

## **MODERNE INDUSTRIEPHOTOGRAMMETRIE IM BAUWESEN - MONITORING UND BEWERTUNG VON BAUWERKEN**

**S. Seyler, W. Schwarz**

*Bauhaus-Universität Weimar*  
*Marienstr. 9, D-99423 Weimar*  
E-mail: [steve.seyler@bauing.uni-weimar.de](mailto:steve.seyler@bauing.uni-weimar.de)

**Keywords:** IndustriephotoGRAMMETRIE, digitale Bildverarbeitung, optische Messtechnik, Verschiebung, Dehnung.

**Kurzfassung.** Monitoring und Bewertung sind Hauptaufgaben im Management bzw. der Revitalisierung von Bauwerken. Unterschiedliche Verfahren können bei der Akquisition der erforderlichen geometrischen Information, wie z. B. Größe oder Verformung eines Gebäudes, eingesetzt werden. Da das Potenzial der digitalen Fotografie kontinuierlich wächst, stellt die IndustriephotoGRAMMETRIE heute eine bedeutende Alternative zu den klassischen Verfahren wie Dehnmessstreifen oder anderen taktilen Sensoren dar.

Moderne IndustriephotoGRAMMETRIE erfasst die Bilder mittels digitaler Systeme. Dies bedeutet, dass die Information digitaler Bilder mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung untersucht werden muss, um die Bildkoordinaten der Messpunkte zu erhalten. Eine der Aufgaben der Bildverarbeitung für photoGRAMMETRIE Zwecke besteht somit darin, den Mittelpunkt von kreisförmigen Marken zu lokalisieren. Die modernen Operatoren liefern Subpixelgenauigkeit für die Koordinaten des Punktes.

Das optische Messverfahren der IndustriephotoGRAMMETRIE erfordert hinsichtlich der Hardware in erster Linie hochauflösende digitale Kameras. Dabei lassen sich die Kameras in Videokameras, HighSpeed-Kameras, intelligente Kameras sowie so genannte Consumer und Professionelle Kameras unterscheiden. Die geometrische Auflösung digitaler HighEnd-Kameras liegt heute bei über 10 Megapixel. In punkto Datentransfer zum Rechner sind verschiedene Standards am Markt verfügbar, z. B. USB2.0, GigE-Vision, CameraLink oder Firewire. Die Wahl des Standards hängt immer von der spezifischen Aufgabenstellung ab, da keine der Techniken eine führende Position einnimmt.

Die moderne PhotoGRAMMETRIE bietet viele neue Möglichkeiten für das Monitoring und die Bewertung von Bauwerken. Sie kann ein-, zwei-, drei- oder vierdimensionale Informationen liefern, falls erforderlich auch in Echtzeit. Als berührungsloses Messverfahren ist der Einsatz der PhotoGRAMMETRIE noch möglich, wenn die taktilen Sensoren z. B. aufgrund ihres Platzbedarfes nicht mehr eingesetzt werden können. Hochauflösende Videokameras erlauben es, selbst dynamische Untersuchungen mit großer Präzision durchzuführen.

# 1 EINLEITUNG

Für das Management bzw. die Revitalisierung von Bauwerken stellen Monitoring bzw. Bewertung eine Hauptaufgabe dar. Dabei steht eine Vielzahl an Messverfahren zur Verfügung, mit denen die erforderliche geometrische Information, wie z. B. Größe oder Verformung eines Gebäudes, erfasst werden kann.

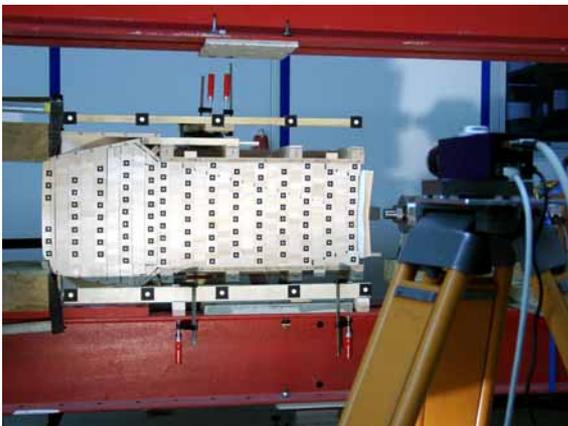
Die rasante Entwicklung der digitalen Fototechnik gab der Photogrammetrie einen enormen Schub. Immer leistungsstärkere und zudem billigere Digitalkameras sind auf den Markt verfügbar, so dass sowohl die Qualität als auch die Wirtschaftlichkeit der digitalen Photogrammetrie kontinuierlich steigen. Dadurch kann die moderne Industriephotogrammetrie<sup>1</sup> ihre gewichtige Position im technischen Versuchswesen, die sich durch die hohe Flexibilität und Effizienz des optischen Messverfahrens erklärt, weiter ausbauen.

Mit der Verfügbarkeit der hochauflösenden Kameratechnik geht ebenfalls eine verstärkte Forschung auf dem Gebiet der Auswertetechniken einher. Effiziente und robuste Verfahren der digitalen Bildverarbeitung<sup>2</sup> (DBV) sowie neue Auswerteverfahren in der Photogrammetrie haben sich dank der modernen Rechentechnik in den letzten Jahren weiterentwickelt und in der Praxis etabliert. Der Beitrag gibt einen Überblick über den Stand des Wissens und der Technik in der modernen Photogrammetrie und zeigt, inwieweit das optische Messverfahren bei der Lösung von Problemen im Bauwesen beitragen kann.

## 2 STAND DES WISSENS UND DER TECHNIK

### 2.1 Stand des Wissens in der Bildverarbeitung und der Industriephotogrammetrie

Moderne Industriephotogrammetrie setzt digitale Sensoren zur Bildakquisition ein. Dies bedeutet, dass die Information digitaler Bilder untersucht werden muss, um die Bildkoordinaten der Messpunkte aus dem Bild zu erhalten. Für die Auswertung der aufgezeichneten Bildinformation stehen mittlerweile eine Vielzahl an Verfahren und Prozeduren in der DBV zur Verfügung [7], [8], [10]. Es kann in diesem Beitrag nur ein kurzer Überblick in diese sehr umfangreiche Thematik gegeben werden.



**Abbildung 1:** Signalisierung durch diskrete Punkte

Bei der Messung eines Objekts bzw. dessen Verformungen werden zwei unterschiedliche Lösungsansätze verfolgt, deren Ansätze zur digitalen Bildauswertung vollständig voneinander abweichen. Einerseits lässt sich das Objekt anhand diskret verteilter Punkte modellieren (siehe Abb. 1). Anzahl, Dichte und Position der Punkte sind dabei der jeweiligen Messaufgabe sowie der Objektgeometrie anzupassen, damit diese Punkte das Objekt bzw. dessen Verformung ausreichend genau beschreiben. Andererseits besteht die Möglichkeit, die Oberflächenstruktur, die so genannte Textur

<sup>1</sup> Synonym kann auch der Begriff *Nahbereichsphotogrammetrie* verwendet werden – in Abgrenzung zur Luftbildphotogrammetrie. Die heutzutage übliche Bezeichnung lautet jedoch Industriephotogrammetrie.

<sup>2</sup> Oftmals findet sich in diesem Zusammenhang auch der aus dem englischen stammende Begriff des Computerschens (computer vision).

des Objektes für die Modellierung heranzuziehen (siehe Abb. 2). Dabei kommt sowohl die natürliche Struktur des Objektes als auch ein auf das Objekt aufgebrachtes Muster in Frage. Diese Vorgehensweise ist insbesondere in den Fällen interessant, in denen eine Signalisierung nicht oder nur schwer möglich ist.

Das Objekt wird dabei quasi flächenhaft erfasst. Die Aufgabe besteht darin, die geometrische Beziehung zwischen Bildern bzw. Bildausschnitten mittels Verfahren der *automatischen Bildzuordnung*, dem so genannten *image matching* zu bestimmen. Das image matching ist immer eine Betrachtung der Bildinformation mehrerer Bilder und somit als digitale Mehrbildauswertung zu bezeichnen. Bildzuordnungsverfahren basieren auf einer hierarchischen Strategie [10]. Die ersten Stufen bilden die Vorverarbeitung der Bilder sowie eine Merkmalsextraktion. Die Feinzuordnung wird mit Hilfe von Korrelations- bzw. Kleinste-Quadrate-Lösungen durchgeführt [9], [10]. Hierbei können geometrische Zusatzinformationen (z. B. Epipolargeometrie, Objektbedingungen) zur Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit mit in die Ausgleichung einfließen [10]. Praktikable Lösungen gehen in der Regel davon aus, dass eine konstante Beleuchtung und eine formstabile Oberfläche für den Zeitraum der Bildaufnahme vorliegen. Die Genauigkeit des image matching liegt bei ca. 0,1 Pixel. In diesem Beitrag wird keine Anwendung vorgestellt, der die Auswertetechnik zugrunde liegt.

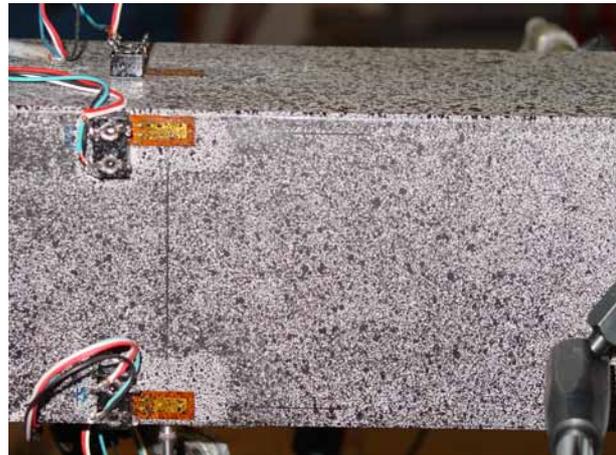


Abbildung 2: stochastisches Muster

Die im Beitrag vorgestellten Beispiele beruhen auf dem Ansatz der Messung diskreter Punkte. Es handelt sich hierbei immer um eine digitale Einzelbildauswertung, da die Bildinformation jedes einzelnen Bildes für sich getrennt betrachtet wird. Das eingesetzte Verfahren wird unter dem Begriff *strukturelle Messverfahren*<sup>3</sup> zusammengefasst.

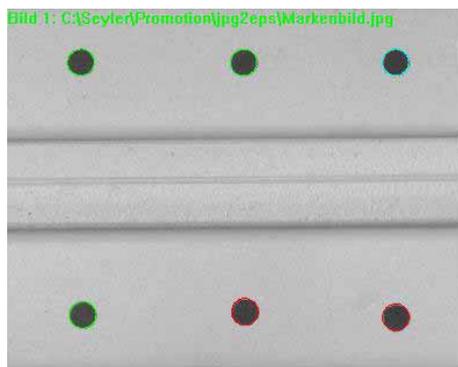


Abbildung 3: detektierte Marken

Strukturellen Messverfahren ermitteln die relevanten Kanten des ellipsenförmigen Messpunktes und modelliert die Geometrie des Punktes mit Hilfe einer mathematischen Formbeschreibung. Werden kreisförmige Marken eingesetzt, bietet sich insbesondere eine *Ellipsenapproximation* an (vgl. Abb. 3). Abb. 4 zeigt die Grauwertinformation des Bildausschnittes (Abb. 3) als 3D-Darstellung. Die Ermittlung des Ellipsenzentrums (Bildmessung) erfolgt in mehreren Schritten. Nach der Festlegung des Suchfensters wird aus der Grauwertinformation die Kante mittels *Operatoren der Kantenextraktion* subpixelgenau lokalisiert. Ist der Ellipsenrand erfasst, sind aus den Kantenpunkten die Para-

metern wird aus der Grauwertinformation die Kante mittels *Operatoren der Kantenextraktion* subpixelgenau lokalisiert. Ist der Ellipsenrand erfasst, sind aus den Kantenpunkten die Para-

<sup>3</sup> Es existieren weitere Verfahren zur digitalen Einzelbildauswertung (z. B. Korrelationsverfahren, Kleinste-Quadrate-Anpassung, Schwerpunktverfahren). Weitere Details können z. B. aus [8], [10] oder [11] entnommen werden.

meter der Ellipse mittels Ausgleichung zu bestimmen. Die Bildmessung kann bei Bildserien<sup>4</sup> vollautomatisch ablaufen, da das jeweils vorherige Bild den Suchbereich festlegt.

Geeignete Kantenoperatoren müssen neben der hohen Genauigkeit im Subpixelbereich ebenfalls eine starke Robustheit aufweisen und eine möglichst geringe Rechenzeit erfordern. In der Regel werden zur Dämpfung von Ausreißern in den Konturpunkten (Verdeckungen, Formfehler u. ä.) die Messungen gewichtet, so dass mit einer robusten Statistik (z. B. robuste Schätzung nach Huber) gearbeitet wird. Ergebnis sind die gesuchten Mittelpunktskordinaten sowie u. a. die Formparameter der Ellipse. Die Genauigkeit der Punktbestimmung liegt bei ca. 0,01 Pixel und besser. Die Präzision der Punktmessung hängt jedoch nicht zuletzt von einer über das Bild homogenen und über den Zeitraum der Bildaufzeichnung möglichst konstanten Beleuchtung ab. Ebenso beeinflusst die Markengröße die Genauigkeit der Bildauswertung. Die minimale Markengröße liegt bei rund 10 Pixel.

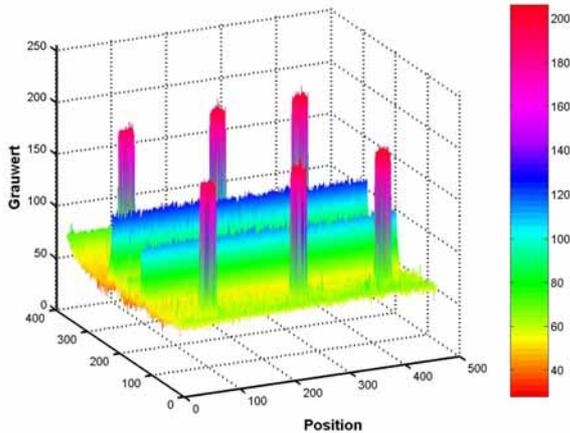


Abbildung 4: 3D-Grauwertdarstellung (inverses Bild)

Die strukturellen Messverfahren liefern als Ergebnis die Bildkoordinaten der Messpunkte. Um die gesuchte Objektinformation (Größe, Verformung o. ä.) zu erhalten, sind die Bildkoordinaten mittels Verfahren der Industriephotogrammetrie in Objektkoordinaten zu transformieren. Dazu können Methoden der *Ein-, Stereo- oder Mehrbildphotogrammetrie* eingesetzt werden. In Abhängigkeit vom eingesetzten Verfahren, ergeben sich somit ein-, zwei- oder dreidimensionale<sup>5</sup> Auswertungen. Beim Einsatz von entsprechend leistungsfähiger Rechnerhardware ist zudem eine Echtzeitlösung möglich.

Abb. 5 verdeutlicht ein Prinzip der *Einbildphotogrammetrie*. Besteht die Aufgabe darin, ein- oder zweidimensionale Verformungen zu bestimmen, und lässt es die Geometrie des zu beobachtenden Objekts zu<sup>6</sup>, kann die Messung mit einer einzelnen Kamera von einem Standpunkt ausreichend sein. Bei zueinander parallelen Bild- und Objektebenen ergeben sich die Objektkoordinaten aus den gemessenen Bildkoordinaten und dem Bildmaßstab. Der Bildmaßstab ist anhand von zusätzlichen Geometrieminformationen (z. B. eine bekannte Strecke) abzuleiten. Da Verformungen lediglich als relative Lageveränderungen gegenüber einem Ausgangsbild betrachtet werden, minimieren sich bei der Differenzbildung systematische Messabweichungen der Kameraorientierung.

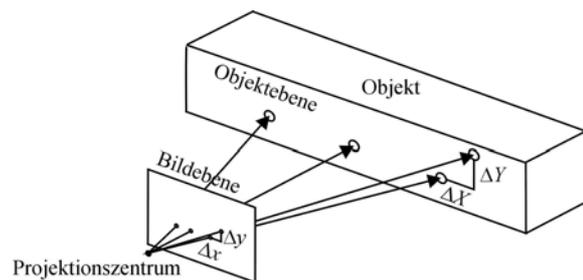


Abbildung 5: Prinzip der Einbildphotogrammetrie

<sup>4</sup> Unter *Bildserie* wird im Folgenden die Aufnahme einer Bildfolge (mit vorgegebener Frequenz) von einem festen Kamerastandpunkt aus verstanden. Insbesondere bei der Bestimmung von Verformungen ist dies die gängige Praxis der Bildaufzeichnung.

<sup>5</sup> Für die dreidimensionale Auswertung ist die Bildinformation von mindestens zwei Bildern erforderlich.

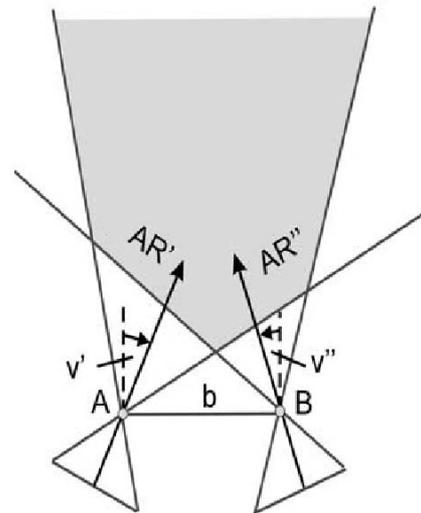
<sup>6</sup> Es muss sich um ein ebenes Objekt handeln, bzw. die Verformungen dürfen sich nur in einer Ebene vollziehen.

Damit ist mit geringem Aufwand ein hohes Genauigkeitspotenzial erreichbar. In den Abschnitten 3.1 sowie 3.3 werden Beispiele für die Anwendung dieses Prinzips vorgestellt.

Eine Verkantung von Bild- und Objektebene kann bildweise durch eine projektive Einzelbildentzerrung über zuvor bestimmte Passpunkte, die außerhalb des zu erwartenden Verformungsbereiches liegen, berücksichtigt werden. Die Koordinaten der Passpunkte können z. B. tachymetrisch bestimmt werden. Die projektive Entzerrung ist insbesondere bei absoluten Koordinatenbestimmungen von Interesse, da hier der Vorteil der Differenzbildung fehlt. Die Einzelbildentzerrung lässt sich z. B. mit Hilfe der Projektivtransformation durchführen (Gleichung 1). Die insgesamt 8 Parameter sind mit Hilfe von mindestens 4 Passpunkten zu bestimmen, von denen nicht drei auf einer Geraden liegen dürfen. Abschnitt 3.4 zeigt ein Beispiel für diese Form der Auswertung.

$$X = \frac{a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y}{c_1 \cdot x + c_2 \cdot y + 1} \quad \text{und} \quad Y = \frac{b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y}{c_1 \cdot x + c_2 \cdot y + 1} \quad (1)$$

Das Prinzip der *Stereophotogrammetrie* ist in Abb. 6 abgebildet. Zwei Kameras zeichnen simultan von zwei festen Standpunkten Bilder auf. Der überlappende Bereich des Sichtfeldes beider Kameras kann dreidimensional bestimmt werden. Die innere Orientierung beider Kameras<sup>7</sup> kann bei geeigneter Wahl der Ausstattung als invariant angesehen werden (vgl. hierzu die Ausführungen in Abschnitt 2.2), was die Auswertung erheblich vereinfacht. Die photogrammetrische Auswertung erfolgt dann in zwei Schritten. Die räumliche Orientierung der Kameras wird mit Hilfe eines Rückwärtsschnittes berechnet, wozu Passpunkte erforderlich sind. Anschließend lassen sich durch einen räumlichen Vorwärtsschnitt die Koordinaten der Neupunkte bestimmen. Die Parameter der inneren Orientierung beider Kameras werden vorab im Rahmen einer Kamerakalibrierung bestimmt. Da diese Thematik den Rahmen dieses Beitrages sprengen würde, sei an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen [10], [11].



**Abbildung 6:** Prinzip des Stereomodells (Konvergenzfall)

Der Fall der *Mehrbildphotogrammetrie* kann einerseits als Erweiterung des Stereofalles auf mehr als zwei Bilder betrachtet werden (allgemeiner räumlicher Vorwärtsschnitt). Andererseits existiert eine einstufige Variante der Auswertung, die so genannte Bündeltriangulation. Das Verfahren der Bündeltriangulation wird in der Regel bei einer Kamerakalibrierung angewandt. Für weiterführende Details sei auf die Literatur verwiesen [10], [11].

## 2.2 Stand der optischen Systemtechnik

Der Erfolg der Industriephotogrammetrie in der Messtechnik lässt sich nicht zuletzt an der Entwicklung in der digitalenameratechnik festmachen. Das optische Messverfahren der Industriephotogrammetrie erfordert in punkto Hardware in erster Linie eine hochauflösende Kamera. Hierbei sind insbesondere die hochauflösenden Videokameras (engl.: machine vision

<sup>7</sup> Die innere Orientierung einer Kamera sind die optischen Kenndaten des Systems Kamera-Objektiv. Darunter fallen neben der Kamerakonstanten und den Bildhauptpunktkoordinaten auch die Verzeichnungsparameter des Objektivs. Näheres zu der Thematik ist z. B. in [10] oder [11] zu finden.

camera, siehe Abb. 7) von Interesse, da diese als reine Messkamera über die erforderliche Stabilität verfügen und darüber hinaus höhere Messfrequenzen als herkömmliche Digitalkameras



**Abbildung 7:** hochauflösende Videokamera SVS11000 (11 Megapixel), Eigentum der Prof. Holz- und Mauerwerksbau

(Consumer oder Professionelle Spiegelreflexkameras) erlauben. Die maximale geometrische Auflösung am Markt verfügbaren Videokameras liegt bereits bei über 10 Megapixel. Die maximale Aufnahme­frequenz beträgt bei voller Auflösung rund 5 Hz. Bei Kameras mit geringerer Auflösung (Größenordnung 1-2 Megapixel) sind Bildfrequenzen von 10 bis 30 Hz jedoch als üblich anzusehen. Die Kameras haben meistens monochrome Sensoren, da nur in seltenen Fällen eine Farbinformation für die photogrammetrische Messung erforderlich ist.

HighSpeed-Kameras erlauben hingegen weitaus höhere Aufnahme­frequenzen (teilweise bis in den kHz-Bereich). Die geometrische Auflösung von HS-Kameras liegt bei ca. 1 Megapixel. Die Geschwindigkeit wird dadurch erreicht, dass die Bilder auf dem internen Speicher der Kamera abgelegt, und erst nach der Aufnahme zum Rechner übertragen werden. Die Speichergröße erreicht einige GByte, wodurch sich in der Regel nur ein recht kurzer Zeitraum der Aufzeichnung ergibt.

Die Videokameras sind direkt an einen Rechner angeschlossen, über den die komplette Steuerung der Aufnahme erfolgt. Für den Videoausgang an der Kamera sind unterschiedliche Standards am Markt vorhanden (z. B. Firewire, USB2.0, CameraLink, GigE-Vision). Vor allem die Standardübertragungsmöglichkeit Firewire (IEEE 1394a bzw. 1394b) sowie der Framegrabber-Standard CameraLink sind weit verbreitet. Firewire bietet dabei den Vorteil der Mobilität, da der Bus auch an einem Notebook verfügbar ist. Im Gegensatz dazu erlaubt die Framegrabberlösung CameraLink die wesentlich höhere Übertragungsrate. In Kombination mit dem PCI Express Standard kann die gesamte CameraLink Bandbreite von 680 MByte/s genutzt werden. Demgegenüber hat Firewire (IEEE 1394b) eine wesentlich geringere Übertragungsgeschwindigkeit in der Größenordnung von 65 MByte/s.

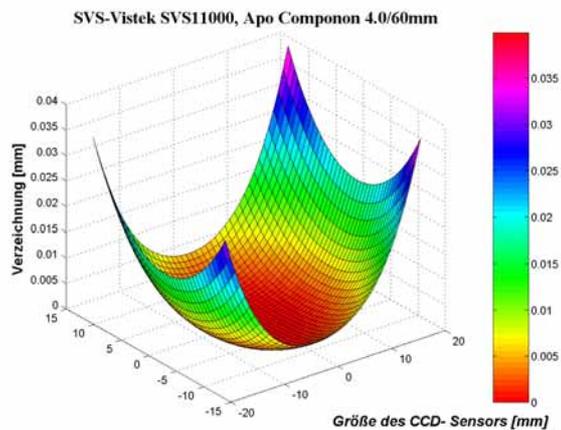
Die Bildaufnahme lässt sich sowohl softwaregesteuert als auch über einen externen Trigger auslösen. Sind mehrere Kameras zu einem System zu verbinden, so wird in der Regel durch externe Triggerung die bessere Synchronität erreicht. Die softwaregesteuerte Synchronisation liegt in der Größenordnung von 10 bis 15 ms und ist somit natürlich für viele Aufgaben ausreichend. Die externe Triggerung ermöglicht zusätzlich die Steuerung von Kameras, die mit unterschiedlichen Rechnern verbunden sind.

Neben qualitativ hochwertigen Kameras sind ebenfalls Präzisionsmessobjektive unerlässlich für eine optische Präzisionsmessung (siehe Abb. 8). Präzisionsobjektive zeichnen sich durch eine hohe Stabilität und Güte der Optik aus, was nicht zuletzt in der geringen Objektiv-



**Abbildung 8:** Auswahl an Präzisionsobjektiven

verzeichnung zu erkennen ist. Abb. 9 zeigt die Verzeichnung des optischen Systems bestehend aus der Videokamera SVS11000 und einem 60 mm-Objektiv. Die Präzisionsobjektive haben in der Regel Festbrennweiten, sind jedoch mit einer Fokussierung und einer variablen Blende ausgestattet. Zoomobjektive werden nur selten bei photogrammetrischen Anwendungen eingesetzt. Es sind sowohl Weitwinkel-, Normalbrennweite als auch Teleobjektive als Präzisionsobjektive verfügbar. Das Objektiv kann somit der praktischen Anwendung entsprechend gewählt werden, um das optimale Verhältnis von Objektabstand und Blickfeld zu erhalten. Der Standardanschluss bei Messkameras ist C-Mount, wobei durch die Größe der neuen Chipgeneration<sup>8</sup> in den hochauflösendsten Kameras dieser Anschluss durch größere wie M42- oder M-58-Gewinde ersetzt wird.



**Abbildung 9:** 3D-Darstellung der Verzeichnung des optischen Systems aus Abb. 7

Zum optischen System hinzu zu zählen sind im Prinzip ebenfalls die Messmarken.

Diese sind im Normalfall als passiv zu bezeichnen, d. h. es ist eine Beleuchtung erforderlich, um die Punkte aufnehmen zu können. Bei Anwendungen im Aussenbereich ist das Tageslicht oftmals ausreichend, bzw. es besteht kaum die Möglichkeit einer weitergehenden Belichtungseinrichtung (vgl. Abschnitt 3.1). Für Laborversuche hingegen steht eine Vielzahl an Beleuchtungen zur Verfügung (LED-Beleuchtung, Kaltlichtquellen, Hochfrequenzleuchten etc.).

Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass die Marken selbst eine aktive Lichtquelle sind. So können z. B. lichtstarke LED selbst als Messpunkt dienen, wie Abschnitt 3.3 zeigen wird. Retroreflektierende Marken zählen ebenfalls zu den aktiven Messmarken. Durch die stärkeren Reflexionseigenschaften heben auch sie sich in der Regel besser vom Hintergrund ab als passive Marken. Ob aktive Messmarken, im Gegensatz zu den passiven, eine geringere Varianz von Kontrast und Helligkeit über eine Bildserie hinweg aufweisen und somit präzisere Ergebnisse erwartet werden können, ist Gegenstand von Untersuchungen.

### 3 BEISPIELE AUS DEM BAUWESEN

In unterschiedlichen Aufgaben im Bau- und Versuchswesen konnten bereits einige Erfahrungen im Bereich der Industriephotogrammetrie gesammelt werden. Zur Auswertung der Bildinformation wurden dabei jeweils die Ansätze der strukturellen Messverfahren verfolgt. In der Regel sind kreisförmige Zielmarken (aktive und passive) zum Einsatz gekommen. Die durchgeführten Projekte umfassen sowohl zwei- als auch dreidimensionale Verformungsbestimmungen sowie die Ermittlung der Bewegung eines schwingenden Systems.

#### 3.1 3D-Verformungsmessung in der Beanspruchungsanalyse von Holzbauteilen

Erfahrungen bei der dreidimensionalen photogrammetrischen Erfassung von Verformungen konnten im Rahmen des AiF-Projektes „Beanspruchungsanalyse von Bauteilen aus Voll-

<sup>8</sup> Der 11 Megapixel-Chip in der SVS11000 hat Kleinbildformat (36 mm × 24 mm).

und Brettschichtholz durch Industriephotogrammetrie am Beispiel von Ausklinkungen und Durchbrüchen“ gesammelt werden, einer Kooperation der Professur Geodäsie und Photogrammetrie mit der Professur für Holz- und Mauerwerksbau [3], [4]. Dabei wurden mittels zwei feststehender Kameras (hochauflösende digitale Spiegelreflexkameras, 6 Megapixel) simultan Bilder des Versuchsobjektes aufgenommen. Die Aufnahmefrequenz betrug, bedingt durch diesen Kameratypus, nur rund 0,2 Hz. Das neue bereits angelaufene Folgeprojekt verbessert die bisherige Messkonzeption durch den Einsatz von hochauflösenden Videokameras (vgl. [5]). Dadurch wird ohne weiteres eine Bildfrequenz von 1 Hz erreicht, d. h. die zeitliche Auflösung wird wesentlich verbessert. Darüber hinaus besitzen die nun eingesetzten Monochrom-Kameras eine vollständig nutzbare geometrische Auflösung von 11 Megapixel<sup>9</sup>. Dies ist eine Steigerung der Auflösung um den Faktor 4-5. Weiterhin ermöglichen die Videokameras einen höheren Automationsgrad der Auswertung, so dass die Ergebnisse schneller zur Verfügung stehen. Die Signalisierung der Holzprobe wie auch des Referenzrahmens erfolgt über ca. 2 mm große, kreisrunde Punkte, die aufgerubbelt werden. Die Punkte befinden sich in einem Raster von 1 cm auf dem Holz.

Abb. 10 zeigt den Versuchsaufbau, dem das Prinzip des konvergenten Stereomodells zugrunde liegt. Unter Zuhilfenahme eines im Bild positionierten Referenzrahmens, der von der Krafteinwirkung unbeeinflusst bleibt, lassen sich die dreidimensionalen Koordinaten der Punkte, und somit die Verformungen, mittels räumlicher Triangulation berechnen. Die Parameter der inneren Orientierung beider Kameras werden dabei als konstant angenommen. Sie werden, wie die Koordinaten der Punkte des Referenzrahmens, vorab im Rahmen einer Bündeltriangulation bestimmt. Der gesamte Auswerteprozess vollzieht sich offline nach dem Versuch.



**Abbildung 10:** Versuchsaufbau (Stereomodell) mit Holzprobe und Referenzrahmen

Anhand erster Versuchsreihen (vgl. [5]) können bereits Schlüsse hinsichtlich des Potenzials gezogen werden. Bei einer Größe des Versuchsobjektes von circa 50 cm × 30 cm folgende Genauigkeiten für die Koordinaten bzw. die Dehnungen erreicht:

absolute Koordinatengenauigkeit<sup>10</sup>:  $\sigma_x = \sigma_y = \pm 0,5 \mu\text{m}$  und  $\sigma_z = \pm 0,9 \mu\text{m}$

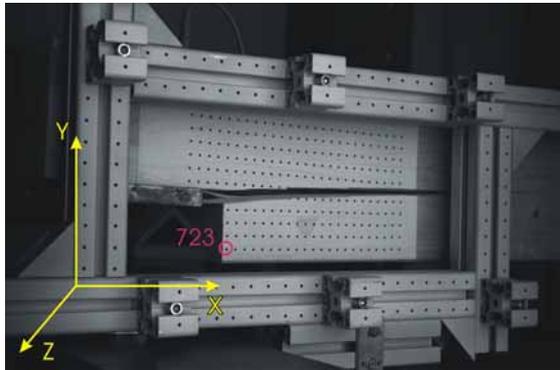
Genauigkeit der Dehnungen:  $\sigma_x = \sigma_y = \pm 0,05 \%$

Abb. 11(a) zeigt ein Messbild der linken Kamera am Ende eines Versuches, d. h. nach dem Versagen des Holzträgers. Im Bild zu erkennen ist ebenfalls der von der Krafteinwirkung unbeeinflusste Referenzrahmen, der die für die Verformungsbestimmung relevanten Holzpunkte umschließt. In Abb. 11(b) ist das dreidimensionale Verformungsverhalten eines Punktes der Holzprobe dargestellt. Es sind die Abweichungen der drei Koordinaten zum Mittelwert abgebildet. Das Bild verdeutlicht, wie detailliert für jeden einzelnen Holzpunkt die dreidimensionale Verformung über den Zeitraum eines Versuches hinweg beobachtet werden kann.

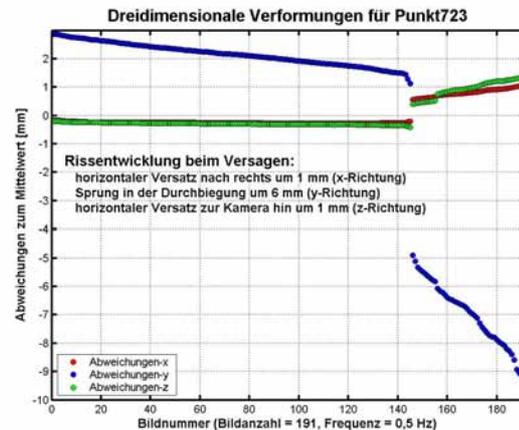
<sup>9</sup> Die Spiegelreflexkameras haben einen Farbchip, der die Farbinformation durch Interpolationsverfahren berechnet. Dies hat zur Folge, dass die nominelle Auflösung von 6 Megapixel nicht vollständig zur Verfügung steht, im Gegensatz zur Bildinformation einer Monochrom-Kamera.

<sup>10</sup> Die xy-Ebene wird durch die Holzebene definiert. Die z-Achse zeigt in Richtung der Kameras.

So kommt es z. B. für den Punkt 723 beim Versagen der Probe erstens zu einem horizontalen Versatz (im Bild nach rechts) von 1 mm. Zweitens weitet sich der Riss um rund 6 mm auf (Durchbiegung in y-Richtung). Drittens verspringt der untere Teil des Holzträgers um 1 mm zur Kamera hin. Kein taktiles Messsystem könnte eine derart dichte und zuverlässige 3D-Information liefern.



(a) Messbild der Holzprobe



(b) dreidimensionale Verformungen

**Abbildung 11: Ergebnisse der photogrammetrischen 3D-Auswertungen**

### 3.2 Belastungsversuch an der Frankebrücke (Erfurt)

Eine an der Professur durchgeführte Studie hatte zum Ziel, die Eignung der Photogrammetrie bei der Verformungsmessung im Rahmen einer Tragsicherheitsbewertung zu prüfen sowie die zu erwartende Genauigkeit zu ermitteln [1], [2]. Die Studie beschränkte sich auf die Bestimmung von zweidimensionalen Verformungen mittels Einbildphotogrammetrie. Es wurde somit für die Auswertung angenommen, dass sich die Verformungen in einer Ebene vollziehen. Diese Aufnahmekonfiguration stellte nur eine Vorstufe dar.

Ziel einer Weiterentwicklung dieser Studie ist eine dreidimensionale Messung der auftretenden Verformungen. Bei den Untersuchungen war jedoch eine 2D-Konstellation ausreichend, um das grundsätzliche Potenzial photogrammetrischer Auswertungen zu testen. Andererseits ergab sich dadurch einen wesentlich geringeren technischen Aufwand, womit z. B. die Problematik der Synchronisation der Aufnahmen mehrerer Kameras entfiel. Abb. 12 zeigt die Brücke mit dem installierten Messequipment. Neben der photogrammetrischen Messung wurde die Durchbiegung parallel mit induktiven Wegaufnehmern (IWT) gemessen. Diese wurden an der im Bild sichtbaren Messbasis befestigt. Neben den an der Brücke befindlichen Messpunkten wurden zusätzlich mehrere von der Krafteinwirkung unbeeinflusste Referenzpunkte im Sichtfeld der Kamera aufgestellt.



**Abbildung 12: Frankebrücke, Messequipment**

In Abb. 13 sind die Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertung den Messungen des IWT gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt eine Standardabweichung der photogrammetrischen Ergebnisse in der Größenordnung von 0,1 bis 0,2 mm. Dies entspricht einer relativen

Genauigkeit von rund 1 : 200.000 (die Brückenlänge und somit das Sichtfenster betrug rund 30 m). Eine derart hohe Genauigkeit ist nicht zuletzt auf den relativen Charakter der Messungen bei unveränderter Kameraposition zurückzuführen, bei dem systematische Einflüsse nur geringe Auswirkungen auf das Ergebnis besitzen. Abhängig von der Größe des Objekts erreicht die Photogrammetrie damit zwar nicht das Genauigkeitspotenzial von induktiven Wegaufnehmern, jedoch ist sie für die meisten Anwendungen ausreichend. Insbesondere hat die Photogrammetrie als messbasisunabhängiges Verfahren einen eindeutigen Vorteil beim konstruktiven Aufwand. Für den Aufbau der Messbasis, die für die induktiven Wegaufnehmer erforderlich ist, wurden bei der durchgeführten Belastung insgesamt zwei Tage benötigt [1].

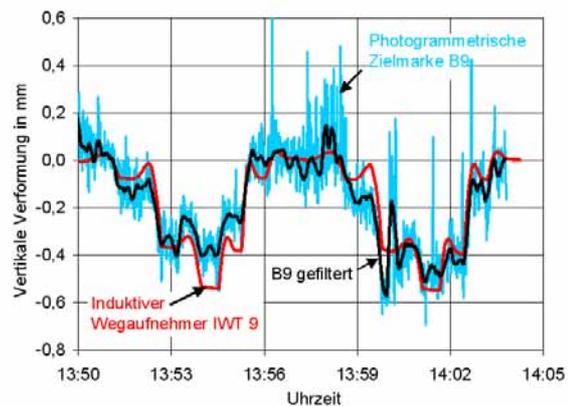


Abbildung 13: Durchbiegung in Punkt B9

Das Ziel weiterer Untersuchungen ist es, die auftretenden dreidimensionalen Verformungen in Echtzeit photogrammetrisch zu bestimmen. Als Messkonfiguration kommt dabei sowohl die in Abschnitt 3.1 eingesetzte Stereophotogrammetrie (Messung von einer Brückenseite aus) als auch die Mehrbildphotogrammetrie (Beobachtung der Brücke von beiden Seiten) in Frage. Durch den Einsatz der Mehrbildphotogrammetrie könnte die Brücke vollständig dreidimensional überwacht werden. Jedoch erhöht sich der Aufwand für die Realisierung einer Echtzeitauswertung deutlich.

### 3.3 Verformungsmessung an einem gemauerten Abwasserkanal

Vor dem Hintergrund eines anstehenden Straßenausbaus wurde die Professur Verkehrsbau der Bauhaus-Universität Weimar seitens des ansässigen Abwasserbetriebes mit der Begutachtung des im Straßenzug befindlichen Abwasserkanals beauftragt. Neben der Aufnahme des gegenwärtigen baulichen Zustandes war die Tragfähigkeit infolge Straßenverkehr zu beurteilen. Als eine Beurteilungshilfe wurden seitens der Professur Geodäsie und Photogrammetrie Verformungsmessungen unter Fahrzeugüberfahrten in zwei Kanalquerschnitten durchgeführt.



Abbildung 14: Messaufbauten im Kanal

Die geforderten Messungen umfassten die horizontalen Bewegungen der Kämpferpunkte sowie die zweidimensionale Verformung des Gewölbes an Kämpfer-, Scheitel- und Viertelpunkten. Die Kämpferbewegung wurde als Längenänderung mittels induktivem Wegaufnehmer erfasst (Prinzip des Extensometers). Die zweidimensionale Verformung des Gewölbes ließ sich photogrammetrisch bestimmen. Abb. 14 zeigt die Messaufbauten im Kanal. Aufgrund der Dunkelheit im Kanal wurden

Lumineszenzdioden (LED) als aktive Messmarken eingesetzt. Die photogrammetrischen Auswertungen beruhen wie im vorherigen Abschnitt auf den Prinzipien der Einbildphoto-

grammetrie. Die auf dem Stativ befindliche Referenzbasis (vgl. Abb. 14) dient dabei sowohl als fester Bezug für die Verformungsmessung als auch der Maßstabsübertragung.

Das linke Bild in Abbildung 15 zeigt die Messungen des Wegaufnehmers während eines gesamten Belastungszyklus. Es sind hier eindeutig die einzelnen Überfahrten des eingesetzten Belastungsfahrzeuges zu erkennen. Weiterhin werden vereinzelte schwere Fahrzeuge sichtbar, die während der Messung über die Messstelle fahren (schmalen Peaks). Die maximalen Längenänderungen lagen bei ca. 0,15 mm. Das rechte Bild zeigt die zweidimensionalen Verformungen des Gewölbes bei einer Überfahrt. Es sind maximale vertikale Bewegungen von ca. 0,5 mm zu erkennen (Scheitelpunkt). Die gemessene horizontale Bewegung der Kämpferpunkte stimmt mit dem Ergebnis der IWT-Messungen überein. Die Standardabweichung der photogrammetrischen Verformungsbestimmung ist besser als  $\pm 0,05$  mm für beide Koordinatenrichtungen. Dies entspricht einer relativen Genauigkeit von ca. 1 : 100.000. Der Einsatz von mehr als zwei Referenzpunkten hätte u. U. zu einem besseren Ergebnis führen können.

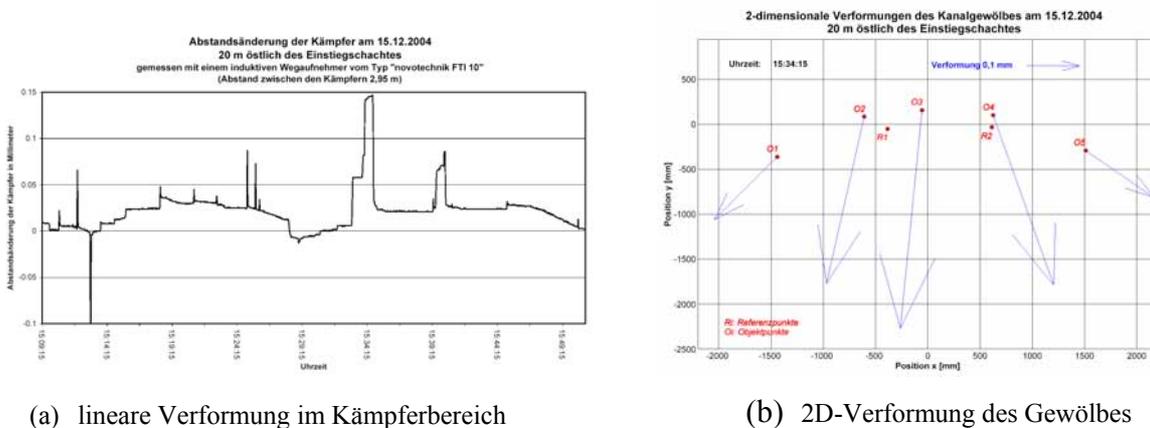


Abbildung 15: Ergebnisse der durchgeführten Verformungsmessungen

### 3.4 Untersuchung der Stabilität eines dynamischen Systems

Wie bereits in Abschnitt 2.2 erwähnt wird durch den Einsatz hochauflösender Videokameras die Erfassung und Modellierung von Bewegungen möglich. Im Rahmen der Untersuchungen zur Stabilität dynamischer Systeme bestand die Aufgabe darin, die schwingende Bewegung einer nicht-linearen Struktur zu erfassen, um die so gewonnenen Messwerte mit dem mathematischen Modell der Bewegung vergleichen zu können [6]. Die Genauigkeitsanforderungen waren dabei gering (mm-Bereich, relative Genauigkeit von ca. 1 : 1.000), so dass sich auf eine zweidimensionale Erfassung nach dem Prinzip der Einbildphotogrammetrie beschränkt werden konnte. In Abb. 16 ist der Aufbau des Versuches zu sehen.



Abbildung 16: Messaufbau mit Videokamera

Der zur Auswertung erforderliche Maßstab des Bildes wurde über vier Referenzpunkte festgelegt, die in der Objektebene angebracht waren. Die Koordinaten der Punkte wurden im Vorfeld tachymetrisch bestimmt. Zur eindeutigen Beschreibung der zu bestimmenden Bewegung wurde die Aufnahme Frequenz mit 10 Hz festgelegt. Das Objekt (ein 30 cm langes Stahllineal) wurde an beiden Enden mit einem Mess-

punkt signalisiert. Neben diesen beiden Punkten konnte aus den Bildern zusätzlich das Stahl-lineal selbst als Kantenfolge detektiert werden, wodurch sich das Objekt als Ganzes erfassen ließ. Die Berechnung der Koordinaten erfolgte mit Hilfe einer projektiven Entzerrung (vgl. Abschnitt 2.1).

Abb. 17 stellt die Modellierung der Bewegung zu einem festen Zeitpunkt dar. Es sind die vier Referenzpunkte sowie Anfangs- und Endpunkt des Stahllineals zu erkennen. Weiterhin ist das Lineal selbst als rote Linie dargestellt. Die erreichte Genauigkeit der Punktkoordinaten lag bei ca.  $\pm 1\text{-}2\text{ mm}$ . Die gewünschte Überprüfung des mathematischen Modells ließ sich somit auf der Grundlage der ermittelten Koordinaten durchführen.

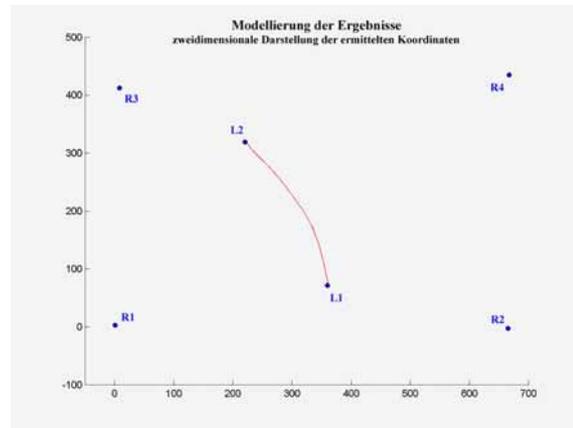


Abbildung 17: Modellierung des Stahllineals

Durch den Einsatz von Kameras mit höherer Auflösung ließe sich die erreichte Messgenauigkeit noch steigern. Ebenso würde eine Berücksichtigung der Objektivverzeichnung die Ergebnisse verbessern. Eine dreidimensionale Erfassung der Bewegung wäre durch zwei simultan arbeitende Kameras ebenfalls möglich. Dabei würde wiederum das Prinzip der Stereophotogrammetrie eingesetzt werden.

#### 4 SCHLUSS UND AUSBLICK

Die im Beitrag vorgestellten Beispiele zeugen vom Potenzial der modernen Industriephotogrammetrie. Die dreidimensionale Erfassung von Objekten und deren Verformung in Echtzeit ist heute erreichbar. Die Verdichtung der Messstellen ist praktisch aufwandsneutral. Daraus können quasi kontinuierliche flächenhafte Aussagen abgeleitet werden. Die bekannten Verfahren der Industriephotogrammetrie sind in vielen Fällen nur präziser auf die jeweiligen Problemstellungen zu adaptieren und ggf. dahingehend weiter zu optimieren.

Das berührungslose optische Messverfahren wird sich im Bauwesen etablieren können, insbesondere wenn sich die Zusammenarbeit zwischen Geodäten und Bauingenieuren weiter intensiviert. Letztlich sollen Anwendungen nicht am fehlenden Wissen über die heute bereits möglichen Techniken scheitern.

#### LITERATUR

- [1] J. Albert et. al., Pilot studies on photogrammetric bridge deformation measurement. *2nd Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, Berlin, 2002, S. 133-140.
- [2] J. Albert, S. Seyler, Verformungsmessungen an Brückenbauwerken aus Bildsequenzen. *Ingenieurvermessung 2004*, 14th International Conference on Engineering Surveying, Zürich, 15.-19. März 2004.
- [3] S. Franke et. al., Beanspruchungsanalyse von Bauteilen aus Voll- und Brettschichtholz durch Industriephotogrammetrie. *Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen*. Beiträ-

- ge zum 61. DVW-Fortbildungsseminar im September 2004 an der Bauhaus-Universität Weimar. Schriftenreihe des DVW, Band 46, Wißner Verlag, Augsburg, S. 237-252.
- [4] S. Franke et. al., Beanspruchungsanalyse von Bauteilen aus Voll- und Brettschichtholz durch Industriephotogrammetrie am Beispiel von Ausklinkungen und Durchbrüchen. *Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 13399 BR*, Bauhaus-Universität Weimar, Oktober 2004.
  - [5] S. Franke et. al., Beanspruchungsanalyse von Bauteilen aus Voll- und Brettschichtholz durch Industriephotogrammetrie am Beispiel von Ausklinkungen und Durchbrüchen. *Zwischenbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 14494 BR*, Bauhaus-Universität Weimar, Februar 2006.
  - [6] P. Frantik, V. Zabel, Dynamical systems stability. *Paper for the studies in interest groups under 11th European Summer Academy*, Bauhaus-Universität Weimar, August 2003.
  - [7] MVTec Software GmbH, *HALCON 6.0 – Referenzhandbuch*. C++-Syntax, München, (1997-2000).
  - [8] R. Klette, P. Zamperoni, *Handbuch der Operatoren für die Bildbearbeitung*. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 1995.
  - [9] F. Lang, W. Förstner, Matching Techniques. *Second Course in Digital Photogrammetry*, Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, Bonn, 1995.
  - [10] Th. Luhmann, *Nahbereichsphotogrammetrie, Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. 2. überarbeitete Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2003.
  - [11] E. M. Mikhail et. al., *Introduction to Modern Photogrammetry*, John Wiley & Sons, New York, 2001.
  - [12] W. Schwarz (Red.), *Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen*. Beiträge zum 61. DVW-Fortbildungsseminar am 27. und 28. September 2004 an der Bauhaus-Universität Weimar. Schriftenreihe des DVW, Band 46, Wißner Verlag, Augsburg.
  - [13] W. Schwarz (Red.), *Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen*. Beiträge zum 56. DVW-Fortbildungsseminar im September 2002 an der Bauhaus-Universität Weimar. Schriftenreihe des DVW, Band 43, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.