

**„eagle eye technologies“: Ein kinematisches terrestrisches
photogrammetrisches Stereoaufnahmesystem mit direkter
Georeferenzierung mittels INS, GPS und Odometer**

von

Manfred BÄUMKER und Johannes LUDWIG

14. Internationale Geodätische Woche 2007

**Obergurgl
Ötztal / Tirol**

11.-17. Februar 2007

„eagle eye technologies“: Ein kinematisches terrestrisches photogrammetrisches Stereoaufnahmesystem mit direkter Georeferenzierung mittels INS, GPS und Odometer

Manfred BÄUMKER und Johannes LUDWIG

1 Einleitung

Aufgrund der Regelungen zum neuen kommunalen Finanzmanagement (z.B. Kommunales Finanzmanagementgesetz NRW – NKFG NRW (LANDESREGIERUNG NORDRHEIN-WESTFALEN 2004)) sind die Kommunen gehalten, in den nächsten 4 - 6 Jahren das Geldverbrauchskonzept auf das Ressourcenverbrauchskonzept umzustellen, sowie das vollständige Vermögen der Kommune zu erfassen. Hierzu zählt auch die Bestandsaufnahme und Bewertung der gesamten Infrastruktur der Kommunen. Da in vielen Kommunen diese Informationen nicht in geeigneter Form vorliegen, sind diese i.d.R. komplett neu aufzunehmen und zu bewerten.

Von den verschiedenen in Frage kommenden Messmethoden, die zur Erfassung dieser großen Datenmengen einsetzbar sind, zeichnet sich ein photogrammetrisches Verfahren besonders wegen seiner Wirtschaftlichkeit, Genauigkeit und seiner hohen Detailtreue aus. Weitere Vorteile bietet ein derartiges Verfahren, wenn die Gewinnung der Bilddaten aus einem fahrenden Fahrzeug heraus erfolgen kann und die direkte Georeferenzierung der Bilddaten ohne Passpunkte möglich ist. Mit dieser konkreten (utopischen) Vision kontaktierte im vergangenen Jahr das Vermessungsbüro Ludwig & Schwefer den Fachbereich Vermessungswesen der FH Bochum, da dort speziell für die Zwecke der Aerophotogrammetrie bereits ein System für die Stabilisierung einer photogrammetrischen Kamera und die direkte Georeferenzierung mittels INS und differentiellem GPS existierte (BÄUMKER & HEIMES 2001).

Auf der Grundlage dieses Systems wurde in kurzer Zeit ein völlig neues Konzept für den terrestrischen Einsatz entwickelt. Das Konzept sieht mindestens zwei Digitalkameras (Canon EOS 1 Mark II N, 8,2 Megapixel) vor, die auf dem Dach des Messfahrzeugs mit möglichst großer Basis schiefwinklig zueinander fest montiert werden und die Fahrbahn und die Seitenränder in Fahrtrichtung erfassen. Um auch in Stadtgebieten mit schlechter Satellitenverfügbarkeit genaue Daten zur direkten Georeferenzierung zu bekommen, erfolgt die Stützung des INS zusätzlich zum RTK-GPS durch zwei Weggeber (Odometer), die direkt an den hinteren Rädern des Messfahrzeugs angebracht sind. Auch die simultane Auslösung der beiden Kameras erfolgt vollautomatisch und wegabhängig über den Navigationsrechner, der auch die Synchronisation der Rückmeldesignale mit den Inertial-, RTK-GPS- und Odometerdaten und deren Speicherung übernimmt. Die Auswertung und Georeferenzierung der Stereoaufnahmen erfolgt mit den abgespeicherten Daten im

Postprocessing, für das zur Berechnung der photogrammetrischen Winkel aus den INS-Winkeln ein neues Verfahren entwickelt wurde.

Das Konzept „eagle eye technologies“ unseres neuen terrestrischen photogrammetrischen Aufnahmesystems sowie die einzelnen Systemkomponenten zur direkten Georeferenzierung werden vorgestellt. Seit gut einem halben Jahr befindet sich das System im Dauereinsatz. Über die Auswerteverfahren und deren Ergebnisse wird ebenfalls berichtet.

2 Komponenten des Messsystems

Das Messsystem besteht aus folgenden Hardwarekomponenten (Abb. 1):

- Inertialsystem (INS), Strapdown-System mit faseroptischen Kreiseln (LCI-6X)
- RTK-GPS-System (LEICA System 500 oder LEICA System 1200)
- SAPOS[®]-Korrekturdatenempfänger
- 2 Odometer (inkrementale Weggeber)
- Navigations- und Steuerrechner
- 2 – 4 digitale Kameras vom Typ Canon EOS 1 Mark II N, 8,2 Megapixel
- 1 – 2 digitale Videos mit 3 Megapixel
- pro Kamera/Video: je 1 PC zur Bild- und Videodatenerfassung mittels der Canon Capture Software

Die beiden Hauptkameras werden auf einem verwindungssteifen Montagerahmen vorne rechts und vorne links auf dem Dach des Messfahrzeugs montiert. Die Aufnahmerichtung der beiden Kameras ist nach vorne geneigt und somit wird der Straßenbereich bis ca. 50 m vor dem Fahrzeug erfasst. Optional besteht die Möglichkeit zwei weitere Kameras zur Erfassung des rechten Fahrbahnrandes und Bürgersteigs zu installieren. In der Mitte des Daches befindet sich das Inertialsystem (INS) und ca. 0.3 m dahinter die GPS-Antenne. Die Kameras und das INS werden über Passstifte in ihrer Lage und Orientierung so fixiert, dass nach einer Demontage der Kamera oder des INS die ehemalige Orientierung so wieder hergestellt werden kann, dass eine erneute Kalibration entfallen kann. An dem linken und rechten Hinterrad befindet sich jeweils ein inkrementaler Weggeber (Odometer), der mit einer auf den Radumfang umgerechnete Auflösung von 0.1 mm die Drehbewegung des Rades erfasst.



Abb. 1: Messfahrzeug mit den Sensoren

Die Messdaten des INS, GPS und Odometers werden zentral von einem Navigations- und Steuerrechner erfasst, dort abgespeichert und in Echtzeit einer Navigationsberechnung zugeführt, wobei folgende Parameter mit 64 Hz berechnet werden (Abb. 2):

- Position (geographische Breite, Länge und Höhe)
- Geschwindigkeit (Nord, Ost, vertikal)
- Kurs- und Lagewinkel (Roll-, Nickwinkel)
- Drehraten (um die Fahrzeuglängsachse, -querachse, -hochachse)
- Zurückgelegter Weg

Ein Teil diese Daten wird auch über eine separate Schnittstelle bereit gestellt, mit denen optional eine regelbare Plattform stabilisiert oder ein Sensor auf ein Objekt ausgerichtet werden kann. Der Navigations- und Steuerrechner regelt auch die automatische und simultane Auslösung der ans System angeschlossenen Kameras. Für die Synchronisation der hybriden Messdaten werden zusätzlich das PPS-Signal des GPS-Empfängers und das Rückmeldesignal der Kamera (Blitzsignal) interruptgesteuert mit einer Genauigkeit < 1 ms akquiriert.

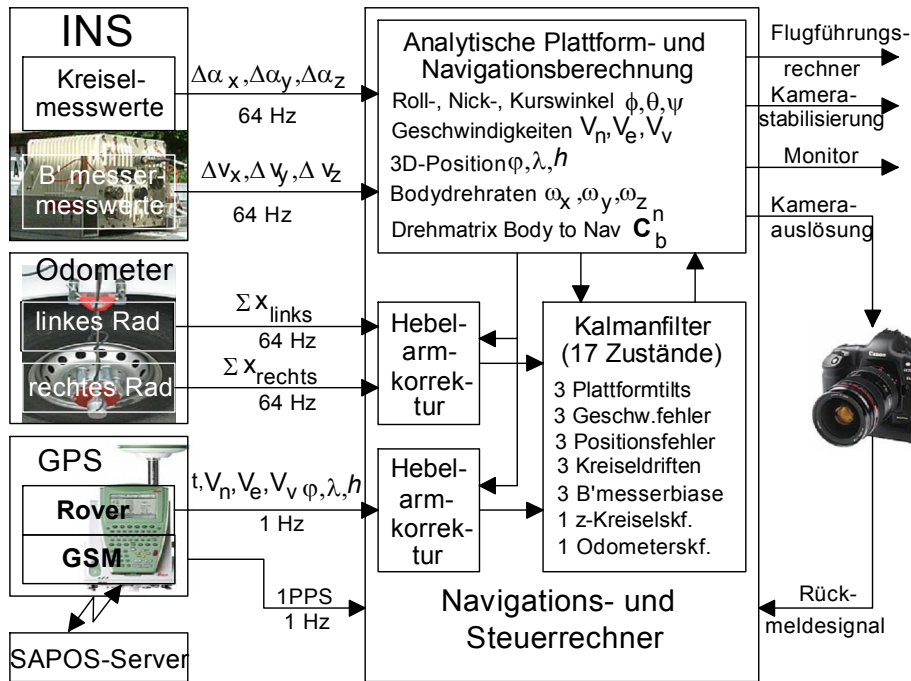


Abb. 2: Datenfluss und Berechnungen im Navigations- und Steuerrechner

Bei dem eingesetzten GPS-Empfänger handelt es sich um einen RTK-Empfänger vom Typ LEICA 1200, der bei ausreichender Satellitenkonstellation mittels der über ein Mobiltelefon (GSM-Modem) empfangenen SAPOS[®]-HEPS-Daten (Hochpräziser Echtzeit

Positionierungs-Service) mit 1 Hz eine 1 cm – 5 cm genaue 3D-Position in Echtzeit ermöglicht (Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen 2003). Der Empfänger ist so konfiguriert, dass zusätzlich mit einer Datenrate von 1 Hz die Rohdaten intern im Empfänger registriert werden, um so später im Postprocessing unter Nutzung des *SAPOS*[®]-GPPS-Dienstes (Geodätischer Präziser Positionierungs-Service, 1 cm, near online) eine verbesserte und kontrollierte Positionslösung sowie vor allem mehr Positionen mit cm-Genauigkeit zu bekommen.

Die automatisch und wegabhängig ausgelösten Bilder der Kameras werden in Echtzeit über eine Firewireschnittstelle von der Canon-Capture-Software (Abb. 3) von der Kamera zu einem kameraeigenen PC übertragen und dort im RAW-Format abgespeichert. Bei der eingestellten höchsten Auflösung erfordert jedes Bild ca. 10 MByte Speicherkapazität. Bei einer Messstrecke von 20 km und einem Auslöseweg von 20 m resultieren hieraus 1000



Bilder und somit 10 Gbyte Daten pro Kamera! Um später eine genaue Zuordnung der Bilder zu den Navigationsdaten zu gewährleisten ist es daher wichtig, die PC-Uhren vor jeder Vermessungsfahrt mit der Ortszeit (MESZ oder MEZ) genau zu synchronisieren.

Abb. 3: Canon-Capture-Software zur Online-Visualisierung und -datenerfassung der Bilddaten via Firewireschnittstelle

3 Auswertung der Navigationsdaten

Vom Navigations- und Steuerrechner werden sämtliche originären Rohdaten des Inertialsystems (64 Hz-Winkel- und Geschwindigkeitsinkremente), der beiden Odometer (64 Hz akkumulierte Pulse/Zählerstände) und des GPS-Empfängers (1 Hz-NMEA-Daten) zusammen mit einer Zeitangabe der Rechneruhr abgespeichert. Zusätzlich zu diesen Daten wird die Zeit des Empfangs des PPS-Signals und des Kamerarückmeldesignals darin abgespeichert. Zusätzlich zu diesen Daten werden intern im GPS-Empfänger die Rohdaten aufgezeichnet und für den Zeitraum der Messfahrt die Daten einer virtuellen Referenzstation in der Mitte oder einer *SAPOS*[®]-Referenzstation in der Nähe des Messgebietes vom *SAPOS*[®]-Server heruntergeladen.

Die so aufbereiteten Rohdaten gewährleisten eine komplette nachträgliche Navigationsberechnung und Bereitstellung der entsprechenden Lösungen für eine direkte Georeferenzierung der Bilddaten. Obwohl ebenfalls die in Echtzeit vom RTK-GPS-System berechneten 3D-Positionsdaten und Geschwindigkeiten zur Verfügung stehen, wird i.d.R.

im Postprocessing eine neue Berechnung durchgeführt. Das Postprocessing erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden mit dem Programmsystem *Leica Geo Office* unter Nutzung der Daten des *SAPOS*[®]-Servers im kinematischen Modus mit einer Frequenz von 1 Hz die Positionsdaten berechnet, wobei zwei Auswertestrategien möglich sind:

- Kinematische Lösung mit den Rohdaten einer virtuellen Referenzstation in der Mitte des Messgebietes
- Kinematische Lösung mit den Rohdaten einer oder mehrerer *SAPOS*[®]-Referenzstation in der Nähe des Messgebietes

Durch das Postprocessing ist somit nicht nur eine zusätzliche Kontrolle der RTK-Positionen gegeben, sondern i.d.R. auch eine größere Anzahl von Positionen, für die die Mehrdeutigkeiten gelöst sind. Dieses ist u.a. auf die Vorwärts/Rückwärtsberechnung der Mehrdeutigkeitslösung nach einem Phasenabriss, z.B. nach unter Brückenunterquerung, und der Abstand zu einer virtuellen oder echten Referenzstation zurückzuführen. Im Echtzeitbetrieb hat der Nutzer keinen Einfluss darauf, welche Daten welcher Referenzstationen gesendet werden, so dass es häufig vorkommt, dass der Abstand zur Referenzstation teilweise 20 km und mehr betragen kann. Diese Probleme können im Postprocessing - nicht zuletzt wegen der besonderen Möglichkeit der Berechnung einer virtuellen Referenzstation vom *SAPOS*[®]-Server - vermieden werden. Auf diese Weise kann die GPS-Auswertung für verschiedene Wegabschnitte mit verschiedenen virtuellen Referenzstationen erfolgen, so dass ein Abstand zur Referenzstation < 5 km eingehalten werden kann.

In einem zweiten Schritt werden die GPS-Daten zusammen mit den Daten des Inertialsystems und der beiden Odometer einer integrierten Navigationsberechnung zugeführt. Die Berechnungsmodule sind identisch mit denen, die in Echtzeit im Navigations- und Steuerrechner ablaufen (vgl. Abb. 2). Im Postprocessing erfolgt während der Berechnung zur Kontrolle zusätzlich eine Visualisierung aller relevanten Navigationsdaten und sowie die Schätzungen des Kalmanfilters. Für die Zeitpunkte der Rückmeldesignale der Kamera werden die 3D-Positionen (geografische Breite, Länge, Höhe) und die Eulerwinkel (Roll-, Nick- und Kurswinkel (ϕ, θ, ψ)) berechnet und gespeichert, um daraus anschließend die direkte Georeferenzierung herzustellen.

4 Auswertung der Bilddaten

Für die Auswertung der Bilddaten müssen im ersten Schritt für jedes Foto jeder Kamera die 6 Parameter der äußeren Orientierung (3D-Koordinaten der Projektionszentren und die Bildneigungs- und -verkantungswinkel $(\varphi, \omega, \kappa)$) ermittelt werden. An Hand der abgespeicherten Auslösezeiten erfolgt eine Zuordnung der Bilder zu den INS-Daten, die für die Georeferenzierung in einer Datei abgespeichert sind. Danach erfolgt die eigentliche Auswertung der Bilddaten mit dem Programmsystem PHIDIAS.

4.1 Direkte Georeferenzierung mittels der INS/GPS-Daten

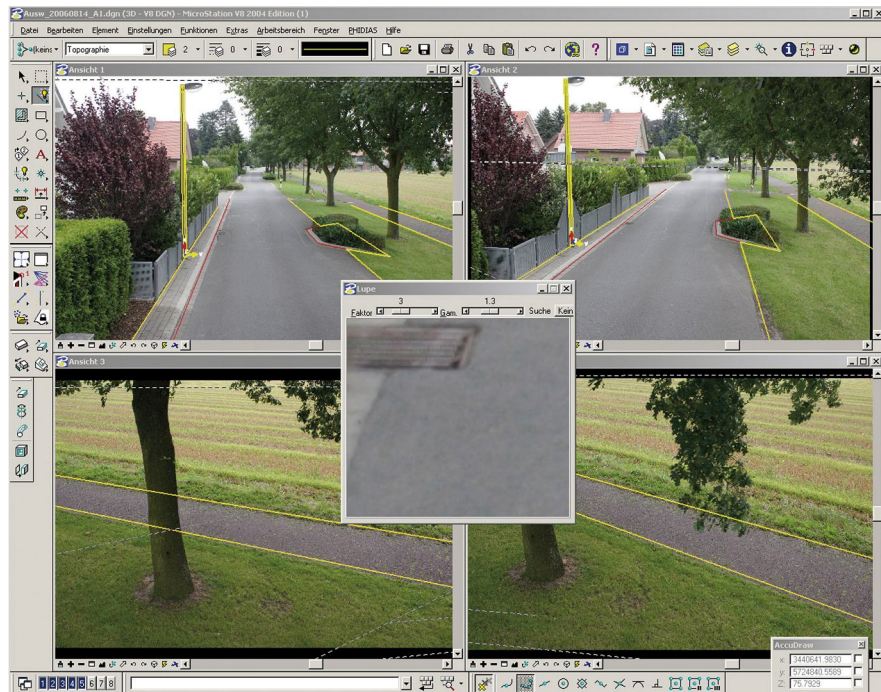
Die direkte Georeferenzierung erfolgt mit Hilfe der INS-Winkel (ϕ, θ, ψ), die hierfür in die vom Auswertesystem benötigten Winkel (φ, ω, κ) umgerechnet werden müssen. Dazu muss für jede Kamera deren Einbauwinkel in Bezug zu den Hauptachsen des INS und der Hebelarm der Kamera im Bodysystem des INS bekannt sein. Da sowohl das Projektionszentrum der Kamera und auch die Hauptachsen des Bildkoordinatensystems und des INS nicht zugänglich sind, werden die Daten im Rahmen einer speziellen Kalibration bestimmt. Hierzu wird von mehreren Fahrzeugpositionen aus ein Testfeld mit koordinatenmäßig bekannten Passpunkten aufgenommen. Aus den INS/GPS-Daten und den Daten der photogrammetrischen Auswertung werden dann die Orientierungen und die Hebelarme der Kameras in Bezug zum INS in einer Ausgleichung berechnet. Zur Vermeidung von Problemen bei der Ausgleichung werden die Orientierungen hier auf der Basis von Quaternionen berechnet. Mit Hilfe eines Quaternionen, das vier Parameter enthält, lässt sich eindeutig eine beliebige Drehung im Raum beschreiben (BÄUMKER 2007). Aus dem Quaternion selbst kann anschließend wieder eine allgemeine 3x3-Drehmatrix abgeleitet werden. Unter Berücksichtigung dieser Drehmatrix sowie der Definition der Drehreihenfolge und der Achsen des Objekt- und des Bildkoordinatensystems werden dann aus den INS-Winkeln und -Positionen sowie den Hebelarmen der Kameras die für die photogrammetrische Auswertung benötigten 6 Parameter der äußeren Orientierung für jedes Bildpaar berechnet. Näheres zu diesen z.T. sehr komplexen Umrechnungen findet sich in BÄUMKER 2007.

4.2 PHIDIAS-Auswertung

Die Zweibildmessung der photogrammetrischen Bildmodelle erfolgt mit dem Programmsystem PHIDIAS. PHIDIAS ist als so genannte MDL-Applikation vollständig in das 3D-fähige CAD-System MicroStation integriert (vgl. BENNING & SCHWERMANN 1997). Die Bildpaare und die dazugehörigen Orientierungs- und Kameradaten aus der Befahrung werden in das System geladen und können entsprechend der fortlaufenden Nummern simultan weitergeschaltet werden. Bei einem Bildabstand von 20 m wird in einem sichtbaren Bereich bis ca. 40 m ausgewertet. Stereoskopische Auswertungen sind dabei auf Grund der Aufnahmegeometrie nur in Einzelbereichen sinnvoll. Die Messungen werden daher in den Einzelbildern vorgenommen. Durch programmtechnisch realisierte Auswertehilfen können Punkte, Linien und Flächen mit den entsprechenden Attributen sehr effizient bestimmt werden. Da die Messung auf einer 3D-Koordinatenmessung basiert, können auch beispielsweise Durchfahrtshöhen von Brücken oder Lampen ermittelt werden. Durch den kleinen Bildabstand und durch den Einsatz von derzeit 4 Kameras kann der Feldvergleich für die nicht sichtbaren Straßenräume auf ein Minimum reduziert werden.

Die Abbildung 4 zeigt die PHIDIAS-Auswertungen von zwei verschiedenen Straßenabschnitten. Aufgrund der hohen Auflösung der Bilddaten lassen sich noch Details von wenigen Zentimetern erkennen und erfassen. Die Standardabweichungen der Objektkoordinaten betragen für die Bereiche, in denen in der GPS-Auswertung die

Mehrdeutigkeiten gelöst werden konnten, < 0.1 m und für die Abschnitte ohne ausreichenden GPS-Empfang 0.1% vom zurückgelegten Weg nach dem Signalverlust. Da für sämtliche befahrene Straßenabschnitte die photogrammetrischen Modelle vorliegen, können auch zu einem späteren Zeitpunkt - ohne aufwendigen Außendienst - weitere Daten im Innendienst kostengünstig nachträglich erfasst werden.



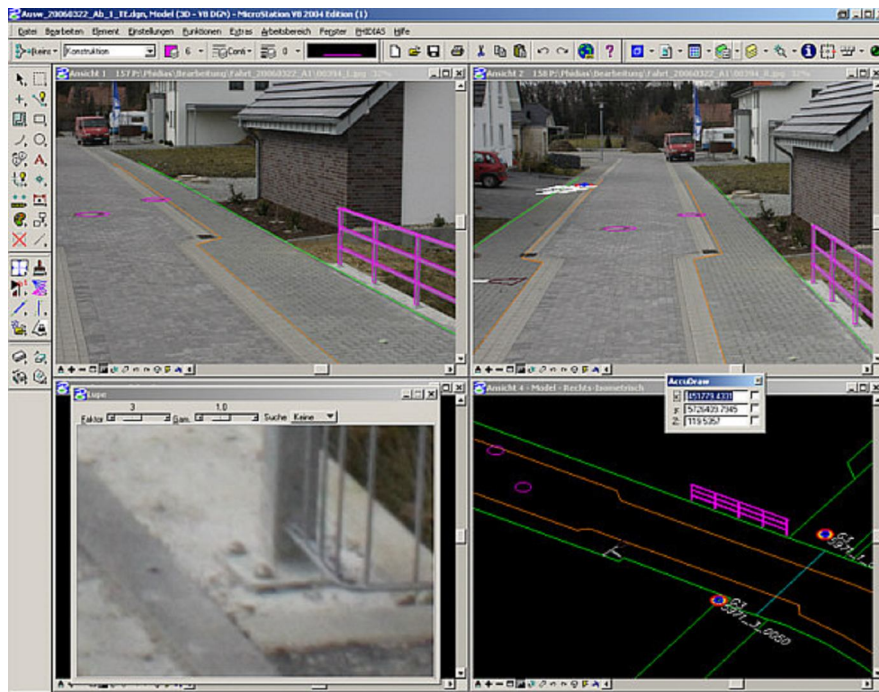


Abb. 4: Auswertebeispiele von zwei Straßenräumen

5 Zusammenfassung

Für die Bestandsdatenerfassung wurde ein neuartiges hybrides Erfassungssystem zur kinematischen Vermessung von Verkehrsanlagen entwickelt. Unser kinematisches Vermessungssystem „eagle eye technologies“ ist ein so genanntes Multi-Sensor-System mit direkter Georeferenzierung. Für die Positionsbestimmung werden das Global Positioning System (GPS), ein hochgenaues Inertiales Navigationssystem (INS) und odometrische Sensoren eingesetzt. Diese Sensoren werden so miteinander verknüpft, dass sie sich sowohl ergänzen als auch kontrollieren. Damit können genaue und zuverlässige Positionsdaten gewonnen werden. Diese werden im Anschluss für die direkte Georeferenzierung der Bilder von Messkameras nutzbar gemacht.

Mit diesem System werden der Verkehrsraum, die Ausstattung (z.B. Schilder, Ampeln oder aber auch Durchfahrtshöhen), bauliche Anlagen und der Straßenzustand bei der Befahrung von hochauflösenden digitalen Farbkameras photogrammetrisch aufgenommen. Gleichzeitig wird die Fahrt auf georeferenzierten Farbvideos festgehalten und dokumentiert. Optional können auch mit einem Laserscanner z.B. Brückenbauwerke dokumentiert werden.

Im Postprocessing werden aus den Bildern dann photogrammetrisch die Koordinaten bestimmt. Die Auswertemöglichkeiten von punkt-, linien- und flächenförmigen Objekten im Straßenraum inklusive der Attribute ist dabei quasi vollständig möglich.

Im Anschluss erfolgt die visuelle Erfassung der Straßenzustände anhand der Schadensmerkmale. Durch die georeferenzierten Bilder wird eine vorbereitende Bewertung durch den Innendienst möglich, die den Feldvergleich auch für diese Aufgabe wesentlich vereinfacht. Diese vollständige Straßendokumentation ermöglicht dem Straßenbaulastträger nicht nur die Bewertung und Bilanzierung im Rahmen des doppelten Rechnungswesens sondern auch die Planung der Unterhaltung des kommunalen Straßennetzes.

Mit dem Messfahrzeug „eagle eye“ wurden bisher ca. 1.000 km kommunale Straßen befahren und anschließend im Innendienst entsprechend den Anforderungen der Auftraggeber ausgewertet.

Diese Methode ist nicht nur deutlich kostengünstiger als eine entsprechende topographische Aufnahme, sondern durch eine höhere Messpunktdichte auch insgesamt wesentlich aussagekräftiger. Ferner können auch im Nachhinein aus den einmal gebildeten photogrammetrischen Modellen bei Bedarf noch weitere Bestandsdaten kostengünstig erfasst werden.

Literatur

- Bäumker, M, F.-J. Heimes (2001):* New Calibration and Computing Method for Direct Georeferencing of Image and Scanner Data Using the Position and Angular Data of an Hybrid Inertial Navigation System. In: Proceedings OEEPE Workshop Integrated Sensor Orientation, Hannover, 17.-18.9.2001.
- Bäumker, (2002):* Hybride Messtechnik, GPS, INS und Stützsensoren. In: Proceedings des Seminars Kinematische Anwendungen auf Straße und Schiene, Neubiberg, 17.-19.9.2002.
- Bäumker, M, H. Hahn, F.-J. Heimes, G. Vestjens (2003):* Ein strenges funktionales Modell für die direkte Georeferenzierung und modellgestützte Regelung einer Fernerkundungsplattform. In: Proceedings 23. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF), Bochum, 9.-11.9. 2003.
- Bäumker, M. (2007):* Kalibration und Umrechnung von INS- und photogrammetrischen Winkeln für beliebige gegenseitige Anordnungen. In: Proceedings 14. Internationale Geodätische Woche. Obergurgl, Ötztal, Tirol, 11.-17.2.2007.
- Benning, W. und R. Schwermann (1997):* PHIDIAS-MS - eine digitale Photogrammetrieapplikation unter MicroStation für Nahbereichsanwendungen. Allg. Vermessungsnachrichten AVN 104, S. 16-25, 1997.

Kraus, K. (2004): Photogrammetrie. Band 1. Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 7. Aufl., de Gruyter Lehrbuch, Berlin 2004, ISBN 3-11-017708-0, 2004.

Landesregierung Nordrhein-Westfalen (2004): Gesetz über ein Neues Kommunales Finanzmanagement der Gemeinden im Land Nordrhein-Westfalen (Kommunales Finanzmanagementgesetz NRW – NKFG NRW vom 16. Nov. 2004. Gesetz und Verordnungsblatt für das Land Nordrhein-Westfalen – Nr. 41, 24. November 2004.

Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen (2003): Richtlinien zum Einsatz von satellitengeodätischen Verfahren im Vermessungspunktfeld – GPS-Richtlinien. Stand vom 2.9.2002 mit 1. Nachtrag vom 15.4.2003, Bonn 2003.

Anschriften der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Manfred Bäumker
Fachbereich Vermessungswesen und
Geoinformatik
FH Bochum
Lennerhofstr. 140
44801 Bochum
email: Manfred.Baeumker@FH-Bochum.de

Dr.-Ing. Johannes Ludwig
Vermessungsbüro Ludwig und Schwefer
Öffentlich bestellte Vermessungsingenieure
Feldmühlenweg 18
59454 Soest
email: JL@LS-Soest.de