

Vom selbstzielenden Theodolit zur Image Assisted Total Station

From the Self-aiming Theodolite to Image Assisted Total Stations

Andreas Wagner, Peter Wasmeier, Thomas Wunderlich, Hilmar Ingensand

Zum Standard einer modernen Totalstation gehört mittlerweile die Unterstützung durch Bild- bzw. Videoinformation. In diesem Beitrag werden – beginnend mit dem selbstzielenden Theodolit – verschiedene Entwicklungen gezeigt, die dazu den Anstoß gegeben haben. Anhand kommerzieller Produkte, sowie Prototypen aus Forschungseinrichtungen wird der Weg von der automatischen Zielerkennung und der Motorisierung der Achsen zur Ein-Mann-Station und letztlich dem bildunterstützten Tachymeter vorgestellt. Die Bildfunktionen aktueller Geräte sowie noch nicht umgesetzte, aber mögliche Anwendungen werden zusätzlich beschrieben.

Schlagwörter: Instrumentenentwicklung, bildunterstützte Tachymeter, Kameraintegration

Assistance by information from images or video streams are nowadays standard in modern total stations. This article shows different developments which initiated this fact, starting from self-aiming theodolites. The way from automatic target recognition, motorized axes and one-man systems to current Image Assisted Total Stations is presented by commercial products and research prototypes. Additionally, image based functions of latest instruments available as well as applications not implemented but possible are shown.

Keywords: Development of instruments, image assisted total station, camera integration

1 EINFÜHRUNG

Heutzutage sind selbstzielende Tachymeter mit hochauflösenden Kameras im Bauwesen mit maschinellen Fertigungsprozessen, der industriellen Messtechnik oder bei permanenten Deformationsmessungen unverzichtbar geworden. Wenn man die Geschichte dieser Instrumentenentwicklungen zurückverfolgt, wird man erkennen, dass die Impulse zur Entwicklung von selbstzielenden tracking-fähigen Systemen mit theodolitartiger Kinematik von verschiedenen Disziplinen kamen. So wurden zunächst Systeme für militärische Anwendungen, später dann für die Navigation von Schiffen in Küstennähe und auf Binnengewässern, für die industrielle Messtechnik sowie trackende Kamerasysteme für die Satellitengeodäsie entwickelt.

Mit diesem Artikel sollen die Entwicklungen bis zu den heutigen Image Assisted Total Stations (IATS), die inzwischen Photogrammetrie und sogar Scanning integrieren, vorgestellt werden.

2 AUTOMATISCHE ZIELUNG UND ZIELVERFOLGUNG

2.1 Das elektrische Auge

In der Geodäsie wurden 1946/47 die ersten Versuche mit automatischer Anzielung am Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt, unternommen. Zielsetzung war es, in der Triangulation 1. Ordnung auch bei visuell schlecht erkennbaren Leuchtzeichen Beobachtungen durchführen zu können. Vor fast 60 Jahren gelang es unter der Leitung von /Gigas & Ebeling 1957/, diese Entwicklung bis zur Feldtauglichkeit weiterzutreiben. Konstruktiv wurde das einfallende Lichtstrahlenbündel durch eine schräggestellte, zur Hälfte verspiegelte Planplatte so in zwei Teile aufgespalten, dass die Differenz der anliegenden Photoströme einer Photozelle und eines Sekundärelektronenervielfaches abgeglichen werden konnte. Damit war dann die

perfekte Zielung erreicht. Die Richtungsmessungen des Niedersächsischen Landesvermessungsamts erreichten eine Genauigkeit von 1" als Mittel aus 6 Sätzen. Die weiteren Versuche verliefen so erfolgreich, dass es sogar zu einer Kleinserie des weiter verbesserten Gerätes von der Firma ASKANIA kam (Abb. 1).

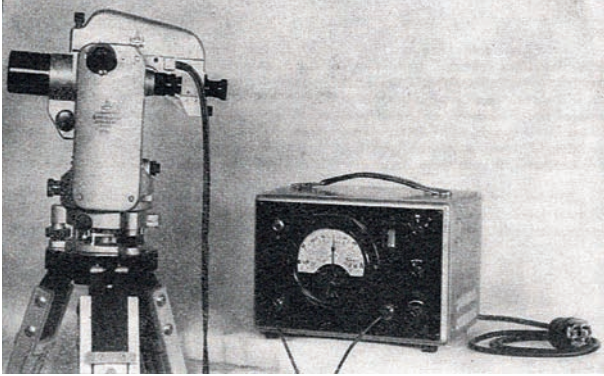


Abb. 1 | ASKANIA Theodolit mit elektrischem Auge, IFAG /Gigas & Ebeling 1957/

portable MINILIR System von der Société Anonyme de Télécommunications (SAT) in Paris entwickelt. Technologisch entspricht dieses Instrument einem selbstzielenden motorisierten Theodolit mit digitaler Teilkreisablesung. Die Zielerfassung beruht darauf, den Scheinwerfer eines Flugzeugs mit einem für Infrarot hochempfindlichen Sensor zu empfangen und die Position der Lichtquelle durch einen exzentrisch rotierenden Siemensstern in ein frequenz- und phasenmoduliertes Signal umzuwandeln. Mit dieser von SAT als Tracker bezeichneten Technologie werden tangentielle und radiale Ablagen in der Bildebene als Änderung des Frequenzhubs Δf bzw. als Phasenverschiebung ϕ erfasst und in das übergeordnete Koordinatensystem umgerechnet (Abb. 2).

Dieses Instrument wurde ab 1980 von Rijkswaterstaat in Kombination mit verschiedenen Distanzmessern (IBEO, Geodimeter) im niederländischen Deltaprojekt für die küstennahe Navigation von Transportschiffen eingesetzt. Ebenso gab es in dieser Konfiguration bereits erfolgreiche Versuchsmessungen beim Tübbing-Einbau und der kinematischen Erfassung von Straßenprofilen.

Nach dem MINILIR folgte 1983 das als POLARFIX bezeichnete Instrument von Krupp Atlas (Abb. 3). Dieses Instrument wurde primär zum Verfolgen von Schiffen auf Binnenwasserstraßen konzipiert /Wentzell 1983/. Es gab aber auch Studien zur Detailvermes-

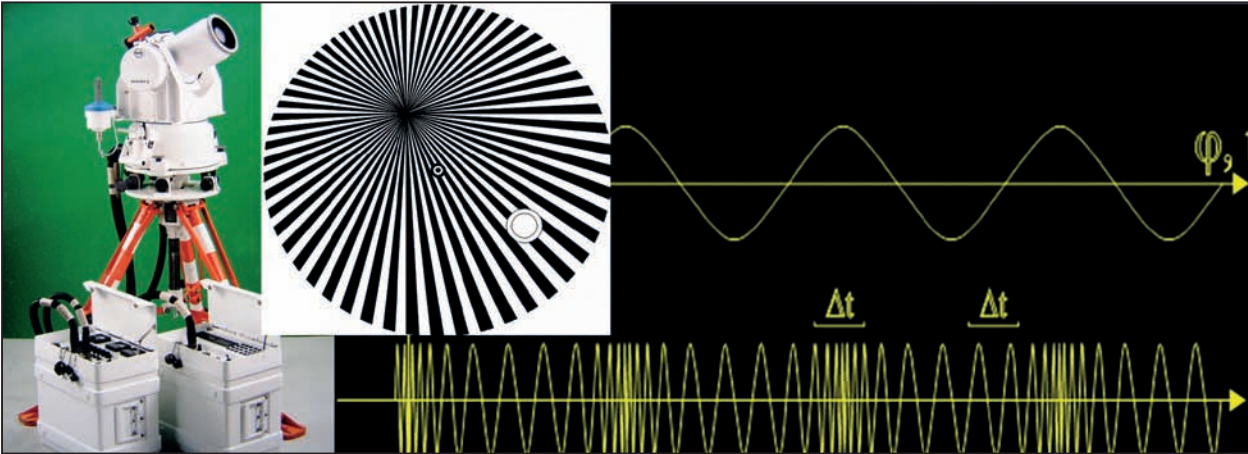


Abb. 2 | MINILIR mit Auswertepinzipp /Castanet 1989/ und /Ingensand & Böckem 1997/

2.2 Entwicklungen zur automatischen Zielverfolgung

Während mit der vorgenannten Entwicklung nur statische Ziele erfasst werden konnten, gab es bereits im zweiten Weltkrieg den ASKANIA Kinotheodolit, der die Bahn bewegter Ziele (Flugzeuge oder Raketen) registrieren konnte. Derartige Kinotheodolite, die nach dem Krieg auch in der Schweiz von CONTRAVES (EOTS) und später sogar in China gebaut wurden, sind noch heute im Einsatz. Auch die in der Satellitengeodäsie verwendeten ballistischen Kameras lassen sich konstruktiv diesem Instrumententyp mit photographischer Aufzeichnung zuordnen. Ballistische Kameras sind später vielfach mit CCD-Sensoren nachgerüstet worden.

Mit der Zielsetzung, den instrumentengestützten Landeanflug von Flugzeugen aufzuzeichnen, wurde Mitte der 1970er Jahre das



Abb. 3 | POLARFIX /Firmenprospekt Krupp-Atlas Elektronik/

sung. Später folgten weitere Entwicklungen wie Navitrak (IBEO) oder LaserTrak (MDL).

Mit den in den 1970er Jahren entwickelten positionsempfindlichen Halbleiter-Quadrantendioden waren auch in der industriellen Messtechnik erste theodolitähnliche Entwicklungen zur Erfassung von Maschinenteilen zu verzeichnen /Kelly & Nemhauser 1973/.

3 UNIVERSITÄRE UND INDUSTRIELLE FORSCHUNGSPROJEKTE ZUR AUTOMATISCHEN ZIELUNG ALS VORLÄUFER DER HEUTIGEN INSTRUMENTE

3.1 Deformationsmessungen, Tracking von Schiffen und Baumaschinen

1981 wurde am Geodätischen Institut der Universität Hannover im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 149 mit dem Teilprojekt „Automatische Abtastung positionsbeweglicher Körper auf See mit registrierenden Tachymetern“ die vorgenannte Idee der Verwendung einer Vierquadrantendiode aufgegriffen. Der in der Bildebene eines Tachymeters eingebaute positionsempfindliche Sensor erfasste das Zentrum einer Quecksilberdampflichtquelle, die sich auf dem zu trackenden Schiff befand. Technisch basierte diese Entwicklung auf dem AGA Geodimeter 700, das über Endlos-Feintrieb verfügte. Mittels angebauten Servomotoren und Regelkreisen wurde das Instrument nachgeführt, wobei die Lichtquelle ständig im Zentrum gehalten wurde /Kahmen & Suhre 1983/. In den folgenden Jahren wurde dieses System unter dem Namen „GEOROBOT“ bzw. „GEOROBOT II“ /Kahmen & Steudel 1988/ auf der Basis des Geodimeter 710 Tachymeters zu einem Vermessungssystem zur Überwachung von Böschungskanten im Tagebau weiterentwickelt (Abb. 4).

Ab 1984 arbeitete das Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart an der Verfolgung und Führung von Baumaschinen. Dieses Projekt wurde im Rahmen eines Teilprojektes „Zielverfolgungssysteme“ des SFB 228 „Hochgenaue Navigation“ gefördert. In Zusammenarbeit mit der Firma Wild, Heerbrugg,

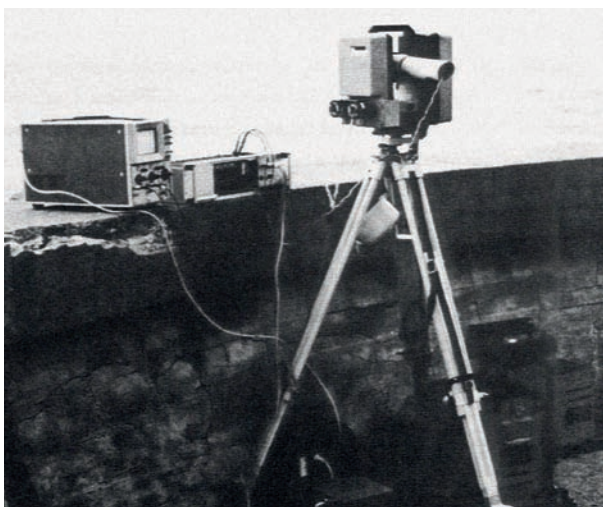


Abb. 4 | GEOROBOT /Kahmen & Suhre 1983/

entstand der motorisierte elektronische Theodolit WILD TM 2000, auf den eine Optik aufgesetzt wurde, die zunächst mit einer positionsempfindlichen Lateraleffektdiode, später dann mit einem CCD-Sensor arbeitete /Bayer et al. 1989/. Das System wurde ebenfalls mittels Regelkreisen den frequenzmodulierten LEDs auf der Baumaschine nachgeführt.

3.2 Roboter-Tachymeter für die Vermessung

Das Potenzial einer automatisierten Zielung und Zielverfolgung für die Tachymetrie wurde anfangs der 1980er Jahre auch an den Universitäten in Bonn und Zürich erkannt, und es entstanden in der Folgezeit verschiedene Funktionsmuster. Am Geodätischen Institut der Universität Bonn wurde 1981 zudem eine automatische Zielerfassung entwickelt, die im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Entwicklungen die Signalstärke der Avalanche-Empfangsdiode des EDM auswertet. Aus der Intensitätsverteilung des reflektierten EDM-Signals, die durch Scanbewegungen erfasst wird, lässt sich das Intensitätszentrum und damit die Reflektormitte bestimmen. Auf dieser Basis wurde ein „beobachterloses“ Tachymeter mit Teleskopstativ und automatischer Horizontierung für topographische und ingenieurgeodätische Aufgaben konzipiert /Ingensand 1981/. Die vier Hauptfunktionen, die Ortung des Reflektors, das Einstellen des Reflektors, die automatische Richtungs- und Entfernungsmessung und die Verfolgung des Prismas, wurden bereits so beschrieben, wie es heute noch bei den modernen Tachymetern abläuft /Wunderlich 2005/.

Wenig später begann an der ETH Zürich eine Machbarkeitsstudie für ein automatisiertes Vermessungssystem unter der Bezeichnung „TOPOMAT“ /Matthias 1982/. Das später zusammen mit der Firma Wild realisierte Versuchsinstrument besitzt eine CCD-Kamera zur Feindetektion (Abb. 5). Für die Grobortung waren zunächst seitliche Fisheye-Optiken mit Photodetektoren vorgesehen, die beim Funktionsmuster durch eine aufgesetzte Grobdetektionsoptik ersetzt wurde. Es ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass das Konzept „TOPOMAT“ mehr als nur die Entwicklung eines selbstzielenden Tachymeters umfasste. Ein „Messtablett“, das man als Vorläufer der

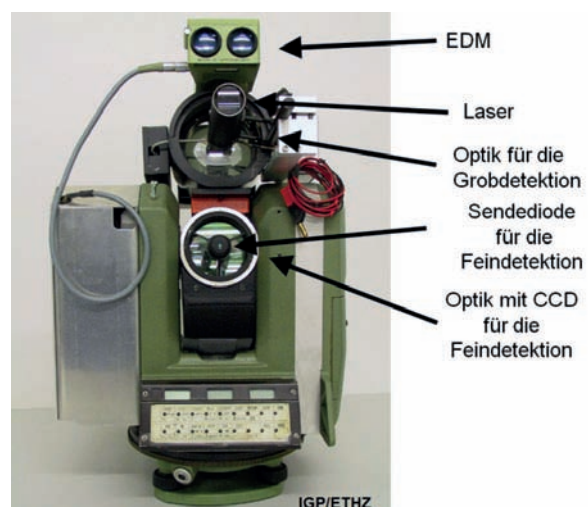


Abb. 5 | TOPOMAT Versuchsmuster /ETH Zürich/

Pen- oder heutigen Tablet-PCs ansehen kann, wurde ebenso bereits angedacht.

Nahezu unbekannt ist die Konzeptstudie „ATLAST“ der israelischen Firma Elbit, die 1988 auf der Basis des WILD T1600 und eines CCD-Sensors ein automatisiertes Tachymeter bauen wollte. Man beachte die Darstellung der zwei Messmodi mit fixen Zielen bzw. einem bewegten Reflektor (Abb. 6).

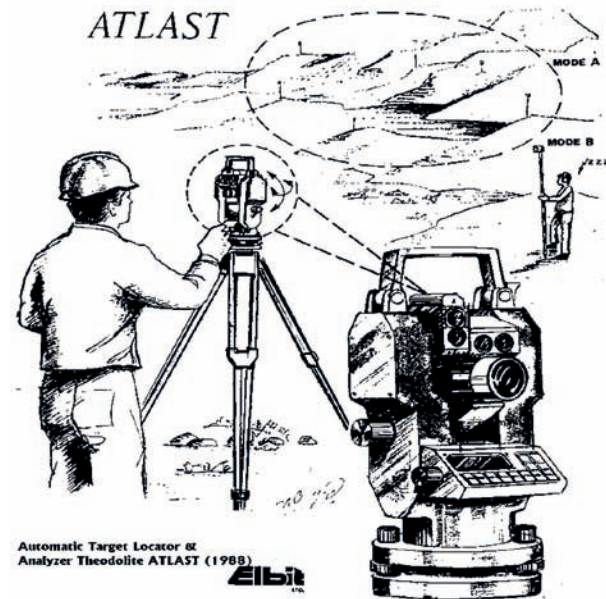


Abb. 6 | Selbstzielendes Tachymeter ATLAST der Fa. Elbit /Firmenprospekt Elbit Systems Ltd./

4 DIE GERÄTEENTWICKLUNGEN DER GEODÄTISCHEN INSTRUMENTENHERSTELLER

4.1 Industrielle Messtechnik und permanente Deformationsmessungen

Um die steigenden Ansprüche von Automobil- und Flugzeugherstellern bei der Montage und der Qualitätskontrolle mit den auf räumlichen Vorwärtsschnitten beruhenden Theodolitmesssystemen befriedigen zu können, arbeiteten Kern und Wild an der Integration von CCDs und digitaler Bildverarbeitung in motorisierten Theodoliten. Nahezu zeitgleich entstanden 1988 bei Kern mit dem E2-SE /Gottwald 1987/ und bei Wild mit dem TM3000V /Katowski 1989/ sogenannte Videotheodolite mit panfokalen Fernrohren als Komponenten der industriellen Messsysteme SPACE bzw. ATMS. Ein signalisierter Zielpunkt – durch einen projizierten Laserpunkt oder durch eine feste Markierung realisiert – wurde dazu von zwei oder mehr entsprechenden Instrumenten mittels Bildauswertung automatisch angezielt und dessen 3D-Raumkoordinaten bestimmt. Die Entwicklung von bildgestützten Tachymetern und den damit einhergehenden automatisierten Messverfahren stellte eine vielversprechende Technik im Nahbereich dar, die allerdings kurz nach ihrem Auftreten mit der Einführung der Lasertracker auch schon wieder abgelöst wurde. Aus der kurzen Zeitspanne der ersten Videotheodolite sind daher nur wenige Geräte übrig geblieben, welche aber für über ein Jahrzehnt die instrumentelle Basis für die wissenschaftliche Weiterbeschäftigung mit dieser Messmethode bildeten. Technische Neuerungen aber, welche für die Automatisierung mittels Videobildern notwendig waren und deshalb in den Markt eingeführt wurden, sind bis heute erhalten geblieben: beispielsweise die motorisierten Endlos-Feintriebe zur Instrumentensteuerung und auch die

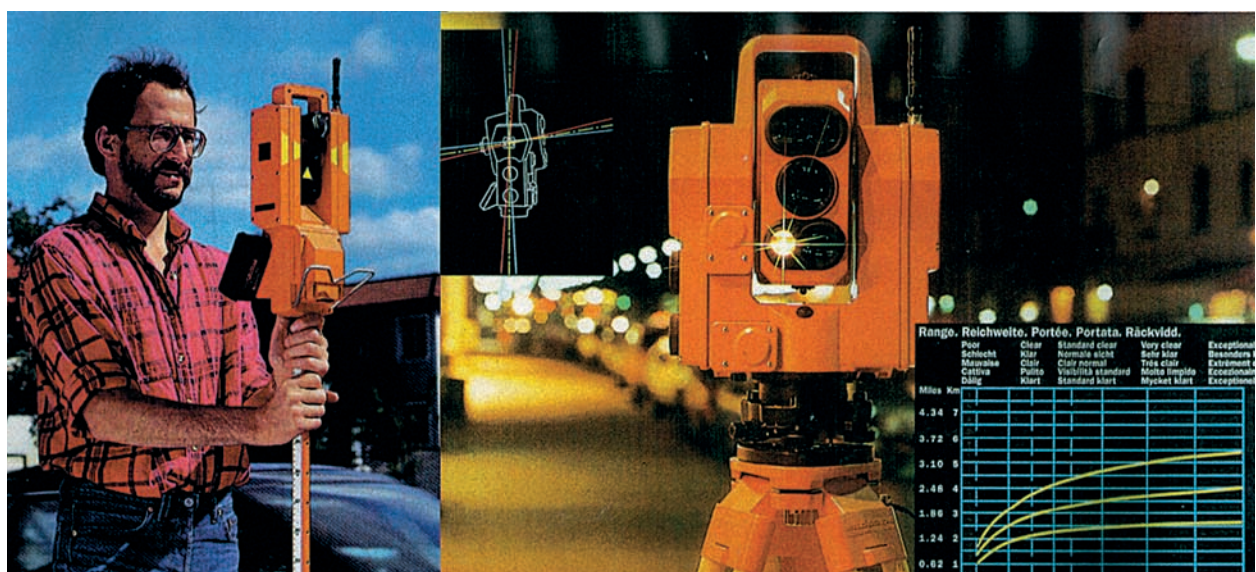


Abb. 7 | One-Man-System Geodimeter 4000 /Firmenprospekt Geotronics/

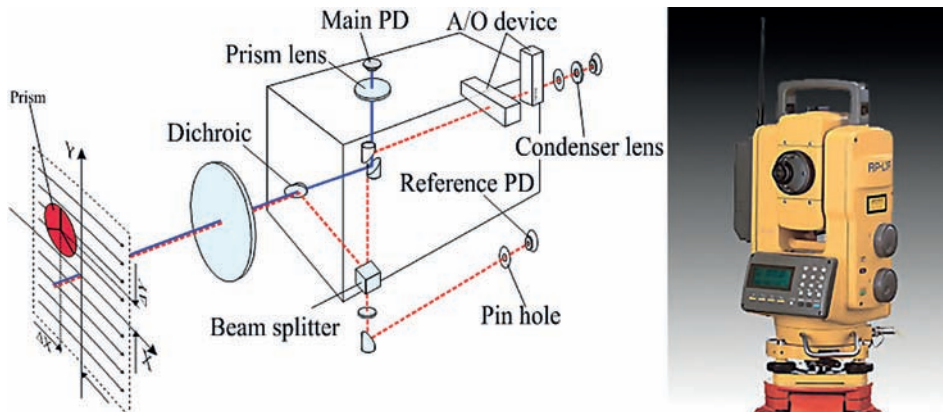


Abb. 8 | Topcon AP-L1A Grob- und Feinzielungsverfahren /Ingensand & Böckem 1997/ und /Firmenprospekt Topcon/

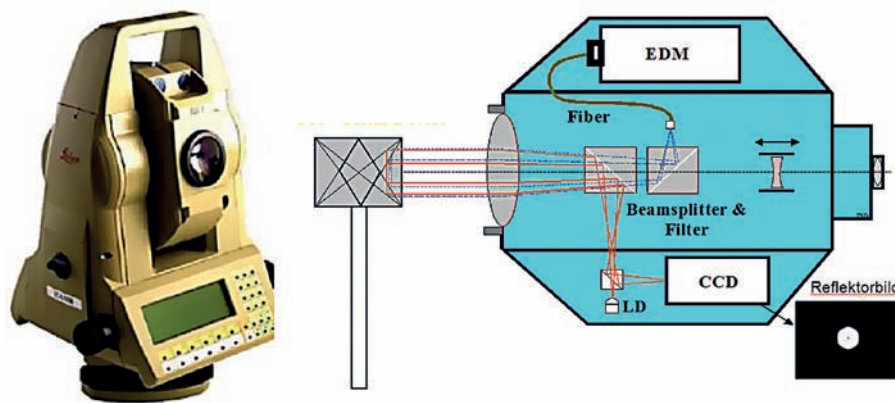


Abb. 9 | Leica TCA1800 mit Strahlengangprinzip /Firmenprospekt Leica Geosystems/ und / ETH Zürich/

heute übliche Prismenerfassung mittels integrierter CCD-Sensoren, welche aus der zweiten Generation des WILD TM3000V stammen. Zur permanenten Deformationsmessung auf Reflektoren wurde hier, wie bereits beim TOPOMAT-Projekt, ein Zielbeleuchter in Form eines Infrarot-Kollimators eingebaut. Diese in das Fernrohr integrierte Diode beleuchtet den grob angefahrenen Reflektor. Das reflektierte Signal wird auf dem für Infrarot empfindlichen CCD-Array aufgefangen und zur präzisen Feinzielung genutzt /Katowski 1993/.

4.2 Roboter-Tachymeter als „Ein-Mann-Messsystem“

Das erste als „Ein-Mann-Messsystem“ bezeichnete Gerät wurde 1987 von Geodimeter vorgestellt (Abb. 7). Dieses System arbeitete mit einem theodolitähnlichen aktiven Zielpunktempfänger, wobei das Fernrohr dieser als Remote Processing Unit (RPU) bezeichneten Einheit auf das als Control and Processing Unit (CPU) bezeichnete Tachymeter ausgerichtet werden musste, um die Grobsuche zu erleichtern.

1989 folgte die Firma Topcon mit dem motorisierten trackingfähigen TOPCON AP-L1A Tachymeter. Dieses Instrument unterschied sich von den bisher vorgestellten Instrumenten und Entwicklungen

darin, dass die Feinzielung – ähnlich dem Aufbau eines Fernsehbilds – mit zeilenablenkenden optischen Elementen arbeitet (AO-Device) und damit ein Bild des vom Instrument beleuchteten Reflektors auswerten kann /Ingensand & Böckem 1997/ (Abb. 8).

Die Firma Leica stellte ihr erstes motorisiertes selbstzielendes Vermessungssystem, das ohne externe Auswerteeinheit arbeitete, 1996 mit dem TCA 1800 vor (Abb. 9). Auch dieses System arbeitet mit einem bildgebenden CCD-Sensor und wertet das beleuchtete Bild des Reflektors mit einem Best-Fit-Algorithmus aus. Mit diesem Instrument erschien auch ein neuartiger kompakter 360°-Rundumreflektor.

5 BILDERFASSUNG ZUR OBJEKTDARSTELLUNG UND -ERKENNUNG: DER WEG ZUR MODERNEN VIDEOTACHYMETRIE

5.1 1990 – 2004: Prototypen in der Forschung

Videotachymetrie (oder bildunterstützte Tachymetrie), welche nicht nur zum Ziel hatte, ein aktives oder kooperierendes Ziel zu detektieren und anzuzielen, war in der Folge lange eine Nischenbetätigung in der akademischen Forschung. Dabei wurden zum einen die

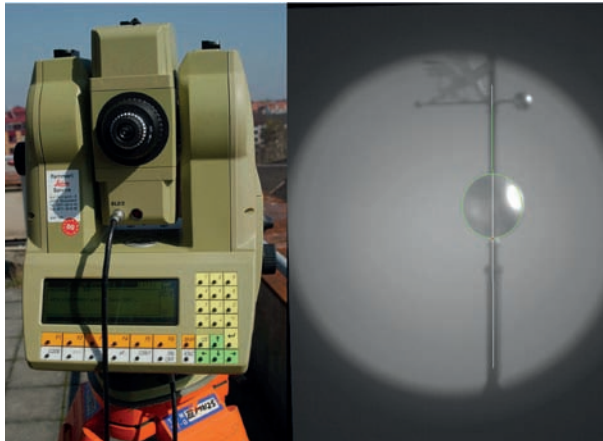


Abb. 10 | Leica TCA2003 mit ATR-Kameraausgang und ausgewertetem ATR-Bild /Wasmeier 2003/

noch vorhandenen Instrumente der ATMS-Ära eingesetzt, zum anderen wurden handelsübliche Tachymeter mit CCD-Kameras zu individuellen Prototypen modifiziert.

An der TU Wien entstanden beispielsweise viele Arbeiten mit den TM3000V, welche den Schwerpunkt weniger auf die (bereits funktionsfähige) Technik, sondern auf die Auswertung und Weiterverwendung der CCD-Bildinformationen legten. Zu nennen sind hier u. a. die Untersuchung (semi-)automatischer Auswertung nicht signalisierter Objekte /Roic 1996/, /Mischke 1998/ oder die hochfrequente Erfassung pulsierender Ziele mittels Differenzbildern /Fabiankowitsch 1990/. Nahezu nebenbei lieferte die Verwendung von Bildinformationen in der Tachymetrie auch den Grundstein für verschiedene Forschungsprojekte im Umfeld wissenschaftlicher Entscheidungssysteme zum Nachweis von Deformationen /Reiterer et al. 2003/, welche durch die Fusionierung unterschiedlicher Messmethoden (Bildauswertung und traditionelle Tachymetrie) Einzug in die Geodäsie gehalten hat und heute mit der zunehmenden Integration von immer weiteren Sensoren aktueller denn je ist.

Andere Forschungseinrichtungen bedienten sich Standard-Tachymetern, wie z. B. eines Leica TCA2003, dessen ATR-Chip über einen zusätzlichen Videoausgang ausgelesen werden konnte /Wasmeier 2003/ (Abb. 10), erweiterten den Aufbau verschiedenster Basisinstrumente durch Aufsatzkameras oder ersetzten die Okularlinse des Fernrohrs direkt durch einen Kamerachip. Das am Kernforschungszentrum Karlsruhe entwickelte System GMS ermöglicht die Projektion von perspektivisch darstellbaren CAD-Modellen in das aktuelle Kamerabild eines modifizierten WILD T2000S /Köhler 1993/. /Schirmer 1994/ verwendet eine auf einem Kern DKM 3A angebrachte Digitalkamera für astronomisch-geodätische Beobachtungen. Insbesondere leitet er dabei die Korrekturparameter für exzentrische Zwei-Lagen-Bildmessung ab. Ebenfalls astronomisch-geodätische Messungen – in diesem Fall zur Geoidverbesserung – führt /Gerstbach 1999/ mit einem Leica TCA1800 mit aufgesetzter Okularkamera durch. Eine Kombination mehrerer Kamerasensoren wird im System TOTAL der Universität Bochum nach /Juretzko 2004/ integriert. Ein herkömmlicher Leica TCRM1102 wird dazu mit einer Okularkamera sowie einer Tele- und einer Weitwinkelkamera im EGL-Gehäuse ausgestattet und der Fokussiertrieb motorisiert. Abbildungsfehler werden durch eine empirische Korrekturmatrix behoben, die Ablagegrößen zwischen Bildposition und Richtungswert aus dem Ansatz der zentralperspektivischen Abbildung gewonnen.

Der einzige kommerzielle Ansatz aus diesem Zeitraum ist die Prototypenstudie SET3110MV von Sokkia, welche auf der Intergeo 2002 vorgestellt worden ist. Bei diesem Instrument wurde zusätzlich zu einer Übersichtskamera erstmals zugunsten einer fokussierbaren CCD-Kamera vollständig auf ein Okular verzichtet (Abb. 11). Obwohl dieses Instrument auf der Homepage des Herstellers noch zu finden ist, kam es nie zur Markteinführung.

Diese Aufzählung ist weder abschließend, noch wird sie allen unterschiedlichen Forschungsansätzen und -ausrichtungen gerecht. Sie zeigt jedoch, dass das Interesse am „sehenden“ Tachymeter auch in einer Zeit, in welcher andere Neuerungen wie GNSS die Geodäsie in Atem hielten, nie zum Erliegen gekommen ist.



Abb. 11 | Prototypenstudie SET3110MV von Sokkia /Firmenprospekt Sokkia Co./

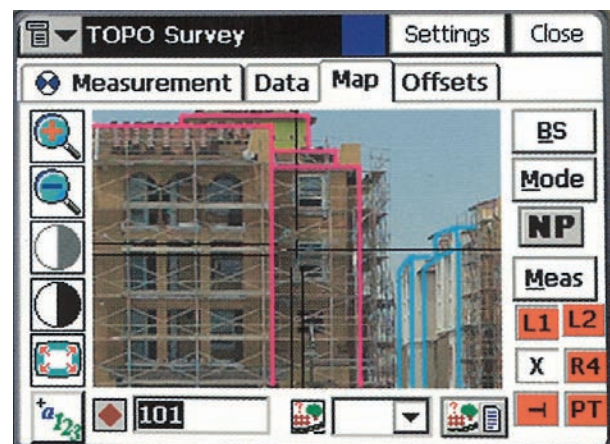


Abb. 12 | Überlagerung von Planungs- oder Messdaten im Livestream /Firmenprospekt Topcon/

5.2 2005 – 2014: Das kommerzielle Interesse nimmt wieder zu

Mitte des letzten Jahrzehnts begannen auch die großen Hersteller von Vermessungsinstrumenten, sich wieder für bildunterstützte Tachymetrie zu interessieren. Dies hatte zum einen ihre Ursache in der zunehmenden Verbreitung des Informationsmediums „Bild“ im alltäglichen gesellschaftlichen Informationsaustausch, zum anderen aber auch in der Notwendigkeit von Bildern als Grundlage zur Instrumentensteuerung, wie sie aus dem Laserscanning bekannt ist.

2005 wurde von Topcon das System GPT-7000i unter dem Schlagwort „Capture Reality“ vorgestellt, das neben einer Übersichtskamera bereits über eine VGA-Okularkamera verfügte. Die Kamera dient vor allem einem überwachten Arbeitsablauf, indem abzusteckende oder bereits gemessene Punkte in das Livebild eingezeichnet werden können (Augmented Reality, siehe Abb. 11), und zu Dokumentationszwecken. Eine Richtungsrechnung beliebiger im Bild dargestellter Punkte ist möglich, motorisierte Achsen oder automatische Fokussierung waren allerdings erst mit dem Nachfolger GPT-9000Ai im Jahr 2007 verfügbar, das damit als echtes „Ein-Mann-Messsystem“ einsetzbar war. Mittlerweile wird die Technik unter dem Überbegriff „Imaging Station“ vertrieben,

welche aktuell in der 3. Generation vertrieben wird. Topcon positioniert sein System als Kombinationsgerät zwischen Tachymeter und einfachem Laserscanner (bis zu 20 Punkte/Sekunde) bei gleichzeitiger digitaler Bilderfassung.

Gleichzeitig begannen auch andere Hersteller, sich durch industriell angestoßene Forschungsarbeiten vor allem hinsichtlich der Kalibrierung integrierter Kameras zu positionieren /Walser 2004/, /Vogel 2006/. Ein Resultat daraus war 2007 die VX Spatial Station von Trimble, die mit einer vergleichbaren Marktausrichtung wie die Imaging Station positioniert wurde. Eine unterhalb des Fernrohrs angebrachte Weitwinkelkamera unterstützte den Anwender insbesondere bei der Bereichswahl für die Scanning-Funktionen (bis 15 Punkte/Sekunde), bei der Punktauswahl und bei der Dokumentation. Von zusätzlichem Vorteil sind bei diesem System die angebotenen Lösungen der direkt georeferenzierten Einbild-Photogrammetrie (z. B. Fassadenentzerrung im automatisch generierten Bildverband), vgl. /Müller 2009/. Weiterführend unterstützt die bildgestützte terrestrische 3D-Vermessung die Kombination dieser Daten mit bestehenden photogrammetrischen Informationen. Diese als „Trimble Vision“ bezeichnete Technologie ist auch in den aktuellen Tachymetern S6 und S8 verfügbar. Eine Okularkamera ist für diese Anforderungen nicht notwendig, ebenso wenig wie für die

				
	Leica Nova	Pentax Visio	Topcon IS/-3	Trimble VX/S8
Kameratyp	Weitwinkel + koaxial	Weitwinkel	Weitwinkel + koaxial	Weitwinkel
Auflösung	2560 x 1920	2048 x 1536	1280 x 1024	2048 x 1536
Gesichtsfeld	15,5° x 11,7° 1,4° x 1,1°	8,8° x 8,8°	28° x 22° 1° x 1°	16,5° x 12,3°
Fokustiefe	2 m – ∞	20 m – ∞	2 m – ∞	3 m – ∞
Framerate	20 Hz	10 Hz	10 Hz	5 Hz
Zoom	4x digital 30x optisch	3x digital	4x digital 30x optisch	8x digital

Tab. 1 | Spezifikationen der aktuell erhältlichen führenden Videotachymeter /Firmenprospekte Leica Geosystems, TI Asahi Co., Topcon, Trimble Navigation/

Einsatzbereiche von Konzepten anderer Hersteller wie z. B. Pentax „Visio“, welches als modulare Zusatzkamera zur Dokumentation in bestehende Tachymetersysteme integriert werden kann.

Leica Geosystes folgte als letzter großer Hersteller 2010 mit den Übersichtskameras der Viva Serie. Die als „Multistation“ bezeichnete, mit bis zu 1000 Punkten pro Sekunde scannende Nachfolgereihe Nova (ab 2013), verfügt schließlich wie die Imaging Station zusätzlich über eine fokussierbare Okularkamera, welche in erster Linie zur direkten Bedienung über das Display/Fernsteuerung dient und den Blick durch das Okular weitgehend ersetzt. Eine unmittelbare Verwendung der Okularbilder für weiterführende Applikationen und Berechnungen ist gegenwärtig weder on-board noch für externe Programme realisiert, zumal der schnelle Zugriff auf die Bildinformationen in hoher Auflösung durch die geringen Übertragungsraten noch stark eingeschränkt ist. Das einzige System, welches z. B. rudimentäre Kantenoperationen direkt für die automatische Punktwahl im Scanningraster nutzt, ist die ImagingStation. Eine Übersicht über die wichtigsten Kenndaten der integrierten Kameras gibt Tab. 1.

Der große Vorteil der aktuellen Nutzung bildgebender Tachymeter liegt demgegenüber in der Tatsache, dass die bewährten Verfahren der Nahbereichsphotogrammetrie mit der Präzisionstachymetrie vereint werden können. Eine geeignete Kalibrierung des Systems vorausgesetzt, die jeder Hersteller der Videotachymeter anbietet, können die Bildinformationen unmittelbar in Richtungsablagen umgerechnet und somit der Raumvektor jedes beliebigen Pixels bestimmt werden. Zusammen mit der Stationierung des Instruments und mit der Entfernungsinformationen der EDM ist die direkte Überführung der Bildinformation in ein übergeordnetes Koordinatensystem möglich, was (stereo)photogrammetrische Messungen sowohl im Feld als auch im Postprocessing im Büro ermöglicht. Tachymetrische Messinformationen (Punkte, Linien, Flächen) können dabei übernommen werden.

5.3 Gegenwärtige Forschungsarbeit

Während die kommerziellen Ansätze der letzten zehn Jahre hauptsächlich zum Ziel hatten, den Messablauf ergonomischer zu gestalten, indem beispielsweise der Blick durch das Okular ersetzt bzw. mittels Fernsteuerung an den Lotstab verlagert werden konnte, war es permanentes Bestreben der wissenschaftlichen Forschung, das hochauflösende, kalibrierte Bild zur Ableitung präziser Messinformation zu verwenden. Dies wurde und wird auch heute noch durch die Nutzung von Eigenentwicklungen erreicht, welche deutlich bessere Zugriffsmöglichkeiten auf die einzelnen Mess- und insbesondere Bilddaten ermöglichen. Dabei kommen zwei unterschiedliche Ansätze zum Einsatz:

Zum einen werden Aufsatzkameras verwendet, die auf das Okular gesteckt bzw. als dessen Ersatz an

einem Tachymeter dienen. Beispiele sind das System DAEDALUS der ETH Zürich /Bürki et al. 2010/, eine Kamera, die ursprünglich zur astronomischen Beobachtung entwickelt wurde (Abb. 13 Mitte), oder MoDiTa, eine Entwicklung des i3mainz /Hauth et al. 2012/ (Abb. 13 Links). Der Vorteil dieser Systeme liegt darin, dass ein Standard-Instrument z. B. nur für eine spezielle Messaufgabe umgerüstet und jederzeit in seinen ursprünglichen Zustand zurückversetzt werden kann.

Der zweite Ansatz sind Prototypen, die ausschließlich für die Forschung entwickelt bzw. modifiziert wurden und nicht für „normale“ Vermessungsarbeiten verwendet werden können. Neben den in Abschnitt 5.1 genannten Instrumenten ist aktuell noch eine Kleinserie namens IATS2 /Reiterer et al. 2009/, /Wasmeier 2009b/ im Einsatz (Abb. 13 rechts). Der Vorteil dieser Art Videotachymeter ist dabei, dass die Kamera mit dem Gerät fest verbunden ist und daher eine Konstanz der Kalibrierparameter gewährleistet ist. Mit gängigen Bildverarbeitungsalgorithmen können Kanten oder Muster im Bereich eines 1/10 Pixel detektiert werden /Reiterer & Wagner 2012/, was bedeutet, dass die Präzision der Bildkomponente die Genauigkeit derzeitiger Totalstationen übersteigt und eine exakte Kalibrierung des Gesamtsystems unerlässlich ist.

Auch die in den letzten Jahren untersuchten Anwendungen mit den o.g. Systemen lassen sich in zwei Kategorien unterteilen. Einerseits werden mittels Algorithmen der industriellen Bildverarbeitung vor allem die Information aus den Bildern genutzt, während das Trägertachymeter in erster Linie als Hilfssystem für eine einfach zu realisierende äußere Orientierung sorgt. D. h. gegenüber klassischer photogrammetrischer Anwendungen entfällt die Verwendung von Passmarken. Beispiele derartiger Anwendungen sind Schwingungsmessung innerhalb eines fixen Kameragesichtsfelds /Wagner et al. 2013b/, /Hauth et al. 2013/ oder Bestimmungen des Refraktionsinflusses /Bürki et al. 2010/, /Reiterer 2012/. Die (relative) Genauigkeit der Ergebnisse und die Performance des Messablaufs sind dabei ausschließlich vom verwendeten Kameramodell abhängig. Szenarien der Mehrbild-Photogrammetrie, im Postprocessing oder simultan mit mindestens zwei Videotachymetern, wie z. B. bei /Reiterer et al. 2009/ oder /Wagner et al. 2013a/, fallen ebenfalls in diese Kategorie.

Der zweite Ansatz versucht, Informationen aus den Kamerabilddern unmittelbar in bestehende komplexere Tachymetrieabläufe zu integrieren. Dazu gehören z. B. alle Anwendungen der Zielpunkterkennung mittels geometrischer Primitive oder über Objektmatching-



Abb. 13 | Aktuelle Videotachymeter-Systeme aus der Forschung: MoDiTa /Hauth et al. 2012/, DAEDALUS /Bürki et al. 2010/, IATS2 /TU München/

Verfahren von aktiven bzw. kooperierenden Zielen wie auch passiver z. B. codierter Ziele(-marken). Es gibt Untersuchungen, flächenhafte Strukturen, wie beispielsweise Nieten einer Stahlkonstruktion, automatisch zu erkennen und anzuvisieren /Wagner et al. 2014/ oder natürliche Formen wie Steine wiederzufinden und über die Zeit zu verfolgen /Thuro et al. 2011/. Auch die Vermessung ausgedehnter Strukturen, d. h. linien- oder flächenhafte Objektvermessung wie z. B. bei der Erfassung von Rissen mit Linienverfolgungsalgorithmen, kann mithilfe bildgebender Tachymeter vollautomatisch erfolgen. Aus den Kamerabildern werden Informationen über den Rissverlauf gewonnen, wobei die reflektorlose Distanzmessung die fehlende Skalierung der Bilddaten liefert. Damit werden neue Fernrohransichtungen abgeleitet und der Riss sukzessive abgefahren und vermessen /Wasmeier 2009a/, /Huep 2010/.

Es ist zu erwarten, dass das Anwendungsspektrum für beide Einsatzgruppen in Zukunft an Bedeutung gewinnt, da sich die bildgebende Technik im Arbeitsalltag gerade als fester Standard etabliert. Mit der permanenten Verfügbarkeit der Sensorik ist der nächste Schritt die Schaffung entsprechender Applikationen, welche die vorhandenen Möglichkeiten auch ausnutzen. Die rasante Zunahme von Rechen- und Speicherleistung unterstützt diesen Trend.

Die voranschreitende Fusion von Tachymeter, Kameras und Laserscanner und der damit entstehende Mehrwert der gleichzeitig verfügbaren Sensoren wird derzeit u. a. an der TU München erforscht. Aus Bildern verschiedener Epochen sollen mithilfe von flächen- bzw. merkmalsbasierten Zuordnungsverfahren korrespondierende Punkte und deren Verlauf detektiert werden. Das Verschneiden der daraus abgeleiteten Richtungsvektoren mit Oberflächenmodellen aus Scandaten führt dann zu 3D-Punktbewegungen. Mittels GNSS und/oder in der Umgebung verteilten, fix installierten Prismen werden zusätzlich die Position und Orientierung des Systems überwacht und ggf. die Ergebnisse korrigiert.

6 AUSBLICK

Die modernen Image Assisted Total Stations stehen am – vorläufigen – Ende einer langen Reihe von Sensorverbesserungen, deren Entwicklung immer ein Abbild des technisch Möglichen war, die heute aber auch kein Anwender mehr missen möchte. Aus dem nahezu historischen Instrumententyp „Theodolit“ ist eine Multi-Sensor-Messmaschine entstanden, und nie konnten so viele Daten so einfach und in so kurzer Zeit gewonnen werden.

Gegenwärtig wird kein Tachymeter des oberen Preis- und Qualitätssegments mehr ohne eine integrierte Übersichtskamera ausgeliefert. In Kürze werden die Instrumente aller Hersteller auch über hochwertige Okularkameras verfügen, welche mittelfristig in einzelnen Baureihen das Okular vollständig ersetzen werden. Gleichzeitig wird der Wunsch nach zunehmender Automatisierung von Standard-Messaufgaben die Auswertung der Kamerabilder verstärkt in den Fokus rücken, sodass on-board verfügbare Bildauswertungsalgorithmen zur Objekterkennung in der Entwicklung der Tachymetersoftware verstärkt zu berücksichtigen sind.

Die große Herausforderung liegt darin, Applikationen zu generieren, welche den üblicherweise sehr hohen Anforderungen des Anwenders an die Genauigkeit der Ergebnisse und vor allem an die

Robustheit und Zuverlässigkeit der Objektdetektion im Bild gerecht werden. Langjährige Erfahrungen im Bereich der Computer Vision und insbesondere auch mit allen bisher verfügbaren Prototypen und kommerziellen bildunterstützten Tachymetern weisen die prinzipielle Eignung dafür immer wieder nach, erkennen die größten Einschränkungen jedoch ebenso regelmäßig in variablen Messumfeld- und vor allem Beleuchtungsverhältnissen, welche nicht nur radiometrische Gesamtverhältnisse im Bild verändern, sondern auch Objektkanten verwischen, Schatteneffekte verursachen und Proportionen scheinbar verschieben. Aktuell kann eine Objekterkennung daher nur semiautomatisch, das heißt unter Ergebnisüberwachung durch einen Operateur, erfolgen und daher bestenfalls arbeitsunterstützend sein. Die entsprechenden Algorithmen für den Einsatz in der geodätischen Anwendung anzupassen, wird daher eine der Kernaufgaben für den weiterführenden Einsatz von Video-tachymetrie sein.

LITERATUR

Bayer, G.; Heck, U.; Mönicke, H.-L. (1989): Einsatz einer CCD-Kamera bei der Objektführung mittels Motortheodolit. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 100(1989)11-12, 423–430.

Bürki, B.; Guillaume, S.; Sorber, P.; Oesch, H.-P. (2010): DAEDALUS: A Versatile Usable Digital Clip-on Measuring System for Total Stations. In: Mautz, R.; Kunz, M.; and Ingensand, H. (Eds.): 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Zurich, IEEE Xplore.

Castanet, Y. (1989): High Speed Infrared Tracking. In: Linkwitz, K; Hangleiter, U. (Eds.): High Precision Navigation – Integration of Navigational and Geodetic Methods. Springer-Verlag, Berlin, 409–418.

Fabiankowitsch, J. (1990): Automatische Richtungsmessung mit digitalen Differenzbildern. Dissertation, Technische Universität Wien.

Gerstbach, G. (1999): CCD und Astro-Geodäsie. Unterwegs zur automatischen Lotrichtungsmessung. In: Geowiss. Mitt. der TU Wien, 50, 40–57.

Gigas, E.; Ebeling, K. (1957): Elektrisches Auge. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, 51.

Gottwald, R. (1987): Kern E2-SE – Ein neues Instrument nicht nur für die Industrievermessung? In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 98(1987)4, 147–154.

Hauth, S.; Schlüter, M.; Thiery, F. (2012): Modular Imaging Total Stations – Sensor Fusion for high precision alignment. In: Schwiager, V; Böttinger, S.; Zheng, B. (Eds.): 3rd International Conference on Machine Control & Guidance Proceedings. Stuttgart.

Hauth, S.; Schlüter, M.; Thiery, F. (2013): Schneller und ausdauernder als das menschliche Auge: Modulare Okularkameras am Motortachymeter. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 120(2013)6, 210–216.

Huep, W. (2010): Scannen mit der Trimble VX Spatial Station. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv), 135(2010), 330-336.

Ingensand, H. (1981): Ein Beitrag zur Entwicklung eines elektronischen Tachymeters mit automatischer Zielerfassung. In: BDVI Forum, 4(1981), 186–192.

Ingensand, H.; Böckem, B. (1997): Automatic Location and Pointing Techniques in Local Positioning Systems. In: Grün, A.; Kahmen, H. (Eds.): 4th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques. Zürich, 329–338.

Juretzko, M. (2004): Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum.

Kahmen, H.; Steudel, J. (1988): Das automatisch zielende Messsystem GEOROBOT II. In: Schnädelbach, K.; Ebner, H. (Eds.): Ingenieurvermessung 88 – Beiträge zum X. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung in München. Dümmler Verlag, Bonn.

Kahmen, H.; Suhre, H. (1983): Ein lernfähiges tachymetrisches Vermessungssystem zur Überwachung kinematischer Vorgänge ohne Beobachter. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv), 108(1983)8, 345–351.

Katowski, O. (1989): Deformationsmessung an Bauwerken mit dem automatischen Theodolitmess-System ATMS. In: Grün, A.; Kahmen, H. (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 393–403.

Katowski, O. (1993): Motorized Theodolite System for Automatic Guidance of Slow Moving Tunnel Construction Machines. Practice Report Leica Geosystems.

Kelly, B.; Nemhauser, R. (1973): Techniques for Using the Position Sensitivity of Silicon Photodetectors to Provide Remote Machine Control. 21st Annual IEEE Machine Tool Conference. Hartford, Connecticut.

Köhler, B. (1993): Die Bedienunterstützende Computergraphik des Videotheodolitsystems GMS. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 104(1993)2, 62–70.

Matthias, H. (1982): Der Topomat. In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 80(1982)4, 123–128.

Mischke, A. (1998): Entwicklung eines Videotheodolite-Messsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten. Dissertation, Technische Universität Wien.

Müller, S. (2009): Anwendungsbeispiele mit der Trimble VX Spatial Station. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 116(2009)1, 31–35.

Reiterer, A. (2012): Modeling Atmospheric Refraction Influences by Optical Turbulences Using an Image-Assisted Total Station. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv), 137(2012)3, 156–165.

Reiterer, A.; Kahmen, H.; Egly, U.; Eiter, T. (2003): 3D-Vermessung mit Videotheodoliten und automatisierte Zielpunkterfassung mit Hilfe von Interest Operatoren. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 110(2003)4, 150–156.

Reiterer, A.; Lehmann, M.; Miljanovic, M.; Ali, H.; Paar, G.; Egly, U.; Eiter, T.; Kahmen, H. (2009): A 3D optical deformation measurement system supported by knowledge-based and learning techniques. In: Journal of Applied Geodesy, 3(2009)1, 1–13.

Reiterer, A.; Wagner, A. (2012): System Considerations of an Image Assisted Total Station – Evaluation and Assessment. In: allgemeine vermessungsnachrichten (avn), 119(2012)3, 83–94.

Roic, M. (1996): Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten. Dissertation, Technische Universität Wien.

Schirmer, W. (1994): Universaltheodolit und CCD-Kamera: ein unpersönliches Messsystem für astronomisch-geodätische Beobachtungen. Dissertation, Technische Universität München.

Thuro, K.; Singer, J.; Festl, J.; Wunderlich, T.; Wasmeier, P.; Reith, C.; Heun-ecke, O.; Glabsch, J.; Schuhbäck, S. (2011): Entwicklung und Erprobung eines integrativen 3D-Frühwarnsystems für alpine instabile Hänge (alpEWAS). Forschungs- und Entwicklungsprogramm GEOTECHNOLOGIEN – Abschlussbericht.

Vogel, M. (2006): Vom Pixel zur Richtung. Die räumlichen Beziehungen zwischen Abbildungsstrahlen und Tachymeter-Richtungen. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.

Wagner, A.; Stylianidis, E.; Smagas, K.; Trdlicka, J.; Paar, G.; Huber, B.; Reith, C.; Reiterer, A. (2013a): Geo-Monitoring By High-Resolution Optical Sensors. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, 166–177.

Wagner, A.; Wasmeier, P.; Reith, C.; Wunderlich, T. (2013b): Bridge Monitoring by Means of Video-Tacheometer – A Case Study. In: allgemeine vermessungsnachrichten (avn), 120(2013)8-9, 283–292.

Wagner, A.; Wasmeier, P.; Wunderlich, T. (2014): Tutorial Videotachymetrie. 17. Internationaler Ingenieurvermessungskurs 2014, Zürich.

Walser, B. (2004): Development And Calibration Of An Image Assisted Total Station. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.

Wasmeier, P. (2003): The Potential of Object Recognition Using a Servo-Tacheometer TCA2003. In: Grün, A.; Kahmen, H. (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques (VI), II48-II54.

Wasmeier, P. (2009a): Grundlagen der Deformationsbestimmung mit Messdaten bildgebender Tachymeter. Dissertation, Technische Universität München.

Wasmeier, P. (2009b): Videotachymetrie – Sensorfusion mit Potenzial. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 116(2009)7, 261–267.

Wentzell, H. F. (1983): Range/Azimuth Position Fixing and Data Processing System with Decimeter Accuracy for Civil Engineering Survey. In: The Hydrographic Journal, 27(1983).

Wunderlich, T. (2005): Automatisches Zielen mit Tachymetern und Theodoliten. Geowissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für Geodäsie und Geophysik an der Technischen Universität Wien, 71(2005), 29–43.

M. Sc. Andreas Wagner

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
LEHRSTUHL FÜR GEODÄSIE



Arcisstraße 21 | 80333 München
a.wagner@tum.de

Dr.-Ing. Peter Wasmeier

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
LEHRSTUHL FÜR GEODÄSIE



Arcisstraße 21 | 80333 München
peter.wasmeier@tum.de

Prof. Dr.-Ing. Thomas Wunderlich

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
LEHRSTUHL FÜR GEODÄSIE



Arcisstraße 21 | 80333 München
th.wunderlich@tum.de

Prof. Dr.-Ing. Hilmar Ingensand

ETH ZÜRICH
INSTITUTE OF GEODESY AND
PHOTOGRAMMETRY



Wolfgang-Pauli-Straße 15 | CH-8093 Zürich
hilmar.ingensand@geod.baug.ethz.ch