

**Wilhelm Benning,  
Stephan Görtz,  
Raimund Schwermann, Aachen**

# Photogrammetrie-gestützte Deformationsanalyse an Stahl- und Spannbauteilen

**Die Überprüfung der Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonträgern zur Festlegung des Bemessungsmodells erfolgte bisher ausschließlich durch punktbezogene Beobachtungen mittels Dehnungsmeßstreifen, Setzdehnungsmessern und Wegaufnehmern. Der Beitrag zeigt die Möglichkeiten der Erfassung der Rißbildung durch photogrammetrische Messungen auf.**

## 1 Einleitung

Im Forschungsbereich zur Tragfähigkeit von Stahlbetonträgern wird vom Institut für Massivbau der RWTH Aachen das Tragverhalten von verschiedenen Versuchskörpern unter fachspezifischen Gesichtspunkten wie der Art der Bewehrung oder der Materialbeschaffenheit des Betons (Normalbeton, Leichtbeton) experimentell untersucht. Die Überprüfung der sog. Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonträgern steht dabei im Vordergrund zwecks Festlegung des Bemessungsmodells in der DIN 1045-1. Mit unterschiedlichen und wiederholten Querkraftversuchen soll insbesondere das Schubrißverhalten untersucht werden.

Die bisher angewandte Meßtechnik zur Schubrißbildung war ausschließlich auf die punktbezogene Bestimmung von geometrischen Veränderungen beschränkt. Zum Einsatz kamen konventionelle Meßmethoden mittels Dehnungsmeßstreifen, Setz-

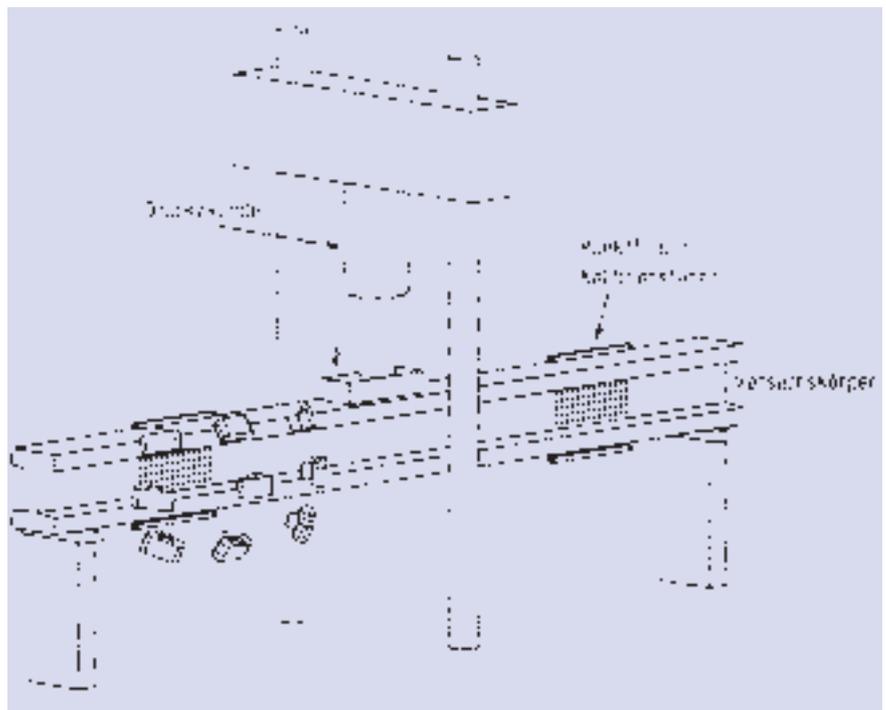
dehnungsmessungen und Wegaufnehmern. In Zusammenarbeit mit dem Geodätischen Institut wurden nunmehr erstmalig photogrammetrische Meßverfahren eingesetzt, da diese einerseits eine schnelle und flächenhafte Erfassung der Verformungen ermöglichen und andererseits den geforderten Genauigkeitsanspruch erfüllen. Dieser liegt für die Analyse des Rißöffnungsverhaltens bei kleiner, gleich 0,1 mm. Aus der flächenhaften Datenerfassung können zudem lokale Bereiche der Schubrißbildung abgegrenzt und individuell modelliert werden.

## 2 Versuchsanordnung

Abbildung 1 gibt einen Überblick zur Versuchs- und Meßanordnung mit ihren wichtigsten Bestandteilen. Der Träger wird an beiden Enden

aufgelagert und durch den mittig angeordneten Druckzylinder unter Last gesetzt. In den Zonen der erwarteten Schubrißbildung, die sich an beiden Enden befinden, werden vor Versuchsbeginn jeweils ca. 500 Zielmarken in nahezu regelmäßiger Anordnung auf dem Trägersteg angebracht. Diese besitzen einen kreisrunden, schwarzen Kern mit einem weißen Rand. Der innere Kern wurde wegen der Forderung einer automatisierten Bildmessung mit einem Durchmesser von 5 mm konzipiert. Für eine sichere Bestimmung des Punktzentrums mit Bildverarbeitungsalgorithmen ist ein Kerndurchmesser im Bild von mindestens 6–8 Pixeln wünschenswert.

Die im annähernd regelmäßigen Gitter mit einem Abstand von 2,5 cm zwischen den Punkten aufgetragenen Punktfelder decken eine



**Abb. 1: Versuchs- und Meßanordnung**

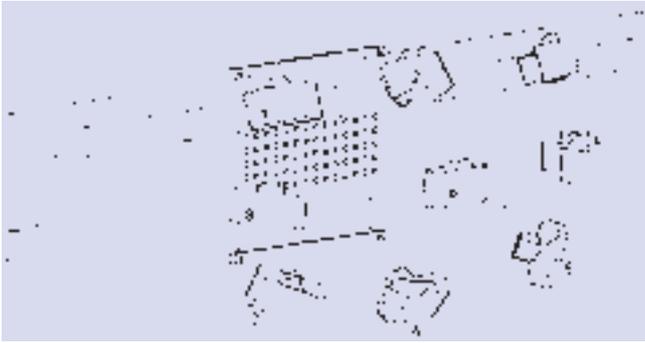


Abb. 2: Photogrammetrische Aufnahmeanordnung

Fläche von jeweils etwa 25 cm x 100 cm ab. Da es relative Punktbewegungen zu untersuchen gilt, ist eine exakte Äquidistanz des Zielpunktgitters nicht erforderlich. Im Versuchsverlauf entstehende Risse bewirken Veränderungen in den Abständen benachbarter Punkte. Das Meß- und Auswertekonzept sollte also auf eine hohe lokale Nachbarschaftsgenauigkeit abzielen.

Jeweils ober- und unterhalb der Zielpunktgitter wurden Kalibrierstäbe aus Stahlprofilen mit jeweils drei fixen Zielpunkten (siehe Abb. 3) angebracht. Die Abstände zwischen diesen Fixpunkten werden vor und nach jeder Versuchsreihe auf der Interferometerbahn des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen ermittelt. Die laserinterferometrische Mehrfachbestimmung ergab eine Standardabweichung der gemittelten Punktabstände von 0,010 bis 0,012 mm. Die Kalibrierstäbe sind unabhängig vom Versuchsaufbau, insbesondere vom Versuchsträger gelagert. Deren absolute Lagestabilität kann während der Versuchsdauer allein aus tageszeitbedingten Temperaturveränderungen nicht gewährleistet werden. Sie ist im Hinblick auf die zu bestimmenden Relativbewegungen der Meßpunkte auch nicht erforderlich. Über die kalibrierten Abstände der Fixpunkte wird letztlich der Maßstab der Meßpunktfelder festgelegt (s. u.). Eine eventuelle Abstandsänderung infolge Temperaturschwankungen wird mit dem bekannten Ausdehnungskoeffizienten von Stahl rechnerisch korrigiert, wozu die fortlaufende Messung der Umgebungstemperatur am Versuchsstand erforderlich ist.

Abbildung 2 zeigt schematisch die Aufnahmekonfiguration. Zu jeder ausgewählten Laststufe (Epoche) werden die Meßfelder einschließlich Kalibrierstäbe mit der Meßkamera von allen Seiten aufgenommen, insgesamt 9 Aufnahmen pro Epoche. In den hier beschriebenen Versuchen kamen zwei Kameratypen parallel zum Einsatz:

• Eine analoge, mit einer Réseauglasplatte ausgestattete Teilmeßkamera des Typs NIKON FM 602. Die Kleinbildkamera wurde in Kombination mit einem 20-mm-Objektiv eingesetzt, wobei während der Aufnahmeserien streng auf die Unveränderlichkeit der Fokussierung geachtet wurde. Als Filmmaterial kam Schwarz-Weiß-TMAX-Film mit einer Empfind-

lichkeit von 400 ASA zum Einsatz.

- Außerdem wurden zu jeder Laststufe Aufnahmen mit einer digitalen Kamera des Typs KODAK DCS 420 mit einer Auflösung von 1500 x 1000 Bildpunkten erstellt. Die CCD-Kamera zeichnet die Bilder direkt auf einen internen Datenträger auf, so daß die Bilder nach dem Auslesen unmittelbar für die Auswertung zur Verfügung stehen. Aufgrund der reduzierten Bildfläche (hier ca. 9,0 mm x 13,6 mm) werden digitale Kameras mit generell kürzeren Objektivbrennweiten kombiniert, hier mit einem 15-mm-Objektiv, damit ein ausreichend großes Bildfeld gegeben ist.

### 3 Digitale Bildpunktmessung und Berechnung der Objektpunktkoordinaten

Die Auswertung der Meßbilder und die Berechnung der Punktkoordinaten erfolgte mit dem digitalen, photogrammetrischen Auswertesystem PHIDIAS-MS [BENNING/SCHWERMANN 1997]. Zum Zwecke der anvisierten hohen Genauigkeit sowie der Reduzierung des Arbeitsaufwandes müssen die signalisierten Punkte bildverarbeitungsgestützt gemessen werden.

Für die automatische Messung von kreis- oder ellipsenförmigen Punkten sind bislang verschiedene Algorithmen entwickelt worden. Neben Schwerpunkt- und Korrelationsverfahren [EHLERS 1983] sind die Kleinste-Quadrate-Anpassung

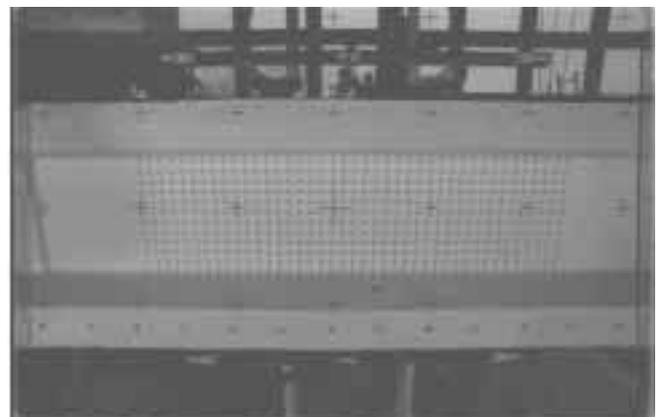
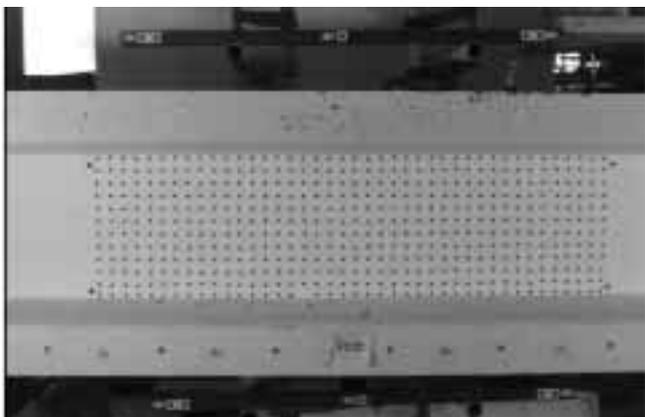
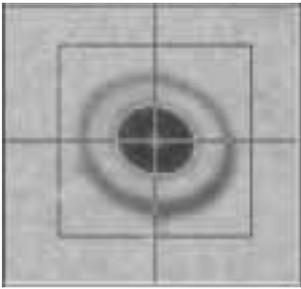


Abb. 3: Beispiele zu den Meßaufnahmen (links digitale und rechts analoge Aufnahme einschließlich der Réseaukreuze der NIKON-Kamera)

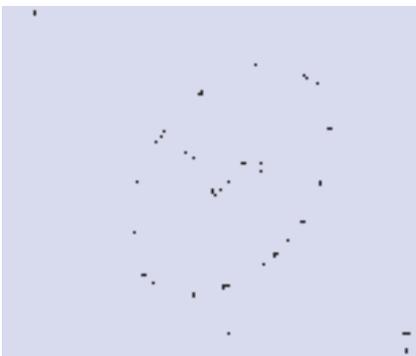


**Abb. 4:**  
*Digitale  
Bildpunkt-  
messung in  
PHIDIAS-  
MS*

[FÖRSTNER 1985] sowie diverse kantenbasierte Verfahren [LUHMANN 2000] als wichtigste Methoden in der Anwendung. In PHIDIAS ist außer einem Korrelationsverfahren und der Kleinste-Quadrate-Methode zusätzlich ein spezieller, kantenbasierter Algorithmus implementiert, der nachfolgend näher beschrieben wird.

### 3.1 Kantenbasierte Bildpunkt-messung in PHIDIAS-MS

Die kreisrunden Punktmarken bilden sich in den Aufnahmen im Allgemeinfall als Ellipsen ab. Strategisch wird bei der Bestimmung des Ellipsenzentrums ähnlich wie beim Stern-Operator in zwei Schritten vorgegangen [LUHMANN 2000]: Zunächst werden möglichst viele Kantenpunkte auf dem Zielmarkenrand ermittelt, welche dann in einem zweiten Schritt durch eine ausgleichende Ellipse approximiert werden (Abb. 4 und 5), eine spezielle Anwendung der Parameterschätzung [KOCH 2000]. Das funktionale Modell wird durch die Gleichung einer Ellipse mit seinen Mittelpunktkoordinaten  $(x_M, y_M)$  sowie der kleinen



**Abb. 5:** *Automatische Punktmessung. Zunächst werden an den Hell-Dunkel-Übergängen über den gesamten Umfang verteilte Randpunkte bestimmt. Anschließend wird durch diese Punkte eine ausgleichende Ellipse als Randkurve gelegt*

und großen Halbachse  $a$  und  $b$  als formbestimmende Parameter repräsentiert (Abb. 5). Hinzu kommt ein im Koordinatensystem zu bestimmender Drehwinkel  $\alpha$ . Da sich in der Ellipsengleichung Beobachtungen und Unbekannte nicht einfach trennen lassen, bietet sich das Gemischte Modell zur Parameterschätzung an.

Zur Bestimmung der Kantenpunkte werden häufig die erste oder die zweite Ableitung der Grauwertfunktion verwendet, z. B. Gradienten- oder Laplace-Filter [BÄSSMANN/KREYSS 1998]. Im System PHIDIAS-MS wird dagegen die Grauwertfunktion direkt, d. h. ohne den Umweg einer Ableitung, durch ein passendes funktionales Modell beschrieben.



**Abb. 6:** *Punktmarke als idealisiertes Grauwertgebirge; daneben ein Schnitt durch das 3D-Modell*

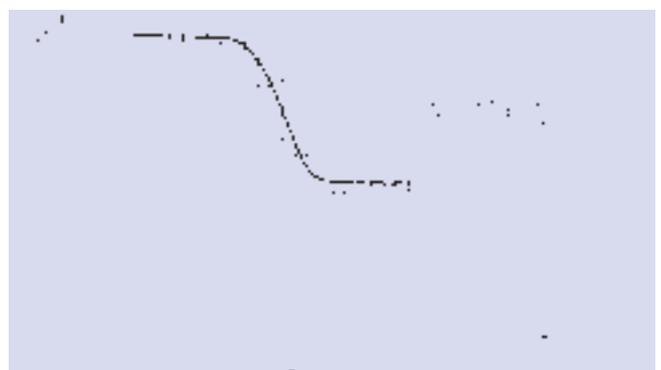
Abbildung 6 zeigt das idealisierte Modell einer elliptischen Zielmarke mit (bspw. schwarzem) Kern als Grauwertgebirge sowie als Schnittzeichnung. Der hier entwickelte Algorithmus bestimmt die steilsten Stellen des „Grauwertanges“; dies sind in der Schnittzeichnung die Wendepunkte der Schnittkurve. An diesen Stellen besitzt der Grauwertgradient seinen größten Betrag.

Als Voraussetzung für die subpixelgenaue Bestimmung der Randpunkte werden zunächst der Mittelpunkt sowie die grobe Form der Randellipse näherungsweise benötigt. Der Mittelpunkt wird bei der praktischen Messung beispielsweise durch den An-

wender oder aufgrund von anderen Informationen (z. B. Näherungskordinaten der Zielmarken in Verbindung mit Orientierungsdaten, so daß eine Projektion in das Meßbild möglich ist) in einem ersten Schritt festgelegt. Nach einer Schwellwertbestimmung findet eine Binarisierung des Bildausschnittes statt, so daß anhand einer einfachen Schwerpunktbestimmung der Mittelpunkt verbessert werden kann. Über die Berechnung von Trägheitsmomenten in den Binärdaten bekommt man schließlich erste Näherungswerte für die Formparameter der Randkontur (Halbachsen und Verdrehung) [HABERÄCKER 1989].

Auf der Basis dieser ersten Näherungswerte erfolgt nun die subpixelgenaue Bestimmung von gleichmäßig verteilten Punkten auf der Randkontur. Hierzu wird in jedem Randpunkt eine virtuelle Ebene er-

richtet, die senkrecht zur Ellipsenkurve liegt und das Grauwertgebirge durchschneidet (siehe auch Abb. 6). Das entsprechende Grauwertprofil zeigt exemplarisch Abbildung 7, wo die Grauwerte  $G_i$  im Randbereich als Funktion des Radius  $r$  aufgetragen sind. Aufgrund der Streuung weicht das Grauwertprofil in der Praxis vom Idealfall ab. In PHIDIAS wird nun an jedem potentiellen Randpunkt eine Arcustangens-Funktion als ausgleichende



**Abb. 7:** *Approximation des diskreten Grauwertprofils durch eine ausgleichende Funktion*

de Kurve durch das Grauwertprofil gelegt:

$$G_i = G_o - f_1 \cdot \arctan[f_2 \cdot (r_i - r_o)]$$

mit den 4 Parametern  $G_o$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  und  $r_o$ . Der Wendepunkt in der Mitte der Funktionskurve fällt mit dem gesuchten Randpunkt der Zielmarke zusammen.  $G_o$  ist eine Konstante, die die Kurve in der „Höhe“ festlegt. Sie markiert das Mittel zwischen oberer und unterer Grauwertebene. Von den Faktoren  $f_1$  und  $f_2$  hängt die Form der Kurve ab. Der Wert  $f_1$  variiert den Abstand zwischen den Plateaus, und mit  $f_2$  kann der Steigungsgrad der Kurve im Bereich des Wendepunktes angepaßt werden. Für die eigentliche Randpunktmessung ist die Größe  $r_o$  wesentlich: sie beschreibt die Position des Kurvenwendepunktes in der Ellipsenebene und damit die subpixelgenaue Position des Konturpunktes.

Die Bestimmung der Funktionsparameter geschieht durch Parameterschätzung im Gauß-Markoff-Modell. Die Grauwerte  $G_i$  des lokalen Profils werden hierzu jeweils durch bilineares Resampling gewonnen und bilden im Ausgleichungsprozeß die Gruppe der Beobachtungen. Da für die Lokalisierung des Randpunktes nur die Grauwerte in der Umgebung des Randes maßgeblich sind, schränkt man zweckmäßig den einbezogenen Bereich auf drei bis fünf Pixel beidseits des Kurvenwendepunktes ein.

Der gesamte Prozeß, d.h. die Bestimmung von Randpunkten und deren Approximation durch eine Ellipse bzw. als Sonderfall durch einen Kreis, wird genauigkeitssteigernd iterativ mit verbesserten Näherungswerten, mindestens jedoch zweimal durchgeführt, da das Ergebnis der Zentrumsbestimmung von der ersten Näherung des Mittelpunktes abhängt. Hiesige Untersuchungen an praktischen Meßaufgaben belegen, daß die einmalige Rekursion ausreicht.

### 3.2 Photogrammetrische Koordinatenberechnung

Die Berechnung der Punktkoordinaten im Objektraum erfolgt im System PHIDIAS-MS. Das Orientierungsmodul von PHIDIAS er-

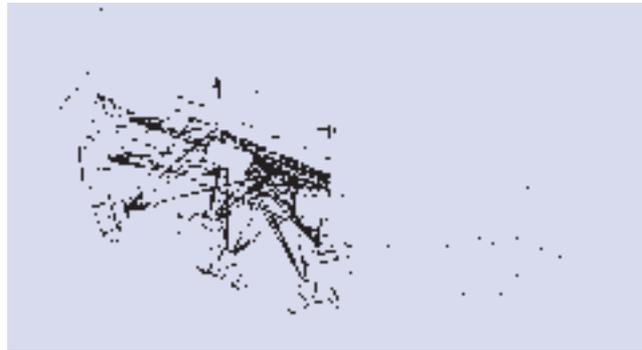


Abb. 8: Dreidimensionale Punktbestimmung durch Bündelausgleichung

möglicht die Berechnung der gesuchten Punktkoordinaten aus den Bildmessungen.

Die plausibelsten Ergebnisse liefert die Bündelausgleichung im Rahmen einer Mehrbildorientierung (Abb. 8). Hierbei definieren die jeweils neun Aufnahmen einer Laststufe räumliche Strahlenbündel (jede Aufnahme mit ca. 500 Strahlen), die im Zuge der photogrammetrischen Orientierungsberechnung mit PHIDIAS-MS ausgleichungstechnisch aufeinander eingepaßt werden. Beobachtungen, unbekannte Parameter sowie Zusatzbeobachtungen werden einer Parameterschätzung im Gauß-Markoff-Modell unterzogen, wobei schlußendlich zusätzlich zu den Orientierungsdaten die dreidimensionalen Koordinaten der Meßpunkte geliefert werden.

Im konkreten Fall wurde der Bildverband als Freies Netz gerechnet, wobei auf die jeweils sechs Fixpunkte des Paßpunktrahmens als Datumspunkte aufgefördert wurde. Für diese Punkte wurden die aus der Interferometermessung ermittelten Distanzen zur Bestimmung des Maßstabes als gewichtete Zusatzbeobachtungen eingeführt. Die Auswertung der Bildverbände im Freien Netz verhindert Einflüsse aus fehlerhaften Paßpunktkoordinaten.

Für jede Epoche wurde ein individuelles Kameramodell, und damit eine Orientierungsberechnung in Verbindung mit einer Selbstkalibrierung, durchgeführt. Für die analoge Kamera wurde hierbei die Verzeichnung funktional durch radial-symmetrische sowie tangential-asymmetrische Komponenten angesetzt. Da die digitale Kamera ein deutlich kleineres Bildfeld besitzt, konnte

bei diesen Aufnahmen im Regelfall nur der radiale Verzeichnungsanteil signifikant nachgewiesen werden.

Sämtliche Berechnungsdurchläufe erfolgten in Kombination mit einem integrierten Ausreißertest, der aufgrund

der hohen Redundanz schon geringste Fehler in der automatischen Bildpunktmessung aufzudecken vermochte. In den digitalen Aufnahmen wurden von etwa 500 Punkten jeweils maximal drei bis fünf Punkte als Ausreißer aufgedeckt. Verschmutzung der Zielmarken war hier der signifikante Grund. In den analogen Aufnahmen wurden dagegen bis zu 25 bis 30 Ausreißern statistisch aufgedeckt, bedingt durch Störungen durch die Réseaukreuze. Auf Nachmessungen der fehlerhaften Punkte wurde wegen der hohen Redundanz in der Regel verzichtet.

### 3.3 Genauigkeit der automatischen Zielmarkenmessung

Das Ergebnis photogrammetrischer Messung und Auswertung sind die dreidimensionalen Koordinaten der jeweils ca. 500 Punkte in den Rißbildungszonen. Da für die Untersuchung des Schubrißverhaltens nur die Punktbewegungen in der Stegeebene des Stahlbetonträgers von Interesse sind, erfolgte eine Transformation in ein zweidimensionales XY-System.

Aufgrund der Berechnung der Objektpunkte im Modell der Mehrbildorientierung kann die mit dem hier dargestellten Verfahren erzielbare Genauigkeit bewertet werden. Die a-posteriori-Standardabweichungen aus der Ausgleichung für Beobachtungen und unbekannte Parameter subsumieren sämtliche Faktoren, die den Meßprozeß beeinflussen. Zu diesen Faktoren zählt neben dem Kameramodell und der Aufnahmetechnik auch der oben beschriebene Meßalgorithmus. Zusätzlich ist ein Vergleich zwischen digitaler Kamera und Réseauka-

**Tab. 1: Standardabweichungen aus der Bildorientierung**

	$\sigma_{x,y}$ im Bild [mm]	$\sigma_{Lage}$ im Objekt [mm]	$\sigma_{Tiefe}$ im Objekt [mm]	Bildmaßstab
Digitalkamera	0,0004	0,016 – 0,019	0,045 – 0,050	1 : 85
Analogkamera	0,0009	0,021 – 0,026	0,044 – 0,049	1 : 40

mera möglich, da die Punktfelder mit beiden Kamerateypen aufgenommen wurden.

Tabelle 1 enthält die Genauigkeitsergebnisse aus den Orientierungsrechnungen. Die Meßgenauigkeit der Bildpunkte mit 4/1000 bzw. 9/1000 mm Standardabweichung entspricht jeweils etwa 4/100 Pixel. Zu berücksichtigen ist hierbei, daß die Resultate unter Versuchsbedingungen (wechselnde Lichtverhältnisse, Verschmutzungen an den Zielmarken usw.) zustande gekommen sind. Betrachtet man die Genauigkeit im Objektraum, so werden mit der digitalen Kamera tendenziell bessere Ergebnisse erzielt, obwohl die Auflösung dieser Aufnahmen nur halb so hoch ist. Die Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten betragen quer zur Aufnahme richtung (hier mit „Lage“ bezeichnet) im Durchschnitt etwa 0,018 mm bzw. 0,023 mm. Erwartungsgemäß sind die innenliegenden Punkte etwas genauer bestimmt als die Randpunkte. Offensichtlich können bei den analogen Aufnahmen nicht alle Einflußgrößen modelliert werden. Trotz Réseau werden die negativen Auswirkungen von Filmdeformationen scheinbar nicht umfassend erfaßt. Im konkreten Fall ist anzumerken, daß die äußeren Réseaukreuze z. T. gar nicht sicht- und meßbar waren, weil sie in den Meßbildern vor zu dunklem Hintergrund verschwanden. Auch die bessere Auflösung und der günstigere Maßstab reichen für einen Genauigkeitsvorsprung nicht aus. Die Tiefenmeßgenauigkeit, die in den hiesigen Versuchen unbedeutend ist, liegt bei beiden Kamerateypen bei etwa 0,047 mm. Die Analogkamera bietet aufgrund des größeren Bildfeldes eine bessere Aufnahmegeometrie; die Bildstrahlen schneiden sich im Durchschnitt unter einem günstigeren Winkel.

#### 4 Analyse des Schubrißverhaltens

Durch die geringe Zugfestigkeit des Betons kommt es bereits unter geringer Beanspruchung zur Rißbildung, so daß sich sehr früh ein hochgradig nichtlineares Tragverhalten mit mechanischen Diskontinuitäten einstellt. Daher ist Stahlbeton auf Makroebene analytischen Betrachtungsweisen auf Grundlage der Elastizitätstheorie im allgemeinen nicht zugänglich. Somit sind hier ingenieurtechnische Modellierungen einzusetzen, die dann an Bauteilversuchen zu überprüfen sind.

Im Zuge der Neuregelung der DIN 1045-1 [E-DIN] werden momentan diverse Querkraftbemessungsansätze kontrovers diskutiert [HEGGER u. a. 1999]. Der Nachweis erfolgt im Stahlbetonbau durch ein idealisiertes Fachwerkmodell. Nach Überschreiten der Zugfestigkeit im Steg kommt es zur Schubrißbildung und die freigesetzten Zugkräfte werden auf die Bügelbewehrung umgelagert. Es stellt sich das idealisierte Fachwerktragverhalten ein, bei dem der Zug- und Druckgurt eines Trägers durch die kombinierte Wirkung der zugbeanspruchten Bügelbewehrung und der sich zwischen den Rissen ausbildenden Betondruckstreben schubfest miteinander verbunden werden. Durch die Möhrsche Fachwerktragwirkung wird nur ein Teil der Querkrafttragfähigkeit erfaßt, bezüglich der darüber hinausgehenden Tragwirkung liegen verschiedene Theorien vor.

Neuere Forschungsergebnisse führen die über die Möhrsche Fachwerktragwirkung hinausgehende Querkrafttragfähigkeit nahezu ausschließlich auf die positive Wirkung der Rißuferverschattung zurück [z. B. REINECK 1990]. Nach Überschreiten der Betonzugfestigkeit im Steg kommt es zur irreversiblen Rißbil-

dung, so daß keine Zugspannungen mehr über die Rißufer übertragen werden können. Bei einer gegenseitigen Verschiebung der Rißufer stoßen die Zuschlagskörner jedoch aneinander und es werden sowohl Drucknormal- als auch Schubkräfte an den Kontaktflächen aktiviert (aggregate interlock). Die übertragbare Kraft wird um so größer, je kleiner die Rißbreite  $w$  und je größer die gegenseitige Verschiebung  $v$  der Rißufer ist.

Während das Fachwerkmodell mit Rißreibung Gegenstand vieler theoretischer Betrachtungen ist, fehlen Versuche, an denen das Rißöffnungsverhalten schwerpunktmäßig untersucht worden ist. In zahlreichen Veröffentlichungen werden Rißbreiten mitgeteilt, Rißuferverschiebungen werden aber nur in wenigen Fällen angegeben [HARDJASAPUTRA 1987, HEGGER/GÖRTZ u. a. 1999, u. a.].

Trotz unvollständiger experimenteller Absicherung war das Fachwerkmodell mit Rißreibung lange Zeit Grundlage der Querkraftbemessung nach DIN 1045-1 und auch in der aktuellen Endversion (05.00) geht die Berechnung der Mindestdruckstrebenneigung auf dieses Modell zurück. Zur experimentellen Überprüfung des Modells sind am Institut für Massivbau (IMB) Querkraftversuche durchgeführt worden, an denen insbesondere das Schubrißverhalten untersucht werden sollte [HEGGER/GÖRTZ/KOMMER 2000]. Die Rißöffnung wird hierbei durch die Relativverschiebungen der Meßmarken erfaßt.

##### 4.1 Ermittlung der Rißbreite und der Rißuferverschiebung

Aus den Verschiebungsvektoren der Meßmarken wird zunächst die gesamte Rißöffnung berechnet und diese anschließend in einen Anteil senkrecht (Rißbreite  $w$ ) und einen Anteil parallel zum Riß (Rißuferverschiebung  $v$ ) zerlegt. Dieses wurde innerhalb eines eigenen Programms wie folgt berechnet:

1. Das Schubfeld wird in Rechtecke unterteilt, wobei die Eckpunkte den Meßmarken entsprechen. Über die Verschiebungsvektoren

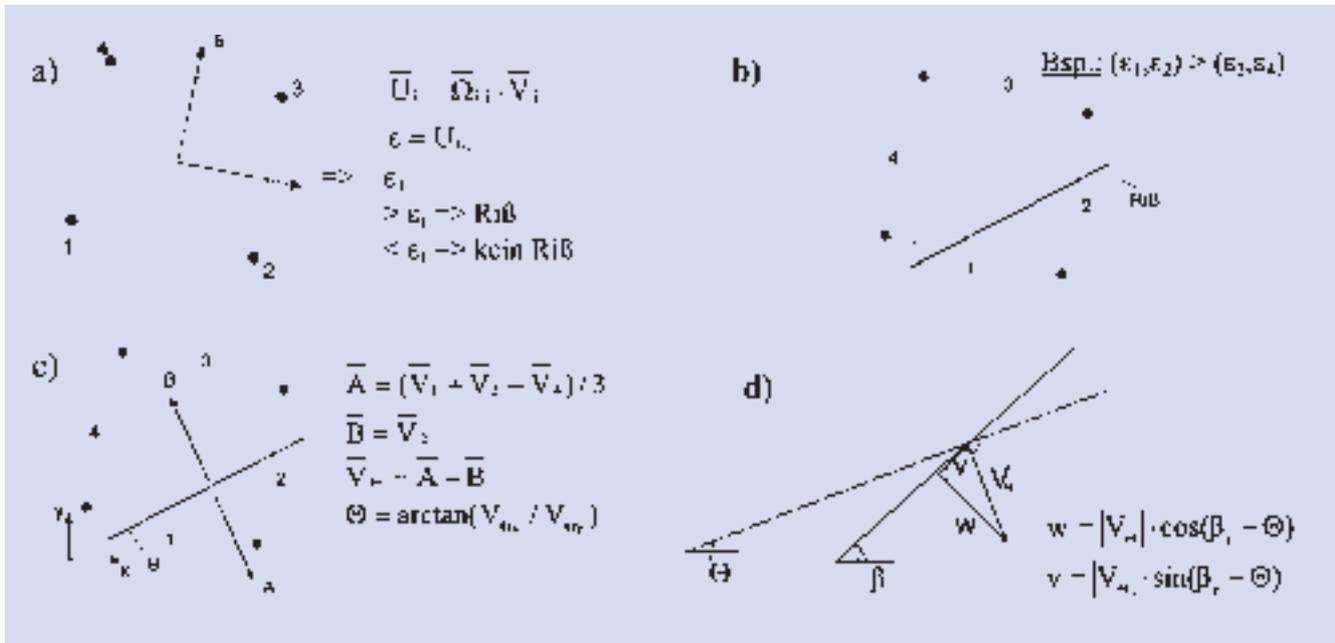


Abb. 9: Berechnung der Rißbreite und Rißuferverschiebung in einem quadratischen Element

- der Eckpunkte  $V_j$  werden mit Hilfe bilinearer Formfunktionen  $\Omega_{i,j}$  die Hauptzugdehnungen im Schwerpunkt der Elemente berechnet (Abb. 9a). Durch Vergleich mit einem vorgegebenen Vergleichswert werden hierüber die gerissenen Elemente von den ungerissenen separiert.
- Bei den gerissenen Elementen werden die Dehnungen entlang der Ränder berechnet. Hierüber wird ermittelt, durch welche Kanten der Riß verläuft (Kanten mit den beiden größten Dehnungen) (Abb. 9b). Die berechneten Rißkanten werden zur Überprüfung mit den tatsächlichen verglichen.
  - Durch den eingefügten Riß wird das Element in zwei Teile separiert.

riert. Unter Annahme, daß die rißöffnungsabhängigen Dehnungen überwiegen, läßt sich unter Vernachlässigung der spannungsbedingten Dehnungen ein Rißöffnungsvektor  $\bar{V}_\Theta$  sowie der zugehörige Rißöffnungswinkel  $\theta$  berechnen (Abb. 9c).

- Durch Vergleich des Rißöffnungswinkels  $\theta$  mit dem tatsächlichen Rißwinkel  $\beta_r$ , der in jedem Element separat gemessen wurde, läßt sich der Rißöffnungsvektor in die Rißbreite  $w$  und die Rißuferverschiebung  $v$  zerlegen (Abb. 9d).

#### 4.2 Fazit der Versuchsergebnisse

Das Meßverfahren der Photogrammetrie konnte durch Vergleich mit

elektronischen Vergleichsmessungen höherer Genauigkeit verifiziert werden. Die Auswertung zeigt, daß bei geringen Bügelbewehrungsgraden die Rißbreite die Rißuferverschiebung eindeutig überwiegt (Abb. 10 links). Im Bruchzustand können somit keine Reibungskräfte nachgewiesen werden, so daß das Fachwerkmodell mit Rißreibung nicht auf alle Querkraftversuche anwendbar ist. Momentan werden am IMB kinematische Beziehungen entwickelt, mit denen die experimentellen Rißöffnungspfade verifiziert und allgemein gültige Aussagen getroffen werden können.

Die Forschungsergebnisse fließen durch aktive Mitarbeit in der Arbeitsgruppe 3 in die Neuregelung der DIN 1045-1 ein.

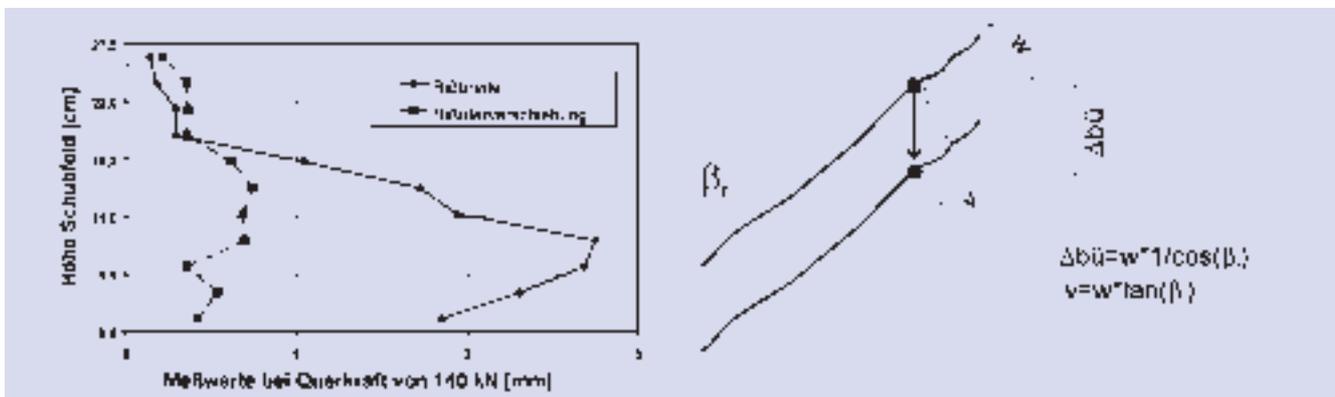


Abb. 10: links:  $w$  und  $v$  bei Versuchen mit geringen Bügelbewehrungsgraden  
 rechts: Näherung: Vertikale Rißöffnung (entnommen aus [HEGGER/GÖRTZ u. a. 1999])

## 5 Schluß

Vorstehend wird eine spezielle Anwendung der digitalen Photogrammetrie im Versuchswesen beschrieben. Durch die optische Erfassung mit digitalen oder analogen Aufnahmen kann das Ribbildungsverhalten von Stahlbetonträgern über die gesamte Ribbildungszone nunmehr flächenhaft beobachtet werden. Bislang war dies auf punktuelle Messungen an ausgesuchten Stellen beschränkt.

Als Voraussetzung für eine hohe Meßgenauigkeit wird der Bereich, in dem Risse auftreten können, mit kreisrunden Zielmarken in Form eines regelmäßigen Punktgitters signalisiert. Mit dem digitalen Nahbereichssystem PHIDIAS-MS können die signalisierten Punkte bildverarbeitungsgestützt gemessen und anschließend durch Mehrbildorientierung berechnet werden. Der hierbei benutzte Algorithmus beruht auf der dreidimensionalen Modellierung des Signalrandes durch eine Arcus-Tangens-Funktion, wobei die Approximation unmittelbar in den diskreten Grauwerten erfolgt. Die erzielte Standardabweichung der Objektpunktkoordinaten in der Ribbildungsebene beträgt ca. 0,020 mm, was einer relativen Genauigkeit von 1:50 000 entspricht.

Zu den entscheidenden Vorzügen der Photogrammetrie zählt die kurze Datenerfassungszeit vor Ort, welche während der hiesigen Versuche auf jeweils weniger als eine Minute reduziert werden konnte. Diese relativ kurze Erfassungsphase ist von entscheidender Bedeutung im Hinblick auf ein etwaiges Kriechen des unter Spannung stehenden Versuchsträgers. Während der Versuchsdurchführung unterliegt der Probekörper hohen Kräften, so daß deformationsrelevante Veränderungen über den Zeitraum einer konstanten Laststufe nicht ausgeschlossen werden können. Je kürzer die Meßzeit während einer Laststufe gehalten werden kann, um so vorteilhafter wirkt sich dies auf die erzielbaren Ergebnisse aus. Die statistisch belegten Ergebnisse der pho-

togrammetrischen Auswertung genügen dem Anforderungsprofil der Aufgabenstellung voll und ganz.

### Literatur

- E-DIN 1045-1 (Version 05.00): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion.
- BÄSSMANN, H.; KREYSS, J.: Bildverarbeitung Ad Oculos. Springer Verlag, Berlin, 1998.
- BENNING, W.; SCHWERMANN, R.: PHIDIAS-MS – Eine digitale Photogrammetrieapplikation unter MicroStation für Nahbereichsanwendungen. Allgemeine Vermessungsnachrichten AVN, Heft 1, 1997.
- EHLERS, M.: Untersuchung von digitalen Korrelationsverfahren zur Entzerrung von Fernerkundungsaufnahmen. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Heft 121, 1983.
- FÖRSTNER, W.: Prinzip und Leistungsfähigkeit der Korrelation und Zuordnung digitaler Bilder. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 11, 1985.
- HABERÄCKER, P.: Digitale Bildverarbeitung. Hanser Verlag, München, 1989.
- HARDJASAPUTRA, H.: Berücksichtigung des Dehnungszustandes bei der Querkraftbemessung von profilierten Stahlbeton- und Spannbetonträgern. Dissertation Universität Stuttgart, 1987.
- HEGGER, J.; GÖRTZ, S.; NEUSER, J. U.: Hochfester Beton für Spannbetonbalken mit sofortigem Verbund. DBV-Bericht Nr. 192, Aachen, November 1999.
- HEGGER, J.; KÖNIG, G.; ZILCH, K.; REINECK, K.-H.; GÖRTZ, S.; BEUTEL, R.; SCHENCK, G.; KLIVER, J.; DEHN, F.; STALLER, M.: Überprüfung und Vereinheitlichung der Bemessungsansätze für querkraftbeanspruchte Stahlbeton- und Spannbetonbauteile aus normalfestem und hochfestem Beton nach DIN 1045-1. Abschlußbericht für das DIBt-Forschungsvorhaben IV 1-5-876/98, Dezember 1999.
- HEGGER, J.; GÖRTZ, S.; KOMMER, B.: Anwendung von hochfestem Leichtbeton bei Spannbetonbalken. Forschungsvorhaben am Institut für Massivbau der RWTH Aachen, 2000.
- KOCH, K.-R.: Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Mo-

dellen. Ferd. Dummlers Verlag, Bonn, 2000.

KUPFER, H.; MANG, R.; KARAVESYR-ROGLOU, M.: Bruchzustand von Stahlbeton – und Spannbetonträgern – Eine Analyse unter Berücksichtigung der Ribverzahnung; Bauingenieur (1983) S. 143–159.

LUHMANN, T.: Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000.

REINECK, K.-H.: Ein mechanisches Modell für den Querkraftbereich von Stahlbetonbauteilen. Dissertation Universität Stuttgart, 1990.

Anschrift der Verfasser:

UNIV.-PROF. DR.-ING. WILHELM BENNING und Dr.-Ing. RAIMUND SCHWERMANN, Geodätisches Institut der RWTH Aachen, Templergraben 55, 52062 Aachen  
Dipl.-Ing. STEPHAN GÖRTZ, Institut für Massivbau der RWTH Aachen  
Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 52072 Aachen

### Zusammenfassung

**Im Zuge der Neuregelung der DIN 1045-1 werden momentan verschiedene Modelle zur Querkrafttragfähigkeit von Stahl- und Spannbetonbauteilen diskutiert. Das Institut für Massivbau (IMB) untersucht in Kooperation mit dem Geodätischen Institut (GIA) der RWTH Aachen schwerpunktmäßig die Auswirkungen auf das Schubrißverhalten. Im Mittelpunkt der nachstehenden Ausführungen steht die Erfassung der Ribbildung durch photogrammetrische Messungen, die die Versuche begleiten. Das Ribbildungsverhalten wird flächenhaft anhand von signalisierten Punktfeldern beobachtet, wobei das digitale photogrammetrische Auswertesystem PHIDIAS-MS zum Einsatz kommt. Die Bildpunktmessung in den digitalisierten Aufnahmen erfolgt bildverarbeitungsgestützt.**