Zeitschrift: IABSE proceedings = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen

Band: 14 (1990)

Heft: P-149: Use of satellites and measurement robots in the construction and monitoring of structures

Artikel: Satelliten und Roboter stützen die Produktion und Überwachung von Bauten

Autor: Kahmen, Heribert

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-42841

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Satelliten und Roboter stützen die Produktion und Überwachung von Bauten

Use of satellites and measurement robots in the construction and monitoring of structures

Emploi de satellites et de robots de mesure dans la construction et la surveillance d'ouvrages

Heribert KAHMEN
Prof. Dr.-Ing.
Techn. Universität Wien
Wien, Österreich

Heribert Kahmen, born 1940 study of geodesy at the University of Bonn and the Techn. Univ. Berlin, doctorate (Dr.-Ing.) 1973, 1978 – 1986 Professor, University Hannover (Germany), since 1986 Professor, Techn. University Vienna, prize winner of «Carl Pulfrich-Prize» 1981, involved in national and international projects in engineering surveying.

ZUSAMMENFASSUNG
Verschiedene Messroboter für die Absteckung und Überwachung von Hoch- und Brückenbauten werden beschrieben. Es wird gezeigt, wie Messroboter mit einem Satellitenpositionierungssystem zusammenarbeiten.

SUMMARY
Different types of measurement robots being used for setting out and deformation measurements of bridges and industrial buildings are described. It is shown how measurement robots work in combination with a satellite positioning system.

RÉSUMÉ
Divers robots de mesure pour l'implantation et la surveillance des bâtiments et des ponts sont décrits. L'article traite de l'interaction entre ces robots de mesure et un système de positionnement à l'aide d'un satellite.

EINLEITUNG

Praktische und wissenschaftliche Verfahren auf verschiedenen Gebieten des Bauingenieurwesens - z.B. der Baustatik und der Bodenmechanik - ermöglichen es, Materialien optimaler zu nutzen und zunehmend zu belasten, um Bauwerke von zunehmender Kühnheit und Größe zu errichten. Von besonderer Bedeutung ist daher in diesem Zusammenhang, Sicherheitskriterien dieser Bauwerke zu definieren und den Tragsicherheits- und Gebrauchsfähigkeitsnachweis zu erbringen.

Meßsysteme, die eine hochgenaue geometrische Realisierung der Bauwerke ermöglichen und mit hoher Sensibilität Formveränderungen überwachen, haben daher zunehmend an Bedeutung gewonnen. Da diese Meßverfahren mit einem hohen Arbeitsaufwand verbunden sind, in der Regel müssen größere Datenmengen erfaßt und verarbeitet werden, sollten sie hochgradig automatisiert sein. Rechnergestützte Meßverfahren und Meßroboter erfüllen diese Anforderungen.

Für die Absteckung und Überwachung eines Bauwerkes muß seine Form aus wirtschaftlichen Gründen durch eine bestimmte Anzahl von Objektpunkten abstrahiert werden. Die Anzahl und der Abstand der Punkte sollte so gewählt werden, daß die Form des Bauwerkes auch beim Anwenden von interpolierenden Verfahren erhalten bleibt. In der Regel werden daher heute Konstruktionsunterlagen der Bauwerke in Form von Tabellen dreidimensionaler Koordinaten der Objektpunkte als ein Ergebnis des Entwurfes zur Verfügung gestellt. Sie sind entweder in einem objektbezogenen Koordinatensystem (Koordinatensystem eines speziellen Bauwerkes) und/oder in dem Koordinatensystem der Baustelle gerechnet.

Die Koordinaten der Objektpunkte und deren Verschiebungen werden in der Natur durch Messen von Längen, Richtungen und deren Änderungen aufgesucht. Für das Messen dieser Größen stehen heute Meßverfahren hoher Präzision zur Verfügung. Auf ihre vielfältigen Einsatzmöglichkeiten, die Probleme ihrer Handhabung, ihre Automationsfreundlichkeit und ihre Integration in Produktionsprozesse wird nachfolgend eingegangen.

1. MESSGERÄTE FÜR DIE ABSTECKUNG UND ÜBERWACHUNG

Die Meßgeräte müssen insbesondere im Hoch- und Brückenbau oftmals hohen Anforderungen an die Automatisierung, Qualität und Qualitätssicherung genügen. Häufig sollen sie außerdem so beschaffen sein, daß aufgrund ihrer Messungen und deren Auswertung direkt steuernd in die Produktion eingegriffen werden kann. Diese Anforderungen erfüllen insbesondere Meßsysteme mit elektrischen Sensoren, durch die geometrische oder mechanische Größen in elektrische umgewandelt werden, damit diese von einem Rechner in Echtzeit für Auswerte- und Steuerungsvorgänge ausgewertet werden können.

Die klassischen geodätischen Meßinstrumente haben diese Entwicklung weitgehend mitvollzogen. Es stehen heute elektronische Theodolite aller Genauigkeitsklassen mit elektronischen Sensoren für das Messen von Horizontal- und Vertikalrichtungen zur Verfügung. Die Theodolite kann man mit einem elektronischen Distanzmesser so kombinieren, daß die zwei optischen Systeme koaxial verlaufen. Es lassen sich dann unmittelbar die drei Komponenten räumlicher Vektoren messen, in einem Speicher ablegen und rechnerisch auswerten. Eine ausführlichere Beschreibung dieser vektoriellen Meßsysteme (elektronischen Tachymeter) findet man z.B. in [7].

Mit der Einführung dieser Sensoren war nur ein erster Schritt für die Automatisierung von Absteckungs- und Überwachungsaufgaben vollzogen. Die Bewegung der Theodolitachsen und die Zieleinstellung erfolgte nach wie vor manuell mittels der Grob- und Feintriebe sowie der Zielmarken-Beobachtung durch das Fernrohrokular. Der Ruf nach weiterer Wirtschaftlichkeitssteigerung durch einen schnelleren Meßablauf und weniger Bedienungspersonal verlangte zusätzliche automationsfreundliche Komponenten.

Es lag nahe, Ideen der Robotik zu verfolgen. Laut Definition ist ein Roboter eine spezielle Art von Maschine, die
- von einem Menschen auszuführende Tätigkeiten übernehmen kann
- eine oder mehrere translatorische oder/und rotatorische Achsen besitzt
- vielfach zusätzlich mit Sensoren (z.B. für künstliches Sehen, Tasten, ...) ausgestattet ist
- sich eine Folge von Vorgängen merken und diese ohne Aufsicht wiederholen kann
- gegebenenfalls diese Vorgänge bei vorhandener Lernfähigkeit je nach zurückliegender Erfahrung abändern kann.

Meßroboter übernehmen vom Menschen die Aufgabe, die Erdoberfläche oder Objekte auf der Erdoberfläche in ihrem starren oder beweglichen Zustand räumlich zu vermessen. Die Kugelkoordinatenbauweise (Abb.1) erweist sich als besonders geeignet. Als Basiselement wird ein elektronischer Theodolit eingesetzt,

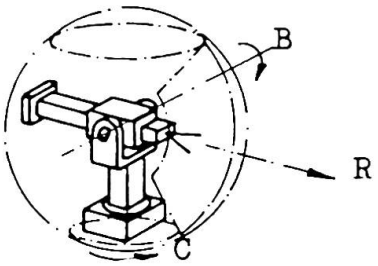

Abb.1 Kugelkoordinatenbauweise eines Roboters

dessen horizontale und vertikale Achse durch Schrittmotoren angetrieben werden. Die translatorische Achse wird durch die Optik eines Zielfernrohres und/oder Distanzmessers festgelegt, so daß in bezug auf das Koordinatensystem des Theodolits Richtungen und/oder Beträge von Vektoren zu Objektpunkten bestimmt werden können. In bezug auf das Kugelkoordinatensystem lassen sich folglich Objekte räumlich abtasten.

Die Steuerung des Roboters sorgt für den Gesamtablauf der Messungen sowie für die Kommunikation mit dem Menschen oder einem übergeordneten Betriebssystem. Abb.2 zeigt an einem Beispiel das Blockschaltbild der Steuerung eines Meßroboters.

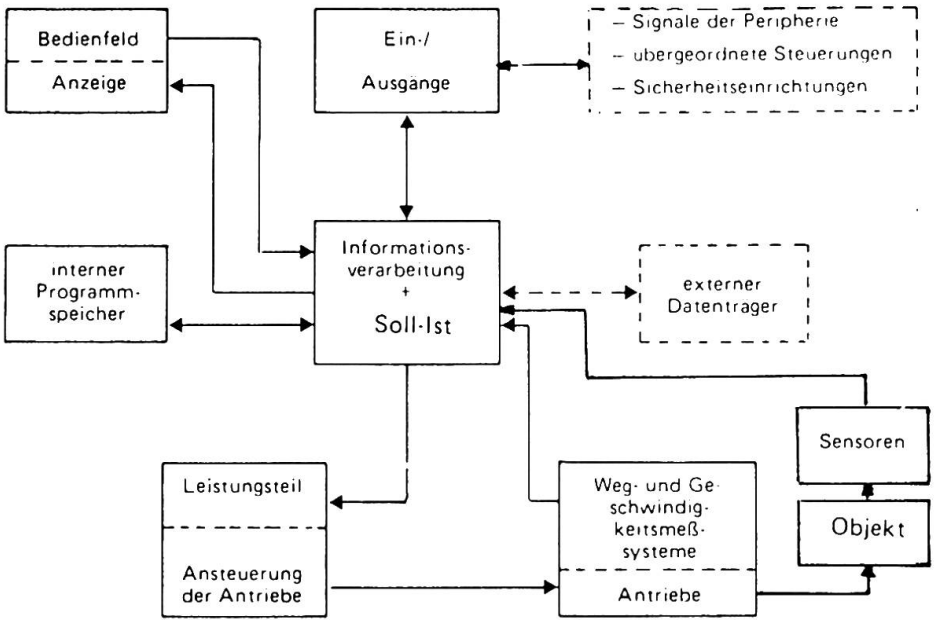

Abb.2 Aufbau der Steuerung eines Meßroboters

Das interne Programm legt fest, in welcher Reihenfolge - z.B. in Form von Rastern oder Profilen - die Punkte angefahren werden sollen und wie der eigentliche Zielvorgang ablaufen soll. Der Zielvorgang kann dabei, gesteuert durch einen oder mehrere Regelkreise, nach folgendem Schema ausgeführt werden: Von dem Steuerrechner bzw. dem System für die Informationsverarbeitung werden zunächst Soll-Koordinaten der Zielpunkte aus dem externen Datenträger übernommen. Diese sind aufgrund einer "Nullmessung" oder aus Konstruktionsunterlagen übernommen worden. Aus den Soll-Koordinaten werden Soll-Richtungen für die Ausrichtung der Theodolitachsen berechnet. Ein elektronisches Weg- bzw. Richtungsmeßsystem mißt außerdem ständig die Ist-Richtung der Achsen in bezug auf eine Referenzrichtung. Aus dem Differenzwinkel zwischen Soll- und Ist-Richtung werden anschließend Steuerdaten für die Ansteuerung der Antriebe ermittelt. Sind die Antriebe der Achsen Schrittmotoren, so wird die den Winkeldifferenzen entsprechende Schrittzahl berechnet, um die die Achsen noch gedreht werden sollen. Um dabei möglichst zeitsparend zu arbeiten, wird in der Regel in Abhängigkeit von der Schrittzahl ein bestimmter Beschleunigungs- und Bremsvorgang vorgegeben. Wenn aus fertigungstechnischen Gründen kein streng linearer Zusammenhang zwischen den Differenzwinkeln und der Schrittzahl gegeben ist, muß der Vorgang iterativ so lange wiederholt werden, bis der Differenzwinkel eine vorgegebene Schranke unterschreitet. Der Regelvorgang ist dann abgeschlossen.

Bei Deformationen des Objektes befinden sich die Zielpunkte teilweise oder manchmal auch insgesamt nicht mehr in der Soll-Position. Es muß dann ein zusätzlicher Zielvorgang eingestellt werden. Dieser Zielvorgang stützt sich auf einen weiteren Regelkreis (Abb.2) mit einem optoelektronischen Sensor: z.B. einer CCD-Kamera. Abb.3 zeigt an einem Beispiel, wie eine CCD-Kamera in

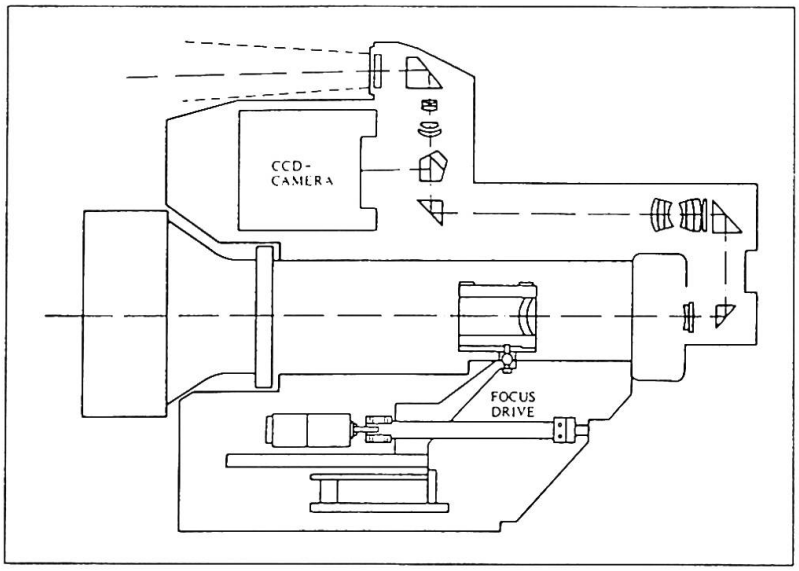

Abb.3 Fernrohr und integrierte Kamera eines Videotheodolits [4]

ein Theodolitfernrohr integriert werden kann. Die Kamera wird als optoelektronischer Bildaufnehmer für eine digitale Zielmarkenerkennung bzw. Bildverarbeitung eingesetzt. Über digitale Bildverarbeitung kann jetzt festgestellt werden, wie groß die horizontalen und vertikalen Ablagewinkel zwischen der Zielachse des Theodolits und der Richtung zum Zielpunkt sind. Um diese Ablagewinkel können anschließend die von den Richtungsgebern des Theodolits gemessenen Richtungen korrigiert werden. Befindet sich die Zielmarke nicht im Gesichtsfeld des Fernrohres, so werden nach einem vorgegebenen Schema die Achsen des Theodolits - gesteuert durch den zweiten Regelkreis - so lange bewegt, bis das Ziel von der Kamera eingefangen ist. Die gesamte Zielung mit beiden Regelkreisen läuft in der Regel pro Zielpunkt in wenigen Sekunden ab.

Neben den Meßrobotern mit Zielmarkendetektion gibt es außerdem solche, die das Fernrohr des Theodolits auf einen Objektpunkt ausrichten und dorthin eine Zielmarke projizieren. Bei einem Meßroboter mit Zielmarkenprojektion ist das Fernrohr des Theodolits mit einem Laser gekoppelt. Ein einzelner, vom Zielpunktprojektor auf das Objekt produzierter Zielpunkt wird allerdings in der Regel auf rauhen Oberflächen so diffus reflektiert, daß er von dem Meßroboter mit Zielmarkendetektion nicht aufgefunden werden kann. Außerdem würde der Speckles-Effekt für eine unsichere Zielmarkierung sorgen. Eine verbesserte Anordnung ist gegeben, wenn eine rotierende Planplatte im Strahlengang des Lasertheodolits dafür sorgt, daß der projizierte Meßpunkt sich auf einer um die Zielachse zentrierten Kreisbahn bewegt (Abb.4). In ge-

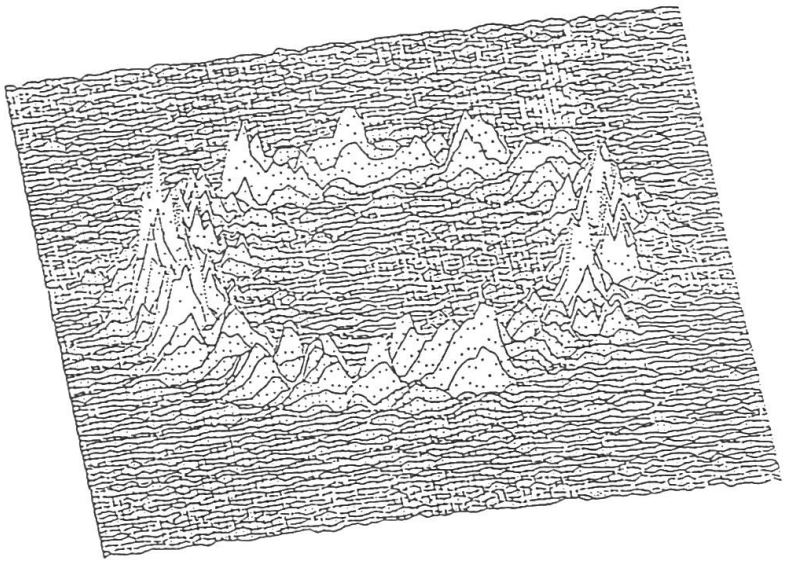

Abb.4 Speckles-Einfluß auf die Intensität des rotierenden Zielpunktes [8]

eignetem Zusammenwirken mit einem Bildverarbeitungssystem kann dann sichergestellt werden, daß der rotierende Meßpunkt während einer Umdrehung oft detektiert wird. Ein nachgeschalteter Mittelungsprozeß sorgt dafür, daß Unsicherheiten, die durch den Speckles-Effekt und durch Oberflächenrauhigkeiten entstehen, weitgehend eliminiert werden.

Ein weiterer Typ von Meßroboter ist gegeben, wenn der Theodolit mit einem elektrooptischen Distanzmesser gekoppelt ist. Die optische Achse des Theodolits kann dann mit der des Distanzmessers zusammenfallen (koaxiales System) oder parallel zu ihr verlaufen. Zu unterscheiden sind noch Distanzmesser, die am Zielpunkt einen Reflektor benötigen oder ohne einen künstlichen Reflektor Distanzen messen.

Verschiedene Meßanordnungen sind möglich. Meßroboter können einzeln oder kombiniert miteinander eingesetzt werden. Für die Positionierung und Orientierung ihres Koordinatensystems müssen ca. 4 Festpunkte (Paßpunkte) angemessen werden, deren (x-, y-, z-) Koordinaten bekannt sind. Als Ergebnis der Messungen zu den Festpunkten und Zielpunkten erhält man Büschel von Richtungen und/oder Distanzen, die ein räumliches Netz bilden. Die Koordinaten der Zielpunkte lassen sich daraus durch polares Anhängen, räumliches Vorwärtseinschneiden oder nach dem Bogenschlagverfahren rechnen. Beim Einsatz mehrerer Roboter hat man vielfach überbestimmte Beobachtungen. Die Zielpunktkoordinaten berechnet man dann durch eine räumliche Netzausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate.
Die bisher beschriebenen Meßsysteme setzt man vorwiegend auf enger begrenztem Raum - der z.B. durch die äußere Form eines Bauwerkes gegeben ist - ein. Häufig haben sie dabei die Aufgabe, in einem großräumigeren Festpunktrahmen durch Interpolation weitere Objektpunkte zu bestimmen.

Für großräumigere Aufgaben, z.B. für die Vermessung des übergeordneten Baustellennetzes, plant man heute vorteilhaft Satellitenpositionierungssysteme ein. Das Global Positioning System (GPS) besteht aus drei Segmenten: dem Weltraumsegment, dem Kontrollsegment und dem Nutzersegment.

Das Weltraumsegment hat in seinem Endausbau 18 GPS-Satelliten, von denen jeweils drei auf sechs Bahnen gleichmäßig verteilt sind. Die Bahnen sind 55° gegenüber der Äquatorebene geneigt. Der mittlere Abstand zur Erdoberfläche beträgt 20 000 km, was einer Umlaufzeit von 12 Stunden und einer Geschwindigkeit von 4 m/s entspricht. Die Anordnung der Bahnen einschließlich dreier weiterer Reservesatelliten ist in Abb. 5 dargestellt.

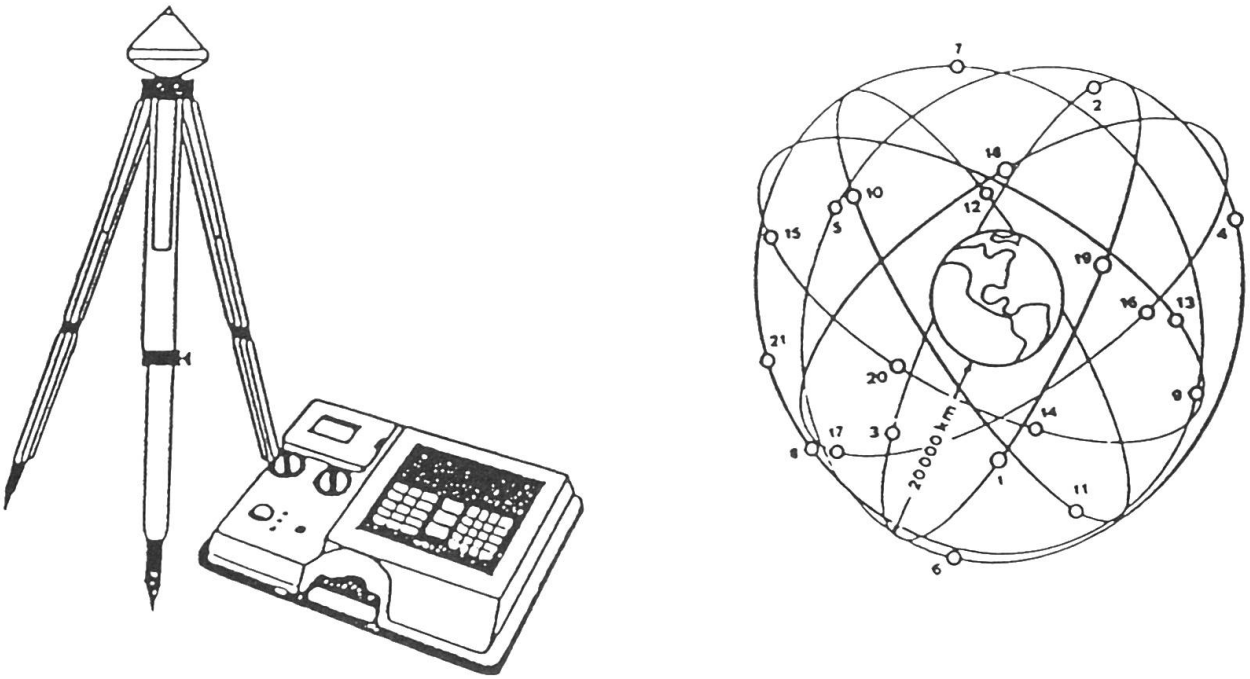

Abb.5 Satellitenkonstellation des GPS-Systems und eine Empfangsstation mit Antenne und Meßgerät

Das Kontrollsegment besteht aus der Master Control Station, die sich in Colorado Springs befindet und drei weiteren Monitorstationen. Die Hauptaufgabe dieser Stationen liegt in der Prädiktion der Satellitenbahnen (Ephemeriden), die aus simultanen Entfernungs- und Entfernungsdifferenzmessungen gewonnen werden. Diese Daten werden über Antennen in den Satellitenkernspeicher übermittelt und bis zu viermal täglich aufdatiert. Von dort werden sie an die Empfänger der Nutzer weitergegeben.

Das Nutzersegment wird von der Vielzahl der GPS-Empfangssysteme gebildet, die vorwiegend navigatorischen oder geodätischen Zwecken dienen. Grundsätzlich bestehen all diese Systeme aus einer Antenne und dem eigentlichen Meßgerät (Abb.5). Mit dem Empfangssystem werden Pseudodistanzen - die noch bestimmter Korrekturen bedürfen - zwischen seiner Antenne und den Antennen der Satelliten bestimmt. Als Meßergebnis einer Meßkampagne erhält man ein räumliches Streckennetz (Abb. 6), das sich zwischen den Empfängern und den Satelliten aufspannt. Die Positionen der Satelliten und zweier oder mehrerer terrestrischer Stationen sind bekannt. Die Stationen der übrigen Netzpunkte können dann mit Hilfe einer räumlichen Netzausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnet werden. Besondere Vorteile des Verfahrens sind:
- es braucht keine Sichtverbindung zwischen den Punkten zu bestehen
- der Einsatz des Systems ist unabhängig von der Wetterlage.

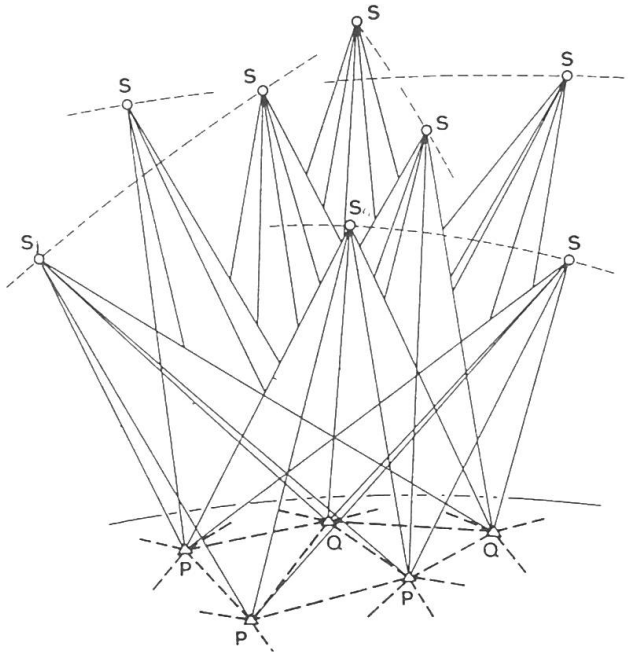

Abb. 6 Vermessung eines geodätischen Netzes mit einem Satellitenpositionierungssystem

Die zuvor beschriebenen Sensoren sind nur eine begrenzte Auswahl all derer, die heute zur Verfügung stehen. Sie geben jedoch einen Überblick über die heutigen Entwicklungstendenzen. Nachfolgend wird nun anhand von Beispielen gezeigt, wie sich die Sensoren für die Absteckung, Aufmessung und Überwachung von Bauwerken einsetzen lassen.

2. EIN RECHNERGESTÜTZTES VEKTORIELLES VERMESSUNGSSYSTEM FÜR DIE STEUERUNG DES FERTIGUNGSPROZESSES UND DIE AUFMESSUNG VON BAUWERKEN

Insbesondere bei Industriebauwerken werden heute hohe Anforderungen an das Vermessungssystem gestellt, das steuernd beim Fertigungsprozeß mitwirken soll und gleichzeitig für die Aufmessung genutzt wird. Einen Hinweis auf die Größe und Kühnheit moderner Schalenstrukturen vermittelt am Beispiel eines Kühlturms Abb. 7. Die Abb. 8 vermittelt einen Eindruck von der Vielfältigkeit der Vermessungsleistungen, die bei einem Bauwerk zu erbringen sind.

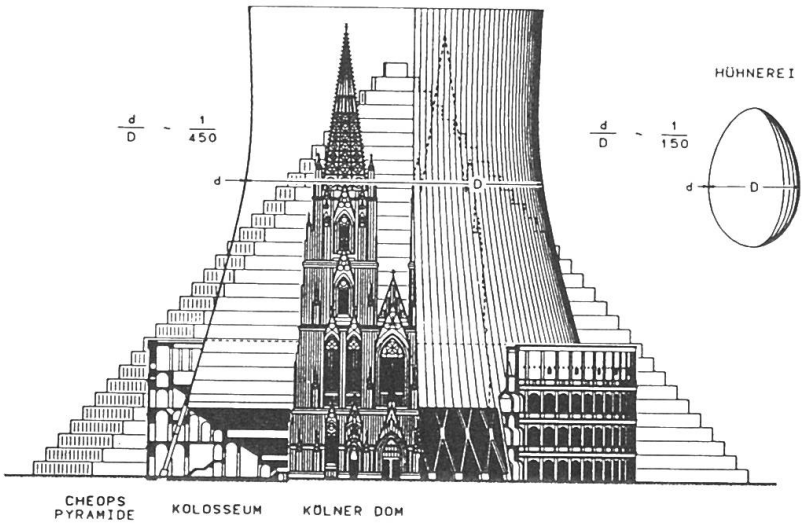

Abb. 7 Kühnheit der Konstruktion der doppelt gekrümmten Schale eines Kühlturms [1]

Das Vermessungssystem sollte so konzipiert sein, daß es
- bei der Einrichtung aller Bauwerksteile mit dem gleichen Instrumentarium und der gleichen Meßstrategie eingesetzt werden kann,

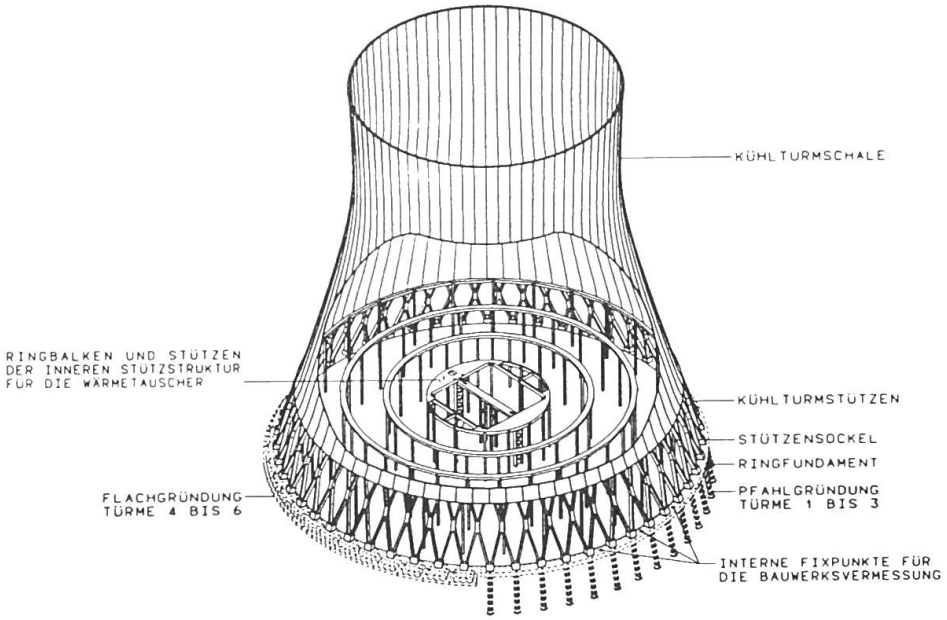

Abb. 8 Stahlbeton-Bauwerksteile eines Trockenkühlturms [1]

- für verschiedene Projekte unabhängig von dem Schalungssystem zu verwenden ist,
- alle Absteckungs- und Aufmessungsleistungen der Baufirma als Hersteller und alle Aufmessungsleistungen des Bauherrn im Sinne einer Überwachung erfüllt,
- während der Bauphase gesammelte Informationen nutzt, um steuernd in den Fertigungsprozeß einzugreifen,
- die Dokumentation weitgehend objektiv ausführt, d.h. die Arbeiten von der Aufnahme der Daten bis zur Herstellung von Tabellenwerken und Graphiken müssen in einem automatischen Datenfluß (on-line) erfolgen.

Herkömmliche Vermessungssysteme - die z.B. aus einem optischen Lot und einem Meßband bestehen - erfüllen diese Bedingungen nur teilweise. Nachfolgend wird ein vektorielles Vermessungssystem vorgestellt [1], das den gestellten Anforderungen gerecht wird. Die Problematik wird exemplarisch im Zusammenhang mit dem Bau einer Kühlturmschale behandelt.

Rechnergestützte vektorielle Vermessungssysteme - die als Basisgerät ein elektronisches Tachymeter haben - ermöglichen es, die Schale des Bauwerkes unmittelbar in einem Arbeitsgang in bezug auf das Koordinatensystem des Meßinstruments mit Raumvektoren abzustecken und aufzumessen. Die Raumvektoren können on-line von dem Mikroprozessor des Meßinstruments in radiale Vektoren des Bauwerkes transformiert werden. Wie nachfolgend noch gezeigt wird, liegen dann unmittelbar ausreichende Informationen vor, mit denen direkt steuernd in die Produktion eingegriffen werden kann. Der Übergang zum Computer-Aided Manufacturing (CAM) wird möglich. Den Regelkreis und zentralen Rechner des Systems zeigt Abb. 9. Meßfühler ist ein elektronisches Tachymeter. Als Prozeßrechner kann ein leicht transportabler feldeinsatzfähiger MICRO-COMPUTER genommen werden. Stellglieder sind die Justiereinrichtungen der Schalung oder Rüstung. Den Regelkreis schließt ein Operateur, der das Meßgerät und den Prozeßrechner bedient, und eine Hilfskraft, die die Justiereinrichtungen handhabt. Die Datenverwaltung und Dokumentation übernimmt ein stationärer Rechner; dies kann ein Rechner der PC-Gruppe sein.

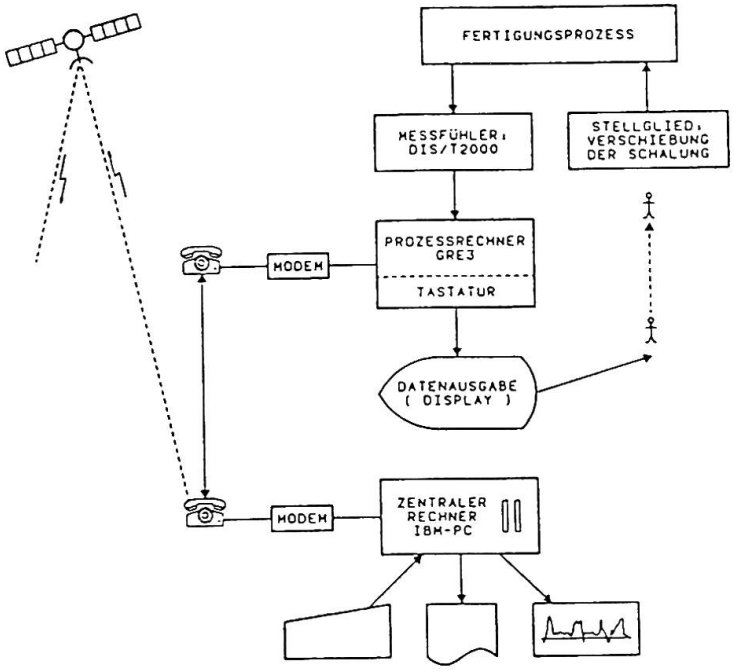

Abb. 9 Vektorielles Vermessungssystem für die Steuerung des Fertigungsprozesses von Stahlbetonbauwerken

Das Tachymeter kann an beliebigen und gefahrlosen Stellen im Inneren des Kühlturmes aufgestellt werden (freie Stationierung). Diese flexible Handhabung ist notwendig, da oft Sichten durch Baumaßnahmen im Innern des Kühlturmes versperrt sind. Für die Positionierung des Tachymeters und die Orientierung seines Teilkreises müssen mindestens Richtungen und Distanzen zu zwei Fixpunkten gemessen werden. Um dieses möglichst reibungslos zu gewähren, sind eine Vielzahl von Fixpunkten auf den Fundamenten des Kühlturmes zu vermerken und im Koordinatensystem des Kraftwerkes der Lage und Höhe nach zu bestimmen. Für die Vermessung der Punkte kann das Satellitensystem GPS eingesetzt werden.

Abb. 10 beschreibt die Steuerung des Fertigungsprozesses und die Aufmessung der Kühlturmschale. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, daß Kühlturmschalen in der Regel in einzelnen Ringabschnitten betoniert werden, die je eine Höhe von ca. 1 m haben. Die vorgegebene Soll-Geometrie der Kühlturmschale ist in der Datenbank des stationären Rechners abgespeichert. Für jeden Ringabschnitt sind dies: der untere und der obere Radius (r_{n-1}, r_n), die entsprechenden Höhen (h_{n-1}, h_n) und die Neigung (x_{n-1}). Vor der Absteckung eines jeden Ringabschnittes werden diese Daten im Baubüro in den Speicher des Prozeßrechners geladen. Der Speicher enthält außerdem die Koordinaten (x_m, y_m, h_m) der Fixpunkte auf den Fundamenten des Kühlturmes. Der Operateur am Tachymeter wird auf der Baustelle über Menü-Technik durch das gesamte Programm geführt.

Zunächst wird möglichst dicht unter der neu einzurichtenden Schalung die zuletzt fertiggestellte Betonwand angemessen. Die Zielpunkte sind allerdings im allgemeinen durch das Klettergerüst verdeckt. Für die Distanz- und Richtungsmessungen müssen daher eine Zielmarke und der zugehörige Reflektor mit einer speziellen - leicht tragbaren - Halterung radial versetzt positioniert werden. Aus den Meßwerten des Tachymeters, den Abmessungen der Halterung und der bekannten Neigung x_{n-1} des Ringabschnittes können schließlich Ist-Radien (r_{n-1} / α_i) für die vorgegebenen Soll-Höhen h_{n-1} berechnet werden; α_i kennzeichnet das jeweilige Azimut.

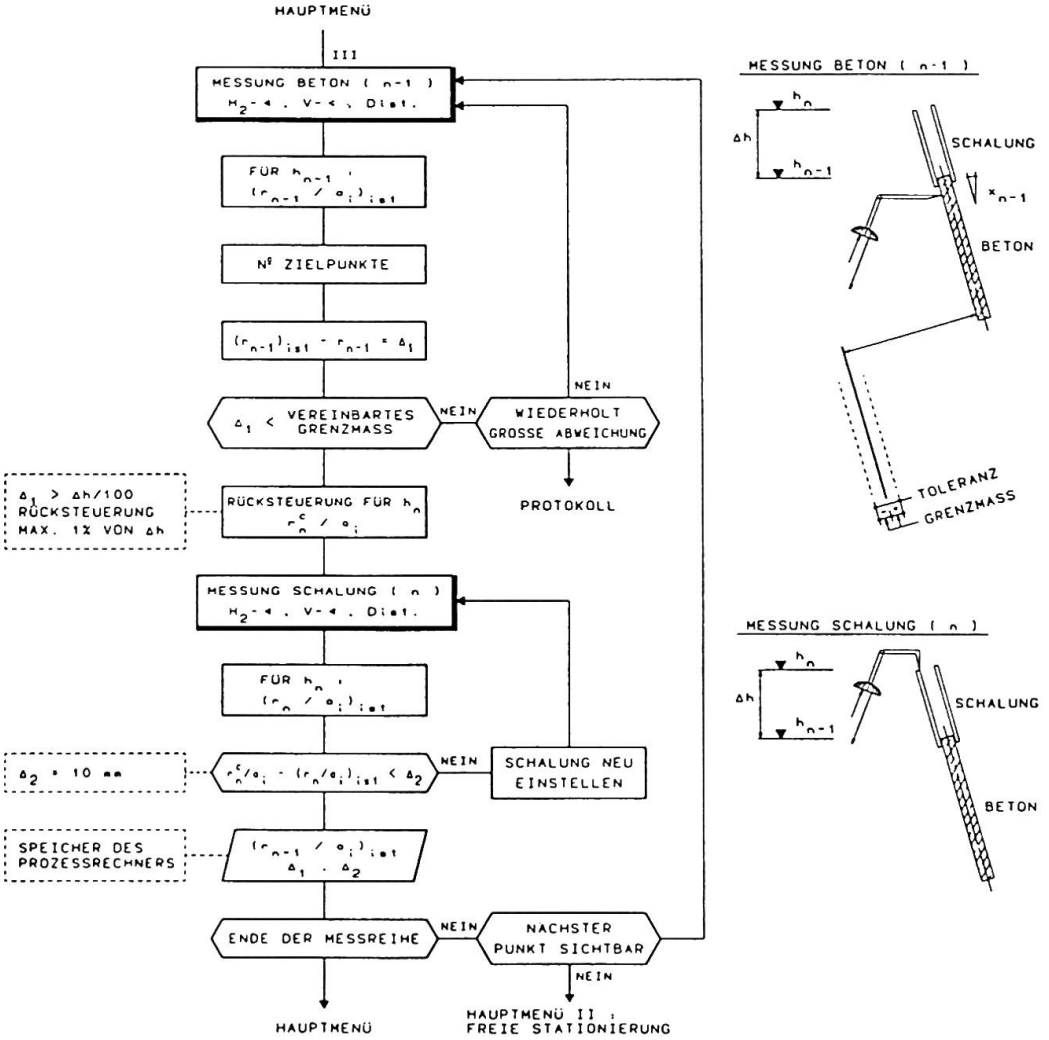

Abb. 10 Absteckung und Aufmessung der Kühlturmschale

Der Beobachter darf bei der Absteckung und Aufmessung nicht an eine bestimmte Reihenfolge gebunden sein, denn es kann z.B. vorkommen, daß Zielpunkte völlig verdeckt und erst von der nächsten Station des Tachymeters aus sichtbar sind. Um unter diesen Bedingungen dem Beobachter am Instrument die Orientierung zu vereinfachen und später die Organisation der Datenverarbeitung zu erleichtern, werden in bezug auf die Stützen der Kühlturmschale den einzelnen Schalungselementen automatisch Nummern zugeordnet. Im weitern Programmablauf wird nun mit dem Ist-Radius überprüft, wie genau bei der Fertigung der vorgegebene Soll-Radius r_{n-1} eingehalten werden konnte. Wird z.B. ein vorgegebenes Grenzmaß (z.B. +/- 50 mm) überschritten, so sind zunächst die Messungen und Auswertungen zu wiederholen. Bestätigen wiederum die Auswertungen das Überschreiten des Grenzmaßes, so ist sofort die Bauleitung zu unterrichten.

Wird das Grenzmaß eingehalten, so kann der normale Fertigungsprozeß fortgesetzt werden. Zunächst interpretiert jetzt der Prozeßrechner ob und in welchem Maß eine Bauabweichung vorliegt. Sind nur kleine Bauabweichungen vorhanden (z.B. $_1$ kleiner 12 mm), so wird die neu einzurichtende Schalungstafel mit dem konstruktiv vorgegebenen Radius abgesteckt. Für die statische Beanspruchung des Bauwerkes ist es vorteilhaft, wenn die Meridiane der Schale möglichst geringe Knicke aufweisen. Aus diesem Grunde werden Bauabweichungen von einigen Zentimetern stufenweise zurückgesteuert. In Abb. 10 ist an einem Modellbeispiel gezeigt, mit welchen Prozentsätzen die schrittweise Reduktion vorgenommen werden kann. Der korrigierte Radius (r_n / α_i), der jetzt den konstruktiv vorgegebenen Radius ersetzt, wird automatisch von dem Prozeßrechner ermittelt.

Die Absteckung der Schalungselemente erfolgt über einen Regelkreis. Zunächst wird aus Tachymetermessungen der obere Ist-Radius ($r_n K_i$) des Schalungselementes abgeleitet. Anschließend wird der Ist-Radius mit dem entsprechenden korrigierten Radius verglichen und kontrolliert, ob die Abweichung Δ_2 einen Grenzwert (z.B. + 10 mm) überschreitet. Ist dies der Fall, so wird das Schalungselement über Stellschrauben neu eingestellt. Dieser Regelvorgang word so lange wiederholt, bis der Grenzwert unterschritten wird.

Der Ist-Radius der oberen Kante der bereits fertiggestellten Schale, die Bauabweichung Δ_1 und die Restabweichung Δ_2 bei der Justierung der Schalung werden für die Dokumentation des Bauwerkes abgespeichert.

Die Aufgaben des zentralen Rechners umfassen folgende Bereiche:
- Bereitstellung einer Datenbank
- Dateneingabe und Datenausgabe über die Rechnerschnittstelle zum Prozeßrechner und über die Tastatur für den Operateur
- Sortieren der Meßdaten
- Auswertung der Daten
- Dokumentation.

Die so ausgewerteten Daten ermöglichen unmittelbar nach der Fertigstellung eines Bauabschnittes (z.B. eines Ringabschnittes) erste Aussagen über dessen Ausführungsqualität. Es können jetzt Listen erstellt werden über:
- Radiusabweichungen an der oberen Kante des zuletzt fertiggestellten Betons
- Radius- und Höhenabweichungen der oberen Kante der neu eingerichteten Schalung.

Weiterhin können statistische Kenngrößen ermittelt werden, die ständig die jeweils erreichte Ausführungsqualität beschreiben. Kenngrößen dieser Art sind:
- maximale Radius- und Höhenabweichungen
- durchschnittliche Radius- und Höhenabweichungen sowie deren Standardabweichungen.

Hierdurch ist die Bauleitung und -überwachung direkt über die Fertigungspräzision informiert und kann unmittelbar im Sinne einer baubegleitenden Qualitätssicherung steuernd in den Fertigungsprozeß eingreifen.

Es muß auch stets die Ausführungsqualität des gesamten bereits fertiggestellten Bauwerkes überwacht werden. Hierfür ist es vorteilhaft, Qualitätsmerkmale in bezug auf ein regelmäßiges Raster darzustellen. Bei Kühltürmen bilden Meridiane und Begrenzungslinien der Ringabschnitte ein geeignetes Gitter. Die zunächst an beliebigen Punkten bestimmten Ist-Radien müssen daher durch Interpolation auf die dazwischenliegenden Rasterpunkte umgerechnet werden. Soll- und Ist-Radien in den Rasterpunkten sind dann geeignetes Ausgangsmaterial für verschiedene Qualitätskontrollen in bezug auf die Schalengeometrie.

Weitgehende Qualitätskontrollen liefern die radialen Bauabweichungen in den Gitterpunkten und die Formabweichungen (Differenzen zwischen Soll- und Ist-Neigung) längs der Gitterlinien sowie deren statistische Kenngrößen. Geeignete statistische Kenngrößen sind auch hier Maximalwerte, Durchschnittswerte und deren Standardabweichungen.

Die Formabweichungen berechnet man geeignet für Linienabschnitte konstanter Länge. Ein Maß für die Formabweichungen ΔF je Linienabschnitt liefert für die Meridianrichtung der Quotient,

$$\Delta F = \frac{\Delta r_{i-1} - \Delta r_i}{\Delta L}$$

wobei Δr_{i-1} und Δr_i die Bauabweichung an den Endpunkten des Linienabschnittes und ΔL die Länge des Linienabschnittes bezeichnen.
Das Vermessungssystem wurde erstmals auf einer Großbaustelle in Südafrika eingesetzt. Über umfangreiche Erfahrungen wird in [2] berichtet.

Zukünftig kann man beim Einsatz von Kletterschalungen mit meridional hochkletternden Gerüsteinheiten für die Steuerung des Fertigungsprozesses und die Aufmessung Meßroboter einsetzen. Dieser verfolgt automatisch an der Kletterschalung befestigte Zielmarken und steuert sie in ihre Sollposition. Der Regelkreis in Abb. 9 arbeitet dann vollautomatisch.

3. MESS- UND AUSWERTESYSTEME FÜR DIE BESTIMMUNG VON DEFORMATIONEN AN BAUWERKEN

Geodätische Deformationsmessungen lassen sich allgemein mit dem in Abb. 11 dargestellten Modell beschreiben. Das Objekt (Bauwerk), das untersucht werden

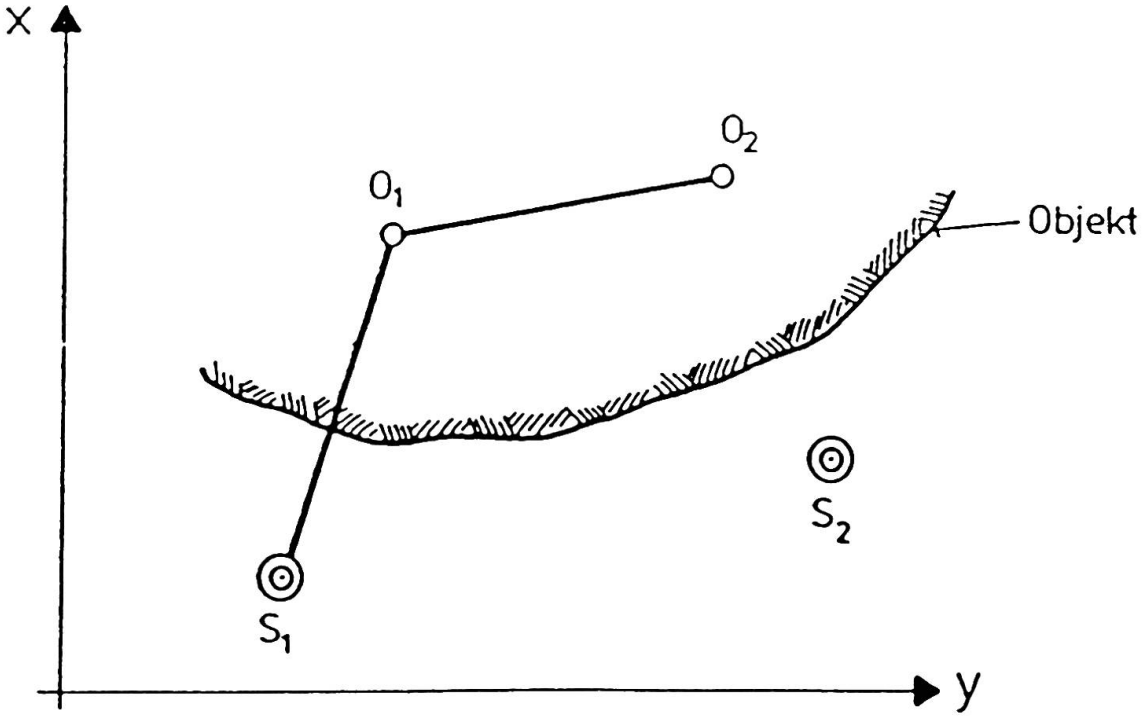

Abb. 11 Modell für absolute und relative Deformationsmessungen

soll, wird durch eine Anzahl von Objektpunkten (O_1, O_2, ...) abstrahiert, deren Bewegungen im Raum die Verformungen des Objektes repräsentieren. Außerhalb des Objektes befinden sich Stützpunkte (S_1, S_2, ...), die nicht an den Objektbewegungen teilnehmen.

Die Objektpunkte werden durch Messungen mit geometrischen Größen (Strecken, Winkel, ...) untereinander verknüpft. Führt man diese Messungen epochenweise aus, so lassen sich Relativbewegungen der Objektpunkte erfassen, die dann als Grundlage für die Analyse von Verformungen (Dehnung, Durchbiegung, Torsion, ...) dienen.

Für die Erfassung von Absolutbewegungen der Objektpunkte werden die Objektpunkte und Stützpunkte ebenfalls durch Meßelemente verbunden. Epochenweise Messungen dieser Verknüpfungselemente liefern die gesuchten Absolutbewegungen, aus denen das Verhalten des Objekts gegenüber seiner Umgebung abgeleitet werden kann; es lassen sich dann Verformungen und Starrkörperbewegungen erfassen.

Häufig bietet es sich an, die Stützpunkte mit dem Positionierungsverfahren GPS und die Verbindungen zu und zwischen den Objektpunkten mit terrestrischen Verfahren zu messen.

3.1 Geometrische Modelle und Meßanordnungen

Für die Interpretation von Bauwerksdeformationen stehen zwei grundlegende Methoden zur Verfügung:
- die geometrische Analyse, die uns einige Informationen über den geometrischen Zustand des Bauwerks und die Veränderungen seiner Oberfläche liefert;
- die physikalische Interpretation, die uns einige Informationen über die Ursachen der Deformation liefert.

Nachfolgend wird die geometrische Analyse behandelt.

3.2 Bestimmung von Deformationen an Erdbauten und in Rutschungsgebieten

In Gebirgen und in der Umgebung künstlicher Erdbauten (Staudämme, Tagebauböschungen, Aufschüttungen) kann das Problem auftreten, daß Gebiete zu rutschen oder zu deformieren beginnen. Gefahren lassen sich abwenden, wenn die Kinematik des Gebietes bekannt ist, d.h. räumliche und zeitliche Bewegungen sich darstellen lassen. Bei großflächigen Aufgaben bietet es sich in der Regel an, in bestimmten zeitlichen Abständen Deformationsnetze zu beobachten, in denen die Beobachtungspunkte Abstände bis zu einigen Kilometern haben können. Die Messungen führt man heute vorwiegend mit Meßgeräten des Satellitenpositionierungssystems NAVSTAR GPS aus. Für eine feinmaschige Interpolation kann man photogrammetrische Verfahren oder Meßroboter einsetzen. Photogrammetrische Verfahren haben zur Zeit noch den Nachteil, daß sie nicht in Echtzeit auswertbar sind. Eine on-line Analyse der Messungen steht jedoch zur Verfügung, wenn Meßroboter eingesetzt werden.

Ein Meßroboter, der über eine rechnergestützte automatische Zieleinstellung und Nachführung der Theodolitachsen durch Schrittmotoren verfügt, wurde erstmalig 1983 für großräumige Deformationsbeobachtungen eingesetzt. Dieses System ist unter dem Namen GEOROBOT bekannt geworden und ermöglicht die Überwachung großflächiger Objekte mit Ausdehnungen bis zu einigen Kilometern [5], [6]. Abb.12 zeigt eine Meßanordnung, bei der simultan zur Beobachtung einer ausgedehnten Tagebauböschung drei Meßroboter im Einsatz sind.

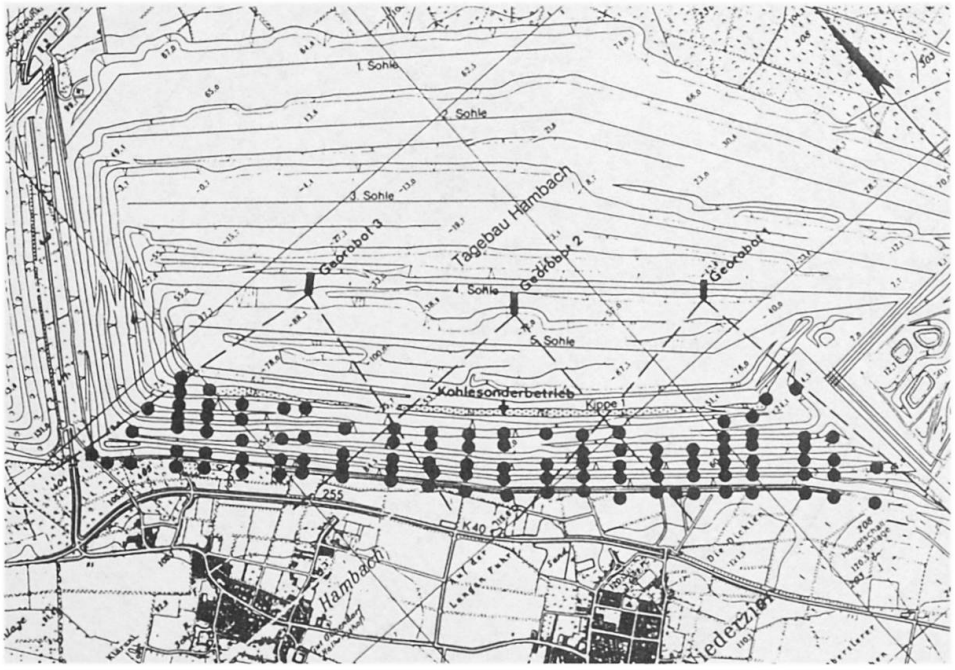

Abb. 12 Beobachtung von Tagebauböschungen mit drei simultan gesteuerten Meßrobotern GEOROBOT, die Längenänderungen erfassen

Der Steuerrechner der Roboter verfügt über Koordinaten der Objektpunkte und einiger Festpunkte in der Umgebung der Rutschungsgebiete. Durch Anzielen der Festpunkte werden zu Beginn der Messungen die Meßroboter orientiert und positioniert. Mit Hilfe der Koordinaten der Objektpunkte können anschließend Steuerdaten für die Schrittmotoren der Theodolitachsen berechnet werden, um die optische Achse des Theodolits bzw. Distanzmessers in einem ersten Regelkreis auf die Objektpunkte auszurichten. Ein zweiter nachgeschalteter Regelkreis führt anschließend mit einem optoelektronischen Sensor eine "Feinzielung" durch. Diese genaue Zielung erfolgt durch eine Zentrierung des Strahlungskegels des elektrooptischen Distanzmessers; dabei werden durch die Schrittmotoren nach einem vorgegebenen Muster die Theodolitachsen so lange gedreht, bis von dem Distanzmesser ein Signal maximaler Intensität zurückkommt.

Insbesondere bei großräumigen Deformationsmessungen hat sich dieses Verfahren als sehr robust erwiesen. Nachteilig ist allerdings, daß die Richtungsmessungen nicht sehr genau sind. Sie werden daher nur für die Zieleinstellung und nicht für die Deformationsanalyse genutzt und die Deformationen werden nur aus Längenänderungen abgeleitet. Meßroboter dieser Art befinden sich heute sehr erfolgreich für verschiedenste Aufgaben im Einsatz.

3.3 Bestimmung von Deformationen an Hochbauten

Eine andere Art von Meßroboter ist gegeben, wenn ein motorgetriebener Theodolit und Distanzmesser zum Einsatz kommen und der Distanzmesser reflektorlos arbeitet. Gibt man dem Steuerrechner zuvor wiederum die von der Konstruktion her bekannten Koordinaten der Objektpunkte ein, so ist er in der Lage, die Steuerdaten zu berechnen, mit denen die optische Achse von Theodolit und Distanzmesser über Schrittmotoren auf die Objektpunkte ausgerichtet werden kann. Anschließend können dann automatisch Vektoren zu diesen Punkten bestimmt werden. Vorteilhaft ist, daß die Oberfläche des Objektes nicht betreten zu werden braucht. Insbesondere bei Hochbauten (z.B. Kühltürmen, Silos) und Staudämmen ist dies ja nur unter großem Aufwand möglich. Abb. 13 zeigt

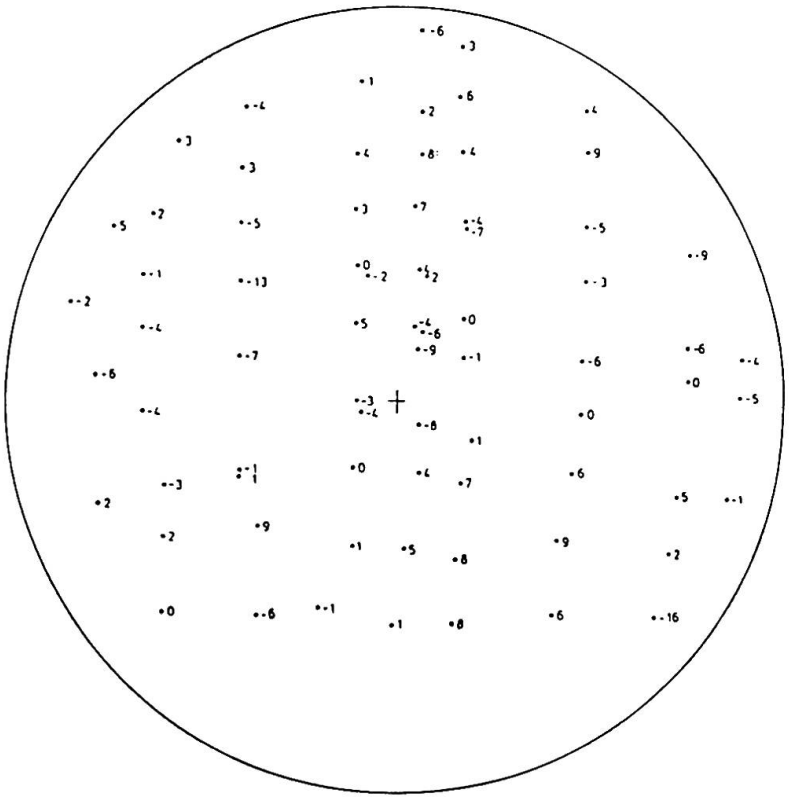

Abb. 13 Radiusabweichungen einer Gaskugel in mm

Radiusabweichungen (Soll- / Ist-Radien) an einem Gasbehälter (Durchmesser ca. 25 m), die mit einem Tachymeter bestimmt wurden, das über einen reflektorlosen Distanzmesser verfügt.

Bei bestimmten Aufgaben der Industrievermessung - insbesondere bei sehr hohen Genauigkeitsanforderungen - kann es sinnvoller sein, die Bestimmung von Objektformen und deren Veränderungen nur durch das Messen von Horizontal- und Vertikalrichtungen von verschiedenen Theodolitstandpunkten aus zu realisieren (Abb. 14). Die Position und Orientierung der Theodolite muß dann mit hoher

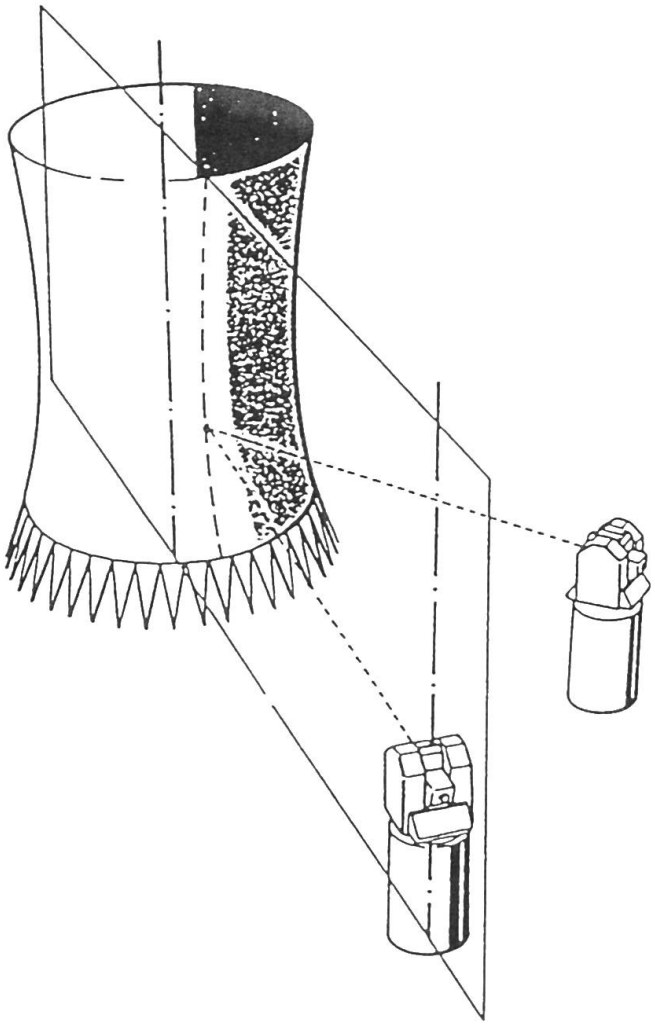

Abb. 14 Meßroboter für Deformationsmessungen aufgrund von Richtungsmessungen [8]

Genauigkeit in einem Koordinatensystem gegeben sein. Diese Meßsysteme bestehen aus zwei oder mehreren Theodoliten. Der gesamte Meßprozeß läßt sich, abgesehen von der anfänglichen Einrichtung des Meßsystems, voll automatisieren, wenn die Bewegungen der Achsen und die Fokussierung des Fernrohres über Schrittmotoren rechnergestützt gesteuert werden können und in das Theodolitfernrohr eine CCD-Kamera integriert ist (vgl. Abb. 3); die Kamera wird als optoelektronischer Bildaufnehmer für eine digitale Zielpunkterkennung bzw. Bildverarbeitung eingesetzt. Dieser motorgetriebene Theodolit ist jetzt die Basis der Meßroboter. Auf ein Objekt geklebte Zielmarken, deren konstruktiv vorgegebene Koordinaten zuvor dem Steuerrechner mitgeteilt wurden, lassen sich dann je mit einer Geschwindigkeit von wenigen Sekunden einmessen und berechnen [3], [4].

Für die Überwachung von Bauwerken erweist es sich häufig als sinnvoll, die Zielmarken nicht mechanisch zu befestigen, sondern einen Theodolit mit Zielmarkenprojektion (Pointertheodolit) einzusetzen, der die koordinativ vorgegebenen Zielmarken auf die Oberfläche des Objektes projiziert [8]. Die Zielmarken können längs von Profilen oder rasterförmig angeordnet sein. Fährt der Pointertheodolit die Profile oder Raster rechnergestützt ab, so folgen ihm die Theodolite mit Zielmarkendetektion automatisch.

Als Ergebnis der Messungen erhält man Richtungsbüschel, die ein räumliches Netz bilden. Die Orientierung und den Maßstab erhält das Netz durch Paßpunkte (Punkte mit bekannten Koordinaten), die mechanisch signalisiert sind und ebenfalls angezielt werden müssen. Die Objektpunkt-Koordinaten erhält man durch räumliche Netzausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate.

4. SCHLUSSBEMERKUNG

Die vorliegenden Ausführungen geben nur eine Auswahl aus den vielfältigen Möglichkeiten für die Absteckung und Überwachung von Brücken- und Hochbauten wieder. Die Meßverfahren sind weitestgehend automatisiert und stützen auch die Automatisation von Fertigungsprozessen im Bauwesen; sie können daher unmittelbar steuernd in Fertigungsprozesse eingreifen.

LITERATUR

1. DAMJAKOB H., KAHMEN H.: Steuerung des Fertigungsprozesses von Stahlbetonbauwerken durch rechnergestützte vektorielle Vermessungssysteme am Beispiel von Naturzugkühltürmen. Allgemeine Vermessungsnachrichten (96), 1989.
2. DAMJAKOB H., KAHMEN H., LÖSEKRAUT H.: Qualitätsorientierte Steuerung des Fertigungsprozesses von Stahlbetonbauwerken mit vektoriellen Vermessungssystemen. "Optical 3-D Measurement Techniques" (Gruen/Kahmen), Herbert Wichmann Verlag (Karlsruhe), 1989.
3. GOTTWALD R.: Kern E2-SE - Ein neues Instrument nicht nur für die Industrievermessung. Allgemeine Vermessungsnachrichten (94), 1987.
4. HUEP W., KATOWSKI O.: Theodolitsysteme für industrielle und geodätische Messungen. Technische Rundschau (39) 1988.
5. KAHMEN H., STENDEL J.: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zur Echtzeit-Überwachung von Böschungssystemen beim Abbau von Braunkohle mit dem Meßsystem GEOROBOT. "Optical 3-D Measurement Techniques" (Gruen / Kahmen), Herbert Wichmann Verlag (Karlsruhe), 1989.
6. KAHMEN H., SUHRE H.: Ein lernfähiges Vermessungssystem zur Überwachung kinematischer Vorgänge. Zeitschrift für Vermessungswesen (108), 1983, S. 345-351
7. KAHMEN H.: Vermessungskunde II. Walter de Gruyter (Berlin - New York), 1986
8. KATOWSKI O.: Deformationsmessungen an Bauwerken mit dem automatischen Theodolit-Meßsystem ATMS. "Optical 3-D Measurement Techniques" (Gruen / Kahmen), Herbert Wichmann Verlag (Karlsruhe), 1989.