

III. Internationales Symposium über  
Deformationsmessungen mit geodätischen  
Methoden

PHOTOGRAMMETRISCHE FORMKONTROLLE  
VON KÜHLTÜRME

E. Kruck  
und  
B. Wrobel

Bundesrepublik Deutschland

Budapest, 25. - 27. 08. 1982

## 1. Einleitung

Zur Freigabe der Abwärme bei Wärmekraftwerken wurden mit zunehmenden Kraftwerkleistungen auch größere Rückkühlssysteme erforderlich. Naturzugkühltürme aus Stahlbeton stellen unter Berücksichtigung der Forderungen nach Leistungsfähigkeit, Betriebssicherheit und Umweltschutz einen kostengünstigen Kompromiß dar und werden von vielen Kraftwerksbetreibern eingesetzt.

Die mit 168 m höchsten europäischen Kühler stehen in Doel/Belgien. Die derzeit größten deutschen Kühler sind 162 m hoch und stehen in Mülheim-Kärlich, Gundremingen und Voerde /3/. Diese dünnwandigen Flächentragwerke sind empfindlich gegen Beulungen. Nur flächenhafte Beobachtungen der meist als Rotationshyperboloid ausgebildeten Kühlerschalen können präzise Auskunft über die tatsächliche Form geben. In Zusammenarbeit mit der Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerke AG (RWE) als Betreiber mehrerer Großkraftwerke wurde ein Forschungsvorhaben zur Entwicklung und Erprobung eines Vermessungsverfahrens für Kühltürme initiiert. Als konkrete Aufgabe ist mit diesem Vorhaben die Bestimmung der Form des Kühlturms Mülheim-Kärlich verbunden.

## 2. Anforderungen

Zur Überprüfung der tatsächlichen Form eines Kühlturms ist eine sehr hohe Anzahl von Meßpunkten erforderlich, deren Lage im Idealfall gleichzeitig zu erfassen wäre. Da dies nicht durchführbar ist, soll die Meßzeit möglichst kurz gehalten und Einflüsse von Sonne und Wind, die zu Veränderungen des Turms führen können, vermieden werden. Die Messung soll daher bei bedecktem Himmel und geringer Windstärke erfolgen.

Durch Vergleich mit der Sollform des Kühlers (Schalpläne) kann nach der ersten Messung die Bauausführung des gesamten Turms kontrolliert und es können Formabweichungen festgestellt werden. Eine spätere zweite Messung gibt Aufschluß über Eigenbewegungen und Stabilität des Turmes. Da auch kleine Veränderungen von Interesse sind, muß die Bestimmung der Punkte am Kühler auf wenige cm genau erfolgen.

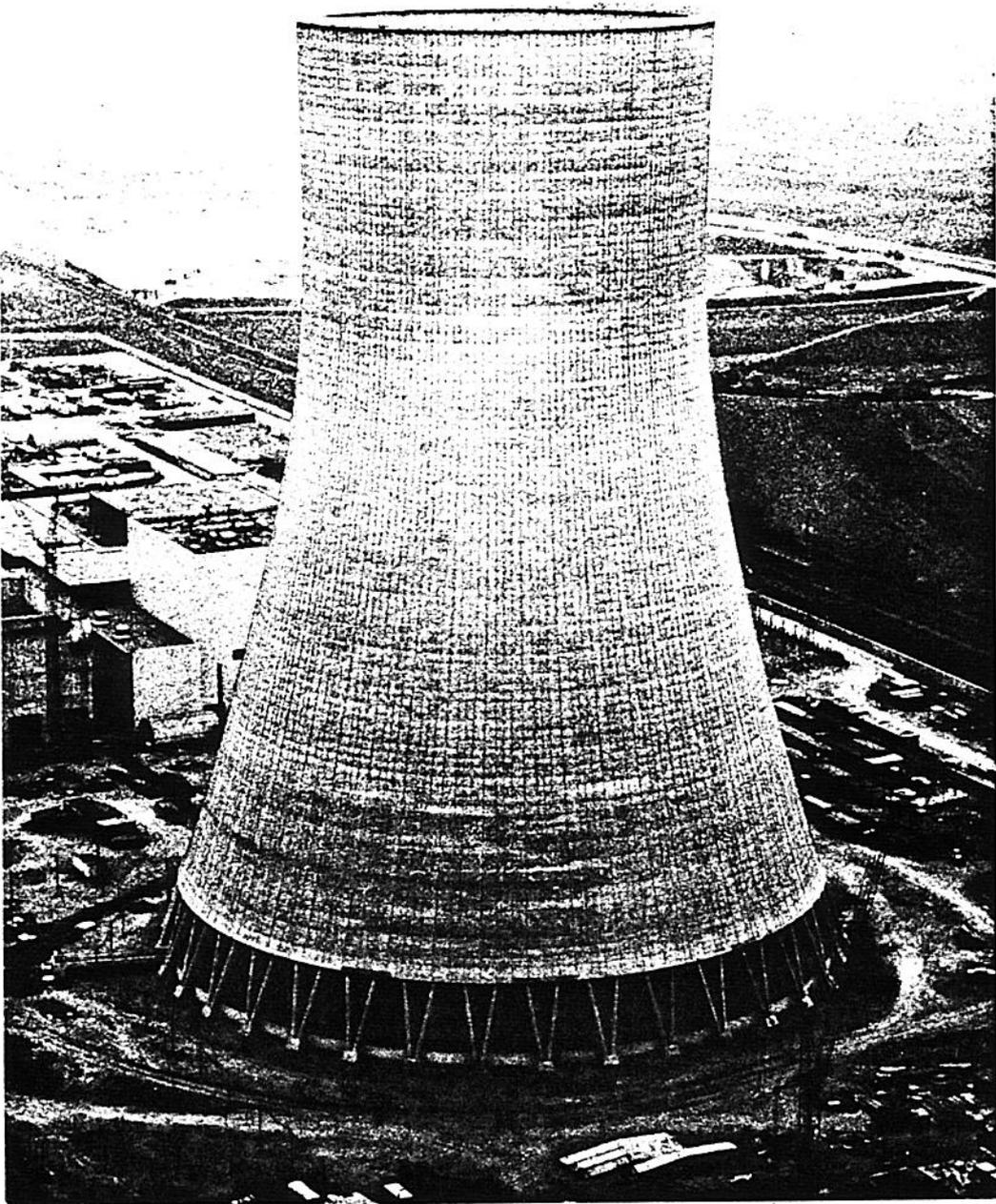


Abb.1 Luftaufnahme vom Kühlturm Mülheim - Kärlich  
Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen  
Universität Hannover  
Freigabe Nr. Brg. 51228/363

### 3. Aufnahmeverfahren

Mit klassischen geodätischen Methoden sind die gestellten Anforderungen insbesondere wegen der hohen Anzahl der Meßpunkte nur schwer zu erfüllen. Daher kommt grundsätzlich eine photogrammetrische Aufnahme in Betracht, die eine flächenhafte Erfassung sicherstellt. Die Punktdichte ist dabei auch nach der Aufnahme beliebig dicht wählbar.

Wegen zu großer Aufnahmeentfernungen, Verdeckungen durch andere Bauwerke, ungünstiger Basisverhältnisse, zu schräger Sichtwinkel auf den Turm und großer Konvergenzwinkel bei räumlicher Betrachtung der Meßbilder ist eine Aufnahme nur vom Boden aus nicht möglich. Der Einsatz von großen Hubwagen bringt für große Kühler keine Verbesserung, da nur maximale Hubhöhen von 60 m möglich sind. Außerdem sind diese Fahrzeuge sehr langsam und setzen voraus, daß das Umfeld des Kühlers befahrbar ist. Daher wurde als Aufnahmeplattform ein Hubschrauber gewählt.

Für die Aufnahmen ist eine großformatige fokussierbare Meßkammer mit Rollfilm und automatischem Filmzyklus erforderlich. Eine kurze Brennweite ist wegen der besseren Tiefengenauigkeit erwünscht. Da im Hubschrauber starke Vibrationen auftreten, sind sehr kurze Belichtungszeiten notwendig. Wegen der genannten Wetterbedingungen ist auch bei hochempfindlichem Film eine Kammer mit großer Blendenöffnung erforderlich. Hier bietet sich die UMK 10/1318 FF an. Sie ist in der Lage, alle Anforderungen zu erfüllen. Durch eine speziell konstruierte Adaptierung (Abb. 4) und besondere Maßnahmen zur Schwingungsdämpfung ist sie im Hubschrauber einsetzbar. Leider steht jedoch kein hochempfindliches Filmmaterial zur Verfügung. Ein Luftbildfilm Aviphot Pan 200 PE, sehr knapp belichtet und forciert mit einer steilen Gradation entwickelt, kommt der Auswertbarkeit des kontrastarmen Objekts sehr entgegen. Die Abbildungen 2 und 3 zeigen natürliche Punkte auf der Kühlturmoberfläche in der Nahaufnahme und aus vergrößerten Meßbildern. Diese Punkte wurden zur Verankerung der Gleitschalung benutzt und sollen jetzt als Meßpunkte dienen. Im oberen Viertel (ab Taille) sind sie offen und daher in den Meßbildern deutlich erkennbar. Im unteren Turmbereich sind sie mit einem grauen Kunststoffstopfen verschlossen und bilden sich daher kontrastarm ab. Auf eine Signalisierung der Kühleroberfläche kann jedoch verzichtet werden.

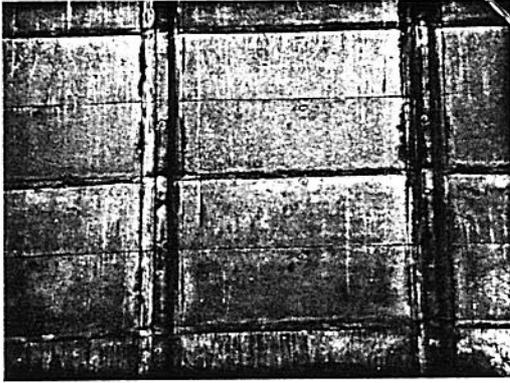
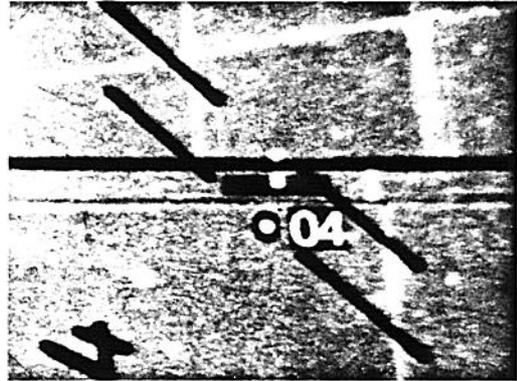
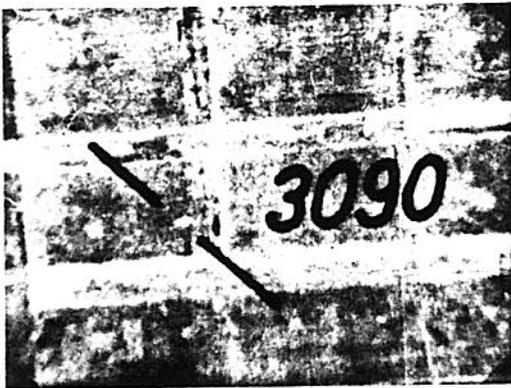


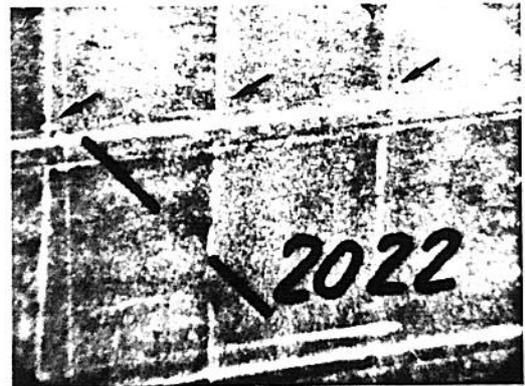
Abb. 2 Oberfläche in Nahaufnahme



3a) Signale am oberen Turmrand



3b) Guter Punkt auf dem Kühler



3c) schlechter Punkt auf dem Kühler

Abb. 3 Vergrößerungen aus Messbildern

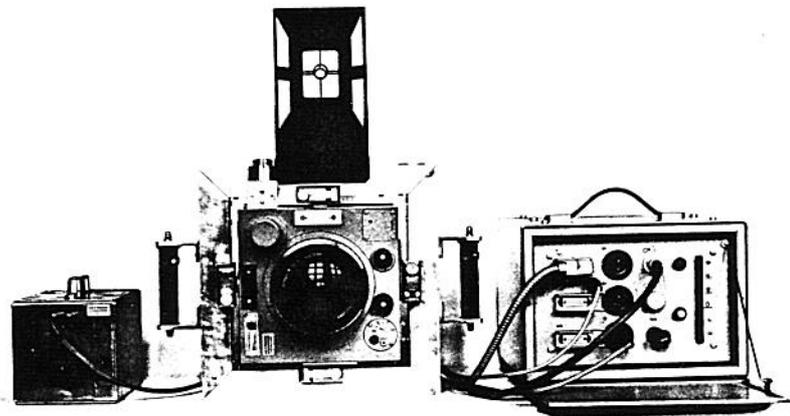


Abb. 4 Adaptierte UMK 10/1318 FF mit Steuereinheit und Batterie

Lediglich am unteren und am oberen Kühlturmrand sind für die Paßpunkte Signale angebracht. Diese Paßpunkte sind während der Befliegung zu koordinieren.

Die einzelnen Aufnahmen sollen in vorausberechneten Positionen erfolgen. Dazu ist ein Navigationsverfahren erforderlich. Eine Orientierung am Turm ist erfahrungsgemäß nicht möglich. Daher wird der Hubschrauber vom Boden aus mit einem besonderen Theodoliten mit großem Öffnungswinkel über Sprechfunkverbindung auf einem Zielstrahl geleitet. Die Einhaltung der geplanten Höhen wird durch einen im Hubschrauber mitgeführten Präzisionshöhenmesser sichergestellt. Wegen der im Hubschrauber schwankenden Druckverhältnisse muß der Abgleich des Höhenmessers im Schwebeflug am oberen Kühlturmrand erfolgen.

#### 4. Aufnahmedisposition

Die Auswertung der Meßbilder soll stereoskopisch mit vertikaler Basis erfolgen, da bei horizontaler Basis die Konvergenz für eine räumliche Betrachtung zu stark ist. Um im unteren problematischen Bereich des Turms gleiche Maßstäbe für die Bilder eines Modells zu erhalten, sind die Aufnahmerichtungen nicht horizontal, sondern gleichmäßig ein wenig nach unten geneigt. Je sechs übereinander angeordnete Aufnahmen bilden einen Streifen mit 60 % Überdeckung. Wegen der Krümmung des Turms nehmen zu den entsprechenden Bildrändern hin die Aufsichtswinkel auf den Turm rasch zu und er-

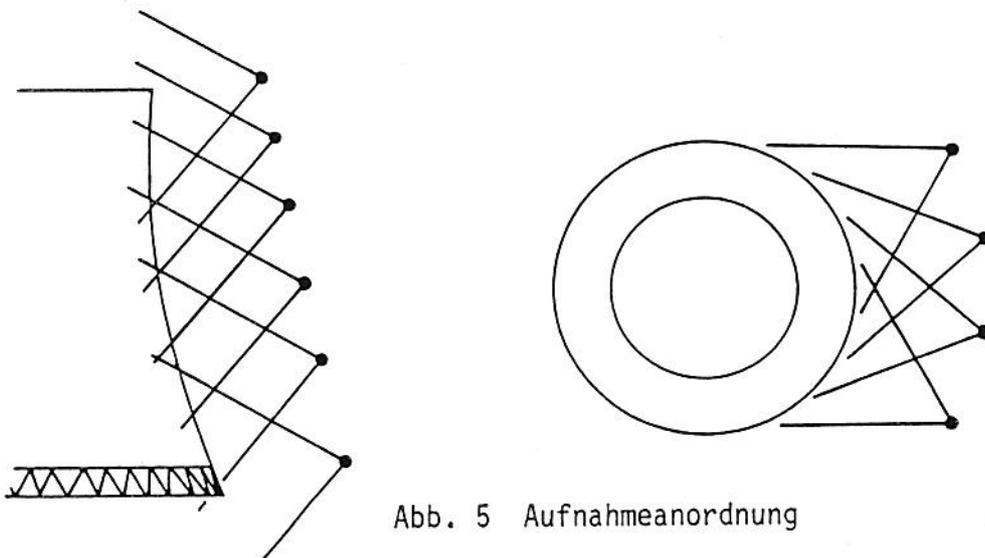


Abb. 5 Aufnahmeanordnung

schweren die Auswertung. Um auch in dieser Richtung eine gute Überdeckung zu erhalten, wurden 18 Bildstreifen rund um den Turm angeordnet (Abb. 5). Die Aufnahmeorte der jeweils obersten Aufnahme eines Streifens liegen über dem oberen Kühlturmrand, so daß der gesamte Kühlturmrand abgebildet wird. Durch 18 auf Stelzen montierte Kugelsignale (Abb. 3 a) ist bei der späteren Auswertung ein stabilisierendes Übergreifen am oberen Kühlturmrand möglich.

In jeder Aufnahmeposition wurden zur Sicherheit zwei Aufnahmen gemacht. Dies erwies sich später als nützlich, da in einigen Aufnahmen ein Rotorblatt des Hubschraubers abgebildet war. Für die gesamten Aufnahmen war eine Flugzeit von 3 Stunden erforderlich.

#### 5. Auswerteverfahren und erreichte Genauigkeit

Die Messung der Bilder erfolgte am analytischen Plotter, Planicomp C 100. Vorbereitend wurden in Vergrößerungen identische Punkte in den Bildern ausgesucht, gegenseitig übertragen und auf einer Deckfolie markiert. Eine in den Bildmaßstab rückverkleinerte auf das Meßbild gelegte Folie erleichterte beim Meßvorgang das Auffinden der Punkte (Abb. 3 b). Auf diese Weise wurden auf der Kühleroberfläche in 11 verschiedenen Höhen Punktreihen mit je 40 bis 45 Punkten gemessen. Die Bestimmung der Koordinaten dieser Punkte erfolgte durch eine Bündelausgleichung mit dem Programmsystem BLUH /2/. Probleme bereiteten bei der Ausgleichung viele kleinere Fehler, die durch unterschiedliche Punktidentifizierungen in den einzelnen Modellen begründet sind. Nach Löschung vieler Meßwerte und der Auflösungen von Verknüpfungen zwischen Punkten, die in verschiedenen Modellen unterschiedlich angesprochen worden waren, ergab sich mit zusätzlichen Punkten ein mittlerer Gewichtseinheitsfehler  $\sigma_0$  von 9,2  $\mu\text{m}$ . Dies ist an sich schon ein recht günstiger Wert, jedoch waren etliche Punkte nur noch in 2 oder 3 Bildern verblieben und daher unsicher bestimmt. Dabei handelte es sich ausnahmslos um solche Punkte, bei denen eine Reihe von Messungen gelöscht werden mußte.

Da das Programmsystem BLUH keine Standardabweichungen für die Koordinatenunbekannten der Punkte liefert, ist eine weitere Bündelausgleichung mit dem Programm BINGO (Bündelausgleichung für Ingenieur-Objekte) ohne zusätzliche Parameter und nur für 4 benachbarte Bildstreifen gerechnet worden. Danach

ließ sich über die Genauigkeit folgendes sagen: Ein Punkt, der in wenigstens zwei Modellen aus verschiedenen Bildstreifen bestimmt wird, hat mittlere Koordinatenfehler  $m_x$ ,  $m_y$  und  $m_z \leq 1$  cm.

Um das Genauigkeitspotential des Bildmaterials weiter auszuschöpfen und eine höhere Zuverlässigkeit für die Punktkoordinaten zu erhalten, wurde mit einer verbesserten Software am Planicomp C 100 eine zweite Messung des Bildmaterials vorgenommen, wobei eine automatische Ansteuerung der Meßpunkte aufgrund der bereits bekannten Punktkoordinaten für eine sicherere Punktidentifizierung sorgte. Die nun folgende zweite Bündelausgleichung wies wesentlich weniger Fehler auf. Nachdem einige Verknüpfungen aufgelöst und fehlerhafte Messungen gelöscht waren, ergab sich ein  $\sigma_0$  von  $8,5 \mu\text{m}$ . Dieser Wert allein sagt noch nicht viel über die erreichte Verbesserung der Koordinatenbestimmung aus. Es konnte hier erreicht werden, daß jeder Punkt in mindestens 6 Bildern angemessen wurde. Die große Mehrzahl der Punkte ist aus mehr als 10 Bildern bestimmt. Damit ist eine gute Kontrollierbarkeit der Meßwerte sichergestellt.

Die mittleren Koordinatenfehler wurden wieder aus 4 Bildstreifen berechnet, wobei diese Streifen so ausgewählt wurden, daß die radiale Komponente der mittleren vertikalen Punktreihe dieser Streifen mit der Koordinatenrichtung  $x$  übereinstimmt. Die mittleren Fehler  $m_x$  geben daher Auskunft über die Genauigkeit der besonders interessierenden

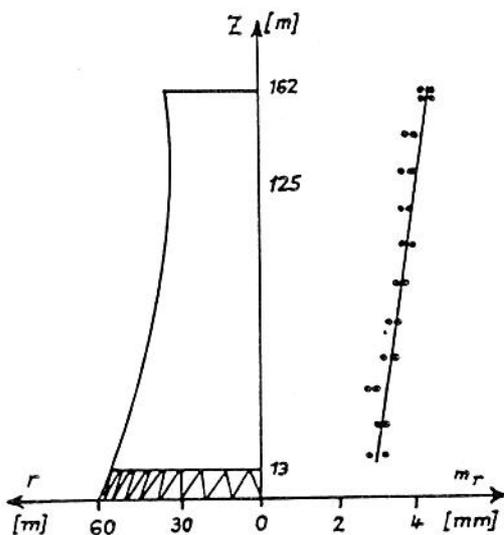


Abb. 6 Erzielte Genauigkeit in radialer Richtung

radialen Komponente. Abbildung 6 zeigt die erzielte Genauigkeit als Funktion der Höhe. Besonders interessant ist dabei die Tatsache, daß die Paßpunkte am oberen Rand geodätisch nur mit einer Genauigkeit von etwa  $\pm 7$  mm bestimmt sind und nach der Bündelausgleichung mit nur 4 Bildstreifen ein  $m_x = \pm 4,3$  mm erhalten. Wegen derzeit noch begrenzter Kapazitäten sind die mittleren Fehler hier nur aus 4 Bildstreifen berechnet. Wird das gesamte Bildmaterial in einem gemeinsamen Prozeß verarbeitet, so werden sich möglicherweise noch kleinere

- auf keinen Fall aber größere - mittlere Fehler ergeben.

Damit ist gezeigt, daß die Photogrammetrie in der Lage ist, die Form von Kühltürmen mit sehr hoher Genauigkeit zu kontrollieren.

Wirtschaftlich ist es nun aber nicht vertretbar, die gesamte Auswertung grundsätzlich zweimal durchzuführen. Dies ist auch nicht erforderlich. Die Hauptursache für die Schwierigkeiten bei der Punktidentifizierung ist darin zu sehen, daß versucht wurde, eine regelmäßige Punktverteilung auf dem Turm zu erreichen. Dadurch gelangen sowohl gute als auch schlecht erkennbare Punkte in die Ausgleichung. Wählt man für die Bündelausgleichung von vorn herein nur solche Punkte aus, die eindeutig identifizierbar sind und gut abgebildet werden, so sind Probleme nicht zu erwarten. Die Messung von Profilen oder Horizontalschnitten kann danach im orientierten Modell erfolgen. Durch die vertikale Basis lassen sich die horizontal verlaufenden Schaltafelgrenzen sehr gut in den Ecken der Windrippen (Lisenen) stereoskopisch einstellen (Abb. 3 c). Jeder Punkt kann zur Kontrolle und Genauigkeitssteigerung in mehreren Modellen angemessen werden, wobei man in jedem Modell eine etwas andere Lage auf der Kühlturmoberfläche erhält. Daher werden die Koordinaten  $(x, y, z)$  aus jedem Modell separat in ein Turmsystem  $(\alpha, z, r)$  umgerechnet, worin  $\alpha$  der Umfangswinkel auf dem Kühler ist und  $r$  der Abstand zur Kühlerachse. Erfolgt nun die Mittelbildung im  $(\alpha, z, r)$ -System, wird die radiale Komponente nicht mit den anderen vermischt und man erhält einen guten Eindruck von der erreichten Tiefengenauigkeit. Wie Abbildung 7 zeigt, sind die Streuungen in radialer Richtung gering.

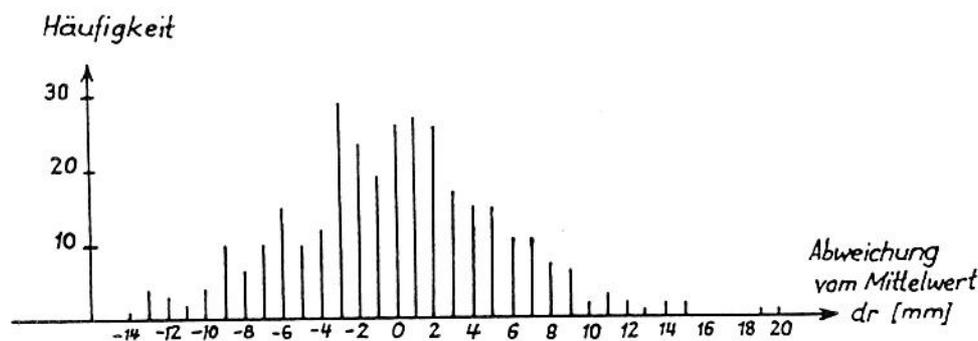


Abb. 7 Streuung der radialen Komponente bei Messung in verschiedenen Modellen

Die Bündelausgleichung liefert neben den Punktkoordinaten auch die Daten der äußeren Orientierung für alle Bilder. Ein Vergleich mit den geplanten Aufnahmepositionen und -richtungen bestätigt die Güte des Navigationsverfahrens. Die Differenzen für die Position betragen im Mittel 2 bis 4 m, für die Richtungen 1 - 3 gon.

## 6. Ergebnisdarstellung

Bei der Darstellung der Ergebnisse wird es stets darum gehen, einen Zustand des Kühlers mit der Sollform oder zwei verschiedene Zustände untereinander zu vergleichen. Da große Zahlenmengen in Tabellen sehr unanschaulich sind, müssen die Ergebnisse auch in geeigneter Weise graphisch dargestellt werden. Jedem Punkt mit den Koordinaten  $(\alpha, z, r)$  auf dem Kühler wird ein  $\Delta r$  zugeordnet. Aufgrund der Anordnung der Punkte bietet sich zunächst die Darstellung von Horizontalschnitten an (Abb. 8). Zur Aufdeckung von Beulen wird eine flächenhafte Darstellung erforderlich. Dazu werden die Punkte im  $\alpha$ - $z$ -System dargestellt und die  $\Delta r$ -Werte nach oben bzw. unten abgetragen. Die Lisenenmessung, bei der für jeden Punkt aufgrund der Messungen

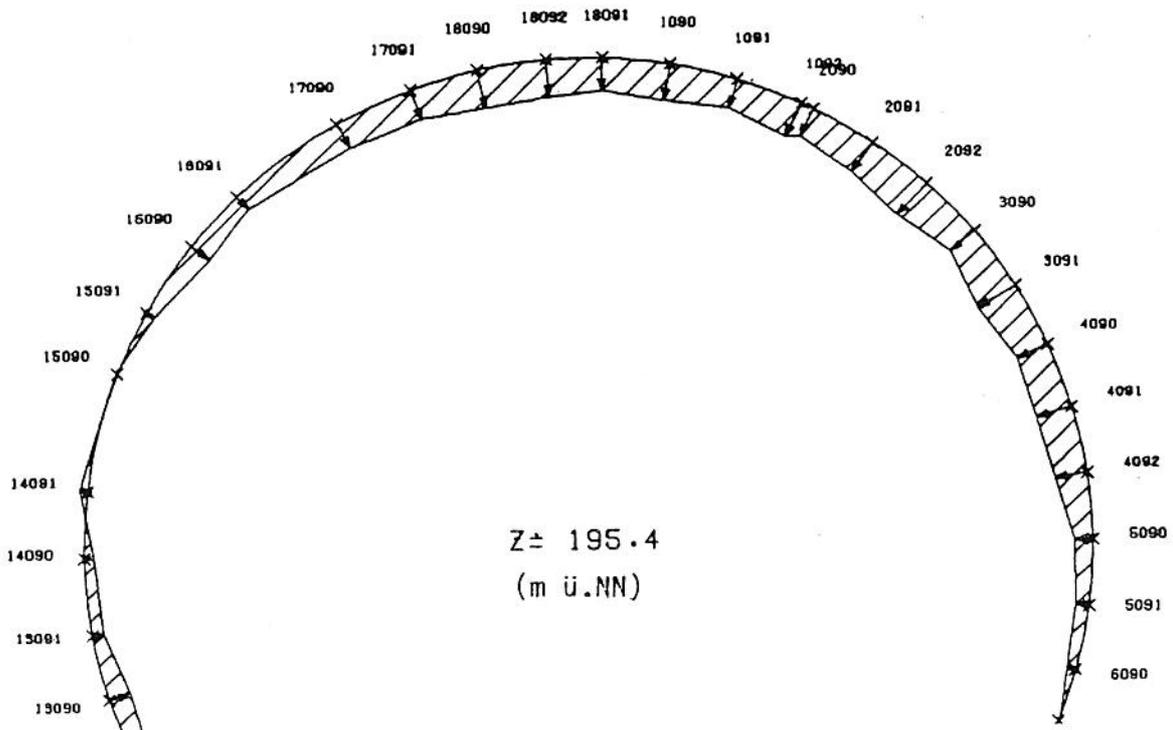


Abb.8 Horizontalschnitt mit überhöhter Darstellung der radialen Komponenten

in mehreren Modellen auch mehrere radiale Komponenten zur Verfügung stehen, kann am günstigsten durch Vertikalschnitte veranschaulicht werden. Dabei wird die Streuung der Meßwerte gut graphisch sichtbar (Abb. 9).

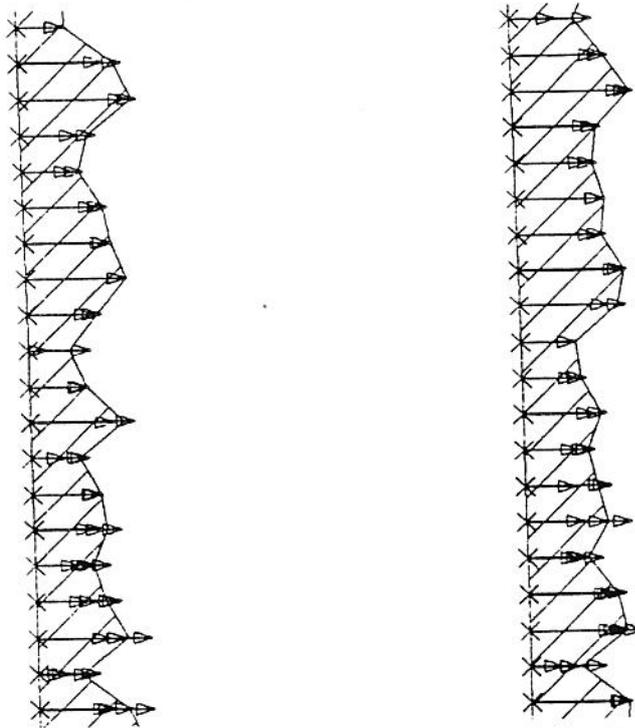


Abb. 9 Vertikalschnitte aus Modellmessungen mit überhöhter Darstellung der radialen Komponenten

## 7. Schlußbemerkungen

Das vorgestellte Verfahren eignet sich zur präzisen Formkontrolle von Kühltürmen. Die aufgetretenen Probleme der Punktidentifizierung für die Bündelungsausgleichung können bei neuen Kühltürmen völlig vermieden werden, wenn beim Bau bereits in geeigneter Weise signalisiert wird. Bei vorhandenen Türmen muß man entweder die Bildverknüpfung nur mit gut sichtbaren Punkten durchführen, oder durch ein geeignetes Meßverfahren die präzise Punktübertragung in die Nachbarbilder sicherstellen /4/.

### Summary

To control the shape of large cooling towers, the engineer is faced with new requirements that are not possible to fulfill using the traditional geodetic methods of measuring because a great number of points are needed in a short period of time. This is why a photogrammetric approach has to be considered.

The pictures of a very large concrete-iron cooling tower were taken from an helicopter with a specially adapted terrestrial camera. This paper deals with the requirements, the problems in taking the pictures, the restitution, and the obtained accuracy.

### Resumé

Il y a de nouvelles exigences à l'ingénieur pour contrôler la forme de grandes tours de refroidissement. On a besoin d'une bonne densité de points, qu'on ne peut pas arpenter économiquement avec les méthodes de la géodésie traditionnelle. Ici s'offre l'arpentage photogrammétrique. Avec une chambre métrique terrestre adaptée à un hélicoptère on a fait des prises de vues d'un grand tours de refroidissement. Ce traitement s'occupe des problèmes et des exigences de l'arpentage et de l'évaluation.

### Literaturhinweise

- /1/ Daberkow, H.: Vermessungstechnische Arbeiten beim Bau von großen Naturzugkühlern aus Stahlbeton. VGB Kraftwerkstechnik, Heft 7, 1975.
- /2/ Jacobsen, K.: Vorschläge zur Konzeption und zur Bearbeitung von Bündelblockausgleichungen, Diss. Hannover 1980.
- /3/ Krätzig, W. B. et al.: Kühltürme. Jahrbuch Bautechnik im Kraftwerksbau, Vulkan-Verlag Essen, 1982/83.
- /4/ Liao, Y.-C.: Untersuchungen über die automatische Punktübertragung bei der Aerotriangulation an analytischen Auswertegeräten. Diss. Hannover 1982.