Sensorfusion und Sensornetze – die Zukunft der geodätischen Messtechnik

Hilmar Ingensand

Sensorfusion und Sensornetze sind schon lange Realität in der Geodäsie im Bereichen Monitoring und der Kombination von GNSS und Tachymetrie. Im Bereich Monitoring kommt als sinnvolle Kombination die geotechnisch-geophysikalische Sensorik hinzu, da die Geodäsie mit geometriemessenden Systemen im wahrsten Sinne an der Oberfläche des Deformationsobjektes bleibt und die „tieferliegenden" Ursachen nicht erfasst. Sensoren, die Strain, Stress oder den Feuchtegehalt eines rutschenden Hangs beobachten, geben ergänzende Informationen, die eine Korrelation der verschiedenen Ereignisse ermöglichen und Vorhersage in Zukunft sicherer machen. Kombinationen von neuen und bestehenden Technologien erschliessen neue Aufgabenfelder wie die kinematische Gleismesstechnik. Ebenfalls kommt im Rahmen von Sensornetzen die Möglichkeit hinzu, ultraleichte fliegende Systeme (UAV) mit Kameras oder in Zukunft auch mit Range-Imaging-Sensoren auszurüsten, um ad hoc Information zu erfassen.

Ebenso sollten die Augen für gänzlich neue Lösungen wie terrestrische Radarinterferometrie offen bleiben. Die Radarinterferometrie wird das Laserscanning nicht völlig substituieren, sondern in Kombination mit Laserscanning die gewünschten Informationen liefern.

Einleitung

Die Begriffe Sensorfusion und Sensornetze sind in der Geodäsie relativ neu. Von den Herstellern geodätischer Instrumente werden häufig auch Synonyme wie: Multisensorik, Hybride Systeme, All in One, Smart Station, Imaging Total Station usw. gebraucht. Mit diesem Artikel soll nun gezeigt werden, dass die Kombinationen von Sensoren bzw. Messtechniken in der Vermessung jeweils einen beachtlichen Innovationsschub geleistet haben, wie beispielsweise vor fast 100 Jahren durch die Kombination von Theodolit und Distanzmessung der Tachymeter als neuer Instrumententyp entstand, der bis heute eines der erfolgreichsten geodätischen Instrumente ist.

In diesem Artikel wird Sensor als Synonym für Messsystem gebraucht, da ein Sensor im Normalfall nicht direkt einen Messwert liefert, sondern erst nach einer weiteren Umformung, Kompensation und Weiterverarbeitung die gewünschte Information für den geodätischen Nutzer liefert. So basiert bei GNSS die Information „Koordinate" zwar auf Distanzmessungen zu Satelliten, die Information wird aber im GNSS Empfänger zur der „Messgrösse" Koordinate umgeformt. In diesem Artikel sollen anhand von ausgewählten Beispielen die Kombinationsmöglichkeiten und auch die Vernetzung von Sensoren im Sinne des Begriffs Sensornetz aufgezeigt werden.

Geodätische Basisgrössen und durch Kombination entstandene Instrumente und Messsysteme

In der Geodäsie werden normalerweise als Basisgrössen Distanz, Richtung bzw. Winkel, Bilder, Positionen auf bildgebenden Sensoren und Beschleunigungen erfasst. Daraus lässt sich ein Stammbaum erstellen, der aus der sinnvollen Kombination von verschiedenen Sensoren geodätische Instrumente und Messsysteme entstehen lässt (Abb. 1). Eine besondere Stellung nehmen dabei Beschleunigungssensoren und Drehratengeber in der Form von Laserkreiseln ein, die durch Integration in sogenannten Inertialsystemen Koordinatendifferenzen ermitteln. Es darf an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, dass die Verknüpfung von völlig unterschiedlichen Sensorinformationen und Sensorcharakteristiken insbesondere

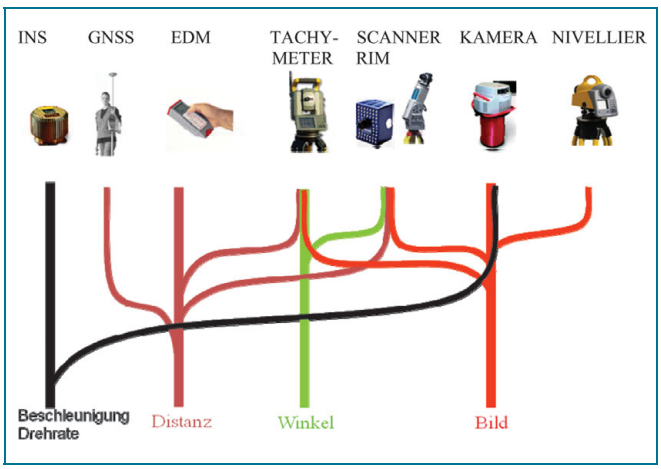

Abb. 1: Stammbaum der geodätischen Instrumente

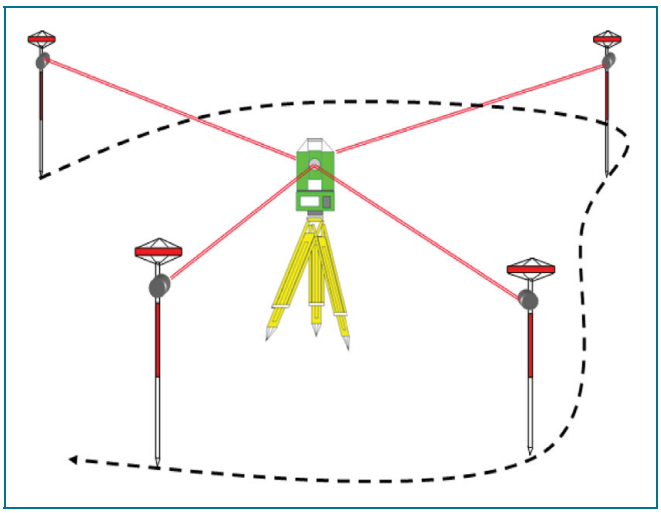

Abb. 2: Kombination GNSS und Tachymetrie

bei zeitkritischen kinematischen Anwendungen nicht unproblematisch ist.
Interessanterweise können heutige Tachymeter als Instrumente mit der grössten Sensorintegration bezeichnet werden. Neben den Grundfunktionen der Richtungs- und Winkelmessung sowie der Distanzbestimmung integrieren Tachymeter biaxiale Neigungssensoren, Scanner und CCD-Sensoren, die einerseits die Zielerfassung ermöglichen, andererseits auch das Fernrohrbild ausgeben. Ebenso naheliegend ist es heute, Tachymeter mit GNSS zu kombinieren. So wurde vor 20 Jahren die Kombination von GPS-Antenne mit Reflektor und Tachymeter in der Form einer sequentiellen Freien Stationierung patentiert (Ingensand et al 1989), die heute von den meisten Herstellern implementiert ist (Abb. 2).
Auch wenn die direkte Verbindung von GNSS mit Tachymetern oder Scannern immer wieder vorgeschlagen wird und sogar als Smartstation™ von der Firma Leica Geosystems angeboten wird, bleibt weiterhin das Problem der erforderlichen Orientierung, die von GNSS bisher nur aus kinematischen Messungen oder mit Mehrantennenlösungen geleistet wird. An der ETH Zürich gibt es inzwischen eine weitere Lösung, die durch gezielte Signalabschwächung eine Richtungsdetektion mit einer GNSS-Antenne ermöglicht (Abb. 3).
Dabei rotiert ein das GNSS-Signal dämpfendes Element, das wiederum mit einem Encoder verbunden ist, über der Antenne. Da der Standpunkt der Antenne und auch die Position der Satelliten bekannt sind, lässt sich aus dieser Messanordnung die Richtung bestimmen. Diese Technologie soll auch in der noch später erwähnten Kombination von Range Imaging und GNSS zum Tragen kommen.

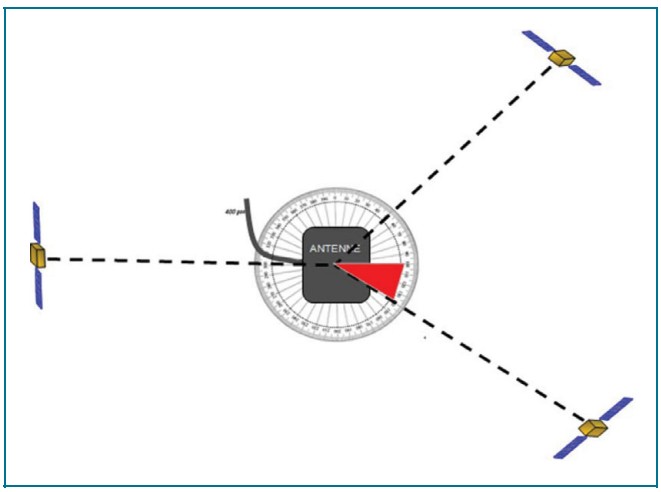

Abb. 3: Richtungsbestimmung mit GNSS (Grimm 2009)

Laserscanning und Bildinformationen

Obwohl Laserscanner zu den bildgebenden Messsystemen gehören, haben Scanner der neuesten Generation viele Gemeinsamkeiten mit Tachymetern. Es ist sogar davon auszugehen, dass beide Technologien, Tachymetrie und Laserscanning in den Instrumenten der nächsten Generationen zusammenwachsen werden (Ingensand, Wunderlich 2009). Aus diesem Grund sind ähnliche Kombinationen von Laserscannern mit anderen Sensoren vorhersehbar. Neben der Verbindung mit GNSS ist vor allem die Kombination mit CCD-Kameras sinnvoll. Laserscanner haben gegenüber photogrammetrischen Systemen den Vorteil, dass sie direkt die Distanz bestimmen und nicht aus Vorwärtsschnitten mit z.T. ungünstigen Geometrien ableiten. Andererseits versagen berührungslos messende Distanzverfahren der Scanner an Kanten. Man spricht dann von sogenannten Mixed Pixels Effekten. Hier ist die Bildinformation einer CCD-Kamera in der Erkennung von Kanten eindeutig im Vorteil. Eine weitere neue Messtechnologie ist in der Kombination von Kamerabild, Scanner und Tachymeterfunktionalität, die ein sogenanntes intelligentes Scanning ermöglicht (Scherer 2004, Staiger et al 2008). Dabei ist auch die Möglichkeit einer gegenseitigen Kalibrierung der verschiedenen Sensoren bzw. Messsysteme hervorzuheben.

Multisensorik am Beispiel eines Gleismesswagens

In weiteres typisches Beispiel für eine hohe Integration von Sensoren sind die sogenannten Gleismesswagen. Stellvertretend soll an dieser Stelle der sogenannte Swisstrolley™ vorgestellt werden, der in Zusammenarbeit von Hochschule und Industrie entwickelt wurde. Die kinematische Messtechnik eines Gleismesswagens erfordert spezielle Sensoren und Messverfahren, wie z.B. die kontinuierliche Bestimmung der Position und die daraus abgeleitete Trajektorie (Abb. 4). Dieses erfolgt beim Gleismesswagen bei hohen Genauigkeitsforderungen und in Tunneln mittels zielverfolgenden Tachymetern, bei geringeren Anforderungen mittels GNSS.
Neben der Positionsbestimmung ist der Messwagen mit Neigungsmessern, einem Spurweitenmesssystem, Odometern und Temperatursensoren ausgerüstet. Aus diesen Sensordaten werden die Informationen Überhöhung, Gradient, Kilometrierung und Spurweite abgeleitet. Als Produkte resultieren Weg-Verwindungs- und Weg-Spur-

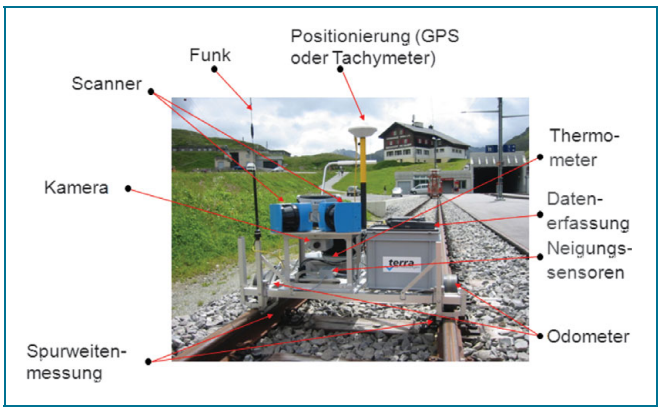

Abb. 4: Sensorik des Gleismesswagens (Glaus 2006)

Abb. 5: IMAR Inertialsystem mit Autokollimationseinrichtungen (Neuhierl et al 2006)

weiten-Diagramme. Daraus werden die erforderlichen Korrekturwerte für Gleisstopfmaschinen ermittelt und an diese weitergegeben. In Kombination mit Laserscannern und CCD-Kamera kann zusätzlich die trassennahe Umgebung (Terrain, Gebäude, Fahrleitungen etc.) kinematisch erfasst werden.

Kreisel, Inertialsysteme und Tachymeter zur Richtungsübertragung

Im Projekt AlpTransit ist die Richtungsübertragung durch einen 800 Meter tiefen Schacht auf die Sohle des Gotthard Basistunnels eine der grössten Herausforderungen. Da Verfahren wie Doppellotung oder die Messung eines räumlichen Präzisionsnetzes innerhalb des Schachtes mit einem Durchmesser von 8 Metern verworfen werden mussten, blieb für die Richtungsübertragung nur die bekannte Methode mittels Azimutkreisel. Da auch diese Messtechnik von vielen Parametern abhängt, die ihrerseits auf Hypothesen, wie z.B. der aus Schweremodellen abgeleiteten Lotabweichungsdifferenz zwischen Schachtkopf und Sohle, abhängig ist, wurde nach einen unabhängigen Kontrollverfahren gesucht. Hier wurde eine Lösung darin gefunden, den ω_z Laserkreisel eines Inertialsystems als richtungssensitiven Sensor einzusetzen.
Normalerweise werden diese Systeme verwendet, um aus der Integration von Beschleunigungsmessungen und den aus den drei Kreiseln abgeleiteten Drehungen die zurückgelegte Trajektorie zu bestimmen. Kann für eine Koordinatenübertragung mit einem Inertialmesssystem über 800 m „nur“ eine Genauigkeit von ca. 0,5 m erwartet werden, ist für die in Sedrun durchgeführten Messungen vor allem die Genauigkeit der Rotation um die z-Achse ω_z von Interesse, da der Schacht senkrecht angeordnet ist. Die Auflösung der Laserkreisel liegt bei 0,3 mgon und ist damit der Auflösung von Azimutkreiseln ebenbürtig. Bei Laserkreiseln treten jedoch durch äussere temperaturabhängige und innere Störungen Sensordriften auf, die sich in einem Hin- und Herwandern des Ausgabesignals um seine Sollkennlinie äussern. Ausserdem ist mit Driften von 0,002 °/Stunde zu rechnen. Diese Driften unterliegen keiner Systematik, aber es besteht die Möglichkeit der Modellierung durch das sogenannte Zero Velocity Update (ZUPT). Dabei wird das Driftverhalten der Sensoren in der Ruhelage, d.h. bei Geschwindigkeit = Null und bei Drehrate = Null erfasst. In Sedrun wurde eine möglichst kurze Fahrzeit der Schachtförderanlage zur besseren Modellierung dieser Driften angestrebt.
Die Übertragung der Richtung im Zugangsstollen auf das Intertialsystem erfolgte durch Autokollimation (Abb. 5). Nach der Schachtfahrt wurde die Richtung auf gleiche Weise wieder auf das Netz im Bereich des Schachtfusses übertragen. Aufgrund der zu erwartenden Driften des Inertialsystems wurde diese Messung mehrmals durchgeführt. Ein Vergleich der Kreiselmessungen und der aus Inertialmessungen abgeleiteten Richtungsübertragung, die in zwei Kampagnen durchgeführt wurde, ergab eine Differenz von 2,2 mgon. Das Ergebnis wurde aber im Hinblick auf die unabhängige Kontrolle der Richtungsübertragung als völlig ausreichend beurteilt.

Neue Kombinationen – Range Imaging (RIM) und GNSS

Vor ca. 10 Jahren wurden neue Sensoren als Kombination von CCD-CMOS Chips und Infrarot-Dioden-Arrays als Sender für die Distanzmessung entwickelt. Mit dieser Anordnung wurde es möglich, dass jedes einzelne Element (Pixel) des CCD-Chips berührungslos eine Distanz ermitteln kann. Damit ist ein neuer Sensortyp entstanden, der, im Gegensatz zu sequentiell messenden Scannern, mit einer Abtastrate von bis zu 30 Hz direkt 3D-Punktwolken erfassen kann. Auch wenn die Leistung mit einer Auflösung von durchschnittlich 160 × 124 Pixeln und Reichweiten von max. 40 Metern noch vergleichsweise gering ist, so entsteht in Kombination mit GNSS, RIM und einem integrierten Neigungssensor bereits ein funktionales portables Messsystem, welches man auch als Weiterentwicklung der Kombination GPS, EDM, Magnetfeldsensor und Neigungssensor verstehen kann. Insbesondere mit der bereits erwähnten GNSS-Richtungsbestimmung ist eine flexible berührungslose 3D-Erfassung von Objekten im Nahbereich möglich (Abb. 6).

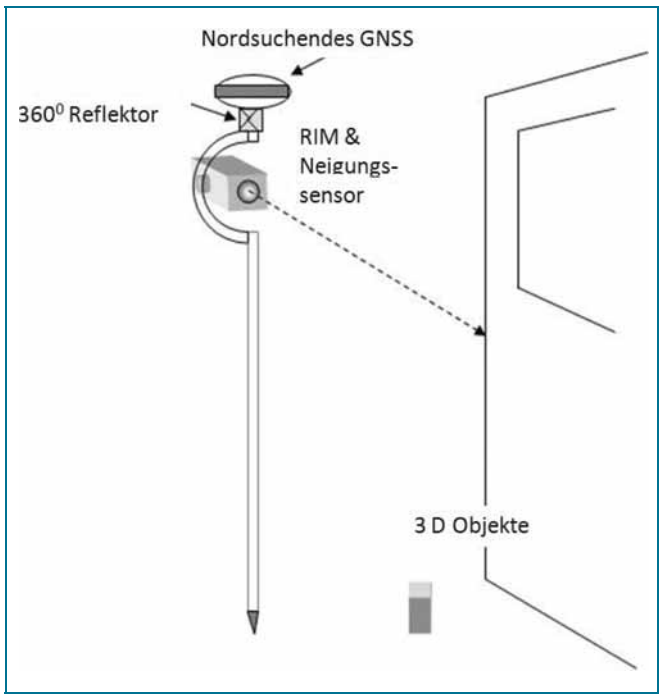

Abb. 6: Kombination von Range Imaging und GNSS (Kahlmann, Ingensand 2009)

Sensornetze in der Geodäsie

Der Begriff „Sensornetz“ wurde ursprünglich zur „kabellosen“ Überwachung von Pipelines erfunden. Heute wird er auch oft im Zusammenhang mit Innenraum Positionsbestimmung genannt. Inzwischen wird auch von Geo-Sensornetzen gesprochen bei denen der Raumbezug der erfassten Informationen im Vordergrund steht. Diese weisen gemäss Sohraby (Sohraby et al 2007) eine typische Grundstruktur aus vier Komponenten auf:

1. Den autonom arbeitenden Sensoren einschliesslich von Aktoren, die wir in der Geodäsie z.B. als Motoren in Tachymetern kennen, und den Sensorknoten, die mehrere Sensoreinheiten umfassen.
2. Einem Kommunikationssystem, welches gegenüber der ursprünglichen Definition eines Sensornetzes aber nicht drahtlos sein muss, sondern auch alle anderen Technologien der Informationsübertrage einschliesst.
3. Einer Zentralstation mit Datenzusammenführung und Datenaufbereitung.
4. Programmen (Software) für die weiterführende Datenauswertung zur Einleitung von Aktionen (Alarm etc.).

Komplexe Installationen mit geodätischen Sensoren (Abb. 7) zum Monitoring von Objekten wie Staumauern, Hangrutschungen oder Felsstürzen entsprechen vollumfänglich der Definition von Geosensornetzen (Stempfhuber 2009).

Der Unterschied zur allgemeinen Sensornetzdefinition besteht darin, dass Sensornetze für Monitoringaufgaben nicht „ad hoc“ eingebaut und vernetzt werden, sondern an den für die Deformation repräsentativen Punkten installiert werden (Glabsch et al 2009). Während Einzelpunkte, die z.B. mit GNSS-Empfängern oder Neigungsmessern besetzt werden, im Sinne der Terminologie als Sensoren bezeichnet werden können, sind Tachymeter, die zu Reflektoren („Sensoren“) messen, die über einen Objektbereich verteilt wurden, als Sensorknoten aufzufassen.

Literatur

[1] Glabsch, J.; Heunecke, O.; Schuhbäck, S.: Hangüberwachung mittels Low Cost GNSS im alpinen Raum – Ansätze und Erfahrungen, AHORN-Tagung, 5./6.11.2009, ETH Zürich

[2] Grimm, D. E.: GNSS Orientation for kinematic applications. 1st International Conference on Machine Control & Guidance, ETH Zurich, 2008

[3] Heunecke, O.: Geosensornetze in der Ingenieurvermessung. Forum, Zeitschrift des Bundes der Öffentlich bestellten Vermessungsingenieure e. V., Heft 2, 34. Jahrgang, 2008, S. 357–364

[4] Ingensand, H.; Frei, E.; Serrer, R.: Surveying System with an Electro-Optical Total Station and a Mobile Receiver Station of a Satellite Positioning System, United States Patent 5233357, 1989

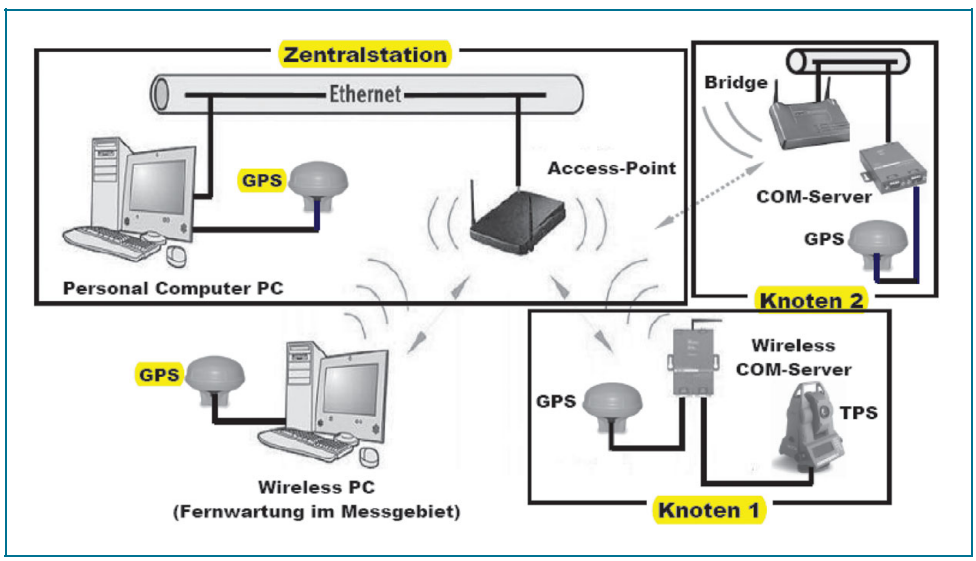

Abb. 7: Sensornetz „Geomonitor“ der Firma SOLEXPERTS

[5] Ingensand, H.; Wunderlich, T.: Scanner und Was kommt danach? DVW Seminar Terrestrisches Laserscanning (TLS), Fulda, November 2009 (im Druck) Herausgegeben von DVW e.V. – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation u. Landmanagement DVW e.V.
[6] Kahlmann, T.; Ingensand, H.: Range Imaging, Zeitschrift für das Vermessungswesen (ZfV), 2007, pp. 87–96
[7] Neuhierl, T.; Ryf, A.; Wunderlich, T.; Ingensand, H.: AlpTransit Sedrun: Weltpremiere mit inertialer Messtechnik, Geomatik Schweiz, 6/2006
[8] Scherer, M.: Intelligentes Scannen mit elektronischen Tachymetern unter Einbeziehung von Digitalbildern, Ingenieurvermessung 2004. Tutorial Laserscanning, Zürich
[9] Sohraby, K.; Minoli, D.; Znati, T.: Wireless Sensor Networks – Technology, Protocols and applications, New York: John Wiley and Sons
[10] Stempfhuber, W.: Geodätische Monitoringsystems – Stand der Technik und Abgrenzung der gegenwärtigen Systeme, DVW-Schriftenreihe, Band 59, S. 181–191, Wissner-Verlag, 2009
[11] Staiger, R.; Wunderlich, T.: „Schneller, weiter, effizienter“ – Aktuelle Entwicklungen der Scannertechnik, In: Terrestrisches Laserscanning (TLS 2008), Beiträge zum 79. DVW-Seminar am 6. und 7. November 2008 in Fulda. Herausgegeben von DVW e.V. – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation u. Landmanagement DVW e.V., 2008

Anschrift des Autors:
Prof. Dr.-Ing. Hilmar Ingensand, ETH Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Wolfgang Pauli-Straße 15, CH-8093 Zürich,
E-Mail: ingensand@geod.baug.ethz.ch

VERANSTALTUNGEN

Terrestrisches Laserscanning (TLS 2009)

Yes, We Scan.

Die DVW Arbeitskreise 3 „Messmethoden und Systeme“ und 4 „Ingenieurgeodäsie“ führten am 19. und 20. November 2009 bereits zum 5. Mal das Seminar „Terrestrisches Laserscanning“ in Fulda durch, das diesmal unter dem Motto *Yes, we scan* stand.

Die Veranstaltung gliederte sich in vier Abschnitte. Nach einer Einführung wurde das Thema Algorithmen behandelt, dem jeweils ein Abschnitt zum mobilen Scannen und einer zum Thema Anwendungen folgten.

Im Ersten Abschnitt brachte zunächst Thomas Wunderlich (TU München) einen Überblick über aktuelle Technologien und blickte voraus auf zukünftige technischen Lösungen. Harald Wölfelschneider (Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik, Freiburg) stellte die physikalischen Prinzipien der Laserscanntechnologie vor. Insbesondere wurde auf die Störfaktoren hingewiesen, die einem Anwender die Messergebnisse „verhageln“ können. Abgeschlossen wurde die Session mit einem Beitrag von Wilfried Wehmann (HTW Dresden), der die Ergebnisse einer Abschlussarbeit vorstellte, in der das noch recht neue Instrument Faro Photon 120 untersucht wurde.

Die zweite Session wurde mit einem Beitrag von Uwe Stilla (TU München) begonnen, der intensiv auf die Grundlagen der Full Waveform des Lasersignals und deren Nutzung für die Auswertung von terrestrischen Scanns einging. Er zeigt die Möglichkeiten, Multireflektionen auch im terrestrischen Laserscanning zu nutzen, um auch teilverdeckte Objekte zu erkennen. Andreas Nüchtern (Uni Bremen) folgte mit seinem Beitrag „6D-SAM mit global konsistentem Scanmatching“. Er zeigt, dass es gelingt, Scanns, die durch Roboter erfasst wurden, automatisch zu registrieren und dadurch „selbstlernende“ Systeme zur 3D-Planerstellung zu nutzen. Lutz Plümer (Uni Bonn) schloss mit einem Beitrag an, in dem beschrieben wird, wie durch Scanns erfasste Fassaden durch eine vorgegebene Grammatik automatisiert analysiert und klassifiziert werden können. Wolfgang Niemeier (TU Braunschweig) stellt in seinem Beitrag eine entwickelte Methode zum Mapping von Rasterdaten auf gescannten Szenen vor, die insbesondere die Problematik teilverdeckte Bereiche berücksichtigt.

Die dritte Session zum Thema mobiles Scannen wurde mit einem Beitrag von Albrecht Grimm, (IGM Siegen) eingeleitet, der das System „Street Mapper“ vorstellte. Dieses Fahrzeug basierte Laserscannsystem, das mit GNSS und Inertialmeßsystemen gestützt wird, dient zur Erfassung von Straßenräumen und wird quasi weltweit eingesetzt. Marius Schäuble (Amberg Technologie, Regensdorf-Watt) erläutert die Erfassung von Lichträumen für die MTA New York, dem Betreiber der U-Bahnen im Großraum New York City. Hier wurde gezeigt, wie mit auf Schienenfahrzeugen montierten Scanner die Massendaten für Lichtraumprofile ohne Störung des Betriebes erfasst und mit ausgefeilter Software ausgewertet werden können. Wolfgang Huep (Hochschule für Technik Stuttgart), stellt eine Einsatzmöglichkeit für die Trimble VX Spatial Station vor, wobei das Instrument schwerpunktmäßig für die Erfassung von Rissen an Gebäuden eingesetzt wurde. Insbesondere wurde die Kombination der Scannfunktion mit der Bilderfassung beleuchtet. Schließlich stellte Guido v. Gösseln (Angermeier Ingenieure GmbH, Giebelstadt) das System Tiger vor. Das System arbeitet auf einer selbst fahrenden Plattform und wird vor allem in Tunnelbereichen eingesetzt.

In der vierten Session wurden ausgewählte Anwendungen dargestellt. Johannes Ohlmann-Bartusel (TU München) berichtet über den Einsatz von terrestrischen Laserscannern für die Überwachung von Ortsbrustdeformationen im Tunnelbau. Ursula Buck (Uni Bern) zeigt den Einsatz von Laserscannern im Bereich der Kriminalistik. Hier kann das

(Fortsetzung auf Seite 18)