

TERRESTISCH-PHOTOGRAMMETRISCHE VERMESSUNG  
 VON GROSSBAGGERN IM TAGEBAU  
 Klaus Reichenbach<sup>1)</sup>  
 Rheinische Braunkohlenwerke AG, Köln  
 Bundesrepublik Deutschland  
 Commission V/4

1 Einleitung

In einem rund 2 500 km<sup>2</sup> großen Gebiet westlich von Köln liegt das größte zusammenhängende Braunkohlenvorkommen Europas mit Vorräten von rund 50 x 10<sup>9</sup> t Kohle, von denen rund 35 x 10<sup>9</sup> t technisch gewinnbar sind. Hier baut die Rheinische Braunkohlenwerke AG (Rheinbraun) jährlich bis zu 120 x 10<sup>6</sup> t Braunkohle in Tagebauen ab, die zu den größten Bergwerksbetrieben der Erde zählen (Bild 1). Die Kohle dient größtenteils der Stromerzeugung; der Anteil des Rheinischen Braunkohlenreviers an der Primärenergiegewinnung der Bundesrepublik Deutschland betrug 1983 rund 22 %, sein Anteil an der Stromerzeugung aus öffentlichen Wärmekraftwerken war 26 %.

Seit rund 25 Jahren erfolgt ein großer Teil der Tagebau-Vermessungen, -Kartierungen und -Massenberechnungen mit Hilfe der Aerophotogrammetrie und der elektronischen Datenverarbeitung (2, 8)<sup>2)</sup>. Der heutige Leistungsstand erlaubt es z. B., Deformationen der Erdoberfläche in Folge des Bergbaus aerophotogrammetrisch zu erfassen (5, 6, 7). Die notwendigen Ausrüstungen wie Bildflugzeuge, Meßkammern, Laboreinrichtungen, Auswertegeräte und EDV-Anlagen mit entsprechender Software stehen im eigenen Haus zur Verfügung.



Bild 1: Tagebau im rheinischen Braunkohlenrevier (Rheinbraun-Luftbild, 1983) Freigabe: Reg. Präs. Düsseldorf Nr. 18P510

1) unter Mitwirkung von Werner Schaefer, Rheinische Braunkohlenwerke AG

2) siehe Literaturverzeichnis am Ende des Beitrages

Neben der Luftbildmessung hat in den letzten 15 Jahren die Nahbereichs-photogrammetrie für Spezialaufgaben immer mehr Bedeutung bekommen, vor allem für Deformationsbeobachtungen an Gebäuden und Maschinen (9). Zu den Maschinen des Tagebaues zählen in erster Linie die Groß-Schaufelradbagger und -Absetzer mit Tagesleistungen bis zu 240 000 fm<sup>3</sup>). Sie haben mit ca. 220 m Länge und 65 m bis 94 m Höhe außerordentliche Dimensionen; die größten wiegen 13 500 t.

Diese Geräte sind vielfältig bewegliche, über ihre Stützflächen weit auskragende Stahlkonstruktionen (Bild 2), die im Tagebaubetrieb äußeren Kippinflüssen ausgesetzt sind, wie z. B. Grabkräfte, ungleichmäßig verteilte Nutzlasten, Verschmutzungen, Neigungen des Fahrplanums und Windkräfte. Das erfordert einen Nachweis der Standsicherheit, die als Verhältnis zwischen stabilisierenden und kippenden Momenten definiert ist. Für die Momenten-Berechnungen sind genaue Messungen am Gerät erforderlich, außerdem muß der Schwerpunkt des fertigen Gerätes durch "Auswiegen" bestimmt werden (1, 4). Für beide Aufgaben benötigt man zwei-oder dreidimensionale Koordinaten diskreter Gerätepunkte bei drei verschiedenen, definierten Gerätestellungen im belasteten und unbelasteten Zustand. Die Last wird durch ein Eichgewicht simuliert, die Gerätebewegungen beschränken sich auf das Heben und Senken des Schaufelradauslegers in die Stellungen "Hoch", "Mitte" und "Tief". Aus den Koordinatenunterschieden zweier Zustände ergeben sich die für die statischen Berechnungen benötigten "Ausweichbewegungen" der Konstruktion.

Bisher erfolgte die Koordinatenbestimmung durch sehr genaue trigonometrische Messungen in einem gerätebezogenen geodätischen Netz (10). Um die Gerätestillstandszeiten kurz zu halten, wurden dabei meist nur drei bis sechs Punkte vermessen. Die Koordinatengenauigkeit war  $\pm 2$  mm.

## 2 Frühere Versuche zur photogrammetrischen Gerätevermessung

Es ist mehrfach über photogrammetrische Messungen an Tagebaugeräten berichtet worden. U. a. hat das Bergbauinstitut in Dnjepropetrovsk/UDSSR ein Verfahren entwickelt, die Durchbiegung von Baggerbauteilen relativ zu einer Bezugslinie stereophotogrammetrisch zu ermitteln. Unter Einsatz eines Fototheodoliten 19/1318 und eines Stereokomparators 1818 des VEB Jenoptik Jena/DDR wurde aus Mehrfachaufnahmen bei 200 m Aufnahmedistanz ein mittlerer

3) "Fest-m<sup>3</sup>", d. h. m<sup>3</sup> anstehendes Material

Fehler der Relativdurchbiegung von  $m_z = \pm 3$  mm erreicht (3).

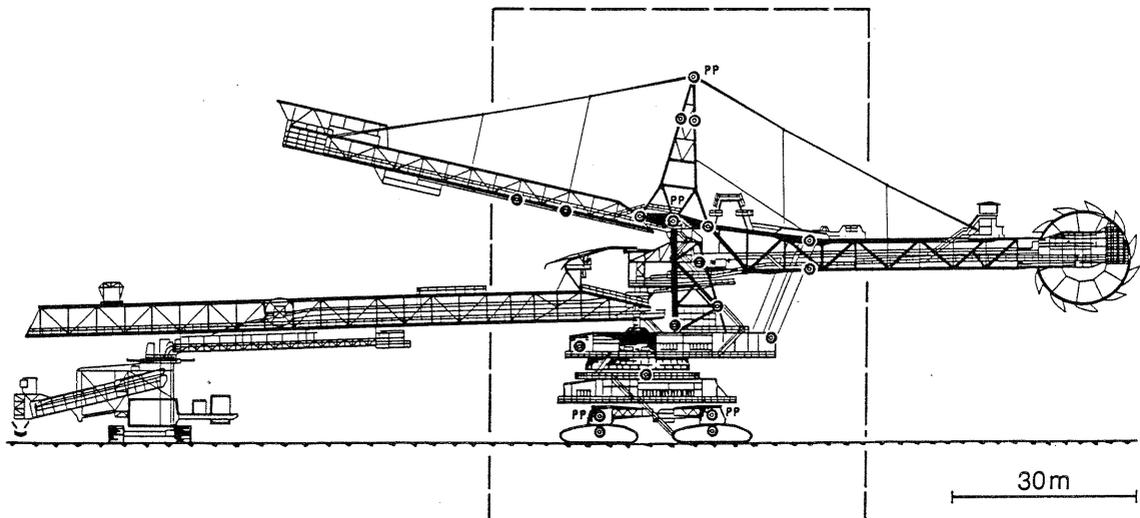
Ein Beispiel für die Anwendung der Parallaxen-Photogrammetrie mit Zeitbasis sind Deformationsmessungen an einer Abraumförderbrücke im Tagebau Spree-tal/DDR. Es wurden vier Lastzustände des Gerätes mit einer UMK 10/1318 und einem Fototheodoliten 19/1318 aufgenommen und die "Deformationsparallaxen" im Komparator Steko 1818 auf  $\pm 5$   $\mu$ m genau gemessen. Man erhielt die relativen Gerätedeformationen mit einer Genauigkeit von rund  $\pm 1$  cm (11).

### 3 Zwei aktuelle Anwendungsfälle im rheinischen Braunkohlenrevier

Die Fortschritte in der EDV mit photogrammetrischen Blockausgleichungsprogrammen erlauben seit einiger Zeit die Abkehr vom Normalfall der Aufnahmeanordnung und die sehr genaue Berechnung räumlicher Punktkoordinaten aus Einzelbildmessungen. Es bot sich an, die in den letzten Jahren an kleineren Objekten gewonnenen Erfahrungen (8, 9) auf mm-genaue Deformationsmessungen an Großbaggern zu übertragen. Diese Meßaufgabe verlangt unter Tagebaubedingungen eine besonders gründliche Planung und Organisation. Man muß dabei u. a. die oft schwierigen topographischen Verhältnisse im Tagebau, den Gerätestandort, die Besonderheiten der Gerätegeometrie und die Wetterbedingungen, vor allem die Windverhältnisse, berücksichtigen, ferner den Ablauf des Gerätebe- und -entlastens und des Einfahrens in die genau definierten Sollstellungen, schließlich auch den eng gesteckten zeitlichen Rahmen. Detaillierte Absprachen und eine gute Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten (Maschinenabteilung und Markscheiderei des Betriebes, Prüfstatiker und Abteilung Photogrammetrie) sind unerlässlich.

Fall 1: Der Raupen-Schaufelradbagger 256, ein im Tagebau Fortuna/Garsdorf eingesetztes Gerät mit einer Förderleistung von 100 000  $\text{fm}^3/\text{Tag}$  und rund 7 500 t Dienstgewicht, mußte nach Reparatur und Umbau neu ausgewogen und vermessen werden. Bild 2 zeigt das Gerät und die Anordnung von Paß- und Meßpunkten; einige Punkte wurden von der Markscheiderei trigonometrisch vermessen. Am Bagger waren 25 Meßpunkte und vier Paßpunkte als Dreier-Punktgruppen mit 50 mm Punktabstand signalisiert.

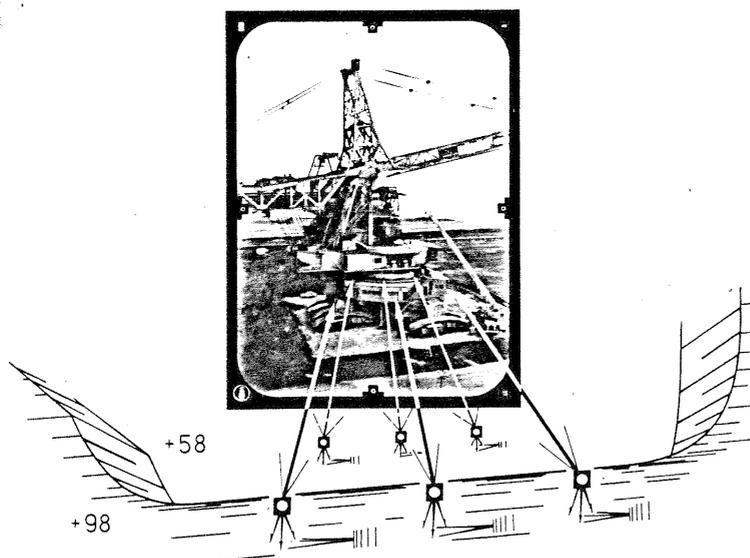
Die räumlichen Koordinaten der Paßpunkte am Unterbau und am Hauptpylon wurden für jeden der sechs Gerätezustände von unveränderten Standpunkten aus trigonometrisch mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  mm bestimmt. Die Meßaufnahmen



**Bild 2:** Schaufelradbagger 256 mit Paß- und Meßpunkten für photogrammetrische Deformationsmessungen

erfolgten mit einer UMK 10/1318 auf drei etwa 50 m vom Bagger entfernten Standpunkten auf dem Planum und mit einer UMK 20/1318 auf drei weiteren Standpunkten, die etwa 100 m entfernt an der Oberkante einer rd. 40 m hohen Böschung lagen (Bild 3). Auf diese Weise ergab sich für alle Aufnahmen ein durchschnittlicher Bildmaßstab von etwa 1 : 500.

Wegen der sehr hohen Genauigkeitsforderungen erschien es zweckmäßig, die beiden Meßkammern simultan zu kalibrieren. Sie waren zwar schon vorher durch



Einzelstandpunkt-Selbstkalibrierung (12) untersucht worden, doch mit anderen Aufnahmeentfernungen als bei der Baggervermessung. Deshalb erfolgten vor und nach den eigentlichen Meßaufnahmen zusätzlich einige Belichtungen mit um 200 gon gekanteten Kammern.

**Bild 3:** Aufnahmeordnung, sechs UMK-Standpunkte am Kopf und am Fuß der Böschung

Die Aufnahmen zogen sich wegen ungünstiger äußerer Bedingungen über zwei Tage hin. Am ersten Tag geriet der Bagger durch heftigen Wind in Schwingungen mit vertikalen Auslenkungen des Oberbaus von rd.  $\pm 3$  mm. Deshalb wurden für jeden der drei an diesem Tage aufgenommenen Gerätezustände jeweils Bilder zum Zeitpunkt der stärksten Ausschläge gemacht, um daraus die Ruhelage durch Mittelbildung zu erhalten. Dabei blieb die Orientierung der Kammern unverändert. Der starke Wind verhinderte übrigens die zusätzlichen Punktbestimmungen der Markscheiderei. Am nächsten Tag war das Wetter ruhiger, so daß man die Ruhelagen fotografieren konnte.

Die Bildmessung der signalisierten Punkte erfolgte in den Rollfilm-Negativen mit einem Monokomparator Zeiss PK 1. Da sich die Einzelbilder zu 100 % überdeckten, ergaben sich hohe Redundanzen: Jedes Dreifachsignal konnte in sechs Bildern gemessen werden. Geringere Überbestimmungen hatten nur wenige Punkte; diese Ausfälle entstanden durch Verdeckungen oder Schatten von Konstruktionsteilen.

| Zustand | Sigma Null<br>[ $\mu\text{m}$ ] | Standardabweichungen |               |               |
|---------|---------------------------------|----------------------|---------------|---------------|
|         |                                 | $s_x$<br>[mm]        | $s_y$<br>[mm] | $s_z$<br>[mm] |
| 1 - 6   | 1,9 bis 2,8                     | 0,7 bis 0,9          | 0,8 bis 1,2   | 1,6 bis 2,1   |
| Mittel  | 2,5                             | 0,8                  | 0,9           | 1,8           |

| Kammer      | Kammerkonstante<br>[mm] |           | Hauptpunktlage<br>[mm] |           |        |           |
|-------------|-------------------------|-----------|------------------------|-----------|--------|-----------|
|             | $c_K$                   | $s_{c_K}$ | $x_H$                  | $s_{x_H}$ | $y_H$  | $s_{y_H}$ |
| UMK 10/1318 | 99,582                  | 0,006     | +0,008                 | 0,005     | -0,001 | 0,004     |
| UMK 20/1318 | 200,421                 | 0,012     | -0,054                 | 0,010     | -0,024 | 0,010     |

Tabelle 1: Bündelausgleichung Bagger 256

Tabelle 2: Simultankalibrierung

Die Ausgleichung der sechs Meßwertgruppen erfolgte zuerst mit dem bei Rheinbraun installierten Stuttgarter Programm PAT B. Die Paßpunktkoordinaten wurden als gleichgewichtige Beobachtungen behandelt. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse. Zum Vergleich mit anderen Programmen wurden die Berechnungen mit dem Programm ORIENT der Universität Wien sowie dem Programm MOR der Universität Bonn wiederholt. Die Ergebnisse waren praktisch identisch, die Rechenzeiten differierten. Mit dem Programm MOR wurden zusätzliche Kalibrierungsaufnahmen nach dem ESK-Verfahren (12) berechnet. Die Simultankalibrierung ergab gute Ergebnisse. (Tabelle 2).

Zwischen den verschiedenen Auslegerstellungen mit und ohne Eichgewicht ergaben sich Deformationen, die als Vektordiagramme (x/y-Ebene) dargestellt wurden (Bild 4). Diese zweidimensionale Aufrißdarstellung und die dazugehörigen Datentabellen genügen dem Statiker für seine Berechnungen, weil die Auslegereinstellungen im Regelfall nur in der Vertikalebene stattfinden. Daß

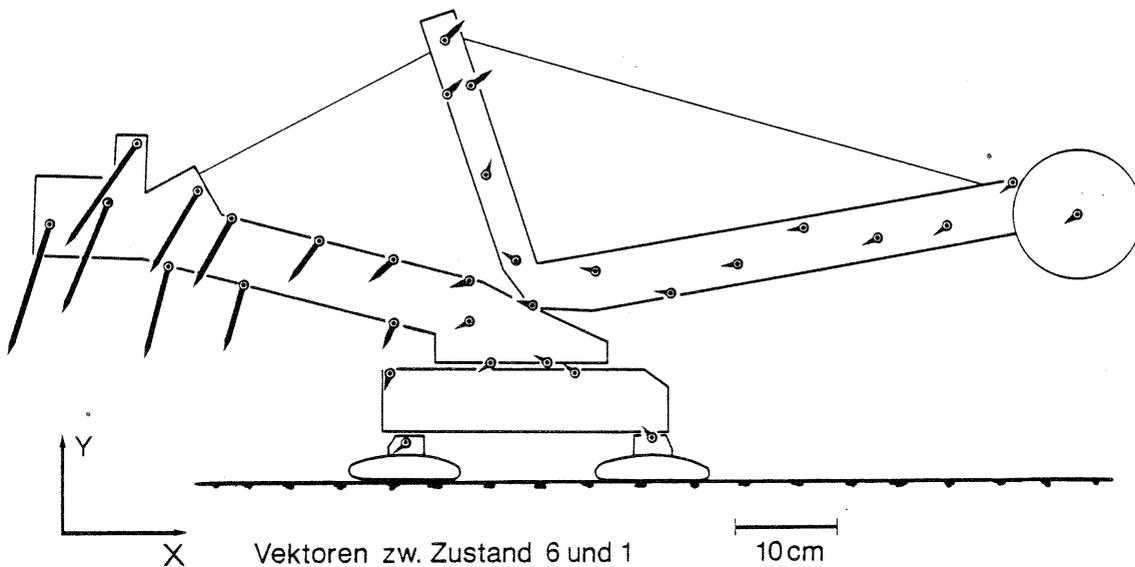


Bild 4 : Vektorendiagramm (x/y-Ebene) der photogrammetrisch ermittelten Deformationen zwischen zwei Gerätezuständen.

aber auch unvorhergesehene Drehungen des Oberbaus um seine Hochachse auftreten können, zeigte sich bei der Analyse der auffällig differierenden z-Koordinaten des 1. und 2. Zustandes: Ein grundrißliches Vektordiagramm (x/z-Ebene) wies zweifelsfrei nach, daß der Baggeroberbau unerlaubt um 0,7 gon geschwenkt worden war (Bild 5). Ohne diese Information, die sich auch nicht aus den trigonometrischen Messungen hätte ableiten lassen, wären die statischen Berechnungen nicht mit der nötigen Sicherheit möglich gewesen.

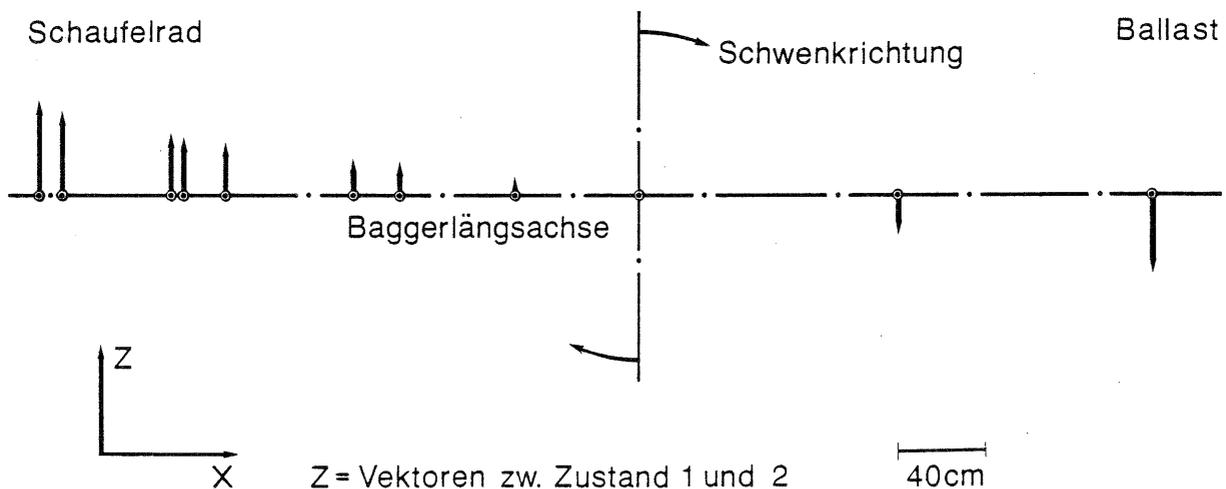


Bild 5: Vektorendiagramm (x/z-Ebene) der zwischen zwei Gerätezuständen eingetretenen Schwenkung des Baggeroberteils

Ferner zeigten Epochenvergleiche, daß sich auch die Lage eines Paßpunktes am Geräteunterbau verändert haben mußte. An ihm erschienen "Deformationen" von 8 mm infolge Nachgebens des Boden unter einer Raupe. Eine herkömmliche Messung hätte das nicht aufgedeckt, da dieser Geräteteil überhaupt nicht beobachtet worden wäre. Man hätte die sich auf den ganzen Oberbau auswirkenden Senkungen als zusätzliche Deformationen interpretiert.

Im Vergleich zu der geringen Punktanzahl, die trigonometrisch mit ähnlichem örtlichem Zeitaufwand meßbar ist, erlaubt die Photogrammetrie wesentlich mehr Beobachtungen, in diesem Fall etwa die sechsfache Menge. Infolge der vielfachen Überbestimmungen, die bei herkömmlicher Messung nicht wirtschaftlich realisierbar sind, ist auch die Zuverlässigkeit der photogrammetrischen Ergebnisse sehr hoch. Dank dieser Vorteile der Photogrammetrie konnte der Prüfstatiker aus dem Deformationsverhalten des Baggers Kippmomente und Gerätestandsicherheit viel genauer und zuverlässiger berechnen als bisher.

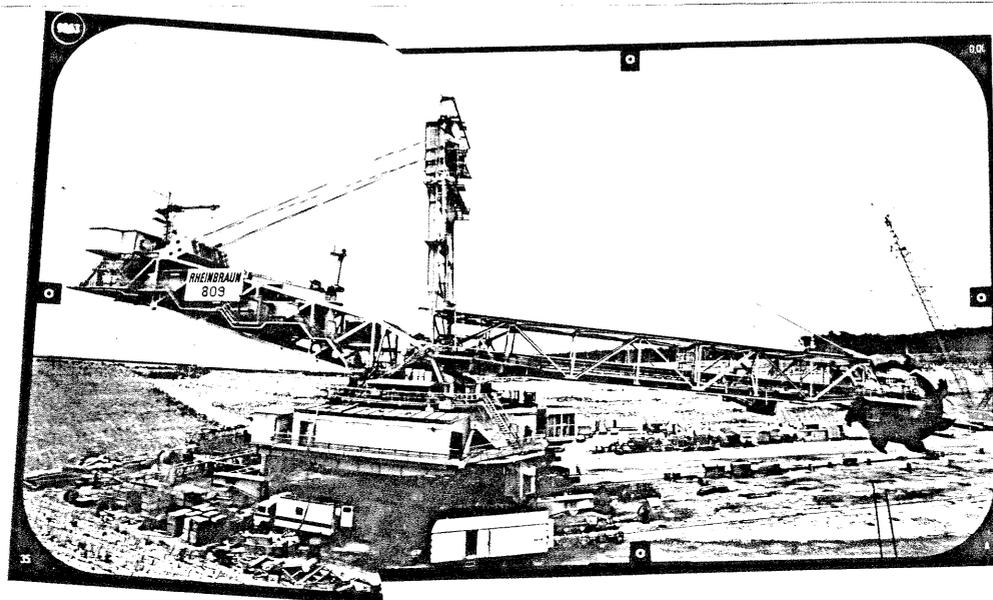


Bild 6: Gesamtansicht des Kohle-Aufnahmegerätes 809

Fall 2: Nach den guten Erfahrungen mit der photogrammetrischen Vermessung des Baggers 256 entschloß man sich, die Messungen für die Betriebszulassung des neuen gleisgebundenen Schaufelrad-Aufnahmegerätes 809 am Kohle-Grabenbunker des Tagebaus Hambach auch auf diese Weise auszuführen. Das Gerät (Bild 6) hat einen ähnlichen Aufbau und dieselbe Förderleistung wie der Schaufelradbagger. Am Gerät befanden sich rund 30 signalisierte Paß- und Meßpunkte. Als Berechnungsgrundlage diente wieder ein örtliches Koordinaten-

system, in dem die Paßpunkte auf  $\pm 1$  mm bis  $\pm 2$  mm genau trigonometrisch bestimmt worden waren.

Das Aufnahmegerät wurde bei einer Kameraentfernung von rund 50 m mit 11 bis 14 UMK-10/1318-Aufnahmen je Zustand im mittleren Bildmaßstab 1 : 700 erfaßt. Eine Aufnahmeanordnung wie beim Bagger 256 mit Kammerstandpunkten in verschiedenen Höhen war nur mit Hilfe einer ca. 8 m hohen Arbeitsplattform auf einem Hubwagen möglich (Bild 7). Dabei überlappten die Konvergentenaufnahmen einander in Längsrichtung (x) um etwa 70 % und quer (y) um 100 %. Die Aufnahmen fanden bei ruhigem Wetter an zwei Tagen im Oktober 1983 statt; Doppelaufnahmen wegen Geräteschwingungen waren nicht erforderlich.

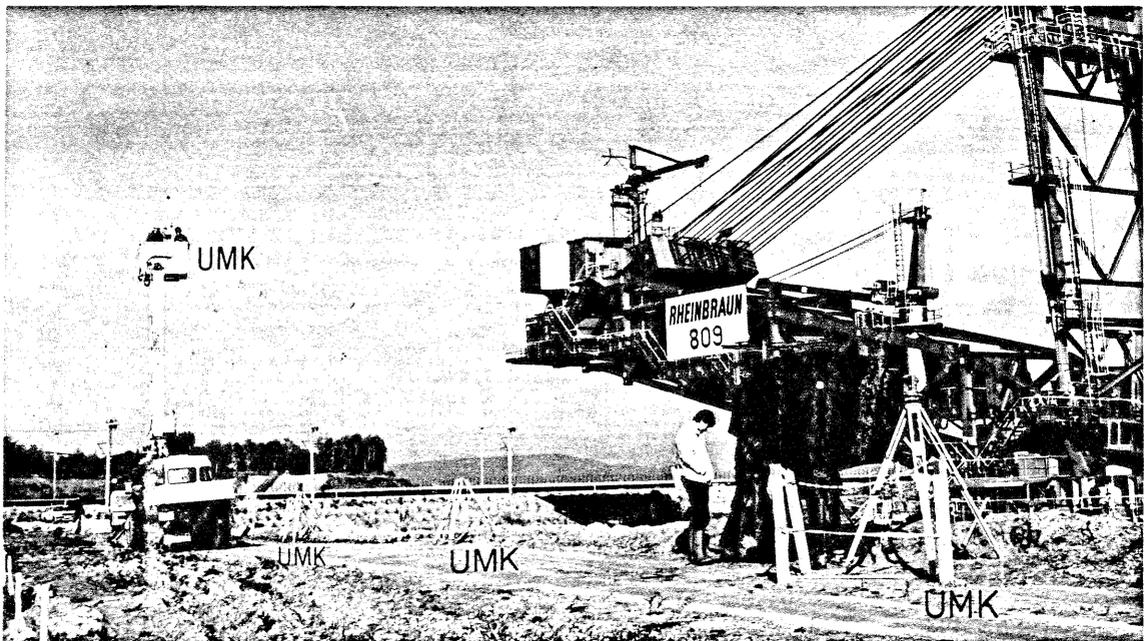


Bild 7: Aufnahmeanordnung mit UMK-Standpunkten auf dem Planum und auf einer Hebebühne

Die Bündelausgleichungen mit dem Programm PAT-B ergaben im Mittel  $\sigma = 2,8 \mu\text{m}$ . Die mittleren quadratischen Restabweichungen an den Bildpunkten betragen  $\text{RMS}_x = 2,6 \mu\text{m}$  (= 1 mm) und  $\text{RMS}_y = 2,3 \mu\text{m}$  (= 1 mm).

Wie sich aus Kontroll-Nivellements ergab, hatte sich der Geräte-Unterbau während des Auswiegens um 4 mm gesetzt; die Ergebnisse aus den photogrammetrischen Messungen zeigten exakt dasselbe. Ihre große Genauigkeit wurde durch diese unabhängige Vergleichsmessung bestätigt.

Zur Optimierung der Aufnahmeordnung wurden zwei Zustände mit dem Programm MOR ausgeglichen. In die Bündelausgleichung ging jedoch nur jeweils ein Punkt der Dreifach-Signale ein. Dies erklärt den Genauigkeitsabfall des Sigma Null von  $2,8 \mu\text{m}$  auf  $3,5 \mu\text{m}$ . Die Standardabweichungen betragen im Mittel  $S_x = 1,8 \text{ mm}$ ,  $S_y = 1,7 \text{ mm}$  und  $S_z = 2,7 \text{ mm}$ . Die gleiche Genauigkeit erhielt man bei einer Bündel-Ausgleichung ohne die drei Bilder des Hochpunktes. Eine weitere Reduzierung der Bildanzahl ergab einen deutlichen Genauigkeitsverlust.

#### 4 Ausblick und weiteres Vorgehen

Die beiden beschriebenen Anwendungsfälle der Nahbereichsphotogrammetrie bei Tagebaugroßgeräten haben einige Vorteile dieses Verfahrens gegenüber der herkömmlichen geodätischen Methode gezeigt:

- Erfassung von mehr Beobachtungspunkten bei geringerem Zeitaufwand vor Ort
- Meßaufnahmen auch bei windbedingten Schwankungen des Baggers
- nachträgliche Kontrolle ungewollter Gerätebewegungen
- größere Zuverlässigkeit der Meßergebnisse durch hohe Redundanz
- höhere Sicherheit der statischen Berechnungen

Nachteilig ist der vergleichsweise große Zeitaufwand für die photogrammetrische Auswertung und die EDV, daher stehen die Ergebnisse nicht so schnell wie bei trigonometrischer Vermessung zur Verfügung.

Mit den Meßwerten aus dem zweiten Anwendungsfall sollen noch weitere Variantenberechnungen erfolgen, mit dem Ziel, anstelle von Paßpunkten nur noch Raumstrecken und ähnliche Zusatzinformationen für die Maßstabsbestimmung und Lagerung der Bildverbände zu benutzen. Ferner ist geplant, die vorhandene Software zu erweitern, um Deformationsanalysen machen zu können. Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist die Möglichkeit, aus der Bündelausgleichung jedes Gerätezustandes die Genauigkeitsmaße für größere Mengen von photogrammetrischen Meßdaten durch Inversion der Normalgleichungsmatrix ableiten zu können.

Literaturverzeichnis

- (1) FRIEDEMANN, L.: Der Standsicherheitsnachweis, Definitionen und Rechen-  
vorschriften. Die Bautechnik 1971, Heft 1, S. 30 - 32.
- (2) HEYLL, H.: Massenermittlung im Rheinischen Braunkohlentagebau mittels  
Luftbildmessung und elektronischer Rechentechnik. Beitrag zum 9. ISP-  
Kongress London 1960.
- (3) KRJUKOV, I. I., et. al.: Photogrammetrische Methode zur Bestimmung der  
Deformation von Stahlkonstruktionen der Schaufelradbagger. Izv. VUZOV  
Gornyj zurnal 1971, Heft 5, S. 95 - 97.
- (4) PFANNMÜLLER, H.: Großschaufelradbagger als vielfältig bewegliche Stahl-  
konstruktion. Der Stahlbau 1963, Heft 4, S. 97 - 106.
- (5) PFLÄGING, K.: Aerophotogrammetrische Messungen zur Erfassung von berg-  
baubedingten Bodenbewegungen. Das Markscheidewesen 1981, Heft 1,  
S. 20 - 25.
- (6) REICHENBACH, K.: Aerophotogrammetrische Präzisionsvermessungen von Punkt-  
verschiebungen in Braunkohlen-Tagebaugebieten. Int. Kongreß des ISPRS  
Hamburg 1980. Int. Arch. of Photogrammetry Vol. XXIII, Part B, S.  
600 - 608.
- (7) REICHENBACH, K.: Zur Genauigkeit der aerophotogrammetrischen Punktbe-  
stimmung. Das Markscheidewesen 1981, Heft 2, S. 339 - 342.
- (8) REICHENBACH, K.: Fortschritte der Luft- und Erdbildmessung bei Anwen-  
dungen im Braunkohlenbergbau und in der Kraftwerksindustrie.  
V. Int. Symposium für Markscheidewesen, Varna 1982, Ref. Bd. 3,  
S. 235 - 242.
- (9) REICHENBACH, K., und F. S. Kröll: Anwendungsgebiete der Photogrammetrie  
im Kraftwerks- und Industriebau. In: Jahrbuch Bautechnik im Kraftwerks-  
bau, 2. Ausgabe, Kapitel IX "Vermessung". Vulkan-Verlag, Essen 1982.
- (10) ROSENBACH, H. : Geodätische Messungen an Tagebaugeräten im Rheinischen  
Braunkohlenbergbau. Vermessungswesen und Raumordnung 1975, Heft 5,  
S. 265 - 270.
- (11) VOGL, W., und K. MIEHLE: Photogrammetrische Deformationsmessungen an der  
42-m-Abraumförderbrücke II im Tagebau Spreetal. Neue Bergbautechnik  
1975, Heft 8, S. 607 - 613.
- (12) WESTER-EBBINGHAUS, W.: Einzelstandpunkt-Selbstkalibrierung. Symposium  
der Komm. V der ISPRS, York 1982. Int. Arch. of Photogrammetry Vol.24,  
Part V-2, S. 533 - 550.