

Instrumente und Einsatzmöglichkeiten der indirekten Streckenmessung

Matthias Fuhrland

Zusammenfassung

Am Geodätischen Institut der TU Dresden fanden in den letzten Jahren zahlreiche Untersuchungen zur Streckenmessung mit externer Auslenkung des Zielstrahles statt. Zu den instrumentellen Entwicklungen zählen das Argus-Auge, das Tachymeter-Aufsatzsystem und ein Reflexgoniometer. Dieser Beitrag soll einen Überblick über die verschiedenen Technologien und Anwendungsmöglichkeiten geben.

Summary

There were a lot of investigations concerning ranging with external beam deflection carried out at the Geodetic Institute of the TU Dresden in the last few years. The developments of instruments included the Argus-Eye, the Total Station Attachment System and a reflex goniometer. This article gives a review of the different technologies and possible applications.

1 Strahlauslenkung durch das Argus-Auge

1.1 Messprinzip

Das Argus-Auge ist ein Winkelspiegel mit Visureinrichtung, der den Zielstrahl eines Laserdistanzmessers exakt rechtwinklig auslenkt. Die 57 mm großen Spiegel sind auf 3 Bogensekunden genau justiert und besitzen im Wellenlängenbereich von 580 nm bis 920 nm einen Reflexionsgrad von 99 %. Das heißt, Strahlleistung und Remission eines Distanzmess-Lasers werden beim Durchlaufen des Argus-Auges nicht beeinträchtigt. Das Anzielen der Stehachse des Argus-Auges wird durch eine gut sichtbare, schwarz eloxierte Zentrierspitze erleichtert. Durch Messung auf die Rundum-Reflexmarke am unteren Rand oder auf eine grauskalierte Folie an der Rückseite kann die Strecke zum Argus-Auge bestimmt werden. Durch Streckenmessung über die Spiegelflächen kann ein beliebiger

Zielpunkt exzentrisch angemessen werden, wobei noch der innere Lichtweg in Form einer Spiegelkonstante zu berücksichtigen ist. Für die Positionierung des Argus-Auges und die Ausrichtung zu Distanzmesser und Objektpunkt ist das Argus-Auge mit einer Visureinrichtung aus Pentaprisma und Diopter ausgestattet (Abb. 1).

1.2 Geodätische Anwendungen

Da das Prinzip sehr einfach ist, ergibt sich eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten. Bei der *Gebäudevermessung* mit Tachymetern hilft das Argus-Auge, den Arbeitsablauf deutlich schneller und flexibler zu gestalten. Die wichtigsten Einsatzmöglichkeiten sind exzentrisches Einmessen von Orientierungspunkten und Aufnahme von verdeckten Objektpunkten im Innen- und Außenraum von Bauwerken (Fuhrland 2005). Der entscheidende Vorteil liegt in der Einsparung von Tachymeterstandpunkten. Durch temporäre Vermarkung von Orientierungspunkten an den Wänden des Innenraumes können Orientierungsmessungen (Polygonzug) und Erfassung der Raumgeometrie auch zeitlich getrennt ablaufen, was besonders in punkto Personalwirtschaft ein effizienteres Arbeiten ermöglicht. Das Handaufmaß in einem rechtwinkligen Koordinatensystem ist mit Laserdistanzmesser (Disto) und Argus-Auge sehr leicht möglich und ist an einigen Fachhochschulen bereits Bestandteil der Ausbildung von Bauingenieuren und Architekten.

Ein weiterer Vorteil liegt im Einsatz des Argus-Auges bei der reflektorlosen Streckenmessung, wenn dadurch ein *schleifender Schnitt* zwischen Zielstrahl und Objekt-oberfläche vermieden werden kann. Der für eine Signalauswertung notwendige Mindestremissionswert wird bei schleifenden Schnitten oft nicht erreicht, besonders bei spiegelnden oder dunklen Objekt-oberflächen, obwohl die Streckenlänge noch unter der Maximalreichweite des

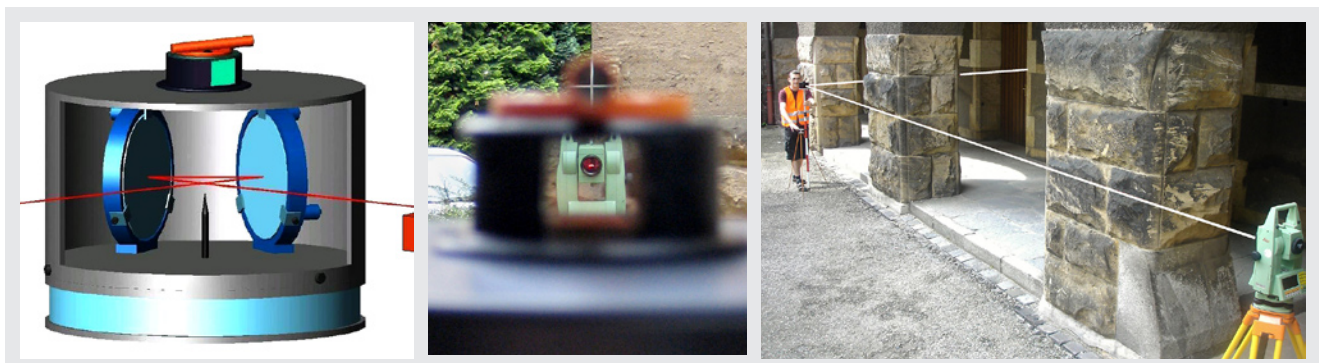


Abb. 1: Prinzip des Argus-Auges

Visureinrichtung

Gebäudevermessung

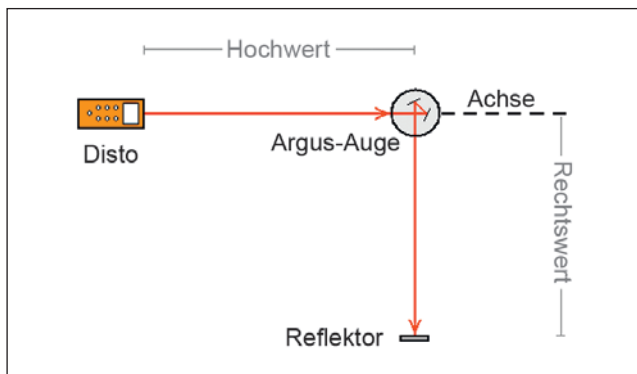


Abb. 2: Rechtwinklige Absteckung mit Disto

Tachymeters liegt. Durch Verwendung des Argus-Auges kann der Auftreffwinkel des Zielstrahles auf die Objekt-oberfläche auf bis zu 100 gon erhöht werden. Testmessungen ergaben, dass dies in den meisten Fällen den Remissionsgrad deutlich anhebt. So macht die Verwendung eines Exzentrums Sinn, auch wenn sie im klassischen Sinne gar nicht notwendig ist. Eine praktische Anwendung, die u. a. vom Stadtvermessungsamt Magdeburg erfolgreich getestet wurde, findet man z. B. beim Messen von Querprofilen in engen Tunnelröhren.

Auf Baustellen kann der Polier oder der Vermessungstechniker mit einem Laserdistanzmesser (Disto) und einem Argus-Auge spielend einfach *rechtwinklige Absteckungen* vornehmen, Koordinaten bestimmen oder kontrollieren (Abb. 2). Die Vorteile für den Nutzer sind hier, dass kein Tachymeter angeschafft und nicht mit Polarkoordinaten gerechnet werden muss. Natürlich lässt sich auch jeder Baulaser oder Rotationslaser rechtwinklig auslenken.

1.3 Industrielle Anwendungen

Die industriellen Einsatzmöglichkeiten von Laserdistanzmessern lassen sich durch ein Argus-Auge immens erweitern und flexibler gestalten, sei es bei der Füllstandsmessung, bei der Positionserfassung in Montageprozessen, bei der Bestimmung von Coildurchmessern, bei der Überwachung von Schließanlagen oder bei der Lagerhaltung mit Portalkränen. Die Entscheidung, welches Messverfahren bei einem Objekt zum Einsatz kommt, kann aus Platzgründen oder aus sicherheitstechnischen Gründen, mangels Begehbarkeit, wegen der Verkabelung oder wegen Ex-Schutz zu Ungunsten eines Laserdistanzmessers ausfallen. Wenn man aber den Zielstrahl einmal oder sogar mehrfach um die Ecke lenken kann, sind die Möglichkeiten, den Laserdistanzmesser für eine Messung zu platzieren, nahezu unbegrenzt. Mit dem Argus-Auge können absolute Strecken und relative Streckenänderungen zu verdeckten Punkten problemlos gemessen werden. Ein weiterer möglicher Einsatzfall ist die permanente Überwachung verdeckt liegender Objektpunkte mit Hilfe eines Interferometers. Allerdings sollte hier mit metallischer anstatt mit dielektrischer Verspiegelung gearbeitet werden.

2 Strahlauslenkung durch Tachymeter-Aufsatzsysteme

2.1 Prinzip

Das modulare Tachymeter-Aufsatzsystem ArgusTAT (Tachymeter-Aufsatz mit Teleskop) ist ein Zusatzinstrument zum herkömmlichen Tachymeter. Es ermöglicht die Vermessung unterirdisch liegender Punkte ausgehend von einem oberirdisch gelegenen Tachymeterstandpunkt. Der horizontale Zielstrahl des Tachymeters wird über ein Spiegelsystem, bestehend aus vier Orthogonalspiegeln (siehe Argus-Auge), auf einen dazu parallelen horizontalen Zielstrahl in variabler Tiefe umgelenkt. Die ersten drei Orthogonalspiegel befinden sich in der Umlenkeinheit, die den Griff des Tachymeters mit dem drehbaren Mittelteil einer Präzisionskonsole verbindet. Umlenkeinheit und Präzisionskonsole bilden das erste Modul, den Tachymeter-Aufsatz ArgusTA. Modul 2 ist ein vertikal am Stativ anzuhängendes Teleskop, welches am untersten Tubus den vierten Orthogonalspiegel trägt. Es ist über einen Seilzug motorisiert ausfahrbar und variiert so die Tiefe des vierten Orthogonalspiegels. Durch die kardanische Aufhängung des Teleskops und Klemmverbindung mit dem Mittelteil der Präzisionskonsole sollte die (vertikale) Teleskopachse genau mit der Stehachse des Tachymeters zusammenfallen. Ein Kreuzschlitten sorgt für einen Lageausgleich zwischen mechanischer und optischer Achse, falls der Stativteller nicht exakt horizontal steht. Die Verwendung eines Spezialstativs garantiert die notwendige Bewegungsfreiheit. Dreht man den Horizontalkreis des Tachymeters, drehen sich die Umlenkeinheit, der Mittelteil der Konsole und das Teleskop mit. Ober- und Unterteil der Konsole sind durch eine Klemmvorrichtung verbunden, so dass die Zwangszentrierung des Tachymeters bei Drehung des Horizontalkreises stehen bleibt (Fuhrland 2007).

Wenn der Tachymeter mittig über einem offenen Schacht steht und das Tachymeter-Aufsatzsystem angehängt wird, kann das Teleskop auf die Tiefe des zu erfassenden Kanals ausgefahren werden. Abb. 3 zeigt den ArgusTAT in halb ausgefahrenem Zustand. Maximale Ausfahrtiefe ist 9,60 m unterhalb der Kippachse. Mit der Drehung des Horizontalkreises des Tachymeters ändert sich auch die Blickrichtung im Schacht. So kann der Kanal im Fernrohr des Tachymeters sichtbar gemacht und die Horizontalrichtung mit dem Tachymeter gemessen werden. Da die mechanische Führung des Teleskops nicht so exakt gearbeitet werden kann, dass die Parallelität zwischen ausgelenktem und originärem Zielstrahl beim Ausfahren des Teleskops erhalten bleibt, ist an dem obersten Tubus ein Feintrieb eingefügt. Fokussiert man mit dem Tachymeter auf ein im untersten Tubus gespanntes Fadenkreuz, kann man dieses mit Hilfe des Feintriebes parallel zum Fadenkreuz des Tachymeters stellen.



Abb. 3: ArgusTAT

Die Geometrie des Tachymeter-Aufsatzes erlaubt es auch, den Zielstrahl des Tachymeters in gewissen Grenzen aus der Horizontalen zu verschwenken. Der Schwenkbereich ist bei großer Ausfahrtiefe durch die Größe des untersten Orthogonalspiegels (16 cm) limitiert, bei geringer Ausfahrtiefe durch die Größe des dritten Orthogonalspiegels. In Abhängigkeit von der Ausfahrtiefe ergibt sich also ein Schwenkbereich zwischen $\pm 0,6$ gon und ± 1 gon. Das heißt, man kann sehr weit in Kanäle hineinsehen, die bis zu 2% Gefälle oder Steigung haben. Größeres Gefälle verkürzt den sichtbaren Bereich. Die Richtung der vertikalen Auslenkung

am Tachymeter (nach oben oder unten) entspricht auch der nach Durchlaufen des untersten Orthogonalspiegels. Der Prototyp wurde für den Einsatz mit einem TCR 1103 oder baugleichen Instrumenten von Leica konstruiert. Hinsichtlich Kippachshöhe und Griffadaption ist für andere Instrumententypen die Umlenkeinheit konstruktiv anzupassen.

2.2 Anwendungen

Die Kombination beider Module ist für den Einsatz im Kanalkataster prädestiniert. Im Gegensatz zu handelsüblichen Messsystemen ist der ArgusTAT in der Lage, dreidimensional Lage und Verlauf eines unterirdischen Kanals zu erfassen. In Kombination mit einem Kanal-messwagen, welcher mit einem beleuchteten Reflexionsprisma ausgerüstet wird, ist die Erfassung von Lage und Höhe des Wagens innerhalb des Kanals möglich, solange dieser vom Schacht bzw. vom Gegenschacht aus sichtbar ist.

Da die meisten Kanäle zwischen zwei Haltungen annähernd geradlinig verlaufen, besteht das Problem lediglich darin, den untersten Orthogonalspiegel vor dem Kanal zu platzieren. Die Ersterfassung von Abwasser-

kanälen und Schachtbauwerken ist damit ebenso möglich wie Deformationsmessung oder die exakte Ortung von Störstellen bei unbekannter Trajektorie. Ein wesentlicher Vorteil des Systems ist, dass die Messung über-tägig erfolgt, so dass die Gesundheit des Messpersonals nicht gefährdet wird. Als technologische Erweiterung ist zurzeit die Entwicklung eines Kanalfahrzeugs mit Kanal-profilscanner in Arbeit.

Der ArgusTAT ist zwar primär für die Vermessung von Abwassersystemen konzipiert, mögliche Einsatzgebiete finden sich aber überall dort, wo schwer zugängliche Hohlräume zu vermessen sind. So wäre bei höherem Genauigkeitspotential zum Beispiel mit dem Instrument die Richtungs- oder Achsenübertragung zwischen verschiedenen Etagen eines Bauwerkes möglich, das heißt also, der Einsatz bei der Bauwerksabsteckung wäre denkbar. Vorstellbar ist dies auch für Tunnel- oder Schachtbauwerke, die maximal 8 m unter der Erdoberfläche liegen. Bei Horizontalabständen von ca. 10 m ist die Genauigkeit für den Einsatz bei der Bauwerksabsteckung schon jetzt ausreichend.

Auch im Bereich der Archäologie und im Bergbau kann das Prinzip angewandt werden, z.B. zur Vermessung unterirdischer Hohlräume oder schwer zugänglicher Kavernen. Erfolgreich getestet wurde hier bereits das Einmessen von unterirdischen Orientierungspunkten für einen Laserscanner, welcher anschließend den unterirdischen Hohlraum scannen konnte. Denkbar ist weiterhin der Einsatz zur Deponievermessung, wahlweise in Kombination mit Inertialmesstechnik, für welche der ArgusTAT die Anfangsrichtung vorgibt (Argus GeoTech 2007).

Der Tachymeter-Aufsatz kann theoretisch durch seine modulare Bauweise auch ohne Teleskop eingesetzt werden (ArgusTA). Mit dem ArgusTA kann der Tachymeter zur Nadirlotung, schrägen Punktübertragung, Teufentmessung und vertikalen Richtungsübertragung in hohen Gebäuden bzw. tiefen Bergbau-, Brunnen- und Tunnel-schächten eingesetzt werden. Praktisch wird es diesen Einsatz kaum geben, da mit der aktuell am Geodätischen Institut stattfindenden Entwicklung eines Hängetachymeters (Knoblach 2006) bereits eine noch bessere und dazu preiswertere Lösung für diese Problematik vorliegt.

3 Strahlauslenkung durch ein Reflexgoniometer

3.1 Prinzip

Ein Ziel des durch die DFG geförderten Projektes »3D-Positionierung mit indirektem Sichtkontakt« war die Entwicklung eines Reflexgoniometers zur zweiachsigen Winkelmessung an einem kardanisch aufgehängten Spiegel (Fuhrland 2008). Der Spiegel wird genutzt, um einen in der Schwenkachse des Kardans verlaufenden

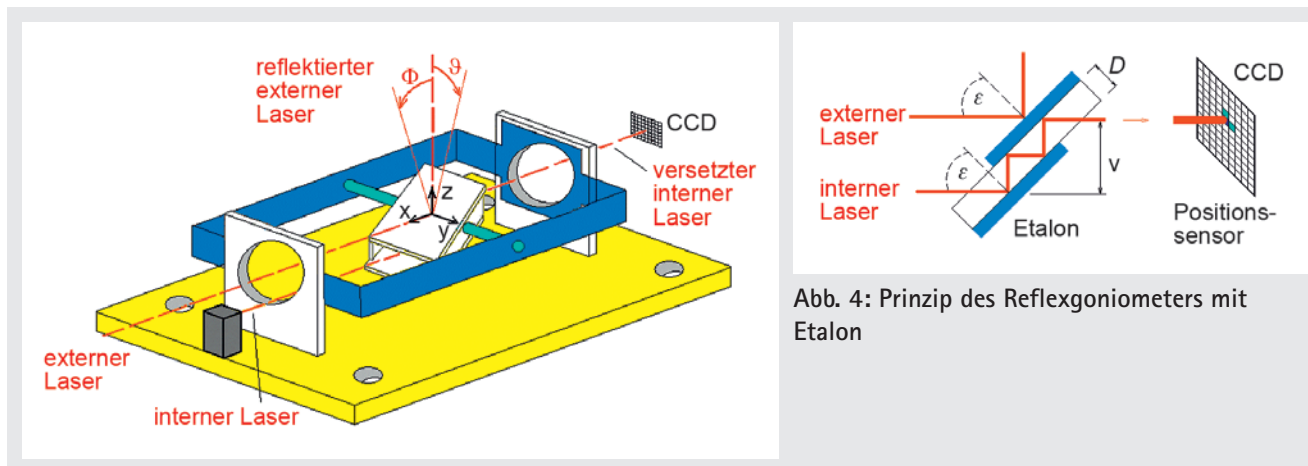


Abb. 4: Prinzip des Reflexgoniometers mit Etalon

Streckenmesslaser definiert auszulernen. Die hochgenaue Messung von Kippwinkel Φ und Schwenkwinkel ϑ des am Spiegel reflektierten Strahls im Koordinatensystem xyz des Kardans war die zu lösende Aufgabe. Der innovative Ansatz besteht darin, planparallel zu dem kardanisch aufgehängten Spiegel ein optisches Ablenkelement zu positionieren, welches gemeinsam mit dem Spiegel gekippt bzw. geschwenkt wird. Dieses Ablenkelement sei entweder eine Planplatte oder vorzugsweise ein Etalon und dient dazu, einen internen Laser, welcher parallel zum externen Laser der Streckenmessung verläuft, in Abhängigkeit von Kippwinkel Φ und Schwenkwinkel ϑ in zwei Dimensionen parallel zu versetzen. Die zweidimensionale Verschiebung des Laserspots wird mit Hilfe eines Positionsdetektors (CCD) hochpräzise gemessen (s. Abb. 4). Der Vorteil der Technologie besteht darin, dass beide Winkel synchron mit einem einzigen Sensor abgegriffen werden, was z. B. für kinematische Anwendungen wichtig ist. Die Kombination aus Kardan, Etalon und Laserspot-Positionsbestimmung sei nachfolgend Reflexgoniometer genannt. Während bei Argus-Auge und Tachymeter-Aufsatzsystem der Winkel der Strahlauslenkung fest definiert ist, kann das Reflexgoniometer den Zielstrahl (externer Laser) in zwei Achsen variabel reflektieren.

Das Etalon besteht aus zwei parallelen Planplatten, deren Oberflächen voll verspiegelt sind. Zwischen den innenliegenden Spiegelflächen wird der interne Laser durch Reflexion parallel versetzt. Die Auflösung des Kippwinkels ist im Vergleich zur Verwendung einer Planplatte als Ablenkelement deutlich höher und kann durch Mehrfachreflexionen nahezu beliebig gesteigert werden, was allerdings in gleichem Maße den Messbereich dieses Winkels reduziert. Die bei der Planplatte relevanten Effekte der Dispersion, Absorption und Polarisationsstreuung treten beim Etalon nicht auf, die Bestimmung des Brechungsindex entfällt und strenge Monochromasie der Strahlungsquelle ist nicht notwendig. Für die in Abb. 5 dargestellte Doppelreflexion ergibt sich der Strahlversatz in Abhängigkeit vom Einfallswinkel ε

$$v = 4 \cdot D \cdot \sin \varepsilon . \tag{1}$$

D entspricht hier dem Abstand der inneren Spiegelflächen, der beim Prototyp 10 mm beträgt. Die geometrische Auflösung steigt mit dem Einfallswinkel. Die Anordnung des Positionsdetektors (CCD) bestimmt also nicht nur den Messbereich, sondern in bestimmten Grenzen auch die erreichbare Auflösung der Winkelmessung. Bei zweiachsiger Winkelmessung, d. h. kardanischem Kippen und Schwenken des Etalons, ergibt sich eine vektorielle Zerlegung des Strahlversatzes in v_y und v_z mit

$$v = \sqrt{v_y^2 + v_z^2} . \tag{2}$$

Der Zusammenhang zum Kippwinkel Φ und zum Schwenkwinkel ϑ ergibt sich über

$$\Phi = 100 \text{ gon} - 2\varepsilon , \tag{3}$$

$$\vartheta = \arctan \frac{v_y}{v_z} . \tag{4}$$

v_y und v_z sind die eigentlichen Messdaten, die mit Hilfe des Positionsdetektors erfasst werden. Kippen und Schwenken des Etalons bzw. der Planplatte bewirken eine planparallele Verschiebung des Laserstrahles ohne Rotation des Strahlprofils.

3.2 Stand der Arbeiten

Es wurde ein Prototyp des Kardans gefertigt und das Prinzip im Laboraufbau getestet. Das kardanisch aufgehängte Etalon wurde aus Zerodur gefertigt und so konstruiert, dass eine Messung in zwei Lagen möglich ist und der Messbereich von $\Phi = \pm 20 \text{ gon}$ bei Doppelreflexion für einen Laserradius von 2,5 mm zur Verfügung steht. Der Messbereich des Schwenkwinkels beträgt damit $\vartheta = \pm 23 \text{ gon}$ bei $\Phi = + 20 \text{ gon}$ und $\vartheta = \pm 20,5 \text{ gon}$ bei $\Phi = - 20 \text{ gon}$. Der Abstand der inneren Spiegelflächen D beträgt 10 mm. Er wurde durch Absolutinterferometrie mit einer Standardabweichung von 10 nm bestimmt. Die Schliffgenauigkeit der Etalonflächen beträgt laut Herstellerangabe ca. 6 nm ($\frac{\lambda}{100}$), die Nichtparallelität (Keilfehler)

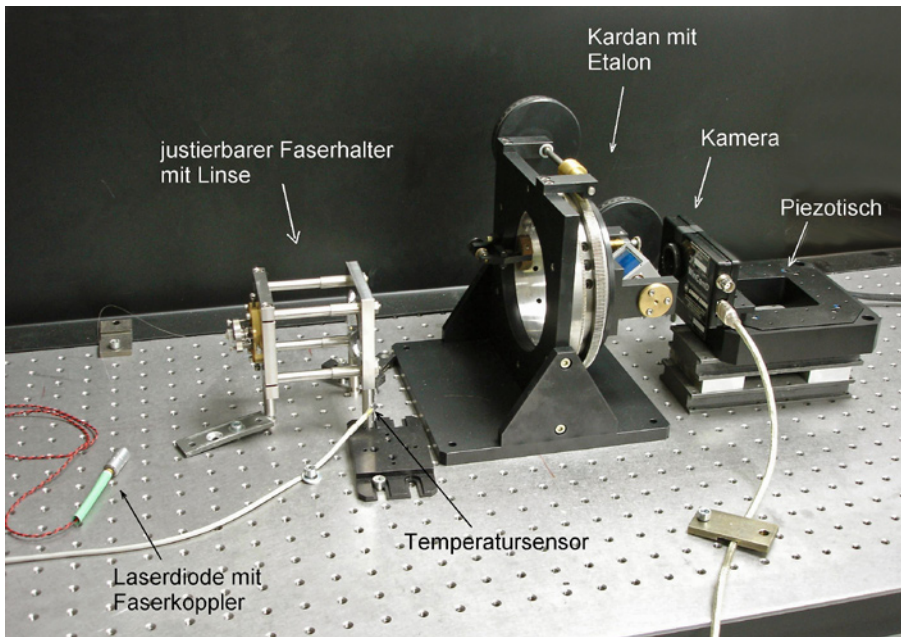


Abb. 5: Versuchsaufbau im Labor

für das Mittel aus 600 Einzelbildern (1 Minute Messzeit) eine Standardabweichung der Laser-spotkoordinaten von $s_{y,z} = 15 \text{ nm}$ (mittlerer Punktfehler nach Helmholtz von 20 nm) bei einer Fokusslänge des Lasers von $0,5 \text{ m}$ empirisch nachgewiesen werden. Das entspräche einer Restabweichung der Kippwinkelmessung von $s_{\phi} = 0,06 \text{ mgon}$. Bei kürzeren Fokusslängen, d.h. kürzerem Abstand zwischen Linse und Kamera, war das Positionsrauschen des Laserspots deutlich geringer und Standardabweichungen unter 10 nm wurden bei Mittelung über 30 s Messzeit erreicht (Fuhrland 2006).

der Etalonflächen beträgt ca. $0,01 \text{ mgon}$. Das Etalon ist in einem Aluminium-Gehäuse gelagert, welches wiederum in der Kippachse des Kardans gelagert ist. Für höchstmögliche Strahlstabilität des internen Lasers wurde das Licht der Laserdiode in eine Faser eingekoppelt, deren anderes Ende in einem Faserpositionierer mit integriertem Linsenhalter aus Invar-Stahl gelagert wurde. Damit wird der interne Laser über das Etalon auf die CCD fokussiert. Dieses etwas aufwändige Laserdiodenmodul sorgte dafür, dass die Strahlstabilität (Richtungsstabilität) des Lasers innerhalb des untersuchten Messzeitraums besser als $s_r = 0,03 \text{ mgon}$ war. Handelsübliche Diodenlaser mit Peltier-Kühlung erreichen nur $s_r = 2 \text{ mgon}$.

Für die Bestimmung der Lage eines Laserspots mit 15 bis $30 \mu\text{m}$ Durchmesser im CCD-Bild wurde ein 3D-Gaußfit in Software umgesetzt. Die erreichte Auflösung liegt für Spotgrößen von ca. $15 \mu\text{m}$ im Bereich weniger nm. Für die Genauigkeitsuntersuchungen wurde die CCD-Kamera auf einem 3D-Piezotisch montiert, der eine Positionsgenauigkeit von 1 nm bei einem Stellweg von $100 \mu\text{m}$ garantiert (Abb. 5). Die Schrittweite des Piezotisches wurde mit der Verschiebung des Laserspots im Bild verglichen. Hier zeigten sich zunächst starke systematische Abweichungen. Die Positionierung eines Temperatursensors an verschiedenen Teilen des mechanischen Aufbaus ergab, dass die Temperatur im Inneren der Kamera selbst die höchste Korrelation mit den gemessenen Spotpositionen besitzt. Die verwendete CCD zeigte aufgrund ihrer Lagerung im Gehäuse nicht nur vertikale Driften mit $2,7 \mu\text{m/K}$, sondern auch horizontale thermische Driften mit etwa $4 \mu\text{m/K}$. In Zeiträumen, wo die thermische Drift linear war, ergab sich nach Korrektur der Drift eine Standardabweichung in einer Achse von weniger als 100 nm für eine Messzeit von zwei Sekunden (Mittel aus 20 Bildern). Bei annähernd gekapseltem Strahlengang sinkt die Standardabweichung um den Faktor 2. Danach konnte

3.3 Mögliche Anwendungen

Das Reflexgoniometer kann wie die festen Spiegelsysteme dazu genutzt werden, Laser oder optische Zielstrahlen innerhalb eines Bezugssystems definiert auszulenkten. Neben industriellen Aufgaben ist die Auslenkung des tachymetrischen Zielstrahles für ausgewählte Positionierungsaufgaben denkbar. In Verbindung mit einem Tachymeter ist das Reflexgoniometer zur schrägen Punktübertragung von unten und von oben einsetzbar. Hierbei wird der horizontale Strahl des Tachymeters von dem im Schacht zu platzierenden Reflexgoniometer vertikal oder schräg ausgelenkt. Die exakte horizontale Ausrichtung der Schwenkachse zum Tachymeter kann durch Autokollimation des Tachymeterfernrohres auf eine der äußeren Spiegelflächen des Etalons erfolgen. In dieser Stellung ist auch die Strecke zwischen Tachymeter und Reflexionspunkt messbar und die Horizontierung des Etalons in Richtung der Schwenkachse kann mit der Horizontierung des Tachymeters abgeglichen werden. Im Gegensatz zu dem Tachymeteraufsatz kann die schräge Punktübertragung über einen sehr großen Bereich des Vertikalwinkels erfolgen.

Für das Reflexgoniometer käme auch eine Nutzung als Abgriffsystem eines zweiachsigen Neigungsmessers bzw. Neigungstisches in Frage. Um den Bezug zur Lotrichtung herzustellen, bieten sich die Autokollimation auf einen Flüssigkeitshorizont oder ein selbsthorizontaler Laser an. Elektronische Neigungssensoren, wie die Nivel20 von Leica oder die Zeromatic von Wyler, erreichen Auflösungen von $0,06 \text{ mgon}$, während die Präzision von den Herstellern mit Faktor 5 schlechter angegeben wird. Hinzu kommt die Nullpunktsdrift, deren Einfluss aber zumindest bei der Zeromatic durch Messung in zwei

Lagen eliminiert wird. Mit Hilfe des Kardans wäre ähnlich wie bei der Zeromatic eine Messung in zwei Lagen möglich. Der eigentliche Vorteil gegenüber diesen Systemen ergibt sich aus dem großen Winkelmessbereich bei annähernd gleicher Auflösung.

Sehr interessant könnte die Anwendung des Reflexgoniometers für ein elektronisches Autokollimationssystem sein. Industrielle Anwendungen ergeben sich im Bereich Optical Tooling, d.h. bei der Prüfung von Werkstücken und Vorrichtungen hinsichtlich Geradheit, Ebenheit, Rechtwinkligkeit, Parallelität etc. Mit festem Fernrohr bzw. Laser und kardanischer Nachführung des Spiegels (Etalons) zur Autokollimation des Fernrohres bzw. Lasers wäre eine Geradlinigkeitsprüfung realisierbar, wobei in jeder Position des Etalons entlang der zu prüfenden Achse die Abweichungen beider Winkel von der Sollstellung direkt vom Reflexgoniometer gemessen werden. Bestehende elektronische Autokollimatoren, wie z.B. das System Elcomat, messen die Position des Bildes der beleuchteten Strichplatte nach der Reflexion mit einem Positionsdetektor oder Zeilensensor. Der Messbereich eines solchen Systems nimmt mit der Entfernung ab und beträgt weniger als 0,75 gon (Schwarz 1995). Im Vergleich zu diesen Systemen wären mit dem Reflexgoniometer wesentlich größere Winkel bzw. deutlich kleinere Krümmungsradien messbar und Messungen über größere Distanzen möglich, da das Etalon nachgeführt wird, anstatt die Position des reflektierten Strahls zu messen. Somit wird der Messbereich in erster Linie durch die Größe der äußeren Spiegelfläche begrenzt, die annähernd das Limit für die streckenabhängige Änderung des lateralen Abstandes zwischen der zu prüfenden mechanischen Achse und der Zielachse darstellt. Der Betrag dieser Änderung entspricht dem Integral des Winkels zwischen den Achsen über die gefahrene Strecke. Beim 35 mm breiten Prototyp des Etalons dürfte sich der laterale Abstand zwar nur um etwa ± 25 mm ändern, die Größe einer äußeren Spiegelfläche lässt sich aber durchaus konstruktiv um den Faktor 10 steigern.

Bei Verwendung eines Tachymeters an Stelle des festen Fernrohres wird der Messbereich der Autokollimation hingegen nicht mehr von der Größe der äußeren Spiegelfläche begrenzt, sondern nur noch vom Winkelmessbereich des Reflexgoniometers. Für die Autokollimation sind dann in jeder Stellung Tachymeter und Reflexgoniometer nachzuführen. Bei beiden Instrumenten sind in kollimierter Stellung jeweils beide Winkel zu messen. In Kombination mit der Distanz erhält man die Lage des bewegten Achsensystems im Raum. Damit ergibt sich in Erweiterung der Geradlinigkeitsprüfung die Möglichkeit

der Prüfung von dreidimensionalen Raumkurven. So etwas wird nach Kenntnis des Autors bislang in der industriellen Messtechnik nur mit dem Lasertracker bzw. mit zielverfolgenden Tachymetern gemessen. Durch die deutlich höhere Spiegelqualität des Etalons und die reflexionsbedingte Verdoppelung der Winkelauflösung dürfte bei gleicher Präzision der Winkelsensoren die Präzision der Autokollimation mindestens doppelt so hoch sein wie die Genauigkeit der Zielverfolgung eines Tripelprismas beim Tachymeter. Gegenüber dem Lasertracker werden die Herstellungskosten für ein Reflexgoniometer geringer ausfallen. Während bei der Zielverfolgung eines Tripelprismas durch Tachymeter oder Lasertracker nur die Position des Prismas gemessen wird, erhält man bei dem Verfahren mit Reflexgoniometer und Tachymeter zusätzlich auch die räumliche Ausrichtung des Achsensystems für jede Position. Eine Realisierung ist für nachfolgende Forschungsarbeiten geplant.

Literatur

- Argus GeoTech: www.argus-geotech.de, Stand 2007.
 Fuhrland, M.: Bauvermessung mit Argus-Augen, AVN 11–12/2005, S. 383–387.
 Fuhrland, M.: Development of a CCD camera based reflex goniometer, Int. Arch. f. Photogr. u. raumbez. Informationswiss., Vol. XXXVI, Part 5, Proceedings of the ISPRS Commission V. Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', Dresden, 25.–27.09.2006, S. 121–125.
 Fuhrland, M.: Das modulare Tachymeter-Aufsatzsystem ArgusTAT, Leistungsmerkmale und Anwendungen, Ingenieurvermessung 2007, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz 2007, Wichmann-Verlag, S. 145–155.
 Fuhrland, M.: Konzeption und Umsetzung neuer Technologien zur biaxialen Winkelmessung und elektrooptischen Pseudostreckenmessung, Dissertation TU Dresden, DGK Reihe C Band 614, 2008 (nur als Internetversion).
 Koblach, S.: Messungen mit einem Tachymeter in hängender Position, Beiträge zum 8. Geokinematischen Tag, Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Freiberg, VGE Verlag Essen, 2007, S. 130–139.
 Schwarz, W.: Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau, DVW-Schriftenreihe Band 13, 1995.

Anschrift des Autors

Dr. Matthias Fuhrland
 Geodätisches Institut der TU Dresden
 01062 Dresden
matthias.fuhrland@tu-dresden.de