

Dynamische Rissdetektion mittels photogrammetrischer Verfahren – Entwicklung und Anwendung optimierter Algorithmen *

Uwe Hampel¹, Hans-Gerd Maas²

Zusammenfassung. Die digitale Nahbereichsphotogrammetrie ermöglicht eine effiziente Erfassung dreidimensionaler Objektoberflächen bei experimentellen Untersuchungen. Besonders für die flächenhafte Erfassung von Verformungen und die Rissdetektion sind photogrammetrische Verfahren – unter Beachtung entsprechender Randbedingungen – prinzipiell geeignet. Der Beitrag geht unter Einbeziehung aktueller Untersuchungen an textiltbewehrten Betonproben auf die Problematik der Rissdetektion ein und gibt einen Überblick über den Entwicklungsstand und das erreichbare Genauigkeitspotential. In Bezug auf die praktische Anwendung der vorgestellten Verfahren wird abschließend auf verschiedene Möglichkeiten der Optimierung eingegangen.

Summary: Digital closed range photogrammetry is an efficiently method to obtain three-dimensional surface information during experiments. The paper gives an overview on recent research and development activities in civil engineering material testing of textile reinforced structures for automatic measurement of displacement fields, deformations and defects such as cracks with a high precision. The main topic of this paper is the crack detection. Also, some aspects of the practical work and the optimization of photogrammetry methods and systems are presented in this paper.

* Dies ist keine begutachtete Veröffentlichung./This is not a peer-reviewed paper.

Online verfügbar/Online available: [urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244047882026-24052](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244047882026-24052)

¹ Dr.-Ing., Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden

² Prof. Dr. habil., Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden

1 Einleitung

Die digitale Photogrammetrie hat sich im Verlauf der letzten Jahre für eine Vielzahl von Messaufgaben als ein effizientes Messverfahren bestätigt (HAMPEL, MAAS [1], LUHMANN ET AL. [5], BENNING ET AL. [6]). Für definierte Anwendungen werden Systeme angeboten, die Bilddatensätze vollautomatisch auswerten und Resultate in Echtzeit bzw. Quasi-Echtzeit zur Verfügung stellen. Einschränkend ist festzustellen, dass es unmöglich ist, alle prinzipiell und sinnvoll photogrammetrisch lösbaren Messaufgaben mit einem System abzudecken. Dies führte dazu, dass kommerzielle Systeme nur für häufig auftretende und klar definierte Aufgabenstellungen angeboten werden. Daneben wurde von Firmen und Hochschulen eine große Zahl von Systemen für Spezialanwendungen entwickelt. Ein Beispiel dafür sind die in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen an textilbewehrten Betonproben.

2 Digitale Nahbereichsphotogrammetrie

2.1 Besonderheiten bei baumechanischen Untersuchungen

Voraussetzung für den erfolgreichen und effizienten Einsatz photogrammetrischer Verfahren für diskrete bzw. flächenhafte Verformungs-, Riss- und Schädigungsmessungen bei baumechanischen Untersuchungen textilbewehrter Probekörper bzw. Baukonstruktionen ist die Kenntnis relevanter material- und verfahrensbezogener Einflussgrößen. Aufgrund der z. T. sehr hohen Anforderungen bei baumechanischen Untersuchungen hinsichtlich Messauflösung bzw. Messgenauigkeit bei möglichst großen Messbereichen bzw. -volumina wurden systematische Untersuchungen entsprechender Stör- und Einflussgrößen im Rahmen zahlreicher photogrammetrischer Messungen vorgenommen. Dafür wurde eine Konzeption entwickelt, die den gesamten Messprozess in eine Vorbereitungs-, Ausführungs- und Nachbereitungsphase aufteilt. Bei entsprechend hohen Anforderungen bzw. kritischen Messaufgaben führt oftmals erst eine Adaption bzw. Entwicklung/ Weiterentwicklung entsprechender Verfahren im photogrammetrischen Messprozess bzw. in den sich anschließenden Auswerteprozeduren zu einem Messergebnis. Insbesondere für die kontinuierliche, flächenhafte Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei textilverstärkten Beton- und Holzproben ergeben sich sehr unterschiedliche Anforderungen an die einzusetzenden photogrammetrischen Verfahren. (HAMPEL, MAAS [1], HAMPEL [3])

2.2 Photogrammetrisches Messsystem

Für die Realisierung photogrammetrischer Messungen bei baumechanischen Untersuchungen textilverstärkter Probekörper und Baukonstruktionen wurde ein modular aufgebautes Messsystem entwickelt (Bild 1). Das Steuermodul stellt das Kernstück für die zeitliche Synchronisierung der nachfolgend beschriebenen Module des photogrammetrischen Messsystems dar. Das Bilderfassungsmodul beinhaltet neben den digitalen Kameras die Software zur synchronen Erfassung verschiedener Bildquellen und der Serialisierung. Die Eigenschaften der zur Verfügung stehenden digitalen Kameras (Kodak Megaplug 4.2i/10, FastCam Ultima ..) sind z. T. sehr unterschiedlich und ermöglichen dadurch einen flexiblen Einsatz bei baumechanischen Untersuchungen von hochauflösenden Verformungsmessungen bis hin zur Erfassung von Bruchvorgängen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera. Die Auswertemodule (Bild 1) beinhalten neben den für allgemeine und spezielle Messaufgaben entwickelten bzw. weiterentwickelten Softwaremodulen auch kommerzielle Programme. Aufgrund des hohen Datenaufkommens und im Zusammenhang komplexer Auswertungen (z.B. der flächenhaften Messung von Verformungen und Rissen) wurde die Implementierung optimierter Algorithmen erforderlich, da Standardimplementierungen bzw. kommerzielle Softwarekomponenten oftmals die praktische Umsetzung in Frage stellt. Diese bilden die Grundlage zur Durchführung von Massenexperimenten.

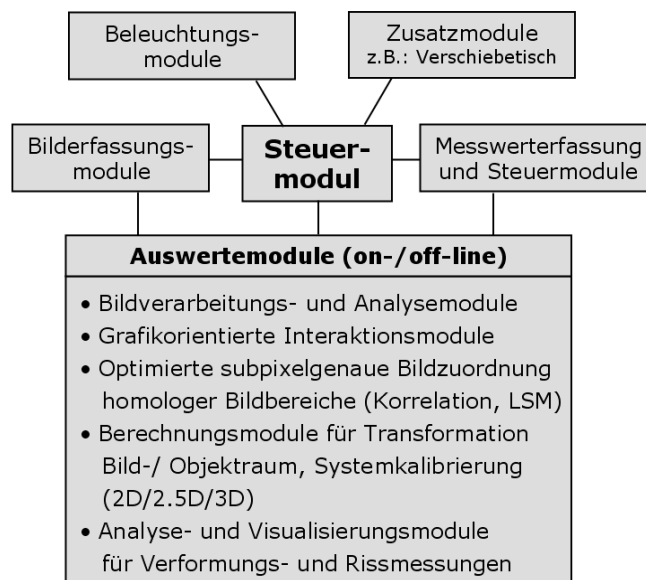


Bild 1: Modular aufgebautes photogrammetrisches Messsystem

Fig. 1: System of modules for photogrammetry measurements

2.3 Photogrammetrische Objekterfassung

Im Verlauf der photogrammetrischen Messung müssen die einzumessenden Objektbereiche definiert werden. In Abhängigkeit der verwendeten Verfahren ist eine diskrete oder/ und eine kontinuierliche Oberflächenerfassung möglich. Für den Einsatz von Verfahren, die ausschließlich den Einsatz von Messmarken erfordern, müssen die einzumessenden diskreten Objektbereiche durch die Anbringung von Messmarken in der Vorbereitungsphase festgelegt werden. Bei Verwendung von Verfahren, die prinzipiell eine kontinuierliche Erfassung von Objektoberflächen ermöglichen, können die gewünschten Objektbereiche beliebig und damit auch nachträglich frei festgelegt werden. Die Bedeutung wird dann sichtbar, wenn z.B. der Versuchsverlauf eine veränderte Anordnung der diskreten Objektpunkte erfordert bzw. wenn nachträglich z.B. ein FEM-Netz für die photogrammetrische Messung übernommen bzw. angepasst werden soll. Voraussetzung für eine kontinuierliche Erfassung von Objektoberflächen ist eine entsprechende Oberflächenstruktur des zu erfassenden Objektes, die einen maßgeblichen Einfluss auf die resultierende Messgenauigkeit darstellt. Bei einer nicht ausreichenden natürlichen Oberflächenstrukturierung können verschiedene diskrete und flächenhafte künstliche Objektsignalisierungen eingesetzt werden. Für die Erfassung bzw. die Verschiebungsanalyse diskreter und flächenhafter Bereiche wurden verschiedene Algorithmen und Softwaremodule untersucht und entwickelt (z.B. Schwerpunkoperator, parametrische Merkmalsextraktion, Kreuzkorrelation und Least-Squares-Matching). Die erzielten Genauigkeiten für die diskrete Punktbestimmung unter Einbeziehung von merkmalsbasierten Messmarken liegen überwiegend im Bereich von 0,02–0,05 Pixel. Unter Verwendung von intensitätsbasierten Marken konnte eine Genauigkeit von 0,01 Pixel erzielt werden. Die Verschiebungsanalyse für natürliche Oberflächenstrukturen kann im Normalfall mit einer Genauigkeit bis 0,02 Pixel erfolgen. In einigen Anwendungsbeispielen bestätigten sich Genauigkeiten bis 0,01 Pixel. Im Zusammenhang mit der Transformation Bild-/Objektraum wird die Kalibrierung des verwendeten Kamerasystems bzw. der einzelnen Kameras erforderlich. Hierfür werden in Abhängigkeit der verwendeten Verfahren (2D/2.5D/3D) unterschiedliche Ansätze verfolgt. Für die Systemkalibrierung bei einer 3D-Messung hat sich das Aicon-System bewährt. (HAMPEL [3])

2.4 Photogrammetrische Verformungs- und Rissmessungen

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 528 erfolgten zahlreiche Versuche an textilbewehrten bzw. -verstärkten Betonprobekörpern (ORTLEPP ET AL. [5]). In diesem Zusammenhang bestand besonderes Interesse an einer qualitativen und quantitativen Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung während der Versuche. Diese beziehen sich beispielsweise auf ein- und zweiaxiale Zugversuche textilbewehrter Betonproben und auf Schubversuche an textilverstärkten Betonproben (TP B1/C1/D5). Zur Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten erfolgten im Sonderforschungsbereich 528 umfangreiche Untersu-

chungen. Diese bezogen sich in einem ersten Schritt auf die photogrammetrische Erfassung der Verformungs- und Rissentwicklung (Risslage und -breite). Zielstellung war dabei die Klärung der Einsatzgrenzen (Messgenauigkeit, min. Rissbreite usw.) sowie die Auswahl und Entwicklung von Algorithmen bzw. Modulen, die in effizienter Weise die vorgenannten Messaufgaben ermöglichen.

Aktuelle Untersuchungen des Teilprojektes Y1 beschäftigen sich mit der Erfassung der Verformungs- und Rissentwicklung bei einaxialen Zugversuchen im Teilprojekt D5. Im Kontext dieser Untersuchungen sollen die bestehenden Aufnahme- und Auswertemodule so weiterentwickelt werden, dass zukünftig eine selbständige Nutzung durch das Versuchspersonal ermöglicht wird. Die im Teilprojekt D5 zu realisierende Messaufgabe besteht in der Erfassung eines 100 mm x 240 mm großen Messbereiches. Zur Erreichung einer größtmöglichen Genauigkeit für den zu erfassenden Messbereich werden zwei Kodak Megaplex 4.2i/10 in einer 2.5D-Konfiguration eingesetzt (HAMPEL [3]). Das ermöglicht eine effiziente Erfassung des Messbereiches. Bild 2 zeigt den Versuchsstand, die digitalen Kameras und einen für diese Versuche entworfenen Bezugsrahmens, der für die 2.5D-Erfassung erforderlich ist. Dieser dient zur Erfassung und Korrektur von Starrkörperbewegungen bzw. Kamerabewegungen (Erschütterungen).

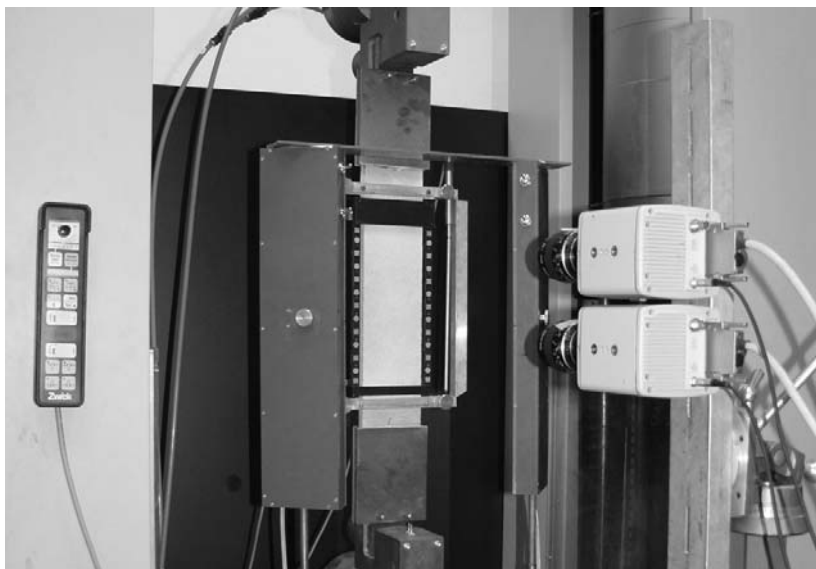


Bild 2: Versuchsstand mit 2 Kameras für 2.5D (SFB 528, TP D5)

Fig. 2: Test stand with two cameras for 2.5D (SFB 528, TP D5)

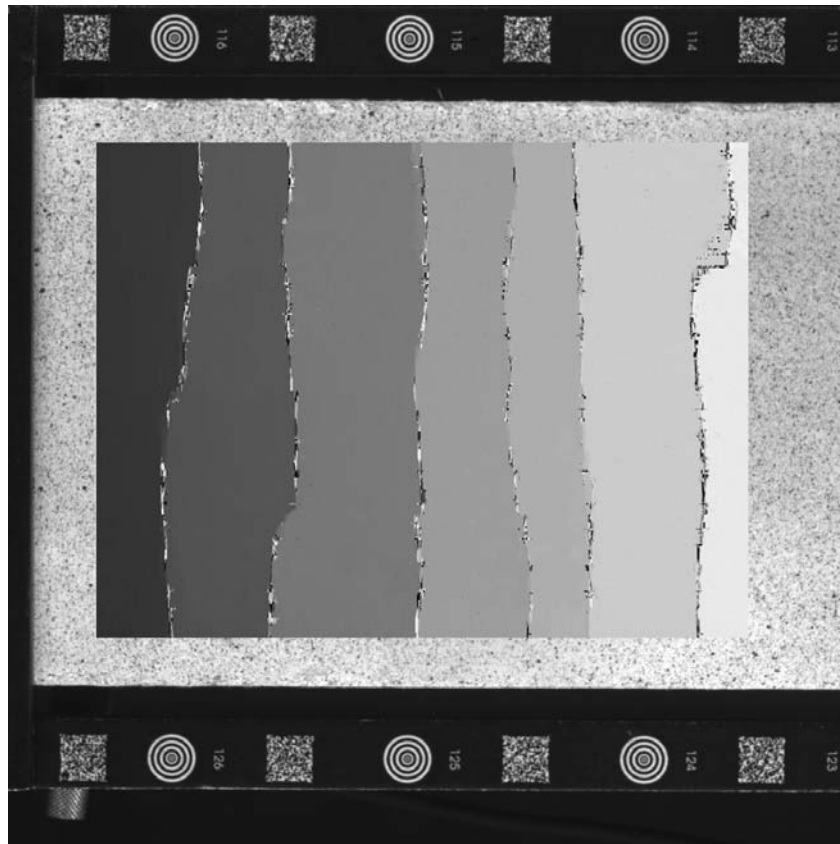


Bild 3: Berechnetes Rissbild (013-07-p2-15%, C1)

Fig. 3: Calculated crack image

Konkrete Ziele der laufenden Untersuchungen sind die lastabhängige Risserfassung (Anzahl, Lage und Breite). Ein Ergebnis der photogrammetrischen Auswertung sind berechnete Rissbilder, die die lastabhängige Rissituation flächenhaft zeigen (Bild 3). Diese dienen auch als Grundlage zur Festlegung von Messprofilen, um ungeeignete Messbereiche (Störungen, Rissverzweigungen) zu vermeiden. Das im Bild 3 gezeigte Rissbild beinhaltet zusätzlich eine Falsch-Farb-Darstellung der berechneten Relativverschiebungen. Die in Bild 4 gezeigten Relativverschiebungen für ein Messprofil stellen ein weiteres Ergebnis der photogrammetrischen Auswertung dar. Dargestellt sind die über einen Teilmessbereich in einem Profil erfassten lastabhängigen Relativverschiebungen für zwei Laststufen. Die im Bild 4 deutlich zu erkennenden Risse können ab einer Größe von ca. 3 μm detektiert werden.

In den bisher durchgeführten Untersuchungen hat sich die Verwendung von Messprofilen bewährt. Tabelle 1 fasst die wesentlichen Schritte zur Rissdetektion in Verschiebungsprofilen zusammen.

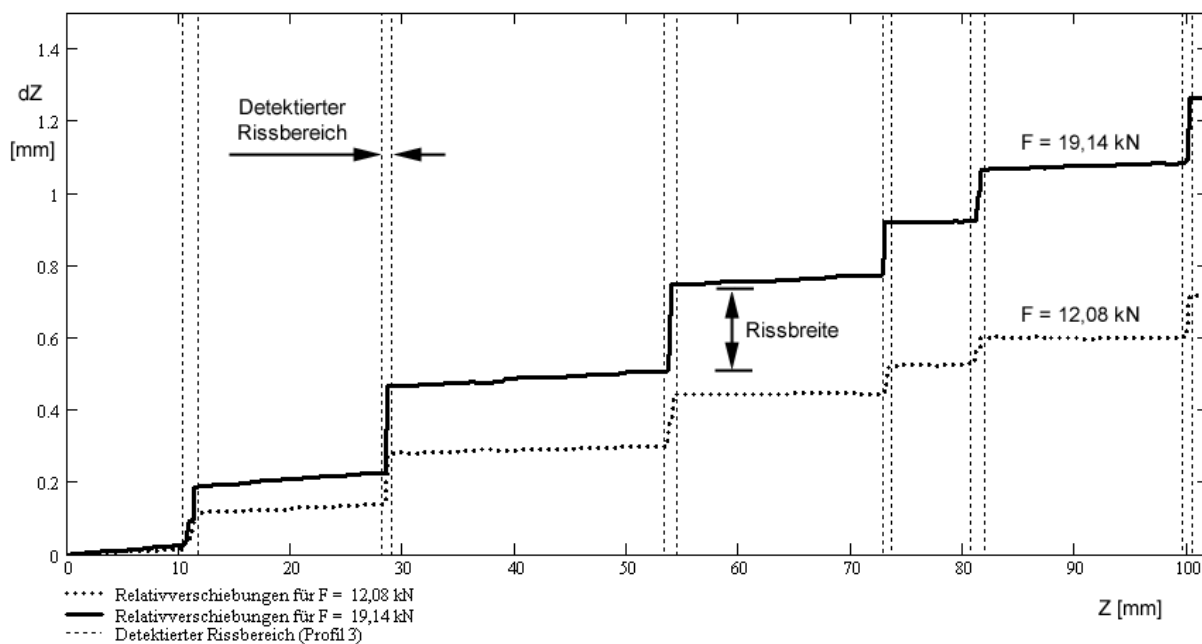


Bild 4: Relativverschiebungen für zwei Laststufen (C1, Profil 3)

Fig. 4: Relative deformations for two load steps

3 Möglichkeiten der hard- und softwarebasierten Optimierung photogrammetrischer Aufnahme- und Auswerteprozesse

Der Umfang und die Komplexität photogrammetrischer Messprozesse erfordern im bautechnischen Versuchswesen, z. B. bei der Durchführung von Massenexperimenten, oftmals eine Optimierung des jeweiligen Aufnahme- und Auswerteprozesses. Die z. T. sehr hohen Anforderungen bzgl. der resultierenden Messauflösung - bezogen auf die zu erfassenden Messbereiche (2D) bzw. Messvolumen (3D-Objektoberfläche) - und die z. T. sehr große Anzahl von Messbildern (Bildsequenzen bis 750 Bilder/Bildpaare pro Versuch) initiieren entsprechende Entwicklungen. In Bezug auf den photogrammetrischen Aufnahmeprozess führten diese z. B. zur 2.5D-Objekterfassung mittels dynamischer projektiver Transformation, die Entwicklung intensitätsbasierter Messmarken und den Einsatz der Spiegelphotogrammetrie (HAMPEL [3]).

Bzgl. Der Optimierung photogrammetrischer Auswerteprozesse ergeben sich vielschichtige Möglichkeiten, die sich vorwiegend auf die Algorithmenentwicklung/-optimierung und deren Implementierung beziehen. Bei der Algorithmenentwicklung (z. B. für die Rissdetektion) und bei der Einbeziehung bekannter Algorithmen hat sich gezeigt, dass in Bezug auf die Implementierung oftmals weit reichende Optimierungen vorgenommen werden können.

Tabelle 1: Rissdetektion in Verschiebungsprofilen**Table 1:** Detection of cracks in profiles

lfd. Nr.	Beschreibung
1.	<p>Datenbereitstellung (Profilbezogene Relativverschiebungen)</p> <p>Bereitstellung der Relativverschiebungen für ein Messprofil pro Laststufe. Zur Vereinfachung sind geeignete Objektkoordinatentransformationen vorzunehmen, die das Profil auf eine Koordinatenachse ausrichten, die sich an der Belastungsrichtung orientiert – falls dies möglich ist. Im Folgenden wird von dem Fall eines einaxialen Zug- bzw. Schubversuches ausgegangen, bei dem eine entsprechende Festlegung problemlos möglich ist.</p>
2.	<p>Datenvorverarbeitung</p> <p>Die Vorverarbeitung der lastabhängigen Relativverschiebungen soll im Bereich der jeweiligen Risspositionen, aber auch in ungerissenen Bereichen zu einem hinreichend glatten Verlauf führen, ohne dass dabei der wesentliche Informationsgehalt (Risscharakteristik) beeinträchtigt wird. Dies kann beispielsweise auf der Grundlage verschiedener Mittelwertberechnungen erfolgen, aber auch im direkten Zusammenhang mit Faltungsoperatoren, die im nächsten Analyseschritt zum Einsatz kommen können. Die Art und Weise der Vorverarbeitung hat i. d. R. einen entscheidenden Einfluss auf den nachfolgenden Analyseschritt.</p>
3.	<p>Kennzeichnung der charakteristischen Sprünge in den Relativverschiebungen</p> <p>Kennzeichnung der charakteristischen Sprünge (Rissposition) in den Relativverschiebungen, z. B. durch Differenz- bzw. Faltungsoperatoren. In Abhängigkeit der jeweiligen Rissituation müssen die einbezogenen Operatoren aufgabenbezogen angepasst werden. In diesem Zusammenhang können verschiedene Parameter Bedeutung erlangen, z. B. der minimale Abstand zwischen zwei Rissen und die Größe der Operationsbereiche. Die minimale Rissbreite stellt einen ortsabhängigen Parameter dar, der festlegt, ab wann zwei nebeneinander liegende Risse erkannt werden. Die Operationsbereiche stellen beispielsweise den einbezogenen Objektbereich bei dem Einsatz von Differenz- und Faltungsoperatoren dar. Generell gilt: Je kleiner der Operationsbereich gewählt wird, umso empfindlicher wird die Rissdetektion – auch in Bezug auf eine fehlerhafte Rissdetektion. Dieses Verhalten kann zwar stark durch die in Schritt 2 vorgenommene Datenvorverarbeitung (Datenglättung) beeinflusst werden, es muss allerdings beachtet werden, dass eine starke Datenglättung die Erfassung kleiner Risse erschwert bzw. verhindert und somit einen gegenläufigen Effekt bewirken kann. Daraus folgt, dass die einzelnen Prozesse aufeinander abgestimmt werden müssen.</p>
4.	<p>Ermittlung charakteristischer Rissparameter (Rissentstehung, Rissposition und -breite)</p> <p>Lastabhängige Berechnung der Rissposition und -breite, einschließlich der Erstrissdetektion (Rissentstehung) unter Einbeziehung der Daten aus dem 3. Bearbeitungsschritt. Die Auswahl geeigneter Methoden hängt von diesen Daten ab. Prinzipiell lassen sich viele in der digitalen Bildverarbeitung und Photogrammetrie bekannten Verfahren zur Erfassung ausgeprägter Merkmale anwenden, beispielsweise die merkmals- und intensitätsbasierten Analyse- und Auswertemethoden zur Erfassung punktförmiger Merkmale. Die Sprung-Charakteristik in den Relativverschiebungen legt auch den Einsatz bekannter Verfahren für die Kantendetektion nahe.</p>

Weitere Optimierungsmöglichkeiten ergeben sich bei der Implementierung (Softwareentwicklung). Aufgrund der großen Auswahl von Systemen (Hardware, Betriebssystem, Entwicklungsumgebung), die für photogrammetrische Auswerteprozesse zum Einsatz kommen können, wird nachfolgend auf eine Auswahl prinzipieller Optimierungsmöglichkeiten eingegangen. Der aktuelle Trend bei der Entwicklung der Rechentechnik deutet auf eine starke Parallelisierung der Hardware hin. Dies wird z. B. durch die Entwicklung und dem Einsatz verschiedener Multicore-Prozessoren und leistungsfähiger Grafikkarten (GPU's) deutlich. Hochleistungsrechner beinhalten oftmals mehrere dieser Multicore-Prozessoren und verfügen dadurch über ein großes Leistungspotential. Um dieses Potential erschließen zu können, gibt es verschiedene Strategien bei der Implementierung. In einem ersten Schritt müssen die Einzelprozesse, die auf mehrere Cores aufgeteilt werden können, optimiert werden. Dies wird z. B. durch eine hardwarenahe Programmierung (Assembler, In-Line-Assembler) ermöglicht und gestattet die zur Verfügung stehenden CPU-Ressourcen optimal auszuschöpfen. In einem zweiten Schritt können die für eine CPU optimierten Implementierungen auf mehrere CPU's verteilt werden. Hierfür stehen verschiedene Entwicklungsumgebungen und Bibliotheken zur Verfügung (z. B.: Intel, OpenMP). Eine weitere Optimierungsmöglichkeit besteht in der Nutzung leistungsfähiger Grafikkarten, die beispielsweise eine direkte Programmierung der GPU ermöglichen und in allgemeine Berechnungsprozeduren einbezogen werden können. Durch die konsequente Bündelung der jeweiligen Berechnungsressourcen können für komplexe Auswerteprozesse effiziente Auswertemodule entwickelt werden, die durch eine geeignete Skalierung der Hardware (CPU's, GPU's) den Erfordernissen der jeweiligen Applikationen angepasst werden kann.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass mit den entwickelten Lösungen vielschichtige Messaufgaben prinzipiell realisiert werden können. Für Massenexperimente und komplexe Messaufgaben sind i. d. R. spezielle Entwicklungen bzw. Systeme erforderlich, die auf die jeweilige Aufgabe abgestimmt sind.

Besonders im bautechnischen Versuchswesen sind die Anforderungen an ein photogrammetrisches Messsystem sehr unterschiedlich und erfordern eine genaue Kenntnis der Einfluss- und Störgrößen im Zusammenhang mit hochgenauen Oberflächenmessungen (z.B. bei baumechanischen Untersuchungen von Betonprobekörpern). Für die flächenhafte Objekterfassung wurden im Zusammenhang mit speziellen Messaufgaben Algorithmen bzw. Verfahren entwickelt, weiterentwickelt und adaptiert, die eine effiziente Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen ermöglichen und das derzeit praktisch erreichbare Genauigkeitspotenzial unter Verwendung der vorgestellten Verfahren widerspiegeln.

Kritisch muss angemerkt werden, dass bei den vorgestellten Verfahren der flächenhaften Bildzuordnung homologer Bildbereiche z. T. empirisch ermittelte Parameter Verwendung finden und keine allgemeine Gültigkeit besitzen. Weiterhin wurde festgestellt, dass einige Einflussparameter (z.B. Sensorparameter) in den bekannten und hier vorgestellten Verfahren nicht bzw. unzureichend berücksichtigt werden und somit ein Potenzial zur Absicherung und Steigerung einer hohen Subpixelgenauigkeit beinhaltet.

5 Literatur

- [1] HAMPEL, U., MAAS, H.-G.: *Cascaded image analysis for dynamic crack detection in material testing*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009
- [2] HAMPEL, U.: *Photogrammetrische Messprozesse im bautechnischen Versuchswesen*. Oldenburger 3D-Tage 2009, Verlag Herbert Wichmann, 2009
- [3] HAMPEL, U.: *Photogrammetrische Erfassung der Verformungs- und Rissentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen*. TU Dresden, Dissertation, 2008
- [4] ORTLEPP, R.; HAMPEL, U.; CURBACH, M.: *A new Approach for Evaluating Bond Capacity of TRC Strengthening*. In: *Cement and Concrete Composites* 28 (2006) 7, 589–597
- [5] LUHMANN, TH. (Hrsg.): *Nahbereichsphotogrammetrie in der Praxis – Beispiele und Problemlösungen*. Verlag Herbert Wichmann, 2002
- [6] BENNING, J., LANGE, R., SCHWERMANN, C., EFFKEMANN, GÖRTZ, S.: *Monitoring crack origin and evolution at concrete elements using photogrammetry*. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 35 (Part B/5) (2004), pp. 678–68