

Digitalkameratachymeter – Einsatzmöglichkeiten für modulare und integrierte Systeme

STEFAN HAUTH¹ & MARTIN SCHLÜTER²

Zusammenfassung: Die aktuellen Entwicklungen bei den modernen Tachymetern zeigen verstärkt in die Richtung einer Kombination von digitalen Bildsensoren mit Robottachymetern. So bieten verschiedene Gerätehersteller polare Messsysteme mit fest integrierten Digitalkameras an. Ergänzend zu dieser Entwicklungsschiene forscht das i3mainz an einem modularen Konzept.

Das modulare Konzept für Digitalkameratachymeter ist unabhängig von den Herstellern und ermöglicht eine Kombination verschiedener Hardware, Software und Algorithmen und ist deshalb unabhängig von individuellen Entwicklungszyklen. Es sollen hier erste Ergebnisse der aktuellen Entwicklung im Bereich der Hardware (Kamera, Optik und Halterung) gezeigt werden.

Modulare und integrierte Systeme haben individuelle Stärken und Schwächen. Deshalb erwarten wir, dass beide Ansätze in unterschiedlichen Einsatzgebieten genutzt werden. Unser Ziel ist ein besseres Verständnis für die Systeme und ihren Anwendungen. Es werden erste Ergebnisse von Anwendungen und das Potenzial in anderen Einsatzbereichen gezeigt.

1 Einleitung

Das i3mainz entwickelt seit 2006 Kombinationslösungen von digitalen Industriekameras mit polaren Messsystemen und zeigt erfolgreich mit dem i3mainz Digitalkameratheodolit den Einsatz im Umfeld von technischen Präzisionsmessungen (SCHLÜTER/HAUTH/HEß 2009). Im aktuellen Forschungsprojekt „Modulare Digitalkameratachymeter“, gefördert vom BMBF, werden die bei automatischen Kollimationszielungen gewonnenen Erfahrungen auf tachymetrische Anwendungen übertragen.

Die Idee, bildgebende Sensoren mit einem Tachymeter bzw. Theodolit zu kombinieren, ist im Grunde nicht neu. Bereits in den 80er Jahren wurde, mit einem Fokus auf Theodolitmesssystemen, im Bereich Videotheodolite geforscht. Diese Entwicklungen gehen schrittweise bis zu den heutigen Digitalkameratachymetern weiter (JURETZKO 2005 und WASMEIER 2009). Die Hersteller Pentax, Trimble, Topcon und Leica Geosystems bieten heute polare Messsysteme mit integrierten Digitalkameras an (siehe Kapitel 2).

2 Digitalkameratachymeter als integriertes System

Die Hersteller von Messgeräten bieten seit den letzten Jahren verschiedene Systeme an, bei denen die Digitalkamera fest in das Tachymeter integriert ist. Die Hersteller verfolgen dabei zum Teil unterschiedliche Einsatzzwecke für eine Digitalkamera in einem polaren Messsystem.

¹ Stefan Hauth M. Sc., Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik i3mainz, FH Mainz, Lucy-Hillebrand-Str.2, 55128 Mainz, hauth@geoinform.fh-mainz.de

² Prof. Dr.-Ing. Martin Schlüter, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik i3mainz, FH Mainz, Lucy-Hillebrand-Str.2, 55128 Mainz, schluefer@geoinform.fh-mainz.de

Ebenso verschieden sind auch die technischen Umsetzungen zur Kombination von Kameras und Messgeräten.

Bei den Visio-Modellen von der Firma Pentax ist die Digitalkamera über dem Objektiv des Fernrohrs montiert (Abbildung 1). Die Kamera hat eine Auflösung von ca. 3 Megapixeln und ein Weitwinkelobjektiv mit fester Brennweite (PENTAX 2008). Die Bilddaten dienen in Zusammenhang mit den Messwerten vom Tachymeter als Grundlage für die grafische Dokumentation der Zielpunkte in einem Übersichtsbild.

Hexagon Metrology bietet mit dem Leica Absolute Tracker AT401 ein polares Messsystem an, das eine Übersichtskamera fest integriert hat (Abbildung 1, HEXAGON 2010). Lasertracker halten grundsätzlich kein Okular für den Benutzer vor. Die Übersichtskamera beim Lasertracker unterstützt insbesondere das Arbeiten mit mehreren passiven Reflektoren.

Die Trimble VX Spatial Station hat seine Kamera unter dem Fernrohrobjektiv verbaut (Abbildung 1). Der Sensorchip hat eine Auflösung von ca. 3 Megapixel und eine Weitwinkeloptik mit einer festen Brennweite (TRIMBLE 2007). Die Digitalkamera dient zur Dokumentation der Messpunkte und zur Steuerung des Gerätes. Das Tachymeter bietet auch einen Scanmodus an, die Kamera dient hier wie bei anderen Laserscannern auch zur Festlegung des Scanbereiches. Die Bilder können zur Texturierung der Scandaten verwendet werden.

Bei der Topcon Imaging Station kann der Benutzer über zwei bildgebende Sensoren verfügen (Abbildung 1). Eine Kamera ist mit einem Weitwinkelobjektiv neben dem Objektiv des Tachymeterfernrohres befestigt. Der zweite Sensor ist koaxial zum Strahlengang des Gerätefernrohres integriert und nutzt somit auch dessen Fokus. Beide Kameras haben eine Auflösung von ca. 1,3 Megapixel (TOPCON 2008). Die beiden Kameras können zur Anzielung von Punkten genutzt werden. Dabei dient die neben dem Fernrohr angebrachte Kamera der Übersicht bei der Grobanzielung und die im Fernrohr integrierte Kamera der Feinanzielung. Die Kameras unterstützen ähnlich wie bei dem Trimble-Modell den Scanmodus des Tachymeters.

Das Digitalkameratachymeter von Leica Geosystems ist zurzeit ein Prototyp. Es handelt sich dabei um eine Kleinserie die auf der TCRA1200-Reihe aufbaut. Bei diesem Gerät ersetzt ein CMOS-Farbchip die Strichkreuzplatte und das Okular. Die Auflösung beträgt ca. 5 Megapixel (WASMEIER 2009).



Abbildung 1: Polare Messsysteme mit integrierter Kamera (v.l.n.r.): Pentax Visio-Modelle, Leica Geosystems Absolute Tracker AT401, Trimble VX Spatial Station, Topcon Imaging Station

3 Modulare Digitalkameratachymeter

3.1 Konzept und Aufbau

Wir bauen auf den von SCHIRMER (1994) zusammengestellten Optionen für die Kombination von einem Theodolit und einem digitalen Bildsensor auf. Das modulare Digitalkameratachymeter, das zurzeit am i3mainz entwickelt wird, kommt ohne umfassende Veränderungen am Messgerät aus. Es besteht auf der Hardwareseite aus einem Okularadapter. Dieser dient als Halterung für die Digitalkamera, Optik und den Fokusmotor. Für die Montage ist das normale Okular zu entfernen und durch den Adapter zu ersetzen (Abbildung 2). Der Softwareteil besteht aus der Steuerung der Kamera, des Tachymeters und des Fokusmotors. Dazu kommen u.a. Algorithmen für die geometrische Kalibrierung der Kamera bezüglich der Tachymeterachsen und Bildverarbeitungsfunktionen.

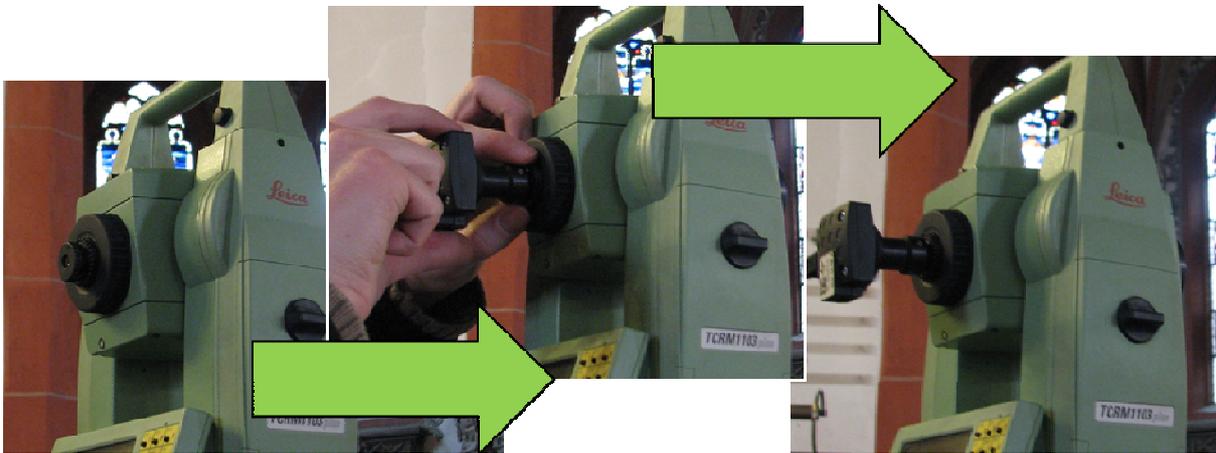


Abbildung 2: Modulares Digitalkameratachymeter, Montage des Adapters an die Okularhalterung

Der Okularadapter hat die Vorzüge, dass im Feld einfach und schnell zwischen dem klassischen Okular und dem Digitalkameraokular gewechselt werden kann. Das modulare System ermöglicht damit ein einfaches und kostengünstiges Upgraden eines herkömmlichen Tachymeters zu einem Digitalkameratachymeter. Das Konzept sieht vor, dass die Hardware mit wenigen Sonderanfertigungen auskommt. So sind Kamera und Optiken keine speziellen Entwicklungen für dieses Projekt, sondern auf gängigen Industriestandards aufbauende Katalogware. So nutzen wir z.B. S-Mount und C-Mount-Anschlüsse für Kamera und Optik und serielle Schnittstellen bzw. USB für Stromversorgung und Datentransfer. Das hat den Vorteil, dass die Komponenten relativ preisgünstig sind und das ein Wechsel von Bauteilen einfach und schnell erfolgen kann. So lässt sich ohne großen Aufwand die Kamera austauschen: durch ein neueres Modell, mit z.B. mehr Auflösung, oder farbig statt monochromatisch.

3.2 Optik und Kamera

Beim modularen Digitalkameratachymeter wird keine Veränderung des optischen Strahlengangs im Fernrohr vorgenommen. Die Digitalkamera nimmt die Bilder direkt von der Strichkreuzebene

auf. Der Adapter ist so variabel konzipiert, dass unterschiedliche Vergrößerungen von der Strichkreuzebene möglich sind. Der Benutzer kann wählen, ob er die Strichkreuzebene vollständig abgebildet haben möchte oder, für eine bessere Vergrößerung, nur den zentralen Teil der Strichkreuzebene.

Die Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau (im Querschnitt) des Okularadapters zur Befestigung der Digitalkamera mit der Optik. Die Optik ist über ein S-Mount-Gewinde in der Okularhalterung befestigt. Diese Halterung ist am Bajonettanschluss für das Okular mit dem Tachymeter verbunden. Die Länge der Okularhalterung bestimmt den Abbildungsmaßstab und somit wie viel vom Strichkreuz auf den Sensor abgebildet wird. An der Kamerahalterung ist die Digitalkamera über einen C-Mount-Anschluss befestigt. Die Halterung lässt sich variabel auf der Okularhalterung verschieben, dadurch verändert sich der Abstand zwischen Sensor und Optik und das Strichkreuz kann scharf abgebildet werden.

Zurzeit werden Digitalkameras mit einer Auflösung von 2560 x 1920 Pixeln (farbig und monochromatisch) und 1280 x 1024 Pixeln (monochromatisch) verwendet. Die Kameragehäuse sind Serienprodukte der Hersteller mit einem C-Mount-Anschluss. Die Datenübertragung und die Stromversorgung erfolgen bei allen Kameras über USB 2.0. Dadurch kann je nach Anwendungsgebiet und Genauigkeitsanforderung zwischen einer Farbkamera mit Bayer-Sensor und monochromatischen Sensoren gewechselt werden. Bei den Optiken handelt es sich um S-Mount-Modelle mit unterschiedlichen Festblenden.

An der Objektivöffnung des Tachymeters ist ein geeignetes Gegengewicht vorzusehen.

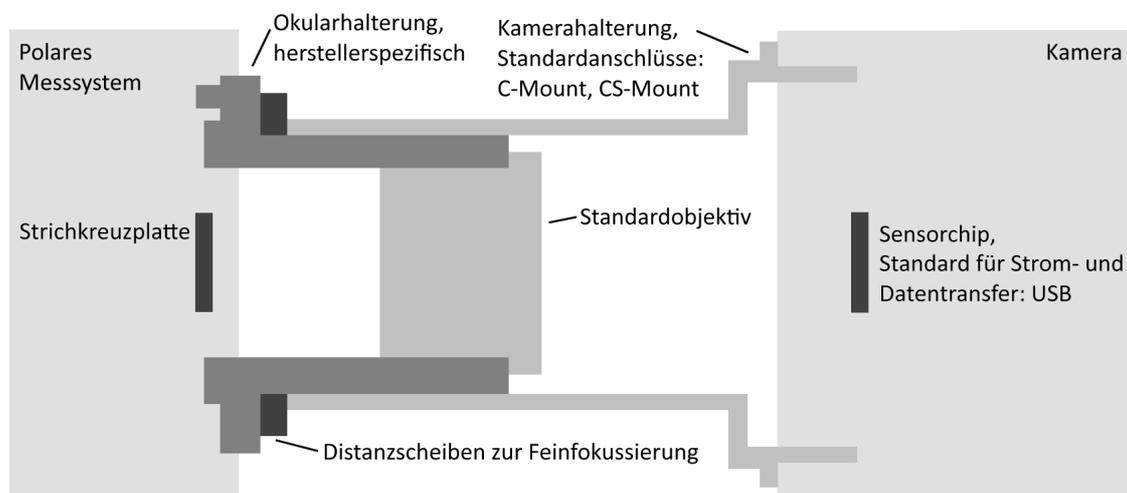


Abbildung 3: Schematischer Querschnitt des Okularadapters

3.3 Auflösungsvermögen

Um zu überprüfen welche Bildauflösungen für ein Digitalkameratachymeter sinnvoll sind, wird das Auflösungsvermögen über die Kontrastübertragungsfunktion ermittelt. Die Aufnahme der Messbilder findet dabei nicht in einer Laborumgebung statt, sondern im Außendienst auf endlich entfernten Zielen. Dies soll praxisnähere Ergebnisse liefern, weil der Haupteinsatzbereich für

geodätische Tachymeter der Außendienst ist. Die Testtafeln sind in den Entfernungsbereichen aufgebaut, die den üblichen Messentfernungen eines geodätischen Tachymeters entsprechen (bis ca. 400 m). Auf den Testtafeln sind Balkenmuster (Schwarz/Weiß-Wechsel) in verschiedenen Linienbreiten aufgedruckt (Abbildung 4).

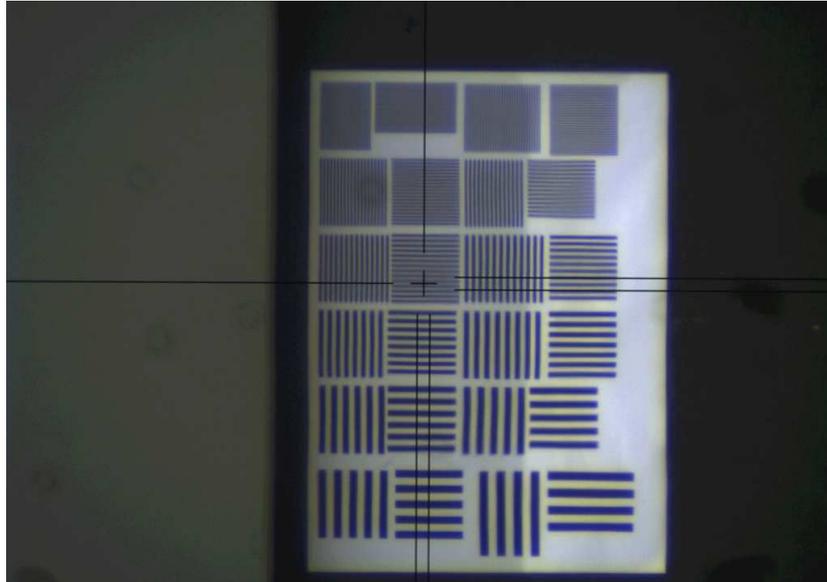


Abbildung 4: Testtafel mit regelmäßigem Strichmuster in unterschiedlichen Linienbreiten. Aufnahme durch das Tachymeterfernrohr (Ausschnitt)

Die Kontrastübertragungsfunktion wird angelehnt an KRAUS (2004) berechnet:

$$C' = \frac{I'_{\max} - I'_{\min}}{I'_{\max} + I'_{\min}} \quad (1)$$

$$CT(F) \approx C' \quad (2)$$

C' – Kontrast im Bildraum

$CT(F)$ – Kontrastübertragungsfunktion in Abhängigkeit der Objektfrequenz (F)

I' – Intensität im Bild

Die folgenden Werte beschreiben nicht die Kontrastübertragungsfunktion in Abhängigkeit zu der Bildfrequenz (f), sondern in Abhängigkeit zu der Objektfrequenz (F). Dies ist eine Abweichung von der in der gängigen Literatur üblichen Darstellung, ermöglicht aber in diesem Fall eine bessere Vergleichbarkeit mit der Messauflösung des Tachymeters. Die Kontrastübertragungsfunktion ist pro Messbild auf den jeweiligen größten Bildkontrast normiert.

Um die Funktion zu erzeugen, wird pro Messbild durch die Streifenmuster ein Grauwertprofil gelegt. In diesen Profilen lassen sich dann die Intensitätsunterschiede messen und den $CT(F)$ für die jeweilige Frequenz (Lp/mm) ermitteln.

Bei der Frequenz, bei welcher die Kontrastübertragungsfunktion einen gewissen Schwellenwert unterschreitet, liegt das Auflösungsvermögen. Dieser Grenzwert ist an der Stelle im Bild zu

wählen, an der kein periodisches Streifenmuster mehr zu erkennen ist, sondern nur noch ein strukturloses Grau (NASSE 2008). Bei den hierfür erzeugten Messbildern liegt die Grenze bei ca. $CT(F) = 0,2$.

Die nachfolgenden Werte zeigen exemplarisch die Ergebnisse der durchgeführten Messserien. Das verwendete Digitalkameratachymeter hat einen CMOS-Farbsensor und eine Auflösung von 2560 x 1920 Pixeln (ca. 5 Megapixel). Das Tachymeter ist ein Leica Geosystems TCRM 1103. Zum Vergleich der Auflösungen werden aus den jeweiligen Messbildern die Auflösungsstufen 1920 x 1440 (ca. 2,7 Megapixel) und 1280 x 960 (ca. 1,2 Megapixel) zusätzlich berechnet. Die Tabelle 1 zeigt das Auflösungsvermögen im Objekt der drei Auflösungen exemplarisch in drei Entfernungen. Das Auflösungsvermögen wird in dieser Tabelle nicht in Lp/mm sondern Breite des Linienpaars angegeben. Dies soll deutlicher zeigen, welche Details im Objekt noch zu erkennen sind. Es ist zeigt sich, dass die Reduzierung der Bildauflösung auch eine Reduzierung bei der Detailauflösung (=Auflösungsvermögen) mit sich bringt. Der Faktor zwischen der größten und kleinsten Bildauflösung ist gleich 2, bei dem Auflösungsvermögen aber nur ca. 1,2. Der Verlust in der Detailauflösung ist also erheblich geringer, als die Reduzierung der Bildauflösung.

Tabelle 1: Darstellung des Auflösungsvermögens im Objektraum, Breite des Linienpaars in mm, Grenzwert 0,2

	Entfernung ca. 40 m	Entfernung ca. 110 m	Entfernung ca.250 m
2560 x 1920	2,4 mm	9,0 mm	14,4 mm
1920 x 1440	2,5 mm	9,3 mm	15,7 mm
1280 x 960	2,8 mm	9,3 mm	16,6 mm

Die Tabelle 2 zeigt nochmal die Werte aus Tabelle 1, nur wird hier die Breite des Linienpaars in mgon angegeben. Bei den Entfernungen von 40 m und 250 m sind Werte für die jeweilige Bildauflösung relativ gleich. Die schlechteren Ergebnisse bei der Entfernung von 110 m kommen durch Luftflimmern. Dies zeigt, dass äußere Einflüsse (z.B. Atmosphäre) starke Auswirkungen auf das Auflösungsvermögen haben.

Tabelle 2: Darstellung des Auflösungsvermögens im Objektraum, Breite des Linienpaars in mgon, Grenzwert 0,2

	Entfernung ca. 40 m	Entfernung ca. 110 m	Entfernung ca.250 m
2560 x 1920	3,8 mgon	5,1 mgon	3,6 mgon
1920 x 1440	3,9 mgon	5,2 mgon	3,9 mgon
1280 x 960	4,3 mgon	5,2 mgon	4,2 mgon

Einen direkten Rückschluss von der Bildauflösung über das Auflösungsvermögen zu der Messgenauigkeit ist nur bedingt möglich. So haben das Aussehen und die Eigenschaften des Ziels auch einen sehr starken Einfluss auf die Genauigkeit. Dass mit einem modularen Konzept

auch Messgenauigkeiten von ca. 0,15 mgon möglich sind, zeigt SCHLÜTER/HAUTH/HEB (2009) mit einem Digitalkamerataeodolit. Die Winkelmessgenauigkeit des dort verwendeten Leica Geosystems TM5100 konnte mit einer Kameraauflösung von 1280 x 1024 Pixeln komplett ausgenutzt werden.

4 Anwendungsfelder und Ausblick

4.1 Digitalkameratachymeter

Bei dem reinen Digitalkameratachymeter ist der Fokus des Messgerätes fix oder kann nur manuell am Gerät verändert werden. Mögliche Anwendungsfelder sind hochpräzise Ausrichtearbeiten mittels Kollimations und Autokollimationszielungen (AZAR 2009), sowie die Azimutbestimmung durch astronomische Beobachtungen von Sternen oder der Sonne (Abbildung 5).

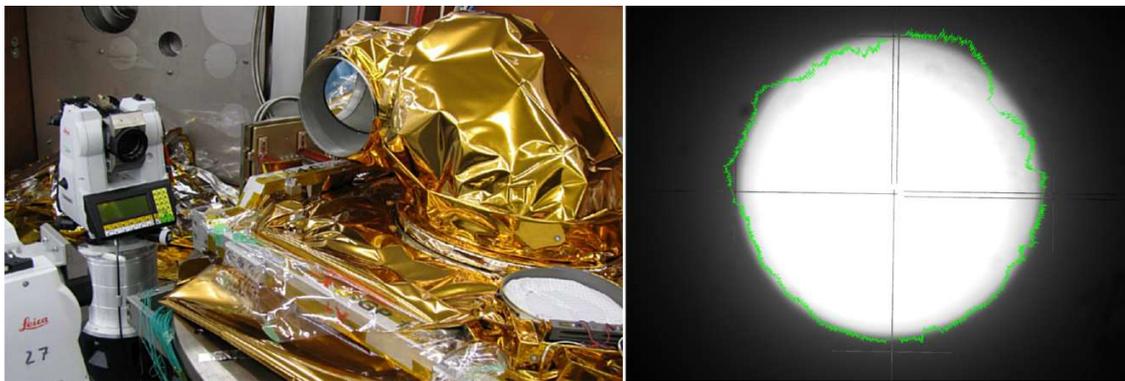


Abbildung 5: Präzise Ausrichtung von Laserstrahlen (links), Azimutbestimmung über astronomische Beobachtungen der Sonne (rechts)

4.2 Digitalkameratachymeter mit Fokusmotor

Bei dieser Ausbaustufe kommt zur der Kamera ein Fokusmotor hinzu, dieser ermöglicht die Steuerung des Fokusantriebs vom PC aus. In der Kombination mit einem Motortachymeter kann das Gerät komplett ferngesteuert werden. Das Messgerät kann somit auch in gewissen Bereichen autark arbeiten und nach einer Lernphase automatisch verschiedene Ziele wiederholt anmessen. Das Digitalkameratachymeter kann zur Dokumentation von natürlichen Passpunkten für Laserscanning und Photogrammetrie genutzt werden. Die natürlichen Passpunkte sind dabei normal mit dem Tachymeter aufzunehmen und das Bild dient als Hilfe für das Auffinden der Punkte in der Punktwolke (Abbildung 6). Im Projekt „DIO3D“ (Deutsche Inschriften Online 3D) vom i3mainz wird das modulare Digitalkameratachymeter für diesen Anwendungsfeld eingesetzt.

Weiterhin können mit einem Digitalkameratachymeter Bauschäden wie z.B. Risse (Abbildung 6) einfach und präzise dokumentiert und georeferenziert werden. Ein Monitoring des Verlaufs und der absoluten Ausdehnung von Rissen sollte auch über große Zeiträume hinweg möglich sein.



Abbildung 6: Dokumentation von natürlichen Passpunkten für Laserscanning und Photogrammetrie (links) und Rissmonitoring (rechts)

4.3 Digitalkameratachymeter mit automatischer Fokussteuerung

In der letzten Ausbaustufe ist eine Automatisierung der Fokussteuerung möglich. Der Fokusmotor lässt sich sowohl anhand der Distanzmessungen des Tachymeters als auch mittels Bildanalyse steuern. Damit ist einerseits eine gewisse Komfortsteigerung für den Benutzer verbunden, andererseits könnten nicht nur Reflektoren sondern auch anderweitig definierte Targets oder Messtaster automatisiert gefunden und erkannt werden.

Technisch machbar ist auch ein automatisiertes Zusammenrechnen von Bildserien systematischer Fokuseinstellungen, das sog. Fokus-Stacking, (HAUTH 2009). Die derzeit verfügbaren Lösungen versagen jedoch bei Szenen mit sehr stark gegliederter räumlicher Tiefe. In unseren Augen ist daher im Moment noch offen, mit welchen Anwendungen dem Modularen Digitalkameratachymeter der Sprung in die Produktreife gelingt.

5 Literaturverzeichnis

- AZAR, E., 2009: Automatisierte Prüfung von digitalen Libellen mit einem Digitalkamera-theodolit. Bachelorarbeit, FH Mainz, B0035.
- HAUTH, S., 2009: Focus-Stacking für Videotachymeter. Masterarbeit, FH Mainz, KM0005.
- HEXAGON, 2010: Leica Absolute Tracker AT401, Produktbroschüre.
- JURETZKO, M., 2005: Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 588, München.
- KRAUS, K., 2004: Photogrammetrie Band 1. De Gruyter Lehrbuch, Berlin.
- NASSE, H. H., 2008: Wie liest man MTF-Kurven?. Carl Zeiss, Geschäftsbereich Photo-Objektive.
- PENTAX, 2008: Pentax Visio Total Station V-325DN Series Specifications. Datenblatt.
- SCHIRMER, W., 1994: Universaltheodolit und CCD-Kamera – ein unpersönliches Meßsystem für astronomisch-geodätische Beobachtungen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 427, München.
- SCHLÜTER, M., HAUTH, S., HEB, H., 2009: Selbstkalibrierung motorisierter Digitalkamera-theodolite für technische Präzisionsmessungen. ZfV, 134 (1), S. 22-28.
- TOPCON, 2008: IS Imaging Station. Datenblatt.
- TRIMBLE, 2007: Trimble VX Spatial Station. Datenblatt.
- WASMEIER, P., 2009: Videotachymetrie – Sensorfusion mit Potenzial. AVN, 7/2009, S. 261-267.