

International Congress of Photogrammetry and Remote Sensing

Rio de Janeiro 17th to 29th June, 1984

NUMERICAL PHOTOGRAMMETRY AT THE SUPPORTING FRAMEWORK OF THE
WUPPERTAL SUSPENSION RAILWAY

NUMERISCHE PHOTOGRAMMETRIE AM TRAGGEROST DER WUPPERTALER
SCHWEBEBAHN

Dipl.-Ing. R. Beyer
GSI, Gesellschaft f. Sondermessungen, Düsseldorf

Dipl.-Ing. R. Hössler
Technische Universität München
Lehrstuhl für Photogrammetrie

Prof. Dr.-Ing. W. Wester-Ebbinghaus
Universität Hannover
Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen

Working Group V/4

A B S T R A C T

Around the turn of the century, the Wuppertal suspension railway in W.-Germany was designed and built as an electrical transportation system. The framework supporting it consists of a polygonal chain of 468 three-dimensional steel truss bridges, to the lower levels of which the rails are attached. Approximately every 30 mts the top bearing nodes of these truss bridges rest on supporting frames. The signs of wear appearing in the 70ies made it necessary to replace all bearing by state-of-the-art ones.

For that purpose the actual condition of all steel truss bridges had to be surveyed around the bearing nodes. The survey had to provide point coordinates, so-called system triangles and dimensions as used by steel construction engineers for their design work.

The technical solution, developed and realized by GSI and the experts concerned was based on numerical close-range photogrammetry. The photogrammetric measurements were further processed by computer programs written specifically to obtain the required steel construction data.

1. EINLEITUNG

Die bekannte Wuppertaler Schwebebahn in West-Germany wurde um die Jahrhundertwende, in den Jahren 1898-1902, als erste elektrische Einschienenhängebahn der Welt in der 2. Ebene gebaut. Die Streckenführung folgt im weitaus größten Teil dem Lauf der Wupper, wobei das Stahlgerüst das Flußbett überspannt. Das Bild 1 gibt eine typische Ansicht der damaligen Zeit wieder.

Die gesamte Bahnstrecke von den Stadtteilen Wuppertal-Oberbarmen bis Wuppertal-Vohwinkel hat eine Länge von ca. 13,4 km. Die Stahltragkonstruktion der Schwebebahn besteht aus einer polygonzugartigen Kette von 468 räumlichen Fachwerkbrücken mit Stützweiten von 21 m, 24 m, 27 m, 30 m oder 33 m, die auf Pendelrahmen mit festen Punktkipplagern aufliegen. Die räumlichen Fachwerkträger, auch nach ihrem Konstrukteur "Rieppel"-Träger benannt, bestehen aus einem senkrechten Hauptträger (SH) und einem oberen und unteren Horizontalverband (OH, UH). Diese Fachwerkbrücken tragen in UH-Ebene die beiden Schienenträger, die innerhalb der Pendelrahmen durchlaufen. Die in Bild 2 abgebildete historische Skizze aus [1] vermittelt einen guten Überblick über die Stahlkonstruktion des Traggerüsts.

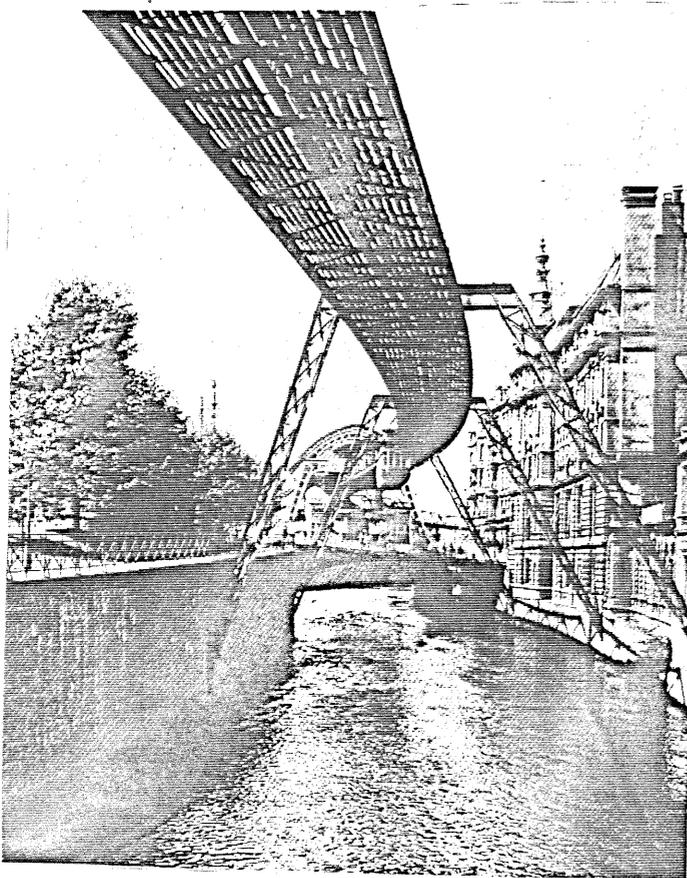


Bild 1. Traggerüst der Wuppertaler Schwebebahn um 1900 [1]

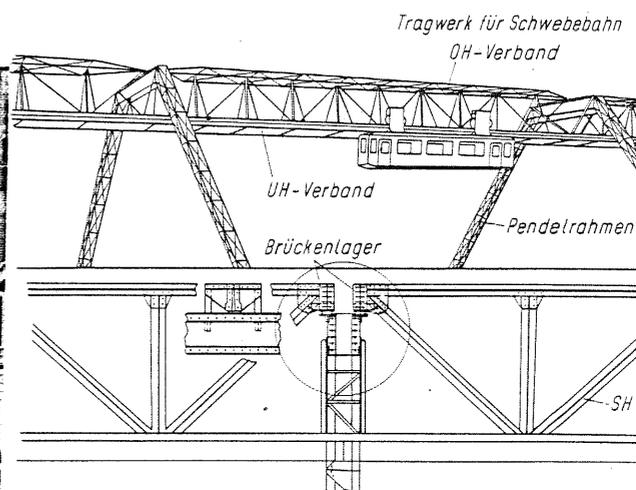


Bild 2. Historische Skizze des Schwebebahn-Traggerüsts [1]

Ungefähr alle 200 m sind zur Aufnahme der in Fahrbahnschienenhöhe wirkenden Brems- und Anfahrkräfte der Schwebbahn sogenannte Ankerstützen als Festpunkte angeordnet.

Jeweils in der Mitte zwischen zwei Ankerstützen liegt ein Temperaturdehnungsstoß, die sogenannte "Dilatation". Zwischen "Ankerstütze" und "Dilatation" sind die einzelnen räumlichen Stahlfachwerkbrücken auf den Pendelrahmen aufgelagert (Bild 2). Weitere konstruktive und statische Einzelheiten des Traggerüsts und der Haltepunkte sind in /2/ und /3/ zu finden.

Die Fachwerkbrückenachsen, nicht zu verwechseln mit Bahnachsen, bilden im Grundriß einen Polygonzug mit den Polygonpunkten, den Schnittpunkten zwischen Pendelrahmen und Stahlfachwerkbrückenachse.

Nach Abschluß der damaligen Bauarbeiten im Jahre 1903 wurde der Schwebbahnbetrieb zunächst mit Zügen, bestehend aus einem Wagen, aufgenommen. Anfang der 70iger Jahre wurden die alten Schwebbahnwagen durch neue Gelenktriebwagen mit geänderten Drehgestell- und Achsenabständen und höheren Beschleunigungs- und Verzögerungswerten ersetzt. Diese Belastungsänderung des Traggerüsts sowie die Verschleißerscheinungen an den vorhandenen Lagerteilen machen es erforderlich, alle Brückenlager auf der gesamten Strecke durch neue, dem heutigen Stand der Technik entsprechende Lager zu ersetzen.

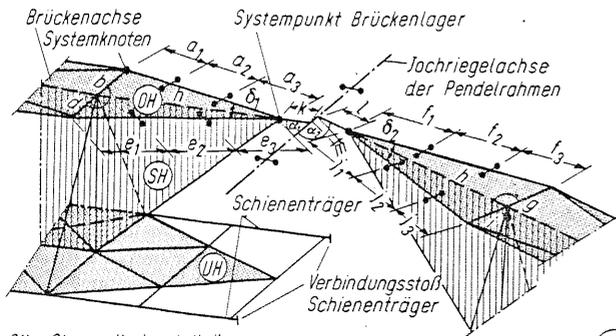
Auf Grund der systematischen Untersuchungen, statischen Gutachten und Messungen vorhandener Beanspruchungen sowie durch Erfahrung bei bereits vorgenommenen Lagerauswechslungen sind gewisse neue Lagertypen entwickelt worden. Diese neu entwickelten Lagertypen werden auf der ganzen Schwebbahnstrecke eingebaut.

2. LÖSUNGSWEG UND VERSUCHSMESSUNG

Als Grundlage für die Stahlbau-Werkstatt- und Montagearbeiten zum Auswechseln der Brückenlager mußten optimale Planunterlagen für beide Arbeitsgänge zur Verfügung stehen. Voraussetzung für eine gute technische Planung bei der Montage und im Betrieb war aber ein Aufmaß der vorhandenen Tragkonstruktion im Bereich der auszuwechselnden Brückenköpfe.

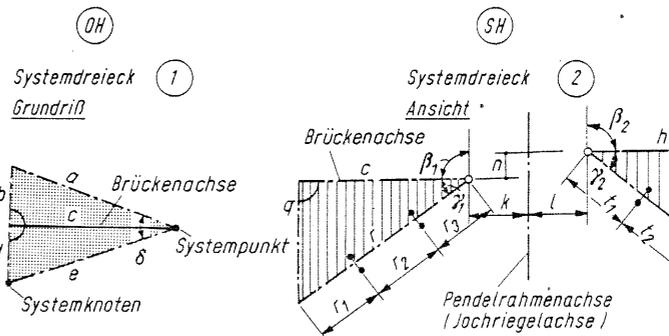
Für eine genaue Werkstattvorfertigung und eine reibungslose Montage an dem Traggerüst war es deshalb notwendig, ein vermessungstechnisches Aufmaß mit Auswertung in Form von stahlbaugerechten Systemskizzen, Maßen und Winkeln bereitzustellen. Im einzelnen mußten die folgenden Maße mit der vom Auftraggeber geforderten Genauigkeit ermittelt werden.

- a) Systemmaße als wahre Längen der OH- und SH-Endfelder beider aufliegenden Brückenträger (Systemdreiecke ① und ②).
- b) Lage der beiden Brückenträgerachsen und der zugehörigen Jochriegelachsen zueinander (Winkel α_i) mit Angabe eines eventuell vorhandenen Versatzmaßes (Maß "m").
- c) Abstand der Systemmaße der Brückenlager (Maße k, l) von der Jochriegelachse (Stützenrahmenachse).
- d) Höhenversatz (Maß "n") der beiden SH-Systemdreiecke ② in den Brückenlagerpunkten.
- e) Anbringung von dauerhaften Meßmarken für die Montage am OH- (je 2 Stück), SH- (1 Stück) Endfeld und am Jochriegel (1 Stück), die im Aufmaßsystem eingebunden sind und von denen örtlich Kontrollmessungen vorgenommen werden können.
- f) Lage der beiden OH-Endfelder gegen die Lotebene (Winkel β_i).
- g) Öffnungswinkel zwischen OH-Ebene und Diagonalstäben (Winkel γ_i).
- h) Öffnungswinkel der OH-Stäbe (Winkel δ_i).



OH = Oberer Horizontalträger
 UH = Unterer Horizontalträger
 SH = Senkrechter Hauptträger
 † = Meßmarken

Bild 3:
 Räumliche Darstellung des
 Auflagerbereiches eines Fach-
 werkbrückenträgers und ge-
 suchte Systemdreiecke SH und
 OH aus /4/.



Alle wahren Längen a-t und die Winkel $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ sind zu bestimmen

Die zu ermittelnden Maße und Winkel sind aus /4/, siehe Bild 3, entnommen bzw. durch Forderungen des Auftraggebers ergänzt worden. Die Ermittlung dieser Werte sollte zuerst auf konventionellem Wege mit Hilfe von Abschnüren und Nivellieren erfolgen. Vom erstgenannten Verfasser wurde dazu ein Alternativvorschlag ausgearbeitet, der auf einem berührungslosen, photographischen Meßverfahren - der Photogrammetrie - aufbaut. Um das photogrammetrische Meßverfahren nun auf die Vermessung des Traggerüsts in den Auflagerbereichen anwenden zu können, war eine Reihe von neuartigen Überlegungen, Entwicklungen und Vorarbeiten nötig.

Als erstes mußten eine Reihe grundsätzlicher Fragen geklärt werden:

- Ist dieses Meßverfahren überhaupt unter den gegebenen Voraussetzungen und Randbedingungen auf ein Stahlgerüsttragwerk, wie es das Schwebebahntragwerk darstellt, anzuwenden?
- Können die gemachten Aufnahmen so ausgewertet werden, daß eine Genauigkeit im mm-Bereich erzielt werden kann, wie sie im Stahlbau üblich ist?
- Welche Aufnahmestandorte sind für die Meßgenauigkeit und Bereitstellung der gewünschten Meßdaten erforderlich?
- Wie können die mit Hilfe der Photogrammetrie erhaltenen Meßdaten sinnvoll weiterverarbeitet werden, um stahlbaugerechte Systemmaße des Traggerüsts in den Auflagerbereichen zu erhalten?

Zur weiteren Klärung dieses Fragenkomplexes wurde eine Versuchsvermessung mit Hilfe der Photogrammetrie an einem Brückenkopf des Schwebebahntragwerks durchgeführt. Dieser Versuch sollte Aufschluß darüber geben, ob das Verfahren praktikabel und kostengünstig für eine Einmessung aller auszu-

wechselnden Brückenköpfe des gesamten Schwebbahntraggerüsts sei. Die Versuchsergebnisse haben dies bestätigt.

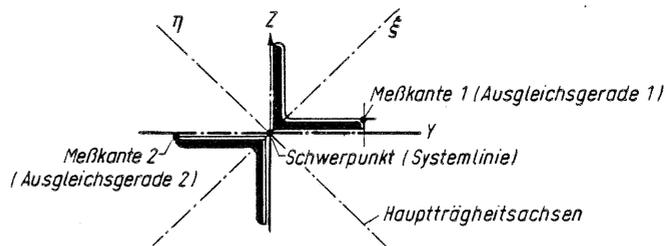
Da die gesuchten Systemlinien nicht direkt photogrammetrisch meßbar sind, mußte überlegt werden, wie man mit sichtbaren Meßpunkten auf die Systemlinie schließen kann.

Dazu bot es sich an, die Kanten der Winkelprofile zu signalisieren. Man erhält so für jeden Fachwerkstab zwei Meßpunktfolgen, die durch ausgeglichene Geraden ersetzt werden können. Durch Reduktion dieser Ausgleichsgeraden erhält man pro Fachwerkstab eine Gerade, die Systemlinie, s. Bild 9. In diesem speziellen Falle ist die Systemlinie eine stofffreie Achse, weil bei übereckgestellten Winkelprofilen der Massenschwerpunkt zwischen diesen Profilen liegt (Bild 4).

Die Aneinanderreihung der Schwerpunkte ergibt die gesuchte Systemlinie.

Bringt man nun diese gemessenen und ausgeglichenen, räumlichen Geraden zum Schnitt, so erhält man die in Bild 3 dargestellten Systemdreiecke. Aus diesen Dreiecken können alle Maße als wahre Längen berechnet und zeichnerisch dargestellt werden.

Bild 4:
Winkelprofilquerschnitte
eines Fachwerkstabes
Meßkante 1 und 2



Dazu war es erforderlich, ein Computerprogramm zu erstellen, das die an den Fachwerkstäben gemessenen Punkte zu einer Systemlinie pro Fachwerkstab reduziert. Werden alle Systemlinien der Fachwerkstäbe miteinander räumlich zum Schnitt gebracht, so ergeben sich die in Bild 3 dargestellten Systemdreiecke.

1. OH-Dreieck - Systemdreieck 1 ,
2. SH-Dreieck - Systemdreieck 2 .

Die hierfür erforderliche Entwicklung eines Computer- und Plotprogramms geschah in Zusammenarbeit mit der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Stahlbau.

Die vom Auftraggeber geforderten Genauigkeiten beziehen sich auf die zu ermittelnden wahren Längen der gesuchten Systemdreiecke. Das bedeutet, daß die einzelnen Meßpunkte ungenauer sein können, sofern genügende Redundanz vorliegt. Es war jedoch zu fordern, daß auch die Einzelmeßpunkte in der Regel Standardabweichungen von < 1 mm erreichten, damit für die materiellen Ungenauigkeiten am Objekt, wie Temperatur, Anstrich, Rost, Deformation etc., ohne Gefährdung der Endgenauigkeit noch genügend Sicherheit verblieb. Diese Meßpunktfolgen haben außer ihrer Hilfsfunktion zur Bestimmung der Systemlinie keine dauerhafte Bedeutung, abgesehen von einigen Referenzmarken (Körnerpunkten) für die spätere Stahlbaumontage.

Auf der Suche nach einem geeigneten Kameraträger wurde zunächst neben einigen anderen Möglichkeiten der Einsatz eines leichten Hubschraubers vorgeschlagen /5/. Dieses Vorhaben scheiterte jedoch an der Verweigerung der Fluggenehmigung durch die zuständige Behörde.

Als Kamerasystem wurden zwei Platten-Meßkammern Zeiss (JENA) UMK 10 eingesetzt. Für diese Meßkammern lagen von ähnlichen Präzisionsmessungen genügend Erfahrungen vor.

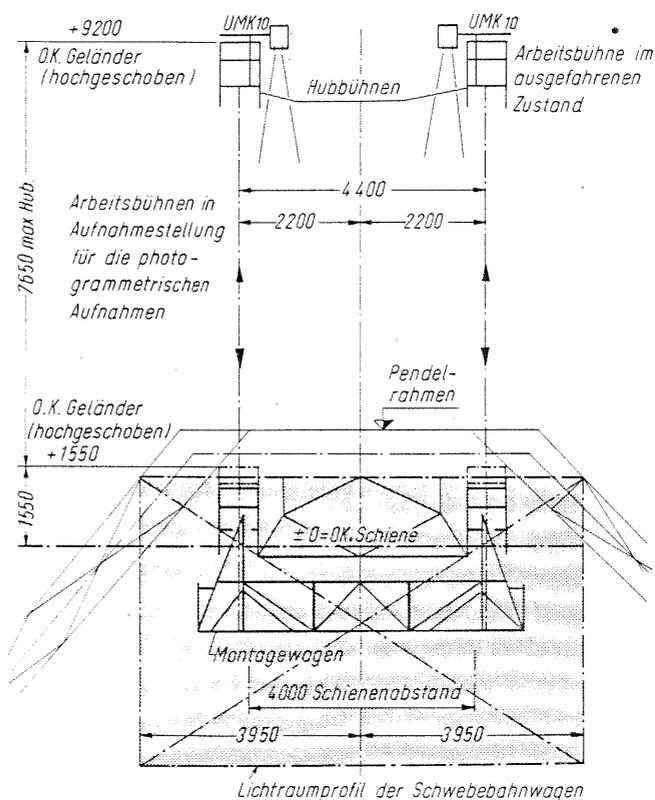
3. VORBEREITENDE ARBEITEN

Durch das Versagen der Fluggenehmigung mit dem Hubschrauber mußte bei gleicher Aufnahmeanordnung der Meßkammern eine andere technische und gleichzeitig wirtschaftliche Lösung gefunden werden.

Als alternativer Kameraträger für die photogrammetrischen Aufnahmen am Schwebebahngerüst wurde ein demontierbares, fahrbares Arbeitsgerüst entwickelt, gebaut und für den Nachteinsatz ausgetestet. Dieses Arbeitsgerüst in Form eines Montagewagens hängt an den beiden Fahrschienen des Schwebebahntraggerüsts und ist mit zwei ausfahrbaren, hydraulisch betriebenen Hubbühnen ausgestattet. Am Aufnahmeort werden die beiden Wagenhälften so zusammenmontiert, daß eine statisch stabile Tragkonstruktion entsteht, die die beiden hydraulisch betriebenen Hubbühnen mit Bedienungs-personal und Meßkammern im ausgefahrenen Zustand sicher tragen kann.

Weitere technische Einzelheiten sind in /5/ und /9/ mitgeteilt. Bild 5 zeigt eine Prinzipskizze des Montagewagens mit ausgefahrenen Hubbühnen an einem Pendelrahmen des Schwebebahntraggerüsts.

Bild 5:
Prinzipskizze des zusammen-
gebauten Montagewagens im
Aufnahmezustand



Bei den photogrammetrischen Nachtaufnahmen wurden die beiden Wagenhälften bei entsprechend trockener Witterung gegen 23.30 Uhr an einem in der Nähe des Aufnahmeortes gelegenen Bahnhof an die Schwebebahntraggerüstkonstruktion angehängt.

Nach Anbringen und Auslegen einiger meßtechnischer Zusatzgeräte wie Meßschablonen, Blitzlichter und Paßpunktsystem, und Dokumentation organisatorischer Daten wie Temperatur, Aufnahmeort und -zeit konnte die Aufnahme nach Ausfahren der Hubbühne aus ca. 6 m Höhe über dem Traggerüst geschossen werden.

Nach der Aufnahme erfolgte die Demontage der Aufnahmevorrichtungen in den Hubbühnen, damit der Montagewagen mit eingefahrenen Arbeitsbühnen unter der aufgenommenen Pendelstütze hindurch zur nächsten Stütze verschoben werden konnte. Dieser Aufnahmevorgang konnte bis ca. 4.00 Uhr morgens fortgesetzt werden, dann mußte das Schwebebahntraggerüst wieder geräumt werden, damit die Schwebebahnzüge gegen 5.30 Uhr ihren Betrieb wieder aufnehmen konnten.

Diese analytisch photogrammetrische Auswertung lieferte pro Bildpaar die Objektkoordinaten der Meßschablonenpunkte für insgesamt 18 Geraden und der sieben Meßmarken für die Stahlbaumontage. Mit einem speziell entwickelten und ebenfalls auf den Computer HP 1000 ausgelegten Programm wurden sodann 18 ausgleichende räumliche Geraden gerechnet.

Routinemäßig durchgeführte Genauigkeitsabschätzungen für die Geradenausgleichungen ergaben, daß die Standardabweichungen der Koordinaten der einzelnen Geradenpunkte i.a. unterhalb 1 mm lagen. In Bonn und München zu Testzwecken ausgeführte Doppelauswertungen bestätigen diese Genauigkeit. Die Koordinaten der Anfangs- und Endpunkte der ausgeglichenen Geraden und der Meßmarken für die Stahlbaumontage wurden schließlich an den Lehrstuhl für Stahlbau der Universität Bochum zur Weiterverarbeitung übergeben.

5. AUFBEREITUNG DER PHOTOGRAMMETRISCHEN MESSWERTE ZU STAHLBAUSYSTEM- MASSEN UND -DREIECKEN

Der wichtigste Bearbeitungsabschnitt für die Lösung der Aufgabe war die Weiterverarbeitung der Meßdaten zu stahlbaugerechten Systemmaßen. Hier war auch die Schnittstelle zwischen der photogrammetrischen Vermessung und der Stahlbaukonstruktion. Die Meßergebnisse müssen so aufbereitet werden, daß die Konstrukteure diese Ergebnisse unmittelbar in ihre Planung einfließen lassen können.

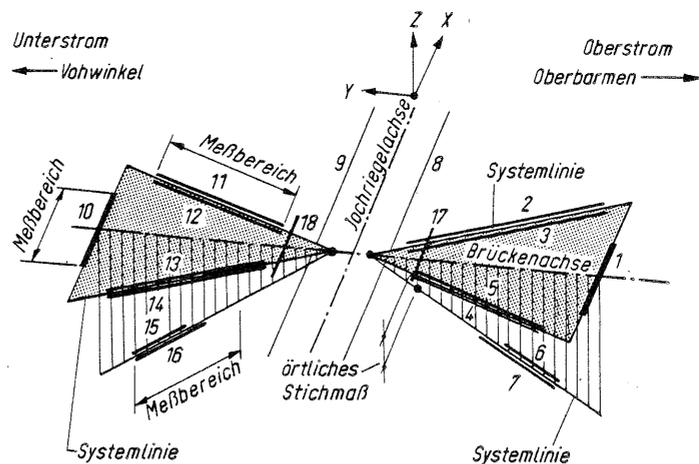
Dazu mußte ein Computerprogramm geschrieben werden, das die Meßdaten mit den zugehörigen organisatorischen Daten so aufbereitet, daß die in Bild 3 dargestellten Systemdreiecke mit ihren wahren Längen und Winkeln berechnet werden können. Die erforderliche Programmierung wurde am Lehrstuhl für Stahlbau der Universität Bochum durchgeführt /6/. Das Programm ist so aufgebaut, daß es die Meßdaten in Form von 18 räumlichen Ausgleichsgeraden, organisatorischen Daten, Materialstärken der aufgemessenen Winkelprofile bzw. Knotenbleche und Stichmaße als ein vollständiges räumliches Modell der Systemdreiecke berechnet.

Die auf dem Lochstreifen angelieferten Daten der Ausgleichsgeraden, die in Bild 8 durchnummeriert sind, wurden nach der Berechnung als erste augenscheinliche Kontrolle auf dem graphischen Bildschirm ausgegeben. Bild 8 zeigt eine Skizze des Kontrollplots des räumlichen Modells der Endfeldsystemdreiecke.

Die endgültigen Systemlinien, die nicht direkt photogrammetrisch meßbar sind, werden mit Hilfe des Computerprogramms, dessen Ablaufschema in /9/ beschrieben ist, berechnet

Bild 8:

Kontrollplot des räumlichen Modells der Fachwerkbrückenendfelder.



4. PHOTOGRAMMETRISCHE ARBEITEN

Die Aufnahmekammern wurden an Auslegern des Montagewagens in die Aufnahme-positionen geschwenkt. Am Geländer der Arbeitsbühnen waren je zwei Studio-Blitzlampen der Marke Rollei angebracht. Die Auslösung der Kamern erfolgte über elektrische Verbindung gleichzeitig, wobei, durch den Verschuß einer Kammer gesteuert, die vier Blitzlampen durch Funksignal synchron gezündet wurden. Solch eine Meßaufnahme zeigt Bild 6.

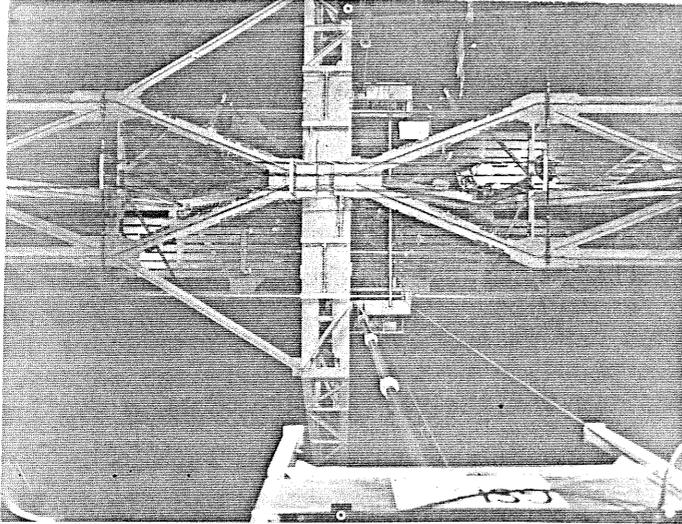


Bild 6: Photogrammetrische Aufnahme von zwei Fachwerkbrückenendfeldern

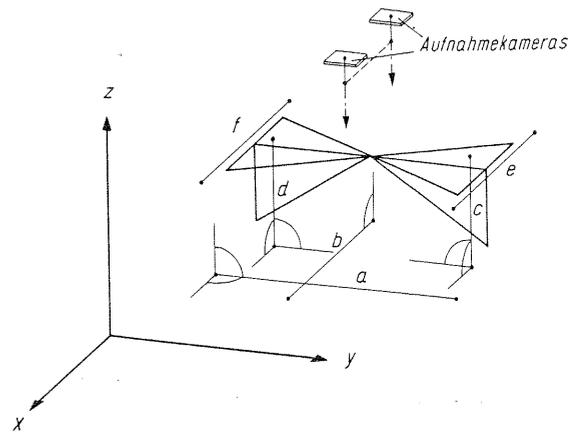


Bild 7: Aufnahmeanordnung und geodätische Einpaßinformation der Fachwerkbrückenendfelder

Zur Orientierung der Meßbilder im Auswertegerät diente ein System von Meßstäben und Richtungen (Bild 7). Eine Bereitstellung von Paßpunkten durch geodätische Messungen vor Ort war innerhalb der für eine Aufnahme zur Verfügung stehenden Zeit, ca. 20 Minuten, ausgeschlossen. Die horizontierten Maßstäbe "a" und "b", die Lotlängen "c" und "d" und die Maßstäbe "e" und "f" lieferten die Einpaßinformationen, um das photogrammetrische Modell zu horizontieren und im Maßstab zu definieren, und erlaubten darüber hinaus eine simultane Kalibrierung der Aufnahmekammern im Zuge der Auswertung der Meßbilder. Weitere Einzelheiten sind in /7/ beschrieben.

Bei einer relativen Objektiefe von rund 0,4 und einem Basis-Entfernungsverhältnis von 0,4 bis 0,3 waren an die Parameter der inneren Orientierung der Aufnahmekammern hohe Genauigkeitsansprüche zu stellen. Diesen konnte im Rahmen der genannten Simultankalibrierung mit hoher Zuverlässigkeit entsprochen werden, ohne sich mit schwer abwägbarer Unsicherheit auf Ergebnisse einer Vorab-Kalibrierung stützen zu müssen.

Die Auswertung der UMK-Meßbildpaare erfolgte am Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn und am Lehrstuhl für Photogrammetrie der TU München an Analytischen Stereoauswertesystemen Zeiss Planicomp C 100.

Der Vorgang der Auswertung gliedert sich in die Messung der Bildkoordinaten x' y' und x'' y'' homologer Punkte P' und P'' im linken und rechten Bild und die Berechnung der zugehörigen Objektkoordinaten x y z unter Verwendung der zentralperspektiven Abbildungsgleichungen und der zuvor rekonstruierten Parameter für die Orientierung der beiden Meßbilder im Raum.

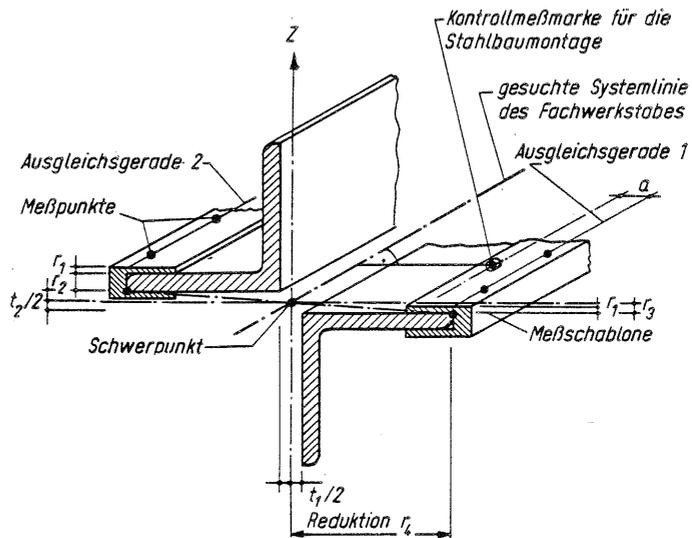
Diese Berechnung wird im Standardfall vom Steuerrechner des Planicomp C 100 in Echtzeit ausgeführt, wobei die Zykluszeit 20 ms beträgt. Da die Geräte-software aber nicht auf die Besonderheiten der hier beschriebenen Paßpunktinformation ausgelegt ist, war es im vorliegenden Fall notwendig, die Bildkoordinaten x' y' z'' y'' nach erfolgter Messung zu registrieren und die Berechnung der Objektkoordinaten x y z off-line durchzuführen. Dies erforderte die Entwicklung spezieller, auf den Steuerrechner HP 1000 ausgelegter Computerprogramme

Die notwendige Reduktion der Ausgleichsgeraden auf die gesuchte Systemlinie ist in Bild 9 verdeutlicht.

Bild 9:

Reduktion der Ausgleichsgeraden der Fachwerkstäbe um die Materialstärken r_1 und r_2 bzw. r_3 und r_4

- t_1/t_2 = Knotenblechdicke
- r_1 = Materialdicke der Schablone
- r_2 = Materialdicke des Winkelprofils
- r_3 = halbe Materialdicke des \overline{OH} -Knotenbleches
- r_4 = Schenkellänge des L-Profiles plus halbe Knotenblechstärke
- a = konstanter Abstand



Wichtige Marken für Kontrollmessungen bei der Montage der neuen Brückenköpfe sind die vom Auftraggeber geforderten dauerhaften Kontrollmeßmarken (Bild 9). Da diese Meßmarken nur auf der Oberfläche der Winkelprofile photogrammetrisch sichtbar angebracht werden können, müssen sie für Planung und Montage in das Vermaßungssystem der Systemdreiecke einbezogen werden. Dazu wird rechnerisch das räumliche Lot auf die jeweilig zugehörige Systemlinie gefällt und die wahren Längen zu den Schnittpunkten der Systemdreiecke berechnet.

Als Endergebnis der gesamten photogrammetrischen Vermessung wurde eine zuerst in /4/ entwickelte und dann modifizierte Darstellung als Plottzeichnung mit allen vom Auftraggeber geforderten Maßen, Winkeln, Längen und Daten für die weitere Bearbeitung übergeben. Solch ein Ergebnis in Form einer Plottzeichnung für den Auflagerbereich eines Pendelrahmens ist in Bild 10 abgebildet. Weitere Einzelheiten des Programms mit Druckerprotokoll und Erläuterungen zu den Meß- und Rechenergebnissen sind in /5/ beschrieben.

Bild 10:

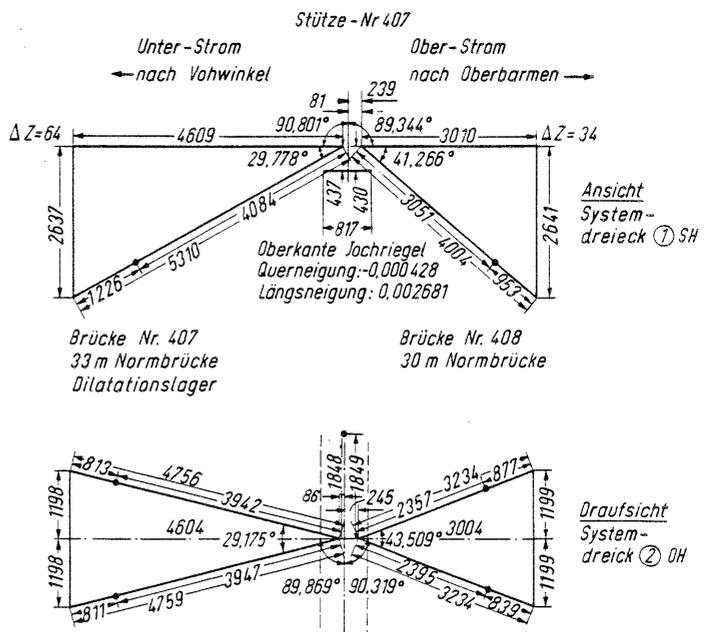
Plottzeichnung der Stahlbau-Systemdreiecke mit Bemaßung

Organisatorische Daten:

Jochriegel-Nr.: 407
 Messung am: 23.08.79
 Messung durch: Uni Bonn
 Uhrzeit: 1.15 Uhr
 Temperatur: 15,8 Grad
 Wetterbedingungen: bedeckt
 Auswertung: Uni München

Meßtechnische Daten:

	Unterstrom	Oberstrom
Exzentrizität OH-SH:	-5mm	-6mm
Lagerexzentrizität OH:	174mm	15mm
Lagerexzentrizität SH:	179mm	21mm
Winkel α :	89,869°	90,319°
Winkel β :	90,801°	89,344°
Winkel γ :	29,778°	41,266°
Winkel δ :	29,175°	43,509°
Höhe über Joch:	437mm	450mm

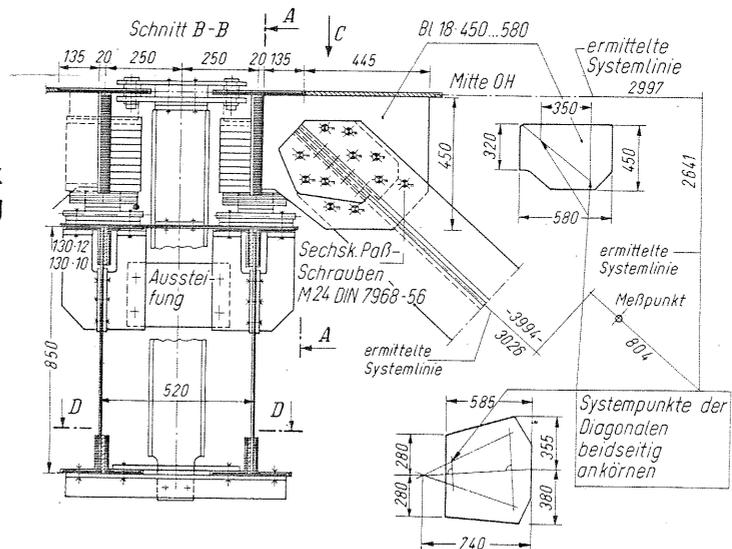


6. SCHLUSSBETRACHTUNG

Um Fehler in den Meßergebnissen und somit in Systemlängen und Winkeln zu vermeiden, waren Kontrollen der Ergebnisse in allen Bearbeitungsschritten der Auswertung erforderlich. Diese Kontrollen mußten äußerst sorgfältig durchgeführt werden, um Planungs- und Herstellungsfehler der Brückenköpfe von vornherein auszuschließen. Es wurde ein Kontrollsystem entwickelt, daß Meßfehler praktisch ausschließt. Ein wichtiger Gesichtspunkt des entwickelten photogrammetrischen Verfahrens ist, daß Schreib- und Übertragungsfehler bei der Auswertung und Weiterverarbeitung ausgeschlossen sind, weil die Meßergebnisse ausschließlich digital übertragen und weiterverarbeitet werden.

Bild 11:

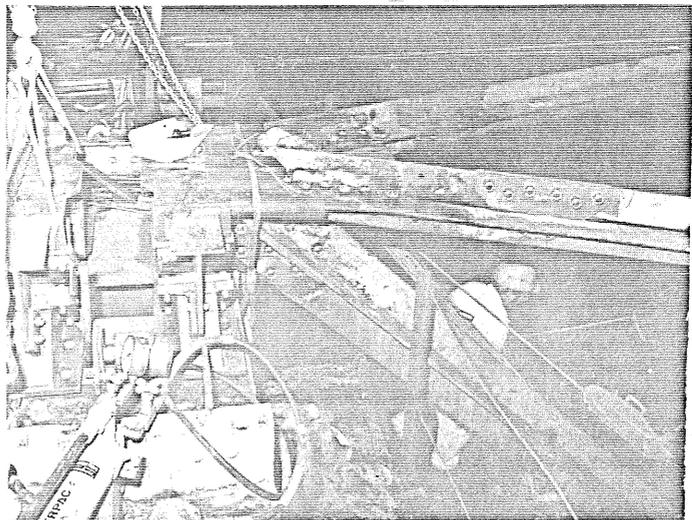
Ansicht des neuen Brückenlagers mit SH-Systemdreieck (Auszug aus einer Zeichnung der Firma Thyssen Engineering, Dortmund)



Die einzelnen Kontrollabschnitte, die die Meßergebnisse und deren Weiterverarbeitung durchlaufen, sind in /5/ ausführlich beschrieben. Haben die Meßergebnisse alle Kontrollabschnitte ohne Beanstandungen passiert, werden sie an die Stahlbaufirma zur weiteren Bearbeitung übergeben. Das Bild 11 zeigt Details des neuen Brückenlagers mit den eingearbeiteten Systemdreiecken und Kontrollmeßmarken für die Werkstattfertigung und die Stahlbaumontage. Das Foto (Bild 12) zeigt einen Brückenkopfaustausch kurz vor seiner Fertigstellung. Zwischenzeitlich sind etwa 80 % der neuen

Bild 12:

Ausgewechselter Brückenkopf des Schwebebahntraggerüsts (Foto der Firma Thyssen Engineering, Dortmund)



Brückenköpfe eingebaut, ohne daß die Meßergebnisse Anlaß zur Beanstandung gegeben haben. Damit ist zu erkennen, daß sich dieses Verfahren evtl. in modifizierter Form für andere im Stahlbau schwierig zu lösende Vermessungsaufgaben einsetzen läßt, besonders auch mit den in / 8/ geschaffenen Grundlagen des Rechnergestützten Konstruierens von Stahlbauteilen.

Das technische Gesamtkonzept für die photogrammetrischen Arbeiten wurde von der Gesellschaft für Sondermessungen im Ingenieurwesen, Düsseldorf, der GSI der GSI, entwickelt. Die Durchführung der Arbeiten erfolgte unter Beteiligung der Universitätsinstitute für Photogrammetrie in Bonn und München und des Lehrstuhls für Stahlbau an der Ruhr-Universität Bochum. Der Auftragnehmer für die gesamten Stahlbauarbeiten ist die Firma Thyssen Engineering, Dortmund. Allen an der Durchführung dieser nicht alltäglichen Ingenieuraufgaben Beteiligten sei für ihre kooperative Zusammenarbeit gedankt.

Literatur:

- /1/ Schierk, H.-F.: Schwebebahn und Wupperbrücken. Erläuterungen und Katalog zu einer gleichnamigen Ausstellung. Herausgegeben von der GHS Wuppertal, FB 11. Eigenverlag, Wuppertal 1979.
- /2/ Beyer, R., Hartmann, B.: Zur statischen Auslegung des Traggerüsts der Wuppertaler Schwebebahn. BHI-Bericht Nr. 353/80/9, 1980.
- /3/ Beyer, R., Eckermann, K., Hartmann, B.: Ein Unfallschaden am Bahnhof Hammerstein der Wuppertaler Schwebebahn. Elfter IVBH Kongreß Wien 1980, Schlußbericht Seite 897-902.
- /4/ Beyer, R.: Photogrammetrische Vermessung des Schwebebahntraggerüsts in Wuppertal. Versuchsbericht, Ingenieurbüro Beyer, Erkrath-Hochdahl, Juli 1977.
- /5/ Beyer, R., Fuchs, H., Töpfer, G.-J.: Photogrammetrische Vermessung der Auflagerbereiche des Stahltraggerüsts der Wuppertaler Schwebebahn. Projektbericht der Firma GSI, Düsseldorf, 1981.
- /6/ Haake, H.-P.: Programm zur Berechnung von Stahlbausystemdreiecken mit Hilfe photogrammetrischer Meßdaten, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Stahlbau, 1980
- /7/ Wester-Ebbinghaus, W.: Zur Verfahrensentwicklung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität Bonn, 1981.
- /8/ Haake, H.-P.: Grundlagen zum dreidimensionalen-Rechnergestützten-Konstruieren im Stahlbau mit Anwendung. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, 1982. Technisch-Wissenschaftliche Mitteilungen 82/9.
- /9/ Beyer, R., Ebner, H., Wester-Ebbinghaus W.: Numerische Photogrammetrie am Traggerüst der Wuppertaler Schwebebahn. Der Stahlbau, Heft 12, 1983, S. 363 - 370. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.