschrieben.

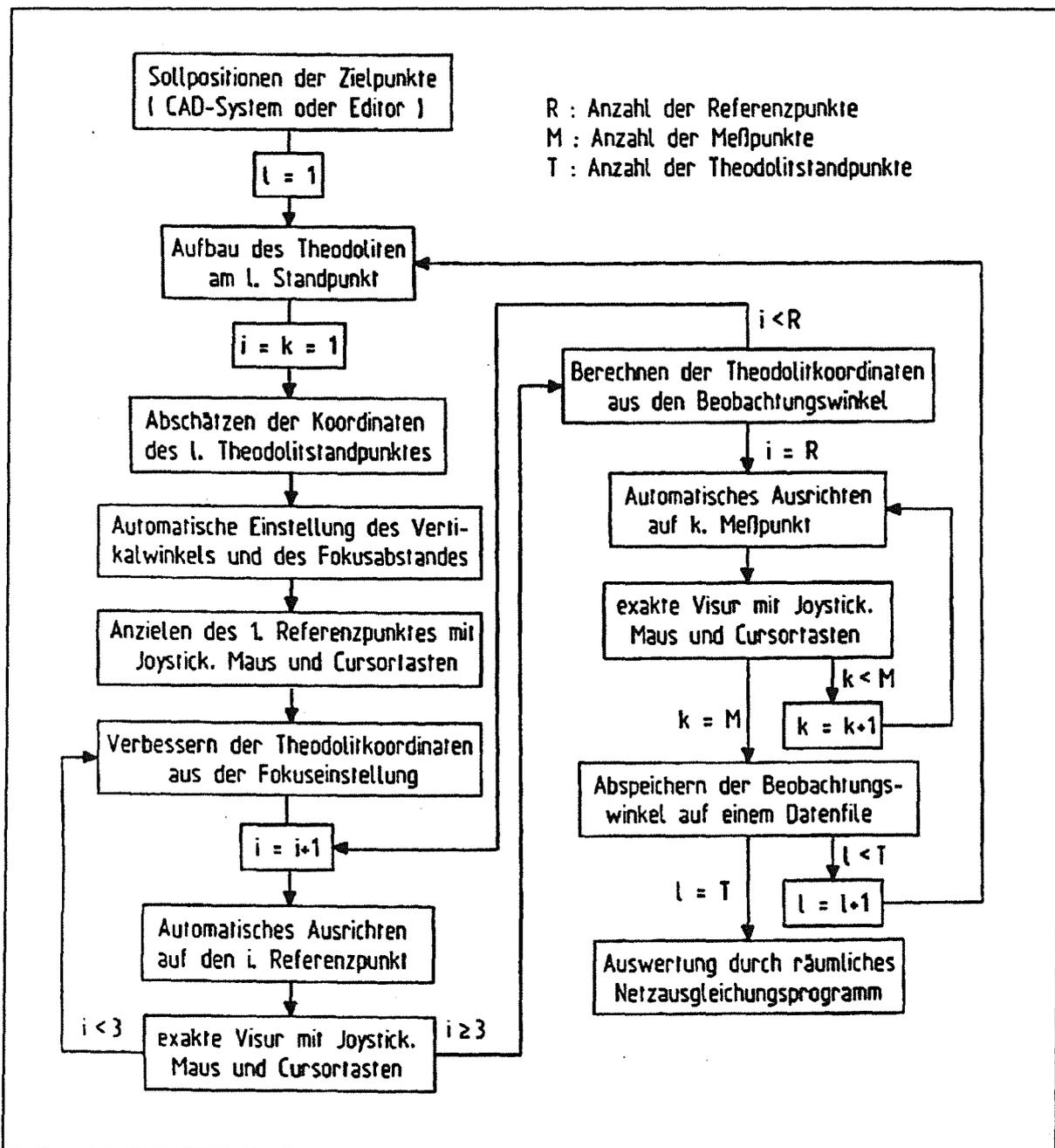


Abbildung 14. Arbeitsablaufdiagramm für GMS-Vermessungen

3.3.1 Eingabedateien

Das auf dem INTEL-Rechner implementierte GMS-Programm zur Registrierung der Beobachtungswinkel greift auf die folgenden drei Eingabedateien zu:

- In der **Zielpunktdatei** sind die Koordinaten der Referenzpunkte und die Sollpositionen der Meßpunkte eingetragen (s. Anhang F.2). Die Maßeinheit der angegebenen Koordinaten ist in der zweiten Zeile aufgeführt, und zur Kennzeichnung steht in der ersten Zeile der Name des Meßobjekts.

Diese Zielpunktdatei wird vom Postprozessor des GMS-Systems automatisch aus der vom CAD-System bereitgestellten IGES-Datei erzeugt (s. Kap. 4.4). Ist für das zu vermessende Objekt kein CAD-Modell vorhanden, kann die Zielpunktdatei auch mit dem Texteditor erstellt werden.

- Durch entsprechende Einträge in die **Maßstabsdatei** können maximal drei bekannte Strecken (Basislatten) zusätzlich als Referenzmaßstab in das Vermessungsprogramm integriert werden. Als Referenzmaßstab wird beim GMS-System ein Invarstab verwendet, an dessen Enden gut anzuzielende Markierungen angebracht sind (s. Abb. 6 auf Seite 11). Der Abstand zwischen diesen Markierungen wurde interferometrisch mit einer Genauigkeit von $\pm 0,002$ mm bestimmt. Der mittlere lineare Temperatúrausdehnungskoeffizient α wird in dem mitgelieferten Eichzertifikat mit 1,2 ppm/°C angegeben. Zur Bestimmung des α -Wertes wurde die verwendete Basislatte in der Klimakammer der TH-Zürich untersucht.

Der Eintrag in die Maßstabsdatei besteht für jede der zusätzlich eingeführten Strecken aus drei Zeilen (s. Anhang F.3). Die erste Zeile enthält die technischen Daten des Referenzmaßstabs (Länge der Strecke in 'mm' bei 20 °C, mittlerer linearer Temperatúrausdehnungskoeffizient, Genauigkeit der Strecke in 'mm'). Zur automatischen Ausrichtung des Theodoliten auf die beiden Basislattenmarkierungen sind deren xyz-Koordinaten in der zweiten bzw. dritten Zeile eingetragen. Sollen weitere Basislatten (insgesamt maximal drei) in das GMS-Vermessungsprogramm eingefügt werden, müssen diese auch entsprechend in der Maßstabsdatei eingetragen sein.

- In der **Kofaktorendatei** ist die Genauigkeit der Referenzpunkte dokumentiert. Bei einer Koordinatenberechnung durch Ausgleichung (s. Kap. 3.4) kann der richtungsabhängige mittlere Lagefehler σ aus dem mittleren Gewichtseinheitsfehler σ_0 und den entsprechenden Kofaktoren q berechnet werden /28/, /29/:

$$\begin{aligned}\sigma_{xi} &= \sigma_0 \sqrt{q_{xi,xi}} \\ \sigma_{yi} &= \sigma_0 \sqrt{q_{yi,yi}} \\ \sigma_{zi} &= \sigma_0 \sqrt{q_{zi,zi}}\end{aligned}\quad [3.3.1]$$

Die bezüglich ihrer Diagonalen symmetrischen Kofaktorenmatrix \underline{Q} hat folgenden Aufbau:

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} q_{x1,x1} & q_{x1,y1} & q_{x1,z1} & \dots & \dots & q_{x1,xk} & q_{x1,yk} & q_{x1,zk} \\ \dots & q_{y1,y1} & q_{y1,z1} & \dots & \dots & q_{y1,xk} & q_{y1,yk} & q_{y1,zk} \\ \dots & \dots & q_{z1,z1} & \dots & \dots & q_{z1,xk} & q_{z1,yk} & q_{z1,zk} \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & q_{xk,xk} & q_{xk,yk} & q_{xk,zk} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & q_{yk,yk} & q_{yk,zk} \\ \dots & q_{zk,zk} \end{bmatrix} \quad [3.3.2]$$

Diese Fehlerangaben beschränken sich auf die Unsicherheit in Richtung der Koordinatenachsen. Zur Beschreibung der Lage und Größe des räumlichen Fehlerellipsoides des Punktes i müssen zusätzlich noch die Matrixelemente $q_{xi,yi}$, $q_{xi,zi}$, $q_{yi,zi}$ mitberücksichtigt werden /29/. Die gemischten Matrixelemente $q_{xi,xk}$, $q_{xi,yk}$, ..., beschreiben ein relatives Fehlerellipsoid zwischen den beiden Punkten i und k /30/. Für den gesamten mittleren Punktfehler nach Helmert gilt /31/:

$$\sigma_{H,i} = \sqrt{(\sigma_{xi})^2 + (\sigma_{yi})^2 + (\sigma_{zi})^2} \quad [3.3.3]$$

In der Kofaktorendatei sind die Koeffizienten der Kofaktorenmatrix \underline{Q} und der mittlere Gewichtseinheitsfehler σ_0 eingetragen. Die ersten beiden Zeilen dieser Datei (s. Anhang F.5) enthalten lesbaren Kommentar. Die in der dritten Zeile eingetragene Matrixkennzahl zeigt an, ob die eingetragene Kofaktorenmatrix als Diagonalmatrix (Kennzahl=1) oder als komplett besetzte Matrix (Kennzahl=2) zu interpretieren ist. In der vierten Zeile ist der mittlere Gewichtseinheitsfehler σ_0 aufgeführt. Ab der fünften Zeile sind die Kofaktoren der Referenzpunkte eingetragen. Hat die Matrixkennzahl den Wert 1, müssen für jeden Referenzpunkt i die Diagonalmatrixelemente $q_{xi,xi}$, $q_{yi,yi}$, $q_{zi,zi}$ in aufsteigender Punktreihenfolge in der Kofaktorendatei eingetragen sein. Da jedes Diagonalmatrixelement in eine separate Zeile geschrieben wird, besteht dieser Eintrag bei n Referenzpunkten aus $3 \cdot n$ Zeilen.

Ist die komplette Kofaktorenmatrix aufgeführt (Kennzahl=2), sind die Kofaktoren spalten- bzw. zeilenweise (Matrix symmetrisch der Diagonalen) in der Datei eingetragen. Bei n Referenzpunkten ist diese Matrix aus $3 \cdot n$ Zeilen bzw. Spalten aufgebaut. Zur besseren Lesbarkeit sind in der Kofaktorendatei pro Zeile vier Matrixelemente in Festformatdarstellung aufgeführt, und bei jeder neuen Matrixzeile bzw. Spalte wird auch in der Kofaktorendatei ein Zeilenumbruch erzeugt.

Werden die Referenzpunktpositionen mit dem GMS-System vermessen, wird die Kofaktorendatei von dem GMS-Auswerteprogramm automatisch erstellt. Sind die Koordinaten der Referenzpunkte durch ein anderes Meßsystem oder Meßverfahren ermittelt worden, muß diese Kofaktorendatei mit dem Editor erstellt werden. Können für die Referenzpunktkoordinaten keine richtungsabhängigen Fehler angegeben werden (z.B. bei einer Vermessung mit dem Zollstock oder Maßband), wird der mittlere Gewichtseinheitsfehler σ_0 abgeschätzt und die "Diagonalmatrixelemente" $q_{xi,xi}$, $q_{yi,yi}$, $q_{zi,zi}$ werden auf den Wert 1 gesetzt (Matrixkennzahl = 1).

3.3.2 Initialisierung

Nach dem Aufruf des GMS-Programms wird der Operateur zuerst aufgefordert, die aktuelle Standpunktnummer einzugeben. Ist die eingegebene Zahl größer als vier, erzeugt das Programm eine entsprechende Fehlermeldung, da die Auswertesoftware maximal vier Theodolitstandpunkte verarbeiten kann. Nach der Eingabe der Standpunktnummer erscheint auf dem Terminal die standardmäßig eingestellte Konfiguration für die Vermessung (Optionen stehen in Klammern):

- **Anzahl der Theodolitstandpunkte: 2 (3/4)**

Zur Berechnung der Zielpunktkoordinaten müssen die Meßpunkte mindestens von zwei unterschiedlichen Theodolitstandpunkten aus angezielt werden. Durch zusätzliches Anzielen der Punkte von einem dritten bzw. vierten Standpunkt aus kann die Genauigkeit der Koordinaten durch ausgleichende Berechnungsverfahren erhöht werden /32/, /16/.

- (nicht) **horizontierte Theodolite**

Wird dieser Parameter auf 'nicht horizontalisiert' gesetzt, werden die Theodolitneigungen ε und ψ bei der Auswertung als zusätzliche Unbekannte eingeführt. Der derzeit verwendete GMS-Theodolit muß aber mit einer Genauigkeit von mindestens $\pm 0,2$ gon (Spielbereich des Kompensators) horizontalisiert sein, da die Neigungskompensation nicht abgeschaltet werden kann.

- **Anzahl der Basislatten: 0 (1/2/3)**

Durch das zusätzliche Beobachten von bekannten Strecken (Basislatten) kann die Genauigkeit bei den Koordinatenberechnungen gesteigert werden /16/. In der bisherigen Ausbaustufe können bei GMS-Vermessungen maximal drei Basislatten eingesetzt werden. Verzichtet man bei der GMS-Vermessung auf das Beobachten von zusätzlichen Strecken, werden die Abstände zwischen den Referenzpunkten zur Maßstabsbestimmung verwendet.

- **Anzielen der Punkte in einer (zwei) Lage(n)**

Bei einer Zweilagenmessung werden sämtliche Zielpunkte zusätzlich in zweiter Fernrohrlage beobachtet.

$$\text{Horizontalwinkel: } HZ_{Lage II} = HZ_{Lage I} \pm 200 \text{ gon} + \delta HZ_{I,II} \quad [3.3.4a]$$

$$\text{Vertikalwinkel: } V_{Lage II} = 400 \text{ gon} - V_{Lage I} + \delta V_{I,II} \quad [3.3.4b]$$

Da die Theodolitkamera fest mit dem Fernrohr verbunden ist, steht das Videobild bei den Beobachtungen in zweiter Lage auf dem Kopf. Mit den so ermittelten Abweichungen $\delta H_{I,II}$, $\delta V_{I,II}$ können Instrumentenfehler eliminiert werden /12/. Für die korrigierten Beobachtungswinkel gilt:

$$\text{Horizontalwinkel: } \overline{Hz} = HZ_{Lage I} + 0,5 \cdot \delta HZ_{I,II} \quad [3.3.5a]$$

$$\text{Vertikalwinkel: } \overline{V} = V_{Lage I} - 0,5 \cdot \delta V_{I,II} \quad [3.3.5b]$$

Bei dem eingesetzten elektronischen Theodoliten können die Gerätefehler einmal bestimmt und abgespeichert werden. Entsprechend dieser registrierten Werte werden die Theodolitwinkel automatisch korrigiert, und es kann in der Regel auf eine Beobachtung in zweiter Fernrohrlage verzichtet werden.

Der Operateur kann diese vorgegebene Parametereinstellung bestätigen oder auch interaktiv verändern. Die eingestellte Konfiguration wird auch im Kopf der GMS-Ausgabedatei (s. Anhang I.1) dokumentiert. Werden Basislatten eingesetzt, muß als nächster Schritt die Umgebungstemperatur eingegeben werden. Durch die in der Maßstabsdatei (s. Anhang F.3) eingetragenen Temperatureausdehnungskoeffizienten können somit temperaturbedingte Längenänderungen berücksichtigt werden.

Im nächsten Schritt wird der Operateur vom Programm aufgefordert, verschiedene notwendige Einstellungen zu überprüfen:

1. **Getriebe eingekoppelt**

Mit Drehschalter können die horizontalen und vertikalen Motorantriebe ein- und ausgekoppelt werden. Bei ausgekoppelten Motoren kann der Kameratheodolit wie ein konventionelles Instrument mit Klemme und Feintrieb manuell ausgerichtet werden.

2. **Bremsen gelöst**

Soll der Theodolit mit den Motoren ausgerichtet werden, müssen die Klemmen für die manuellen Feintriebe gelöst sein. Wird bei nicht gelösten Bremsen versucht, den Theodolit mit den Motoren zu bewegen, sorgt eine Rutschkupplung zwischen Getriebe und Motor dafür, daß die Motoren nicht überlastet werden.

3. **Steuergerät eingeschaltet**

Die Elektronik zur Steuerung der Theodolitmotoren ist in einem externen 19"-Gehäuse eingebaut.

4. **Graphikprogramm gestartet**

Das Programm für die GMS-Graphikunterstützung ist auf einem PC implementiert (s. Kap. 5.0). Die Kommunikation zwischen dem INTEL-Steuerrechner und dem Graphik-PC erfolgt über eine RS232-Schnittstelle.

5. **Theodolit horizontiert**

Aufgrund des Kompensators muß der eingesetzte Theodolit mit einer Genauigkeit von mindestens $\pm 0,2$ gon horizontiert sein. Ist dies nicht der Fall, erscheint beim Einschalten des Theodoliten eine entsprechende Fehlermeldung. Wird die automatische Horizontierplattform ALF (s. Kap. 6.0) verwendet, muß der Operateur für die Horizontierung des Theodoliten nur den entsprechenden Taster der ALF-Fernbedienung betätigen.

Hat der Operateur die Überprüfung mit der <Enter>-Taste bestätigt, wird der Theodolit durch das Programm eingeschaltet und verschiedene Instrumentenparameter (z.B. Winkelmeßeinheit: gon, keine automatische Abschaltung, ...) werden eingestellt. Für die Initialisierung der Schrittmotorsteuerung wird der Operateur aufgefordert, anschließend die gelbe Taste am Bedienpanel (s. Abb. 13 auf Seite 21) zu drücken. Dadurch wird die Motorsteuerung auf Joystickbetrieb eingestellt, und die Schrittmotorsteuerung sendet an den INTEL-Rechner die Quittung 'HAND' (s. Kap. 3.1). Hat der Rechner von beiden

Schrittmotorcontrollern diese Quittung erhalten, muß anschließend die grüne Taste betätigt werden. Die Schrittmotorsteuerung springt dadurch in das Hauptbefehlsmenü und schickt an den Rechner die Zeichenfolge 'M,P,L,S,H ?'. Das Betätigen dieser Tasten dient zur Überprüfung ob die Kommunikation zwischen Bedienpanel, Schrittmotorsteuerung und Rechner funktioniert.

Nach dieser Initialisierung der Theodolitmotoren wird eine Messung der Theodolitwinkel durchgeführt. Wie bereits oben erwähnt, kann die Theodolitorientierung nur im Bereich $200 \text{ gon} < \text{Hz} \leq 400 \text{ gon}$ eindeutig durch eine Winkelmessung bestimmt werden. Ist der gemessene Horizontalwinkel kleiner als 200 gon , wird der Operateur nach der aktuellen Theodolitorientierung gefragt. Da aber das GMS-Programm während der Vermessung die aktuelle Theodolitorientierung laufend registriert und auf der Festplatte abspeichert, wird die Theodolitorientierung, die das Instrument nach dem letzten GMS-Programmablauf hatte, am Bildschirm angezeigt. Wurden seither am Theodoliten keine manuellen Einstellungen vorgenommen, muß der Operateur diesen vorgeschlagenen Wert nur bestätigen.

3.3.3 Bestimmen der Theodolitkoordinaten

Zur automatischen Ausrichtung des Theodoliten auf vorgegebene Zielpunkte muß die Theodolitposition bekannt sein. Damit auch schon beim Anfahren der ersten drei Referenzpunkte eine rechnergesteuerte Voreinstellung erfolgen kann, muß der Bediener im nächsten Schritt die Näherungskordinaten des Theodolitstandpunktes eingeben. Basierend auf dieser Angabe wird der Fokus- und der Vertikaltrieb auf den ersten Referenzpunkt $(x_{R_1}, y_{R_1}, z_{R_1})$ eingestellt. Je exakter die eingegebene Standpunktposition ist, um so weniger muß der Operateur die Fokus- und Vertikalwinkeleinstellung korrigieren. Eine rechnergesteuerte Ausrichtung des Horizontaltriebs ist beim ersten Referenzpunkt noch nicht möglich, da die Ausrichtung des Theodoliten im Koordinatensystem (Orientierung) noch unbekannt ist. Nach der rechnergesteuerten Voreinstellung wird das exakte Anzielen des Punktes vom Operateur durchgeführt (s. Kap. 3.2). Nachdem die Beobachtungswinkel Hz_{R_1} , V_{R_1} und die eingestellte Fokusdistanz a_{F,R_1} registriert sind, werden die vom Operateur geschätzten Theodolitkoordinaten $\bar{x}_T, \bar{y}_T, \bar{z}_T$ anhand dieser Beobachtungen verbessert:

$$\bar{z}_T = z_{R_1} - a_{F,R_1} \cdot \cos V_{R_1} \quad [3.3.6a]$$

Bei der Verbesserung der x- und y-Koordinate des Theodoliten wird angenommen, daß der Fehler der geschätzten Koordinaten \bar{x}_T und \bar{y}_T für beide Richtungen gleich groß ist:

$$\bar{x}_T = x_{R_1} + \frac{\bar{a}_{R_1}}{a_{R_1}} (\bar{x}_T - x_{R_1}) \quad [3.3.6b]$$

$$\bar{y}_T = y_{R_1} + \frac{\bar{a}_{R_1}}{a_{R_1}} (\bar{y}_T - y_{R_1}) \quad [3.3.6c]$$

$$\text{mit: } a_{R_1} = \sqrt{(\bar{x}_T - x_{R_1})^2 + (\bar{y}_T - y_{R_1})^2}$$

$$\bar{a}_{R_1} = a_{F,R_1} \cdot \sin V_{R_1}$$

Mit diesen verbesserten Standpunktkoordinaten werden die Theodolitwinkel und die Zielpunktentfernung für den zweiten Referenzpunkt berechnet (s. Anhang G). Der Theodolit wird anschließend vom GMS-Programm automatisch auf diese Werte (HZ_{R_2} , V_{R_2} , a_{F,R_2}) eingestellt. Nach der Korrektur durch den Operateur werden die tatsächlichen Beobachtungsdaten HZ_{R_2} , V_{R_2} , a_{F,R_2} registriert. Mit dem gemessenen Vertikalwinkel V_{R_1} und der eingestellten Fokuseinstellung a_{F,R_1} werden die verbesserten Theodolitkoordinaten \bar{x}_T , \bar{y}_T , \bar{z}_T nochmals korrigiert. Die Instrumentenhöhe wird hierbei ausgleichend bestimmt:

$$\bar{z}_T = \frac{1}{2} [(z_{R_1} - a_{F,R_1} \cdot \cos V_{R_1}) + (z_{R_2} - a_{F,R_2} \cdot \cos V_{R_2})] \quad [3.3.7a]$$

Mit den auf die x-y-Ebene reduzierten Fokuseinstellungen \bar{a}_{R_1} und \bar{a}_{R_2} können die Lagekoordinaten des Theodoliten korrigiert werden. Bildet man einen Kreis mit dem Mittelpunkt R_1 und dem Radius \bar{a}_{R_1} und einen zweiten Kreis um R_2 mit Radius \bar{a}_{R_2} , so kann die Theodolitposition dann als Schnittpunkt der beiden Kreise berechnet werden:

$$1. \text{Kreis: } (\bar{x} - x_{R_1})^2 + (\bar{y} - y_{R_1})^2 = \bar{a}_{R_1}^2 \quad \text{mit } \bar{a}_{R_1} = a_{F,R_1} \cdot \sin V_{R_1}$$

$$2. \text{Kreis: } (\bar{x} - x_{R_2})^2 + (\bar{y} - y_{R_2})^2 = \bar{a}_{R_2}^2 \quad \text{mit } \bar{a}_{R_2} = a_{F,R_2} \cdot \sin V_{R_2}$$

Auflösen der 1. Kreisgleichung nach x:

$$\bar{x} = x_{R_1} + \sqrt{\bar{a}_{R_1}^2 - (\bar{y} - y_{R_1})^2} \quad [3.3.7b]$$

Einsetzen der Gleichung [3.3.7b] in die zweite Kreisgleichung liefert nach Umformung:

$$\bar{y} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a} \quad [3.3.7c]$$

$$\text{mit: } a = (x_{R_2} - x_{R_1})^2 + (y_{R_2} - y_{R_1})^2$$

$$b = [\bar{a}_{R_2}^2 - \bar{a}_{R_1}^2 - y_{R_2}^2 + y_{R_1}^2 - (x_{R_2} - x_{R_1})^2] \cdot (y_{R_2} - y_{R_1}) - 2y_{R_1}(x_{R_1} - x_{R_2})^2$$

$$c = \frac{[\bar{a}_{R_2}^2 - \bar{a}_{R_1}^2 - y_{R_2}^2 + y_{R_1}^2 - (x_{R_2} - x_{R_1})^2]^2}{4} + (y_{R_1}^2 - \bar{a}_{R_1}^2) \cdot (x_{R_1} - x_{R_2})^2$$

Damit die beiden Kreise sich schneiden bzw. berühren, muß der Wurzel Ausdruck in Gl. [3.3.7c] positiv sein ($b^2 \geq 4ac$). Ist dies nicht der Fall (ungenauere Fokuseinstellung und die Punkte R_1 , R_2 und T liegen annähernd auf einer Geraden), schreibt das GMS-Programm eine entsprechende Meldung ('Kein Schnittpunkt') auf den Bildschirm. Für die Voreinstellungen der Theodolitwinkel und der Fokuseinstellung auf den dritten Referenzpunkt werden dann die mit den Gleichungen [3.3.6] berechneten Standpunktkoordinaten verwendet. In der Regel werden aus den Gleichungen [3.3.7b] und [3.3.7c] zwei Kreisschnittpunkte bestimmt. Als der gesuchte Theodolitstandpunkt wird vom GMS-Programm derjenige Schnittpunkt ausgewählt, der näher bei dem Punkt \bar{T} (s. Gl. [3.3.6]) liegt.

Obwohl in der Literatur /33/, /34/ auch Verfahren zum Rückwärtseinschneiden nach zwei Referenzpunkten bekannt sind, wird bisher im GMS-Programm darauf verzichtet. Die im GMS-Programm implementierte Korrektur der geschätzten Standpunktkoordinaten

ten hat bei den durchgeführten GMS-Vermessungen zu ausreichend guten Voreinstellungen beim Anzielen des dritten Referenzpunktes geführt. Es ist auch fraglich, ob das Rückwärtseinschneiden nach zwei Referenzpunkten wegen der Zweideutigkeit und der "gefährlichen Ebene" /35/ nach dem Anzielen von R_2 schon bessere Standpunktkoordinaten liefert.

Nach dem genauen Anzielen des dritten Referenzpunktes kann dann der Theodolitstandpunkt mit einem räumlichen Rückwärtsschnitt berechnet werden (s. Anhang A). Nach dieser Bestimmung der Theodolitkoordinaten x_T, y_T, z_T wird geprüft, ob der Standpunkt in der Nähe des "gefährlichen Kreises" liegt. Ist die Entfernung von T zu diesem Kreis kleiner als $0,1 \cdot \text{Kreisradius}$, erscheint auf dem Terminal die Meldung: *Theodolitstandpunkt nahe dem gefährlichen Kreis!*

Sind bei der Vermessung weitere Referenzpunkte (Maximum = 6 beim GMS-Programm) vereinbart, werden diese anschließend in aufsteigender Punktreihenfolge angezielt. Da die mit dem räumlichen Rückwärtsschnitt berechneten Koordinaten - in der Regel - wesentlich genauer sind als die korrigierten Theodolitposition nach dem Anzielen des ersten bzw. zweiten Referenzpunktes, kann der Theodolit durch das GMS-Programm schon sehr exakt auf diese zusätzlichen Referenzpunkte ausgerichtet werden. Die Korrekturen durch den Operateur beschränken sich dann nur noch auf die exakte Feineinstellung. Nach jedem Anzielen eines weiteren Referenzpunktes werden die Theodolitkoordinaten durch ausgleichende Berechnungen korrigiert. Für jede mögliche Kombination von Referenzpunkttripel werden jeweils die Theodolitkoordinaten mit einem Rückwärtsschnitt bestimmt (s. Anhang A). Somit können nach dem Anzielen des n-ten Referenzpunktes k verschiedene Theodolitstandpunkte ${}_i T$ berechnet werden. Für k gilt:

$$k = \frac{n!}{3!(n-3)!}$$

Aus diesen k Koordinatentripel wird die Theodolitposition als arithmetischer Mittelwert berechnet. Bei der Mittelwertbildung werden allerdings nur diejenigen Theodolitpositionen ${}_i T$ berücksichtigt, bei denen die drei Referenzpunkte günstig für das Rückwärtseinschneiden angeordnet sind. Ist eine Position ${}_i T$ in der Nähe des gefährlichen Kreises (s. Anhang A) oder ist die Horizontalwinkeldifferenz zwischen zwei beteiligten Referenzpunkten kleiner als 10 gon, werden diese berechneten Koordinaten zur Mittelwertbildung nicht verwendet. Würde sich bei keiner Referenzpunktkombination eine günstige Konstellation für das Rückwärtseinschneiden ergeben, würde diejenige Theodolitposition ${}_i T$ gewählt werden, bei der die Referenzpunktpositionen noch am wenigsten ungünstig sind. In diesem Fall wird der Operateur auch wieder vom GMS-Programm durch eine entsprechende Meldung gewarnt.

3.3.4 Registrierung der Beobachtungswinkel

Nach dem Anzielen der Referenzpunkte werden die Beobachtungen zu den Meßpunkten durchgeführt. Die Genauigkeit der vom GMS-Programm durchgeführten automatischen Voreinstellung ist umso größer, je weniger die Istpositionen der Meßpunkte von den vorgegebenen Sollposition abweichen. Je exakter ein Punkt durch die automatische Voreinstellung bereits angezielt wird, umso geringer wird die Zeit, die der Operateur für die manuelle Feineinstellung benötigt. Die Beobachtungsrichtungen und die Signalisierung der Zielpunkte sind weitere Einflußgrößen für die benötigte Einstellzeit. Es wurde festgestellt, daß bei schrägen Sichten und/oder schlechten Zielpunktmarkierungen (z.B.

abgerundete Ecken) der Operateur wesentlich länger für die exakte Feineinstellung benötigt. Als Anhaltswerte für die Einstellzeit kann ein Bereich von 10 bis 90 Sekunden angegeben werden.

Werden bei der Meßkampagne zusätzlich bekannte Strecken verwendet, werden diese Basislattenpunkte im Anschluß an die Meßpunkte beobachtet. Bei der Aufstellung der Basislatte(n) ist besonders darauf zu achten, daß die anzuzielenden Punkte von allen Theodolitstandpunkten gut beobachtet werden können, da Beobachtungsfehler zu einer Maßstabsverzerrung bei der Netzausgleichung (s.a. Kap. 3.4) führen. Auch die Position(en) der Basislatte(n) bzgl. der übrigen Zielpunkte, hat eine starke Auswirkung auf die Genauigkeit der Netzpunkte /16/ und sollte(n) deshalb sehr sorgfältig ausgewählt werden.

Wurde bei der am Anfang durchgeführten Parametereinstellung festgelegt, daß die Zielpunkte nur in einer Fernrohrlage beobachtet werden sollen, so ist die Registrierung der Beobachtungswinkel für diesen Standpunkt abgeschlossen und die Daten werden auf der Festplatte abgespeichert (s. Anhang I.1). Bei einer Zweilagenmessung werden sämtliche anzuzielenden Punkte noch in zweiter Fernrohrlage angezielt (s. Gl. [3.3.4]). Die Punktfolgenfolge ist dabei genau umgekehrt gegenüber den Beobachtungen in der ersten Fernrohrlage. Da die Beobachtungsdaten aus der ersten Lage bereits registriert sind, ist die vom GMS-Programm automatisch durchgeführte Voreinstellung in zweiter Fernrohrlage schon sehr exakt. Der Operateur muß nur noch die fehlerbedingten Winkelabweichungen $\delta H_{z,i}$ und $\delta V_{i,i}$ (s. Gl. [3.3.4]) mit den Cursortasten korrigieren. Für diese manuelle Feineinstellung benötigt ein geübter Operateur weniger als zehn Sekunden. Nach dem Anzielen des ersten Referenzpunktes in der zweiten Fernrohrlage (letzter Zielpunkt), werden die gemittelten Beobachtungsdaten abgespeichert (s. Anhang I.1) und das Theodolitfernrohr wird wieder in die erste Lage zurückgestellt. Als letzter Schritt im GMS-Beobachtungsprogramm wird der Theodolit ausgeschaltet.

3.3.5 Datensicherung

Beim Beobachten der Zielpunkte können unterschiedliche Ursachen (Stromunterbrechung, Schnittstellenverklebung, ...) zu einem Programmabbruch führen. Damit in diesem Fall die bereits registrierten Beobachtungen nicht noch einmal wiederholt werden müssen, werden jeweils, wenn ein Punkt vom Operateur exakt eingestellt ist, die Beobachtungsdaten (Hz- und V-Winkel, Fokuseinstellung) in einer für jeden Punkt separaten Datei abgelegt. Da der Inhalt einer zum Schreiben geöffneten Datei bei einem Programmabbruch verloren ist, wird die jeweilige Datei sofort nach dem Eintragen der Beobachtungsdaten wieder geschlossen und somit dauerhaft auf der Festplatte gespeichert.

Wird das GMS-Programm ungewollt abgebrochen, kann der Operateur mit einem implementierten Wiederaufnahmeprogramm die Beobachtungen an der unterbrochenen Stelle fortsetzen. Der Ablauf dieses GMS-Wiederaufnahmeprogramms ist nahezu identisch mit dem in Kap. 3.3.1 - 3.3.4 beschriebenen Programm; es erfolgt nur zu Beginn eine zusätzliche Abfrage, bis zu welchem Zielpunkt die Beobachtungsdaten bereits registriert wurden. Das Wiederaufnahmeprogramm liest die Daten aus den entsprechenden Dateien und der Theodolit wird nochmals auf den zuletzt registrierten Zielpunkt automatisch ausgerichtet. An dieser Einstellung kann der Operateur erkennen, ob der von ihm eingegebene letzte registrierte Zielpunkt korrekt ist. Anschließend wird der Theodolit automatisch auf die nominelle Position des nächsten Punktes ausgerichtet, und der weitere Ablauf ist wie oben beschrieben.

3.4 Auswertung der Beobachtungswinkel

Nach dem Anvisieren der Zielpunkte und der Registrierung der Beobachtungswinkel werden die Koordinaten der Zielpunkte bestimmt. Da bei den GMS-Vermessungen immer eine Überbestimmung vorliegt, können die Zielpunktkoordinaten ausgleichend berechnet werden. Für die Netzausgleichung wird das am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe entwickelte Rechenprogramm NETZ3D eingesetzt (s. Anhang D). Da bei der freien Netzausgleichung das Bezugskoordinatensystem nicht festgelegt ist, müssen die mit NETZ3D ermittelnden Punktkoordinaten noch in das vorgegebene Referenzkoordinatensystem transformiert werden. Für diese Berechnungen wird das ebenfalls am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe entwickelte Programm AETRA verwendet.

Zur ausgleichenden Berechnung der Koordinatentransformationsparameter setzt das Programm AETRA voraus, daß mindestens drei Punktpositionen in beiden Koordinatensystemen bekannt sind. Neben den Positionsangaben müssen Kofaktoren für diese Werte angegeben werden. Abhängig von den Kofaktoren gehen die angegebenen Koordinaten gewichtet in die Ausgleichung ein, d.h. Koordinatenangaben mit höherer Genauigkeit haben auch einen größeren Einfluß bei der Bestimmung der Transformationsparameter. Die für diese ausgleichenden Berechnungen erforderliche Mathematik ist in /36/ ausführlich dargestellt.

Für die GMS-Auswertungen wurde das NETZ3D-Ausgleichungsprogramm entsprechend erweitert, so daß die Kofaktorenmatrix der ausgeglichenen Koordinaten in einer Datei abgelegt wird. Das Dateiformat ist dem Eingabeformat von AETRA angepaßt und dadurch können diese Kofaktorenmatrizen von AETRA direkt eingelesen werden. Als identische Punkte werden bei den GMS-Vermessungen die Referenzpunkte verwendet. Diese Punkte repräsentieren das vorgegebene Koordinatensystem und werden in der Initialisierungsmessung mit dem GMS-System vermessen. Die Auswertung der Einmessung mit NETZ3D liefert, neben den Referenzpunktkoordinaten im xyz-Koordinatensystem, auch die zugehörigen Kofaktoren. Die Kofaktorenmatrix beschreibt somit die Genauigkeit der Referenzpunkte im xyz-Koordinatensystem (s.a. Anhang F.5). Bei allen anschließenden Meßkampagnen wird diese Kofaktorenmatrix für die Gewichtung der Referenzpunktpositionen im festgelegten xyz-Koordinatensystem verwendet.

Neben der ausgleichenden Bestimmung der Koordinatentransformationsparameter berechnet AETRA auch gleich daraus die Meßpunktkoordinaten in dem vorgegebenen xyz-Koordinatensystem. Zusätzlich zu den Koordinaten werden in AETRA auch die durch die freie Netzausgleichung bestimmten Fehlerellipsoide der Meßpunkte in das xyz-Koordinatensystem transformiert.

Bei dieser Auswertestrategie wird vorausgesetzt, daß die Referenzpunktpositionen dauerhaft stabil sind. Die Auswahl und Markierung der Referenzpunkte sollte deshalb sehr sorgfältig durchgeführt werden. Beim Einmessen dieser Referenzpunkte mit dem GMS-System, sollten die Punkte möglichst von vier Theodolitstandpunkten (GMS-Maximum) aus angezielt werden. Die starke Überbestimmung bewirkt, daß der mittlere Punktfehler möglichst gering wird. Dieser hohe Aufwand für die Bestimmung der Referenzpunktkoordinaten ist sinnvoll, da sich die Koordinatenfehler der Referenzpunkte auf alle zukünftigen Objektvermessungen auswirken. Die Referenzpunktpositionen sollten in regelmäßigen Abständen überprüft werden, ob die vorausgesetzte Punktstabilität auch noch erfüllt ist.

Bei dem GMS-Programm zur Registrierung der Beobachtungswinkel (s. Kap. 3.3) werden die Theodolitstandpunkte aus den Zielungen auf die Referenzpunkte errechnet. Durch diese Standpunktbestimmung kann der Theodolit dann auf die vorgegebenen Sollpositionen der Zielpunkte automatisch ausgerichtet werden. Für die Standpunktbestimmung (s. Anhang A) sind bei günstiger Punktanordnung drei Referenzpunkte vollauf ausreichend; eine höhere Genauigkeit der Standpunktkoordinaten durch Anzielen weiterer Referenzpunkte bringt für die automatische Theodolitausrichtung keine entscheidende Verbesserung (Unterschiede zwischen den vorgegebenen Soll- und Istpositionen sind in der Regel wesentlich größer als der Fehler bei den errechneten Theodolitkoordinaten). Die Referenzpunkte werden aber nicht nur zur Bestimmung der Theodolitkoordinaten verwendet, sondern legen auch das Bezugskordinatensystem fest. Deshalb sollten möglichst viele Referenzpunkte angezielt werden, da die Genauigkeit bei der ausgleichenden Berechnung der Koordinatentransformationsparameter mit der wachsenden Anzahl der Referenzpunkte steigt. Aufgrund der begrenzten Hauptspeicherkapazität kann das GMS-System derzeit aber maximal sechs Referenzpunkte verarbeiten.

Sowohl das Programm NETZ3D als auch AETRA erwarten, daß die Informationen in den Eingabedateien in vorgegebenen Formaten eingetragen sind. Zur automatischen Auswertung wurde im Rahmen dieser Arbeit das Programm NETZ3DIN erstellt, das aus den GMS-Beobachtungsdateien (s. Anhang I.1) die entsprechende Eingabedatei für das NETZ3D-Programm erzeugt. Sind zwischen den vorgegebenen Soll- und den tatsächlichen Istpositionen der Meßpunkte größere Differenzen, sind die Linearisierungsungenauigkeiten nicht mehr vernachlässigbar (s. Anhang D), und die ausgeglichenen Punktkoordinaten müssen iterativ berechnet werden. Da aufgrund der begrenzten Hauptspeicherkapazität des Auswerterechners (INTEL) die maximale Anzahl der Netzpunkte bereits auf 28 beschränkt werden mußte, wurde auf die Integration dieser iterativen Berechnung in die NETZ3D-Software verzichtet.

Die Erweiterung der NETZ3D-Software hätte eine weitere Reduzierung der maximalen Anzahl der Netzpunkte zur Folge. Deshalb wurde in dieser Arbeit ein separates Rechnerprogramm N3DBESSER erstellt, das automatisch aus der NETZ3D-Ergebnisdatei eine neue NETZ3D-Eingabedatei mit verbesserten Punkt.koordinaten erzeugt. Diese iterative Auswertung wird solange fortgesetzt, bis die Verbesserungen aller Netzpunktkoordinaten geringer sind als die mittleren Fehler in den entsprechenden Koordinatenrichtungen. Ist dieses Abbruchkriterium erfüllt, meldet das Programm N3DBESSER, daß keine weiteren Verbesserungen mehr berechnet werden können.

Aus der NETZ3D-Ergebnisdatei erzeugt das in dieser Arbeit implementierte Programm AETRAIN die, für die AETRA-Software erforderliche Eingabedatei. Die von AETRA erzeugte Ausgabedatei ist im Anhang I.2 aufgeführt. Aus dieser Datei und der vom CAD-System vorgegebenen IGES-Datei erzeugt der entwickelte IGES-Präprozessor des GMS-Systems eine neue IGES-Datei (s.a. Abb. 17 auf Seite 46) in der die Meßergebnisse zusätzlich eingetragen sind.

4.0 Datenaustausch CAD-GMS

Weltweit werden derzeit über 250 verschiedene CAD-Systeme angeboten, deren rechnerinterne Modelldarstellungen sich zumeist erheblich unterscheiden. Um CAD-Modelle auf ein anderes Computersystem zu übertragen, muß das Modell durch entsprechende Konvertierungsprogramme (Prozessoren) bedeutungserhaltend auf die rechnerinterne Darstellung des empfangenden Systems abgebildet werden. Für diesen digitalen CAD-Datenaustausch gibt es prinzipiell zwei unterschiedliche Möglichkeiten:

- Direkte Kopplung (Punkt zu Punkt-Kopplung, s. Abb. 15)
- Kopplung über eine systemneutrale Schnittstelle (Stern-Kopplung, s. Abb. 15)

In der Praxis werden häufiger systemneutrale Schnittstellen für den CAD-Modellaustausch eingesetzt. Eine Übersicht der verfügbaren systemneutralen CAD-Schnittstellen ist in Kap. 4.1 zusammengestellt. Die Vorteile bei dieser Stern-Kopplung liegen, außer in einer größeren Flexibilität, besonders in der vergleichsweise kleinen Anzahl an Prozessoren /37/. Der direkte Datenaustausch erfordert $n \times (n-1)$ Prozessoren um n CAD-Systeme zu koppeln, während für den Datentransfer über eine systemneutrale Schnittstelle lediglich $2 \times n$ Prozessoren benötigt werden (s. Abb. 15).

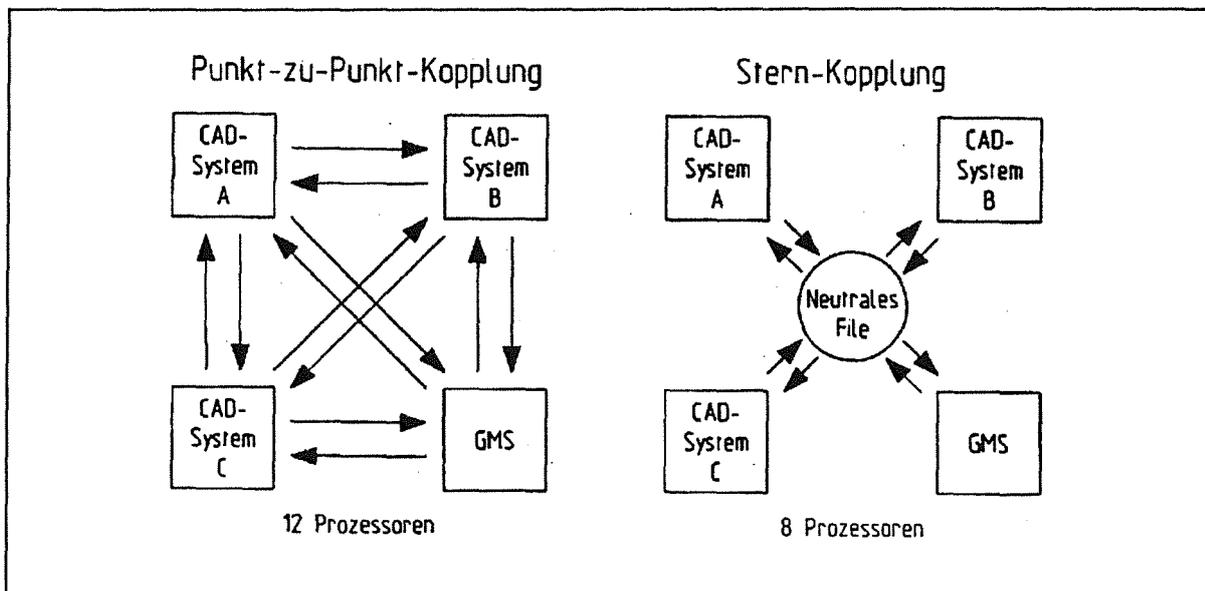


Abbildung 15. Möglichkeiten der GMS-Kopplung an CAD-Systeme

Aufgrund dieser Vorteile wird für den Datenaustausch CAD-GMS eine systemneutrale Schnittstelle eingesetzt. Da die IGES-Schnittstelle derzeit die am häufigsten eingesetzte neutrale CAD-Schnittstelle ist, wird für den Datenaustausch CAD-GMS das IGES-Format verwendet. In Kap. 4.2 ist dieses IGES-Datenformat detailliert beschrieben.

Für die Vermessung mit dem GMS-System müssen am CAD-Modell noch die Zielpunkte speziell markiert werden. Die dafür erforderlichen zusätzlichen Modellergänzungen sind in Kap.4.3 erläutert.

Bei den Konvertierungsprogrammen unterscheidet man zwischen Prä- und Postprozessoren. Der Präprozessor konvertiert die rechnerinterne Modellbeschreibung in das systemneutrale Datenformat, während der Postprozessor die systemunabhängige Modelldarstellung auf die systemspezifische Modelldarstellung abbildet. Der für das GMS-Sy-

stem entwickelte IGES-Postprozessor ist in Kap. 4.4 und der Präprozessor ist in Kap. 4.5 beschrieben. Mit der im Rahmen dieser Arbeit implementierten Konvertierungssoftware kann das GMS-Vermessungssystem Modelle von sämtlichen CAD-Systemen bearbeiten, die diese neutrale Schnittstelle unterstützen.

4.1 Systemneutrale CAD-Schnittstellen

Es wurden bereits mehrere systemneutrale Schnittstellen konzipiert und zum Teil auch national genormt. In der Praxis werden heute die folgenden drei neutralen Datenformate eingesetzt:

1. IGES (Initial Graphics Exchange Specification)

Die Entwicklung der IGES-Schnittstelle wurde Ende der siebziger Jahre im Rahmen eines Programms der US AIR FORCE begonnen und die Version 1 /38/ wurde 1981 als ANSI-Standard Y14.26M genormt /39/. Die Elemente dieser ersten Spezifikation beschränken sich auf die Beschreibung von Drahtmodellen, Flächengeometrien und technischen Zeichnungen. Die überarbeitete Version 2.0 (1983) enthält zusätzliche Elemente für die Elektrotechnik und für Berechnungen mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM) /40/. Die Bearbeitung von mehr als 250 Änderungs- und Erweiterungsvorschlägen führte 1986 zu der IGES-Version 3.0 /41/. Es wurden Unklarheiten bei den Spezifikationsbeschreibungen der IGES-Elemente beseitigt und zusätzlich Implementierungsrichtlinien für die Konvertierungssoftware ausgearbeitet /42/. Neue Elemente (unterschiedliche Flächenbeschreibungen, erweiterte Bemaßungsmöglichkeiten, Schraffurelement, ...) wurden definiert und einige sehr selten verwendete IGES-Elemente eliminiert. Die Version 3.0 spezifiziert auch ein komprimiertes ASCII-Format, wodurch sich IGES-Dateien auf ca. 1/3 ihrer ursprünglichen Größe reduzieren lassen. Die aktuelle IGES-Version 4.0 (1988) bietet nun auch die Möglichkeit, einfache Volumenmodelle zu übertragen /43/. Für die nächste IGES-Überarbeitung ist eine erweiterte Volumenmodellbeschreibung angekündigt.

IGES ist die am häufigsten eingesetzte Schnittstelle, und es werden IGES-Prozessoren für fast alle CAD-Systeme angeboten.

2. VDAFS (Verband der Automobilindustrie - Flächenschnittstelle)

1982 entschloß sich der Verband der Automobilindustrie (VDA), die systemneutrale VDAFS-Schnittstelle zu entwickeln. Ein Hauptgrund für diesen Entschluß war die Tatsache, daß in der ersten IGES-Version nur Freiformkurven und -flächen maximal dritten Grades spezifiziert waren. Es war daher mit IGES 1.0 nicht möglich, die komplexen Automobilkarosseriegeometrien zu übertragen.

Die VDAFS-Spezifikation beschränkt sich bewußt auf den Kern der zu übertragenden Oberflächengeometrien und deshalb ist auch der Entwicklungsaufwand für die VDAFS-Konvertierungssoftware relativ gering. Für das Übertragen der kompletten Modellinformation ist es aber -in der Regel- erforderlich, daß zusätzlich erläuternde Skizzen oder Plotterzeichnungen mit weitergegeben werden.

Die erste VDAFS-Version wurde 1983 veröffentlicht /44/ und 1984 als DIN 66301 genormt /45/. Eine erweiterte und überarbeitete VDAFS-Spezifikation wurde 1987 vom VDA-Arbeitskreis CAD/CAM herausgegeben /46/.

Die VDAFS wird hauptsächlich in der deutschen Automobilindustrie eingesetzt und die erforderlichen Prozessoren sind für ca. 25 CAD/CAM-Systeme verfügbar.

3. SET (Standard d'Échange et de Transfer)

Als Alternative zu IGES wurde in Frankreich die SET-Schnittstelle entwickelt. Die 1984 veröffentlichte Version 1.1 /47/ wurde 1985 als AFNOR-Z68-300 /48/ genormt. Der Elementumfang von SET 1.1 ist vergleichbar mit dem der IGES-Spezifikation 2.0 /49/. Verglichen mit IGES hat SET ein kompakteres Datenformat und ist besser strukturiert.

Die SET-Schnittstelle wird bisher fast ausschließlich in der europäischen Flugzeugindustrie beim Bau des AIRBUS eingesetzt.

Um eine einheitliche internationale Schnittstellenstandardisierung zu erreichen, wurde 1984 ein eigenständiges Komitee (ISO TC/184 SC/4) eingerichtet. Ziel dieses Komitees ist es, die ISO-Norm STEP (Standard for the Exchange of Product Definition Data) zu spezifizieren /50/. STEP soll alle CAD-Systemklassen (Linien-, Flächen-, Volumenmodellierer) unterstützen. Die bisherigen Erfahrungen mit den nationalen Schnittstellennormen sollen bei der STEP-Spezifikation berücksichtigt werden. Eine erste Version von STEP wird frühestens 1991 verfügbar sein.

Um den Aufbau von europäischem Know-How beim CAD-Datenaustausch zu unterstützen, war die CAD-Schnittstellenentwicklung Bestandteil des EG-Forschungsprogramms ESPRIT. Im Rahmen des Projekts 322 'CAD-Interfaces' wurde die CAD*I-Schnittstelle für die Übertragung von Linien-, Flächen- und Volumenmodellen entwickelt /51/. Diese europäischen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten haben auch einen großen Einfluß auf die STEP-Spezifikation /52/.

4.2 IGES-Datenformat

Das Datenformat der IGES-Schnittstelle, die für den Datenaustausch CAD \leftrightarrow GMS eingesetzt wird, ist in diesem Kapitel beschrieben. Um eine höchstmögliche Hardwareunabhängigkeit zu gewährleisten, wurden für das physikalische IGES-Datenformat folgende Randbedingungen vereinbart /53/:

- Sequentielle Datei
- ASCII-Zeichensatz
- 80 Zeichen pro Datensatz (Festformat).

Die grundlegende Informationseinheit in IGES ist das Element. Alle produktdefinierenden Daten werden in IGES in Form einer Liste von Elementen beschrieben. In der IGES-Version 3.0 wurden hierfür 55 verschiedene Elementtypen definiert, die über vorgegebene Typnummern unterschieden werden. Die IGES-Elemente lassen sich in 3 Kategorien einteilen:

- **Geometrielemente** dienen zur Definition von dreidimensionalen Kanten- und Flächenmodellen.
- **Zeichnungselemente** (z.B. Bemaßung) werden zum Erstellen von technischen Zeichnungen verwendet.
- **Strukturelemente** zielen auf die Beschreibung von logischen Beziehungen zwischen IGES-Elementen sowie auf die Zusammenfassung von Einzelementen zu größeren Einheiten.

Zur Darstellung der Information sind in IGES fünf Typen von Konstanten vereinbart. Diese Konstantentypen sind in Tabelle 2 auf Seite 40 detailliert beschrieben. Die IGES-Spezifikation basiert auf einem Modellkonzept, das die Definition von Elementen und Beziehungen zwischen Elementen zuläßt. Elemente werden durch zugeordnete Attribute (z.B. Farbe) detailliert beschrieben. Die Beziehungen zwischen den Elementen werden durch Zeiger dargestellt. In IGES wird bei der Definition von Elementen grundsätzlich unterschieden zwischen

- dem Definitionsraum und
- dem Modellraum.

Der Modellraum ist ein dreidimensionaler euklidischer Raum mit einem festgelegten Koordinatensystem x, y, z zur Definition des gesamten Modells. Der Definitionsraum ist ebenfalls ein dreidimensionaler euklidischer Raum, dessen Koordinatensystem x_t, y_t, z_t allerdings von Element zu Element unterschiedlich sein kann.

Das Konzept des Definitionsraums erlaubt die Verwendung von lokalen Koordinatensystemen und wird besonders bei der Beschreibung von ebenen Elementen (z.B. Kreisbögen) benutzt. Dazu werden diese Elemente im elementeigenen Definitionsraum beschrieben und über eine Transformationsmatrix in die exakte Lage im Modellraum

| |
|--|
| Integer-Konstante |
| Eine Integer-Konstante wird durch eine numerische Zeichenkette dargestellt und kann ein vorangestelltes Vorzeichen enthalten. Der Wertebereich W wird durch die Bitanzahl N bestimmt, die für die Integer-Konstante zur Verfügung stehen: $W = \pm(2^N - 1)$ |
| Floating-Point-Konstante (Real-Konstante) |
| Es wird zwischen Floating-Point-Konstanten mit einfacher und doppelter Genauigkeit unterschieden. Einfachgenaue Floating-Point-Konstanten können ohne und mit Exponent dargestellt werden. Die Darstellung der Floating-Point-Konstante ohne Exponent unterscheidet sich von der Integer-Konstante durch das zwingend vorgeschriebene Dezimaltrennzeichen ('.'). Floating-Point-Konstanten in Exponentendarstellung beginnen mit einer Real- oder Integer-Konstanten, gefolgt von dem Zeichen 'E' für einfachgenaue, bzw. dem Zeichen 'D' für doppelgenaue Floating-Point-Konstanten. Danach folgt eine Integer-Konstante zur Darstellung des Exponenten. Einfach- und doppelgenaue Floating-Point-Konstanten unterscheiden sich in der Bitanzahl für Mantisse und Exponent (s. Parameter 8 - 11 in Tabelle 3 auf Seite 42). |
| String-Konstante (Text-Konstante) |
| Die String-Konstante wird im Hollerithformat dargestellt /54/. Sie ist aufgebaut aus einer vorzeichenlosen Integer-Konstanten (Anzahl der ASCII-Zeichen des Strings), gefolgt von dem Zeichen 'H' und dem anschließend aufgeführten String. Die Anzahl der Zeichen des Strings ist beliebig, und dieser kann sich somit über mehrere IGES-Sätze erstrecken. |
| Pointer-Konstante (Zeiger-Konstante) |
| Die Pointer-Konstante wird durch eine maximal siebenstellige Integer-Konstante dargestellt. Durch die Pointer-Konstante wird der Bezug zu anderen IGES-Sätzen aufgebaut. Der Wert der Pointer-Konstanten ist identisch mit dem Wert der Sequenznummer des Satzes, auf den verwiesen wird. Optionale Pointer-Konstanten haben ein negatives Vorzeichen (s. Tabelle 4 auf Seite 43), ansonsten sind sie vorzeichenlos. |
| Language Statement-Konstante |
| Die Language Statement-Konstante ist ein String aus ASCII-Zeichen, der im Unterschied zur Stringkonstanten nicht im Hollerithformat dargestellt wird. Nur bei der Programmierung von IGES-Macros werden Language Statement-Konstante verwendet. |

Tabelle 2. Die fünf vereinbarten Konstantentypen des IGES-Formates

transformiert. Diese Transformation umfaßt eine Rotation und eine Translation. Sie ist grundsätzlich für alle IGES-Elemente über den Bezug auf eine Transformationsmatrix möglich.

Eine IGES-Datei ist logisch in fünf Abschnitte unterteilt, und jeder Abschnitt besteht aus einer gewissen Anzahl von 80er ASCII-Sätzen (IGES-Sätzen). Jeder IGES-Satz ist in Spalte 73 durch den Anfangsbuchstaben des Abschnittes (Sectionidentifizier) gekennzeichnet. Außerdem enthält jeder Satz in den Spalten 74 bis 80 eine Sequenznummer, die rechtsbündig eingetragen ist (s.a. Anhang F.1). Diese Sequenznummer beginnt in jedem Abschnitt mit dem Zeichen '1' und muß für die folgenden Sätze aufsteigend sortiert sein. Sowohl zwischen den Abschnitten als auch innerhalb eines Abschnitts können durch Zeiger (Pointer) die logische Zusammengehörigkeit von Daten festgelegt werden. In der nachfolgenden Liste werden die fünf IGES-Abschnitte näher beschrieben:

1. Die **Start Section** (S-Section) bildet den Anfang einer IGES-Datei und enthält lesbaren Kommentar. Sie muß aus mindestens einem Satz bestehen.
2. Die **Global Section** (G-Section) enthält Informationen, die den Präprozessor und das sendende System beschreiben sowie Informationen, die für den Postprozessor zur Dateiverarbeitung benötigt werden. In der Global Section sind genau 24 Parameter (s. Tabelle 3 auf Seite 42) eingetragen; Standardwerte sind nur für die ersten beiden Parameter vereinbart.
3. In der **Directory Entry Section** (DE-Section) sind in Festformatdarstellung alle Elemente der IGES-Datei aufgeführt. Jeder DE-Eintrag eines Elements (DE-Satz) umfaßt zwei IGES-Sätze, die in 20 Felder zu je 8 Zeichen eingeteilt sind. In diesen Feldern sind die Attribute (z.B. Farbe) des IGES-Elements verzeichnet (s. Tabelle 4 auf Seite 43), und die Parameter sind rechtsbündig in den entsprechenden Feldern eingetragen. Elementattribute können direkt einem Element zugeordnet sein (positiver Werteeintrag) oder über Zeiger (negativer Werteeintrag) dem Element zugeordnet werden.
4. Die **Parameter Data Section** (PD-Section) enthält die Parameterdaten der Elemente, die in der Directory Entry Section eingetragen sind. Der Parameter-Datensatz (PD-Satz) eines IGES-Elementes kann aus mehreren IGES-Sätzen bestehen. Die Zuordnung vom PD-Satz zum DE-Satz eines Elements erfolgt durch einen Zeiger im DE-Eintrag und durch Rückzeiger in den IGES-Sätzen der PD-Section. Die Parameterdaten werden in das Parameterdatenfeld eingetragen, für das die Spalten 1 bis 64 des IGES-Satzes vorgesehen sind. Der Rückzeiger zum DE-Satz ist in Spalte 65 bis 72 verzeichnet und entspricht der Sequenznummer des ersten IGES-Satzes des zugehörigen DE-Eintrags eines IGES-Elementes. Erstreckt sich der PD-Satz eines IGES-Elementes über mehr als einen IGES-Satz, wird der Rückzeiger für die folgenden IGES-Sätze konstant gehalten.

Der erste Dateneintrag eines PD-Satzes ist stets die Elementtypnummer, die einem Element zur Kennzeichnung zugeordnet ist. Anschließend werden die elementspezifischen Parameter aufgeführt (s. Tabelle 7 auf Seite 98 - Tabelle 15 auf Seite 101). Am Ende der Parameterliste können dem Element durch Rückzeiger (Backpointer auf die DE-Section) noch Struktur- oder Textelemente und weitere Attribute (z.B. numerische Daten) zugeordnet werden. Der Parameter-Datensatz muß durch das Satzbegrenzungszeichen abgeschlossen werden. Nach dem Satzbegrenzungszeichen kann noch Kommentar folgen, der sich über mehrere IGES-Sätze erstrecken kann.

| Nr. | Typ | Beschreibung |
|-----|---------|--|
| 1 | Text | Parameterbegrenzungszeichen (Standard: Komma) |
| 2 | Text | Satzbegrenzungszeichen (Standard: Semikolon) |
| 3 | Text | Senderproduktname |
| 4 | Text | Dateiname |
| 5 | Text | Systemidentifikation |
| 6 | Text | Übersetzerversion |
| 7 | Integer | Bitanzahl für Festkomma-Konstante |
| 8 | Integer | Bitanzahl für Exponent einer einfachgenauen Gleitkomma-Konstanten |
| 9 | Integer | Bitanzahl für Mantisse einer einfachgenauen Gleitkomma-Konstanten |
| 10 | Integer | Bitanzahl für Exponent einer doppelgenauen Gleitkomma-Konstanten |
| 11 | Integer | Bitanzahl für Mantisse einer doppelgenauen Gleitkomma-Konstanten |
| 12 | Text | Empfängerproduktname |
| 13 | Real | Maßstab |
| 14 | Integer | Kennziffer für Maßeinheit: <ul style="list-style-type: none"> • Kennziffer = 1: Maßeinheit: inch • Kennziffer = 2: Maßeinheit: mm • Kennziffer = 3: Maßeinheit: definiert durch Parameter 15 |
| 15 | Text | Einheit |
| 16 | Integer | Größte Strichstärke |
| 17 | Real | Längste Linie in oben vereinbarter Einheit |
| 18 | Text | Datum und Zeit der Dateierstellung |
| 19 | Real | Kleinste Auflösung des Modellraums |
| 20 | Real | Größte Auflösung des Modellraums |
| 21 | Text | Name des Programmierers |
| 22 | Text | Angaben zur Organisation |
| 23 | Integer | Versionsnummer |
| 24 | Integer | Zeichungsstandard |

Tabelle 3. Die Parameter der Global Section

5. Die **Terminate Section** (T-Section) markiert das Dateiende und enthält Prüfsummen der Sections 1 bis 4. Sie besteht aus nur einem IGES-Satz.

Ein Schwachpunkt des IGES-Formats ist die komplexe Pointerstruktur (DE → DE, DE → PD, PD → DE). Das Erstellen bzw. Auflösen dieser Pointer macht aufwendige Konvertierungssoftware erforderlich und erhöht erheblich die Rechenzeiten der Prozessorläufe. Ein weiterer Schwachpunkt ist der hohe Speicherplatzbedarf für die IGES-Dateien: Die aus dem CAD-Modell des einfachen Testobjekts erzeugte IGES-Datei (s. Anhang F.1) benötigt z.B. bereits einen Speicherplatz von 25 kByte (nicht komprimiertes IGES-Format).

Eine Schwierigkeit beim CAD-Datenaustausch mit der IGES-Schnittstelle, wird dadurch verursacht, daß der Umfang der implementierten IGES-Elemente bei den verschiedenen Prozessoren unterschiedlich sein kann. Da in IGES keine Klasseneinteilung und auch kein Pflichtumfang für die Prozessoren festgelegt ist, müßte für einen kompletten systemunabhängigen Datentransfer folgendes gewährleistet sein:

- Sämtliche Postprozessoren müßten alle IGES-Elemente unterstützen, und
- sämtliche systemspezifischen CAD-Elemente müßten vom Präprozessor bedeutungserhaltend auf IGES-Elemente abgebildet werden.

| Feld-Nr | Typ (I: Integer-Konstante P: Pointer-Konstante) | Bedeutung des Feldes |
|---------|---|--|
| 1 | I | Elementtypnummer des 1.Satzes |
| 2 | P | Zeiger auf 1.Satz in der PD-Section, in der die dazugehörigen Parameter des Elements stehen |
| *3 | I/P | Versionsnummer, nur Wert 1 erlaubt |
| *4 | I/P | Linienart |
| *5 | I/P | Zeichnungsebene |
| 6 | P | Zeiger zu einem Ansichten-Element |
| 7 | P | Zeiger zu einem Transformationsmatrizelement |
| 8 | P | Zeiger zu einem Assoziationselement (Merkmal Ausdruck) |
| 9 | I | Status, 4 Subfelder aus jeweils 2 Zeichen: 1.Subfeld: 00 sichtbar 01 unsichtbar 2.Subfeld: 00 unabhängig 01 abhängig (physikalisch) 02 abhängig (logisch) 03 01 und 02 gleichzeitig 3.Subfeld: 00 Geometrielemente 01 Zeichnungselemente 02 Strukturelemente (Definition) 03 weitere Elemente 04 virtuelle Elemente 4.Subfeld: 00 Attribute gelten auch für untergeordnete Elemente 01 Attribute nur für Element gültig 02 Attribute werden durch ein Eigenschaftselement bestimmt |
| 10 | I | Sequenznummer des 1.Satzes |
| 11 | I | Elementtypnummer des 2.Satzes |
| 12 | I | Linienstärke |
| 13 | I | Stift- oder Farbnummer |
| 14 | I | Anzahl von PD-Sätzen eines Elements |
| 15 | I | Formnummer, gibt Interpretationsweise des PD-Satzes an |
| 16 | | unbenützt |
| 17 | | unbenützt |
| 18 | I | Elementkennung |
| 19 | I | Elementzähler |
| 20 | I | Sequenznummer des 2.Satzes |

Tabelle 4. Die Elementattribute der Directory Entry Section. (Die mit * gekennzeichneten Felder sind bei negativem Werteeintrag Pointer-Konstanten)

Die in der Praxis eingesetzte Schnittstellensoftware erfüllt allerdings diese Anforderungen nicht /55/. Deshalb muß beim Datentransfer mit IGES die Leistungsfähigkeit der beteiligten Prozessoren mit berücksichtigt werden. Neben den Leistungsunterschieden ist auch die Qualität der auf dem Markt befindlichen IGES-Prozessoren sehr unterschiedlich /56/ und sie weisen zum Teil noch erhebliche Fehler auf.

Trotz der genannten Schwierigkeiten wird die IGES-Schnittstelle bereits erfolgreich in der Praxis eingesetzt /56/. Sie wird auch in den kommenden Jahren noch eine entscheidende Rolle beim CAD-Datenaustausch spielen. Erst mit der Einführung von STEP ist zu erwarten, daß die IGES-Schnittstelle an Bedeutung verlieren wird.

4.3 Festlegen der Zielpunkte am CAD-Modell

Grundlage für die GMS-Vermessungen ist das CAD-Modell des Vermessungsobjekts. Dieses Modell muß im CAD-System als Drahtmodell vorhanden sein. Für die Vermessungen mit dem GMS-System werden am CAD-Modell des Meßobjekts noch zusätzlich die Referenz- und Meßpunkte speziell gekennzeichnet (s. Abb. 16 auf Seite 45). Zur Markierung dieser Punkte wurde für das GMS-System folgendes vereinbart:

- Durch zusätzlich eingeführte Punktelemente werden die Koordinaten der Zielpunkte festgelegt.
- Zur Kennzeichnung wird jedem dieser Punkte ein Text zugeordnet. Das erste Zeichen des Textes ist bei Referenzpunkten der Buchstabe 'R'; die Meßpunkte sind durch 'M' gekennzeichnet. Die anschließende, maximal 4stellige Ziffer numeriert die Punkte. Durch diese Zahl wird auch die Reihenfolge der Zielpunkte bei der Vermessung festgelegt.
- Die Zielpunkte und ihre zugehörigen Texte werden auf vorgegebenen CAD-Zeichnungsebenen abgelegt /57/. Für die Meßpunkte wird die Ebene 7777 verwendet und die Referenzpunkte werden der Ebene 7778 zugeordnet. Durch diese Festlegung kann der Operateur am CAD-System die Referenz- und/oder die Meßpunkte wahlweise ein- bzw. ausblenden.

Da diese Zeichnungsebenen nicht bei allen CAD-Systemen verfügbar sind, wurde bei der Erstellung der Konvertierungssoftware darauf geachtet, daß diese Zeichnungsebenen leicht angepaßt werden können. Die Zahlen der neu gewählten Zeichnungsebenen müssen dann nur in die Konstantendeklarationen der Konvertierungsprogramme eingetragen werden.

- Zur optischen Unterscheidung wurde vereinbart, daß die Referenzpunkte und die ihnen zugeordneten Texte durch das Farbattribut blau gekennzeichnet werden. Für die Darstellung der Meßpunkte wurde die Farbe rot gewählt. Diese Farbzuzuordnung ist aber nicht zwingend und kann willkürlich verändert werden. Hierbei ist allerdings zu beachten, daß den gemessenen Istpositionen vom Präprozessor das Farbattribut grün zugewiesen wird (s. Kap. 4.5).

Die CAD-Modelle für die GMS-Tests wurden auf dem System BRAVO3 der Firma Applicon erstellt. Für dieses CAD-System wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Kommando-prozedur implementiert, mit der der Benutzer die Referenz- und Meßpunkte am CAD-Modell menügeführt festlegen kann. Nach dem Aufruf dieser Kommandoprozedur kann gewählt werden, ob Meß- oder Referenzpunkte erzeugt werden sollen. Es muß dann nur noch die Punktposition eingegeben werden, und die Kommandoprozedur erzeugt automatisch einen Punkt auf der festgelegten CAD-Zeichnungsebene, verknüpft ihn mit einem entsprechenden Text und ordnet diesem Punkt-Textelement das vereinbarte Farbattribut zu. Werden weitere Referenz- oder Meßpunkte erzeugt, wird die zugehörige Punktnummer jeweils automatisch um eins erhöht. Die Kommandoprozedur bietet dem Bediener ferner die Möglichkeit, bereits erzeugte Meß- bzw. Referenzpunkte zu löschen oder auch die bestehende Punktnumerierung zu ändern. Mit Hilfe dieser menügeführten Kommandoprozedur kann die Festlegung der Theodolitzzielpunkte am CAD-Modell auch von einem Bediener mit geringer Systemkenntnis durchgeführt werden.

Das für die Vermessung überarbeitete CAD-Modell wird dann vom IGES-Präprozessor des CAD-Systems bedeutungserhaltend abgebildet auf das neutrale IGES-Format. An-

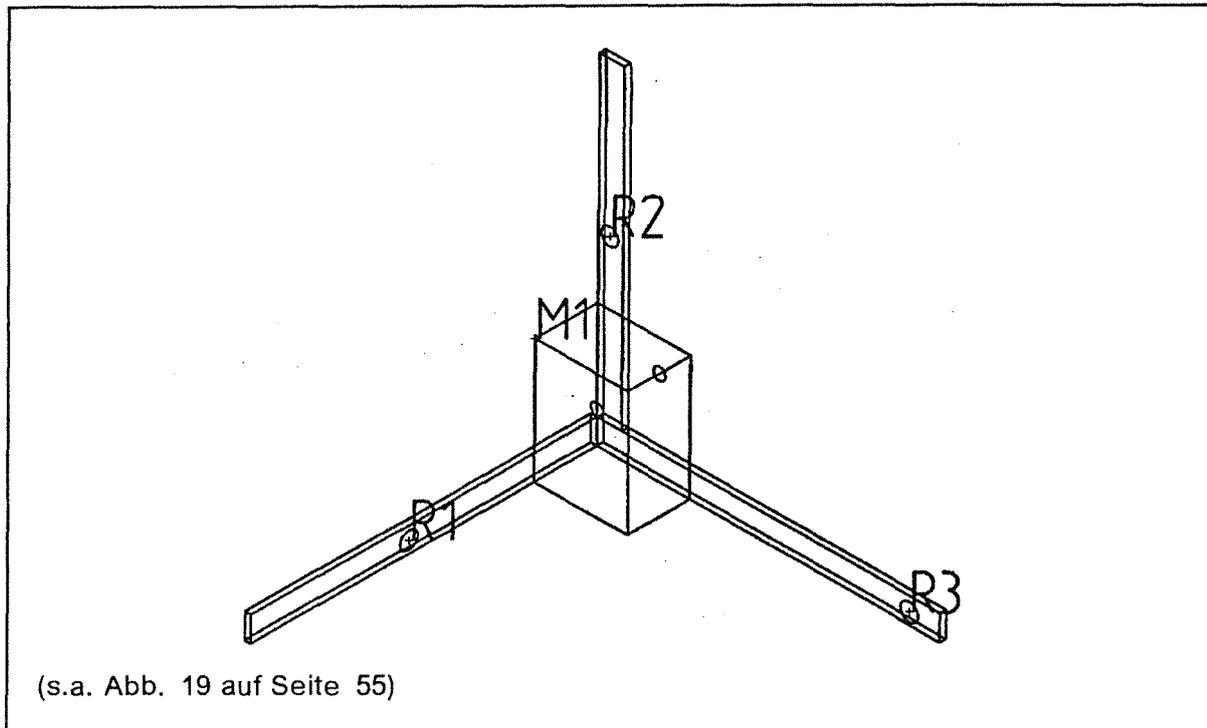


Abbildung 16. CAD-Modell mit markierten Meß- und Referenzpunkten

schließlich wird die IGES-Datei physikalisch auf den GMS-Rechner (INTEL) übertragen und vom IGES-Postprozessor des GMS-System weiter verarbeitet.

4.4 IGES-Postprozessor des GMS-Systems

Der im Rahmen dieser Arbeit erstellte Postprozessor des GMS-Systems /53/ liest die vom Präprozessor des CAD-Systems erzeugte IGES-Datei - im folgenden kurz CAD-IGES-Datei genannt - und erzeugt die beiden Eingabedateien (Zielpunkte, Geometrie) für die Vermessung mit dem GMS-System (s. Abb. 17 auf Seite 46). Aufgrund eines u.U. fehlerhaften Präprozessors oder physikalischer Übertragungsfehler beim Datentransfer kann eine IGES-Datei fehlerhaft sein. Deshalb führt der GMS-Postprozessor nach dem Einlesen der IGES-Datei zuerst eine umfangreiche Datenanalyse /58/ durch:

1. Lexikalische Analyse

Bei der lexikalischen Analyse wird das Format der IGES-Datei überprüft:

- Enthält die IGES-Datei ausschließlich ASCII-Zeichen (80 Zeichen pro Zeile)?
- Entsprechen die aufgeführten Parameter dem spezifizierten IGES-Datenformat?
- Sind die Feldeinträge in der DE- und T-Section rechtsbündig eingetragen und nach links durch Leerzeichen aufgefüllt?

2. Syntaktische Analyse

Die syntaktische Analyse überprüft die durch IGES vorgegebene Satzstruktur:

- Reihenfolge der IGES-Abschnitte (S-Section vor G-Section, etc.)
- aufsteigende Numerierung der IGES-Sätze innerhalb eines Abschnitts
- Reihenfolge der Parameter in der G- und PD-Section
- Reihenfolge der Feldeinträge in der DE- und T-Section

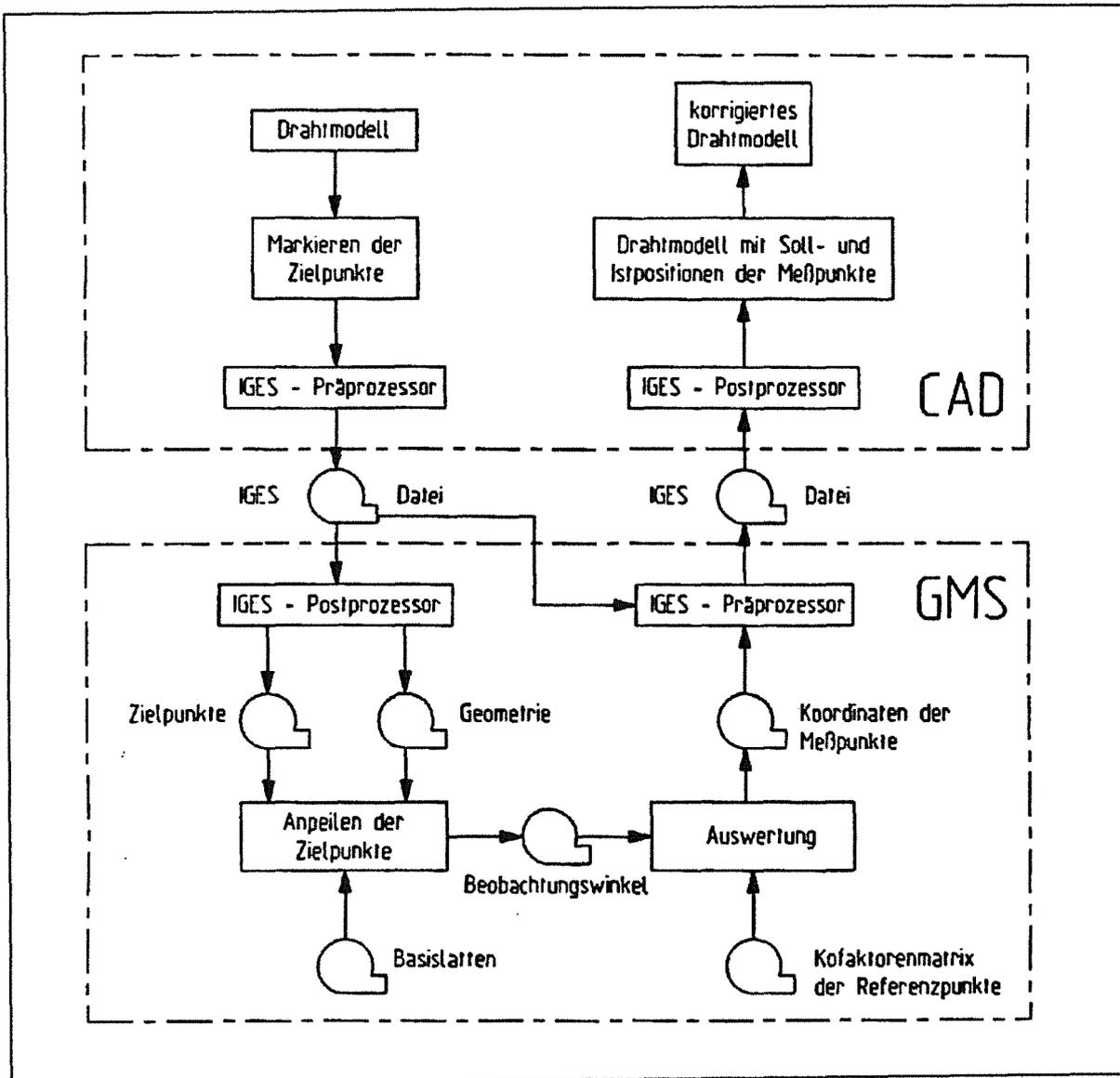


Abbildung 17. Datenfluß CAD → GMS → CAD

3. Semantische Analyse

Die Wort- und Satzbedeutung wird in der semantischen Analyse überprüft:

- Wortbedeutung
 - Ist die angegebene Maßeinheit 'mm', 'cm' oder 'm' (s. Parameter 14 und 15 in Tabelle 3 auf Seite 42)?
 - Ist die Bitanzahl zur Darstellung einer Real- oder Integerzahl (s. Parameter 7 - 11, Tabelle 3 auf Seite 42) in der IGES-Datei größer als im GMS-Rechner?
 - Enthält die IGES-Datei Elemente, die der GMS-Postprozessor nicht interpretieren kann (s. Tabelle 6 auf Seite 97)?
- Satzbedeutung
 - Sind in den Feldern der DE-Section die elementspezifischen Wertekombinationen eingetragen (s. Tabelle 6 auf Seite 97)?
 - Entsprechen die PD-Sätze der elementtypabhängigen Struktur (s. Tabelle 7 auf Seite 98 - Tabelle 15 auf Seite 101)?

- Sind die Parameter explizit aufgeführt? Ist dies nicht der Fall, werden den Parametern die Standardwerte zugewiesen. Ist für einen Parameter, der nicht explizit aufgeführt wird, kein Standardwert vorgesehen, wird der Postprozessorlauf mit entsprechender Fehlermeldung abgebrochen.
- Sind die in der T-Section eingetragenen Prüfsummen identisch mit der Zeilenanzahl in den einzelnen Abschnitten?

Wird bei der Analyse der IGES-Datei ein Fehler festgestellt, schreibt der Postprozessor eine entsprechende Nachricht auf den Bildschirm. Abhängig von der Art des erkannten Fehlers kann dieser zum kontrollierten Abbruch des Postprozessorprogramms führen. Enthält die IGES-Datei eine Maßeinheit, die das GMS-Auswerteprogramm nicht bearbeiten kann, ist es sinnlos, GMS-Eingabedateien zu erstellen und der Postprozessorlauf wird abgebrochen. Enthält das IGES-File aber z.B. ein Geometrieelement, das der Postprozessor nicht interpretieren und umsetzen kann (z.B. Kegelschnitte), wird nur eine entsprechende Fehlermeldung erzeugt und das unbekannte Element wird überlesen. Die GMS-Vermessung wird dadurch nur insofern beeinträchtigt, daß dieses Element in der bedienerunterstützenden Graphik (s. Kap. 5.0) nicht dargestellt werden kann.

In der jetzigen Ausbaustufe kann der IGES-Postprozessor des GMS-Prototypen acht IGES-Elemente interpretieren. Die zulässigen DE-Parameter für diese Elemente sind in der Tabelle 6 auf Seite 97 eingetragen. Die Bedeutung der PD-Parameter dieser Elemente sind in Tabelle 7 auf Seite 98 - Tabelle 15 auf Seite 101 erklärt. Die Koordinatenangaben in den Parameter-Datensätzen beziehen sich jeweils auf einen elementspezifischen Definitionsraum x_i , y_i , z_i . Die exakte Lage der Elemente im xyz-Modellraum wird durch den Bezug auf Transformationsmatrizen hergestellt (Parameter 7 in Tabelle 4 auf Seite 43). Wird einem Element keine Transformationsmatrix zugewiesen (DE-Parameter 7 = 0), ist der elementspezifische Definitionsraum identisch mit dem festen Modellraum. Die IGES-Elemente, die der Postprozessor des GMS-Prototypen derzeit verarbeiten und interpretieren kann, sind in der nachfolgenden Liste beschrieben:

1. Geometrie-Elemente

- **Punkt** (point)
Das Element Punkt wird durch ein Koordinatentripel beschrieben (s. Tabelle 7 auf Seite 98).
- **Gerade** (line)
Eine Gerade wird in IGES durch ihren Start- und Endpunkt definiert (s. Tabelle 8 auf Seite 98).
- **Kreisbogen** (circular arc)
Im PD-Satz eines Kreisbogens (Elementtyp 100) werden die Koordinaten des Kreismittelpunkts, des Start- und des Endpunkts angegeben (s. Tabelle 9 auf Seite 99). Bei einem Vollkreis sind die Start- und Endpunktkoordinaten identisch. Die z_i -Achse des Kreisbogenmodellraums steht definitionsgemäß senkrecht auf der Kreisebene und deshalb haben die drei angegebenen Punkte die gleiche z_i -Koordinate.
- **Zusammengesetzte Kurve** (composite curve)
Das Element Zusammengesetzte Kurve (Elementtyp 102) ist ein abhängiges Element und verknüpft die aufgeführten Geometrieelemente zu einer logischen Einheit (s. Tabelle 10 auf Seite 99). Da der IGES-Postprozessor des GMS-Prototypen nur die geometrischen Grundelemente Linie und Kreisbogen verarbei-

ten und umsetzen kann, darf die Zusammengesetzte Kurve nur aus diesen beiden Elementen aufgebaut sein.

- **Transformationsmatrix** (transformation matrix)

Durch eine Translation und eine Rotation wird ein Element aus seinem elementspezifischen Definitionsraum (x_t, y_t, z_t) in den festen Modellraum (x, y, z) transformiert. Die PD-Parameter t_1, t_2, t_3 eines Transformationsmatrixelements bilden den Translationsvektor und die Elemente r_{11}, \dots, r_{33} sind Koeffizienten einer Rotationsmatrix (s. Tabelle 11 auf Seite 100):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad [4.4.1]$$

Mit dem DE-Parameter 7 kann einem IGES-Element ein Transformationsmatrixelement zugewiesen werden. Ist der Parameter größer als Null, so entspricht dieser Wert der Sequenznummer des ersten DE-Satzes eines Transformationsmatrixelements und die Koordinaten müssen in den Modellraum transformiert werden.

2. Zeichnungselemente

- **Text** (general note)

Neben dem eigentlichen Textinhalt wird beim IGES-Element Text (Elementtyp 212) auch das Layout und die Position des Textes definiert (s. Tabelle 12 auf Seite 100). Der Definitionsraum des Textes ist so orientiert, daß die z_t -Achse senkrecht auf der Textebene steht.

3. Strukturelemente

- **Teilbild** (subfigure)

Wird ein Ausschnitt eines Modells mehrfach benötigt, kann dieser in einem Teilbildelement (Elementtyp 308) einmal definiert werden (s. Tabelle 13 auf Seite 101). Das Teilbildelement kann sowohl Geometrie-, Zeichnungs- als auch Strukturelemente enthalten. Der IGES-Postprozessor kann aber nur Teilbildelemente bearbeiten, die ausschließlich auf Elemente verweisen, die der IGES-Postprozessor des GMS-Systems auch interpretieren kann. Die im Teilbild zusammengefaßten Elemente können selbst wieder Teilbildelemente sein. Ein Teilbild kann aber nur solche Teilbildelemente referenzieren, die eine kleinere Hierarchiestufe aufweisen. Die Hierarchie des Teilbildes wird durch den zweiten PD-Parameter gekennzeichnet. Ist dieser Parameter Null, kann dieses Teilbild auf keine anderen Teilbildelemente verweisen - es kann aber von allen Teilbildelementen referenziert werden, deren Hierarchiestufe größer als Null ist.

- **Beziehung** (associativity)

Mit dem Element Beziehung (Elementtyp 402) können verschiedene IGES-Elemente zu einer logischen Einheit zusammengefaßt werden (s. Tabelle 14 auf Seite 101). Die zur Kennzeichnung der Zielpunkte verwendete Punkt-Text-Relation wird im IGES-File mit dem Element Beziehung beschrieben (s. Tabelle 15 auf Seite 101).

Nach der Analyse der IGES-Datei erstellt der GMS-Postprozessor zwei Eingabedateien für die Vermessung. In der Datei 'Zielpunkte' sind der Name, die Maßeinheit, die Anzahl und die Koordinaten der Meß- und Referenzpunkte in einem festgelegten Format einge-

tragen (s. Anhang F.2). Zum Aufbau der bedienerunterstützenden Graphik sind in der zweiten Datei die Geometriedaten des Vermessungsobjekts enthalten (s. Anhang F.4). Der Postprozessor des GMS-Prototypen ist bisher bei der Umsetzung der Drahtmodellgeometrie auf die Elemente Linie, Kreisbogen und zusammengesetzte Kurve beschränkt. Die Einträge in der Geometriedatei sind für diese Elemente in der folgenden Liste erläutert:

- Der Datensatz einer **Linie** besteht aus drei Zeilen. Zur Kennzeichnung des Elements ist in der ersten Zeile der Buchstabe 'L' eingetragen. Die zweite Zeile enthält die Koordinaten des Startpunkts der Linie und das erste Zeichen ist für den Kennbuchstaben 'S' (Startpunkt) reserviert. Die Position des Endpunkts der Linie (Kennbuchstabe 'E') wird in der dritten Zeile aufgeführt.
- Zur Beschreibung eines **Kreisbogens** werden in der Geometrie-Datei fünf Zeilen benötigt. Die Kopfzeile besteht nur aus dem Kennbuchstaben 'K'. Die Position des Kreismittelpunkts ('M') wird in der zweiten Zeile beschrieben. Die Startpunktkoordinaten ('S') sind in der dritten und die Endpunktkoordinaten ('E') in der fünften Zeile eingetragen. Um auch einen Kreis bzw. Halbkreis im Raum eindeutig beschreiben zu können, muß noch die Position eines weiteren auf dem Kreisbogen liegenden Punkts angegeben werden (s. Anhang H). Die Position dieses berechneten Hilfspunkts ('H') steht in der vierten Zeile des Datensatzes.
- Mit dem Element **Zusammengesetzte Kurve** können Linien und/oder Kreisbögen logisch zusammengefaßt werden. Die Kopfzeile enthält den Kennbuchstaben 'Z' und die Anzahl n der zusammengefaßten Geometrieelemente (Linie, Kreisbogen) wird durch die nachfolgende Integerzahl angegeben. Im Anschluß an die Kopfzeile sind diese n Geometrieelemente, entsprechend den oben beschriebenen Spezifikationen, in die Geometriedatei eingetragen.

Gestützt auf diese vom Postprozessor erstellten Dateien werden dann die Zielpunkte mit dem GMS-System beobachtet (s. Kap. 3.3).

4.5 IGES-Präprozessor des GMS-Systems

Aus den Beobachtungswinkeln werden die aktuellen Istpositionen der Meßpunkte berechnet (s. Kap. 3.4) und in eine Meßergebnisdatei geschrieben (s. Anhang I.2). Diese Datei und die vom CAD-System bereitgestellte CAD-IGES-Datei (s. Anhang F.1) sind die beiden Eingabedateien für den IGES-Präprozessor des GMS-Systems (s.a. Abb. 17 auf Seite 46). Aus der Meßergebnisdatei liest der im Rahmen dieser Arbeit implementierte Präprozessor

- den Namen des Meßobjekts,
- das Datum der Vermessung,
- die Anzahl der Meßpunkte
- und die errechneten Istkoordinaten der Meßpunkte.

Nach dem Einlesen der CAD-IGES-Datei wird zunächst geprüft, ob der Senderproduktname (s. Parameter 3, Tabelle 3 auf Seite 42) identisch ist mit dem Objektnamen in der Meßergebnisdatei. Außerdem wird überprüft, ob in der CAD-IGES-Datei genausoviele Meßpunkte eingetragen sind wie in der Meßergebnisdatei. Wird bei dieser Prüfung ein

Fehler festgestellt, wird das Präprozessorprogramm mit entsprechender Fehlermeldung abgebrochen. Auf eine umfangreichere Dateianalyse wird beim GMS-Präprozessor verzichtet, da diese CAD-IGES-Datei bereits vom IGES-Postprozessor des GMS-Systems detailliert überprüft wurde.

Sind keine Fehler festgestellt worden, sucht der Präprozessor in der DE-Section der CAD-IGES-Datei alle Elemente mit der Typnummer 402, die auf der Zeichnungsebene 7777 eingetragen sind. Diese Elemente verbinden die Sollposition der Meßpunkte mit dem zugehörigen Text. In den PD-Sätzen dieser Beziehungselemente sind jeweils ein DE-Pointer auf einen Punkt und auf ein zugeordnetes Textelement eingetragen (s. Tabelle 15 auf Seite 101). Aus dem DE-Satz der Textelemente werden die Nummern der zugehörigen PD-Sätze gelesen. Die in den PD-Sätzen dieser Textelemente aufgeführten ASCII-Zeichenketten beginnen alle mit dem Kennbuchstaben 'M', und die nachfolgende Zahl ist die jeweilige Nummer des Meßpunktes. Somit ist nun bekannt, welche IGES-Textelemente den einzelnen Meßpunkten zugeordnet sind.

Nach dem Lesen der beiden Eingabedateien erstellt der GMS-Präprozessor eine neue IGES-Datei, die im folgenden kurz GMS-IGES-Datei genannt wird. Diese IGES-Datei enthält sämtliche Elemente der vom CAD-System bereitgestellten CAD-IGES-Datei; zur Beschreibung der gemessenen Istpositionen werden pro Meßpunkt aber zusätzlich drei weitere IGES-Elemente hinzugefügt. Analog zu den Referenzpunkten und zu den Sollpositionen der Meßpunkte (s. Kap. 4.4), werden auch die GMS-Ergebnisse durch eine Punkt-Text-Relation dargestellt. Zur optischen Unterscheidung werden diese Punkte und die ihnen zugeordneten Texte in der Farbe grün gezeichnet. Ferner wurde für die Istpositionen der Meßpunkte willkürlich vereinbart, daß sie auf der CAD-Zeichnungsebene 7776 abgelegt werden sollen.

Die einzelnen Abschnitte der GMS-IGES-Datei sind folgendermaßen aufgebaut (s. Anhang I.3):

- Die **S-Section** der GMS-IGES-Datei enthält die komplette S-Section der CAD-GMS-Datei. Zur lesbaren Kennzeichnung, daß in dieser Datei zusätzlich GMS-Meßergebnisse eingetragen sind, wird in der S-Section direkt nach der Kopfzeile ein weiterer IGES-Satz hinzugefügt (s. 2. Satz der S-Section im Anhang I.3). In diesem IGES-Satz ist auch das Datum dokumentiert, an dem die GMS-Messung durchgeführt wurde. In der GMS-IGES-Datei ist die Anzahl der IGES-Sätze in der S-Section um eins höher als in der CAD-IGES-Datei.
- Die **G-Section** der GMS-IGES-Datei wird unverändert von der CAD-IGES-Datei übernommen.
- In die **DE-Section** der GMS-IGES-Datei werden zunächst sämtliche DE-Sätze der CAD-IGES-Datei übertragen. Anschließend werden pro Meßpunkt ein Text-, ein Punkt- und ein Beziehungselement in der DE-Section der GMS-IGES-Datei hinzugefügt:
 - Die DE-Parameter des neu hinzugefügten Textelements (Typ 212) sind, mit Ausnahme der Farbnummer (DE-Parameter 13), identisch mit den DE-Parametern des Textes, welcher der Sollposition des entsprechenden Meßpunktes zugeordnet ist (vgl. DE-Satz 91-92 mit DE-Satz 115-116 in Anhang I.3). Dadurch sind die beiden Textelemente, die der Soll- und der gemessenen Istposition eines Meßpunktes zugeordnet sind, geometrisch deckungsgleich und unterscheiden sich nur in der Farbe.

- Im DE-Eintrag des Punkts (Typ 116) wird diesem Element (s. DE-Satz 117-118 in Anhang I.3) ein neu zu erstellender PD-Eintrag zugeordnet (DE-Parameter 2). Dieser PD-Eintrag besteht aus einem einzelnen IGES-Satz (DE-Parameter 14). Durch die Zahl 7776 im fünften DE-Feld, wird der Punkt auf die vorgegebene CAD-Zeichnungsebene gelegt und über den DE-Parameter 13 wird dem Punkt die Farbe grün zugewiesen. Die DE-Parameter 6-8 werden auf den Wert 0 festgelegt, und die übrigen DE-Felder sind mit den Einträgen bei den vorgegebenen Meßpunkten (Ebene 7777) identisch.
- Durch ein Beziehungselement (Typ 402) wird die gemessene Istposition des Meßpunktes mit dem zugehörigen Textelement verknüpft. Im DE-Feld 2 wird auf den neu zu erstellenden PD-Eintrag verwiesen, der aus einem einzelnen IGES-Satz besteht (s. DE-Parameter 14). Beim Parameter für die Zeichnungsebene (DE-Parameter 5) ist der Wert 7776 eingetragen und die Farbnummer 3 (DE-Parameter 13) kennzeichnet die Farbe grün. Alle übrigen Feldeinträge sind identisch mit den DE-Parametern der CAD-IGES-Beziehungselemente, welche die Punkt-Text-Relation der Meßpunkte beschreiben.

Abhängig von der Anzahl N der Meßpunkte erhöht sich die Zahl der DE-Sätze in der GMS-IGES-Datei um $2 \times 3 \times N$ gegenüber der CAD-IGES-Datei.

- In die **PD-Section** der GMS-IGES-Datei werden zuerst die PD-Sätze der CAD-IGES-Datei komplett übertragen. Im Anschluß daran wird die PD-Section pro Meßpunkt um zwei zusätzliche PD-Sätze ergänzt (s. PD-Satz 68-69 im Anhang I.3):
 - Im PD-Satz des GMS-Meßpunktes werden nach der Typnummer 116 die gemessenen Istkoordinaten eingetragen. Die Parameter 5-7 (s. Tabelle 7 auf Seite 98) werden mit dem Wert 0 belegt. In der Spalte 72 des PD-Satzes wird rechtsbündig der Backpointer zum zugehörigen DE-Element eingetragen.
 - Im PD-Satz des Beziehungselements (Typ 402) wird ein Geometrie- (s. Tabelle 15 auf Seite 101 Parameter 2) mit einem Textelement (Parameter 4) verknüpft. Der PD-Parameter 3 zeigt auf den ersten DE-Satz des GMS-Punktelements und der fünfte PD-Eintrag steht für die DE-Satznummer des zugehörigen Textelements. Die Nummer vor dem Kennbuchstaben 'P' (Spalte 73) zeigt auf den ersten DE-Satz des Beziehungselements.

Für das neu eingetragene Textelement des GMS-Meßpunktes (s. DE-Satz 115-116 im Anhang I.3) muß kein neuer elementspezifischer PD-Satz erstellt werden, da in dessen DE-Felder nur auf PD-Einträge Bezug genommen wird, die bereits in der CAD-IGES-Datei vorhanden sind.

- In der **T-Section** wird für jeden IGES-Abschnitt die korrigierte Anzahl der IGES-Sätze eingetragen.

Die vom IGES-Präprozessor erstellte GMS-IGES-Datei wird physikalisch auf den CAD-Rechner übertragen. Der IGES-Postprozessor des CAD-Systems liest diese IGES-Datei und erzeugt daraus ein Drahtmodell in systemspezifischer Darstellung. Alle Geometrielemente des CAD-Modells, aus dem das CAD-IGES-File erzeugt wurde, sind auch in diesem neuen Drahtmodell unverändert enthalten. Für jeden Meßpunkt ist nun aber zusätzlich ein weiterer Punkt markiert, dessen Koordinaten identisch sind mit den Istkoordinaten, die vom GMS-System bestimmt wurden (s. Abb. 18 auf Seite 52).

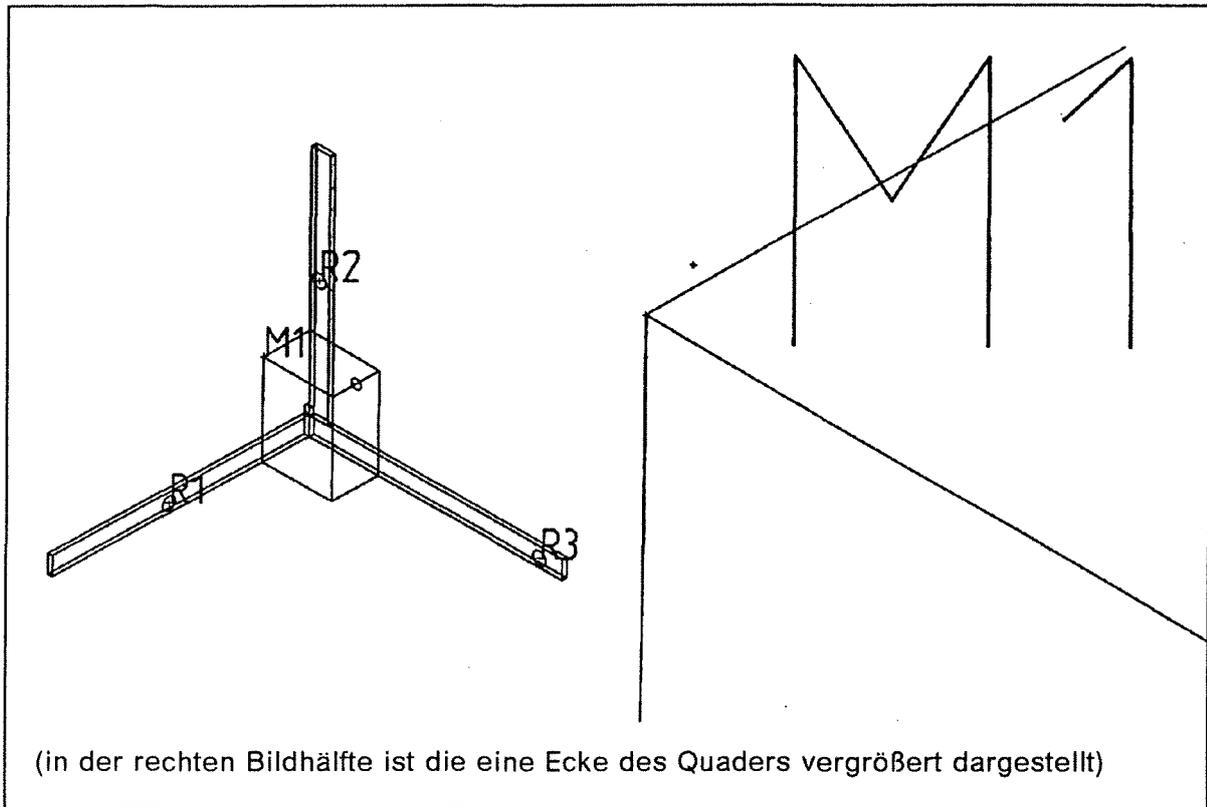


Abbildung 18. CAD-Modell mit dem GMS-Meßergebnis. Der zusätzliche Punkt kennzeichnet die gemessene Istposition des Meßpunktes

Gestützt auf die gemessenen Istpositionen kann die Modellgeometrie auf dem CAD-System korrigiert werden. In der bisherigen Ausbaustufe des GMS-Prototypsystems muß der Operateur diese Modellkorrekturen mit dem graphischen Editor des CAD-Systems manuell durchführen. Methoden und Strategien zur automatischen Korrektur sollen in einer nachfolgenden Arbeit entwickelt werden.

5.0 Bedienerunterstützende GMS-Graphik

Zur Unterstützung des Operateurs kann dem Videobild des Theodoliten eine bedienerunterstützende Graphik überlagert werden. Eine wesentliche Funktion der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Graphikunterstützung ist es, eine Drahtmodellgraphik des Meßobjekts in perspektivischer Darstellung dem realen Videobild zu überlagern. Neben der reinen Objektgeometrie können in der Graphik auch die Positionen der vorgegebenen Zielpunkte speziell gekennzeichnet werden. An der graphischen Darstellung kann der Operateur dann anschaulich erkennen, welche Punkte angezielt werden sollen.

Neben dieser Graphiküberlagerung sind im erstellten GMS-Graphikprogramm auch Funktionen implementiert, mit denen das dargestellte Kamerabild verändert werden kann (mausgesteuerte Kontrast- und Helligkeitsregulierung, Zoom eines Bildausschnitts). Als weitere Ergänzung bietet das Graphikprogramm auch die Möglichkeit, einen anzuzielenden Punkt im Kamerabild mit einem mausgesteuerten Cursor zu markieren, und der Theodolit wird dann automatisch auf diesen Punkt ausgerichtet.

Zur Realisierung der Graphikunterstützung wird bisher ein separater Rechner benutzt, der mit einer entsprechenden Bildverarbeitungskarte (Auflösung: 512 × 512 Pixel) ausgerüstet ist (s. Kap. 3.0). Die eingesetzte Bildverarbeitungskarte verwendet für jedes Pixel eine Speichertiefe von 12 Bit. Die ersten acht Bits werden für die Digitalisierung des analogen Kamerasignals verwendet (256 Graustufen). Die vier oberen Bits sind frei editierbar und stehen für die Graphiküberlagerung zur Verfügung. Dadurch, daß Kamerabild und überlagerte Graphik unterschiedliche Bitebenen belegen, geht auch bei Graphikeinblendungen keine Information des Kamerabildes verloren. Die Graphiküberlagerung und das Kamerabild können deshalb unabhängig voneinander jeweils ein- und ausgeblendet werden (s. Anhang J.1, Taste 'a', 'e', 'o'). Auch der geplante Einsatz digitaler Bildverarbeitungstechniken für die Zielpunkterkennung wird durch die überlagerte Graphikunterstützung nicht beeinträchtigt, da für die Analyse des Kamerabildes nur die unteren acht Bits verwendet werden.

Die Information über die Objektgeometrie und die Zielpunktpositionen erhält das GMS-Graphikprogramm aus den Dateien die vom Postprozessor erzeugt wurden (s. Anhang F.2 und F.4). Da auf diese Information während des Graphikprogramms häufig zugegriffen werden muß, erstellt das GMS-Graphikprogramm daraus mehrere Dateien in einem speichereffizienteren Format. Das Aufbereiten der Modelldateien durch das GMS-Graphikprogramm ist in Kap. 5.1 detailliert erläutert.

Die überlagerte graphische Darstellung des Vermessungsobjekts sollte möglichst mit dem Kamerabild deckungsgleich sein. Voraussetzung für diese Kongruenz ist, daß die perspektivische Abbildungsgeometrie der Kamera bekannt ist. Die perspektivische Transformation muß dann genauso auf das 3D-Drahtmodell angewendet werden. Die dazu erforderlichen Berechnungen sind in Kap. 5.2 dargestellt.

Mit einer RS232-Schnittstelle ist der Graphikrechner mit dem INTEL-Steuerrechner verbunden. Über diese serielle Datenleitung können die implementierten Graphikfunktionen vom GMS-Steuerrechner aus aufgerufen werden. Eine Beschreibung über die implementierten Graphikbefehle und über die Steuerung des Graphikprogramms enthält Kap. 5.3.

5.1 Aufbereiten der Modelldateien

Die Modellgeometrie und die vorgegebenen Zielpunktpositionen erhält das GMS-Graphikprogramm aus den vom IGES-Postprozessor erstellten Dateien (Zielpunkt- und Geometriedatei, s. Anhang F.2 und F.4). Diese beiden Dateien müssen zuerst physikalisch vom Steuer- auf den Graphikrechner übertragen werden. Für die Dateinamen wurde vereinbart, daß beide Dateien den selben Namen (Prefix) haben, der vom Operateur möglichst sinnvoll bestimmt werden kann. Zur Unterscheidung ist die Zielpunktdatei mit der Erweiterung (Suffix) 'MES' und die Geometriedatei mit 'GEO' gekennzeichnet. Die Dateien werden in ein vorgegebenes Unterverzeichnis auf die Festplatte des Graphikrechners (HP-Vectra) kopiert. Nach dem Programmstart liest das erstellte GMS-Graphikprogramm die Namen der Dateien aus diesem Unterverzeichnis. Die Liste der verfügbaren GMS-Modelle wird auf dem Bildschirm eingeblendet, und der Operateur wählt daraus den Modellnamen des aktuell zu vermessenden Objekts.

Für eine schnellere Bearbeitung werden die Geometriedaten vom GMS-Graphikprogramm in ein speichereffizienteres Dateiformat umgesetzt, da diese Daten während des Programms häufig gelesen werden müssen. Bei der Umsetzung werden vier neue Dateien erstellt, die den gleichen Namen haben wie die Zielpunkt- bzw. Geometriedatei. Zur Unterscheidung haben die Dateien aber die unterschiedlichen Erweiterungen 'MSS', 'REF', 'LIN' und 'KRS'. In der Datei mit der Erweiterung 'MSS' sind die Meßpunkte und in der Datei mit dem Suffix 'REF' sind die Referenzpunktpositionen eingetragen. Die Koordinatenwerte sind fortlaufend - nur durch Kommata getrennt - aufgeführt, wobei für jeden Punkt eine separate Zeile verwendet wird. In der Liniendatei (Suffix: 'LIN') werden pro Zeile sechs Koordinaten angegeben; das erste Koordinatentripel beschreibt den Startpunkt und das zweite den Endpunkt der Geraden.

Bei der Umsetzung der Kreisgeometrien werden die Kreise bzw. Kreisbögen durch n Liniensegmente approximiert (s. Anhang K). Die Anzahl n wird durch den letzten Eintrag in der Parameterdatei der GMS-Graphik festgelegt (s. Anhang L). Die von uns durchgeführten Tests haben gezeigt, daß für den Wert $n=36$ die Kreisbögen - in der Regel - in der Bildschirmdarstellung rund erscheinen. Die errechneten Eckpunkte dieser Linienzüge sind in der Kreisdatei (Suffix: 'KRS') abgespeichert. Für jeden Kreis bzw. Kreisbogen sind jeweils in einer Zeile fortlaufend $n+1$ Koordinatentripel eingetragen.

Das Aufbereiten der Modelldaten muß für jedes Vermessungsobjekt aber nur einmalig durchgeführt werden. Beim nächsten Aufruf des Graphikprogramms mit dem gleichen Modellnamen erkennt das Programm, daß die umgesetzten Dateien (Suffix: 'MSS', 'REF', 'LIN' und 'KRS') mit diesem Namen bereits vorhanden sind, und es kann auf die Konvertierung verzichtet werden.

Für die Modellierung des Vermessungsobjekts kann sowohl der IGES-Postprozessor als auch das Graphikprogramm des GMS-Systems bisher nur Kreise, Kreisbögen und Linien verarbeiten. Sollte der IGES-Postprozessor auf zusätzliche Geometrielemente erweitert werden, muß das GMS-Graphikprogramm lediglich um jeweils eine Umsetzungsprozedur ergänzt werden, welche die neuen Elemente durch Liniensegmente approximiert. Die Berechnungen für die perspektivische Darstellung können somit unverändert weiterverwendet werden, da ja - wie schon auch bisher - nur für Linien eine perspektivische Transformation durchgeführt werden muß.

5.2 Perspektivische Transformation der Drahtmodellgraphik

Damit das Videobild und die überlagerte Drahtmodellgraphik deckungsgleich sind, muß die perspektivische Abbildung der Kamera auch auf das 3D-Drahtmodell angewendet werden. Zur Berechnung der perspektivischen Transformation (3D-Koordinaten \rightarrow Bildschirmkoordinaten) wird die optische Abbildung der Kamera als Zentralprojektion (Lochkameramodell) idealisiert /59/, /60/. Die speziellen optischen Abbildungsparameter der Theodolitkamera sind in Kap. 5.2.1 erläutert. Obwohl bei dieser vereinfachten Modellierung keinerlei Abbildungsfehler (Linsenfehler, Inhomogenitäten des CCD-Chips, ...) berücksichtigt werden, ist die damit erreichte Überdeckung zwischen Videobild und Graphik (s. Abb. 19) für die Bedienerunterstützung vollauf ausreichend.

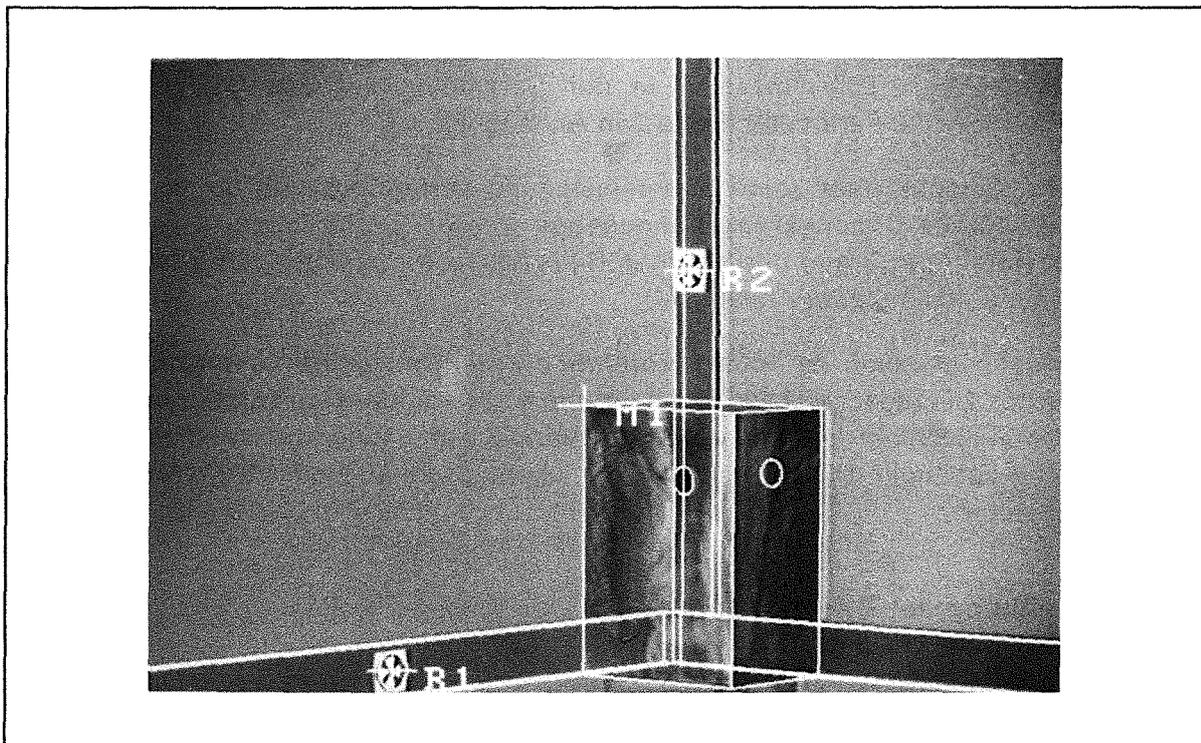


Abbildung 19. Modell mit Markierung aller Zielpunkte. Ist der Theodolitstandpunkt bekannt und das Instrument auf den Zielpunkt ausgerichtet, so ist die überlagerte Graphik deckungsgleich dem realen Kamerabild.

Ist der Standpunkt, die Zielrichtung und die Abbildungsgeometrie der Kamera bekannt, können aus den vorgegebenen 3D-Koordinaten deren entsprechende Bildkoordinaten bestimmt werden. Diese Berechnungen sind in Kap. 5.2.2 dargestellt.

5.2.1 Zentralprojektion der Theodolitkamera

Charakteristische Größen einer Zentralprojektion sind die Position des Projektionszentrums, die Blickrichtung und der Öffnungswinkel der Optik. Da diese Werte für das Weitwinkel- und das Meßsehfeld unterschiedlich sind, muß bei der Bestimmung der perspektivischen Transformationsparameter die Stellung des Bildwechsellprismas (s. Abb. 9 auf Seite 17) mit berücksichtigt werden.

Im Meßsehfeld (Fernrohroptik) ist die Position des Projektionszentrums identisch mit den Theodolitkoordinaten (x_T, y_T, z_T) , und die Blickrichtung wird durch die Koordinaten

des aktuellen Zielpunktes (x_z, y_z, z_z) festgelegt. Da aber das Zentrum des CCD-Chips nicht exakt in der optischen Achse des Meßsehfeldes justiert ist, wird auch das Fadenkreuz des Theodoliten nicht exakt auf das Chipzentrum projiziert. Diese Versatzwerte (Pixel) sind in der Parameterdatei der GMS-Graphik eingetragen (s. Parameter 20-23 im Anhang L) und müssen bei der Bestimmung des Zielpunktes im Meßsehfeld (CCD-Chipzentrum \neq Theodolitziel) berücksichtigt werden.

Aufgrund der panfokalen Fernrohroptik (s. Kap. 3.1.2) ist der Öffnungswinkel im Meßsehfeld nicht konstant und von der Objektentfernung abhängig. Im Anhang M ist der Zusammenhang zwischen der Größe des erfaßten Bildausschnitts (Weltfenster) und der Zielentfernung dargestellt.

Die Weitwinkeloptik ist auf dem Theodolitfernrohr installiert (s. Abb. 9 auf Seite 17). Die Parallaxe zwischen der Weitwinkel- und der Fernrohroptik ist in der Abb. 11 auf Seite 18 dargestellt. Die Versatzwerte zwischen den beiden Projektionszentren ($\Delta \hat{z} = -33,5 \text{ mm}$, $\Delta \hat{x} = 83,5 \text{ mm}$) sind in der Parameterdatei des GMS-Graphikprogramms eingetragen (s. Parameter 1 und 2 in Anhang L).

Da die Weitwinkeloptik über keine Zoomeinstellung verfügt, können für den erfaßten Bildbereich konstante Öffnungswinkel angegeben werden (s. Parameter 4 und 5 in Anhang L). Die Höhe bzw. Breite des erfaßten Bildausschnitts ist somit nur linear von der Objektentfernung abhängig (s. Anhang M).

Wie bereits oben erwähnt, ist beim Fernrohrbild der Pixelversatz zwischen dem Bildzentrum und der Theodolitzielachse konstant und nicht von der Objektentfernung abhängig. Im Weitwinkelsehfeld hingegen sind die Versatzwerte aufgrund der Parallaxe von der Entfernung abhängig. Die Berechnung der abstandsabhängigen Versatzwerte ist im Anhang N erläutert.

5.2.2 Berechnung der Bildkoordinaten

Nach dem Aufbereiten der Modelldaten (s. Kap. 5.1) ist die 3D-Drahtmodellgeometrie nur noch aus Linien aufgebaut. Zur graphischen Darstellung der Objektgeometrien müssen deshalb nur Linien perspektivisch transformiert werden. Da eine 3D-Linie durch eine Zentralprojektion auch in der 2D-Bildschirmdarstellung wieder auf eine Linie oder im Spezialfall auf einen Punkt abgebildet wird, müssen nur die Bildkoordinaten der Linienendpunkte bestimmt werden.

Um die Berechnungen für die perspektivische Abbildung zu vereinfachen, werden zuerst sämtliche Endpunkte der Drahtmodelllinien in ein Kamerakoordinatensystem $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ transformiert (s. Abb. 20 auf Seite 57). Der Ursprung dieses Koordinatensystems liegt im Kamerazielpunkt, und die \hat{z} -Achse zeigt in Richtung des Projektionszentrums. Aufgrund der Horizontierung des Theodoliten ist die \hat{x} - \hat{z} -Ebene parallel zur z-Achse. Die Richtung der \hat{x} -Achse ist von der Fernrohrlage des Theodoliten (s. Kap. 3.3.2) abhängig (Fernrohrlage I: \hat{x} -Achse zeigt nach oben, Fernrohrlage II: \hat{x} -Achse zeigt nach unten). Die Orientierung des Koordinatensystems ist als rechtsdrehend vereinbart, und damit ist dessen Lage eindeutig festgelegt. Alle weiteren Betrachtungen zur Bestimmung der Bildkoordinaten werden in diesem Kamerakoordinatensystem durchgeführt.

Ein zentraler Punkt bei der Abbildungstransformation ist die Untersuchung, ob eine Linie bzw. ein Teil der Linie außerhalb des Darstellungsbereichs der Kameraoptik liegt. Für jede darzustellende Linie wird zuerst überprüft, ob diese komplett hinter dem Pro-

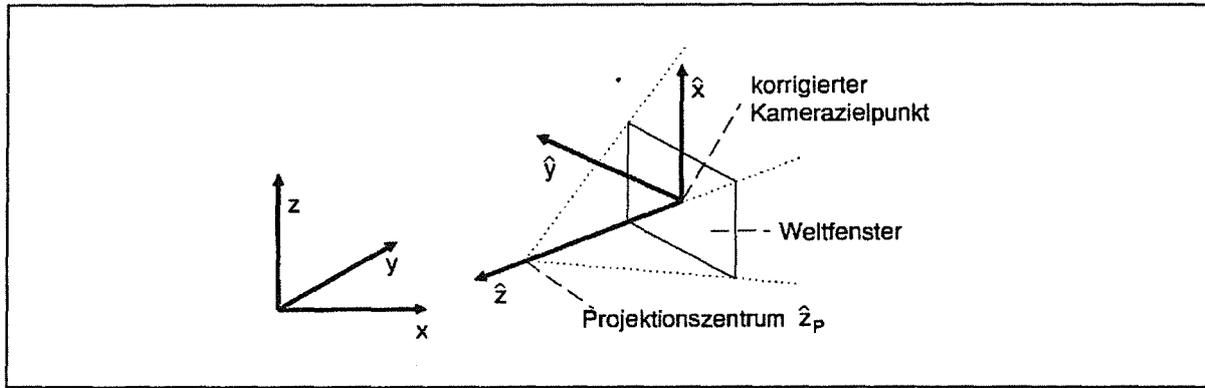


Abbildung 20. Das Kamerakoordinatensystem \hat{x} , \hat{y} , \hat{z}

jektionszentrum liegt. Das ist der Fall, wenn die \hat{z} -Koordinaten sowohl des Start- als auch des Endpunktes größer als \hat{z}_P sind (s. Abb. 21 auf Seite 57). Diese Linie ist somit komplett außerhalb des von der Kameraoptik erfaßten Bereichs. Liegt die Linie nur teilweise hinter dem Projektionszentrum, ist die \hat{z} -Koordinate des Start- oder des Endpunktes größer als \hat{z}_P . In diesem Fall muß dann der Durchstoßpunkt der Linie mit der Brennpunktebene (parallel zur \hat{x} - \hat{y} -Ebene durch das Projektionszentrum) berechnet werden. Bei der anschließenden Abbildungstransformation wird nur noch der Teil betrachtet, der sich vor dem Projektionszentrum befindet.

Um zusätzlich auch weitere Einschränkungen des optischen Darstellungsbereichs (z.B. Fokusbereich, maximale Sicht- bzw. Zielweite) in der Modellgraphik berücksichtigen zu können, ist im GMS-Graphikprogramm auch eine vordere und hintere Sichtbarkeitsgrenze (Clippinggrenze) implementiert (s.a. Abb. 21). Diese Beschränkungen können optional gesetzt werden (s. Parameter 26 und 27 im Anhang L), und die angegeben

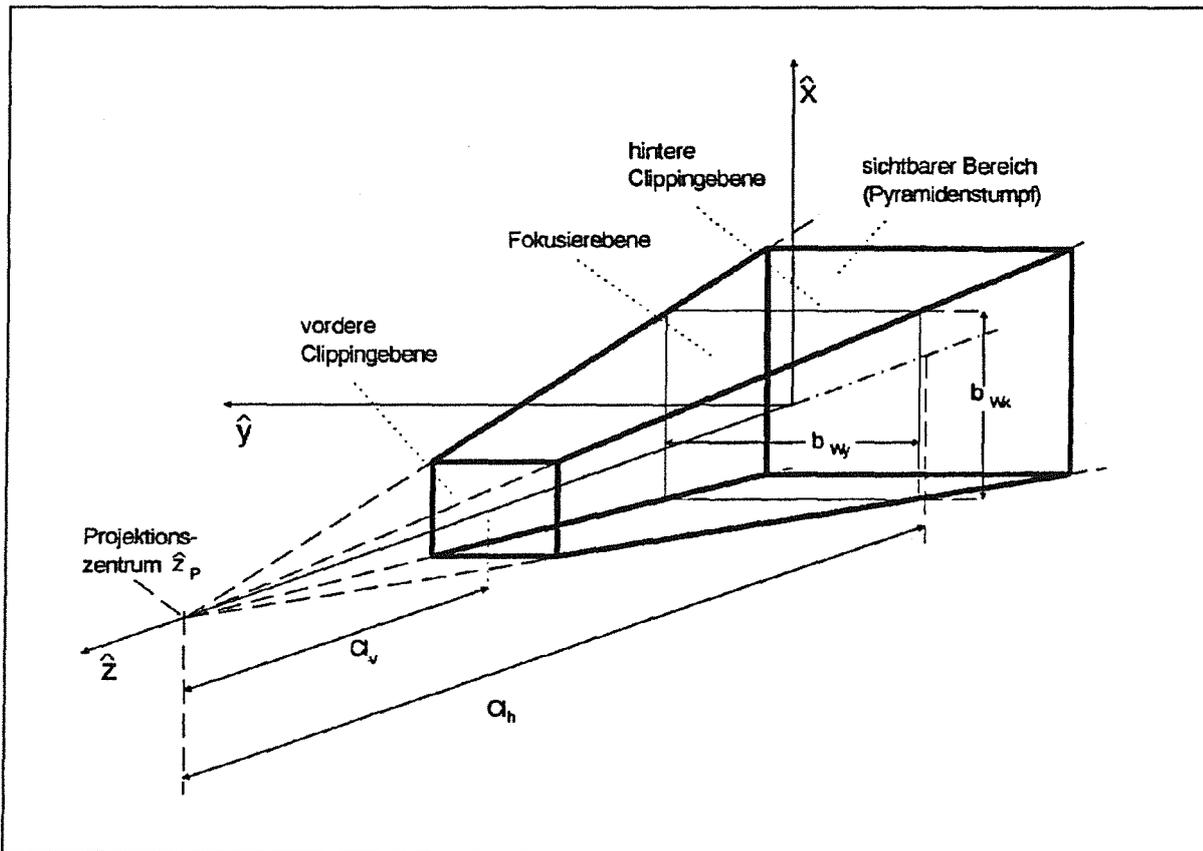


Abbildung 21. Der Darstellungsbereich der GMS-Graphik

Werte (s. Parameter 17 und 18 im Anhang L) entsprechen dem Abstand zum Projektionszentrum. Ist das vordere bzw. das hintere Clipping aktiviert, kann auch hier die Sichtbarkeit an den \hat{z} -Koordinaten der Linienendpunkte überprüft werden. Sind beide \hat{z} -Koordinaten größer als $\hat{z}_p - Cl_v$ bzw. kleiner als $\hat{z}_p - Cl_h$, liegt die Linie komplett außerhalb des Darstellungsbereichs. Schneidet die Linie eine oder beide Clippingebenen, werden der bzw. die Durchstoßpunkt(e) berechnet und für die weiteren Berechnungen als Linienendpunkt(e) verwendet.

Hat die obige Überprüfung der \hat{z} -Koordinaten zum Ergebnis, daß eine Linie zumindest teilweise innerhalb des Darstellungsbereichs liegt, werden für die Linienend- bzw. Durchstoßpunkte eine Zentralprojektion durchgeführt. Der projizierte Punkt ist der Schnittpunkt der Projektionsgeraden mit der \hat{x} - \hat{y} -Ebene, wobei die Projektionsgerade durch das Projektionszentrum und den Linienendpunkt festgelegt ist (s. Abb. 22). Anhand der berechneten Schnittpunktkoordinaten $\hat{x}_s, \hat{y}_s, \hat{x}_E$ und \hat{y}_E wird anschließend überprüft, inwieweit die projizierte Linie ganz, teilweise oder garnicht auf dem Bild sichtbar ist. Wegen der begrenzten Öffnungswinkel wird nur der Bereich innerhalb des Weltfensters vom CCD-Chip erfaßt. Liegen beide projizierten Linienendpunkte außerhalb dieser Fensterfläche, muß noch überprüft werden, ob die Linie die Fenstergrenzen schneidet. Ist dies der Fall, müssen die Schnittpunkte berechnet werden und die Linie ist zwischen diesen beiden Punkten sichtbar. Schneidet die Linie die Bereichsgrenzen nicht, so liegt sie komplett außerhalb des Bildes. Auch für den Fall, daß ein Linienendpunkt innerhalb und der andere außerhalb der Fensterfläche liegt (s. Abb. 22), begrenzt der berechnete Schnittpunkt mit dem Fensterrand den dargestellten Linienbereich.

Liegt ein Linie ganz oder teilweise innerhalb des Darstellungsfensters, müssen die Koordinaten der projizierten Linienendpunkte bzw. deren Schnittpunkte mit den Fenstergrenzen in Pixelpositionen umgerechnet werden. Die Bildverarbeitungskarte des GMS-Systems /24/ hat sowohl horizontal als auch vertikal eine Auflösung von 512 Pixeln. Mit einer Dreisatzberechnung ($b_{wx} \sim 512$ Pixel; $b_{wy} \sim 512$ Pixel) können die Pixelpositionen der sichtbaren Linienendpunkte berechnet werden. Da aber nur ganzzahlige Pixelwerte belegt werden können, müssen die errechneten Werte noch auf- oder abgerundet werden. Für das Zeichnen der Linie zwischen den beiden errechneten Pixelwerten wird eine auf die Bildverarbeitungskarte abgestimmte Programmibliothek (ITEX) verwendet /61/. Durch einen Programmparameter kann die Farbe der Linie aus einer Palette von acht Farbtönen ausgewählt werden.

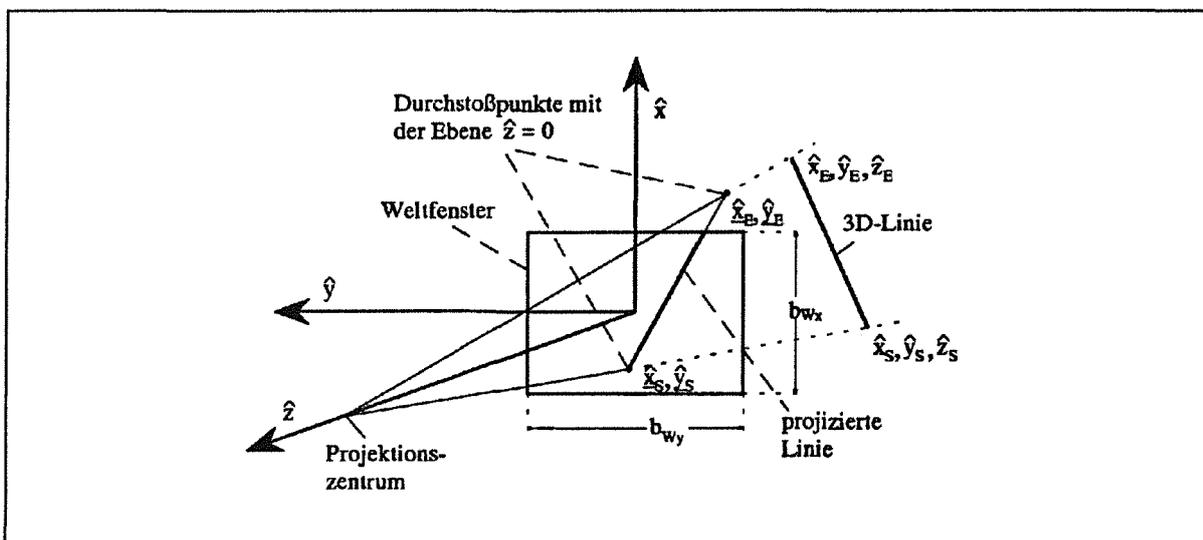


Abbildung 22. Die Zentralprojektion einer Linie

Sollen auch Zielpunkte in der Graphik gekennzeichnet werden, so müssen auch die 3D-Punktkoordinaten perspektivisch transformiert werden. Die dazu erforderlichen Berechnungen sind identisch mit den beschriebenen Transformationen der Linienendpunkte.

5.3 Ablauf und Aufbau des GMS-Graphikprogramms

Ist das GMS-Graphikprogramm gestartet muß zunächst der Modellname des Vermessungsobjekts angegeben werden. Nach der evtl. erforderlichen Datenumsetzung (s. Kap. 5.1) wartet das Graphikprogramm auf Befehle vom INTEL-Leitrechner. Der Wartezustand wird durch die zyklische Statusmeldung *'Nichts zu tun!'* am Bildschirm des Graphikrechners angezeigt. Erhält das Graphikprogramm über die RS232-Schnittstelle eine Befehlssequenz vom INTEL-Rechner, springt die Statusmeldung auf *'Bitte warten!'*. Dieser Status bleibt erhalten, bis der Befehl vom Graphikprogramm vollständig ausgeführt ist. Die bisher implementierten Graphikbefehle, die vom GMS-Steuerrechner aktiviert werden können, sind in Kap. 5.3.1 beschrieben. Nach der Ausführung eines Befehls wartet das GMS-Graphikprogramm wieder auf weitere Befehle (Statusmeldung: *'Nichts zu tun!'*).

Neben dem Eintreffen eines Befehls vom GMS-Steuerrechner kann der Wartezustand auch über die Tastatur des Graphikrechners unterbrochen werden. Durch Betätigen der <ESC>-Taste wird ein internes Befehlsmenü aktiviert, das in Kap. 5.3.2 beschrieben ist.

5.3.1 Graphikbefehle des GMS-Steuerrechners

Der Datenaustausch zwischen dem GMS-Steuer- und dem GMS-Graphikrechner erfolgt über eine serielle RS-232 Schnittstelle. Um Datenübertragungsfehler zu erkennen, wird für den Datentransfer ein Protokoll mit Quittungszeichen (Handshake) und Prüfsummenvergleich verwendet. Das Schnittstellenprotokoll und die bisher implementierten Befehlssequenzen sind im Anhang O detailliert dargestellt.

Beim GMS-Vermessungsprogramm kann der Operateur die gewünschte Graphikunterstützung aktivieren, indem er die entsprechende Taste auf der Steuerrechnerntastatur betätigt (s. Anhang J.1). Abhängig von den aktuellen Einstellungen (Theodolitposition, Zielpunkt, Fernrohrlage, Sehfeld) erzeugt das GMS-Vermessungsprogramm die entsprechende Befehlssequenz (s. Tabelle 19 auf Seite 136) und schickt sie an den GMS-Graphikrechner. Kann der Befehl vom Graphikprogramm nicht interpretiert werden oder ist die errechnete Quersumme nicht identisch der Prüfsumme (s. Abb. 45 auf Seite 137), sendet das Graphikprogramm an das Vermessungsprogramm das Zeichen *'NAK'* (Negative AcKnowledge, ASCII Nr. 21). In diesem Fall wird die Befehlssequenz vom Vermessungsprogramm noch einmal an das Graphikprogramm geschickt. Wird auch nach zweimaliger Wiederholung die Richtigkeit nicht mit dem Zeichen <ACK> (ACKnowledge, ASCII Nr. 6) bestätigt, wird der Versuch, dem Graphikprogramm diesen Befehl zu schicken, mit einer entsprechenden Fehlermeldung abgebrochen.

Eine wesentliche Funktion des GMS-Graphikprogramms ist es, daß das Vermessungsobjekt in der Kameraperspektive graphisch dargestellt werden kann (s. Abb. 19 auf Seite 55). Wird das GMS-Graphikprogramm durch eine entsprechende Befehlssequenz (s. Kennbuchstabe B - G in Tabelle 19 auf Seite 136) aufgefordert, das Drahtmodell des Vermessungsobjekts einzublenden, wird für jede Linie die in Kap.5.2 beschriebene per-

spektivische Transformation durchgeführt. Diese Modellkanten werden von der GMS-Graphik in der Farbe weiß dargestellt.

Sollen zusätzlich Zielpunkte (Meß- oder Referenzpunkte) graphisch markiert werden, so werden auch diese Punktkoordinaten perspektivisch transformiert. Die dadurch ermittelten Pixelwerte sind jeweils das Zentrum für eine kreuzförmige Punktmarkierung (s. Abb. 23). Neben den markierten Punkten ist die Punktbezeichnung eingeblendet. Diese Bezeichnung besteht aus einem Kennbuchstaben (R: Referenzpunkt, M: Meßpunkt), und die angegebene Zahl ist die fortlaufende Punktnummer. Für die Größe dieser Markierung und des zugeordneten Textes wurde ein konstanter Wert festgelegt. Demnach ist die Darstellungsgröße nicht von der Zielentfernung abhängig. Zur Hervorhebung und Unterscheidung werden die markierten Referenzpunkte in der Farbe gelb und die Meßpunkte in rot auf dem RGB-Monitor dargestellt.

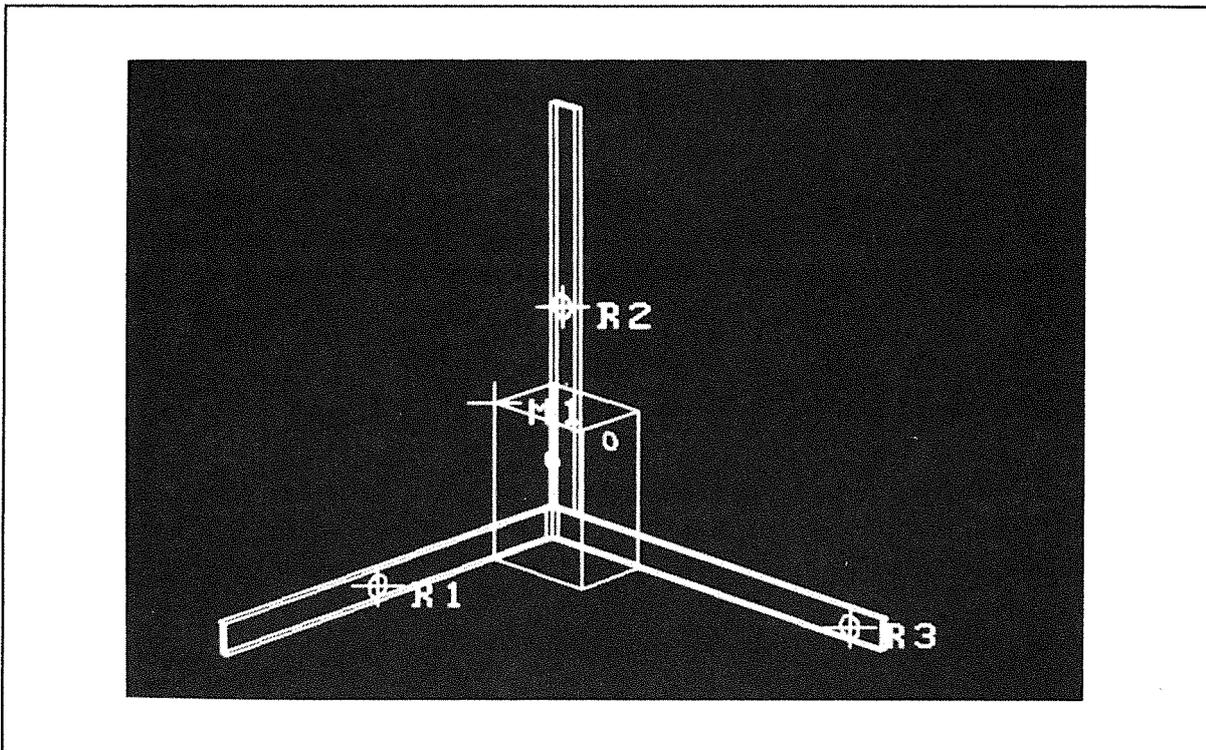


Abbildung 23. Modell mit Markierung aller Zielpunkte (Kamerabild ausgeblendet)

Mit der Graphikzoomfunktion (s. Tasten ']' und '[' in Tabelle 16 auf Seite 123) kann der Operateur den von der Graphik dargestellten Bildausschnitt verändern. Ist der Zoomwert κ auf den Standardwert 0 eingestellt, so ist die Größe des Graphikmodells identisch mit der Darstellungsgröße im Kamerabild. Soll das eingeblendete Graphikmodell des Vermessungsobjekts vergrößert dargestellt werden, muß ein Zoomwert größer als 0 eingestellt sein. So wird z.B. für $\kappa = 10$ (Maximalwert) das Vermessungsobjekt in der graphischen Darstellung 10 mal größer dargestellt als auf dem Kamerabild. Eine vergrößerte Graphikeinblendung ist besonders dann hilfreich, wenn aufgrund einer großen Objektentfernung und/oder einer komplexen Modellgeometrie keine Details mehr erkannt werden können.

Ist dagegen der Theodolitstandpunkt sehr dicht an dem Vermessungsobjekt, kann selbst der von der Weitwinkeloptik erfaßte Szenenausschnitt bei der Suche eines Zielpunktes zu klein sein. Wählt der Operateur einen Zoomwert kleiner als 0 (Minimalwert: $\kappa = -10$), zeigt die Graphik einen größeren Szenenausschnitt als das Kamerabild (s.a.

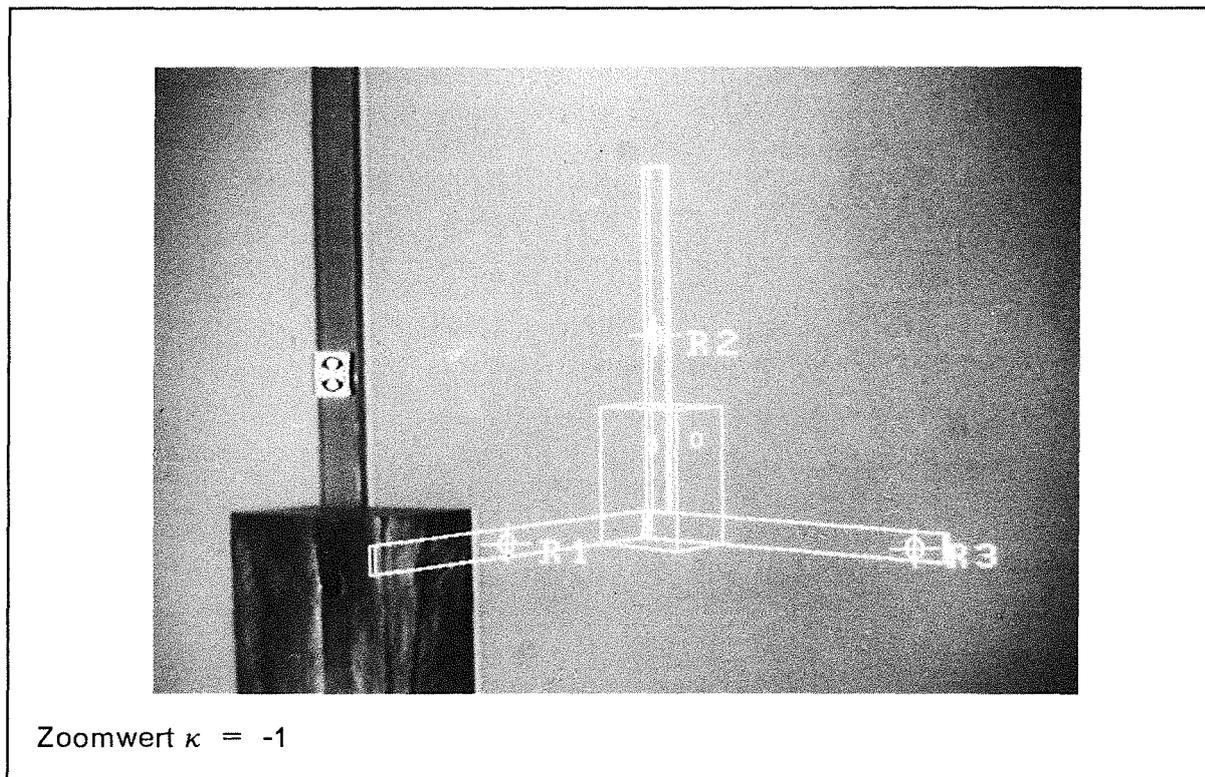


Abbildung 24. Verkleinerte graphische Darstellung des Vermessungsobjekts

Abb. 24). Die verkleinerte Weitwinkeldarstellung des eingeblendeten Graphikmodells soll den Operateur besonders bei der Zielpunktsuche unterstützen.

Aufgrund der Parallaxe zwischen Weitwinkel- und Fernrohrsehfeld ist der Zielpunktversatz im Weitwinkelbild von der Entfernung abhängig (s. Abb. 11 auf Seite 18). Die Berechnung der abstandsabhängigen Versatzwerte ist im Anhang N detailliert dargestellt. Damit der Operateur diesen Versatz bei der Peilung eines Zielpunktes im Weitwinkelsehfeld berücksichtigen kann, sind die Parallaxenskala (s. Abb. 25 auf Seite 62) und das parallaxenkorigierte Weitwinkelfadenkreuz (s. Abb. 26 auf Seite 62) implementierte GMS-Graphikfunktionen:

- Bei der Parallaxenskala (s. Befehl '±A1' in Tabelle 19 auf Seite 136) sind die Versatzwerte für zehn ausgewählte Zielpunktentfernungen eingetragen (s. Abb. 25 auf Seite 62). An der Skala ist auch deutlich zu erkennen, daß der Einfluß der Parallaxe mit wachsender Entfernung geringer wird.
- Beim parallaxenkorigierten Weitwinkelfadenkreuz (s. Befehl '±A2' in Tabelle 19 auf Seite 136) werden die Versatzwerte für die angegebene Zielpunktentfernung berechnet, und dieser Pixelwert wird durch ein grünes Kreuz markiert (s. Abb. 26 auf Seite 62). Zusätzlich wird neben dem Markierungskreuz die vorgegebene Zielpunktentfernung alphanumerisch angezeigt.

Die parallaxenkorigierten Zielhilfen sind besonders dann sehr hilfreich, wenn das grobe Ausrichten des Theodoliten auf einen Zielpunkt vom Operateur durchgeführt werden muß. Dies ist immer dann erforderlich, wenn die rechnergesteuerte automatische Voreinstellung des Theodoliten (s. Anhang G) nicht ausreicht, damit der Zielpunkt vom Fernrohrsehfeld erfaßt wird.

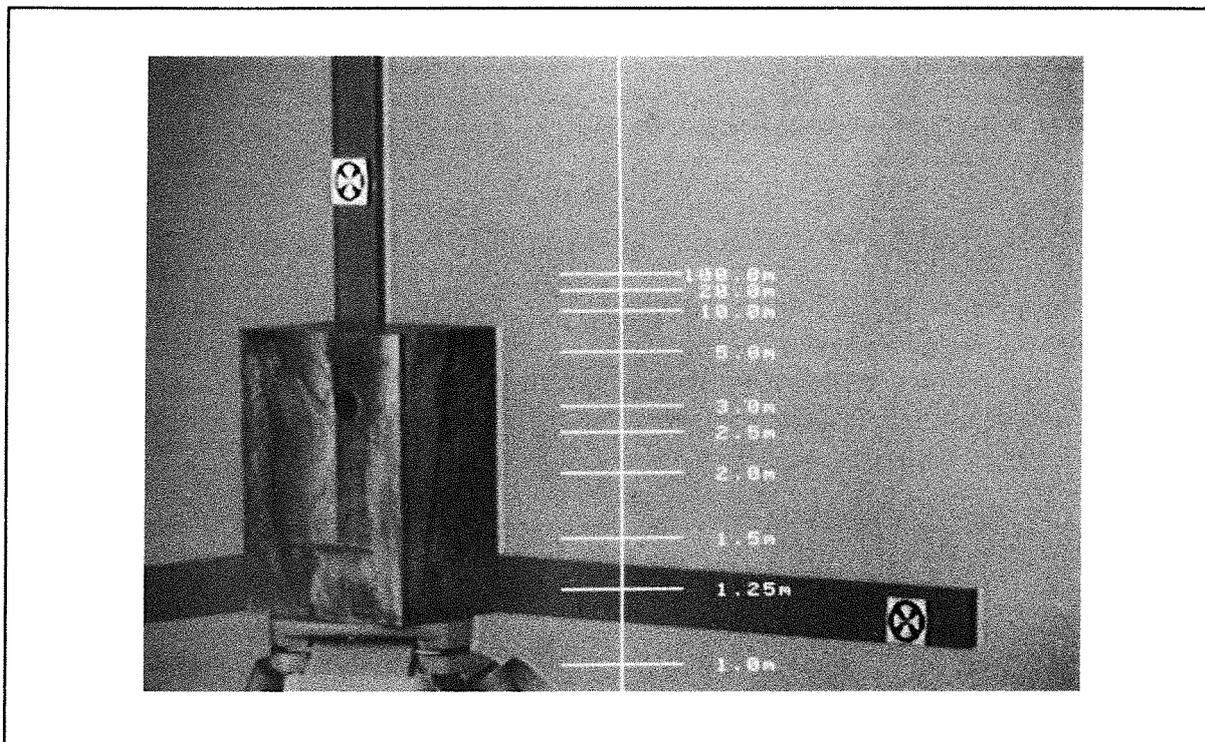


Abbildung 25. Parallaxenskala

Zur genauen Anzielung eines Punktes muß das interne Fadenkreuz des Theodolitfernrohres auf diesen Zielpunkt eingestellt werden. Ist das Theodolitfadenkreuz innerhalb eines dunklen Bildbereichs (s. Abb. 27 auf Seite 63), so ist dieses Strichkreuz - wenn überhaupt - nur noch schwer zu erkennen. In diesem Fall kann der Operateur eine graphische Fadenkreuzmarkierung einblenden (s. Befehl '±Q' in Tabelle 19 auf Seite 136). Abhängig von der Fernrohrlage wird die Markierung entsprechend den in der Konfigurationsdatei abgespeicherten Versatzwerten (s. Parameter 20-23 im Anhang L) positio-

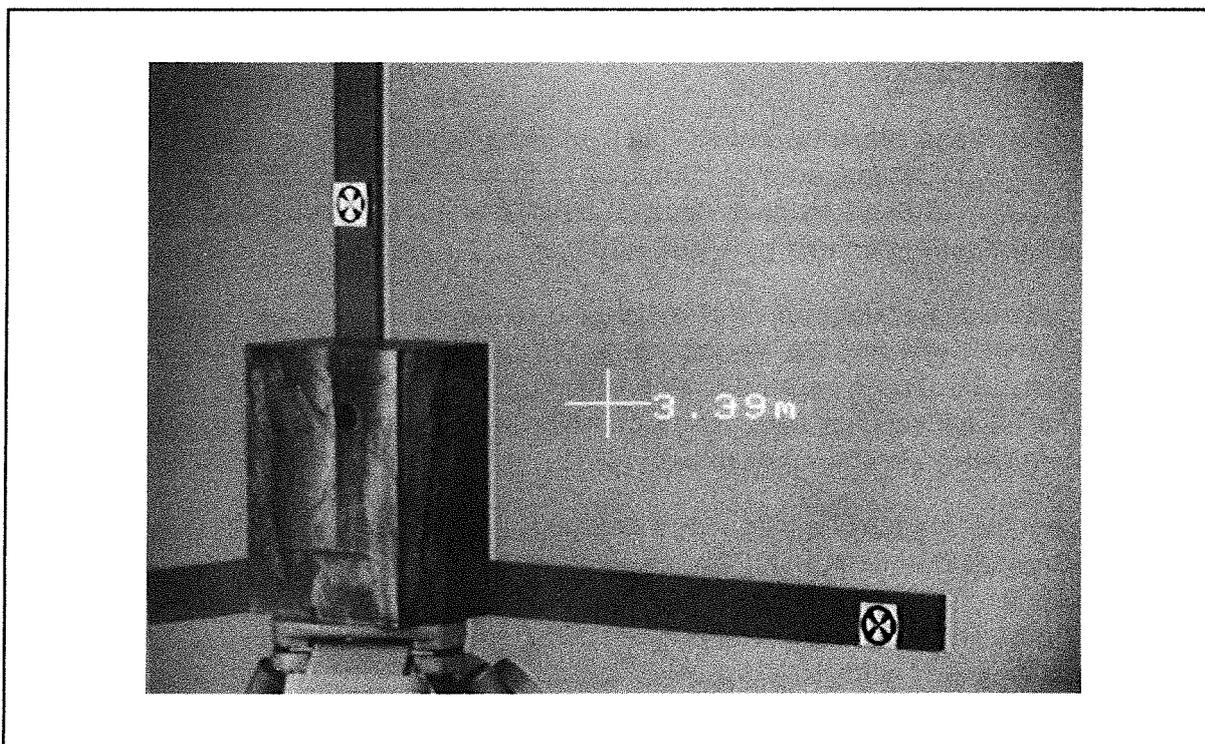


Abbildung 26. Parallaxenkorrigiertes Fadenkreuz

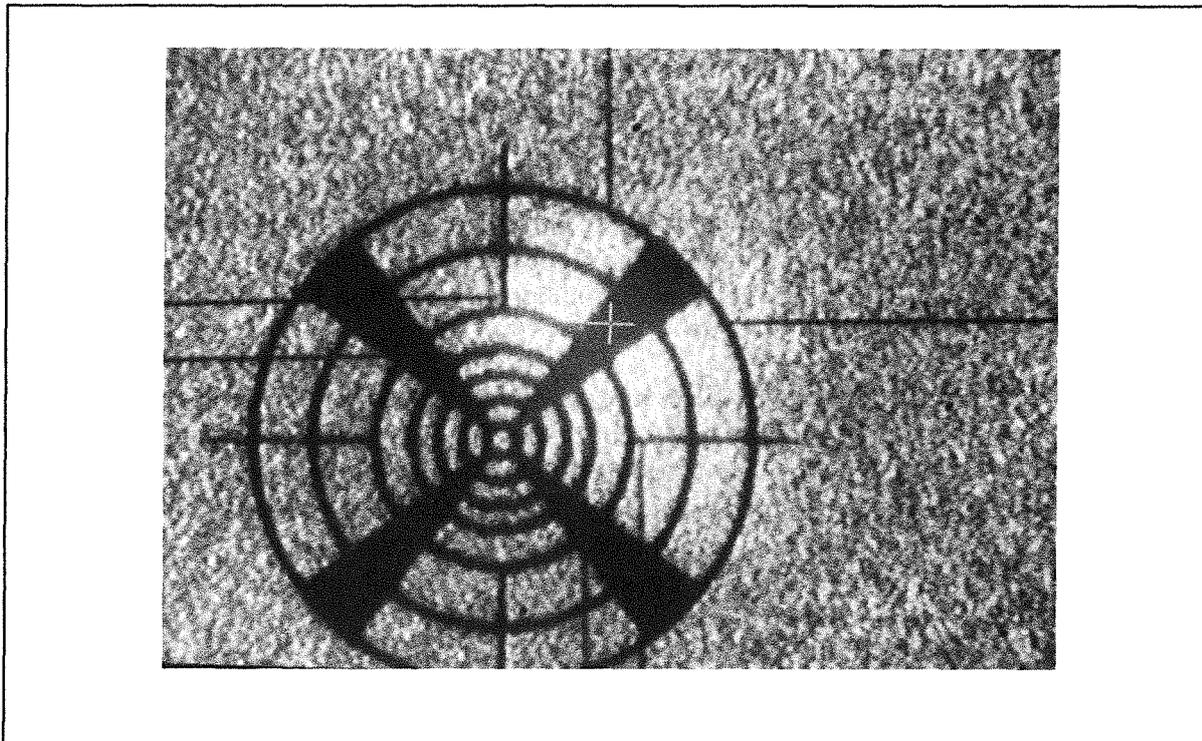


Abbildung 27. Graphische Markierung des Fadenkreuzentrums. Hilfreich, wenn durch dunklen Hintergrund das interne Theodolitfadenkreuz nicht sichtbar ist.

niert. Das eingeblendete graphische Fadenkreuz ist aus vier einzelnen orthogonalen Linien aufgebaut (Abb. 27 auf Seite 63); das zentrale zu markierende Pixel bleibt ausgespart. Tests mit unterschiedlichen geometrischen Formen hatten zum Ergebnis, daß dieses Fadenkreuzdesign eine feine und trotzdem deutliche Punktmarkierung erzeugt. Der Grund für die unterschiedliche Linienstärke (horizontal feiner als vertikal) liegt darin, daß das Kamerabild mit 512x512 Pixel digitalisiert ist, aber auf dem Fernsehschirm im Verhältnis 4:3 dargestellt wird.

Wie bereits oben erwähnt, wird das Kamerabild und die eingeblendete Graphikunterstützung von der Bildverarbeitungskarte auf unterschiedlichen Bitebenen abgelegt. Durch diese Trennung können sowohl die überlagerte Graphik als auch das Kamerabild (s. Abb. 23 auf Seite 60) wahlweise ein- und ausgeblendet werden (s. Befehle 'O', 'K', 'L' in Tabelle 19 auf Seite 136).

Zusätzlich zu den bereits erläuterten Graphikeinblendungen sind im GMS-Graphikprogramm auch Funktionen implementiert, mit denen das digitalisierte Kamerabild modifiziert werden kann. Für die Einstellung des Bildkontrasts und der Bildhelligkeit können die Grauwerte der digitalisierten Bildpunkte verändert werden. Zur Regulierung der Bildhelligkeit werden die Grauwerte aller Pixel um den gleichen Betrag erhöht bzw. verringert (Offset). Bei der Einstellung des Bildkontrasts werden die Grauwerte mit einem Faktor multipliziert (Gain). Für die Modifikation der Gain- und Offsetwerte werden Funktionen der bereits oben erwähnten ITEX-Bibliothek benutzt.

Aufgrund der stark unterschiedlichen Öffnungswinkel muß die Helligkeit und der Kontrast bei der Darstellung des Fernrohrbildes anders eingestellt werden als beim Weitwinkelbild. Die Gain- und Offsetwerte, die im allgemeinen eine gute Bildschirmdarstellung für das jeweilige Sehfeld erzeugen, sind in der Kameradatei eingetragen (s. Parameter 28 - 31 im Anhang Anhang L). Wird das Bildfeld der Theodolitkamera gewechselt, sendet das Graphikprogramm die entsprechende Befehlssequenz (s. Befehl 'U', 'V'

in Tabelle 19 auf Seite 136), und das Graphikprogramm paßt die Kontrast- und Helligkeitswerte dem dargestellten Bildfeld an.

Sind die vorgegebenen Gain- und Offsettinginstellungen nicht optimal, kann der Operateur die Werte mausgesteuert modifizieren (s. Befehl 'W' in Tabelle 19 auf Seite 136). Dieser Einstellvorgang ist in Kap. 5.3.2 (Taste 'K') beschrieben. Am Terminal des GMS-Steuerrechners wird die Statusmeldung *'Helligkeits- und Kontrasteinstellung mit der Maus'* in blinkender Schrift eingeblendet. Beendet der Operateur den Einstellvorgang durch Betätigen der rechten Maustaste, sendet das Graphikprogramm den Kennbuchstaben 'E' an den Steuerrechner.

Zur vergrößerten Darstellung kann auch ein gewählter Ausschnitt bildschirmfüllend gezeigt werden (s. Befehl 'M' in Tabelle 19 auf Seite 136). Der Einstellvorgang für diesen Pixelzoom ist in Kap. 5.3.2 (Taste 'Z') erläutert. Als Statusmeldung wird *'Bildausschnitt zoomen mit der Maus'* angezeigt. Ebenso wie bei der Gain- und Offsettinginstellung wird das Ende des Zoomvorgangs vom Graphikprogramm mit dem Zeichen 'E' quittiert. Die Praxis hat allerdings gezeigt, daß die Zoomansicht nur selten eine deutlichere Darstellung liefert als das Originalbild.

Soll der Theodolit mausgesteuert auf einen Zielpunkt ausgerichtet werden, wird ein graphisches Fadenkreuz eingeblendet, das der Operateur mit der Maus auf dem Zielpunkt plaziert. Die Empfindlichkeit der Maussteuerung kann mit dem Parameter 25 in der Konfigurationsdatei (s. Anhang L) eingestellt werden. Durch das Drücken der rechten Maustaste bestätigt der Operateur, daß die Fadenkreuzposition mit dem anzuzielenden Punkt identisch ist. Aus der eingestellten Pixelposition errechnet das GMS-Graphikprogramm die realen Versatzwerte $\Delta x_w, \Delta y_w$ im Weltfenster (s. Anhang C). Bei der Berechnung wird berücksichtigt, daß sowohl im Weitwinkel- als auch im Meßsehfeld der Theodolitzielpunkt nicht mit dem Zentrum des Bildes übereinstimmt. Die so berechneten Versatzwerte $\Delta x_w, \Delta y_w$ werden an den INTEL-Rechner geschickt. Aus diesen Versatzwerten können dann die Theodolitwinkelkorrekturen ΔH_z und ΔV für die aktuelle Zielpunktentfernung a_z berechnet werden. Da der Theodolit horizontalisiert ist, gilt für die Winkelkorrekturen:

$$\begin{aligned}\Delta H_z &= \arctan \frac{\Delta x_w}{a_z} \\ \Delta V &= \arctan \frac{\Delta y_w}{a_z}\end{aligned}\tag{5.3.1}$$

Wählt der Operateur für das mausgesteuerte Anzielen eines Punktes die Taste 'I' (s. Tabelle 16 auf Seite 123), wird das aktuelle Kamerabild um den Faktor 2 vergrößert dargestellt (Pixelzoom). Von dem gespeicherten Bild wird ein zentrales Fenster (256x256 Pixel) bildschirmfüllend dargestellt. Im Gegensatz zum mausgesteuerten Anzielen ohne Zoom ist das vergrößerte Kamerabild nicht live, sondern ein abgespeichertes Standbild. Bei der Berechnung der Versatzwerte $\Delta x_w, \Delta y_w$ muß berücksichtigt werden, daß sich die Weltfenstergrößen b_{wx}, b_{wy} wegen des kleineren Bildausschnittes halbieren.

5.3.2 Befehlsmenü des GMS-Graphikprogramms

Das erstellte GMS-Graphikprogramm hat auch ein eigenes Befehlsmenü, das durch Betätigen der <ESC>-Taste am Graphikrechner aktiviert werden kann. Wird das interne Befehlsmenü aufgerufen, erhält der Operateur zunächst eine Übersicht über die verfügbaren Funktionen und es wird angezeigt, durch welche Tasten sie ausgelöst werden können. Die bisher implementierten internen Graphikbefehle und deren Tastenschlüssel sind in der folgenden Liste aufgeführt:

- 'q' Beenden des GMS-Graphikprogramms.
Das Anwendungsprogramm wird beendet, und die Rechnersteuerung geht auf die Betriebssystemebene.
- '<ESC>' Verlassen des internen Befehlsmenüs.
Das Graphikprogramm wartet wieder auf Befehle vom INTEL-Rechner. Während das interne Befehlsmenü aktiviert ist können keine Befehle vom GMS-Steuerrechner empfangen und bearbeitet werden.
- 'k' Mausgesteuertes Einstellen der Gain- und Offsetwerte (Kontrast und Helligkeit).
Durch das Bewegen der Maus können diese Werte geändert werden. Das auf dem RGB-Monitor dargestellte Bild der Theodolitkamera wird online mit den gewählten Werten aktualisiert und gleichzeitig werden die eingestellten Kontrast- und Helligkeitswerte alphanumerisch auf dem Bildschirm des Graphikrechners angezeigt. Durch das Drücken der rechten Maustaste bestätigt der Operateur die aktuelle Einstellung und je nach Bildfeld werden die bisherigen Gain- und Offsetwerte für das Weitwinkel- oder das Meßsehfeld (s.a. Parameter 28 - 31 in Kap. Anhang L) durch die aktuell eingestellten Werte ersetzt. Das mausgesteuerte Einstellen der Kontrast- und Helligkeitswerte kann auch durch eine entsprechende Befehlssequenz vom GMS-Steuerrechner aktiviert werden (s. Kap. 5.3.1).
- 'e' Eichung des Fadenkreuzes.
Das Fernrohrbild des Theodoliten wird über Prismen und Linsen auf den CCD-Chip der Kamera gelenkt (s. Abb. 9 auf Seite 17). Da aber selbst kleinste Positionsänderungen der Umlenkprismen oder des CCD-Chips zu einem erkennbaren Bildversatz führen, muß der Fadenkreuzversatz bei Bedarf neu bestimmt werden. Diese Eichung ist dann erforderlich, wenn das eingeblendete graphische Fadenkreuzzentrum (s. Abb. 27 auf Seite 63) gegenüber dem internen Theodolitfadenkreuz einen Versatz aufweist.

Wegen der Schwerkraft und einem geringen Spiel im Drehmechanismus des Bildwechselprismas ist der Bildversatz in Fernrohrlage I und II unterschiedlich (s. Parameter 20 - 23 im Anhang L). Führt der Operateur eine Eichung durch, muß er das Zentrum des Theodolitfadenkreuzes mit einem mausgesteuerten Cursor anfahren und die exakte Einstellung durch Drücken der rechten Maustaste bestätigen. Mit der gemessenen Pixelposition werden die Versatzwerte für die aktuelle Fernrohrlage korrigiert.

'z' Zoom eines gewählten Bildausschnitts.
Mit dieser Funktion kann der Operateur mausgesteuert einen rechteckförmigen Zoomausschnitt selektieren: Durch Bewegen der Maus plaziert der Operateur einen eingblendeten Cursor auf der linken oberen Ecke des gewählten Bildausschnitts und bestätigt die Position mit der linken Maustaste. Beim Führen des mausgesteuerten Bildschirmcursors auf die rechte untere Ecke des Zoomausschnitts wird der aktuell selektierte Bildbereich online durch einen roten rechteckförmigen Graphikrahmen markiert (Rubberband). Die korrekte Einstellung des Bildbereichs muß der Operateur mit der rechten Maustaste bestätigen.

Der selektierte Bildausschnitt wird dann mit maximal möglicher Vergrößerung auf dem Bildschirm dargestellt. Um eine verzerrungsfreie Darstellung zu erhalten, wird das Seitenverhältnis beibehalten, d.h. nur für das Seitenverhältnis 4:3 wird der komplette Bildschirm durch das vergrößerte Bild ausgefüllt. Diese Funktion kann auch vom GMS-Steuerrechner aus aktiviert werden (s. Kap. 5.3.1).

's' Speichern des aktuellen Kamerabildes.
Zu Dokumentationszwecken kann das aktuell dargestellte Bild inklusiv der überlagerten Graphik als TIFF-Datei (Tag Image File Format /62/) abgespeichert werden. Der standardmäßig vorgegebene Dateiname BILDx.TIF für das x. Bild kann vom Operateur wahlweise geändert werden. Diese TIFF-Datei kann von zahlreichen Programmen (WORD, PAGEMAKER, PAINT, ...) direkt verarbeitet werden. Mit einem speziellen Graylaserport für einen Drucker des Typs HP-Laserjet II können die Bilder auch in 256 Graustufen und mit einer Auflösung von 300 dpi (dots per inch) ausgedruckt werden /63/.

'I' Einlesen eines bereits abgespeicherten Kamerabildes.
Zur Unterstützung des Operateurs können sämtliche abgespeicherten TIFF-Bilder (s. Taste 's') auch innerhalb des GMS-Graphikprogramms wieder eingelesen werden. Nach dem Betätigen der Taste 'I' werden die Namen aller verfügbaren TIFF-Dateien auf dem Bildschirm aufgelistet, und der Operateur kann das gewünschte Bild auswählen. Diese TIFF-Datei wird eingelesen, und das Bild wird auf dem RGB-Monitor gezeigt. Durch das Betätigen einer beliebigen Taste schaltet die Bildschirmdarstellung wieder auf das aktuelle Kamerabild des Theodoliten.

In dem internen Befehlsmenü des Graphikprogramms sind Funktionen implementiert, die nicht nur bei GMS-Vermessungen eingesetzt werden können. Auch wenn eine andere Kamera an die Bildverarbeitungskarte angeschlossen wird, kann das digitalisierte Kamerabild mit diesen Funktionen bearbeitet werden, ohne daß die entsprechende Befehlssequenz über die RS232-Schnittstelle geschickt werden muß.

Die Eichung des Theodolitfadenskreuzes und das Abspeichern bzw. Einlesen von Kamerabildern werden bei den GMS-Vermessungen nur relativ selten benötigt. Es wurde deshalb darauf verzichtet, daß diese Funktionen auch vom GMS-Steuerrechner aktiviert werden können.

6.0 Automatische Horizontierungsplattform

Wie in Kap. 3.1 erläutert, muß der GMS-Theodolit horizontalisiert aufgestellt sein. Ist die Instrumentenneigung größer als $\pm 0,2$ gon (Spielbereich des Stehachskompensators), erscheint eine entsprechende Fehlermeldung, und es können keine Theodolitwinkel gemessen werden (Meßelektronik ist blockiert). Zur Horizontierung des Instruments ist der Theodolitsockel (Dreifuß) mit Stellspindeln ausgerüstet. Durch Drehen der Dreifußschrauben muß der Operateur die Instrumentenneigung manuell kompensieren /25/. Bei diesem Einstellvorgang orientiert sich der Operateur an den am Instrument angebrachten Libellen (Dosen- und Röhrenlibelle). Bei der Feineinstellung kann er sich auch die vom Kompensator gemessene Neigung an einem LCD-Display anzeigen lassen.

Der manuelle und direkt am Instrument durchzuführende Horizontiervorgang steht aber im Widerspruch zur geforderten kompletten Fernbedienbarkeit des GMS-Systems. Zur Erfüllung der gestellten Anforderungen muß der manuell einzustellende Dreifuß des Theodoliten durch eine zumindest fernbedienbare Horizontierungseinrichtung ersetzt werden. Zur Vereinfachung sollte der Einstellvorgang möglichst automatisch durchgeführt werden können. Eine für den GMS-Theodoliten geeignete Horizontierungseinrichtung muß die folgenden Mindestanforderungen erfüllen:

- **Einstellgenauigkeit: $\pm 0,1$ gon**
Damit die Horizontiereinrichtung auch für Instrumente mit zweiachsigem Kompensator eingesetzt werden kann, sollte die Einstellgenauigkeit aber möglichst besser als $\pm 0,06$ gon (Spielbereich der zweiachsigen Kompensatoren /25/) sein.
- **Einstellbereich: ± 5 gon**
Dieser geforderte Einstellbereich entspricht dem Verstellbereich der manuellen Dreifußspindeln.
- **Traglast: 150 N**
Die Horizontiereinrichtung muß zumindest das Theodolitgewicht (13 kg) tragen können.

Da auf dem Markt keine geeignete Horizontiereinrichtung verfügbar war, wurde für das GMS-System die automatische Horizontierungsplattform ALF (Automatic Levelling Facility) entwickelt /64/. Die Konzeption für die Horizontierungsplattform wurde im Rahmen dieser Arbeit erstellt; das Ausarbeiten der Konstruktionsdetails und die Entwicklung der Steuerungselektronik wurden im wesentlichen von Dipl.-Ing. Kornelson am Institut für Reaktorentwicklung des Kernforschungszentrums Karlsruhe durchgeführt. Der mechanische Aufbau der ALF-Plattform ist in Kap. 6.1 und die ALF-Steuerung ist in Kap. 6.2 beschrieben.

6.1 Mechanischer Aufbau der Horizontierungsplattform

Als günstigste Lösung wurde für die Horizontiereinrichtung eine geteilte zylinderförmige Konstruktion realisiert (s. Abb. 28 auf Seite 68). Das Gehäuseoberteil (2) ist auf einem Kugelkopf (12) zentrisch gelagert und kann nach allen Seiten geneigt werden. Dieser Kugelkopf ist mit dem Gehäuseunterteil (1) starr verbunden. Die in Klammern eingetragenen Zahlenwerte beziehen sich auf die Bauteilnumerierung in Abb. 28.

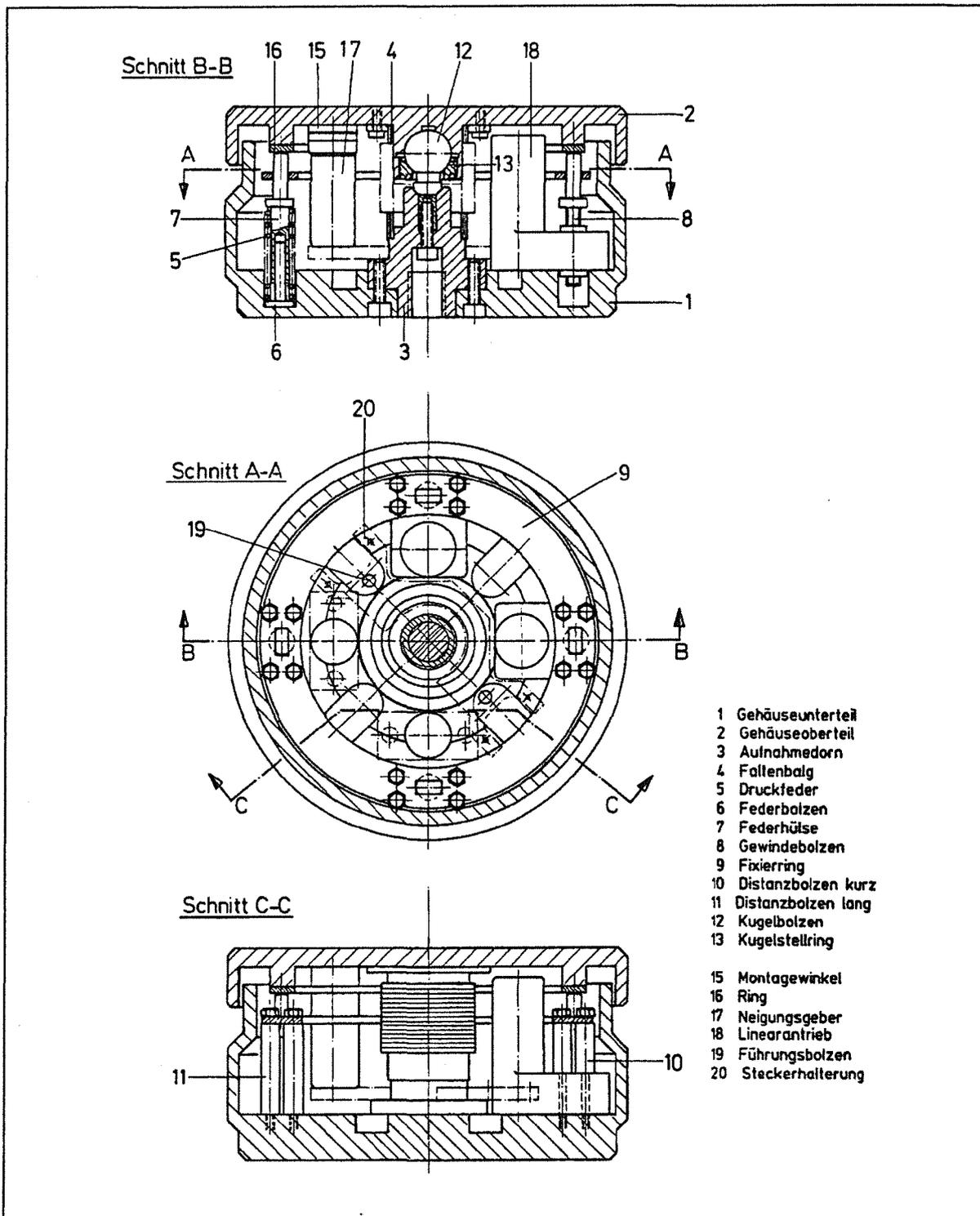


Abbildung 28. Konstruktionszeichnung für die automatische Horizontierungsplattform

Um Verdrehungen zwischen dem Ober- und Unterteil zu vermeiden, ist das Kugelkopflager von einem metallischen Faltenbalg (4) umschlossen, der an den Enden mit dem Ober- bzw. dem Unterteil fest verschraubt ist. Dadurch wird eine hohe Verdrehsteifigkeit zwischen den beiden Gehäuseteilen erreicht.

Im Gehäuseunterteil sind zwei Servoantriebe (18) eingebaut, die jeweils einen selbsthemmenden Gewindebolzen antreiben. Diese Spindeltriebe sind - um 90° versetzt - radial bzgl. der Kugelkopfachse angeordnet. Die oberen Enden der Gewindebolzen haben Kontakt mit dem beweglichen Gehäuseoberteil. Dadurch kann mit den motorisch ange-

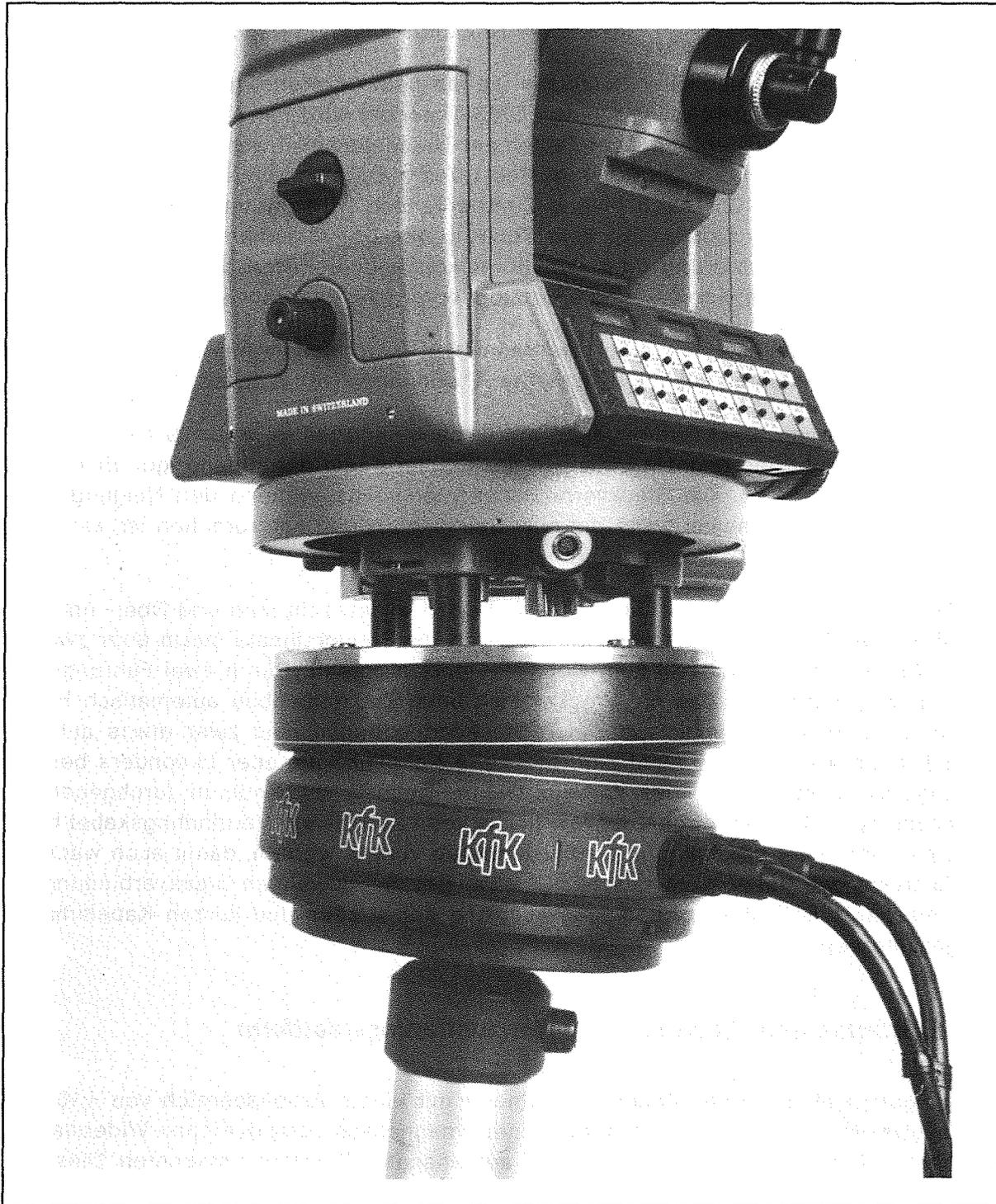


Abbildung 29. Automatische Horizontierungsplattform mit aufgesetztem Theodoliten

triebenen Spindeln die Plattform in jede Richtung geneigt werden. Voraussetzung dafür ist, daß der Gewindebolzen immer mit dem Oberteil Kontakt hat. Um dies sicherzustellen, sind im Gehäuseunterteil zwei Druckfederelemente (5) eingebaut. Diese sind bzgl. den Spindelantrieben um 180° versetzt angeordnet. Die Stirnseiten dieser Federelemente drücken gegen das Gehäuseoberteil und garantieren somit, daß der gegenüberliegende Spindelantrieb in jeder Stellung spielfreien Kontakt mit dem Oberteil hat.

Zum Messen der Plattformneigung sind am Gehäuseoberteil zwei Inklinometer (17) angebaut. Diese einachsigen Neigungsgeber sind jeweils einer Einstellrichtung zugeord-

net. Die Achsen dieser Sensoren sind so ausgerichtet, daß jeweils ein Inklinometer genau die von einem Spindeltrieb einstellbare Neigungsrichtung erfaßt.

Zur Aufnahme unterschiedlicher Nutzlasten ist auf dem Oberteil eine Adapterplatte angeschraubt. Bei der Verwendung für den GMS-Theodolit wird die Adapterplatte mit einem festen Dreifuß ausgerüstet. Drei Zapfen am Theodolitsockel werden in die vorgesehenen Zentrierbuchsen des Dreifußes gesteckt und mit einem zentral gelagerten Drehverschluß verriegelt /12/. Durch diesen Zentrierflansch wird garantiert, daß die Stehachse des Theodoliten genau über dem Zentrum des Gehäuseoberteils fixiert ist. Aufgrund der Zwangszentrierung über dem Kugelkopflager der Horizontierungsplattform, bleibt die Instrumentenhöhe bei einem Horizontiervorgang unverändert.

Das Gehäuseunterteil ist mit einer zentralen 5/8"-Gewindebohrung ausgestattet. Die ALF-Plattform kann somit auf konventionellen Theodolitstativen aufgesetzt werden.

Über zwei 12-polige Steckverbindungen am Gehäuseunterteil (s. Abb. 29 auf Seite 69) werden Meß- und Steuersignale zwischen der Plattform und der zugehörigen Elektronik (s. Kap.6.2) übertragen. Die Steckverbindungen sind entsprechend den Neigungsrichtungen aufgeteilt; d.h. selbst wenn die eine Steckverbindung unterbrochen ist, kann die andere Neigungsrichtung uneingeschränkt eingestellt werden.

Da die Sensoren am beweglichen Gehäuseoberteil angebracht sind und Ober- und Unterteil bei der Demontage getrennt werden, sind die Sensorsignale intern über zwei 9-polige Steckverbindungen (20) zum Gehäuseunterteil geführt. Durch zwei Führungsbolzen (19) wird garantiert, daß die Stecker sich beim Zusammenbau automatisch in die zugehörigen Buchsen einklinken. Diese Steckverbindungen sind zwar etwas aufwendiger herzustellen als eine nicht unterbrochene Kabelführung, aber besonders bei der Montage hat diese Konstruktion Vorteile. Bei der anfangs verwendeten durchgehenden Kabelführung mußte das wegen der Montierbarkeit relativ lange Verbindungskabel beim Zusammenbau sehr sorgfältig im Gehäuseinneren verlegt werden, damit auch während des Betriebs das Kabel nicht beschädigt wird. Bei der gewählten Steckverbindung ist eine mechanische Kabelbeschädigung aufgrund der straffen und kurzen Kabelführung ausgeschlossen.

6.2 Elektronik und Steuerung der Horizontierungsplattform

Als Neigungsgeber werden Pendelinklinometer mit einem Arbeitsbereich von ± 10 gon eingesetzt /65/. Der Sensor besteht aus einem magnetisch veränderlichen Widerstandselement (Feldplatte) und einem als Pendel aufgehängten Permanentmagneten. Diese robusten und zuverlässigen Pendelpotentiometer haben lt. Herstellerangaben eine Empfindlichkeit (inklusive Hysterese) von $0,01^\circ$ und einen Betriebstemperaturbereich von -10°C bis 75°C /65/.

Das von den Sensoren erzeugte Spannungssignal U_N ist ein Maß für die Inklinometer- bzw. Plattformneigung (s. Abb. 30 auf Seite 71). Zum Nullabgleich des Neigungsgebers wird dem Sensorsignal U_N eine einstellbare konstante Spannung U_0 überlagert. Zur Einstellung dieser Abgleichsspannung wird eine hochpräzise elektronische Wasserwaage (Auflösung: $0,06$ mgon, /66/) auf die Horizontierungsplattform gestellt. Die Spannung U_0 wird dann über ein von außen verstellbares Trimpotentiometer so eingestellt, daß keine Neigung mehr in der zu regulierenden Richtung vorhanden ist. Durch den Abgleich können Ungenauigkeiten bei der Fertigung bzw. der Montage kompensiert werden.

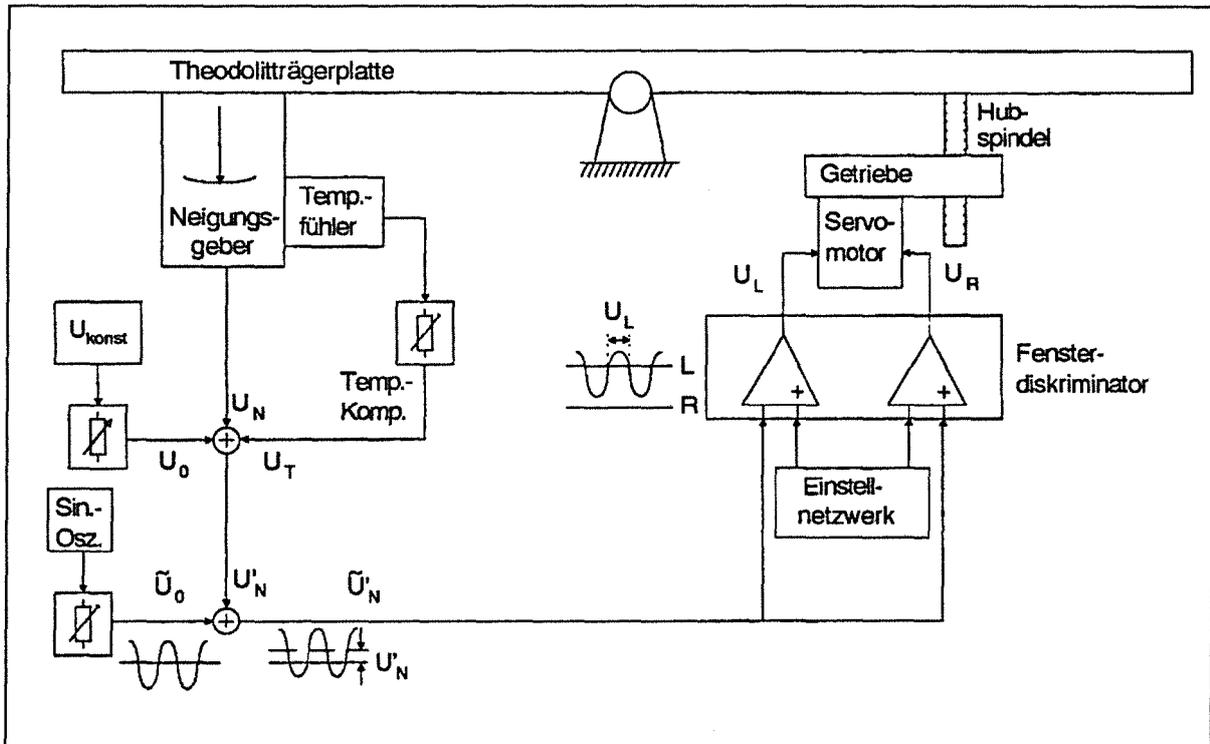


Abbildung 30. Prinzip der Horizontierelektronik für eine Achse

Zur Temperaturkompensation ist zusätzlich ein Temperaturfühler am Inclinometergehäuse angebracht. Dieses IC-Element ist mit einer Klammer am Gehäuse befestigt und somit auf dem gleichen Temperaturniveau wie der Neigungsgeber. Im Arbeitsbereich von -16°C bis $+38^{\circ}\text{C}$ reagiert das verwendete IC auf eine veränderte Temperatur mit einer Spannungsänderung von $18\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Dieses Sensorsignal wird der Ausgangsspannung U_N des Neigungsgebers überlagert (s. Abb. 30). Über ein einstellbares Potentiometer

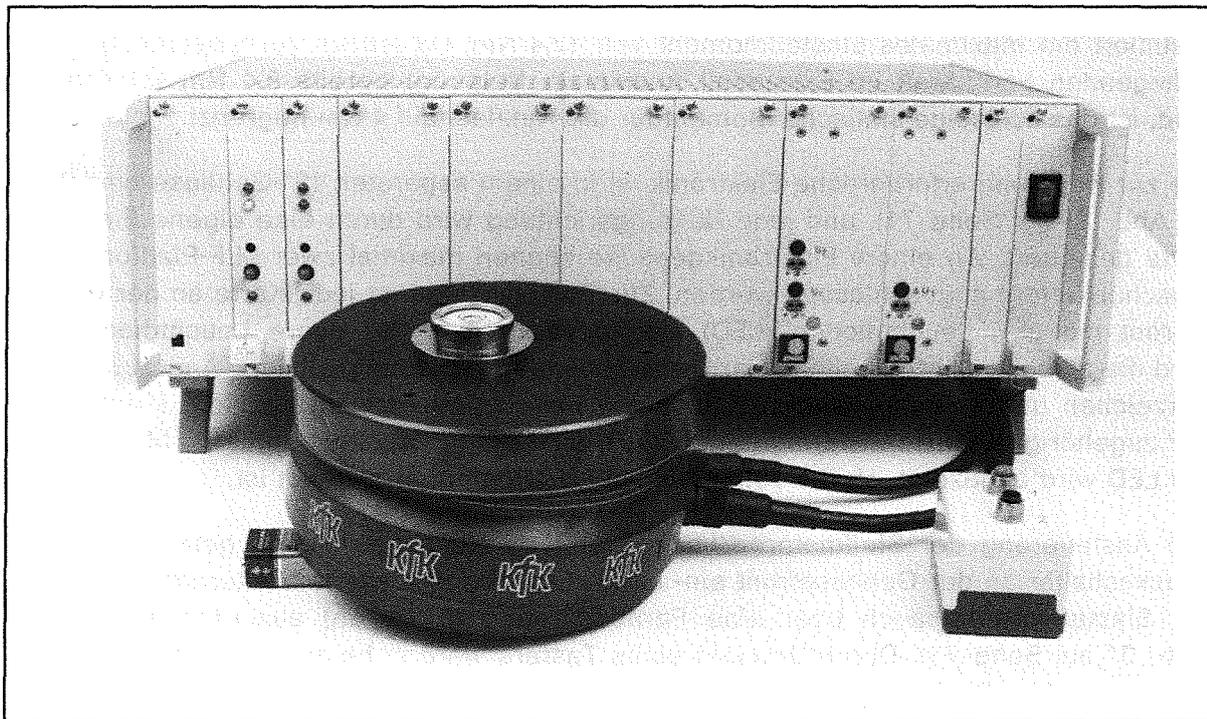


Abbildung 31. Automatische Horizontierungsplattform mit Horizontierelektronik

meter kann die Spannung U_T der Temperaturkennlinie des Inklinometers individuell angepaßt werden.

Der korrigierten Spannung U'_N wird anschließend die von einem Sinus-Oszillator erzeugte Wechselspannung \tilde{U}_0 überlagert (s. Abb. 30 auf Seite 71). Die daraus resultierende Spannung $\tilde{U}_N(t)$ hat einen zeitlich sinusförmigen Verlauf (10 Hz) mit einem Offset U'_N . Aus dem Signal werden dann in einem Fensterdiskriminator die Motorstellsignale $U_{L(\text{links})}$ bzw. $U_{R(\text{rechts})}$ generiert. Die obere und untere Fenstergrenze ist über ein Einstellnetzwerk justiert. Abhängig vom Offset U'_N liegt die Spannung \tilde{U}_N komplett oder zeitweise außerhalb der eingestellten Fenstergrenzen. Liegt der Spannungsverlauf \tilde{U}_N komplett über der oberen Fenstergrenze, wird durch die erzeugte konstante Spannung ($U_L = \text{konst.}$) der Servomotor mit Maximalgeschwindigkeit linksdrehend verfahren. Bei kleineren Offsetspannungen U'_N ist die Spannung \tilde{U}_N nur noch zeitweilig größer als die eingestellte Fenstergrenze L (s. Abb. 30 auf Seite 71). Nur innerhalb dieser Zeitintervalle liegt dann noch die Stellspannung U_L am Servomotor an. Analog der linksdrehenden Einstellung wird bei entgegengesetzter Neigungsrichtung ($U'_N < 0$) das Motorstellsignal U_R entsprechend der eingestellten Fenstergrenze R erzeugt.

Um eine optimale Empfindlichkeit zu erreichen, ist die Wechselspannung \tilde{U}_0 so einzustellen, daß in horizontierter Stellung ($U'_N = 0$) die Extremwerte des sinusförmigen Spannungsverlaufs gerade an die Fenstergrenzen R und L heranreichen. In dieser Einstellung führen selbst kleinste Neigungsänderungen zu Stellsignalen an den Servomotoren. Die hohe Empfindlichkeit hat allerdings zur Folge, daß selbst bei schwachen Vibrationen des Untergrunds - z.B. durch laufende Maschinen - die Servomotoren ständig angesteuert werden. Durch das Einstellen der Amplitude von \tilde{U}_0 kann aber die Empfindlichkeit den Einsatzbedingungen angepaßt werden.

Als Stellglied wird für jede Neigungsachse eine Motor/Getriebe-Kombination der Fa. Portescap eingesetzt /67/. Besonders die sehr kompakten Abmessungen ($58 \times 50,5 \times 32$ mm) waren bei der Entscheidung für die in Serie gefertigte Antriebseinheit ausschlaggebend. Bei diesem Linearantrieb wird eine Hubspindel (1mm/Umdrehung) mit einer Getriebeuntersetzung von 100:1 durch einen 12-V-Gleichstrommotor direkt angetrieben. Die gewählte Ausführung hat eine maximale Verstellkraft von 200 N und daraus resultiert ein maximales Einstellmoment von 12,4 Nm. Da jedoch zur Überwindung der anliegenden Federkraft im Extremfall (maximale Neigung) bereits 8,4 Nm erforderlich sind, ist das zulässige statische Moment für die Nutzlast auf 4 Nm begrenzt.

Die zur Regelung erforderliche Elektronik ist in einem separaten 19"-Gehäuse eingebaut (s. Abb. 31 auf Seite 71), und jede Neigungsrichtung wird durch eine eigene Einschubkarte gesteuert. An einem Elektronikgehäuse können maximal zwei ALF-Plattformen (4 Einschubkarten) angeschlossen werden. Zur Statusanzeige ist jede Karte an der Gehäusefront mit drei Leuchtdioden (LED) ausgestattet. Über das obere Leuchtdiodenpaar wird die aktuelle Schrägstellung der einzustellenden Achse signalisiert. Ändert sich das Vorzeichen der Neigung, wechselt auch die Leuchtdiodenanzeige; ist die Plattform in der zugehörigen Einstellrichtung horizontalisiert, sind beide Leuchtdioden aus. Mit der dritten LED wird angezeigt, ob die automatische Horizontierung aktiviert ist.

Die Ansteuerung der Stellmotoren kann - für jede Neigungsrichtung getrennt - durch Druckschalter an der Gehäusefront ein- bzw. ausgeschaltet werden. Alternativ kann dieser Einstellvorgang auch über eine Fernbedienung (2 Tasten) ausgelöst werden (s. Abb. 31 auf Seite 71). Durch Drücken eines Tasters werden beide Stellmotoren der zugehörigen ALF-Plattform aktiviert. Der Einstellvorgang wird fortgesetzt, solange der

Operateur den Taster betätigt. Hierbei kann der Horizontiervorgang anhand der LED-Signale überprüft werden.

Damit die Horizontierung auch rechnergesteuert aktiviert bzw. überwacht werden kann, verfügt die Horizontierelektronik auch über eine Schnittstelle mit TTL-Pegel (+5 V). Neben einer Rückmeldung bei aktivierter Horizontierung liefert die Schnittstelle auch den Status der einzelnen Neigungsgeber. Anhand dieser Signale kann die Horizontierungsplattform auch rechnergesteuert kontrolliert werden. Die rechnergesteuerte Horizontierung ist aber in der bisherigen Ausbaustufe des GMS-Prototypsystems noch nicht integriert.

Betrachtet man das Regelverhalten der Horizontierungsplattform, so zeigt die Elektronik aufgrund der Fensterdiskriminatoren und des sinusförmigen Eingangssignals die Charakteristik eines PD-Reglers. Zusammen mit dem I-Anteil des Servomotors kann somit ein günstiges Regelverhalten des Gesamtsystems und hohe Einstellgenauigkeit realisiert werden. Wie die Untersuchungen an einem ALF-Prototypen gezeigt haben, werden die gestellten Anforderungen von der entwickelten Horizontierungsplattform erfüllt (s. Tabelle 5).

| | | |
|----------------------------------|------|------------|
| Einstellbereich | gon | ± 6 |
| Einstellgenauigkeit | mgon | 10 |
| zulässige Traglast | N | 150 |
| zulässiges statisches Moment | Nm | 4 |
| Abmessungen | | |
| Durchmesser | mm | 160 |
| Höhe (ohne Adapterplatte) | mm | 90 |
| Masse | kg | 4 |
| Temperaturbereich (Gesamtsystem) | °C | +5 bis +35 |

Tabelle 5. Technische Daten der Horizontierungsplattform ALF

7.0 Vermessungen mit dem GMS-Prototypsystem

Neben zahlreichen, an Labormodellen (s. z.B. Abb. 19 auf Seite 55) durchgeführten GMS-Tests, wurde der GMS-Prototyp einer detaillierten System- und Genauigkeitsuntersuchung unterzogen. Diese Studie ist in Kap. 7.1 näher beschrieben. Außer bei Vermessungstests wurde das GMS-Prototypsystem auch bereits bei konkreten praktischen Vermessungsaufgaben eingesetzt, die in Kap. 7.2 näher erläutert sind.

7.1 Testmessungen mit dem GMS-Prototypsystem

Zur Beurteilung des GMS-Prototypsystems wurden umfangreiche Testmessungen durchgeführt /68/. Für diese Systemuntersuchung wurden in einer Halle (Grundfläche: $11 \times 13 \text{ m}^2$) unterschiedliche Zielmarkierungen an den Wänden angebracht. Zur Vermessung der Punkte wurden Klebezielmarken verwendet /69/, die als Vermessungszubehör erhältlich sind.

Zum Vergleich wurde zusätzlich neben jeder Marke eine selbst hergestellte Zielmarkierung an der Wand angebracht. Im Gegensatz zu den als Vermessungszubehör erhältlichen Marken, die auf dünnem Aluminiumblech aufgedruckt sind, wird bei dem Eigenentwurf hoch reflektierende Folie (High Gain 7610, /70/) als Trägermaterial verwendet. Die Selbstklebefolie reflektiert das auftreffende Licht in Richtung der aussendenden Lichtquelle zurück (Retroreflexion). Für die Markierung wurde in einem ersten Test ein entsprechend belichtetes Filmmaterial auf die Retroreflexfolie aufgeklebt. Hierbei wurde allerdings der Reflexionsgrad durch das Filmmaterial stark verringert. Auch im Siebdruckverfahren erstellte Marken waren nicht optimal, da die Druckränder wegen der relativ rauhen Oberfläche der Retroreflexfolie teilweise unscharf waren. Die besten Ergebnisse wurden mit Zielmarkierungen erreicht, die als Anreibesymbole aufgedruckt wurden. Die als Sonderanfertigung hergestellten Anreibesymbole /71/ wurden im Rahmen dieser Arbeit entworfen und erzeugen eine eindeutige Punktdefinition, ohne daß der Reflexionsgrad beeinträchtigt wird (s. Abb. 32 auf Seite 76).

Um auch das Anzielen von Objekten ohne spezielle Zielmarkierungen untersuchen zu können, wurden zwei quaderförmige Aluminiummodelle ($180 \times 70 \times 30 \text{ mm}^3$) an den Wänden befestigt. Neben zwei eingefräßten Nuten sind mehrere kleine Bohrungen (Durchmesser: 0,25 - 0,85 mm) an den Modellen angebracht (s. Abb. 33 auf Seite 76). Die Ecken der Modelle und die Bohrungszentren wurden als Meßpunkte am Objekt verwendet.

Sämtliche Zielpunktkoordinaten wurden zuerst mit dem GMS-System ermittelt. Zum Vergleich wurden die gleichen Punkte mit einem Industriemeßsystem (IMS) des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe vermessen (s. Abb. 34 auf Seite 77). Das IMS-System besteht aus zwei elektronischen Theodoliten (Kern E2; Zeiss ELTA4), deren Beobachtungswinkel von einem Rechner registriert werden. Bei den IMS-Theodoliten werden die Zielungen über das Augenokular des Theodolitenfernrohrs beobachtet. Durch Drehen von Stellschrauben am Instrument werden die Theodolite manuell auf die Zielpunkte ausgerichtet. Dieses und ähnliche Systeme haben sich bereits in zahlreichen Industrieinsätzen bewährt /23/, /72/, /73/.

Die Ergebnisse der GMS-Systemanalyse und der Vergleich zwischen dem IMS und dem GMS sind in der folgenden Liste zusammenfassend aufgeführt /68/:

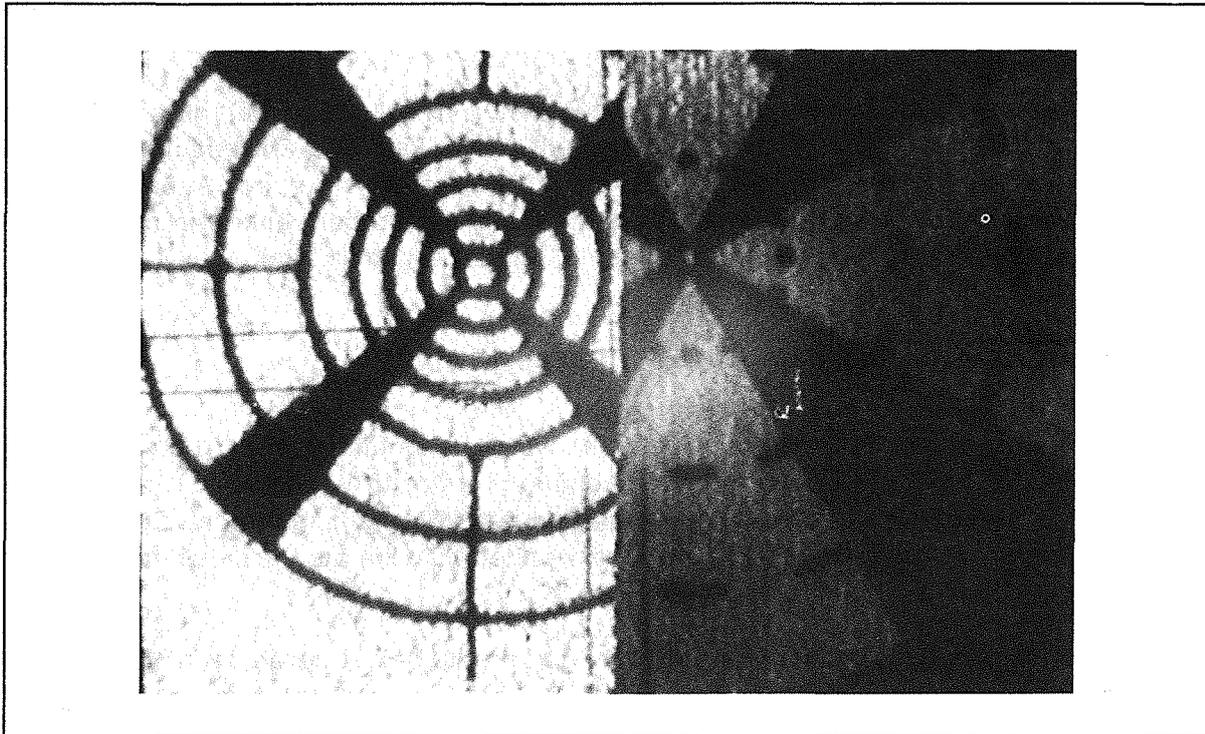


Abbildung 32. Standardzielmarke (rechts) und selbstentwickelte Retroreflexmarke (links). Zur Zielbeleuchtung ist ein Halogenspot (75 Watt) am Theodoliten angebracht.

- Die erreichbare Genauigkeit ist bei beiden Systemen annähernd gleich. Die bei der Netzausgleich errechneten mittleren Punktfehler sind im Bereich zwischen 0,05 mm (aufgeklebte Zielmarken) und 0,15 mm (Eckpunkte am Modell). Die begrenzte Einstellbarkeit des GMS-Theodoliten (s. Kap. 3.1) machte sich bei diesen Entfernungen < 10 m noch nicht negativ bemerkbar. Erst bei Zielweiten größer als 20 m muß damit gerechnet werden, daß der GMS-Theodolit nicht mehr exakt auf Zielpunkte ausgerichtet werden kann.
- Im Gegensatz zu den manuellen Instrumenten des IMS-Systems müssen die Ziele für die Beobachtung mit dem GMS-Kameratheodoliten sehr gut ausgeleuchtet sein. Der Hauptgrund dafür ist, daß das menschliche Auge wesentlich lichtempfindlicher ist als der CCD-Chip der eingebauten Kamera. Um den Beleuchtungsaufwand zu reduzieren, wurden die bereits oben erwähnten speziellen Zielmarken entwickelt (s.a. Abb. 32). Für die Zielbeleuchtung ist bei den Retroreflexmarken ein kleiner,

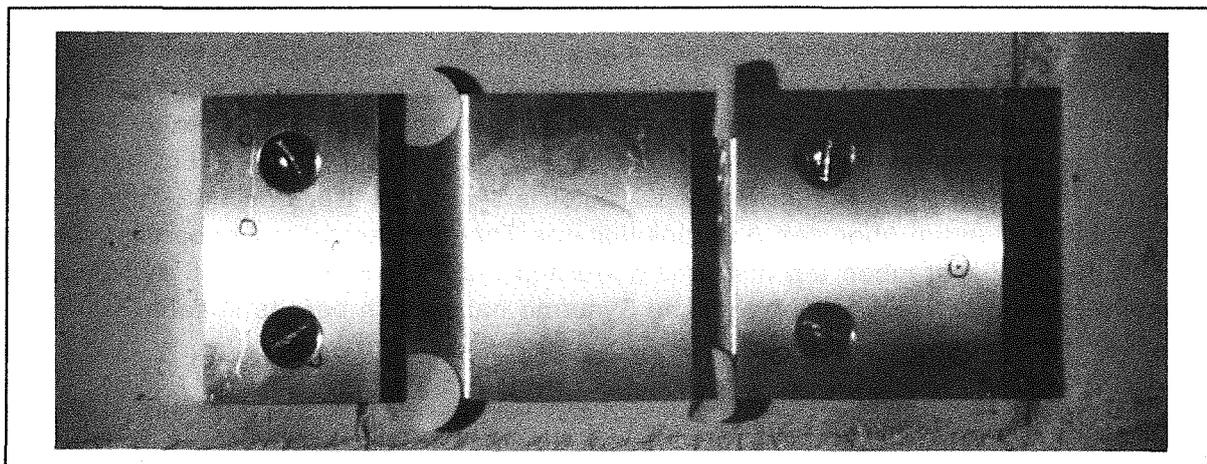


Abbildung 33. Aluminiummodell für die Genauigkeitsuntersuchung

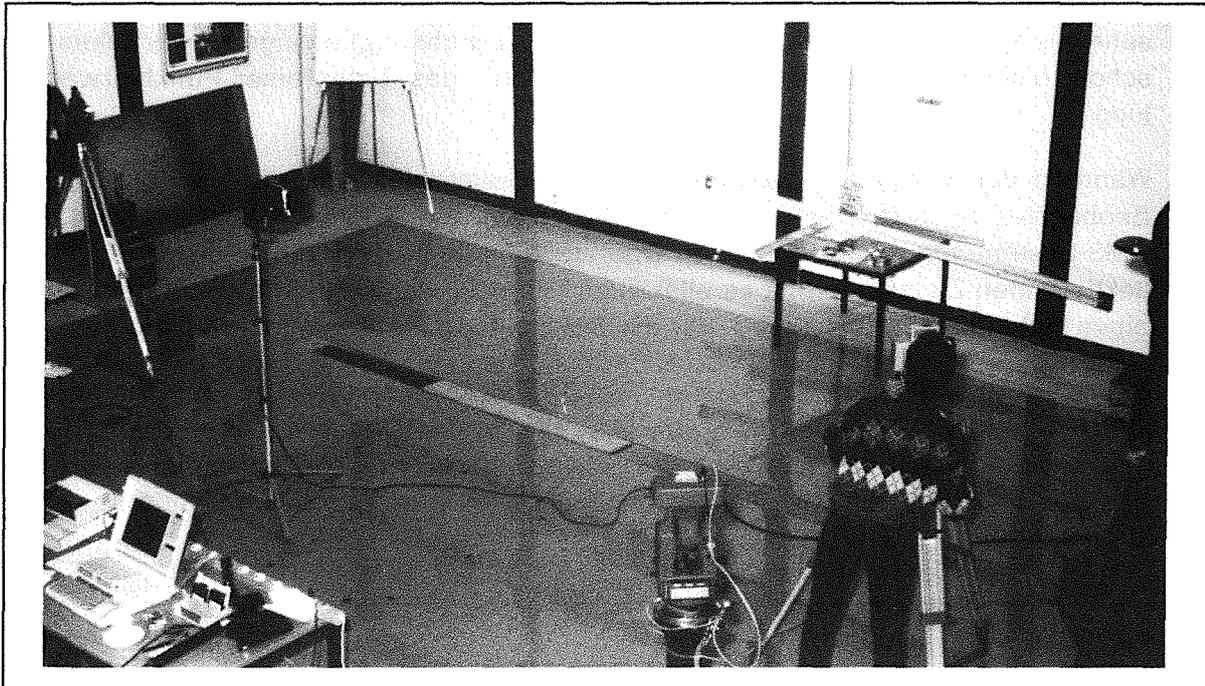


Abbildung 34. Vermessung des Testfelds mit dem IMS-System

am Theodolit befestigter Halogenspot ausreichend. Beim Anzielen der nicht retroreflektierenden übrigen Zielpunkte werden bei den GMS-Beobachtungen leistungsstarke Filmleuchten (2000 Watt) eingesetzt.

- Das Anzielen der Modelleckpunkte war sowohl mit dem IMS- als auch mit dem GMS-System problematisch. Eine der Hauptursachen für die Schwierigkeiten war, daß aufgrund der Bearbeitung teilweise keine scharfen spitzen Eckpunkte mehr vorhanden waren und der Operateur beim Anzielen einen fiktiven Eckpunkt einstellen mußte. Zusätzlich war je nach Standort, von den drei, den Eckpunkt definierenden Begrenzungsflächen, nur eine Fläche sichtbar. Beim Aufstellen der Beleuchtung für die Eckpunkte mußte beachtet werden, daß das Bild nicht durch Schattenwurf gestört wurde. Diese Schwierigkeiten beim Anzielen sind die Hauptursache für den bereits oben genannten größeren Punktfehler bei den Eckpunkten.
- Die am Modell angebrachten kleinen Bohrungen sind für beide Systeme als Zielmarkierungen gut geeignet. Für Zielweiten kleiner als 10 m sollte der Bohrungsdurchmesser allerdings nicht größer als 0,5 mm sein.
- Bei der Vermessung mit dem IMS-System, mußte den beiden Beobachtern der aktuell anzuzielende Punkt durch Zuruf mitgeteilt werden. Die verbale Beschreibung der Zielpunktpositionen kann mißverständlich sein und zu Punktverwechslungen führen. Zur Kontrolle werden beim IMS nach jeder Beobachtung die Punktkoordinaten mit einem räumlichen Vorwärtsschnitt bestimmt (s.a. Kap.2.1). An der überbestimmten Punkthöhe (s. Gl. [2.1.3]) können Anzielungenauigkeiten und Punktverwechslungen eingeschränkt erkannt werden. Diese Überprüfung versagt aber, wenn der falsch angezielte Punkt auf gleicher Höhe liegt wie der korrekte Zielpunkt. Eine solche Punktverwechslung, wie sie auch bei der IMS-Vermessung des Testfelds passierte, kann nur durch eine aufwendige Analyse der Ausgleichsergebnisse erkannt werden.

Beim GMS-System kann sich der Operateur die Zielpunktpositionen in der überlagerten Graphikunterstützung anzeigen lassen. Durch die graphische Markierung ist

die Gefahr, daß bei der GMS-Vermessung ein falscher Zielpunkt anvisiert wird, sehr gering. Auch die automatische Theodolitausrichtung verringert - vor allem bei schon relativ genau bekannter Zielpunktposition - das Risiko einer Punktverwechslung.

- Während das Vermessungsteam beim IMS idealerweise aus drei Personen (zwei Beobachter an den Theodoliten, ein Operateur am Rechner) besteht, wird das GMS-System von einem einzelnen Operateur bedient. Beim Anzielen von nicht reflektierenden Zielpunkten ist es allerdings hilfreich, wenn der GMS-Operateur durch einen Gehilfen unterstützt wird, der die Beleuchtung auf Kommando ausrichtet.
- Die relativ anstrengende Tätigkeit der am Theodolit stehenden IMS-Beobachter entfällt bei dem GMS-System, und die gesamte Systemsteuerung erfolgt von einem zentralen Leitstand aus (s.a. Abb. 35). Diese Steuer- und Recheneinheit kann wegen der beschränkten Kabellänge maximal 30 m vom Theodoliten entfernt aufgestellt werden.

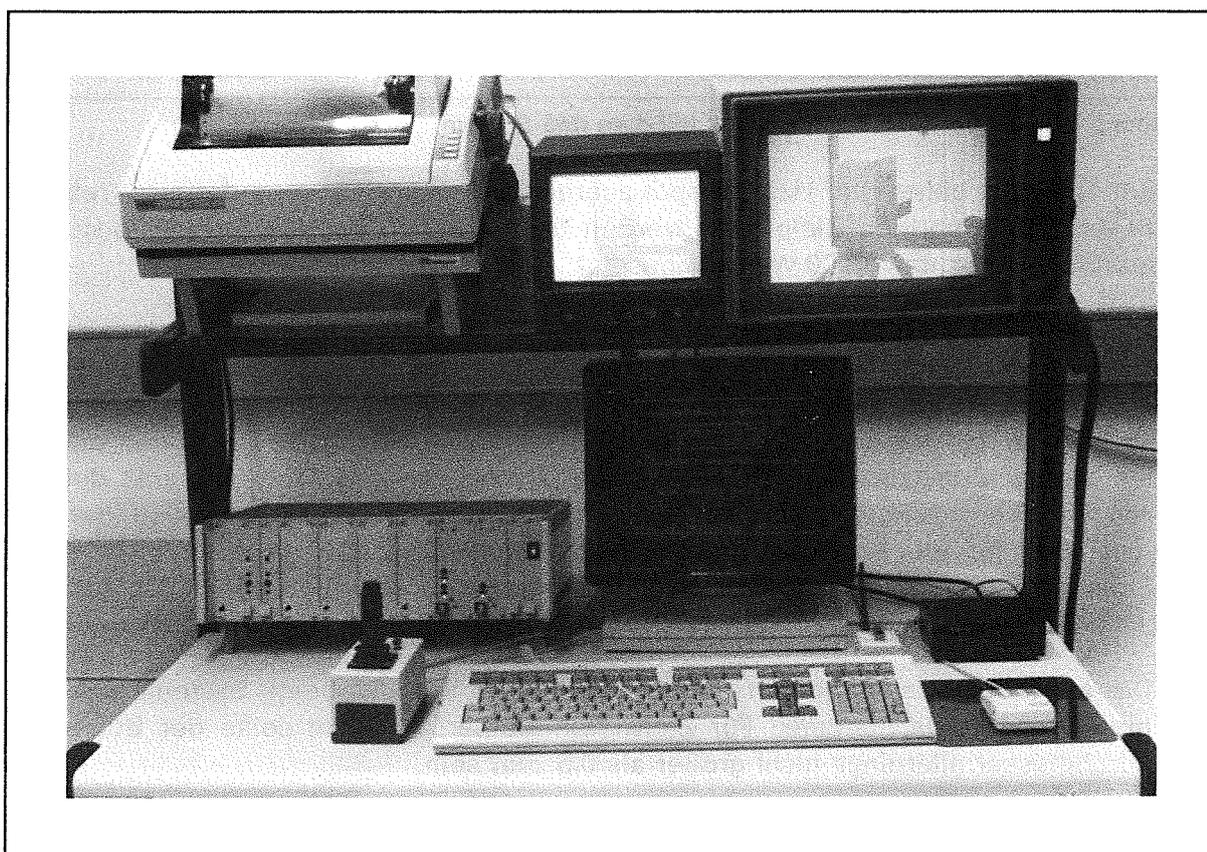


Abbildung 35. Zentraler Leitstand des GMS-Prototypsystems

- Mit den drei unterschiedlichen Einstellmöglichkeiten (Joystick, Maus, Cursortasten) für den GMS-Theodoliten, kann der GMS-Operateur individuell den Fahrbetrieb wählen, der ihm für die aktuelle Ausrichtung am geeignetsten erscheint.
- Da das GMS-Prototypsystem derzeit nur mit einem einzelnen Theodoliten ausgerüstet ist, muß gewährleistet sein, daß sich die Zielpunkte zwischen den zeitlich getrennten GMS-Beobachtungen nicht verändern. Durch den gleichzeitigen Einsatz von zwei Theodoliten entfällt diese Einschränkung beim IMS-System, und die

Punktkoordinaten können - wie bereits oben erwähnt - sofort nach den Zielungen berechnet werden.

Die Systemuntersuchung hat gezeigt, daß das GMS-Prototypsystem die gestellten Anforderungen erfüllt. Im Unterschied zu manuellen Theodolitmeßsystemen können beim GMS-System die kompletten Zielbeobachtungen von einem zentralen Leitstand aus gesteuert werden, und das GMS-Programm bietet dem Operateur beim Anzielen eine breite Palette von Unterstützungsfunktionen.

Eine Schwachstelle des GMS-Prototypsystems ist die erforderliche aufwendige Beleuchtung, wenn keine speziellen retroreflektierenden Zielmarken verwendet werden. Auch sind die manuellen Theodolitmeßsysteme mobiler als das GMS-Prototypsystem, bei dem wesentlich mehr Hardwarekomponenten benötigt werden.

7.2 Praktische Einsätze des GMS-Prototypsystems

Das GMS-System wurde auch im Bereich des Arbeitsschwerpunktes Handhabungstechnik am Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) bereits bei konkreten Meßaufgaben eingesetzt. Diese Meßkampagnen sind im folgenden erläutert:

1. Für die rechnergestützte Bahnplanung des sechs-achsigen Vielgelenkarms EMIR (Extended Multi-joint Robot /74/) muß der Achsabstand genau bekannt sein. Aufgrund von Fertigungstoleranzen bei den Armgliedern (Länge zwischen 3,5 m und 6,5 m) müssen deshalb die Achspositionen am komplett montierten Gerät vermessen werden. Ferner müssen zur Systeminitialisierung die genauen Achspositionen des EMIR-Systems in der zusammengefalteten Parkposition (s. Abb. 36) bekannt sein. Da mit konventionellen Meßmethoden (Maßband, Schieblehre, ...) die räumlichen Achskoordinaten nicht mit der geforderten Genauigkeit von 2 mm bestimmt werden können, wurde für die Vermessung das GMS-System eingesetzt /75/. Zu-

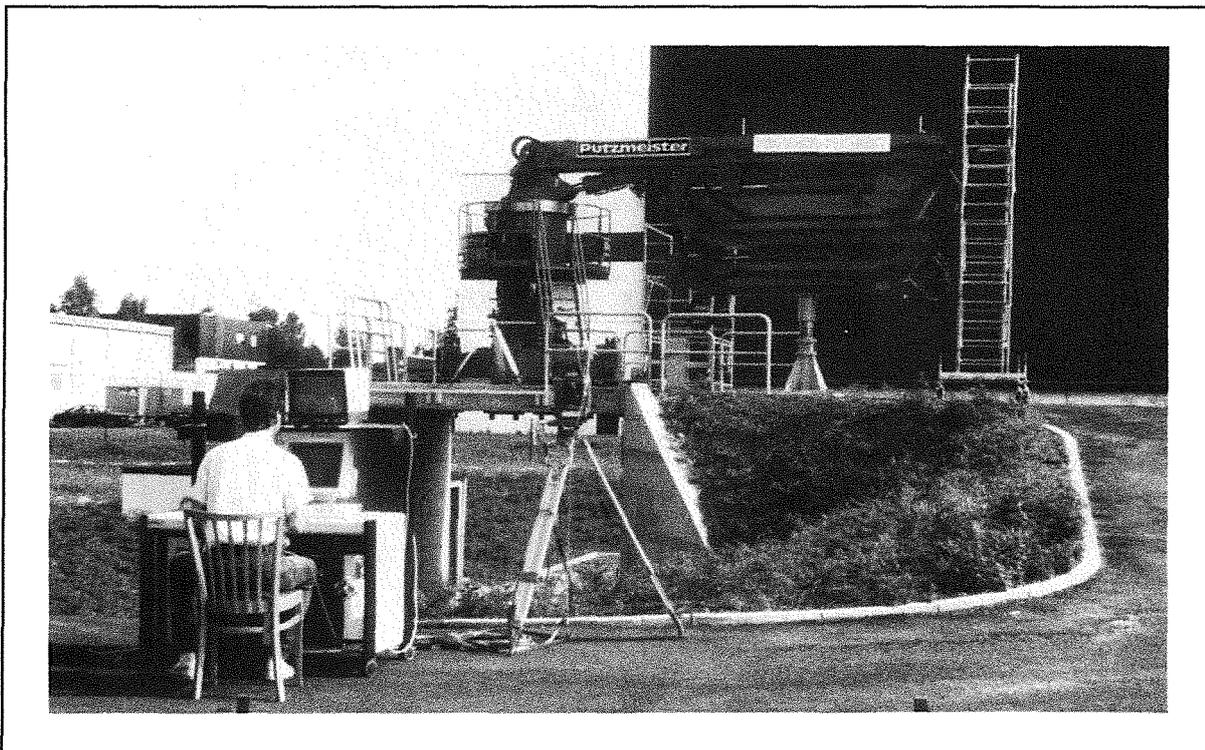


Abbildung 36. GMS-Vermessung am EMIR (Extended Multi-joint Robot)

sätzlich zu den Achspositionen wurden bei der Meßkampagne auch spezielle, am EMIR-Fundament angebrachte Zielmarkierungen vermessen. Diese dauerhaften Punktmarken repräsentieren ein ortsfestes Weltkoordinatensystem und können bei zukünftigen Messungen als Bezugspunkte verwendet werden. Trotz der relativ ungünstigen Beobachtungsbedingungen (fester Untergrund nur auf der Zufahrtsstraße, s.a. Abb. 36 auf Seite 79) war der mittlere Punktfehler der GMS-Messung für die Achspositionen kleiner als 1,9 mm /75/.

2. Das Ziel des KfK-Projekts CATROB (Computer Aided Teleoperation with ROBOts) ist die Automatisierung von ferngesteuerten Wartungs- und Reparaturarbeiten. In der CATROB-Prototypanlage wird ein Knickarmroboter mit sechs Gelenken eingesetzt /76/. Um den Aktionsraum des Roboters zu vergrößern, ist er an einem rechnergesteuerten Trägersystem montiert (s. Abb. 37). Dieser zwei-achsige Portalkran hat einen Verfahrbereich von $4 \times 4 \text{ m}^2$.

Für die Simulation von off-line programmierten Handhabungsvorgängen und zur Überwachung bei realen Roboterbewegungen wird das CATROB-System durch das graphische Simulationssystem KISMET (Kinematik Simulation, Monitoring and off-line programming Environment for Telerobotics) unterstützt /77/. Die Geometrie der zu simulierenden Teile erhält KISMET von einem CAD-System. Eine realitätsnahe Simulation ist allerdings nur dann möglich, wenn die Geometrie des CAD-Modells mit der tatsächlichen Istgeometrie übereinstimmt. Die KISMET-Simulation zeigt aber teilweise deutliche Unterschiede zu der realen CATROB-Szene. Eine Ursache für diese Diskrepanz kann darin liegen, daß das erstellte CAD-Modell, das im wesentlichen auf Zollstockmessungen basiert, zu ungenau ist.

Für eine erste Korrektur des CAD-Modells wurden die Positionen der vier Portalstützen und der beiden Schwenk-Neigeköpfe (SNK) für die Beobachtungskameras

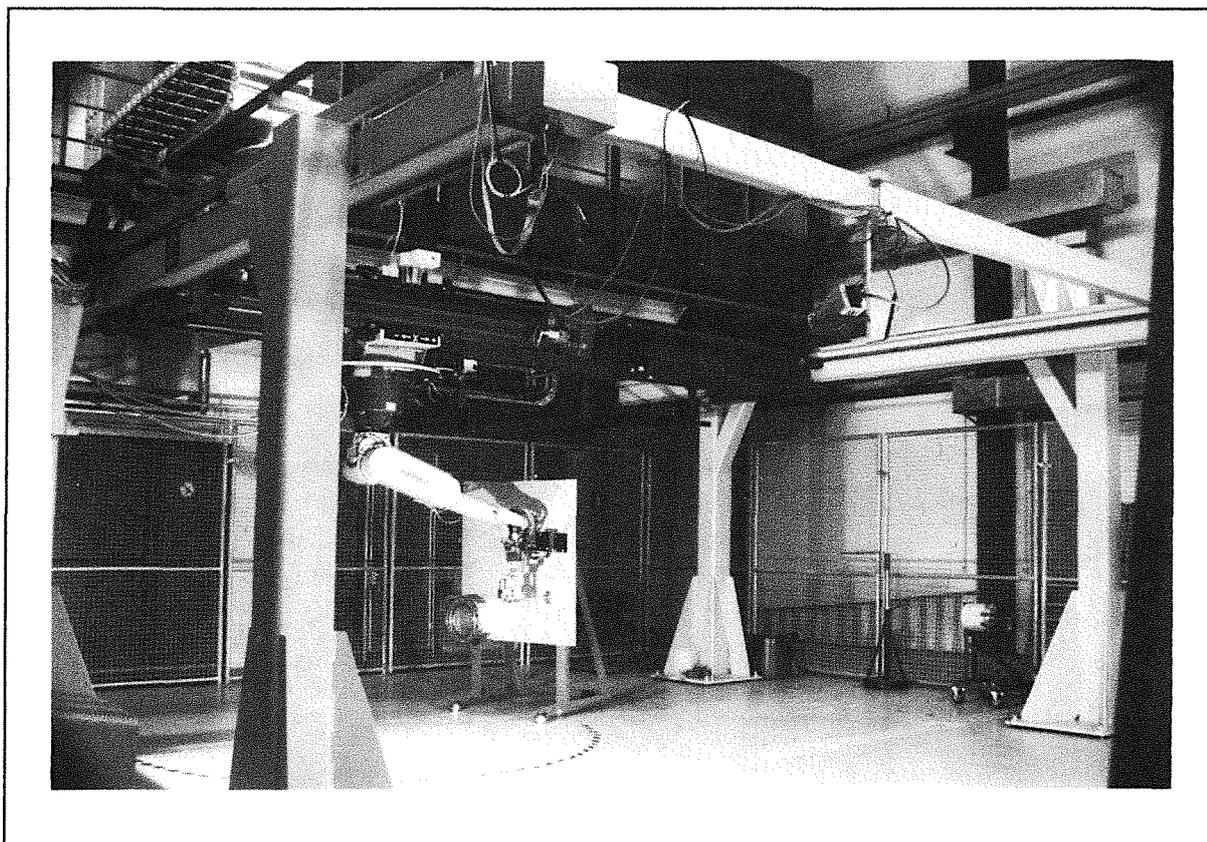


Abbildung 37. Das CATROB-Fernhandhabungssystem. 6-Achsen Industrieroboter am Portalkran.

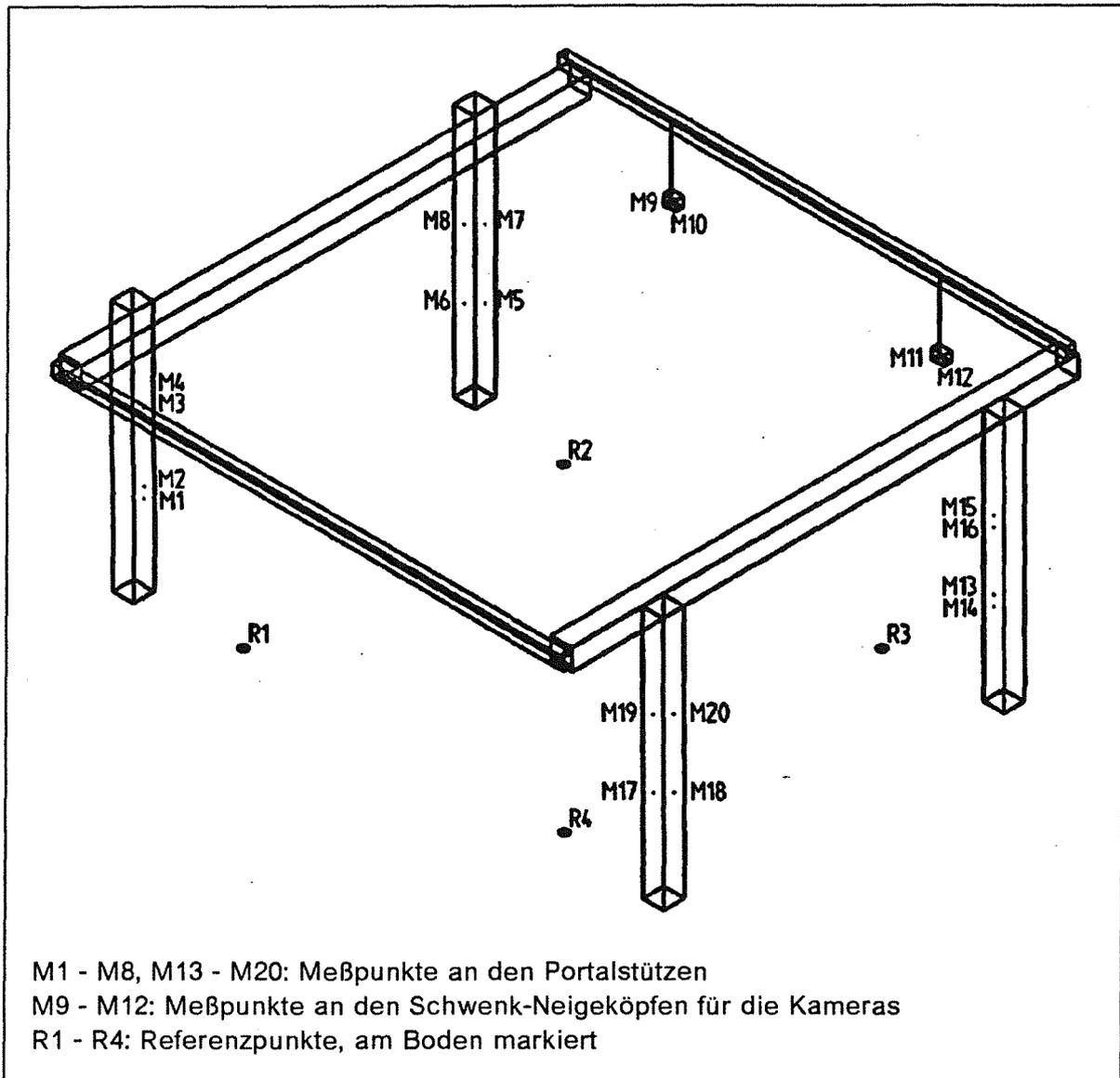


Abbildung 38. CAD-Modell des CATROB-Portalkrans für die GMS-Vermessung. Am CAD-Modell sind die Zielpunkte bereits markiert.

mit dem GMS-System vermessen /78/. Als charakteristische Größe wurden bei den Stützen die zentralen Achspositionen und bei den Schwenk-Neigeköpfen die Drehzentren bestimmt (s. Abb. 38 auf Seite 81). Da diese Positionen nicht direkt beobachtet werden können, wurden Zielmarken an den Stützenoberflächen und den SNK-Gehäusen angebracht.

Zur Bestimmung der genauen Arbeitshöhe des kopfüber aufgehängten Roboters (s. Abb. 37 auf Seite 80) wurde zusätzlich eine Zielmarkierung an der Roboterplattform angebracht und vermessen. Zur Festlegung des Bezugskordinatensystems wurden die vier Eckpunkte des CATROB-Arbeitsbereichs auf dem Boden dauerhaft markiert. Damit die Markierungen auch für weitere Vermessungskampagnen verwendet werden können, sind die aufgeklebten Marken durch Abdeckungen vor Beschädigungen geschützt.

Trotz ungünstiger Netzkonfiguration war der mittlere Punktfehler bei der CATROB-Vermessung im Bereich zwischen 0,07 - 0,14 mm. Dies ist eine weitere Bestätigung, daß die geforderte Genauigkeit mit dem GMS-System erreicht wird. Neben der Genauigkeit der GMS-Vermessung muß bei den daraus abgeleiteten Achs- und

Zentrumspositionen die Genauigkeit der Vermarkung mit berücksichtigt werden (äußere Genauigkeit). Zur Bestimmung der Stützenachsen aus den markierten Seitenmitten wurden ein orthogonaler Stützenquerschnitt, ebene Seitenflächen und eine, bezüglich den Verfahrrichtungen parallele Stützensausrichtung angenommen. Hierbei hat die vorausgesetzte Parallelität den stärksten Fehlereinfluß; eine Stützenverdrehung von 1 gon führt bereits zu einem Achsenversatz von 2,9 mm /78/.

3. Für dynamische Bahnvermessungen werden am Kernforschungszentrum Karlsruhe auch Wegsensoren eingesetzt, welche die Länge eines ausgezogenen Meßseils erfassen /79/. Die Länge des ausgezogenen Meßseils wird von einem Rechner mit einer Meßfrequenz von 100 Hz aufgezeichnet. Zur Bestimmung von 3D-Bahnkurven werden mindestens drei dieser Wegsensoren eingesetzt, deren Meßseile an dem Handhabungsgerät befestigt werden. Ist die Position der Meßseilgeber bekannt, kann die räumliche Bahnkurve aus den Sensorsignalen als Schnittpunkt dreier Kugel­flächen berechnet werden /80/.

Zur Bestimmung der Wegsensorpositionen wurde das GMS-System bereits in zwei Meßkampagnen eingesetzt. Neben einer Bahnvermessung am Vielgelenkarm EMIR /81/, wurde dieses Meßseil­system auch bei Vermessungen an einem Handhabungsgerät für den TFTR-Reaktor (Tokamak Fusion Test Reactor) in Princeton/USA eingesetzt /82/. Der sechsgliedrige Arm mit einer Gesamtlänge von 12 m wurde vom Kernforschungszentrum Karlsruhe entwickelt /83/. Vor dem Versand nach den USA wurde der Gelenkarm im KFK-Handhabungslabor zusammengebaut und getestet (s. Abb. 39). Im Rahmen dieser Test- und Abnahmephase wurden auch die Vermessungen durchgeführt.

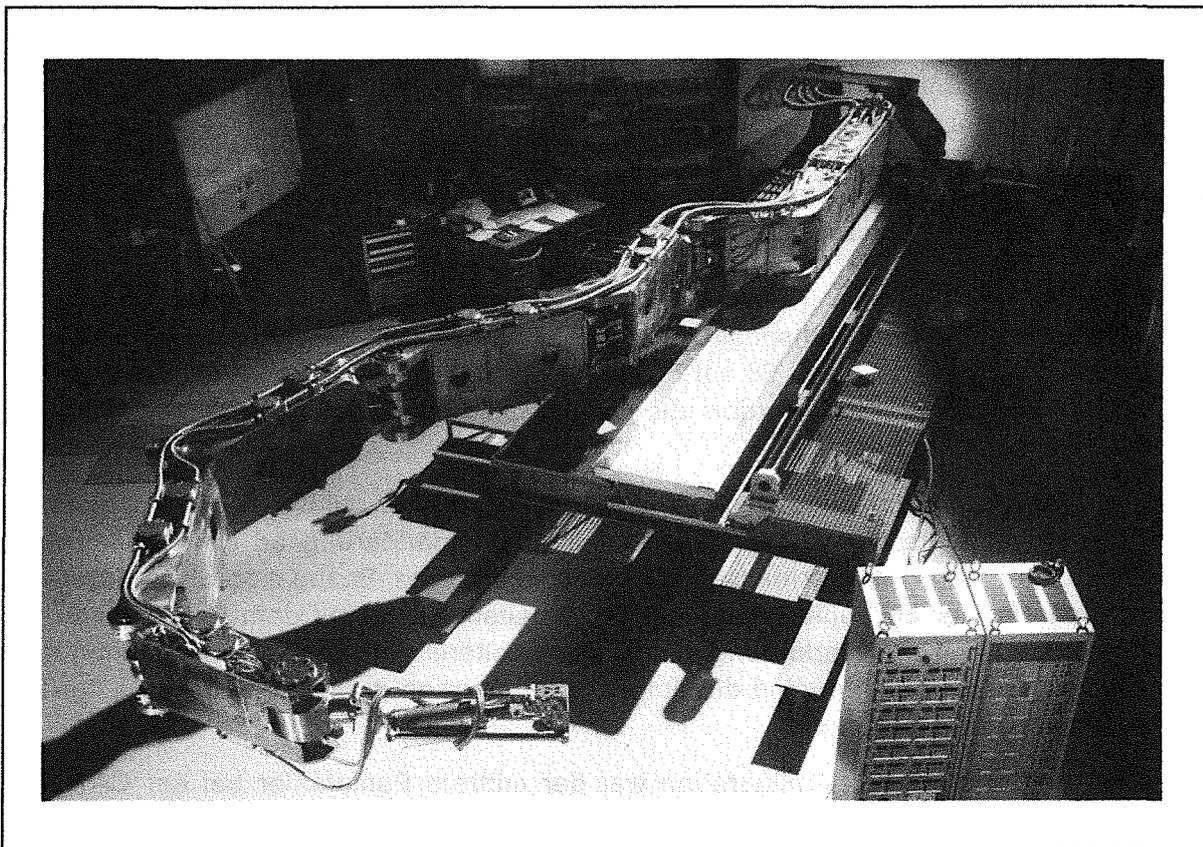


Abbildung 39. Manipulator für den TFTR-Reaktor. Zu Testzwecken wurde der Gelenkarm im KFK-Handhabungslabor aufgebaut.

Da das Auflösungsvermögen des Meßseilsystems auf maximal 10^{-3} abgeschätzt werden kann, wurden die Initialisierungsvermessungen mit dem GMS-System ohne genauigkeitssteigernde Zusatzbeobachtungen durchgeführt. Obwohl jeweils nur von zwei Theodolitstandpunkten aus und in einer Fernrohrlage beobachtet wurde, war der auf die Entfernung bezogene mittlere Punktfehler für alle Punkte immer kleiner als die geforderten 10^{-4} .

Auch im praktischen Einsatz hat sich das GMS-Prototypsystem bewährt, und die jeweils gestellten Meßanforderungen konnten erfüllt werden. Da nur für die CATROB-Vermessung ein geeignetes CAD-Modell (s. Abb. 38 auf Seite 81) verfügbar war, konnte bei den übrigen Meßkampagnen die bedienerunterstützende GMS-Graphik nur eingeschränkt eingesetzt werden. Trotzdem wurden auch bei diesen Vermessungen wichtige Erkenntnisse gewonnen, die bei der Weiterentwicklung des GMS-Prototypsystems hilfreich waren.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Geomtry Measurement System (GMS) ist ein komplett fernbedienbares und rechnergesteuertes Vermessungssystem. Mit dem aufgebauten GMS-Prototypsystem konnte nachgewiesen werden, daß die an das System gestellten Anforderungen (s. Kap.1.0) erfüllt bzw. übertroffen werden. Vergleicht man den GMS-Prototypen mit den Industriemeßsystemen SPACE /8/ oder ATMS /9/, so sind besonders die folgenden speziellen GMS-Fähigkeiten zu nennen:

- **Anbindung an CAD-Systeme**
Da für den Datenaustausch CAD-GMS die neutrale IGES-Schnittstelle eingesetzt wird, können Modelle von allen CAD-Systemen mit dem GMS-System bearbeitet werden - vorausgesetzt diese CAD-Systeme unterstützen die IGES-Schnittstelle.
- **Automatische Horizontiereinrichtung**
Durch die Horizontierungsplattform ALF entfällt die zeitaufwendige manuelle Instrumentenhorizontierung über Stellspindeln am Dreifuß des Theodoliten.
- **Bedienerunterstützende Graphik**
Gestützt auf die CAD-Daten bietet die dem Videobild überlagerte Graphik eine breite Palette von Unterstützungsfunktionen, die der Operateur wahlweise aktivieren kann.

Die Systeme SPACE und ATMS sind dafür konzipiert, spezielle Zielmarkierungen automatisch zu erkennen und zu vermessen. Bei dem im Rahmen dieser Arbeit erstellten GMS-Prototypsystem wird der Theodolit nur auf die vorgegebenen Sollpositionen der Zielpunkte automatisch ausgerichtet. Unterstützt durch zahlreiche GMS-Funktionen wird das exakte Anzielen der Punkte vom Operateur gesteuert. Es können somit auch Zielpunkte mit dem GMS-System vermessen werden, die durch Bildverarbeitungstechniken nicht oder nur schwer zu erkennen sind. Ein wesentliches Leitmotiv bei der Entwicklung des GMS-Programms war es, bei der Visur die flexiblen optischen Fähigkeiten des menschlichen Auges auszunützen, aber den Operateur bei den Einstellungen stark durch den Rechner zu unterstützen.

Ein bisher noch nicht optimal gelöstes Problem ist die Zielbeleuchtung bei den GMS-Beobachtungen. Besonders bei der Anzielung von nicht retroreflektierenden Zielen (erforderliche Beleuchtungsstärke ca. 600 Lux) werden bisher leistungsstarke Filmleuchten eingesetzt, die manuell auf das Vermessungsobjekt ausgerichtet werden. Als Vorversuch für eine noch zu entwickelnde, automatisch mitgeführte Beleuchtungseinrichtung wurden am Theodoliten Halogenspots befestigt. Diese Tests haben gezeigt, daß eine am Theodoliten angebrachte nachgeführte Beleuchtungseinrichtung mit konventionellen Halogenspots für die Objektbeleuchtung bei Zielentfernungen bis 10 m ausreichend ist.

Zur Reduzierung der GMS-Hardware wird derzeit die auf dem INTEL-Rechner implementierte Software auf dem GMS-Graphikrechner installiert. Nach Beendigung dieser Arbeiten wird für das GMS-System nur noch ein einziger IBM-PC-kompatibler Rechner erforderlich sein.

Bei der GMS-Graphik werden bisher alle Modellkanten dargestellt, auch wenn sie im Kamerabild nicht sichtbar sind. Da die Darstellung dieser unsichtbaren Kanten - besonders bei höherer Modellkomplexität - verwirrend sein kann, muß die GMS-Graphik noch durch eine Funktion ergänzt werden, die erkennt, ob die Linien ganz oder teilweise ver-

deckt sind /84/. Diese Sichtbarkeitsuntersuchung sollte allerdings optional ein- und ausschaltbar sein, da die erforderlichen Berechnungen sehr zeitaufwendig sind.

Bei der derzeitigen GMS-Prototypversion ist es erforderlich, daß sämtliche Zielpunkte von allen Theodolitstandpunkten aus anvisiert werden. Zur Erhöhung der Flexibilität, soll diese Einschränkung bei der geplanten Überarbeitung der GMS-Programme beseitigt werden.

In der bisherigen Ausbaustufe schickt das GMS-Prototypsystem die gemessenen Istpositionen der Zielpunkte an das CAD-System; die daraus resultierenden Modellveränderungen müssen manuell mit dem graphischen Editor des CAD-Systems korrigiert werden. In Zukunft ist geplant, daß die Korrektur der CAD-Modelle automatisch erfolgt. Methoden und Strategien für diese rechnergesteuerte Modellanpassung sollen in einer nachfolgenden Arbeit entwickelt werden.

Da das GMS-Prototypsystem bisher nur mit einem Theodoliten ausgestattet ist, muß garantiert sein, daß sich die Zielpunktpositionen während den GMS-Beobachtungen nicht verändern. Um das System zu ergänzen, ist bereits ein zweiter motorisierter Kamera-Theodolit (Wild T3000V /9/) beschafft worden. Die Arbeiten zur Integration dieses Instruments in das GMS-System sind noch nicht abgeschlossen.

Ist der zweite Theodolit integriert, können die Zielpunktkoordinaten auch unmittelbar nach Registrierung der Beobachtungswinkel berechnet werden. Für diese online Berechnungen ist beabsichtigt, ein Verfahren auf der Basis der sequentiellen Netzausgleichung zu implementieren /85/.

Zur Erweiterung der GMS-Fähigkeiten ist geplant, die GMS-Software durch digitale Bildverarbeitungstechniken zur automatischen Zielpunkterkennung zu ergänzen. Durch einen zusätzlichen Eintrag in der GMS-Eingabedatei werden dann die Punkte zusätzlich gekennzeichnet, ob die exakte Visur wie bisher durch den Operateur erfolgt, oder ob dieser Punkt speziell markiert ist und somit die Beobachtungswinkel vollautomatisch bestimmt werden können.

Mit den oben aufgeführten Verbesserungen und Ergänzungen werden die Flexibilität und die Einsatzmöglichkeiten des GMS-Systems weiter gesteigert. Bereits in seiner jetzigen Ausbaustufe hat sich das GMS-Prototypsystem bewährt, und auch die Industrie zeigt sich an den GMS-Entwicklungen interessiert. Über eine konkrete Verwertung der GMS-Entwicklungen durch Industriepartner kann aber zum jetzigen Zeitpunkt noch keine definitive Aussage gemacht werden.

Anhang A. Räumlicher Rückwärtsschnitt

Beim Rückwärtseinschneiden (s. Abb. 40) werden die Theodolitpositionen durch das Anzielen von mindestens drei Referenzpunkten bestimmt. Bei den folgenden Betrachtungen wird nicht mehr zwischen den Theodoliten T_1 und T_2 unterschieden, da der Rechenweg für beide Standpunkte identisch ist. Die Positionen der Referenzpunkte R_1, R_2, R_3 sind bzgl. des raumfesten xyz-Koordinatensystems bekannt und somit können die Theodolitkoordinaten x_T, y_T, z_T aus den Referenzpunktbeobachtungen berechnet werden [12]. Bei dem Verfahren nach Collins [86] werden die Theodolitkoordinaten x_T, y_T zunächst durch eine zweidimensionale Betrachtung bestimmt. Die dafür erforderlichen Berechnungen sind in den nachfolgenden Gleichungen [A.1] - Gl. [A.12] beschrieben. Nach der Lagebestimmung kann dann die Instrumentenhöhe z_T ausgleichend bestimmt werden (s. Gl. [A.13] - Gl. [A.16]).

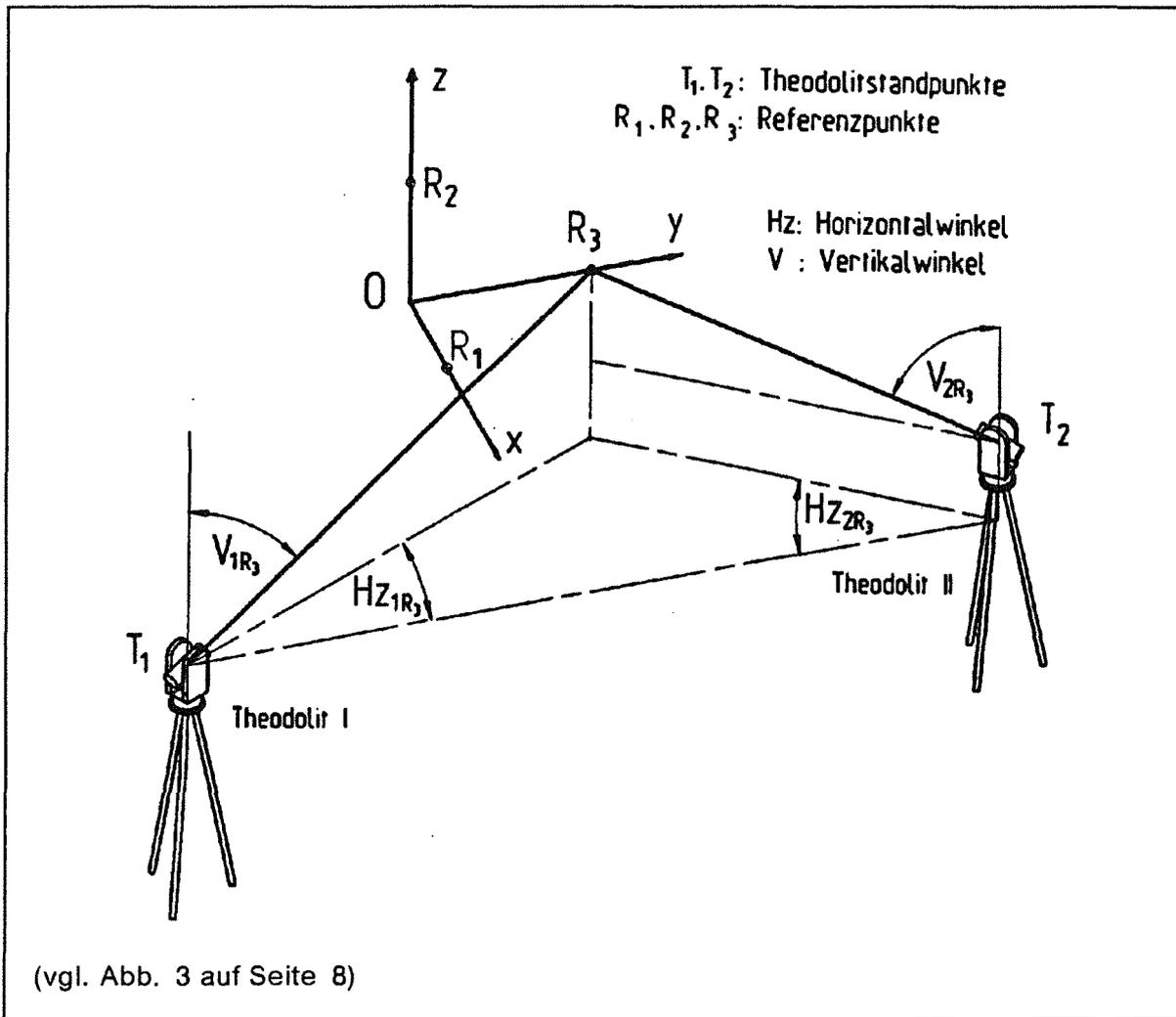


Abbildung 40. Systemkonfiguration beim Rückwärtseinschneiden

Berechnung der Richtungswinkel $t_{R_1R_3}$, t_{R_1O} , $t_{R_3R_1}$ und t_{R_3O} (s. Abb. 41 auf Seite 88):

$$\bar{t}_{R_1R_3} = \arctan \left[\frac{x_{R_3} - x_{R_1}}{y_{R_3} - y_{R_1}} \right] \quad [A.1]$$

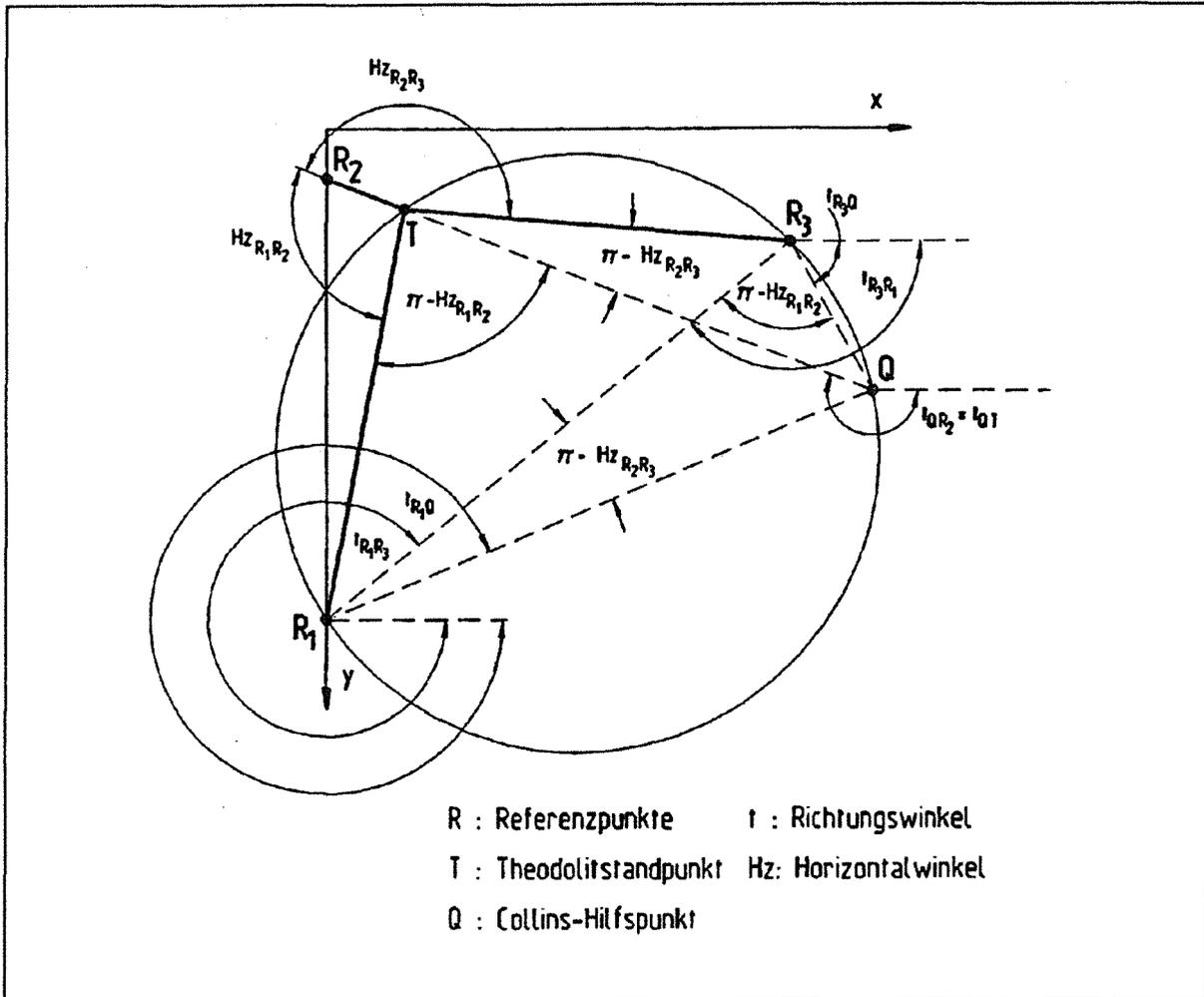


Abbildung 41. Ebener Rückwärtsschnitt für die Lagebestimmung. Die Referenzpunkte R_1, R_2, R_3 und der Theodolitstandpunkt T sind auf die xy-Ebene projiziert.

Abhängig von der Lage der Punkte R_1 und R_3 müssen zur Bestimmung von $t_{R_1R_3}$ noch Vielfache von $\frac{\pi}{2}$ addiert werden:

| | | | | | | | |
|---------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|
| $x_{R_3} - x_{R_1}$ | ≥ 0 | ≥ 0 | < 0 | < 0 | > 0 | < 0 | [A.2] |
| $y_{R_3} - y_{R_1}$ | > 0 | < 0 | < 0 | > 0 | $= 0$ | $= 0$ | |
| $t_{R_1R_3} =$ | $\bar{t}_{R_1R_3}$ | $\bar{t}_{R_1R_3} + \frac{\pi}{2}$ | $\bar{t}_{R_1R_3} + \pi$ | $\bar{t}_{R_1R_3} + \frac{3\pi}{2}$ | 0 | π | |

$$t_{R_1Q} = t_{R_1R_3} + (\pi - Hz_{R_2R_3}) \quad [A.3]$$

$$t_{R_3R_1} = \begin{cases} t_{R_1R_3} + \pi & \text{für } 0 \leq t_{R_1R_3} < \pi \\ t_{R_1R_3} - \pi & \text{für } \pi \leq t_{R_1R_3} < 2\pi \end{cases} \quad [A.4]$$

$$t_{R_3Q} = t_{R_3R_1} - (\pi - Hz_{R_1R_2}) \quad [A.5]$$

Zur Berechnung der Hilfspunktkoordinaten x_Q und y_Q werden die trigonometrischen Gleichungen

$$\tan t_{R_3Q} = \frac{x_Q - x_{R_3}}{y_Q - y_{R_3}} \quad [\text{A.6}]$$

und

$$\tan(2\pi - t_{R_1Q}) = -\tan t_{R_1Q} = \frac{x_{R_1} - x_Q}{y_Q - y_{R_1}} \quad [\text{A.7}]$$

nach x_Q und y_Q aufgelöst:

$$y_Q = \frac{x_{R_3} - x_{R_1} + y_{R_1} \tan t_{R_1Q} - y_{R_3} \tan t_{R_3Q}}{\tan R_{R_1Q} - \tan R_{R_3Q}} \quad [\text{A.8}]$$

$$x_Q = x_{R_1} + (y_Q - y_{R_1}) \tan t_{R_1Q} \quad [\text{A.9}]$$

Die Berechnung der Richtungswinkel $t_{QR_2} = t_{TR_2}$ kann analog der Berechnung von $t_{R_1R_3}$ (Gl. [A.2]) durchgeführt werden.

Mit den Richtungswinkeln

$$\begin{aligned} t_{TR_1} &= t_{TR_2} - HZ_{R_1R_2} \\ t_{TR_3} &= t_{TR_2} + HZ_{R_2R_3} \end{aligned} \quad [\text{A.10}]$$

und der π -Periodizität der Tangensfunktion ($\tan t_{R_1T} = \tan t_{TR_1}$; $\tan t_{R_3T} = \tan t_{TR_3}$) können die Theodolitkoordinaten y_T und x_T berechnet werden:

$$y_T = \frac{x_{R_3} - x_{R_1} + y_{R_1} \tan t_{R_1T} - y_{R_3} \tan t_{R_3T}}{\tan t_{R_1T} - \tan t_{R_3T}} \quad [\text{A.11}]$$

$$x_T = x_{R_1} + (y_T - y_{R_1}) \tan t_{R_1T} \quad [\text{A.12}]$$

Dieses Verfahren zur Bestimmung von x_T und y_T versagt aber, wenn die Referenzpunkte $R_1(x,y)$, $R_2(x,y)$, $R_3(x,y)$ und der Theodolitstandpunkt $T(x,y)$ auf einem gemeinsamen Kreis K liegen. In diesem Fall sind für alle $T(x,y) \in K$ die Beobachtungswinkel $HZ_{R_1R_2}$ bzw. $HZ_{R_2R_3}$ immer gleich (Winkel über gleichen Sehnen). Der durch die Referenzpunkte $R_1(x,y)$, $R_2(x,y)$ und $R_3(x,y)$ aufgespannte Kreis wird auch gefährlicher Kreis genannt. Die Lagebestimmung wird bereits ungenau, wenn $T(x,y)$ in der Nähe dieses Kreises liegt /86/. Fehlertheoretisch optimal ist es, wenn sich der Theodolit im Zentrum dieses Kreises befindet und die Referenzpunkte $R_1(x,y)$, $R_2(x,y)$ und $R_3(x,y)$ ein gleichseitiges Dreieck bilden /87/.

Mit der projizierten Strecke

$$\overline{R_1T'} = \sqrt{(x_{R_1} - x_T)^2 + (y_{R_1} - y_T)^2} \quad [\text{A.13}]$$

kann der Höhenversatz

$$\Delta z_1 = \frac{\overline{R'_1 T'}}{\tan V_{R_1}} \quad [\text{A.14}]$$

und somit die aus der Zenitdistanz V_{R_1} berechnete z-Koordinate des Theodoliten bestimmt werden:

$$z_T = z_{R_1} + \Delta z_{R_1} \quad [\text{A.15}]$$

Werden zur Bestimmung von z_T alle drei beobachteten Zenitdistanzen verwendet, kann diese Theodolitkoordinate ausgleichend berechnet werden:

$$z_T = \frac{1}{3} \left[z_{R_1} + \frac{\sqrt{(x_{R_1} - x_T)^2 + (y_{R_1} - y_T)^2}}{\tan V_{R_1}} \right] + \frac{1}{3} \left[z_{R_2} + \frac{\sqrt{(x_{R_2} - x_T)^2 + (y_{R_2} - y_T)^2}}{\tan V_{R_2}} \right] + \frac{1}{3} \left[z_{R_3} + \frac{\sqrt{(x_{R_3} - x_T)^2 + (y_{R_3} - y_T)^2}}{\tan V_{R_3}} \right] \quad [\text{A.16}]$$

Anhang B. Der Linearencoder des Fokusantriebs

Mit einem entsprechenden Befehl liefert die Fokussteuerung dem GMS-Programm die aktuelle Position der Fokuslinse. Die von der Fokussteuerung gelieferte Positionsangabe ist eine vierstellige Zahl in hexadezimaler Darstellung. Diese Fokusinkremente i_F sind ein eindeutiges Maß für die aktuelle Fokuseinstellung. Der Zusammenhang zwischen den gelesenen Fokusinkrementen i_F und der eingestellten Fokulentfernung a_F [m] wurde experimentell ermittelt. Das Videobild wurde auf eine Vielzahl von bekannten Objektdistanzen fokussiert und die jeweils angezeigten Fokusinkremente wurden registriert. Aus den Wertepaaren kann der funktionale Zusammenhang $a_F(i_F)$ hergeleitet werden. Bei Zielweiten unter 20 m ist dieser Zusammenhang näherungsweise eine gebrochen rationale Funktion zweiter Ordnung:

$$a_F = \frac{E_1 \cdot \hat{i}_F^2 + E_2 \cdot \hat{i}_F + E_3}{E_4 \cdot \hat{i}_F^2 + E_5 \cdot \hat{i}_F + E_6} \quad [B.1]$$

mit $\hat{i}_F = -0,0000025 \cdot i_F$

Für die Fokusparameter E_i wurden folgende Werte ermittelt:

$$\begin{aligned} E_1 &= 1,368908324 \\ E_2 &= -0,022437797 \\ E_3 &= 0,001607617 \\ E_4 &= 1 \\ E_5 &= 0,135648678 \\ E_6 &= 0,004155355 \end{aligned}$$

Zur Einstellung der Fokussierlinse auf eine vorgegebene Zielentfernung a_F [m] muß der Fokussteuerung die einzustellende Position durch die entsprechende vierstellige Hexzahl i_F mitgeteilt werden. Zur Berechnung von $i_F(a_F)$ muß die Gleichung [B.1] invertiert werden:

$$i_F = \left\{ \begin{array}{l} 4 \cdot 10^5 (A - \sqrt{A^2 - B}) \text{ für } N > 0 \\ 4 \cdot 10^5 \frac{E_3 \cdot E_4 - E_1 \cdot E_6}{E_1 \cdot E_5 - E_2 \cdot E_4} \text{ für } N = 0 \\ 4 \cdot 10^5 (A + \sqrt{A^2 - B}) \text{ für } N < 0 \end{array} \right\} \quad [B.2]$$

$$\begin{aligned} \text{mit } N &= a_F \cdot E_4 - E_1 \\ A &= \frac{a_F \cdot E_5 - E_2}{2 \cdot N} \\ B &= \frac{a_F \cdot E_6 - E_3}{N} \end{aligned}$$

Anhang C. Korrektur der Beobachtungswinkel

Bei konventionellen optischen Theodoliten muß das Theodolitfadenkreuz exakt auf den Zielpunkt ausgerichtet werden. Ist der Theodolit mit einer CCD-Kamera ausgerüstet, können die Beobachtungswinkel auch bestimmt werden, ohne daß der Theodolit exakt auf das Ziel ausgerichtet wird.

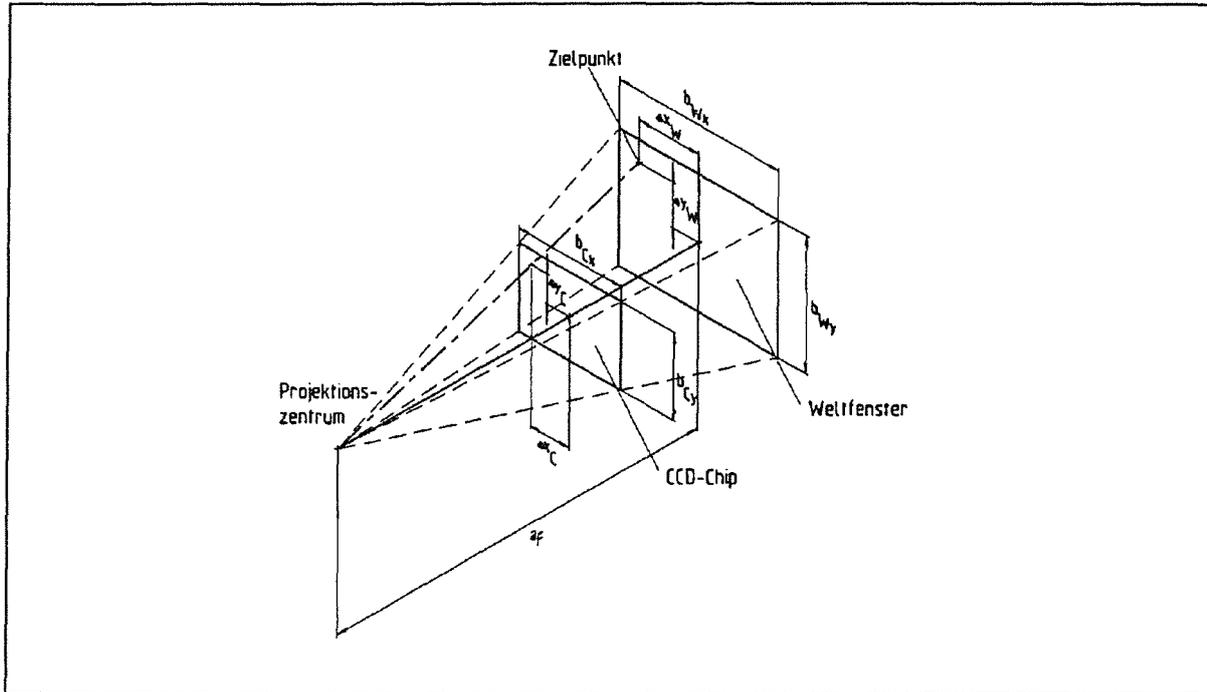


Abbildung 42. Abbildungsgeometrie der CCD-Kamera (Lochkameramodell)

Der korrigierte Horizontalwinkel H_{z_k} kann aus dem gemessenen horizontalen Theodolitwinkel H_z , dem Fokusabstand a_F und dem Bildversatz Δx_W berechnet werden:

$$H_{z_k} = H_z + \delta H_z = H_z + \arctan \frac{\Delta x_W}{a_F} \quad [C.1a]$$

Entsprechend gilt für den Vertikalwinkel:

$$V_k = V + \delta V = V + \arctan \frac{\Delta y_W}{a_F} \quad [C.1b]$$

Mit dem Strahlensatz können die Abstände Δx_W bzw. Δy_W aus dem registrierten Pixelversatz Δx_C bzw. Δy_C berechnet werden:

$$\Delta x_W = \frac{b_{Wx}}{b_{Cx}} \frac{\Delta x_C}{p_x} b_{Cx} \quad [C.2a]$$

mit $p_x =$ horizontale Auflösung des digitalisierten Bildes

$$\Delta y_W = \frac{b_{Wy}}{b_{Cy}} \frac{\Delta y_C}{p_y} b_{Cy} \quad [C.2b]$$

mit $p_y =$ vertikale Auflösung des digitalisierten Bildes

Anhang D. Freie Netzausgleichung mit dem Programm NETZ3D

Bei dem am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe entwickelten Programm NETZ3D wird eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen durchgeführt /88/, d.h. die Beobachtungen werden als lineare bzw. linearisierte Funktion der Unbekannten dargestellt. Für dieses funktionale Modell gilt in allgemeiner Darstellung:

$$\tilde{l} = A \tilde{x} \quad [D.1]$$

mit \tilde{l} : wahre Beobachtungen
 \tilde{x} : wahre Unbekannte
 A : Konfigurationsmatrix (Designmatrix)

Bei den GMS-Vermessungen sind Horizontalwinkel, Vertikalwinkel und Streckenlängen die Beobachtungsgrößen; die Zielpunktkoordinaten, die Theodolitpositionen und die Orientierung der Theodolite (Nullrichtung der Horizontalteilkreise) sind die gesuchten Unbekannten. Die linearisierten funktionalen Zusammenhänge zwischen den Beobachtungen l und den Unbekannten x sind in /89/ für die dreidimensionale Netzausgleichung hergeleitet. Die Koeffizienten dieser Gleichungen sind die Elemente der Konfigurationsmatrix A . Durch Einführen der tatsächlichen Beobachtungen l , folgt aus der hypothetischen Beziehung Gl. [D.1]:

$$\hat{l}_{n,1} = l + v = A \hat{x}_{n,u,1} \quad [D.2]$$

mit \hat{l} : Vektor der geschätzten (ausgeglichenen) Beobachtungen
 \hat{x} : Vektor der geschätzten Unbekannten
 l : Vektor der tatsächlichen Beobachtungen
 v : Vektor der Verbesserungen
 n : Anzahl der Beobachtungen
 u : Anzahl der Unbekannten

Die Genauigkeiten der Beobachtungen werden durch das stochastische Modell beschrieben:

$$\underline{C}_{ll} = \sigma_0^2 \underline{Q}_{ll} = \sigma_0^2 \underline{P}_{ll}^{-1} \quad [D.3]$$

mit \underline{C}_{ll} : Varianz – Kovarianzmatrix
 σ_0^2 : Varianzfaktor a priori
 \underline{Q}_{ll} : Kofaktorenmatrix der Beobachtungen
 \underline{P}_{ll} : Gewichtsmatrix der Beobachtungen

Bei den GMS-Auswertungen mit NETZ3D wird der a priori Varianzfaktor auf $\sigma_0^2 = 10^{-6}$ festgesetzt. Zum Aufstellen der Gewichtsmatrix \underline{P}_{ll} wird für alle registrierten Beobachtungswinkel ein einheitlicher mittlerer Fehler von $\sigma_i = 0,2 \text{ mgon}$ vorgegeben. Werden Basislatten als Streckenbeobachtungen eingeführt, wird die Genauigkeitsangabe des Herstellers als mittlerer Fehler für die jeweilige Strecke eingesetzt (s.a. Kap. 3.3). Werden die Abstände zwischen den Referenzpunkten als bekannte Strecken in die Ausgleichung

chung verwendet, werden deren mittlere Fehler aus den Genauigkeitsangaben für die Referenzpunkte (s.a. Anhang F.5) bestimmt.

Unter der Annahme, daß keine Korrelation zwischen den Beobachtungen existiert, sind nur die Diagonalelemente der Kofaktoren- bzw. der Gewichtsmatrix besetzt. Somit können aus den vorgegebenen Beobachtungsgenauigkeiten die Matrixelemente bestimmt werden:

$$q_{ii} = \frac{1}{p_{ii}} = \frac{\sigma_i}{\sigma_0} \quad [D.4]$$

Die Minimierung der Verbesserungsquadratsumme (Ausgleichungsverfahren nach Gauß) führt bei gewichteten Beobachtungen zu der Forderung $v^T P v \rightarrow \text{Minimum}$ /90/. Verknüpft man diese Forderung mit dem funktionalen Modell (Gl. [D.2]), führt die Differentiation zu den sogenannten Normalgleichungen:

$$(A^T P A) \hat{x} - A^T P l = 0 \quad [D.5]$$

Gleichung [D.5] aufgelöst nach den Unbekannten \hat{x} :

$$\hat{x} = (A^T P A)^{-1} A^T P l = \underline{Q}_{\hat{x}\hat{x}} A^T P l \quad [D.6]$$

Mit der Kofaktorenmatrix $\underline{Q}_{\hat{x}\hat{x}}$ (s.a. Gl.[3.3.2]) kann der mittlere Koordinatenfehler für die ausgeglichenen Beobachtungen berechnet werden (s. Gl. [3.3.1]):

$$\hat{\sigma}_{\hat{x}_i} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{\hat{x}\hat{x}_i}} \quad [D.7]$$

$$\text{mit Varianzfaktor (a posteriori): } \hat{\sigma}_0^2 = \frac{v^T P v}{n - u}$$

Um die Gleichung [D.5] nach der Unbekannten \hat{x} aufzulösen, muß die Normalgleichungsmatrix $N = A^T P A$ invertiert werden. Die Normalgleichungsmatrix wird aber singular ($\det(N) = 0$), wenn keine Netzpunktkoordinaten festgehalten werden (absolute räumliche Lage des Netzes ist unbestimmt). Die Netzlagerung bei den GMS-Vermessungen (horizontierte Theodolite, Maßstab durch Streckenbeobachtungen festgelegt) verfügt über vier Freiheitsgrade: drei Translationen und eine Rotation um die z-Achse (Lot). Dieser Rangdefekt ($d=4$) muß durch d zusätzliche Bedingungen beseitigt werden. Bei den GMS-Auswertungen werden alle Referenz- und Meßpunkte als sogenannte Datumspunkte eingeführt. Die Lagerung des Netzes wird dann so optimiert, daß die mittleren Fehler für diese Datumspunkte minimal werden. Durch diese Teilspurminimierung (spur ($Q_{\hat{x}\hat{x}}$) $\rightarrow \text{Minimum}$ für die Datumspunkte) ist das Netz dann eindeutig gelagert.

Anhang E. IGES-Elemente die der GMS-Postprozessor interpretieren kann

In den folgenden Tabellen sind die zulässigen Einträge der IGES-Elemente aufgeführt, die der IGES-Postprozessor interpretieren kann. Im Anhang E.1 sind die Einträge in der DE-Section dargestellt, und die zulässigen PD-Parameter sind im Anhang E.2 aufgeführt.

E.1 DE-Parameter

| Kreisbogen | | | | | | | | | |
|------------------------|-----|-----|-----|--------------|---|-----|---|------------------------|-----|
| 100 | > 0 | 1 | 1-4 | ≥ 0 | 0 | ≥ 0 | 0 | 00010001 | > 0 |
| 100 | ≥ 0 | ≥ 0 | > 0 | 0 | * | * | * | > 0 | > 0 |
| Zusammengesetzte Kurve | | | | | | | | | |
| 102 | > 0 | 1 | 1-4 | ≥ 0 | 0 | 0 | 0 | 00000001 (00010001) | > 0 |
| 102 | ≥ 0 | ≥ 0 | > 0 | 0 | * | * | * | > 0 | > 0 |
| Gerade | | | | | | | | | |
| 110 | > 0 | 1 | 1-4 | ≥ 0 | 0 | ≥ 0 | 0 | 00010001 | > 0 |
| 110 | ≥ 0 | ≥ 0 | > 0 | 0 | * | * | * | > 0 | > 0 |
| Punkt | | | | | | | | | |
| 116 | > 0 | 1 | 1-4 | 7777 7778 | 0 | ≥ 0 | 0 | 00020001 (00030001) | > 0 |
| 116 | ≥ 0 | ≥ 0 | > 0 | 0 | * | * | * | > 0 | > 0 |
| Transformationsmatrix | | | | | | | | | |
| 124 | > 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 00010301 | > 0 |
| 124 | 0 | 0 | > 0 | 0 | * | * | * | > 0 | > 0 |
| Text | | | | | | | | | |
| 212 | > 0 | 1 | 1-4 | 7777 7778 | 0 | ≥ 0 | 0 | 00010101 | > 0 |
| 212 | ≥ 0 | ≥ 0 | > 0 | 0 | * | * | * | > 0 | > 0 |
| Teilbild | | | | | | | | | |
| 308 | > 0 | 1 | 1-4 | ≥ 0 | 0 | ≥ 0 | 0 | 00000201 | > 0 |
| 308 | ≥ 0 | ≥ 0 | > 0 | 0 | * | * | * | > 0 | > 0 |
| Beziehung | | | | | | | | | |
| 402 | > 0 | 1 | 1-4 | ≥ 0 | 0 | ≥ 0 | 0 | 00000001 00010001 | > 0 |
| 402 | ≥ 0 | ≥ 0 | > 0 | 5100 (7) | * | * | * | > 0 | > 0 |

Tabelle 6. Die zulässigen DE-Einträge der Elemente die vom GMS-Postprozessor interpretiert werden können. (Die mit * gekennzeichneten Felder werden vom Postprozessor überlesen)

E.2 PD-Parameter

| Nr. | Typ | Bedeutung des Parameters (In Klammern geschriebene Werte müssen zwingend eingetragen sein. Ist dies nicht der Fall, wird der Postprozessorlauf mit entsprechender Fehlermeldung abgebrochen) |
|-----|---------|---|
| 1 | Integer | Elementtypnummer (116) |
| 2 | Real | x_t -Koordinate des Punktes |
| 3 | Real | y_t -Koordinate des Punktes |
| 4 | Real | z_t -Koordinate des Punktes |
| 5 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Teilbild-Elemente (0) |
| 6 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Struktur-/Textelemente (0) |
| 7 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Eigenschaftselemente (0) |

Tabelle 7. PD-Satz des Elements Punkt

| Nr. | Typ | Bedeutung des Parameters (In Klammern geschriebene Werte müssen zwingend eingetragen sein. Ist dies nicht der Fall, wird der Postprozessorlauf mit entsprechender Fehlermeldung abgebrochen) |
|-----|---------|---|
| 1 | Integer | Elementtypnummer (110) |
| 2 | Real | x_t -Koordinate des Startpunktes |
| 3 | Real | y_t -Koordinate des Startpunktes |
| 4 | Real | z_t -Koordinate des Startpunktes |
| 5 | Real | x_t -Koordinate des Endpunktes |
| 6 | Real | y_t -Koordinate des Endpunktes |
| 7 | Real | z_t -Koordinate des Endpunktes |
| 8 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Struktur-/Textelemente (0) |
| 9 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Eigenschaftselemente (0) |

Tabelle 8. PD-Satz des Elements Gerade

| Nr. | Typ | Bedeutung des Parameters (In Klammern geschriebene Werte müssen zwingend eingetragen sein. Ist dies nicht der Fall, wird der Postprozessorlauf mit entsprechender Fehlermeldung abgebrochen) |
|-----|---------|---|
| 1 | Integer | Elementtypnummer (100) |
| 2 | Real | Parallelverschiebung z_t der Kreisbogendefinitionsebene x_t, y_t zur x,y -Ebene des Modellraums |
| 3 | Real | x_t -Koordinate des Kreismittelpunktes |
| 4 | Real | y_t -Koordinate des Kreismittelpunktes |
| 5 | Real | x_t -Koordinate des Startpunktes |
| 6 | Real | y_t -Koordinate des Startpunktes |
| 7 | Real | x_t -Koordinate des Endpunktes |
| 8 | Real | y_t -Koordinate des Endpunktes |
| 9 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Struktur-/Textelemente (0) |
| 10 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Eigenschaftselemente (0) |

Tabelle 9. PD-Satz des Elements Kreisbogen

| Nr. | Typ | Bedeutung des Parameters (In Klammern geschriebene Werte müssen zwingend eingetragen sein. Ist dies nicht der Fall, wird der Postprozessorlauf mit entsprechender Fehlermeldung abgebrochen) |
|-------|---------|---|
| 1 | Integer | Elementtypnummer (102) |
| 2 | Integer | Anzahl N der zusammengefaßten Geometrieelemente |
| 3 | Pointer | Zeiger zum DE-Eintrag des 1. Elements |
| . | . | . |
| . | . | . |
| N + 2 | Pointer | Zeiger zum DE-Eintrag des N. Elements |
| N + 3 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Struktur-/Textelemente (0) |
| N + 4 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Eigenschaftselemente (0) |

Tabelle 10. PD-Satz des Elements Zusammengesetzte Kurve

| Nr. | Typ | Bedeutung des Parameters (In Klammern geschriebene Werte müssen zwingend eingetragen sein. Ist dies nicht der Fall, wird der Postprozessorlauf mit entsprechender Fehlermeldung abgebrochen) |
|-----|---------|---|
| 1 | Integer | Elementtypnummer (124) |
| 2 | Real | Element r_{11} der Rotationsmatrix |
| 3 | Real | Element r_{12} der Rotationsmatrix |
| 4 | Real | Element r_{13} der Rotationsmatrix |
| 5 | Real | Element t_1 des Translationsvektors |
| 6 | Real | Element r_{21} der Rotationsmatrix |
| 7 | Real | Element r_{22} der Rotationsmatrix |
| 8 | Real | Element r_{23} der Rotationsmatrix |
| 9 | Real | Element t_2 des Translationsvektors |
| 10 | Real | Element r_{31} der Rotationsmatrix |
| 11 | Real | Element r_{32} der Rotationsmatrix |
| 12 | Real | Element r_{33} der Rotationsmatrix |
| 13 | Real | Element t_3 des Translationsvektors |
| 14 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Struktur-/Textelemente (0) |
| 15 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Eigenschaftselemente (0) |

Tabelle 11. PD-Satz des Elements Transformationsmatrix

| Nr. | Typ | Bedeutung des Parameters (In Klammern geschriebene Werte müssen zwingend eingetragen sein. Ist dies nicht der Fall, wird der Postprozessorlauf mit entsprechender Fehlermeldung abgebrochen) |
|-----|---------|---|
| 1 | Integer | Elementtypnummer (212) |
| 2 | Integer | Anzahl der Textstrings (1) |
| 3 | Integer | Anzahl der Zeichen des Textstrings |
| 4 | Real | Buchstabenbreite |
| 5 | Real | Buchstabenhöhe |
| 6 | Integer | Schriftart |
| 7 | Real | Neigungswinkel der Zeichen |
| 8 | Real | Rotationswinkel des Textes |
| 9 | Integer | Parameter für die Spiegelung des Textes |
| 10 | Integer | Parameter für die Rotationsachse |
| 11 | Real | x_t -Koordinate des Textstartpunktes |
| 12 | Real | y_t -Koordinate des Textstartpunktes |
| 13 | Real | Parallelverschiebung z_t der Textdefinitionsebene x_t, y_t zur x,y -Ebene des Modellraums |
| 14 | String | ASCII-Zeichenkette |
| 15 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Struktur-/Textelemente (0) |
| 16 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Eigenschaftselemente (0) |

Tabelle 12. PD-Satz des Elements Text

| Nr. | Typ | Bedeutung des Parameters (In Klammern geschriebene Werte müssen zwingend eingetragen sein. Ist dies nicht der Fall, wird der Postprozessorlauf mit entsprechender Fehlermeldung abgebrochen) |
|-------|---------|---|
| 1 | Integer | Elementtypnummer (308) |
| 2 | Integer | Hirarchiestufe |
| 3 | String | Teilbildname |
| 4 | Integer | Anzahl N der Elemente im Teilbild |
| 5 | Pointer | Zeiger zum DE-Eintrag des 1. Teilbildelements |
| . | . | . |
| N + 4 | Pointer | Zeiger zum DE-Eintrag des N. Teilbildelements |
| N + 5 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Struktur-/Textelemente (0) |
| N + 6 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Eigenschaftselemente (0) |

Tabelle 13. PD-Satz des Elements Teilbild

| Nr. | Typ | Bedeutung des Parameters (In Klammern geschriebene Werte müssen zwingend eingetragen sein. Ist dies nicht der Fall, wird der Postprozessorlauf mit entsprechender Fehlermeldung abgebrochen) |
|-------|---------|---|
| 1 | Integer | Elementtypnummer (402) |
| 2 | Integer | Anzahl N der Geometrieelemente |
| 3 | Pointer | Zeiger zum DE-Eintrag des 1. Geometrieelements |
| . | . | . |
| N + 2 | Pointer | Zeiger zum DE-Eintrag des N. Geometrieelements |
| N + 3 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Struktur-/Textelemente (0) |
| N + 4 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Eigenschaftselemente (0) |

Tabelle 14. PD-Satz des Elements Beziehung (Bauteilgeometrie)

| Nr. | Typ | Bedeutung des Parameters (In Klammern geschriebene Werte müssen zwingend eingetragen sein. Ist dies nicht der Fall, wird der Postprozessorlauf mit entsprechender Fehlermeldung abgebrochen) |
|-----|---------|---|
| 1 | Integer | Elementtypnummer (402) |
| 2 | Integer | Anzahl der Geometrieelemente (1) |
| 3 | Pointer | Zeiger zum DE-Eintrag des Elements Punkt |
| 4 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Struktur-/Textelemente (1) |
| 5 | Pointer | Pointer zum DE-Eintrag des Textelements |
| 6 | Pointer | Anzahl der Pointer auf Eigenschaftselemente (0) |

Tabelle 15. PD-Satz des Elements Beziehung (Punkt-Textverbindung)

F.1 CAD-IGES-Datei

Die folgende IGES-Datei wurde vom IGES-Präprozessor des CAD-Systems BRAVO3 erzeugt. Diese Datei beschreibt das in Abb. 16 auf Seite 45 dargestellte CAD-Modell im neutralen IGES-Format.

```

----- BEGINNING OF IGES START SECTION ----- S 1
Aluminiumquader mit einer Bohrung und einem Messpunkt. S 2
Zur Festlegung des Bezugskordinatensystems sind drei Flachstaebe S 3
orthogonal am Modell angebracht, auf denen die drei Referenzpunkte S 4
markiert sind S 5
----- END OF IGES START SECTION ----- S 6
1H,,1H;,10HTestmodell,9Hdissert3 ,22HBravo3 Editor V2.500 ,21HIGES CONVG 1
ERTER V3.100,32,38,6,38,15,10HTestmodell,1.00000000E+00,2,2HMM,8, G 2
1.00000000E+00,13H900215.122328,1.00000000E-05,5.00000000E+04,7HKoehler,G 3
13HUni-Karlsruhe,5,0; G 4
124 1 1 0 0 0 0 000010301D 1
124 0 0 1 0 0 0 00 2
100 2 1 1 101 0 1 000010001D 3
100 2 8 1 0 0 0 00 4
110 3 1 1 101 0 0 000010001D 5
110 2 8 1 0 0 0 00 6
110 4 1 1 101 0 0 000010001D 7
110 2 8 1 0 0 0 00 8
110 5 1 1 101 0 0 000010001D 9
110 2 8 1 0 0 0 00 10
110 6 1 1 101 0 0 000010001D 11
110 2 8 1 0 0 0 00 12
402 7 1 1 101 0 0 000000001D 13
402 2 8 1 5100 0 0 00 14
100 8 1 1 101 0 1 000010001D 15
100 2 8 1 0 0 0 00 16
110 9 1 1 101 0 0 000010001D 17
110 2 8 1 0 0 0 00 18
110 10 1 1 101 0 0 000010001D 19
110 2 8 1 0 0 0 00 20
110 11 1 1 101 0 0 000010001D 21
110 2 8 1 0 0 0 00 22
110 12 1 1 101 0 0 000010001D 23
110 2 8 1 0 0 0 00 24
402 13 1 1 101 0 0 000000001D 25
402 2 8 1 5100 0 0 00 26
110 14 1 1 101 0 0 000010001D 27
110 2 8 1 0 0 0 00 28
402 15 1 1 101 0 0 000000001D 29
402 2 8 1 5100 0 0 00 30
110 16 1 1 101 0 0 000010001D 31
110 2 8 1 0 0 0 00 32
402 17 1 1 101 0 0 000000001D 33
402 2 8 1 5100 0 0 00 34
110 18 1 1 101 0 0 000010001D 35
110 2 8 1 0 0 0 00 36
402 19 1 1 101 0 0 000000001D 37
402 2 8 1 5100 0 0 00 38
110 20 1 1 101 0 0 000010001D 39
110 2 8 1 0 0 0 00 40
402 21 1 1 101 0 0 000000001D 41
402 2 8 1 5100 0 0 00 42
110 22 1 1 101 0 0 000010001D 43
110 2 8 1 0 0 0 00 44
110 23 1 1 101 0 0 000010001D 45
110 2 8 1 0 0 0 00 46
110 24 1 1 101 0 0 000010001D 47
110 2 8 1 0 0 0 00 48
110 25 1 1 101 0 0 000010001D 49
110 2 8 1 0 0 0 00 50
402 26 1 1 101 0 0 000000001D 51
402 2 8 1 5100 0 0 00 52
110 27 1 1 101 0 0 000010001D 53
110 2 8 1 0 0 0 00 54
110 28 1 1 101 0 0 000010001D 55
110 2 8 1 0 0 0 00 56

```

| | | | | | | | | |
|-----|----|---|---|------|---|---|------------|-----|
| 110 | 29 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 57 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 58 |
| 110 | 30 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 59 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 60 |
| 402 | 31 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 61 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 62 |
| 110 | 32 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 63 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 64 |
| 402 | 33 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 65 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 66 |
| 110 | 34 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 67 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 68 |
| 402 | 35 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 69 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 70 |
| 110 | 36 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 71 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 72 |
| 402 | 37 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 73 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 74 |
| 110 | 38 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 75 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 76 |
| 402 | 39 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 77 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 78 |
| 110 | 40 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 79 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 80 |
| 110 | 41 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 81 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 82 |
| 110 | 42 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 83 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 84 |
| 110 | 43 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 85 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 86 |
| 402 | 44 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 87 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 88 |
| 110 | 45 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 89 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 90 |
| 110 | 46 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 91 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 92 |
| 110 | 47 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 93 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 94 |
| 110 | 48 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 95 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 96 |
| 402 | 49 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 97 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 98 |
| 110 | 50 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 99 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 100 |
| 402 | 51 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 101 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 102 |
| 110 | 52 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 103 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 104 |
| 402 | 53 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 105 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 106 |
| 110 | 54 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 107 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 108 |
| 402 | 55 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 109 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 110 |
| 110 | 56 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 111 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 112 |
| 402 | 57 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 113 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 114 |
| 110 | 58 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 115 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 116 |
| 110 | 59 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 117 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 118 |
| 110 | 60 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 119 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 120 |
| 110 | 61 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 121 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 122 |
| 402 | 62 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 123 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 124 |
| 110 | 63 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 125 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 126 |
| 110 | 64 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 127 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 128 |
| 110 | 65 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 129 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 130 |
| 110 | 66 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 131 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 132 |
| 402 | 67 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 133 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 134 |
| 110 | 68 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 135 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 136 |

| | | | | | | | | |
|---|-----|---|---|------|---|-----|------------|-----|
| 402 | 69 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 137 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 138 |
| 110 | 70 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 139 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 140 |
| 402 | 71 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 141 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 142 |
| 110 | 72 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 143 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 0D | 144 |
| 402 | 73 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 145 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 146 |
| 124 | 74 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 000010301D | 147 |
| 124 | 0 | 0 | 2 | 0 | | | 0D | 148 |
| 100 | 76 | 1 | 1 | 101 | 0 | 147 | 000010001D | 149 |
| 100 | 2 | 8 | 2 | 0 | | | 0D | 150 |
| 402 | 78 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 151 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 152 |
| 124 | 79 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 000010301D | 153 |
| 124 | 0 | 0 | 2 | 0 | | | 0D | 154 |
| 100 | 81 | 1 | 1 | 101 | 0 | 153 | 000010001D | 155 |
| 100 | 2 | 8 | 2 | 0 | | | 0D | 156 |
| 402 | 83 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 157 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 158 |
| 100 | 84 | 1 | 1 | 101 | 0 | 153 | 000010001D | 159 |
| 100 | 2 | 8 | 2 | 0 | | | 0D | 160 |
| 402 | 86 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 161 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 0D | 162 |
| 124 | 87 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 000010301D | 163 |
| 124 | 0 | 0 | 2 | 0 | | | 0D | 164 |
| 212 | 89 | 1 | 1 | 1500 | 0 | 163 | 000010101D | 165 |
| 212 | 2 | 2 | 2 | 0 | | | 0D | 166 |
| 116 | 91 | 1 | 1 | 7777 | 0 | 0 | 000020001D | 167 |
| 116 | 2 | 2 | 1 | 0 | | | 0D | 168 |
| 402 | 92 | 1 | 1 | 7777 | 0 | 0 | 000000001D | 169 |
| 402 | 2 | 2 | 1 | 5100 | | | 0D | 170 |
| 212 | 93 | 1 | 1 | 1500 | 0 | 163 | 000010101D | 171 |
| 212 | 2 | 7 | 2 | 0 | | | 0D | 172 |
| 116 | 95 | 1 | 1 | 7778 | 0 | 0 | 000020001D | 173 |
| 116 | 2 | 7 | 1 | 0 | | | 0D | 174 |
| 402 | 96 | 1 | 1 | 7778 | 0 | 0 | 000000001D | 175 |
| 402 | 2 | 7 | 1 | 5100 | | | 0D | 176 |
| 212 | 97 | 1 | 1 | 1500 | 0 | 163 | 000010101D | 177 |
| 212 | 2 | 7 | 2 | 0 | | | 0D | 178 |
| 116 | 99 | 1 | 1 | 7778 | 0 | 0 | 000020001D | 179 |
| 116 | 2 | 7 | 1 | 0 | | | 0D | 180 |
| 402 | 100 | 1 | 1 | 7778 | 0 | 0 | 000000001D | 181 |
| 402 | 2 | 7 | 1 | 5100 | | | 0D | 182 |
| 212 | 101 | 1 | 1 | 1500 | 0 | 163 | 000010101D | 183 |
| 212 | 2 | 7 | 2 | 0 | | | 0D | 184 |
| 116 | 103 | 1 | 1 | 7778 | 0 | 0 | 000020001D | 185 |
| 116 | 2 | 7 | 1 | 0 | | | 0D | 186 |
| 402 | 104 | 1 | 1 | 7778 | 0 | 0 | 000000001D | 187 |
| 402 | 2 | 7 | 1 | 5100 | | | 0D | 188 |
| 124,0.,0.,-1.,0.,0.,1.,0.,0.,1.,0.,0.,0.,0,0; | | | | | | | 00000001P | 1 |
| 100,0.,150.,100.,160.,100.,160.,100.,0,0; | | | | | | | 00000003P | 2 |
| 110,0.,0.,0.,0.,0.,200.,0,0; | | | | | | | 00000005P | 3 |
| 110,0.,150.,0.,0.,150.,200.,0,0; | | | | | | | 00000007P | 4 |
| 110,0.,0.,200.,0.,150.,200.,0,0; | | | | | | | 00000009P | 5 |
| 110,0.,0.,0.,0.,150.,0.,0,0; | | | | | | | 00000011P | 6 |
| 402,5,3,5,7,9,11,0,0; | | | | | | | 00000013P | 7 |
| 100,-100.,150.,100.,160.,100.,160.,100.,0,0; | | | | | | | 00000015P | 8 |
| 110,100.,0.,0.,100.,0.,200.,0,0; | | | | | | | 00000017P | 9 |
| 110,100.,150.,0.,100.,150.,200.,0,0; | | | | | | | 00000019P | 10 |
| 110,100.,0.,200.,100.,150.,200.,0,0; | | | | | | | 00000021P | 11 |
| 110,100.,0.,0.,100.,150.,0.,0,0; | | | | | | | 00000023P | 12 |
| 402,5,15,17,19,21,23,0,0; | | | | | | | 00000025P | 13 |
| 110,0.,150.,200.,100.,150.,200.,0,0; | | | | | | | 00000027P | 14 |
| 402,1,27,0,0; | | | | | | | 00000029P | 15 |
| 110,0.,0.,200.,100.,0.,200.,0,0; | | | | | | | 00000031P | 16 |
| 402,1,31,0,0; | | | | | | | 00000033P | 17 |
| 110,0.,150.,0.,100.,150.,0.,0,0; | | | | | | | 00000035P | 18 |
| 402,1,35,0,0; | | | | | | | 00000037P | 19 |
| 110,0.,0.,0.,100.,0.,0.,0,0; | | | | | | | 00000039P | 20 |
| 402,1,39,0,0; | | | | | | | 00000041P | 21 |
| 110,0.,0.,0.,0.,0.,40.,0,0; | | | | | | | 00000043P | 22 |
| 110,550.,0.,0.,550.,0.,40.,0,0; | | | | | | | 00000045P | 23 |
| 110,0.,0.,40.,550.,0.,40.,0,0; | | | | | | | 00000047P | 24 |
| 110,0.,0.,0.,550.,0.,0.,0,0; | | | | | | | 00000049P | 25 |
| 402,4,43,45,47,49,0,0; | | | | | | | 00000051P | 26 |
| 110,-10.,0.,0.,-10.,0.,40.,0,0; | | | | | | | 00000053P | 27 |
| 110,-10.,550.,0.,-10.,550.,40.,0,0; | | | | | | | 00000055P | 28 |

| | | |
|--|-----------|-----|
| 110,-10.,0.,40.,-10.,550.,40.,0,0; | 00000057P | 29 |
| 110,-10.,0.,0.,-10.,550.,0.,0,0; | 00000059P | 30 |
| 402,4,53,55,57,59,0,0; | 00000061P | 31 |
| 110,-10.,0.,40.,0.,0.,40.,0,0; | 00000063P | 32 |
| 402,1,63,0,0; | 00000065P | 33 |
| 110,-10.,0.,0.,0.,0.,0.,0,0; | 00000067P | 34 |
| 402,1,67,0,0; | 00000069P | 35 |
| 110,-10.,550.,40.,0.,550.,40.,0,0; | 00000071P | 36 |
| 402,1,71,0,0; | 00000073P | 37 |
| 110,-10.,550.,0.,0.,550.,0.,0,0; | 00000075P | 38 |
| 402,1,75,0,0; | 00000077P | 39 |
| 110,0.,0.,0.,0.,0.,40.,0,0; | 00000079P | 40 |
| 110,0.,550.,0.,0.,550.,40.,0,0; | 00000081P | 41 |
| 110,0.,0.,40.,0.,550.,40.,0,0; | 00000083P | 42 |
| 110,0.,0.,0.,0.,550.,0.,0,0; | 00000085P | 43 |
| 402,4,79,81,83,85,0,0; | 00000087P | 44 |
| 110,0.,-10.,0.,0.,-10.,40.,0,0; | 00000089P | 45 |
| 110,550.,-10.,0.,550.,-10.,40.,0,0; | 00000091P | 46 |
| 110,0.,-10.,40.,550.,-10.,40.,0,0; | 00000093P | 47 |
| 110,0.,-10.,0.,550.,-10.,0.,0,0; | 00000095P | 48 |
| 402,4,89,91,93,95,0,0; | 00000097P | 49 |
| 110,550.,0.,40.,550.,-10.,40.,0,0; | 00000099P | 50 |
| 402,1,99,0,0; | 00000101P | 51 |
| 110,550.,0.,0.,550.,-10.,0.,0,0; | 00000103P | 52 |
| 402,1,103,0,0; | 00000105P | 53 |
| 110,0.,0.,40.,0.,-10.,40.,0,0; | 00000107P | 54 |
| 402,1,107,0,0; | 00000109P | 55 |
| 110,0.,0.,0.,0.,-10.,0.,0,0; | 00000111P | 56 |
| 402,1,111,0,0; | 00000113P | 57 |
| 110,0.,40.,550.,0.,0.,550.,0,0; | 00000115P | 58 |
| 110,0.,40.,40.,0.,0.,550.,0,0; | 00000117P | 59 |
| 110,0.,0.,40.,0.,0.,550.,0,0; | 00000119P | 60 |
| 110,0.,40.,40.,0.,0.,40.,0,0; | 00000121P | 61 |
| 402,4,115,117,119,121,0,0; | 00000123P | 62 |
| 110,-10.,40.,40.,-10.,40.,550.,0,0; | 00000125P | 63 |
| 110,-10.,0.,40.,-10.,0.,550.,0,0; | 00000127P | 64 |
| 110,-10.,40.,550.,-10.,0.,550.,0,0; | 00000129P | 65 |
| 110,-10.,40.,40.,-10.,0.,40.,0,0; | 00000131P | 66 |
| 402,4,125,127,129,131,0,0; | 00000133P | 67 |
| 110,-10.,40.,40.,0.,40.,40.,0,0; | 00000135P | 68 |
| 402,1,135,0,0; | 00000137P | 69 |
| 110,-10.,40.,550.,0.,40.,550.,0,0; | 00000139P | 70 |
| 402,1,139,0,0; | 00000141P | 71 |
| 110,-10.,0.,550.,0.,0.,550.,0,0; | 00000143P | 72 |
| 402,1,143,0,0; | 00000145P | 73 |
| 124,0.707107,-0.707107,0.,0.,0.,1.,0.,-0.707107,-0.707107,0., | 00000147P | 74 |
| 0.,0,0; | 00000147P | 75 |
| 100,0.8506,197.98184,-226.38123,211.9818,-226.38123,211.9818, | 00000149P | 76 |
| -226.38123,0,0; | 00000149P | 77 |
| 402,1,149,0,0; | 00000151P | 78 |
| 124,0.,0.,1.,0.,-0.447214,0.894427,0.,0.,-0.894427,-0.447214,0., | 00000153P | 79 |
| 0.,0,0; | 00000153P | 80 |
| 100,0.5338,-240.41481,440.24291,-226.41479,440.24291,-226.41479, | 00000155P | 81 |
| 440.24291,0,0; | 00000155P | 82 |
| 402,1,155,0,0; | 00000157P | 83 |
| 100,-0.6038,-277.8985,-118.97587,-263.89848,-118.97587, | 00000159P | 84 |
| -263.89848,-118.97587,0,0; | 00000159P | 85 |
| 402,1,159,0,0; | 00000161P | 86 |
| 124,-0.707107,-0.40828,0.577328,0.,0.707107,-0.40828,0.577328, | 00000163P | 87 |
| 0.,0.,0.816465,0.577395,0.,0,0; | 00000163P | 88 |
| 212,1,2,62.57815,45.00002,1,1.5708,0.,0,0,35.35535,61.223, | 00000165P | 89 |
| 259.811,2HM1,0,0; | 00000165P | 90 |
| 116,100.,0.,200.,0,0,0; | 00000167P | 91 |
| 402,1,167,1,165,0; | 00000169P | 92 |
| 212,1,2,54.14065,45.00002,1,1.5708,0.,0,0,-211.58013,-106.4641, | 00000171P | 93 |
| 185.32479,2HR1,0,0; | 00000171P | 94 |
| 116,300.07,0.8506,20.0814,0,0,0; | 00000173P | 95 |
| 402,1,173,1,171,0; | 00000175P | 96 |
| 212,1,2,64.68753,45.00002,1,1.5708,0.,0,0,13.05923,239.33539, | 00000177P | 97 |
| 184.20432,2HR2,0,0; | 00000177P | 98 |
| 116,-0.6038,17.86473,301.7676,0,0,0; | 00000179P | 99 |
| 402,1,179,1,177,0; | 00000181P | 100 |
| 212,1,2,61.1719,45.00002,1,1.5708,0.,0,0,354.08256,-190.06175, | 00000183P | 101 |
| 300.19257,2HR3,0,0; | 00000183P | 102 |
| 116,0.5338,501.282,18.15093,0,0,0; | 00000185P | 103 |
| 402,1,185,1,183,0; | 00000187P | 104 |
| S 6G 4D 188P 104 | T | 1 |

F.2 Zielpunktdatei

Die folgende GMS-Eingabedatei wurde vom GMS-Postprozessor aus der im Anhang F.1 aufgeführten IGES-Datei erzeugt.

```

*Testmodell
MASSEINHEIT DER KOORDINATEN : [MM]
ANZAHL DER REFERENZPUNKTE : 3
KOORDINATEN DER REFERENZPUNKTE :
      X           Y           Z
R1    300.0700    0.8506    20.0814
R2    -0.6038    17.8647    301.7676
R3     0.5338    501.2820    18.1509
ANZAHL DER MESSPUNKTE : 1
KOORDINATEN DER MESSPUNKTE :
      X           Y           Z
M1    100.0000    0.0000    200.0000
    
```

F.3 Maßstabdatei

Durch die folgende GMS-Eingabedatei wird eine zusätzliche Strecke in das GMS-Vermessungsprogramm eingeführt. Die verwendete Meßlatte hat eine Länge von 1305.493 mm, einen mittleren Temperaturexpansionskoeffizienten von 1,2 ppm/°C und eine Genauigkeit von $\pm 0,002$ mm. Die geschätzten Koordinaten der Markierungen sind in der zweiten und dritten Zeile eingetragen.

```

1305.493 0.0000012 0.002
200.0 -650.0 40.0
-500.0 550.0 40.0
    
```

F.4 Geometriedatei

Die folgende Eingabedatei für das GMS-Graphikprogramm wurde vom GMS-Postprozessor aus der im Anhang F.1 aufgeführten IGES-Datei erzeugt.

```

*Testmodell
MASSEINHEIT DER KOORDINATEN : [MM]
      X           Y           Z
K
M    0.0000    100.0000    150.0000
S    0.0000    100.0000    160.0000
H    0.0000    108.6603    145.0000
E    0.0000    100.0000    160.0000
L
S    0.0000     0.0000     0.0000
E    0.0000     0.0000    200.0000
L
S    0.0000    150.0000     0.0000
E    0.0000    150.0000    200.0000
L
S    0.0000     0.0000    200.0000
E    0.0000    150.0000    200.0000
L
S    0.0000     0.0000     0.0000
E    0.0000    150.0000     0.0000
K
M    100.0000    100.0000    150.0000
S    100.0000    100.0000    160.0000
H    100.0000    108.6603    145.0000
E    100.0000    100.0000    160.0000
L
S    100.0000     0.0000     0.0000
E    100.0000     0.0000    200.0000
L
S    100.0000    150.0000     0.0000
    
```

| | | | |
|---|----------|----------|----------|
| E | 100.0000 | 150.0000 | 200.0000 |
| L | | | |
| S | 100.0000 | 0.0000 | 200.0000 |
| E | 100.0000 | 150.0000 | 200.0000 |
| L | | | |
| S | 100.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| E | 100.0000 | 150.0000 | 0.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 150.0000 | 200.0000 |
| E | 100.0000 | 150.0000 | 200.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 0.0000 | 200.0000 |
| E | 100.0000 | 0.0000 | 200.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 150.0000 | 0.0000 |
| E | 100.0000 | 150.0000 | 0.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| E | 100.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| E | 0.0000 | 0.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | 550.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| E | 550.0000 | 0.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 0.0000 | 40.0000 |
| E | 550.0000 | 0.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| E | 550.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| L | | | |
| S | -10.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| E | -10.0000 | 0.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | -10.0000 | 550.0000 | 0.0000 |
| E | -10.0000 | 550.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | -10.0000 | 0.0000 | 40.0000 |
| E | -10.0000 | 550.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | -10.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| E | -10.0000 | 550.0000 | 0.0000 |
| L | | | |
| S | -10.0000 | 0.0000 | 40.0000 |
| E | 0.0000 | 0.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | -10.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| E | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| L | | | |
| S | -10.0000 | 550.0000 | 40.0000 |
| E | 0.0000 | 550.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | -10.0000 | 550.0000 | 0.0000 |
| E | 0.0000 | 550.0000 | 0.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| E | 0.0000 | 0.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 550.0000 | 0.0000 |
| E | 0.0000 | 550.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 0.0000 | 40.0000 |
| E | 0.0000 | 550.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| E | 0.0000 | 550.0000 | 0.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | -10.0000 | 0.0000 |
| E | 0.0000 | -10.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | 550.0000 | -10.0000 | 0.0000 |
| E | 550.0000 | -10.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | -10.0000 | 40.0000 |
| E | 550.0000 | -10.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | -10.0000 | 0.0000 |
| E | 550.0000 | -10.0000 | 0.0000 |
| L | | | |

| | | | |
|---|----------|----------|----------|
| S | 550.0000 | 0.0000 | 40.0000 |
| E | 550.0000 | -10.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | 550.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| E | 550.0000 | -10.0000 | 0.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 0.0000 | 40.0000 |
| E | 0.0000 | -10.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| E | 0.0000 | -10.0000 | 0.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 40.0000 | 550.0000 |
| E | 0.0000 | 0.0000 | 550.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 40.0000 | 40.0000 |
| E | 0.0000 | 40.0000 | 550.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 0.0000 | 40.0000 |
| E | 0.0000 | 0.0000 | 550.0000 |
| L | | | |
| S | 0.0000 | 40.0000 | 40.0000 |
| E | 0.0000 | 0.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | -10.0000 | 40.0000 | 40.0000 |
| E | -10.0000 | 40.0000 | 550.0000 |
| L | | | |
| S | -10.0000 | 0.0000 | 40.0000 |
| E | -10.0000 | 0.0000 | 550.0000 |
| L | | | |
| S | -10.0000 | 40.0000 | 550.0000 |
| E | -10.0000 | 0.0000 | 550.0000 |
| L | | | |
| S | -10.0000 | 40.0000 | 40.0000 |
| E | 0.0000 | 40.0000 | 40.0000 |
| L | | | |
| S | -10.0000 | 40.0000 | 550.0000 |
| E | 0.0000 | 40.0000 | 550.0000 |
| L | | | |
| S | -10.0000 | 0.0000 | 550.0000 |
| E | 0.0000 | 0.0000 | 550.0000 |
| K | | | |
| M | 300.0701 | 0.8506 | 20.0814 |
| S | 309.9696 | 0.8506 | 10.1819 |
| H | 286.5472 | 0.8506 | 16.4579 |
| E | 309.9696 | 0.8506 | 10.1819 |
| K | | | |
| M | 0.5338 | 501.2820 | 18.1507 |
| S | 0.5338 | 495.0210 | 5.6287 |
| H | 0.5338 | 515.2569 | 18.9895 |
| E | 0.5338 | 495.0210 | 5.6287 |
| K | | | |
| M | -0.6038 | 17.8649 | 301.7676 |
| S | -0.6038 | 11.6039 | 289.2456 |
| H | -0.6038 | 31.8397 | 302.6064 |
| E | -0.6038 | 11.6039 | 289.2456 |

F.5 Kofaktorendatei der Referenzpunkte

In der folgenden Datei sind die Kofaktoren für die Referenzpunkte eingetragen. Werden die Referenzpunkte mit dem GMS-System eingemessen, so wird diese Datei automatisch erstellt.

| * | Kofaktorenmatrix der Referenzpunkte | | | * 4 Jan 90 |
|-------------|-------------------------------------|------------|-------------|------------|
| 2 | Testmodell | | | |
| 0.00152402 | | | | |
| 61.863053 | 29.179798 | 19.144931 | -82.237332 | |
| -41.236589 | -6.563747 | 20.374279 | 12.056790 | |
| -12.581184 | | | | |
| 29.179798 | 160.792315 | 36.060994 | -130.134634 | |
| -124.706450 | -87.066763 | 100.954835 | -36.085866 | |
| 51.005769 | | | | |
| 19.144931 | 36.060994 | 31.105272 | -42.205474 | |
| -13.209973 | -22.889604 | 23.060543 | -22.851021 | |
| -8.215668 | | | | |
| -82.237332 | -130.134634 | -42.205474 | 166.071712 | |
| 120.307061 | 60.894406 | -83.834380 | 9.827572 | |
| -18.688932 | | | | |
| -41.236589 | -124.706450 | -13.209973 | 120.307061 | |
| 151.001875 | 64.662829 | -79.070473 | -26.295425 | |
| -51.452856 | | | | |
| -6.563747 | -87.066763 | -22.889604 | 60.894406 | |
| 64.662829 | 62.732173 | -54.330659 | 22.403934 | |
| -39.842569 | | | | |
| 20.374279 | 100.954835 | 23.060543 | -83.834380 | |
| -79.070473 | -54.330659 | 63.460101 | -21.884363 | |
| 31.270116 | | | | |
| 12.056790 | -36.085866 | -22.851021 | 9.827572 | |
| -26.295425 | 22.403934 | -21.884363 | 62.381291 | |
| 0.447088 | | | | |
| -12.581184 | 51.005769 | -8.215668 | -18.688932 | |
| -51.452856 | -39.842569 | 31.270116 | 0.447088 | |
| 48.058237 | | | | |

Anhang G. Ausrichten des Theodoliten auf vorgegebene Zielpunktpositionen

Sollen die Theodolitachsen vom Rechner automatisch auf den n-ten Zielpunkt (Meß-, Referenz- oder Basislattenpunkt) ausgerichtet werden, müssen die einzustellenden Theodolitwinkel aus den Zielpunktkoordinaten $x_{z_n}, y_{z_n}, z_{z_n}$ und der bekannten Theodolitposition x_T, y_T, z_T berechnet werden. Die einzustellende Zenitdistanz \underline{v}_{z_n} kann aus der Höhendifferenz Δz und der Zielentfernung a berechnet werden:

$$\underline{v}_{z_n} = \arccos \frac{z_{z_n} - z_T}{a} \quad [G.1]$$

$$\text{mit } a = \sqrt{(x_{z_n} - x_T)^2 + (y_{z_n} - y_T)^2 + (z_{z_n} - z_T)^2}$$

Zur Ausrichtung des Horizontalkreises muß der Richtungswinkel auf den einzustellenden Zielpunkt $\underline{t}_{z_n T}$ berechnet werden:

$$\bar{t}_{z_n T} = \arctan \left[\frac{x_{z_n} - x_T}{y_{z_n} - y_T} \right] \quad [G.2]$$

Abhängig vom Quadranten müssen zur Bestimmung von $\underline{t}_{z_n T}$ noch Vielfache von $\frac{\pi}{2}$ addiert werden:

| | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|
| $x_{z_n} - x_T$ | ≥ 0 | ≥ 0 | < 0 | < 0 | > 0 | < 0 | [G.3] |
| $y_{z_n} - y_T$ | > 0 | < 0 | < 0 | > 0 | $= 0$ | $= 0$ | |
| $\underline{t}_{z_n T} =$ | $\bar{t}_{z_n T}$ | $\bar{t}_{z_n T} + \frac{\pi}{2}$ | $\bar{t}_{z_n T} + \pi$ | $\bar{t}_{z_n T} + \frac{3\pi}{2}$ | 0 | π | |

Zur Bestimmung des einzustellenden Horizontalwinkels H_{z_n} muß auch der Richtungswinkel $\underline{t}_{z_{n-1} T}$ auf den aktuell eingestellten Zielpunkt analog Gleichung [G.2] und [G.3] berechnet werden. Aus der Winkeldifferenz $\underline{t}_{z_n T} - \underline{t}_{z_{n-1} T}$ und dem gemessenen aktuellen Horizontalwinkel $H_{z_{n-1}}$ kann der einzustellende Hz-Winkel H_{z_n} bestimmt werden:

$$H_{z_n} = H_{z_{n-1}} + (\underline{t}_{z_n T} - \underline{t}_{z_{n-1} T}) \quad [G.4]$$

Ist der berechnete Wert negativ bzw. größer als 400 gon, muß zu diesem Wert noch 400 gon addiert bzw. subtrahiert werden. Bei der automatischen horizontalen Ausrichtung des Theodoliten wird beim GMS-Programm möglichst diejenige Fahrtrichtung (links- oder rechtsdrehend) gewählt, für die der Drehweg geringer (≤ 200 gon) ist. Nur wenn diese Einstellung wegen der Kabelführung zur Blockierung führen würde, wird der komplementäre Drehweg bei entgegengesetzter Drehrichtung gewählt.

Anhang H. Die Berechnung des Hilfspunktes eines Kreisbogens

Zur Beschreibung eines Kreisbogens werden in IGES die Definitionsraumkoordinaten des Mittel-, Start- und Endpunktes angegeben. Da bei einem Halb- oder Vollkreis diese drei angegebenen Punkte auf einer Geraden liegen und somit die Kreisebene nicht eindeutig festgelegt ist, wird der kreisbogenspezifische Definitionsraum x_t, y_t, z_t so gewählt, daß die z_t -Achse orthogonal zur Kreisebene ist. Zur eindeutigen Bestimmung des Kreisbogens wurde in IGES außerdem vereinbart, daß die Drehrichtung immer mathematisch positiv (entgegen Uhrzeigerdrehrichtung) ist.

Zur Beschreibung eines Kreisbogens sind in der GMS-Datei 'Geometrie' die Modellraumkoordinaten des Mittel-, Start- und Endpunktes eingetragen (s. Anhang F.4). Da diese Angaben bei einem Halb- oder Vollkreis nicht ausreichen, um die Kreisbogenebene im Raum eindeutig zu spezifizieren, wird noch ein weiterer auf dem Kreisbogen liegender Punkt angegeben. Die Position des Hilfspunktes ist so gewählt, daß der Abstand Hilfspunkt - Startpunkt ein Drittel der Kreisbogenlänge beträgt. Diese Spezifikation der Hilfspunktposition garantiert, daß die vier angegebenen Punkte in keinem Fall auf einer Geraden liegen und somit die Kreisbogenebene eindeutig festgelegt wird. Da der angegebene Hilfspunkt auf dem Kreisbogen liegt, ist auch keine zusätzliche Vereinbarung der Drehrichtung des Kreisbogens erforderlich.

Zur Berechnung der Hilfspunktkoordinaten im xyz-Modellraum werden zunächst die Koordinaten im IGES-Definitionsraum x_t, y_t, z_t bestimmt:

- Bogenlänge α_{SE} des Kreisbogens.
Ein ebener Kreisbogen läßt sich durch die folgende Matrixgleichung beschreiben:

$$\begin{bmatrix} x_{tE} \\ y_{tE} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{SE} & -\sin \alpha_{SE} & -x_{tM} \cos \alpha_{SE} + y_{tM} \sin \alpha_{SE} + x_{tM} \\ \sin \alpha_{SE} & \cos \alpha_{SE} & -x_{tM} \sin \alpha_{SE} + y_{tM} \cos \alpha_{SE} + y_{tM} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{tS} \\ y_{tS} \\ 1 \end{bmatrix} \quad [H.1]$$

x_{tM}, y_{tM} : Definitionsraumkoordinaten des Mittelpunktes
 x_{tS}, y_{tS} : Definitionsraumkoordinaten des Startpunktes
 x_{tE}, y_{tE} : Definitionsraumkoordinaten des Endpunktes
 α_{SE} : Bogenlänge des Kreisbogens

Die Gleichung [H.1] aufgelöst nach α_{SE} :

$$\alpha_{SE} = \arccos \left[\frac{(x_{tE} - x_{tM})(x_{tS} - x_{tM}) + (y_{tE} - y_{tM})(y_{tS} - y_{tM})}{(x_{tS} - x_{tM})^2 + (y_{tS} - y_{tM})^2} \right] \quad [H.2]$$

Da die Arkuskosinusfunktion nur Werte zwischen 0 und π berechnet, muß für den Bogenwinkel α_{SE} noch die folgende Fallunterscheidung durchgeführt werden:

$$\alpha_{SE} = \begin{cases} \alpha_{SE} & \text{für } 0 < \alpha_{SE} \leq \pi \\ 2\pi - \alpha_{SE} & \text{für } \pi < \alpha_{SE} < 2\pi \\ 2\pi & \text{für } \alpha_{SE} = 0 \end{cases} \quad [H.3]$$

Für den Fall $\alpha_{SE} > 0$ muß durch Einsetzen von α_{SE} in Gleichung [H.1] überprüft werden, ob der gesuchte Kreisbogen größer oder kleiner als π ist.

- Analog zur Gleichung [H.1] können die Hilfspunktkoordinaten x_{tH} , y_{tH} berechnet werden:

$$\begin{bmatrix} x_{tH} \\ y_{tH} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_{SH} & -\sin\alpha_{SH} & -x_{tM} \cos\alpha_{SH} + y_{tM} \sin\alpha_{SH} + x_{tM} \\ \sin\alpha_{SH} & \cos\alpha_{SH} & -x_{tM} \sin\alpha_{SH} + y_{tM} \cos\alpha_{SH} + y_{tM} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{tS} \\ y_{tS} \\ 1 \end{bmatrix} \quad [H.4]$$

mit $\alpha_{SH} = \frac{1}{3} \alpha_{SE}$

Zur Transformation in den Modellraum ist jedem Kreisbogenelement in IGES ein Transformationsmatrixelement zwingend zugeordnet. Die Definitionsraumkoordinaten des Mittel-, Start-, Hilfs- und Endpunktes können somit entsprechend Gleichung [4.4.1] in den Modellraum transformiert werden.

I.1 Beobachtungswinkeldatei

Die folgende Datei enthält die Beobachtungswinkel des ersten Theodolitstandpunktes und wird vom GMS-Programm automatisch erstellt. Für den anderen bzw. die anderen Theodolitstandpunkt(e) werden auch die entsprechenden Dateien erstellt.

```

***** 19 Feb 90 / 15:50
*                               *
*                               *
*****
2 Theodolitstandpunkte
1 Basislatten
Horizontierte Theodolite
3 Referenzpunkte
1 Messpunkte
zweilagig

Koordinaten des ersten Standpunktes :
X           Y           Z
[mm]       [mm]       [mm]
2198.67914  972.13955  748.19039

Referenzpunkte :
Nr  X       Y       Z   Horizontalwinkel:  Vertikalwinkel:
   [mm]   [mm]   [mm]   [gon] [gon]
1  300.070  0.851  20.081  144.19669  120.99497
F  0.01199  0.01933  0.00850
   1.Lage: 144.19601  120.99568
   2.Lage: 344.19736  279.00573
   Delta : 0.00068  0.00071
2  -0.604  17.865  301.768  148.23746  111.74782
F  0.01964  0.01873  0.01207
   1.Lage: 148.23733  111.74792
   2.Lage: 348.23760  288.25227
   Delta : 0.00014  0.00010
3   0.534  501.282  18.151  160.86737  119.91522
F  0.01214  0.01204  0.01057
   1.Lage: 160.86591  119.91418
   2.Lage: 360.86884  280.08373
   Delta : 0.00146  0.00104

1. Basislatte : Laenge : 1305.49770 Fehler : 0.00200
Nr  X       Y       Z   Horizontalwinkel:  Vertikalwinkel:
   [mm]   [mm]   [mm]   [gon] [gon]
1  1  200.000 -650.000  40.000  131.68929  108.03167
   1.Lage: 131.68994  108.03087
   2.Lage: 331.68864  291.96753
   Delta : 0.00065  0.00080
1  2 -500.000  550.000  40.000  163.01638  107.75711
   1.Lage: 163.01686  107.75636
   2.Lage: 363.01589  292.24215
   Delta : 0.00048  0.00075

Messpunkte :
Nr  X       Y       Z   Horizontalwinkel:  Vertikalwinkel:
   [mm]   [mm]   [mm]   [gon] [gon]
1  100.000  0.000  200.000  146.73538  114.77864
   1.Lage: 146.73542  114.77877
   2.Lage: 346.73534  285.22149
   Delta : 0.00004  0.00013

```

I.2 Meßergebnisdatei

In der folgenden Datei sind die ausgeglichenen und transformierten GMS-Meßergebnisse einer GMS-Vermessung des Testmodells (s. Abb. 16 auf Seite 45) eingetragen. Der Referenzpunkt n hat die Punktnummer 100 + n und für den k-ten Meßpunkt ist die Kennzahl 200 + k vereinbart.

```

AAAAAAA EEEEE TTTTTTT RRRRRR AAAAAAA
AA AA EE TTT RR RR AA AA
AAAAAAA EEEEE TTT RRRRRR AAAAAAA
AA AA EE TTT RR RRR AA AA
AA AA EEEEE TTT RR RRR AA AA
*****
**
** A E H N L I C H K E I T S - **
** T R A N S F O R M A T I O N **
** M I T **
** S T O C H A S T I S C H E N **
** P U N K T E N **
**
*****

```

PROJEKT :

* Testmodell * 19 Feb 90
101 - 106 : identische Punkte; 201 - 299 : zu transformierende Punkte

ANZAHL DER IDENTISCHEN PUNKTE : 3
ANZAHL DER SONSTIGEN PUNKTE : 1
ANZAHL DER VORGEGEBENEN PARAMETER : 3

| PARAMETER | | GEWICHT |
|------------|---------|----------|
| EPSILON : | 0.00000 | 0.21E+10 |
| PSI : | 0.00000 | 0.21E+10 |
| MASSSTAB : | 1.00000 | 0.21E+10 |

KOFAKTORENMATRIX 1 (Q(UVW))
VOLL BESETZTE MATRIX
SIGMAU = 0.0013388400

KOFAKTORENMATRIX 2 (Q(XYZ))
VOLL BESETZTE MATRIX
SIGMAX = 0.0015240200

VARIANZFAKTOR A PRIORI : 0.001524020

K O O R D I N A T E N V E R Z E I C H N I S

I D E N T I S C H E P U N K T E

S Y S T E M 1

| NR | U | V | W | NORM. VERB |
|-----|---------|---------|---------|-----------------|
| 101 | 298.447 | 1.010 | 15.868 | 135.1 58.4286.7 |
| 102 | 0.900 | 16.050 | 300.923 | 138.0123.3 23.5 |
| 103 | 0.699 | 502.310 | 22.247 | 52.7 72.8294.1 |

S Y S T E M 2

| NR | X | Y | Z | NORM. VERB |
|-----|---------|---------|---------|-----------------|
| 101 | 300.070 | 0.851 | 20.081 | 135.1 58.5286.7 |
| 102 | -0.604 | 17.865 | 301.768 | 138.0123.3 23.5 |
| 103 | 0.534 | 501.282 | 18.151 | 52.8 72.7294.1 |

TRANSFORMIERTE KOORDINATEN (S1==>S2)
 MIT RESTKLAFFUNGEN
 UND MITTLEREN KOORDINATENFEHLERN
 FEHLERELLIPSOID

| NR | X DX MX | Y DY MY | Z DZ MZ | HALBACHSEN | RIWI (ALTGRAD) | HOEHWI |
|-----|--|------------------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|--|
| 101 | 298.102 -1.968 0.019 MP = 0.034 | 1.155 0.304 0.025 0.034 | 16.331 -3.750 0.012 | A= B= C= | 0.0149 0.0290 0.0079 | 323.1589 57.5996 194.4280 14.4521 16.7213 67.6120 |
| 102 | 0.564 1.168 0.025 MP = 0.036 | 16.367 -1.498 0.022 0.036 | 301.386 -0.382 0.013 | A= B= C= | 0.0328 0.0115 0.0084 | 39.6422 138.7678 280.0513 17.5791 26.5925 57.3163 |
| 103 | 0.644 0.110 0.014 MP = 0.025 | 502.628 1.346 0.013 0.025 | 22.711 4.560 0.016 | A= B= C= | 0.0078 0.0133 0.0196 | 27.8571 99.9398 342.1381 -34.1613 24.3868 45.8142 |

SONSTIGE PUNKTE (S1)

| NR | U | V | W |
|-----|--------|-------|---------|
| 201 | 99.954 | 0.625 | 200.962 |

TRANSFORMIERTE SONSTIGE PUNKTE (==>S2)
 MIT MITTLEREN KOORDINATENFEHLERN

| NR | X MX | Y MY | Z MZ | HALBACHSEN | RIWI (ALTGRAD) | HOEHWI |
|-----|-------------------------------|-------------------------|------------------|----------------|----------------------------|--|
| 201 | 99.609 0.021 MP = 0.029 | 0.886 0.017 0.029 | 201.426 0.011 | A= B= C= | 0.0267 0.0077 0.0083 | 36.7384 133.6303 274.5058 16.0255 22.6740 61.6963 |

TRANSFORMATIONSPARAMETER MIT MITTLEREN FEHLERN

| | | | | |
|----------|---|------------------|-----|-------------------|
| X0 | : | -0.346 | +/- | 1.576 |
| Y0 | : | 0.318 | +/- | 0.709 |
| Z0 | : | 0.463 | +/- | 0.541 |
| EPSILON | : | 0x 0' 0.001868'' | +/- | 0x 0' 1.1317156'' |
| PSI | : | 0x 0' 0.001122'' | +/- | 0x 0' 1.1317158'' |
| OMEGA | : | 0x 1'59.532164'' | +/- | 0x 9' 1.1409954'' |
| MASSSTAB | : | 0.999999999 | +/- | 0.000005487 |

VERBESSERUNGSQUADRATSUMME : 0.316092317

VARIANZFAKTOR A POSTERIORI : 0.251432821

MITTLERE KLAFFUNG V.D. TRANSF.: 3.74963

MITTLERE KLAFFUNG N.D. TRANSF.: 3.646189147

ANZAHL DER DURCHLAEFUE : 2

DREHMATRIX :

| | | |
|------------------|------------------|------------------|
| 0.9999998320851 | 0.0005795082538 | -0.0000000054344 |
| -0.0005795082538 | 0.9999998320851 | 0.0000000090612 |
| 0.0000000054396 | -0.0000000090580 | 1.0000000000000 |

1.3 Die GMS-IGES-Datei

Die folgende IGES-Datei wurde vom GMS-Präprozessor aus der CAD-IGES-Datei (s. Anhang F.1) und der Meßergebnisdatei (s. Anhang I.2) erzeugt. Diese Datei enthält sämtliche Elemente der vom CAD-System bereitgestellten IGES-Datei. Zum Übertragen der aktuellen Meßpunktpositionen auf das CAD-System werden pro Meßpunkt drei zusätzliche IGES-Elemente hinzugefügt.

```

----- BEGINNING OF IGES START SECTION ----- S 1
Messergebnisse vom 19 Feb 90 S 2
Aluminiumquader mit einer Bohrung und einem Messpunkt. S 3
Zur Festlegung des Bezugskordinatensystems sind drei Flachstaebe S 4
orthogonal am Modell angebracht, auf denen die drei Referenzpunkte S 5
markiert sind S 6
----- END OF IGES START SECTION ----- S 7
1H,,1H;,10HTestmodell,9Hdissert3 ,22HBravo3 Editor V2.500 ,21HIGES CONVG 1
ERTER V3.100,32,38,6,38,15,10HTestmodell,1.00000000E+00,2,ZHMM,8, G 2
1.00000000E+00,13H900215.122328,1.00000000E-05,5.00000000E+04,7HKoehler,G 3
13HUni-Karlsruhe,5,0; G 4
124 1 1 0 0 0 0 000010301D 1
124 0 0 1 0 0 0 0D 2
100 2 1 1 101 0 1 000010001D 3
100 2 8 1 0 0 0 0D 4
110 3 1 1 101 0 0 000010001D 5
110 2 8 1 0 0 0 0D 6
110 4 1 1 101 0 0 000010001D 7
110 2 8 1 0 0 0 0D 8
110 5 1 1 101 0 0 000010001D 9
110 2 8 1 0 0 0 0D 10
110 6 1 1 101 0 0 000010001D 11
110 2 8 1 0 0 0 0D 12
402 7 1 1 101 0 0 000000001D 13
402 2 8 1 5100 0 0 0D 14
100 8 1 1 101 0 1 000010001D 15
100 2 8 1 0 0 0 0D 16
110 9 1 1 101 0 0 000010001D 17
110 2 8 1 0 0 0 0D 18
110 10 1 1 101 0 0 000010001D 19
110 2 8 1 0 0 0 0D 20
110 11 1 1 101 0 0 000010001D 21
110 2 8 1 0 0 0 0D 22
110 12 1 1 101 0 0 000010001D 23
110 2 8 1 0 0 0 0D 24
402 13 1 1 101 0 0 000000001D 25
402 2 8 1 5100 0 0 0D 26
110 14 1 1 101 0 0 000010001D 27
110 2 8 1 0 0 0 0D 28
402 15 1 1 101 0 0 000000001D 29
402 2 8 1 5100 0 0 0D 30
110 16 1 1 101 0 0 000010001D 31
110 2 8 1 0 0 0 0D 32
402 17 1 1 101 0 0 000000001D 33
402 2 8 1 5100 0 0 0D 34
110 18 1 1 101 0 0 000010001D 35
110 2 8 1 0 0 0 0D 36
402 19 1 1 101 0 0 000000001D 37
402 2 8 1 5100 0 0 0D 38
110 20 1 1 101 0 0 000010001D 39
110 2 8 1 0 0 0 0D 40
402 21 1 1 101 0 0 000000001D 41
402 2 8 1 5100 0 0 0D 42
110 22 1 1 101 0 0 000010001D 43
110 2 8 1 0 0 0 0D 44
110 23 1 1 101 0 0 000010001D 45
110 2 8 1 0 0 0 0D 46
110 24 1 1 101 0 0 000010001D 47
110 2 8 1 0 0 0 0D 48
110 25 1 1 101 0 0 000010001D 49
110 2 8 1 0 0 0 0D 50
402 26 1 1 101 0 0 000000001D 51
402 2 8 1 5100 0 0 0D 52
110 27 1 1 101 0 0 000010001D 53
110 2 8 1 0 0 0 0D 54
110 28 1 1 101 0 0 000010001D 55
110 2 8 1 0 0 0 0D 56
110 29 1 1 101 0 0 000010001D 57
110 2 8 1 0 0 0 0D 58
110 30 1 1 101 0 0 000010001D 59
110 2 8 1 0 0 0 0D 60
402 31 1 1 101 0 0 000000001D 61
402 2 8 1 5100 0 0 0D 62
110 32 1 1 101 0 0 000010001D 63

```

| | | | | | | | | |
|-----|----|---|---|------|---|-----|------------|-----|
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 64 |
| 402 | 33 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 65 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 66 |
| 110 | 34 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 67 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 68 |
| 402 | 35 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 69 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 70 |
| 110 | 36 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 71 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 72 |
| 402 | 37 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 73 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 74 |
| 110 | 38 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 75 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 76 |
| 402 | 39 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 77 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 78 |
| 110 | 40 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 79 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 80 |
| 110 | 41 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 81 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 82 |
| 110 | 42 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 83 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 84 |
| 110 | 43 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 85 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 86 |
| 402 | 44 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 87 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 88 |
| 110 | 45 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 89 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 90 |
| 110 | 46 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 91 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 92 |
| 110 | 47 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 93 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 94 |
| 110 | 48 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 95 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 96 |
| 402 | 49 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 97 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 98 |
| 110 | 50 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 99 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 100 |
| 402 | 51 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 101 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 102 |
| 110 | 52 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 103 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 104 |
| 402 | 53 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 105 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 106 |
| 110 | 54 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 107 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 108 |
| 402 | 55 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 109 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 110 |
| 110 | 56 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 111 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 112 |
| 402 | 57 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 113 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 114 |
| 110 | 58 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 115 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 116 |
| 110 | 59 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 117 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 118 |
| 110 | 60 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 119 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 120 |
| 110 | 61 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 121 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 122 |
| 402 | 62 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 123 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 124 |
| 110 | 63 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 125 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 126 |
| 110 | 64 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 127 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 128 |
| 110 | 65 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 129 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 130 |
| 110 | 66 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 131 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 132 |
| 402 | 67 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 133 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 134 |
| 110 | 68 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 135 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 136 |
| 402 | 69 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 137 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 138 |
| 110 | 70 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 139 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 140 |
| 402 | 71 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 141 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 142 |
| 110 | 72 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000010001D | 143 |
| 110 | 2 | 8 | 1 | 0 | | | 00 | 144 |
| 402 | 73 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 145 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 146 |
| 124 | 74 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 000010301D | 147 |
| 124 | 0 | 0 | 2 | 0 | | | 00 | 148 |
| 100 | 76 | 1 | 1 | 101 | 0 | 147 | 000010001D | 149 |
| 100 | 2 | 8 | 2 | 0 | | | 00 | 150 |
| 402 | 78 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 151 |

| | | | | | | | | |
|---|-----|---|---|------|---|-----|------------|-----|
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 152 |
| 124 | 79 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 000010301D | 153 |
| 124 | 0 | 0 | 2 | 0 | | | 00 | 154 |
| 100 | 81 | 1 | 1 | 101 | 0 | 153 | 000010001D | 155 |
| 100 | 2 | 8 | 2 | 0 | | | 00 | 156 |
| 402 | 83 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 157 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 158 |
| 100 | 84 | 1 | 1 | 101 | 0 | 153 | 000010001D | 159 |
| 100 | 2 | 8 | 2 | 0 | | | 00 | 160 |
| 402 | 86 | 1 | 1 | 101 | 0 | 0 | 000000001D | 161 |
| 402 | 2 | 8 | 1 | 5100 | | | 00 | 162 |
| 124 | 87 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 000010301D | 163 |
| 124 | 0 | 0 | 2 | 0 | | | 00 | 164 |
| 212 | 89 | 1 | 1 | 1500 | 0 | 163 | 000010101D | 165 |
| 212 | 2 | 2 | 2 | 0 | | | 00 | 166 |
| 116 | 91 | 1 | 1 | 7777 | 0 | 0 | 000020001D | 167 |
| 116 | 2 | 2 | 1 | 0 | | | 00 | 168 |
| 402 | 92 | 1 | 1 | 7777 | 0 | 0 | 000000001D | 169 |
| 402 | 2 | 2 | 1 | 5100 | | | 00 | 170 |
| 212 | 93 | 1 | 1 | 1500 | 0 | 163 | 000010101D | 171 |
| 212 | 2 | 7 | 2 | 0 | | | 00 | 172 |
| 116 | 95 | 1 | 1 | 7778 | 0 | 0 | 000020001D | 173 |
| 116 | 2 | 7 | 1 | 0 | | | 00 | 174 |
| 402 | 96 | 1 | 1 | 7778 | 0 | 0 | 000000001D | 175 |
| 402 | 2 | 7 | 1 | 5100 | | | 00 | 176 |
| 212 | 97 | 1 | 1 | 1500 | 0 | 163 | 000010101D | 177 |
| 212 | 2 | 7 | 2 | 0 | | | 00 | 178 |
| 116 | 99 | 1 | 1 | 7778 | 0 | 0 | 000020001D | 179 |
| 116 | 2 | 7 | 1 | 0 | | | 00 | 180 |
| 402 | 100 | 1 | 1 | 7778 | 0 | 0 | 000000001D | 181 |
| 402 | 2 | 7 | 1 | 5100 | | | 00 | 182 |
| 212 | 101 | 1 | 1 | 1500 | 0 | 163 | 000010101D | 183 |
| 212 | 2 | 7 | 2 | 0 | | | 00 | 184 |
| 116 | 103 | 1 | 1 | 7778 | 0 | 0 | 000020001D | 185 |
| 116 | 2 | 7 | 1 | 0 | | | 00 | 186 |
| 402 | 104 | 1 | 1 | 7778 | 0 | 0 | 000000001D | 187 |
| 402 | 2 | 7 | 1 | 5100 | | | 00 | 188 |
| 212 | 89 | 1 | 1 | 1500 | 0 | 163 | 000010101D | 189 |
| 212 | 2 | 3 | 2 | 0 | | | 5D | 190 |
| 116 | 105 | 1 | 1 | 7776 | 0 | 0 | 000030001D | 191 |
| 116 | 2 | 3 | 1 | 0 | | | 5D | 192 |
| 402 | 106 | 1 | 1 | 7776 | 0 | 0 | 000000001D | 193 |
| 402 | 2 | 3 | 1 | 5100 | | | 31D | 194 |
| 124,0.,0.,-1.,0.,0.,1.,0.,0.,1.,0.,0.,0.,0,0; | | | | | | | 00000001P | 1 |
| 100,0.,150.,100.,160.,100.,160.,100.,0,0; | | | | | | | 00000003P | 2 |
| 110,0.,0.,0.,0.,0.,200.,0,0; | | | | | | | 00000005P | 3 |
| 110,0.,150.,0.,0.,150.,200.,0,0; | | | | | | | 00000007P | 4 |
| 110,0.,0.,200.,0.,150.,200.,0,0; | | | | | | | 00000009P | 5 |
| 110,0.,0.,0.,0.,150.,0.,0,0; | | | | | | | 00000011P | 6 |
| 402,5,3,5,7,9,11,0,0; | | | | | | | 00000013P | 7 |
| 100,-100.,150.,100.,160.,100.,160.,100.,0,0; | | | | | | | 00000015P | 8 |
| 110,100.,0.,0.,100.,0.,200.,0,0; | | | | | | | 00000017P | 9 |
| 110,100.,150.,0.,100.,150.,200.,0,0; | | | | | | | 00000019P | 10 |
| 110,100.,0.,200.,100.,150.,200.,0,0; | | | | | | | 00000021P | 11 |
| 110,100.,0.,0.,100.,150.,0.,0,0; | | | | | | | 00000023P | 12 |
| 402,5,15,17,19,21,23,0,0; | | | | | | | 00000025P | 13 |
| 110,0.,150.,200.,100.,150.,200.,0,0; | | | | | | | 00000027P | 14 |
| 402,1,27,0,0; | | | | | | | 00000029P | 15 |
| 110,0.,0.,200.,100.,0.,200.,0,0; | | | | | | | 00000031P | 16 |
| 402,1,31,0,0; | | | | | | | 00000033P | 17 |
| 110,0.,150.,0.,100.,150.,0.,0,0; | | | | | | | 00000035P | 18 |
| 402,1,35,0,0; | | | | | | | 00000037P | 19 |
| 110,0.,0.,0.,100.,0.,0.,0,0; | | | | | | | 00000039P | 20 |
| 402,1,39,0,0; | | | | | | | 00000041P | 21 |
| 110,0.,0.,0.,0.,0.,40.,0,0; | | | | | | | 00000043P | 22 |
| 110,550.,0.,0.,550.,0.,40.,0,0; | | | | | | | 00000045P | 23 |
| 110,0.,0.,40.,550.,0.,40.,0,0; | | | | | | | 00000047P | 24 |
| 110,0.,0.,0.,550.,0.,0.,0,0; | | | | | | | 00000049P | 25 |
| 402,4,43,45,47,49,0,0; | | | | | | | 00000051P | 26 |
| 110,-10.,0.,0.,-10.,0.,40.,0,0; | | | | | | | 00000053P | 27 |
| 110,-10.,550.,0.,-10.,550.,40.,0,0; | | | | | | | 00000055P | 28 |
| 110,-10.,0.,40.,-10.,550.,40.,0,0; | | | | | | | 00000057P | 29 |
| 110,-10.,0.,0.,-10.,550.,0.,0,0; | | | | | | | 00000059P | 30 |
| 402,4,53,55,57,59,0,0; | | | | | | | 00000061P | 31 |
| 110,-10.,0.,40.,0.,0.,40.,0,0; | | | | | | | 00000063P | 32 |
| 402,1,63,0,0; | | | | | | | 00000065P | 33 |
| 110,-10.,0.,0.,0.,0.,0.,0,0; | | | | | | | 00000067P | 34 |
| 402,1,67,0,0; | | | | | | | 00000069P | 35 |
| 110,-10.,550.,40.,0.,550.,40.,0,0; | | | | | | | 00000071P | 36 |
| 402,1,71,0,0; | | | | | | | 00000073P | 37 |
| 110,-10.,550.,0.,0.,550.,0.,0,0; | | | | | | | 00000075P | 38 |
| 402,1,75,0,0; | | | | | | | 00000077P | 39 |
| 110,0.,0.,0.,0.,0.,40.,0,0; | | | | | | | 00000079P | 40 |
| 110,0.,550.,0.,0.,550.,40.,0,0; | | | | | | | 00000081P | 41 |
| 110,0.,0.,40.,0.,550.,40.,0,0; | | | | | | | 00000083P | 42 |
| 110,0.,0.,0.,0.,550.,0.,0,0; | | | | | | | 00000085P | 43 |
| 402,4,79,81,83,85,0,0; | | | | | | | 00000087P | 44 |
| 110,0.,-10.,0.,0.,-10.,40.,0,0; | | | | | | | 00000089P | 45 |

| | | |
|--|-----------|-----|
| 110,550,-10,0,550,-10,40,0,0; | 00000091P | 46 |
| 110,0,-10,40,550,-10,40,0,0; | 00000093P | 47 |
| 110,0,-10,0,550,-10,0,0,0; | 00000095P | 48 |
| 402,4,89,91,93,95,0,0; | 00000097P | 49 |
| 110,550,0,40,550,-10,40,0,0; | 00000099P | 50 |
| 402,1,99,0,0; | 00000101P | 51 |
| 110,550,0,0,550,-10,0,0,0; | 00000103P | 52 |
| 402,1,103,0,0; | 00000105P | 53 |
| 110,0,0,40,0,-10,40,0,0; | 00000107P | 54 |
| 402,1,107,0,0; | 00000109P | 55 |
| 110,0,0,0,0,-10,0,0,0; | 00000111P | 56 |
| 402,1,111,0,0; | 00000113P | 57 |
| 110,0,40,550,0,0,550,0,0; | 00000115P | 58 |
| 110,0,40,40,0,40,550,0,0; | 00000117P | 59 |
| 110,0,0,40,0,0,550,0,0; | 00000119P | 60 |
| 110,0,40,40,0,0,40,0,0; | 00000121P | 61 |
| 402,4,115,117,119,121,0,0; | 00000123P | 62 |
| 110,-10,40,40,-10,40,550,0,0; | 00000125P | 63 |
| 110,-10,0,40,-10,0,550,0,0; | 00000127P | 64 |
| 110,-10,40,550,-10,0,550,0,0; | 00000129P | 65 |
| 110,-10,40,40,-10,0,40,0,0; | 00000131P | 66 |
| 402,4,125,127,129,131,0,0; | 00000133P | 67 |
| 110,-10,40,40,0,40,40,0,0; | 00000135P | 68 |
| 402,1,135,0,0; | 00000137P | 69 |
| 110,-10,40,550,0,40,550,0,0; | 00000139P | 70 |
| 402,1,139,0,0; | 00000141P | 71 |
| 110,-10,0,550,0,0,550,0,0; | 00000143P | 72 |
| 402,1,143,0,0; | 00000145P | 73 |
| 124,0,707107,-0,707107,0,0,0,1,0,-0,707107,-0,707107,0,0,0,0; | 00000147P | 74 |
| 0,0,0; | 00000147P | 75 |
| 100,0,8506,197,98184,-226,38123,211,9818,-226,38123,211,9818, | 00000149P | 76 |
| -226,38123,0,0; | 00000149P | 77 |
| 402,1,149,0,0; | 00000151P | 78 |
| 124,0,0,1,0,-0,447214,0,894427,0,0,-0,894427,-0,447214,0,0,0,0; | 00000153P | 79 |
| 0,0,0; | 00000153P | 80 |
| 100,0,5338,-240,41481,440,24291,-226,41479,440,24291,-226,41479, | 00000155P | 81 |
| 440,24291,0,0; | 00000155P | 82 |
| 402,1,155,0,0; | 00000157P | 83 |
| 100,-0,6038,-277,8985,-118,97587,-263,89848,-118,97587, | 00000159P | 84 |
| -263,89848,-118,97587,0,0; | 00000159P | 85 |
| 402,1,159,0,0; | 00000161P | 86 |
| 124,-0,707107,-0,40828,0,577328,0,0,707107,-0,40828,0,577328, | 00000163P | 87 |
| 0,0,0,816465,0,577395,0,0,0; | 00000163P | 88 |
| 212,1,2,62,57815,45,00002,1,1,5708,0,0,0,35,35535,61,223, | 00000165P | 89 |
| 259,811,2HM1,0,0; | 00000165P | 90 |
| 116,100,0,200,0,0,0; | 00000167P | 91 |
| 402,1,167,1,165,0; | 00000169P | 92 |
| 212,1,2,54,14065,45,00002,1,1,5708,0,0,0,-211,58013,-106,4641, | 00000171P | 93 |
| 185,32479,2HR1,0,0; | 00000171P | 94 |
| 116,300,07,0,8506,20,0814,0,0,0; | 00000173P | 95 |
| 402,1,173,1,171,0; | 00000175P | 96 |
| 212,1,2,64,68753,45,00002,1,1,5708,0,0,0,13,05923,239,33539, | 00000177P | 97 |
| 184,20432,2HR2,0,0; | 00000177P | 98 |
| 116,-0,6038,17,86473,301,7676,0,0,0; | 00000179P | 99 |
| 402,1,179,1,177,0; | 00000181P | 100 |
| 212,1,2,61,1719,45,00002,1,1,5708,0,0,0,354,08256,-190,06175, | 00000183P | 101 |
| 300,19257,2HR3,0,0; | 00000183P | 102 |
| 116,0,5338,501,282,18,15093,0,0,0; | 00000185P | 103 |
| 402,1,185,1,183,0; | 00000187P | 104 |
| 116,99,6090,0,8860,201,4260,0,0,0; | 191P | 105 |
| 402,1,191,1,189,0; | 193P | 106 |
| S 7G 4D 194P 106 | T | 1 |

J.1 Graphikbefehle

In der nachfolgenden Tabelle sind die bedienerunterstützenden Graphikfunktionen des GMS-Programms eingetragen. Durch Betätigen der entsprechenden Taste auf der Steuerrechner Tastatur kann der Operateur die zugeordnete Graphikunterstützung aufrufen, und es werden die entsprechenden Befehlssequenzen an den Graphikrechner geschickt (s. Tabelle 19 auf Seite 136).

| Taste (auch Großbuchstaben) | GMS-Graphikunterstützung |
|--------------------------------|---|
| 'a' | Das von der Theodolitkamera gelieferte Videobild wird abgeschaltet; es wird nur noch die Graphik gezeigt. (s.a. Abb. 23 auf Seite 60). |
| 'e' | Einschalten des Videobildes; das Ausblenden des Videobildes (Taste 'a') wird aufgehoben. |
| 's' | Einblenden der senkrechten Ziellinie für das Weitwinkelfeld; zur Orientierung ist eine parallaxenkorrigierte Entfernungsskala angebracht (s.a. Abb. 25 auf Seite 62). |
| 'f' | Einblenden eines parallaxenkorrigierten Fadenkreuzes im Weitwinkelfeld; (s.a. Abb. 26 auf Seite 62); der entfernungsabhängige Parallaxenversatz wird aus den Zielpunkt- und den Theodolitkoordinaten berechnet. |
| 'g' | Einblenden eines parallaxenkorrigierten Fadenkreuzes im Weitwinkelfeld entsprechend der aktuellen Fokuseinstellung (s.a. Abb. 26 auf Seite 62). |
| 'd' | Einblenden des CAD-Drahtmodells. |
| 'r' | Einblenden des CAD-Drahtmodells und Markierung aller Referenzpunkte. |
| 'b' | Einblenden des CAD-Drahtmodells und Markierung aller Meßpunkte. |
| 'n' | Einblenden des CAD-Drahtmodells und Markierung aller Meß- und Referenzpunkte (s. Abb. 19 auf Seite 55). |
| 'z' | Einblenden des CAD-Drahtmodells und Markierung des aktuellen Zielpunktes |
| 'x' | Graphische Markierung des aktuellen Zielpunktes. |
| 'v' | Pixelzoom eines rechteckförmigen Bildbereiches; der zu Zoomausschnitt kann maugesteuert (Rubberband) gewählt werden. |
| 'o' | Ausblenden der Graphikunterstützung. |
| 'h' | Graphische Hervorhebung des Theodolitfadenkreuzes (s.a. Abb. 27 auf Seite 63). |
| 'p' | Anpicken des Zielpunktes mit der Maus; Theodolit wird automatisch auf diesen Punkt ausgerichtet. |
| 'l' | Wie Taste 'p', aber das Bild wird vor dem Anpicken um den Zoomfaktor 2 vergrößert dargestellt (Pixelzoom). |
| 'k' | Maugesteuerte Änderung der Helligkeits- und Kontrasteinstellung. |
| ['.', ''] | Erhöhen (['']) bzw. verringern (['.']) des Graphikzoomwertes $\kappa = \kappa \pm 1$ im Bereich $-10 \leq \kappa \leq 10$. Für $\kappa > 0$ (Standardwert=0) ist die Modelldarstellung in der überlagerten Graphik gegenüber dem Kamerabild vergrößert. Für $\kappa < 0$ zeigt die Graphik einen größeren Ausschnitt als das Kamerabild (s. Abb. 24 auf Seite 61). |

Tabelle 16. Befehle zur interaktiven Graphiksteuerung

J.2 Befehle zur Theodolitsteuerung

In den nachfolgenden beiden Tabellen sind die Befehle für die bedienergesteuerte Theodolitausrichtung zusammengefaßt. Zur besseren Übersicht ist die Belegung des numerischen Tastaturblocks in einer separaten Tabelle eingetragen.

| | | | |
|--|---|--|---|
| '7' Ändern der Verstellgeschwindigkeit bei der Feineinstellung des Fokusantriebs. | '8' Ändern der Verstellgeschwindigkeit bei der Grobeinstellung des Fokusantriebs. | '9' Ändern der Fahrgeschwindigkeit des Hz- und V-Motors, sowohl im Start/Stop- als auch im Hochlaufbetrieb. | '.'' Umschalten des Bildwechselprismas auf das Meßsehfeld; einstellen der Hz- und V-Geschwindigkeiten zur Feinjustierung (minimale Drehgeschwindigkeiten); anpassen der Gain/Offset-Werte. |
| '4' Bewegen der Fokussierlinse mit langsamer Geschwindigkeit in Richtung größerer Zielweiten; zum Anhalten muß die <Enter>-Taste betätigt werden. | '5' Bewegen der Fokussierlinse mit schneller Geschwindigkeit in Richtung größerer Zielweiten; zum Anhalten muß die <Enter>-Taste betätigt werden. | '6' Aktuelle Hz- und V-Winkel werden gelesen und am Terminal angezeigt. | '/' Umschalten des Bildwechselprismas auf das Weitwinkelsehfeld; einstellen der Hz- und V-Geschwindigkeiten zur Grobjustierung (maximale Drehgeschwindigkeiten); anpassen der Gain/Offset-Werte. |
| '1' Bewegen der Fokussierlinse mit langsamer Geschwindigkeit in Richtung kleinerer Zielweiten; zum Anhalten muß die <Enter>-Taste betätigt werden. | '2' Bewegen der Fokussierlinse mit schneller Geschwindigkeit in Richtung kleinerer Zielweiten; zum Anhalten muß die <Enter>-Taste betätigt werden. | '3' | '<Enter>' Anhalten des Fokussiermotors; aktuell eingestellte Fokussierentfernung wird gemessen und am Terminal angezeigt. |
| '0' Zielpunkt ist genau anvisiert; der Operateur muß diese Eingabe noch durch anschließendes Betätigen der grünen Taste bei Joysticksteuerung oder der <Enter>-Taste bei Cursor/Maussteuerung bestätigen. | | '.'' Umschalten des Bildwechselprismas auf alternatives Sehfeld; anpassen der Gain/Offset-Werte. | |

Tabelle 17. Tastenbelegung des numerischen Tastaturblocks (VT100-Terminal)

| Taste (auch Großbuchstaben) | Steuerbefehle |
|--------------------------------|--|
| 'j' | Umschalten auf Joysticksteuerung; aktuell eingestellte Steuerungsweise (Joystick- oder Maus/Cursorsteuerung) wird permanent am Terminal angezeigt. |
| 'c' | Umschalten auf rechnerkontrollierte Maus/Cursorsteuerung. |
| '>' | Erhöhen der eingestellten Schrittzahl für die Cursorsteuerung; vorgegebener Standardwert = 1 (Minimum); aktueller Wert wird permanent angezeigt. |
| '<' | Verringern der aktuell eingestellten Schrittzahl. |
| ↑ | Drehen des vertikalen Theodolitantriebs um die aktuell eingestellten Motorschritte in negativer Drehrichtung; V-Winkel wird kleiner; Theodolitfadenkreuz bewegt sich auf dem Beobachtungsmonitor nach oben. |
| ↓ | Wie ↑, aber in entgegengesetzter Richtung; Theodolitfadenkreuz bewegt sich auf dem Beobachtungsmonitor nach unten. |
| → | Drehen des horizontalen Theodolitantriebs um die aktuell eingestellten Motorschritte in Uhrzeigerrichtung (Hz-Winkel größer) bei normaler Fernrohrlage und in Gegenuhrzeigerrichtung (Hz-Winkel kleiner) bei Fernrohrlage II (Kamerabild steht Kopf); Theodolitfadenkreuz bewegt sich auf dem Beobachtungsmonitor nach rechts. |
| ← | Wie →, aber in entgegengesetzter Richtung; Theodolitfadenkreuz bewegt sich auf dem Beobachtungsmonitor nach links. |

Tabelle 18. Befehle zur Cursor/Maussteuerung

Anhang K. Umwandlung der Kreisbögen in Liniensegmente

Für das GMS-Graphikprogramm müssen die Kreise bzw. die Kreisbögen als Linienzüge approximiert werden. Um den Rechenaufwand zu verringern, wird zuerst die Kreisebene auf die x-y-Ebene transformiert. Die Bestimmung der Linienendpunkte reduziert sich somit auf ein ebenes Problem. Durch die inverse Koordinatentransformation werden die berechneten Punkte wieder auf die 3D-Kreisebene transformiert. Die hierzu erforderlichen Rechenoperationen sind im folgenden detailliert aufgeführt:

1. Bestimmen der Kreisebene durch drei Punkte.

Ist es ein Kreisbogen, wird die Ebenengleichung mit den Start-, Hilfs- und Endpunktkoordinaten aufgestellt. Da aber bei einem Vollkreis der Start- und Endpunkt (Index S bzw. E) identisch sind, wird in diesem Fall der Kreismittelpunkt (Index M) als dritter Punkt verwendet:

$$\begin{bmatrix} x - x_S & y - y_S & z - z_S \\ x_H - x_S & y_H - y_S & z_H - z_S \\ x_{E/M} - x_S & y_{E/M} - y_S & z_{E/M} - z_S \end{bmatrix} = 0 \quad [K.1]$$

Für den Normalenvektor \vec{n} der Ebene gilt:

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [y_H - y_S][z_{E/M} - z_S] - [z_H - z_S][y_{E/M} - y_S] \\ [z_H - z_S][x_{E/M} - x_S] - [x_H - x_S][z_{E/M} - z_S] \\ [x_H - x_S][y_{E/M} - y_S] - [y_H - y_S][x_{E/M} - x_S] \end{pmatrix} \quad [K.2]$$

2. Liegt die Kreisebene bereits parallel zur x-y-Ebene ($A \equiv B \equiv 0$), kann auf die Berechnung nach Gl.[K.3] verzichtet werden. Mit Ausnahme dieses Spezialfalles wird durch eine Drehung um die z-Achse mit dem Winkel α und einer Drehung um die x-Achse mit dem Winkel β die Kreisebene in die x-y-Ebene transformiert. Für die Rotationsmatrix R gilt:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad [K.3]$$

$$\text{mit } \alpha = \begin{cases} \arctan\left(\frac{A}{B}\right) & \text{für } B \neq 0 \\ 90^\circ & \text{für } B = 0 \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{C}\right) & \text{für } C \neq 0 \\ 90^\circ & \text{für } C = 0 \end{cases}$$

3. Mit der Rotationsmatrix R wird der Mittel-, Start-, Hilfs- und Endpunkt des Kreises bzw. Kreisbogens auf die x-y-Ebene transformiert. Der Kreisradius r wird aus dem Abstand zwischen dem Mittel- und dem Startpunkt berechnet. Zur Bestimmung der Lage, der Bogenlänge und der Orientierung des Kreisbogens werden die Richtungswinkel in der x-y-Ebene t_{MS} , t_{MH} und t_{ME} analog den Gleichungen [A.1], [A.2] berechnet (s. Anhang A). Es muß die folgende Fallunterscheidung gemacht werden:

| | $t_{ME} > t_{MS}$ | | $t_{ME} < t_{MS}$ | | |
|-----------------------|----------------------------------|---|---|---------------------------------|-------|
| | $t_{MS} < t_{MH} < t_{ME}$ | $t_{MH} > t_{ME}$ oder $t_{MH} < t_{MS}$ | $t_{MH} > t_{MS}$ oder $t_{MH} < t_{ME}$ | $t_{ME} < t_{MH} < t_{MS}$ | |
| Orientierung | rechtsdrehend (math. negativ) | linksdrehend (math. positiv) | rechtsdrehend (math. negativ) | linksdrehend (math. positiv) | [K.4] |
| Bogenlänge γ_K | $t_{ME} - t_{MS}$ | $400 \text{ gon} + t_{MS} - t_{ME}$ | $400 \text{ gon} + t_{ME} - t_{MS}$ | $t_{MS} - t_{ME}$ | |

Abhängig von der Anzahl n der Liniensegmente werden die $n+1$ Eckpunkte des Polygons mit Gleichung [K.5] berechnet:

$$\begin{aligned} \bar{x}[i] &= \bar{x}_M + r \cdot \sin(t_{MS} \pm i \frac{\gamma_K}{n}) \\ \bar{y}[i] &= \bar{y}_M + r \cdot \cos(t_{MS} \pm i \frac{\gamma_K}{n}) \end{aligned} \quad [K.5]$$

für $i = 0 \dots n$ und

$$\text{Vorzeichen} = \begin{cases} + \text{ Orientierung rechtsdrehend} \\ - \text{ Orientierung linksdrehend} \end{cases}$$

- Die so berechneten Endpunkte der Liniensegmente werden dann wieder in die tatsächliche Kreisebene transformiert. Die Matrix \bar{R} für diese Rücktransformation ist identisch der Rotationsmatrix R (s. Gl. [K.3]) mit $\bar{\alpha} = -\alpha$ und $\bar{\beta} = -\beta$. Für den bereits oben angeführten Sonderfall $A \equiv B \equiv 0$ sind die nach Gl. [K.5] berechneten Werte bereits die tatsächlichen Koordinaten, und es ist keine Koordinatentransformation erforderlich.

Anhang L. Parameter für das GMS-Graphikprogramm

Die Abbildungsparameter der Theodolitkamera und diverse weitere Systemparameter für das GMS-Graphikprogramm sind in der Datei KAMERA.DAT eingetragen:

```
Kameradaten für GMS-Graphikprogramm
20.07.1990 Kamera.dat
-----
33.5          /* 1: Parallaxe Weitwinkel Weitenversatz (p_weite) */
83.5          /* 2: Parallaxe Weitwinkel Höhenversatz (p_hoehe) */
4500.0        /* 3: Weitwinkel Schnittentfernung (p_schnt) */
12.0          /* 4: Öffnungswinkel horizontal (o_wink_h) */
8.0           /* 5: Öffnungswinkel vertikal (o_wink_v) */
5.8           /* 6: CCD-Chip Höhe (ccd_h) */
8.4           /* 7: CCD-Chip Breite (ccd_b) */
-505.5173172 /* 8: V1 V1 - V3: Parameter zur Berechnung des */
-68.5727558  /* 9: V2          von der panfokalen Fernrohr- */
-2.1006037   /*10: V3          optik erfassten Bildfeldes */
1.368908324 /*11: E1 E1 - E6: Parameter fuer den */
-0.022437797 /*12: E1          funktionalen Zusammenhang */
0.001607617 /*13: E3          zwischen den */
1.0          /*14: E4          Fokussinkrementen */
0.135648678 /*15: E5          und der eingestellten */
0.004155355 /*16: E6          Zielentfernung */
150.00       /*17: Offset vordere Klippinggrenze in mm (vdv) */
10000.0      /*18: hintere Klippinggrenze in mm (vdh) */
0.170        /*19: Verdrehung Weitwinkel im Uhrzeigersinn(kdrw)*/
-5.0         /*20: X-Versatz des Fadenkreuzes (fdxversatz) */
-17.0        /*21: Y-Versatz des Fadenkreuzes (fdyversatz) */
-4.0         /*22: X-Versatz Fadenkreuz im Kopfstand (fdxmv) */
-14.0        /*23: Y-Versatz Fadenkreuz im Kopfstand (fdymv) */
3.0          /*24: Mausgeschw.(Fadenkreuzeichung) (FAKTM) */
3.0          /*24: Mausgeschw.(Picken eines Zielp.) (FAKTM2) */
1            /*26: Front-Clipping Ein=1 , sonst 0 (CLIP_V) */
1            /*27: Back-Clipping Ein=1 , sonst 0 (CLIP_H) */
70           /*28: Grundeinst. GAIN(Weitwinkel): 0=min 255=max */
0            /*29: Grundeinst. OFFSET(weitwinkel):0=max 255=min*/
254          /*30: Grundeinst. GAIN(Fernrohr): 0=min 255=max */
0            /*31: Grundeinst. OFFSET(Fernrohr): 0=max 255=min */
72           /*32: Anzahl Liniensegmente bei Kreisumsetzung (N)*/
-----
```

Dadurch, daß alle relevanten Abbildungs- und Systemparameter in einer Datei eingetragen sind, können diese Werte bei Veränderungen (z.B. neue Kamera) einfach angepaßt werden; ein Editieren des Quelltextes ist somit nicht erforderlich.

Anhang M. Größe des erfaßten Bildausschnitts

Für eine Optik mit konstantem Öffnungswinkel ist die Höhe bzw. Breite des erfaßten Bildausschnitts (Weltfenster) linear abhängig von der Objektentfernung a_z (s. Abb. 10 auf Seite 18). Betrachtet man den Abbildungsmaßstab β , so gilt für eine Optik mit konstantem Öffnungswinkel:

$$\beta_{fix} = \frac{\text{Bildgröße}}{\text{Gegenstandsgröße}} \sim \frac{1}{a_z} \quad [M.1]$$

Da der Öffnungswinkel des panfokalen Theodolitfernrohrs mit wachsender Zielentfernung a_z kleiner wird, ist der Zusammenhang nach Gl. [M.1] für das Meßsehfeld nicht gültig. Zur Bestimmung eines funktionalen Zusammenhangs $\beta_{pan} = f(a_z)$ wurden für unterschiedliche Zielentfernungen die jeweiligen Bild- und Gegenstandsgrößen registriert. Aus dieser Meßreihe wurde dann der funktionale Zusammenhang in Gl. [M.2] empirisch ermittelt (der Zusammenhang zwischen der Zielpunktentfernung a_z und den Fokusinkrementen i_f ist im Anhang B dargestellt):

$$\beta_{pan} = v_1 \cdot \hat{i}_F^2 + v_2 \cdot \hat{i}_F + v_3 \quad [M.2]$$

$$\begin{aligned} \text{mit } \hat{i}_F &= -0,0000025 \cdot i_F \\ v_1 &= -505,5173172 \\ v_2 &= -68,5727558 \\ v_3 &= -2,1006037 \end{aligned}$$

Die Größen v_1 , v_2 und v_3 sind auch in der Parameterdatei des GMS-Graphikprogramms eingetragen (s. Parameter 8 - 10 im Anhang L). Mit der Gleichung [M.2] kann für die aktuelle Fokuseinstellung i_f die Größe des Weltfensters b_{wx} , b_{wy} (s. Abb. 42 auf Seite 93) aus der bekannten CCD-Chipgröße b_{cx} , b_{cy} (s. Parameter 6 und 7 im Anhang L) errechnet werden:

$$\begin{aligned} b_{wx} &= \frac{b_{cx}}{\beta_{pan}} \quad \text{bzw.} \\ b_{wy} &= \frac{b_{cy}}{\beta_{pan}} \end{aligned} \quad [M.3]$$

Anhang N. Der Zielpunktversatz im Weitwinkelbild

Aufgrund des unterschiedlichen Strahlengangs der Weitwinkel- und der Fernrohroptik (s. Abb. 11 auf Seite 18) zeigt der Fernrohrzielpunkt im Weitwinkelbild einen abstandsabhängigen Versatz. Dieser Bildversatz setzt sich zusammen aus einem horizontalen und einem vertikalen Versatz.

Der horizontale Versatz Δh_p wird dadurch verursacht, daß die beiden optischen Achsen nicht in einer gemeinsamen Ebene liegen. Gegenüber der Fernrohroptik ist die optische Achse des Weitwinkelbildes um $\Delta\alpha_A$ horizontal gedreht.

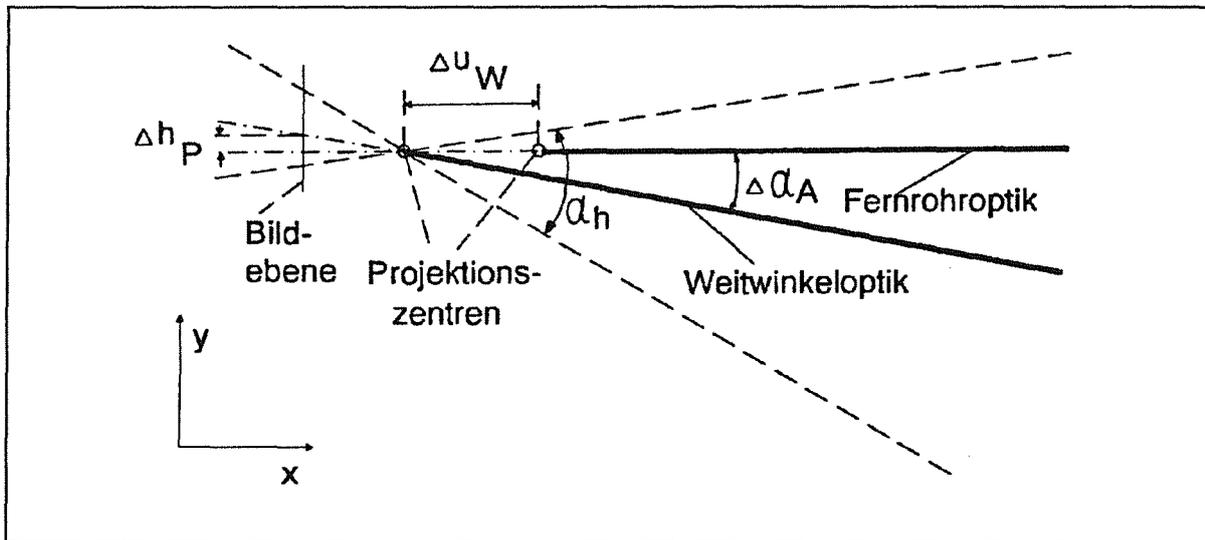


Abbildung 43. Strahlengang der Weitwinkel- und Fernrohroptik (Draufsicht). Skizze zur Berechnung des horizontalen Versatzes Δh_p (s.a. Abb. 11 auf Seite 18)

Der aus der Verdrehung $\Delta\alpha_A$ resultierende horizontale Pixelversatz $\Delta\hat{h}_p$ kann mit dem Strahlensatz bestimmt werden (horizontale Auflösung: 512 Pixel):

$$\frac{\Delta\hat{h}_p}{512 \text{ Pixel}} = \frac{\Delta\alpha_A}{\alpha_h} \quad [N.1]$$

Während diese Verdrehung einen konstanten Pixelversatz erzeugt, ist der vertikale Bildversatz Δv_p von der Zielentfernung abhängig (s. Abb. 44 auf Seite 134). Für den Schnittwinkel α_s gilt:

$$\alpha_s = \arctan \frac{\Delta v_W}{a_s + \Delta u_W} \quad [N.2]$$

Mit dem Strahlensatz kann der Versatz Δv_p für die Zielentfernung a_z berechnet werden:

$$\frac{a_s + \Delta u_W + \Delta v_W \cdot \sin \alpha_s}{a_s - a_z} = \frac{\frac{\Delta v_W}{\cos \alpha_s}}{\Delta v_p} \quad [N.3]$$

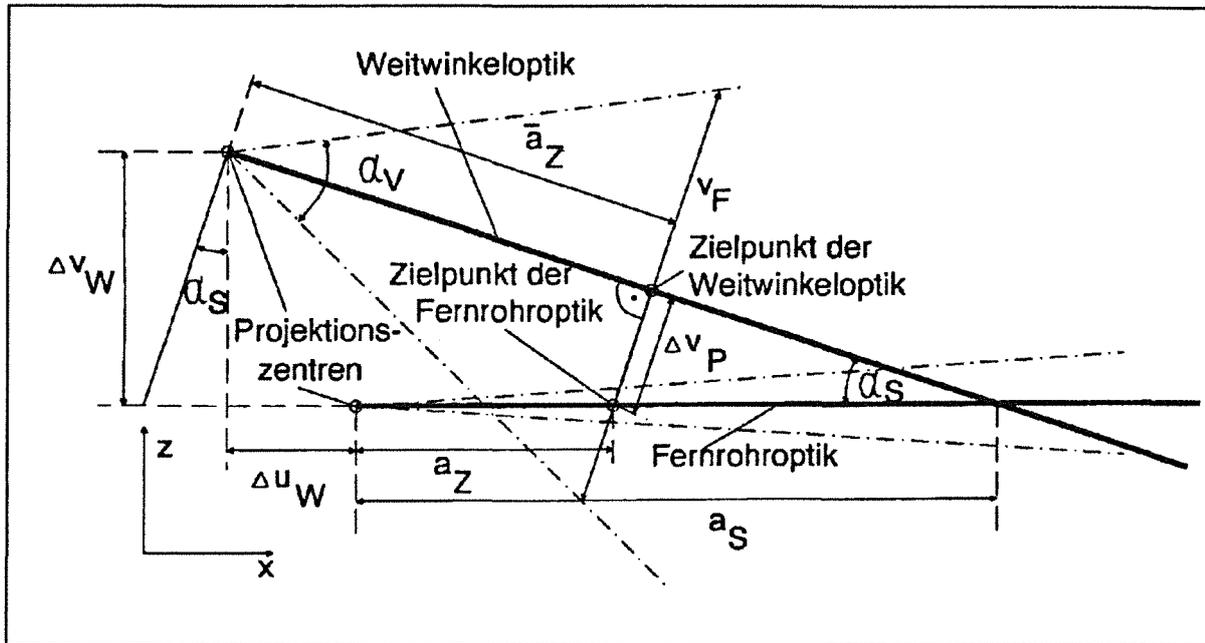


Abbildung 44. Strahlengang der Weitwinkel- und Fernrohroptik (Seitenansicht). Skizze zur Berechnung des abstandsabhängigen vertikalen Bildversatzes Δv_P (s.a. Abb. 11 auf Seite 18)

Vertikale Fenstergröße v_F bei der Entfernung a_Z :

$$v_F = 2 \cdot \bar{a}_Z \tan \frac{v_W}{2} \quad [N.4]$$

$$\text{mit: } \bar{a}_Z = \frac{\Delta u_W + a_Z}{\cos \alpha_S}$$

Für die Bestimmung des Pixelversatzes $\Delta \hat{v}_P$ genügt eine einfache Dreisatzberechnung (vertikale Auflösung: 512 Pixel):

$$\frac{\Delta \hat{v}_P}{256 \text{ Pixel}} = \frac{\Delta v_P}{\frac{v_F}{2}} \quad [N.5]$$

Da aber nur ganzzahlige Pixelwerte dargestellt werden können, muß der mit Gl. [N.5] berechnete Pixelwert noch auf- oder abgerundet werden. Ist der Pixelversatz $\Delta \hat{v}_P$ größer als 256 bzw. kleiner als -256, wird der vom Theodolitenfernrohr angezielte Punkt von der Weitwinkeloptik nicht mehr erfaßt.

Anhang O. Schnittstelle des GMS-Graphikprogramms

Für die Datenübertragung zwischen dem GMS-Graphik- und dem GMS-Vermessungsprogramm ist die serielle RS-232-Schnittstelle wie folgt konfiguriert:

Datenbits: 7
Stopbit: 1
Paritätsbit: 1(even)
Übertragungsgeschwindigkeit: 9600 baud

Für das Datenübertragungsprotokoll wurde festgelegt, daß das sendende System vor jeder zu übertragenden Befehlssequenz das Zeichen <STX> (Start of TeXt, ASCII Nr. 2) schickt. Ist das zu empfangende System bereit, wird als Antwort auf dieses <STX> das Zeichen <DC1> (Device Control 1, ASCII Nr. 17) zurückgeschickt. Erst wenn der Empfänger seine Bereitschaft bestätigt hat, wird die eigentliche Information gesendet. In den ersten drei Bytes der Information ist die Länge n_i der zu übertragenden Sequenz (Anzahl der ASCII-Zeichen) eingetragen. Im Anschluß daran folgt die eigentliche Information. Die bisher implementierten Befehlssequenzen sind in Tabelle 19 auf Seite 136 eingetragen.

Die gesendete Information besteht aus $n_i - 7$ ASCII-Zeichen. Enthält die Befehlssequenz auch rationale Zahlen, werden sie im Format 12:4 (Vorzeichen(\pm), 6 Vorkomma- und 4 Nachkommastellen, Dezimaltrennzeichen: '.') übergeben. Auch bei positiven Werten wird als erstes Zeichen ein '+' gesendet. Als Trennzeichen wird nach jeder Realzahl ein Komma übertragen.

Um Übertragungsfehler zu erkennen, wird im Anschluß eine dreistellige Prüfsumme gesendet. Für die Bildung dieser Quersumme werden die Ordnungszahlen der ASCII-Zeichen addiert (s. a. Abb. 45 auf Seite 137). Um den Übertragungsaufwand zu verringern, werden nur die letzten drei Stellen dieser errechneten Prüfsumme gesendet. Jede zu transferierende Sequenz wird mit dem Zeichen <ETX> (End of TeXt, ASCII Nr. 3) beendet.

Nach dem Einlesen der gesendeten Information vergleicht der Empfänger die gesendete Prüfsumme mit der errechneten Quersumme und es wird überprüft, ob die Information interpretiert werden kann. Sind die Überprüfungen positiv, schreibt der Empfänger das Zeichen <ACK> (ACKnowledge, ASCII Nr. 6) auf die Schnittstelle. Wird bei der Prüfung ein Fehler festgestellt, schickt der Empfänger das Zeichen <NAK> (Negative AcKnowledge, ASCII Nr. 21) an das sendende System. In diesem Fall wird die zu übertragende Sequenz noch einmal auf die Schnittstelle geschrieben. Tritt auch nach zweimaliger Wiederholung noch ein Fehler auf, wird der Übertragungsversuch mit entsprechender Meldung abgebrochen.

| Befehl 1. Fernrohrlage(+) 2. Fernrohrlage(-) | Parameter a_z : Zielentfernung [m] x_T, y_T, z_T : Theodolitkoordinaten [mm] x_Z, y_Z, z_Z : Zielpunktkoordinaten [mm] Z_n : Zielpunktkenung und Nummer (z.B. 'M003' für den dritten Meßpunkt) | Bedeutung (Tastenschlüssel s. Anhang J.1) |
|---|---|--|
| '±A1' | keine | Parallaxenskala im Weitwinkelsehfeld (Taste 's'). |
| '±A2' | a_z | Parallaxenkorrigiertes Fadenkreuz im Weitwinkelsehfeld mit Entfernungseinblendung (Taste 'f', 'g'). |
| '±B1' | $x_T, y_T, z_T, x_Z, y_Z, z_Z$ | Drahtmodell ohne Meß- und Referenzpunkte, Kamerabild ausgeblendet (Taste 'a' und 'd'). |
| '±B2' | $x_T, y_T, z_T, x_Z, y_Z, z_Z$ | Wie 'B1' und Markierung aller Referenzpunkte (Taste 'a' und 'r'). |
| '±B3' | $x_T, y_T, z_T, x_Z, y_Z, z_Z$ | Wie 'B1' und Markierung aller Meßpunkte (Taste 'a' und 'b'). |
| '±B4' | $x_T, y_T, z_T, x_Z, y_Z, z_Z$ | Wie 'B1' und Markierung aller Zielpunkte (Taste 'a' und 'n'). |
| '±C1' - '±C4' | $x_T, y_T, z_T, x_Z, y_Z, z_Z$ | Wie 'B1' - 'B4', aber dem aktuellen Kamerabild überlagert (Tasten 'd', 'r', 'b', 'n'). |
| '±E1' | $x_T, y_T, z_T, x_Z, y_Z, z_Z, Z_n$ | Wie 'C1' und Markierung des Zielpunktes Z_n (Taste 'z'). |
| '±E2' | $x_T, y_T, z_T, x_Z, y_Z, z_Z, Z_n$ | Markierung des Zielpunktes Z_n , wie 'E1' ohne Drahtmodell (Taste 'x'). |
| '±F1' - '±F4' | $x_T, y_T, z_T, x_Z, y_Z, z_Z$ | Wie 'C1' - 'C4' aber für das Fernrohrsehfeld (Tasten 'd', 'r', 'b', 'n'). |
| '±G1', '±G2' | $x_T, y_T, z_T, x_Z, y_Z, z_Z, Z_n$ | Wie 'E1', 'E2' aber für das Fernrohrsehfeld (Taste 'x', 'z'). |
| '±P1' | $x_T, y_T, z_T, x_Z, y_Z, z_Z$ | Mausgesteuertes Anpicken eines Bildpunktes im Weitwinkelsehfeld; Graphik schickt an das Vermessungsprogramm die Versatzwerte $\delta x, \delta y$ (Taste 'p'). |
| '±P2' | $x_T, y_T, z_T, x_Z, y_Z, z_Z$ | Wie 'P1', aber für das Fernrohrsehfeld (Taste 'p'). |
| 'O' | keine | Ausblenden der überlagerten Graphik (Taste 'o'). |
| 'K' | keine | Kamerabild einschalten, Befehl 'L' wird aufgehoben (Taste 'e'). |
| 'L' | keine | Kamerabild ausblenden (Taste 'a'). |
| 'M' | keine | Pixelzoom eines mit Maus gewählten Bereichs (Taste 'v'). |
| '±N1', '±N2' | $x_T, y_T, z_T, x_Z, y_Z, z_Z$ | Wie 'P1' bzw. 'P2', aber vor dem anpicken wird der zentrale Bildausschnitt noch um Faktor 2 vergrößert (Taste 'l'). |
| '±Q' | keine | Graphische Markierung des Fadenkreuz des Theodolitfernrohrs (Taste 'h'). |

| | | |
|-----|--|--|
| 'U' | keine | Kontrast- und Helligkeitseinstellung für Weitwinkelbild (Taste '(', ')'). |
| 'V' | keine | Kontrast- und Helligkeitseinstellung für Fernrohrbild (Taste '[', ']'). |
| 'W' | keine | Mausgesteuerte Kontrast- und Helligkeitseinstellung (Taste 'k'); ist der Einstellvorgang beendet (Drücken der rechten Maustaste), schickt der Graphikrechner das Zeichen 'E' an den INTEL-Rechner. |
| 'Z' | Graphikzoomwert κ ($-10 \leq \kappa \leq 10$) | Vergrößerte ($\kappa > 0$) bzw. verkleinerte ($\kappa < 0$) Darstellung des Graphikmodells (Taste '[', ']'). |

Tabelle 19. Die implementierten Befehlssequenzen der GMS-Graphik

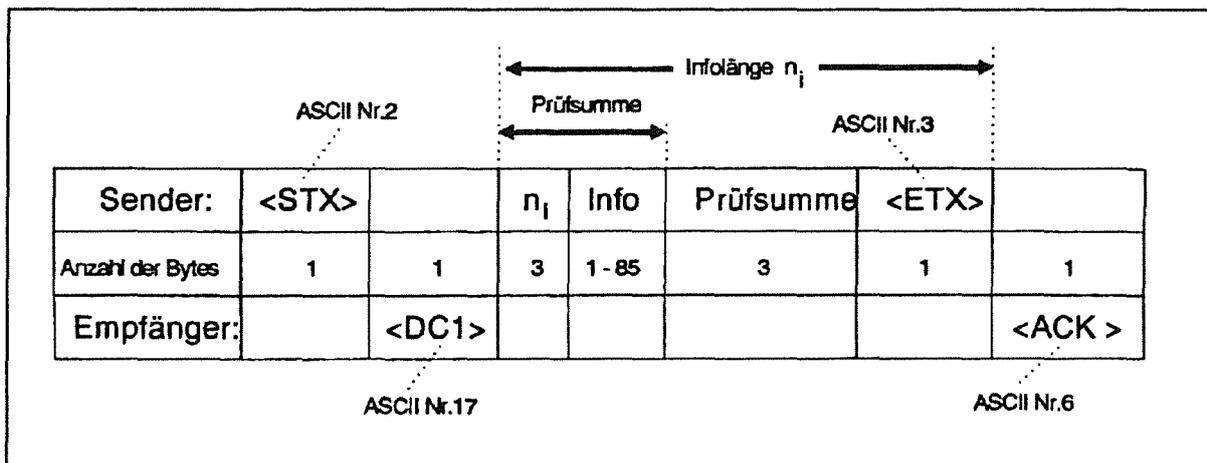


Abbildung 45. Protokoll der GMS-Graphikschnittstelle

- /1/ HOLLOWAY, C.; SALPIETRO, E.: Maintenance Concepts for NET, Proceedings of a technical committee meeting in Karlsruhe (Februar 1988): Robotics and remote maintenance concepts for fusion machines, IAEA-TecDoc-495, International Atomic Energy Agency, Wien 1989
- /2/ KÖHLER, B.: GMS - a high-precision Geometry Measurement System for large fusion reactor components, Proceedings of a technical committee meeting in Karlsruhe (Februar 1988): Robotics and remote maintenance concepts for fusion machines, IAEA-TecDoc-495, International Atomic Energy Agency, Wien 1989
- /3/ SCHRÖDER, J.: Fernvermessung von Fusionsanlagen, Primärbericht (unveröffentlicht), Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe 1984
- /4/ LARDELLI, A.: Elektronische Theodolite im industriellen Bereich, Technische Rundschau 4(1984), Hallweg Verlag, CH-Bern 1984
- /5/ WILD HEERBRUGG AG: Bringing Measurement to the Mountain, Quality Today 4(1984), IPC Business Press, UK-Sutton 1984
- /6/ LEITZ, H.: Computergestützte Koordinatenbestimmung durch räumlichen Vorwärtschnitt mit elektronischen Präzisionstheodoliten, VDI-Berichte Nr. 472, VDI-Verlag, Düsseldorf 1983
- /7/ WILD HEERBRUGG AG: Elektronische Theodolite und Tachymeter (T2000, TC2000, T2000 S), Firmenschrift G1 273d-II.85, Wild Heerbrugg AG, CH-Heerbrugg 1985
- /8/ GOTTWALD, R.: SPACE - Ein automatisiertes berührungsloses 3-D Meßsystem für die Industrie, Proceedings of 7.th conference on Robot Vision and Sensory Controls (RoViSec), Zürich 1988
- /9/ KATOWSKI, O.: Deformationsmessungen an Bauwerken mit dem automatischen Theodolitmeßsystem ATMS, Proceedings of conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Wien 1989
- /10/ DEUMLICH, F.: Instrumentenkunde der Vermessungstechnik, VEB-Verlag, Berlin 1980
- /11/ SCHLEMMER, H.: Aktuelle Instrumentenkunde, Wichmann-Verlag, Karlsruhe 1985
- /12/ KAHMEN, H.: Vermessungskunde II, Sammlung Göschen, Verlag Walter de Gruyter, Berlin 1988
- /13/ GRAFAREND, E.: Fehlertheoretisch günstiges Vorwärtseinschneiden, Zeitschrift für Vermessungswesen 93(1968), Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1968
- /14/ HAMACHER, W.: Zum fehlertheoretischen günstigsten Vorwärtseinschneiden, Zeitschrift für Vermessungswesen 94(1969), Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1969
- /15/ GROTEN, E.: Zur Definition des mittleren Punktfehlers, Zeitschrift für Vermessungswesen 94(1969), Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1969

- /16/ STAIGER, R.: Theoretische Untersuchung zum Einsatz von Industriemeßsystemen, Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C: Dissertationen, Heft Nr. 340, C.H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München 1988
- /17/ WESTER-EBBINGHAUS W.: Ingenieur-Photogrammetrie - neue Möglichkeiten, Bund der öffentlich bestellten Vermessungsingenieure, Forum 4/89, Richard Bacht Verlag, Essen 1987
- /18/ WESTER-EBBINGHAUS W.: Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen, Zeitschrift für Vermessungswesen 3(1985), Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1985
- /19/ WOLF, H.: Ausgleichungsrechnung - Formeln zur praktischen Anwendung, Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn 1975
- /20/ KÖHLER, B.: Surveying of large fusion reactor components, Proceedings of 15th Symposium on Fusion Technology, Volume 2, North-Holland Verlag, Utrecht, 19.-23. September 1988
- /21/ ZHOU, Z.: Determination of Ellipse Centres in Digital Imagery, Technical Papers 1986 ACSM-ASPRS Annual Convention (1986)
- /22/ APPLICON: Bravo3, Editor - Command Reference Guide, Applicon Deutschland GmbH, Hahnstr. 70, 6000 Frankfurt 71, 1987
- /23/ KATOWSKI, O.: RMS2000 - ein System zum berührungslosen Messen großer Objekte, Allgemeine Vermessungsnachrichten 6(1985), Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe 1985
- /24/ STEMMER: Imaging Technology VS100, Newsletter (Prospekt) von der Fa. Stemmer, Gutenbergstr. 11, D-8039 Puchheim, 1989
- /25/ KAHMEN, H.: Vermessungskunde III, Sammlung Göschen, Verlag Walter de Gruyter, Berlin 1988
- /26/ BRANDSTÄTTER, G.: Vom monofokalen zum panfokalen geodätischen Fernrohr, Mitteilung des Geodätischen Institut der TU Graz, Nr. 52, Graz 1986
- /27/ KATOWSKI, O.: Automation of electronic angle-measuring instruments, Proc. of the second Industrial and Engineering Survey Conference, London, 2.-4. Sept. 1987
- /28/ REISSMANN, G.: Die Ausgleichungsrechnung, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1980
- /29/ GROSSMANN, W.: Grundzüge der Ausgleichungsrechnung, Springer-Verlag, Berlin 1969
- /30/ SCHNÄDELBACH, K.: Genauigkeitsmaße zwischen Punkten in dreidimensionalen Netzen, Allgemeine Vermessungsnachrichten 7(1989), Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe 1989
- /31/ KERSTING, N.: Optimale Konfiguration beim Vorwärtseinschneiden mit Industriemeß-Systemen, Allgemeine Vermessungsnachrichten 5(1987), Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe 1987

- /32/ BROWN, D.: Adaption of the bundle method for triangulation of observation made by digital Theodolites, Nr. 43, Conference of Southern African Surveyors, Johannesburg 1985
- /33/ BENNING, W.: Zur freien Stationierung bei zwei Anschlußpunkten mittels Theodolitmessungen, Vermessungswesen und Raumordnung 47/3+4(Mai 1985), Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn 1985
- /34/ KÖHR, J.: Genauigkeit der Punktbestimmung mittels Horizontal- und Vertikalwinkelmessung nach zwei Festpunkten, Zeitschrift für Vermessungswesen 5(1965), Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1968
- /35/ STAIGER, R.: Stellungnahme zum Artikel: Zur freien Stationierung bei zwei Anschlußpunkten mittels Theodolitmessungen von Wilhelm Benning, Vermessungswesen und Raumordnung 48/1+2(Jan. 1986), Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn 1985
- /36/ BLEICH, P.; ILLNER, M.: Strenge Lösung der räumlichen Koordinatentransformation durch iterative Berechnung, Allgemeine Vermessungsnachrichten 4(1989), Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe 1989
- /37/ GRABOWSKI, H.; GLATZ, R.: Schnittstellen zum Austausch produktdefinierender Daten, VDI-Zeitung 10(1986), VDI-Verlag, Düsseldorf 1986
- /38/ NBS: Initial Graphics Exchange Specifications (IGES), Version 1.0, National Bureau of Standards (NBS), US. Department of Commerce, Washington DC 20234, 1980
- /39/ ANSI: Digital Representation of Product Definition Data, Data Chapter I-IV, ANSI Y14.26M-1981, American National Standards Institute (ANSI), 1981
- /40/ NBS: Initial Graphics Exchange Specifications (IGES), Version 2.0, National Bureau of Standards (NBS), US. Department of Commerce, Washington DC 20234, 1983
- /41/ NBS: Initial Graphics Exchange Specifications (IGES), Version 3.0, National Bureau of Standards (NBS), US. Department of Commerce, Washington DC 20234, 1986
- /42/ NBS: Initial Graphics Exchange Specifications, Recommended Practise Guide, Version 3.0, National Bureau of Standards (NBS), US. Department of Commerce, Washington DC 20234, 1985
- /43/ NBS: Initial Graphics Exchange Specifications (IGES), Version 4.0, National Bureau of Standards (NBS), US. Department of Commerce, Washington DC 20234, 1988
- /44/ VDA/VDMA: VDA-Flächenschnittstelle (VDAFS), VDA-Arbeitskreis CAD/CAM, Verband der Automobilindustrie (VDA), Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA), Frankfurt 1983
- /45/ DIN: VDA-Flächenschnittstelle (VDAFS), Version 1.0, DIN 66301, Beuth Verlag, Berlin 1986
- /46/ VDA/VDMA: VDA-Flächenschnittstelle (VDAFS), VDA-Arbeitskreis CAD/CAM, Verband der Automobilindustrie (VDA), Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA), Frankfurt 1987
- /47/ AEROSPATIALE: Standard d'Échange et de Transfer (SET), Version 1.1, Aérospatiale Direction Technique, Paris 1984

- /48/ AFNOR: Automatisation industrielle, Représentation externe des données de définition de produits, Specifications du standard d'échange et de transfert (SET), Z68-300, Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris 1985
- /49/ ANDERL, R.: Schnittstellen zum Austausch produktdefinierender Daten, Fortschrittliche Betriebsführung und Industrial Engineering, REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation, Darmstadt 1987
- /50/ OWEN, J.: STEP Part 1: overview and fundamental principles, Dokument Nr. 467, ISO TC184/SC4/WG1, 1990
- /51/ SCHLECHTENDAHL, E.G.: CAD Interfaces - results of ESPRIT Project 322 (CAD*I) - CAD data transfer for solid models, Springer Verlag, Heidelberg 1989
- /52/ SCHLECHTENDAHL, E.G.: Transporting Geometric Models - Results of the CAD*I Project, Proc. of the IFIP WG 5.2/GI Int. Symp. on Advanced Geometric Modelling for Engineering Applications, Berlin, 8.-10. November 1989
- /53/ BING, F.: Entwicklung von Schnittstellensoftware zur Kommunikation eines INTEL-Rechners mit einem CAD-System, Diplomarbeit (unveröffentlicht), Institut für Reaktortechnik, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe 1987
- /54/ KATZAN, H.: FORTRAN 77, Computer science series, van Nostrand Reinhold Company, New York 1978
- /55/ HAMMERSCHMIDT, R.; PARLAR, K.; TSANTAS, K.: Schnittstellen - der Kampf um Verständigung, CAD-CAM Report 5/87, Dressler Verlag, Heidelberg 1987
- /56/ SCHUSTER, R.; TRIPPNER, D.: Erfahrungen beim CAD/CAM-Datentransfer mit der IGES-Schnittstelle, CAD/CAM 4/85, CAD/CAM Verlag, München 1985
- /57/ EIGNER, M.; MAIER, H.: Einstieg in CAD, Carl Hanser Verlag, München 1985
- /58/ AHO, A.; ULLMAN, J.: Principles of Compiler Design, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts 1977
- /59/ BERGMANN, L.; SCHAEFER, C.: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3 (Optik), Verlag Walter de Gruyter, Berlin 1987
- /60/ GRIMSEHL, E.: Lehrbuch der Physik, Band 3 (Optik), Verlagsgesellschaft B. G. Teubner, Leipzig 1982
- /61/ IMAGING TECHNOLOGY: Itex100 Programmer's Manual, Vertrieb für Deutschland: Fa. Stemmer, Gutenbergstr. 11, D-8039 Puchheim, 1989
- /62/ FEITH, W.: TIFF-Praxis, c't-Magazin für Computertechnik 7/90, Verlag Heinz Heise, Hannover 1990
- /63/ STEMMER: Echte Grauwertausgabe mit Ventura Publisher und Pagemaker auf Standardlaserdrucker, Newsletter (Prospekt) von der Fa. Stemmer, Gutenbergstr. 11, D-8039 Puchheim, 1989
- /64/ KORNELSON, I.: Automatische Horizontierungsplattform ALF (Automatic Levelling Facility), Primärbericht (unveröffentlicht), Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1990

- /65/ PEWATRON AG: Firmenschrift über Inklinometer der Fa. Midori Precision, CH-8304 Wallisellen/Zürich 1990
- /66/ KERN-SWISS: Nivel 20 - das Neigungssystem von Kern Swiss, Firmenschrift 204d/9.88/FA, Kern & Co. AG, CH-Aarau, 1988
- /67/ PORTESCAP: Firmenschrift über Linearantriebe, Gülichstr. 12, 7530 Pforzheim 1990
- /68/ GROßKORDT, U.: Untersuchung des Industriemeßsystems GMS, Diplomarbeit (unveröffentlicht), Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe 1990
- /69/ WILD HEERBRUGG AG: Wild TMS, Firmenschrift G1 296d-X.88, Wild Heerbrugg AG, CH-Heerbrugg 1988
- /70/ 3M: 3M Retro-Reflective-Control, Katalog der Fa. 3M Deutschland GmbH, Carl-Schurz-Straße 1, 4040 Neuss, 1989
- /71/ EDDING: Edding transfer (Firmenkatalog), edding AG, Postfach 1447, 2070 Ahrensberg, 1988
- /72/ WOODWARD, C.: Practical experiences with the Wild-Leitz RMS2000 system, Proc. of the second Industrial and Engineering Survey Conference, London, 2.-4. Sept. 1987
- /73/ HAAG, R.: Anwendungen der 3D-Meßtechnik in der Industrie, Ingenieurvermessung 88 (Band 2), Ferd. Dümmers Verlag, Bonn 1988
- /74/ WADLE, M.: An extended multi-joint robot (EMIR) for outdoor applications, Proc. of Third Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Charleston, South Carolina, 13.-16. März 1989
- /75/ KÖHLER, B.; WADLE, M.: Kalibrierung eines Großroboters mit einem elektronischen Theodoliten, Robotersysteme, Band 6, Heft 2, Juni 1990, Springer Verlag, Berlin 1990
- /76/ BENNER, J.; TILL, W.; WALZ, C.: Automation of Remote Maintenance by an Industrial Robot Mounted on a Gantry Crane, Proc. of Third Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Charleston, South Carolina, 13.-16. März 1989
- /77/ KÜHNAPFEL, U.: KISMET - 3D-Grafik zur Planung, Programmierung und Überwachung von Telerobotics-Applikationen, VDI-Berichte Nr. 861.3, VDI-Verlag, Düsseldorf 1990
- /78/ HEEG, R.; KÖHLER, B.: Die Vermessung von CATROB mit dem GMS-Fernvermessungssystem, Primärbericht (unveröffentlicht), Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe 1990
- /79/ ASM: Meßseilprinzip Sensoren (Firmenkatalog), ASM GmbH, von-Stauffenberg-Straße 25, 8025 Unterhaching bei München, 1988
- /80/ SCHYGULLA, U.: Vermessung des Vielgelenkgerätes EMIR, HTL-Notiz (unveröffentlicht), Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe 1988
- /81/ WADLE, M.: Versuche zur externen Referenzmessung kartesischer TCP-Bewegungen des EMIR, IRE-Notiz (unveröffentlicht), Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe 1989

- /82/ KÖHLER, B.: Einmessen der Fadengeber für Vermessungen am TFTR-Maintenance-Manipulator, IRE-Notiz (unveröffentlicht), Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe 1988
- /83/ SELIG, M.: The TFTR-Maintenance-Manipulator, Proceedings of a technical committee meeting in Karlsruhe (Februar 1988): Robotics and remote maintenance concepts for fusion machines, IAEA-Tec-Doc-495, International Atomic Energy Agency, Wien 1989
- /84/ HARRINGTON, S.: Computergrafik-Einführung durch Programmierung, McGraw-Hill Book Company, Hamburg 1988
- /85/ HOPPE, H.; STAIGER, R.: Strenge Auswertung bei der Echtzeittriangulation mit Industriemeßsystemen, Allgemeine Vermessungsnachrichten 7(1988), Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe 1988
- /86/ JORDAN, W.; EGGERT, O.; KNEISSL, M.: Handbuch der Vermessungskunde, Band II, Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1963
- /87/ GRAFAREND, E.: Optimales Design geodätischer Netze I, Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe A: Höhere Geodesie, Heft Nr. 74, C. H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München 1973
- /88/ BLEICH, P.: Programmerstellung und Untersuchung zur Modellbildung, Genauigkeit und Zuverlässigkeit im geometrischen 3D-Modell, Diplomarbeit (unveröffentlicht), Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe 1985
- /89/ MÜLLER, H.: Dreidimensionale Netzausgleichung in einem kartesischen Koordinatensystem, Allgemeine Vermessungsnachrichten 5(1982), Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe 1982
- /90/ GOTTHARDT, E.: Einführung in die Ausgleichsrechnung, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe 1978