

# Verwendung einer Okularkamera zur Realisierung eines automatisierten geometrischen Alignements

Stand: August 2011

## Implementation of an automated geometrical alignment using an ocular camera

Update: August 2011

Robin Ullrich, Stefan Knoblach, Michael Möser

Das geometrische Alignement ist ein grundlegendes geodätisches Messprinzip, welches aufgrund diskreter Messpunkte Bauwerksbewegungen ermittelt. In diesem Artikel wird die Automatisierung des Messverfahrens mithilfe bildgebender Sensoren dargestellt, eingesetzte Komponenten beschrieben und die Ergebnisse der Instrumentenuntersuchung diskutiert.

Schlüsselbegriffe: Geometrisches Alignement, Fluchtung, Bauwerksüberwachung, Videotachymeter, Schachbrettkalibrierung

The geometrical alignment is a fundamental geodetic measuring principle which determines the movement of artificial structures by means of discrete measuring points. The following article describes the automation of the measuring method using a charge coupled device, the essential system components and the results of the device analyses.

Keywords: Geometrical Alignment, Structural Monitoring, Video Tacheometer, Chessboard Calibration

### 1 Einleitung

Gegenstand geodätischer Überwachungsmessungen ist die Erfassung geometrischer Veränderungen oder, nach DIN 18709-2, die Feststellung von Bewegungen und Verformungen von Messobjekten. Typische Messobjekte sind Bauwerke (z.B. Brückenbauwerke, Stauanlagen, Fertigungshallen und Türme), Maschinen- und sonstige Industrieanlagen, sowie die damit in Verbindung stehenden natürlichen Objekte.

Die wesentliche Aufgabe geodätischer Überwachungsmessungen stellt die Messung und Dokumentation von Verhalten spezieller Messobjekte dar. Anhand ausgewählter Messpunkte wird der Nachweis über das aktuelle Bauwerksverhalten erbracht, womit prognostizierte Veränderungen validiert und falls nötig korrigierende Maßnahmen eingeleitet werden können. Prinzipiell wird ein über die Zeit andauerndes Geschehen betrachtet, d.h. die Verformungen und Veränderungen des Messobjektes in sich und gegenüber seiner Umgebung erfasst.

Bei den Aligniereinrichtungen zur Talsperrenüberwachung basieren die verschiedenen Messvarianten darauf, dass anhand mehrerer Messstellen die Geradlinigkeit ihrer Anordnung geprüft oder die Ablage von Messpunkten zu einer Referenzlinie (Fluchtgerade) über eine Länge von bis zu 300m messtechnisch erfasst wird. Die Referenzlinie wird bisher auf mechanische oder optische Weise hergestellt. Bei den mechanischen Systemen wird die Referenzlinie durch einen gespannten Draht realisiert (Drahtalignement) und die Ablesung der Differenz zur Referenzlinie erfolgt an Konsolen, die fest mit dem Bauwerk verbunden sind. Neben der schlechten Geradlinig-

keit infolge des Drahtdurchhangs und der Drahtverdrillung liegt das Hauptproblem des Drahtalignements darin, dass jede Luftbewegung oder Berührung den Draht zum Schwingen bringt und somit die Messgenauigkeit bis zum Abklingen der Schwingung signifikant verschlechtert wird. Außerdem wird die Nutzung von Freiräumen zwischen den einzelnen Messstellen durch den gespannten Draht stark eingeschränkt.

Bei den optischen Systemen wird die Verschiebung von Zielzeichen gegenüber der Ziellinie (Referenz) eines Fernrohres gemessen. Die Problematik der bisherigen optischen Systeme besteht darin, dass durch die konzeptionellen Gegebenheiten keine automatisierten Beobachtungen und somit auch keine Permanentbeobachtungen realisierbar sind. Bisher muss das Alignierfernrohr zu Beginn jeder Messung manuell auf eine Referenzmarke am Ende der Ziellinie ausgerichtet werden. Anschließend erfolgt die manuelle Einweisung der Zielzeichen (Miren) in die Referenzlinie. Die Ablesung der Exzentrizität orthogonal zur Referenzlinie erfolgt an den Zielzeichen selbst.

In der Literatur finden sich bereits Darstellungen, welche ein automatisiertes geometrisches Alignement aufzeigen (z.B. /MORCOM, APPERLEY, BROWN 2002/). Diese befassen sich jedoch weitgehend nur mit der prinzipiellen Anordnung eines solchen Systems und haben ihren Schwerpunkt in der Entwicklung verschiedener Zielzeichen. Eine konkrete Ausgestaltung des Systems, insbesondere des Zielfernrohrs und der Bildauswertung, wird nicht dargestellt. Als kostengünstige und flexible Alternative zu serienmäßigen Videotachymetern wurde am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich eine Okularkamera auf Basis eines monochromen

CCD-Sensors entwickelt (*GUILLAUME, BÜRKI 2008*). Kombiniert mit einer automatischen Fokussierung konnte diese Konstruktionsvariante bereits bei mehreren Anwendungen (u.a. *KNOBELACH 2009*) ihr hohes Genauigkeitspotenzial zeigen. Wird ein vorhandenes Alignierfernrohr mit einer Okularkamera (und einer Motorisierung der Fokussierung) kombiniert, kann zusammen mit modifizierten Zielzeichen ein automatisiertes geometrisches Alignement realisiert werden. Durch die Montage von Außen müssen keine konstruktiven Veränderungen am Fernrohr vorgenommen werden. Die bisherige Aligniereinrichtung kann weitgehend weiterverwendet werden. Dies bietet zudem den Vorteil einer Kontinuität der Messreihen und die Vergleichbarkeit mit vorhergehenden Ergebnissen.

Der folgende Beitrag stellt die Verwendung einer am Geodätischen Institut der Technischen Universität Dresden eingesetzten Okularkamera zur Realisierung eines automatisierten geometrischen Alignements dar. Es werden Gestaltungs- und Ausführungsmöglichkeiten der Zielmarken aufgezeigt und die darauf aufbauende Kalibrierung des Systems und Auswertung der Messdaten beschrieben. Abschließend wird eine Genauigkeitsuntersuchung des Gesamtsystems durchgeführt und ein Ausblick zur Weiterentwicklung gegeben.

## 2 Systemkomponenten

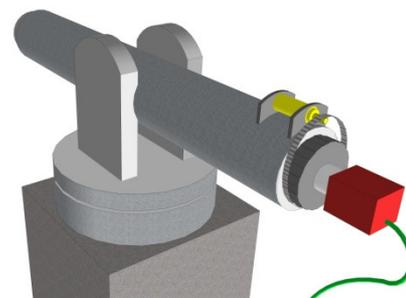
Wie einführend geschildert wurde, besteht der konzeptionelle Gedanke zur Automatisierung des geometrischen Alignements in der Ergänzung bestehender Instrumentarien durch bildgebende Sensoren. Grundsätzlich sollen bei der Montage der Okularkamera keine konstruktiven Veränderungen am Fernrohr selbst vorgenommen werden. Bei einer Vielzahl der verwendeten Alignierfernrohre ist das Okular über einen Bajonettverschluss oder einem Schraubgewinde am Fernrohr befestigt. Diese Befestigung kann ebenso zur Montage einer Okularkamera verwendet werden. Je nach Art des verwendeten Fernrohrs muss die Montage der Komponenten auf die jeweiligen Bauformen angepasst werden.

Bei der Beobachtung mit einem Fernrohr schneiden sich die Abbildungsstrahlen im Regelfall in der Strichkreuzebene, werden vom Okular nochmals gebündelt und bilden anschließend einen Brennpunkt im Auge des Betrachters. Die Nachbildung dieses Strahlenverlaufs unter Verwendung einer Okularkamera anstelle des menschlichen Auges kann prinzipiell durch zwei Varianten realisiert werden. Zum einen durch die Nachbildung des natürlichen Strahlengangs (Beobachtung mit menschlichen Augen) und zum anderen durch die Montage des CCD-Sensors direkt anstelle des Okulars in oder hinter der Strichkreuzebene.

Bei der ersten Variante wird der Strahlengang durch ein zusätzliches Linsensystem derart verändert, dass sich die Strahlen sowohl in der Strichkreuzebene als auch auf dem CCD-Sensor schneiden. So bleibt einerseits das Strichkreuz im Kamerabild sichtbar und andererseits der

Fokussierbereich des Fernrohrs erhalten. Durch den Verzicht auf das zusätzliche Linsensystem und der Ersatz des Okulars durch eine CCD-Kamera (Variante zwei) wird die Anzahl der genauigkeitsmindernden Parameter der Optik, bspw. optischer Verzeichnungen, minimiert. Der daraus resultierende Vorteil einer verbesserten Bildqualität geht einher mit einem weitaus geringeren Platzbedarf der optischen Komponenten.

Um im gesamten Entfernungsbereich scharfe Bilder zu erhalten, muss der CCD-Sensor in der Strichkreuzebene angebracht werden. Ohne eine konstruktive Veränderung des Alignierfernrohrs ist eine Montage des Sensors jedoch nur hinter dieser Ebene möglich. Durch eine zusätzlich auf dem Objektiv angebrachte divergente Linse kann der Schnittpunkt des Strahlengangs jedoch um den Abstand zwischen Strichkreuz- und Sensorebene nach hinten verschoben werden. Als Folge daraus ist das Strichkreuz auf dem Bild des CCD-Sensors nicht sichtbar. Zur Auswertung der Bilddaten ist die Konstruktion ohne ein zusätzliches Linsensystem und einer auf dem Objektiv angebrachten divergenten Linse günstiger, da keine Bildinformationen durch das Strichkreuz verdeckt werden. Desweiteren ist das Vorhandensein einer absoluten Visurmarkierung für das kameraunterstützte Messverfahren nicht nötig, da keine Fernrohrausrichtungen zwischen den einzelnen Messungen nötig sind. Abbildung 1 stellt das Modell einer möglichen Konstruktionsvariante vor. Farblich hervorgehoben sind der zur automatischen Fokussierung angebrachte Schrittmotor (gelb) und die Okularkamera (rot).



**Abb. 1: Alignierfernrohr mit montierter Okularkamera und schrittmotorgesteuerter Fokussierung**

Ohne konstruktive Veränderung des Alignierfernrohrs muss die Motorisierung der Fokussierung ebenfalls von Außen angebracht werden. Als Angriffspunkt eignet sich hier der Fokussiering bzw. -feintrieb des Fernrohrs. Über einen Zahnriemen oder ein Getriebe können die Bewegungen des Antriebs auf die Fokussierung übertragen werden. Durch die Verwendung eines Schrittmotors lassen sich diskrete Positionen der Fokussierlinse direkt und exakt anfahren. Da sich jedoch meist ein gewisses mechanisches Spiel bei der Impulsübertragung zwischen Schrittmotor und Fokussierlinse zeigt, sollte die Positionierung der Fokussierlinse immer in derselben Richtung vorgenommen werden. Ist die Distanz eines Zielpunktes bekannt, kann die Fokussierlinse über den Schrittmotor direkt in die entsprechende Position gebracht werden, wodurch scharfe Abbilder auf dem CCD-Sensor darge-

stellt werden. Liegen jedoch keine Distanzinformationen vor, muss die Steuerung der Fokussierung auf Grundlage der Bildinformationen des CCD-Sensors erfolgen. Hierfür eignet sich ein Verfahren, das die Bestimmung des Bildkontrastmaximums zur Positionsdetektion nutzt (*/KNOBLACH 2009/*).

Für die Ermittlung des Bildkontrasts selbst kann die Varianz der Grauwerte einzelner Pixel eines zentralen Bildausschnitts verwendet werden. Zur Detektion der Position des Kontrastmaximums (bester Fokus) wird im ersten Schritt eine Grobsuche über den gesamten Fokusbereich durchgeführt. Die so bestimmte Position des höchsten gemessenen Kontrast dient im zweiten Schritt zur Definition eines Bereichs für die anschließende Feinsuche. Sind die Grenzen des Untersuchungsbereichs bekannt, kann aus den Kontrastdaten eine Polynomfunktion zweiten Grades interpoliert werden, welche den Bereich des besten Fokus repräsentiert. Die Position des Kontrastmaximums ergibt sich folgend aus den Parametern der Funktion und kann vom Schrittmotor entsprechend angefahren werden.

Zur Erprobung des kameraunterstützten Systems wurde das Fernrohr eines Tachymeters TCA 2003 von Leica als Alignierfernrohr eingesetzt. Dieses Fernrohr wies bereits aus vorhergehenden Anwendungen die Möglichkeit einer Befestigung des automatischen Fokus und der Okularkamera auf. Die Adaption der Befestigungen an gängige Alignierfernrohre sollte jedoch ohne Schwierigkeiten möglich sein und wurde bereits realisiert. Abbildung 2 (links) zeigt die am Fernrohr montierte Okularkamera und die Motorisierung der Fokussierung. Anstelle der am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich entwickelten Okularkamera kann auch die verwendete Basiskamera (AVT Guppy F-080B oder vergleichbare Alternativen) über einen entsprechenden Adapter direkt am Okular befestigt werden (Abb. 2, rechts).



**Abb. 2:** (links) Leica TCA 2003 mit aufgesetzter Okularkamera und montiertem Schrittmotor, (rechts) Basiskamera AVT Guppy F-080B (*/AVT 2009/*)

Die Entwicklungen der eingesetzten Okularkamera hatte in der ursprünglichen Anwendung vor allem eine Reduzierung der Kameragröße zum Ziel, wodurch das Durchschlagen des Tachymeterfernrohrs weiterhin ermöglicht wurde. Dies ist bei einem Alignierfernrohr nicht nötig. Folglich kann bei der Motorisierung ebenso auf ein zu-

sätzliches Getriebe verzichtet und die Fokussierung über einen Zahnriemen direkt durch einen Schrittmotor angetrieben werden.

### 3 Systemaufbau und Zielzeichen

Der grundlegende Systemaufbau des kameraunterstützten Alignements entspricht in den Basiskomponenten dem eines klassischen geometrischen Alignements, welches aus einem Alignierfernrohr und passenden Zielzeichen (Miren) besteht. Der wesentliche Unterschied besteht jedoch in der Ausgestaltung der Komponenten. So kommt beim kameraunterstützten Aligement ein Fernrohr mit montiertem CCD-Sensor und einer automatisierten Fokussierung in Kombination mit darauf abgestimmten Zielzeichen zur Anwendung. Als einzige zusätzliche Komponente wird ein mobiler Rechner eingesetzt, welcher den Messablauf steuert. Die Systemkomponenten sind in Abbildung 3 dargestellt und werden im Folgenden genauer erläutert.



**Abb. 3:** Übersicht der Systemkomponenten

Um die Ablagen der einzelnen Zielzeichen auf der Alignierlinie automatisch und kameraunterstützt zu detektieren, müssen flächige Zielzeichen eingesetzt werden, die kameratechnisch auswertbare Merkmale aufweisen. Diese Merkmale dienen der Ermittlung von Kamerakalibrierparametern, welche Relationen zwischen der Pixelgröße des eingesetzten CCD-Sensors und einer Positionsänderung des Zielzeichens (Ablage) in der jeweiligen Distanz herstellen. Als Beispiel: in einer Distanz von 10m entspricht die Positionsänderung des Zielzeichenabbildes auf dem CCD-Sensor von 1px einer Positionsänderung des Zielzeichens von 1mm, in einer Distanz von 20m einer Positionsänderung von 2,3mm. Da das Abbildungsverhalten des Alignierfernrohrs im Allgemeinen weder zur Distanz des Zielzeichens noch zur Position der Fokussierlinse linear ist, muss jedes Zielzeichen entsprechende Merkmale zur Kalibrierung aufweisen.

Als gut detektierbare flächige Merkmalsstruktur der Zielzeichen eignen sich Schachbrettmuster (Abb. 4, links). Die Größe der einzelnen Schachbrettfelder muss bekannt sein und kann der entsprechenden Distanz der Zielzeichen angepasst werden. Zur automatischen Detektion der Schachbrettecken (SBE) lassen sich Bildverarbeitungsalgorithmen der Photogrammetrie oder der Computer Vision einsetzen (z.B. die Funktion `cvFindChessboardCorners` der Bildverarbeitungsbibliothek `OpenCV`).

Die weitere Auswertung und Verarbeitung der Bilddaten wird im nächsten Kapitel beschrieben.

Alternativ zu einem Schachbrettmuster kann auch ein Zielzeichen aus konzentrischen Ringen (Abb. 4, rechts) verwendet werden. Voraussetzung hierfür ist, dass das Zielzeichen eine ausreichende Größe besitzt, die in Abhängigkeit von der Distanz durch geeignete Bildverarbeitungsprozesse auswertbar ist. Desweiteren müssen die Radien der konzentrischen Ringe mit entsprechender Genauigkeit bekannt sein.

Bei vielen Alignierausrüstungen sind die Zielzeichen bereits als konzentrische Ringe ausgebildet, sodass sie bei entsprechender Größe direkt zur automatisierten Auswertung verwendet werden können. Ausgehend vom Koordinatenursprung, welcher durch das Zentrum der Ringe definiert ist, lassen sich Polarkoordinaten für beliebige Punkte auf den Ringkanten bestimmen. Die Ausrichtung der Schnittachsen des Koordinatensystems kann dabei beliebig definiert werden, wird aber zweckmäßig horizontal bzw. vertikal festgelegt. Anschließend folgt eine Umwandlung in kartesische Koordinaten und eine Auswertung ähnlich wie bei der Verwendung des Schachbrettmusters.



Abb. 4: (links) Zielzeichen mit Schachbrettmuster, (rechts) flächiges Zielzeichen bestehende aus konzentrischen Ringen

Das Alignierinstrument und die Miren werden im Allgemeinen auf Dreifüßen oder speziellen Zentriervorrichtungen (z.B. Freiburger Kugel) montiert. Diese Zentriermöglichkeiten können bei den Referenzpunkten beibehalten werden und ermöglichen im Falle der Zentrierung mit der Freiburger Kugel eine Zentriergenauigkeit bis 0,1 Millimeter.

Da die Alignementspunkte nahezu in einer Flucht entlang der Alignementslinie stationiert sind, entstehen Verdeckungen, die entweder durch die Ausrichtung oder durch die Beschaffenheit der Zielzeichen behoben werden können. Zielzeichen können beispielsweise in die Messlinie geklappt werden, nebeneinander stehen, über Strahlteiler eingeblenet werden oder auf durchsichtigen Folien angebracht sein, sodass sie nur im fokussierten Bereich sichtbar werden. Geht man dabei von einer bestehenden Alignementslinie aus, die durch das neue System überwacht werden soll, ist eine Anordnung der Zielzeichen

nebeneinander nicht möglich. Desweiteren wird durch den Einsatz eines Strahlteilers oder von durchsichtigen Folien die Qualität der Bilddaten negativ beeinflusst. Ein Verfahren zum Eindrehen der Zielzeichen in eine definierte Ziellinie wird bei /MORCOM, APPERLEY, BROWN 2002/ dargestellt. Dabei werden die Zielzeichen durch Funk gesteuert, über einen Drehmechanismus in die Ziellinie geklappt und durch eine geeignete Arretierung während der Messung fixiert (Abb. 5, rechts).

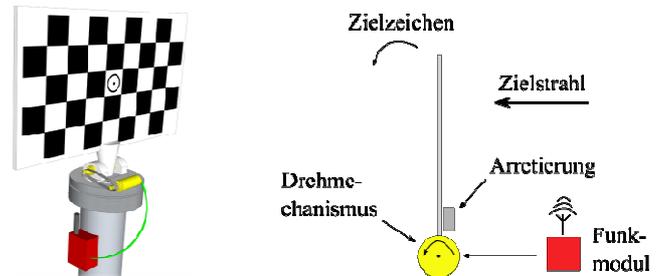


Abb. 5: (links) Modell eine funkgesteuert klappbaren Zielzeichens, (rechts) Seitenansicht des Zielzeichens mit Funkmodul und Drehmechanismus

Die Drehbewegung kann dabei durch Magnete ausgelöst oder ähnlich dem Prinzip der Fokussteuerung über Schrittmotoren in Kombination mit einem Zahnriemen herbeigeführt werden. Die Anschlussvorrichtung zur Zentrierung, beispielsweise der Steckzapfen, wird durch zwei Führungen ergänzt, die eine Welle lagern. Das Zielzeichen ist zwischen den Führungen fest mit der Welle verbunden und somit radial zur Wellenachse kippbar. (Abb. 5, links). Initialisiert das Funkmodul eine Drehbewegung, überträgt der Schrittmotor über einen Zahnriemen die Kraft auf die Welle, wodurch das Zielzeichen in die Alignementslinie hinein- oder herausgeklappt wird. Verdeckungen von Zielzeichen können somit ausgeschlossen und der Messprozess zunehmend automatisiert werden.

## 4 Messung und Auswertung

Das kameraunterstützte Alignierfernrohr wird zu Beginn der Messung auf einen der Referenzpunkte außerhalb des Bereichs der zu erwartenden Bauwerksbewegung montiert und horizontalisiert. Auf dem zweiten Referenzpunkt am Ende der Alignementslinie wird ein kameradetektierbares Zielzeichen aufgebracht und ebenfalls horizontalisiert. Die Zielzeichen sind weiterhin so auszurichten, dass die Zielstrahlen möglichst orthogonal auf die Schachbrettoberfläche treffen. Eine eventuell auftretende Abweichung bei der Horizontalisierung oder der orthogonalen Ausrichtung kann durch das Kamerasystem aufgedeckt werden. Entsprechende Neigungen wirken sich im Kamerabild als Scherungen der ursprünglich quadratischen Schachbrettfelder aus. Mithilfe dieser Scherparameter lässt sich die Ausrichtung und Horizontalisierung der Zielzeichen korrigieren bis ein Scherminimum erreicht wird. Damit lässt sich zugleich die Arretierungsposition (beziehungsweise die Schrittmotorposition des optimalen Einklappwinkels) des Einklappmechanismus justieren. Verbleibende Restnei-

gungen werden bei der Kalibrierung des Systems berücksichtigt. Bei der eigentlichen Messung wird weiterhin davon ausgegangen, dass beide Referenzpunkte keinerlei Bewegung unterliegen und somit als starr angesehen werden können. Nach der Montage des kompletten Systems erfolgt die Bestimmung des Referenzpunktes  $R$  am Ende der Alignementslinie. Mithilfe der Kamera wird die Bildkoordinate  $(x_{R(0)}, y_{R(0)})$  der absoluten Zielmarke oder eines signifikanten Zielzeichenpunktes (beispielsweise die obere linke Schachbrettecke) subpixelgenau detektiert. Dazu können beispielsweise Algorithmen aus dem Bereich der Kantendetektion zum Einsatz kommen. Betrachtet man diese erste Messung als Nullmessung, beschreiben die gemessenen Bildkoordinaten die Lage der Alignementslinie zur Epoche Null.

Im Gegensatz zum klassischen geometrischen Alignment ist es beim kameraunterstützten Alignment nicht möglich, die Alignementslinie bei Folgemessungen durch direktes Anzielen der Zielmarke wiederherzustellen. Grund hierfür ist die Montage des CCD-Sensors hinter der Strichkreuzebene, wodurch das Strichkreuz nicht auf dem Sensor abgebildet wird. Veränderungen der Alignementslinie zwischen Null- und Folgemessung müssen daher mathematisch berücksichtigt werden.

Werden bei den Folgemessungen ebenfalls Bildkoordinaten des Zielzeichens am Referenzpunkt  $(x_{R(n)}, y_{R(n)})$  bestimmt, stellen diese den Verlauf der Alignementslinie zur Folgemessung dar. Diese werden im allgemeinen Fall von den Bildkoordinaten der Nullmessung abweichen. Die Differenz der Bildkoordinaten stellt das Offset  $(\Delta x_R, \Delta y_R)$  der Alignementslinie zwischen Null- und Folgemessung dar.

$$\Delta x_R = x_{R(0)} - x_{R(n)}, \quad \Delta y_R = y_{R(0)} - y_{R(n)} \quad (1)$$

Dieser mathematische Bezug muss im Folgenden zur Bestimmung der Punktablagen für jeden Alignementspunkt berücksichtigt werden.

Zur Bestimmung der Punktablagen werden die Bildkoordinaten der Schachbrettecken durch Bildverarbeitungsalgorithmen bestimmt. Dieser Messvorgang wird für jeden Alignementspunkt wiederholt und liefert als Ergebnis die Koordinaten der Eckpunkte in Pixel (Punktraster). Da die Eckendetektion während der Nullmessung ebenfalls für alle Alignementspunkte durchgeführt wird, stehen sowohl für die Nullmessung  $(x_{A(0)}, y_{A(0)})$  als auch für die Folgemessungen  $(x_{A(n)}, y_{A(n)})$  spezifische Koordinatensätze zur Verfügung. Diese werden anschließend durch eine ebene Transformation  $A$  aufeinander abgebildet.

$$A = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} + \mu \begin{pmatrix} \sin \alpha & \cos \alpha \\ \cos \alpha & -\sin \alpha \end{pmatrix} \quad (2)$$

- $\mu$  Maßstab der Abbildung,
- $\alpha$  Rotationswinkel zw. den Koordinatensystemen

Die Transformation liefert u.a. Translationsparameter  $t_x$  und  $t_y$  (in Pixel), die sowohl eine Veränderung der Alignementslinie als auch eine Veränderung der Alignementspunkte beinhalten. Erst nach der Korrektur um die Bildkoordinatendifferenz der Referenzpunkte (Offset der Alignementslinien) erhält man die Positionsänderung der Alignementspunkte  $(\Delta x_A, \Delta y_A)$  in Pixel.

$$\Delta x_A = t_x + \Delta x_R, \quad \Delta y_A = t_y + \Delta y_R \quad (3)$$

Um Aussagen über die absoluten Positionsänderungen treffen zu können, müssen diese Pixeldifferenzen noch in absolute Werte umgerechnet werden. Hierzu wird eine Transformation zwischen den Koordinaten der Schachbrettecken in Pixel und ihren entsprechenden metrischen Koordinaten durchgeführt, welche z.B. aus einer vorhergehenden Kalibrierung des Schachbretts vorliegen. In Anbetracht des sich ergebenden kleinen Abbildungsbereichs und unter Berücksichtigung der nur minimalen Veränderung der Alignementslinie zwischen Null- und Folgemessung können evtl. vorhandene optische Verzerrungen durch eine lineare Funktion berücksichtigt werden. Ebenso lassen sich mithilfe linearer Funktionen eine durch die Montage der Okularkamera bedingte Verdrehung und Verkippung des CCD-Sensors sowie eine unterschiedliche Skalierung der Pixelgröße entlang der Sensorachsen berücksichtigen (*KNOBELACH 2009*). Die Einflüsse können durch eine Affintransformation  $A$  ohne Translation modelliert werden.

$$A = \begin{pmatrix} \mu_x & 0 \\ 0 & \mu_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \lambda \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (4)$$

- $\mu_x, \mu_y$  Skalierungsfaktoren der Sensorachsrichtungen,
- $\lambda$  Scherfaktor,
- $\alpha$  Rotation des CCD-Sensors orthogonal zur Sensorebene

Die absoluten Positionsänderungen im metrischen Maß ergeben sich nach Multiplikation der Pixeldifferenzen mit den Skalierungsfaktoren der Transformation zu:

$$\Delta x_A [m] = \Delta x_A [px] \cdot \mu_x, \quad \Delta y_A [m] = \Delta y_A [px] \cdot \mu \quad (5)$$

Eine Zusammenstellung des kameraunterstützten Messablaufes der Null- und Folgemessung wird mit Angaben zu den mathematischen Zusammenhängen und resultierenden Größen in Tabelle 1 dargestellt.

## 5 Praktischer Einsatz und Ausblick

Kriterien für den Einsatz eines Messsystems sind die zu erreichenden Genauigkeiten und die Effizienz des Messablaufes. Der hohe Automatisierungsgrad des Messsystems, welches prinzipiell beobachterunabhängig allein durch eine Software gesteuert werden kann, stellt die Grundlage zum Erreichen einer maximalen Effizienz des Messvorgangs dar. Zur Abschätzung der zu erreichenden Systemgenauigkeit wurden die Standardabweichungen

**Tab. 1: Zusammenstellung des Messablaufs und der mathematischen Zusammenhänge**

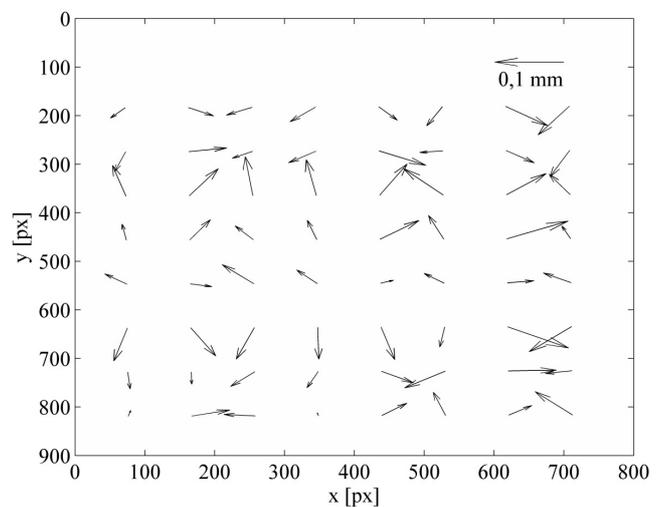
Nullmessungen	Folgemessungen in drei Schritten		
	1 <sup>*)</sup>	2 <sup>**)</sup>	3 <sup>**)</sup>
Koordinatenbestimmung des Referenzpunktes [px] <b><math>\mathbf{x}_R(0), \mathbf{y}_R(0)</math></b>	Koordinatenbestimmung des Referenzpunktes [px] <b><math>\mathbf{x}_R(n), \mathbf{y}_R(n)</math></b>	Bestimmung der Koordinaten des Alignmentpunktes [px] <b><math>\mathbf{x}_A(n), \mathbf{y}_A(n)</math></b>	Schachbrettkalibrierung (Affintransformation) <b><math>\mu_x, \mu_y</math></b>
Koordinatenbestimmung der Alignmentpunkte [px] <b><math>\mathbf{x}_A(0), \mathbf{y}_A(0)</math></b>	Bestimmung des Alignmentlinien-Offsets [px] <b><math>\Delta \mathbf{x}_R = \mathbf{x}_R(0) - \mathbf{x}_R(n)</math></b> <b><math>\Delta \mathbf{y}_R = \mathbf{y}_R(0) - \mathbf{y}_R(n)</math></b>	Translationsbestimmung zw. Null- und Folgemessung (ebene Transformation) [px] <b><math>t_x, t_y</math></b>	Bestimmung der absoluten Punktablagen [mm] <b><math>\Delta \mathbf{x}_A = (t_x + \Delta \mathbf{x}_R) \mu_x</math></b> <b><math>\Delta \mathbf{y}_A = (t_y + \Delta \mathbf{y}_R) \mu_y</math></b>
Definierte Referenzlinie zur Epoche Null	*) einmalig, am Beginn der Folgemessung		***) für jeden Align.-Pkt. zu wiederholen

der photogrammetrischen Bildverarbeitungsalgorithmen (Standardabweichung des Mittelwertes einer Pixelkoordinate für eine große Anzahl von Bildmessungen) und das Auflösungsvermögen des Systems unter Laborbedingungen bestimmt. Die Messdaten wurden anhand von Zielzeichenmessungen in Entfernungen zwischen 5 und 21m ermittelt. Die Untersuchungsergebnisse der bildbasierenden Punktbestimmung ( $\sigma_P = 0,034px$ ) stellen das aktuell zu erreichende Genauigkeitsniveau intensitätsbasierender Matchingverfahren dar. Durch die Anwendung des Kalibriermodells kann diese Standardabweichung in eine metrische Unsicherheit der Punktlage von  $\sigma_P = 0,048mm$  transformiert werden, was im Vergleich zum klassischen Verfahren (Standardabweichung einer Punktweisung  $\sigma_P = 0,80mm$ ) eine deutliche Genauigkeitssteigerung aufzeigt (JULLRICH 2010).

Neben der zu erreichenden Genauigkeit ist insbesondere der minimale Punktabstand von Interesse, der durch das System detektiert werden kann. Diesbezügliche Untersuchungen des Auflösungsvermögens wurden unter Laborbedingungen vorgenommen und unterstreichen das hohe Genauigkeitsniveau des Messsystems. Verschiebeträge im Bereich von  $7\mu m$  konnten für eine Distanz von 21m detektiert werden. Erste Feldversuche zeigten jedoch ein ca. 10fach schlechteres Auflösungsvermögen unter realen Messbedingungen, womit Verschiebungsbeträge im hundertstel Millimeterbereich nachgewiesen werden können. Entsprechende Verschiebungsbeträge können durch das geometrische Alignment nicht aufgelöst werden.

Damit derartige Genauigkeitsbereiche erreicht werden können, müssen die Algorithmen zur Eckendetektion zuverlässige Ergebnisse liefern. Untersuchungen zeigten, dass die Kanten der einzelnen Schachbrettfelder eine Länge von ca. 20px nicht unterschreiten sollten, was z.B. für eine maximale Zielzeichenentfernung von 100m einer metrischen Längenangabe von vier Zentimetern entspricht. Entsprechend der Länge der Alignmentlinie ist die Struktur des Zielzeichens zu wählen. Anhand dieser regelmäßigen Zielzeichenstruktur wurden die optischen Eigenschaften des Systems untersucht. Ein ausschlagge-

gendes Kriterium zur Beurteilung der Qualität des optischen Systems stellen die optischen Verzeichnungen dar. In der Photogrammetrie werden diese systematischen Effekte häufig im Kalibriermodell durch eine geeignete Parametrisierung berücksichtigt. So auch im bereits beschriebenen Modell der Schachbrettkalibrierung. Trägt man die während der Kalibrierung bestimmten Klaffungen der detektierten Schachbrettpunkte (bezogen auf das kalibrierte Schachbrettmuster) in einem Bildkoordinatensystem (CCD-Sensorebene) auf, lassen sich die verbleibenden Abweichungen visuell darstellen (Abb. 6).



**Abb. 6: Klaffungen der Schachbrettpunkte bezogen auf das kalibrierte Schachbrettmuster**

Es werden die Klaffungen für eine Distanz von 12m dargestellt, welche repräsentativ für die Untersuchungsergebnisse größerer Distanzen steht. Aus der Abbildung wird deutlich, dass keinerlei verbleibende Systematiken vorhanden sind. Das verwendete Kalibriermodell rechtfertigt folglich seine Anwendung.

Weiterhin ist das Aufwärmverhalten des CCD-Sensors zu berücksichtigen, welches die Langzeitstabilität der kameradetektierten Daten beeinflusst. Unter konstanten atmosphärischen Bedingungen wurden Messungen auf ein

stabiles Zielzeichen über einen Zeitraum von bis zu 60 Stunden vorgenommen. Es zeigte sich, dass der CCD-Sensor nach einer Aufwärmzeit von ca. sechs Stunden konstante Messwerte liefert. Verzichtet man auf diese Aufwärmzeit sind Drifterscheinungen der horizontal- und Vertikalrichtung von 0,1mgon/h zu verzeichnen. Für eine Distanz von 100m entspricht das einer Ablage von ca. 0,15mm, was etwa der Zentriergenauigkeit entspricht. In Abhängigkeit von der Anzahl der zu messenden Alignementspunkte wird die Zeitspanne der Durchführung eines vollständigen kameraunterstützten Alignements wesentlich geringer ausfallen, wodurch derartige Drifterscheinungen für entsprechend hohe Genauigkeitsniveaus nahezu zu vernachlässigen sind. Im Allgemeinen ist das Messsystem jedoch für den Dauerbetrieb konzipiert, wodurch die Aufwärmzeit vor dem Beginn der Dauermessung problemlos zu berücksichtigen ist und somit zuverlässige Messwerte aufgezeichnet werden können.

Bei der Bauwerksüberwachung ist neben der Bestimmung des aktuellen Bauwerkszustandes die Analyse des Langzeitverhaltens von wesentlicher Bedeutung. Bauwerkszustände sollen möglichst genau präzisiert werden können, um eventuell auftretende Gefahrenszenarien zu identifizieren und/oder vorzubeugen. Für das Alignement besteht damit die Notwendigkeit einer Verknüpfung von klassisch durchgeführten Alignementsmessungen zu kameraunterstützten Messungen. Als ausschlaggebender Parameter ist dabei die unterschiedliche Ausrichtung der Alignementslinien zwischen dem klassischen Verfahren und dem kameraunterstützten Verfahren zu betrachten. Zur Berücksichtigung dieses Problems gibt es mehrere Möglichkeiten. Die neuen flächigen Zielzeichen können mithilfe eines genau definierten Punktes an die Position der ursprünglichen Miren montiert werden. Als definierter Punkt eignet sich dabei beispielsweise eine markierte Schachbrettecke oder bei der Verwendung von konzentrischen Kreisen deren Zentrum.

Anhand dieser Punkte lässt sich eine mathematische Korrektur, ähnlich der Wiederherstellung der Alignementslinie zur Folgemessung, durchführen. Die Bezugspunkte beim kameraunterstützten- und klassischen Verfahren sind demnach genau definiert und können für den Referenzpunkt am Ende der Alignementslinie durch das kameraunterstützte Messsystem in Pixelkoordinaten bestimmt werden. Die daraus resultierenden Offsets der Alignementslinienendpunkte  $(\Delta x_L, \Delta y_L)$  zeigen die unterschiedlichen Orientierungen auf und können in Gleichung 5 (absolute Punktablagenbestimmung) wie folgt berücksichtigt werden:

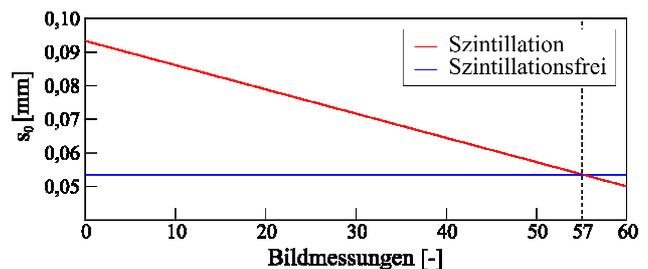
$$\begin{aligned} \Delta x_A [m] &= (\Delta x_A - \Delta x_L) [px] \cdot \mu_x \\ \Delta y_A [m] &= (\Delta y_A - \Delta y_L) [px] \cdot \mu_y \end{aligned} \tag{6}$$

Die so ermittelten Ablagen  $(\Delta x_A, \Delta y_A)$  drücken die aktuell vorhandenen Punktablagen bezogen auf die Alignementslinie des klassischen Verfahrens aus. Zur Prüfung der Ergebnisse oder als weitere Variante kann

eine kameraunterstützte Alignementsmessung direkt im Anschluss an eine klassische Messung folgen. Geht man dabei davon aus, dass zwischen beiden Messungen keine Deformationen des zu beobachtenden Objekts stattfinden, kann die klassisch durchgeführte Messreihe mit den detektierten Positionsdifferenzen der kameraunterstützten Messreihe direkt in Bezug gebracht und somit weitergeführt werden. Für all diese Varianten ist damit die Fortführung der klassischen Alignementsmessungen unter Verwendung der Kameratechnik möglich.

Neben dem automatisierten Messprozess und dem höheren Genauigkeitspotenzial können zusätzliche Effekte der Refraktion und Szintillation (Luftbildflimmern) betrachtet und minimiert werden (CASOTT, DEUSSEN 2000). Werden anstelle einzelner Bilder ganze Bildsequenzen aufgenommen und ausgewertet, können insbesondere die Effekte der Szintillation minimiert werden. Diese atmosphärische Erscheinung wird durch die zeitliche- und räumliche Variation des Brechungsindex der Luft verursacht und ist als sogenanntes Bildpunkttauchen im Bild der CCD-Kamera sichtbar. Zur Bildung eines mathematischen Modells kann das Bildpunkttauchen als Variation um einen Mittelwert aufgefasst werden und durch Aufnahme ganzer Bildsequenzen minimiert werden. Dieser Effekt wird insbesondere bei der Kalibrierung des Systems deutlich.

Betrachtet man die Standardabweichung der Gewichtseinheit, die während der Kalibrierung durch eine vermittelnde Ausgleichung bestimmt wird, zeigt sich, dass bereits nach einer Messdauer von ca. 1,9 Sekunden (entspricht 57 Bildern bei einer Bildaufnahme rate von 30Hz für die vorliegende Okularkamera) und Mittelung das Genauigkeitsniveau einer szintillationsfreien Messung erreicht wird (ULLRICH 2010).



**Abb. 7: Regressionsgeraden der Standardabweichungen (Gewichtseinheit) für unterschiedliche Anzahlen an Bildmessungen**

Abbildung 7 stellt die Regressionsgeraden der Standardabweichungen für eine unterschiedliche Anzahl an Bildmessungen (und Mittelungen) dar.

Neben der in diesem Artikel erläuterten Anwendungsmöglichkeit des kameraunterstützten Messsystem zur Realisierung eines geometrischen Alignements lassen sich eine Vielzahl von geodätischen Messverfahren identifizieren, die einen Einsatz des vorgestellten Systems rechtfertigen. Dazu gehört u.a. die Beobachtung des Schwingungsverhaltens von Brücken und Türmen (BÜRKI U. A. 2010). Allen gemein ist die Nutzung der

Kameratechnik zur beobachterunabhängigen und somit zuverlässigeren und genaueren Bestimmung unterschiedlichster Messelemente, welche den entscheidenden Vorteil des Messsystems darstellt.

## 6 Literatur

- AVT (2009): Allied Vision Technologies GmbH - AVT Guppy, Technical Manual, V7.1.0, 2009
- Bürki, B. u.a. (2010): A versatile usable digital clip-on measuring system for total stations. In: Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010 International Conference on; 15.-17. Sept. 2010, ETH Zürich, S. 1-10.
- Casott, N.; Deussen, D. (2000): Vom Bildflimmern zur refraktionskorrigierten Vertikalwinkelmessung. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN): 107 (8/9) S.286-292.
- Guillaume, S.; Bürki, B. (2008): Digital Astro-Geodetic online Observation System DAEDALUS. Geodesy and Geodynamics Lab., ETH Zürich. User manual version 1.0
- Knoblach, S. (2009): Entwicklung, Kalibrierung und Erprobung eines kameraunterstützten Hängetachymeters. Dissertation, Geodätisches Institut, TU Dresden. URL: <http://dgk.badw.de/fileadmin/docs/c-655.pdf>
- Morcom, J.; Apperley, R.; Brown, L. (2002): Multi position alignment system. European patent application, EP 1 267 145 A2. Date of filing: 13.06.2002, Date of publication: 18.12.2002
- Ullrich, R. (2010): Refraktion und Szintillation beim geometrischen Alignment. Diplomarbeit, Geodätisches Institut, TU Dresden – unveröffentlicht. URL: (<http://trimr.de/ZFN>)

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. ROBIN ULLRICH

Prof. Dr.-Ing. habil. MICHAEL MÖSER

TU Dresden, Geodätisches Institut, 01062 Dresden

E-Mail: [Robin.Ullrich@TU-Dresden.de](mailto:Robin.Ullrich@TU-Dresden.de)

[Michael.Moeser@TU-Dresden.de](mailto:Michael.Moeser@TU-Dresden.de)

Dr.-Ing. STEFAN KNOBLACH

Glaviusstraße 32, 96047 Bamberg

E-Mail: [mail@stefan-knoblach.de](mailto:mail@stefan-knoblach.de)

Manuskript eingereicht:

Manuskript angenommen: