

# Mobile Messroboter

Mobile Messsysteme bewegen sich durch die Umwelt, deren Objekte sie erfassen sollen. Diese technologische Entwicklung eröffnet neue Forschungsfragen und Anwendungsfelder. In der Deutschen Geodätischen Kommission der Bayerischen Akademie der Wissenschaften sind Forscher versammelt, die sich damit befassen.

VON HEINER KUHLMANN UND VOLKER SCHWIEGER

SEIT FRIEDRICH ROBERT HELMERT 1880 die Geodäsie als die Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche definiert hat, hat sich die Technologie, die für diese Aufgaben zur Verfügung steht, stetig gewandelt. Zu Helmerts Zeiten wurden optische Theodolite und einfache mechanische Längenmesswerkzeuge – etwa Messketten und Latten – verwendet, um die Punktkoordinaten des Grundlagentzes zu bestimmen. Von diesen Punkten aus wurden die Objekte, die von Interesse waren, erfasst – wegen der überwiegenden Nutzung durch das Militär waren das im Wesentlichen Straßen und Wege, das Gewässernetz, Gebäude und Geländeformen. Dabei wurden optisch-mechanische Instrumente wie Kippregel und Messtisch eingesetzt. Die Darstellung erfolgte in analogen Landkarten mittleren Maßstabs, häufig 1:25.000.

## Moderne Elektronik in der Messtechnik

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts hat die Elektronik in den geodätischen Instrumentenbau Einzug gehalten. Streckenmesser funktionieren elektrooptisch und sind in Tachymeter eingebaut, die ihre Ziele selbständig finden und anzielen. Die Daten werden gespeichert oder per Funk übertragen. Laserscanner tasten das Messobjekt mit einer enormen Punktdichte automatisch ab, ähnlich wie bei digitalen Bildern. Die Positionsbestimmung erfolgt vielfach mit Hilfe satellitengestützter Verfahren, am häufigsten durch das Global Positioning System GPS. Die in der Geodäsie typischen Genauigkeitsbereiche von wenigen Zentimetern oder darunter können dabei nur durch differentielle Phasenmessungen erreicht werden, bei denen die unbekannte Anzahl der vollen Wellenlängen vom Satelliten zum Empfänger mit berechnet wird. Hierzu sind in den letz-

ten Jahren einige effiziente Ansätze entwickelt worden. Die für die Differenzbildung notwendige zweite Station mit bekannten Koordinaten wird in einigen Ländern durch permanent arbeitende Referenzstationsdienste bereitgestellt, wie in Deutschland durch SAPOS. Deren Daten werden durch Funk in Echtzeit an die Nutzer übertragen. Insgesamt ist die Objektaufnahme durch die Fortschritte in der Erfassungstechnik effizienter und damit preiswerter geworden. Es können mehr Details aufgenommen werden.

## Anreicherung mit Sachdaten

Die Repräsentation der erfassten Informationen erfolgt heute in Geoinformationssystemen, wobei neben der Geometrie, also der Lage und Form der Objekte, zahlreiche Sachdaten mit abgespeichert werden können. Dabei kann es sich etwa um die Art der Nutzung, die Objektmaterialien oder auch um administrative Informationen handeln. Die graphische Darstellung geschieht in digitalen Karten, deren Aussehen je nach Zweck stark differieren kann. So unterscheidet sich die Ansicht von Bebauung und Straßen einer Stadt

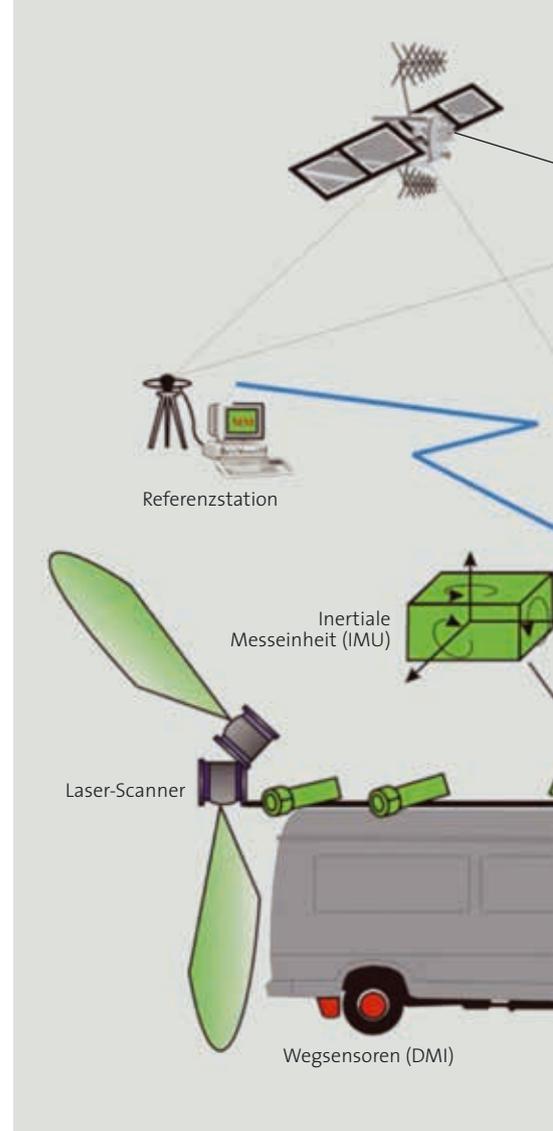
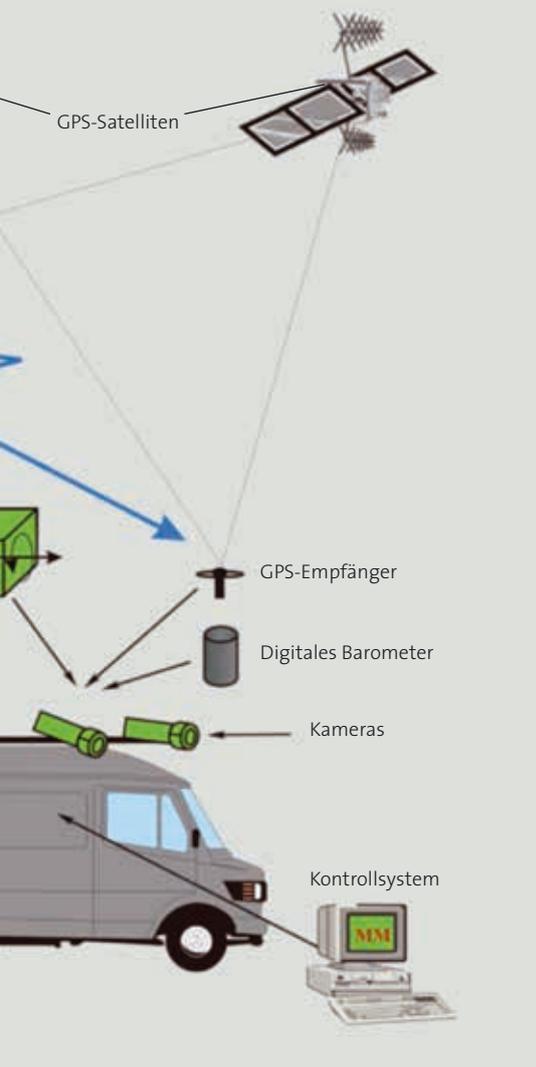


ABB. AUS: G. GRÄBE, KINEMATISCHE ANWENDUNGEN VON LASERSCANNERN IM STRASSENRAUM, 2007



- Vielfalt: Waren früher für die Nutzung durch das Militär nur relativ wenige Objekte von Interesse, so hat heute jede Anwendung ihre eigenen Anforderungen: Fahrzeugnavigationssysteme benötigen neben der Straßengeometrie auch Abbiegevorschriften, Verkehrsschilder und Hausnummern. Die für den Betrieb zuständigen Straßenbauverwaltungen benötigen vom selben Objekt aber den Straßenbelag, dessen Abnutzung und den Bewuchs der Grünflächen. Bei Gebäuden ist im Liegenschaftskataster nur die Lage und der Grundriss gefordert, für Baufortschrittsdokumentation und Building Information Modelling (BIM) werden Wandstärken, Stützentypen und deren Materialien benötigt. Die Liegenschaftsverwaltung ist wiederum mehr an Fensterflächen oder Beleuchtungseinrichtungen interessiert.

**Der nächste Schritt: mobile Messroboter**

Kinematische Multi-Sensor-Systeme, also mobile Messroboter, stellen hinsichtlich der Effizienz nun den nächsten Entwicklungsschritt dar. Das Instrument, das für die Vermessung eingesetzt wird, ist nicht mehr stationär, sondern bewegt sich auf

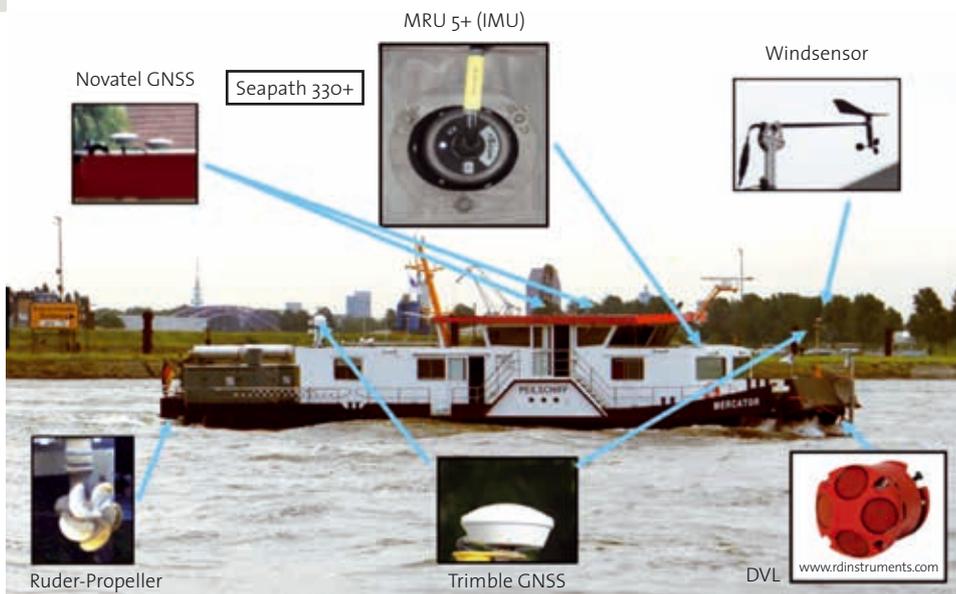
**Abb. 1: Mobiles Mapping-Fahrzeug (links).**

**Abb. 2: Kinematisches Multi-Sensor-System auf einem Vermessungsschiff.**

auf dem Bildschirm eines Fahrzeugnavigationssystems stark von der in einem Bebauungsplan.

Bei der „Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche“ lässt sich daher heute ein Trend ausmachen, der durch folgende Merkmale charakterisiert ist:

- Detailreichtum: Bei der Erfassung von Gebäuden wird z. B. nicht mehr nur der Grundriss, sondern auch die Gebäudehöhe, die Form der Außenhaut, Dachformen, Fenster, Türen, Innenräume, Einrichtungsgegenstände usw. gefordert.
- Häufigkeit: Vielfach ist nicht nur die einmalige Erfassung und Darstellung eines Objektes gefragt, sondern es sollen auch zeitliche Veränderungen berücksichtigt werden. Wiederholungszyklen können dabei von der Verformung einer Staumauer durch die jährliche Variation von Temperatur und Wasserstand über die tägliche Baufortschrittsdokumentation bei der Erstellung eines Bauwerkes bis zur Verformung eines Brückenbauwerkes durch einen darüber fahrenden Zug variieren.



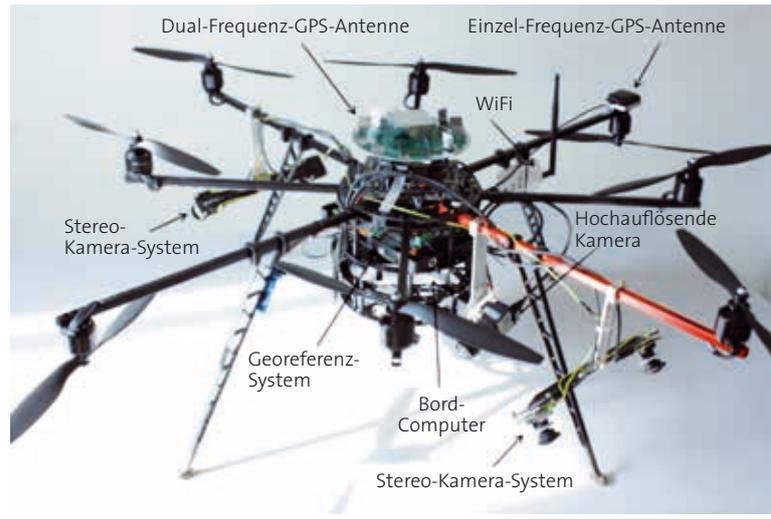
einer Trägerplattform durch die Umwelt, deren Objekte von Interesse sind. Bei kinematischen Multi-Sensor-Systemen sind grundsätzlich zwei Aufgaben zu trennen: Einerseits wird die Position und Orientierung der Trägerplattform des mobilen Messroboters bestimmt, um damit andererseits das Messobjekt durch Laserscanner oder digitale Fotos zu vermessen.

ABB. AUS: M. BREITENFELD ET. AL., DEVELOPMENT OF A MULTI-SENSOR SYSTEM, 2014

Ein Beispiel hierfür sind die schon vielfach bekannten mobilen Mapping-Fahrzeuge, wie sie etwa für Google Street View eingesetzt werden. Das zur Bestimmung der sechs Parameter von Position (X, Y, Z) und Orientierung (Roll, Nicken, Heading) notwendige inertielle Navigationssystem besteht aus sich ergänzenden Sensoren (Beschleunigungsmessertriade, drei Kreisel, Temperaturfühler), zu denen oft weitere Sensoren Zusatzinformationen geben (z. B. Weggeber oder Barometer). Diese Sensoren führen überwiegend zu Drifteffekten, daher ist eine Kombination mit GPS-Positionen und -Geschwindigkeiten unbedingt erforderlich. Darüber hinaus sind zur Umgebungserfassung Sensoren wie Laserscanner und Kameras in unterschiedlichen Spektralbereichen (z. B. RGB, Infrarot) erforderlich.

Abb. 3: Oktokopter der Universität Bonn (oben).

Abb. 4: 3-D-Modell, als Punktwolke mit Oktokopter erfasst.



Kinematische Multi-Sensor-Systeme sind nicht auf Land und Luft beschränkt. Im Gewässer misst man die Wassertiefe bzw. die Lage des Gewässerbodens mit Echoloten. Die Bestimmung von Position und Orientierung erfolgt nach ähnlichen Algorithmen und mit ähnlichen Sensor-konfigurationen wie bei land- oder flugbasierten Systemen.

Jüngste Entwicklungen ermöglichen es, Objekte aus der Luft mit kleinen, unbemannten Fluggeräten (UAV) zu erfassen. Besondere Herausforderungen liegen hier in der geringen Traglast, sodass die eingesetzte Sensorik möglichst leicht sein muss. Abbildung 3 zeigt den an der Universität Bonn im Rahmen der DFG-Forscherguppe „Mapping on Demand“ entwickelten Oktokopter.

Der besondere Anspruch an die Bestimmung von Position und Orientierung ergibt sich hier durch die Echtzeitanforderung; die Position und Orientierung des Fluggerätes und daraus die Objektgeometrie werden während des Fluges errechnet. Bei bisherigen Systemen erfolgte lediglich die Datensammlung während der Fahrt, die Berechnungen machte man im Post-Processing.

Die Position wird mit Hilfe eines 2-Frequenz-GPS-Empfängers in Kombination mit einer inertialen Messeinheit bestimmt. In Bezug auf die oben angesprochenen Phasenmehrdeutigkeiten ergeben sich zwei Problemfelder: Durch Bäume

oder andere Gegenstände, die unterflogen werden, geht häufig die Verbindung zum Satelliten verloren, was eine Neuinitialisierung der Phasenmehrdeutigkeiten notwendig macht. Dieser Berechnungsprozess dauert nach den bisherigen Algorithmen einige Sekunden, was für die Echtzeitanforderung das zweite Problem darstellt. Innerhalb der Forschergruppe ist es gelungen, diese Zeit durch einen geschickten Filteransatz auf 0,2 s zu reduzieren.

Roll- und Nicken werden durch Beschleunigungs- und Drehratensensoren bestimmt. Die Erfassung des Headings ist anspruchsvoller, da der Bezug zum Schwerfeld fehlt. Hier kommt neben den inertialen Sensoren eine zweite GPS-Antenne zum Einsatz, die mit der ersten Antenne und dem Satelliten ein interferometrisches Dreieck aufspannt. Außerdem wird die Orientierungsbestimmung durch den optischen Fluss in den vier Stereokameras gestützt.

Die Vermessung der Objekte erfolgt hier durch eine hochauflösende Industriekamera. Die Bilder

**DIE AUTOREN**

*Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann hat seit 2003 die Professur für Geodäsie an der Universität Bonn inne. Er ist Mitglied der Deutschen Geodätischen Kommission der Bayerischen Akademie der Wissenschaften und Sprecher ihrer Sektion Ingenieurgeodäsie.*

*Prof. Dr.-Ing. Volker Schwieger hat seit 2010 die Professur für Ingenieurgeodäsie an der Universität Stuttgart inne. Er ist Mitglied der Deutschen Geodätischen Kommission der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.*

werden per Funk an eine Bodenstation übermittelt. Dort wird innerhalb weniger Sekunden mit Hilfe der zuvor bekannten Position und Orientierung der Aufnahmeorte automatisch ein 3-D-Modell in Form einer Punktwolke generiert. Der Vorteil eines solchen Systems ist, dass es für interessierende Objektdetails näher heranfliegen und somit die Auflösung vergrößern kann.

**Kalibrierung des Messsystems**

Bei mobilen Messrobotern sind die sechs Parameter von Position und Orientierung für jeden Zeitpunkt zu bestimmen. Daher muss auch die relative Lage der Sensoren auf der Plattform bekannt sein. Für dieses Kalibrierproblem stehen bereits einige Ansätze zur Verfügung, die im Wesentlichen auf die Vermessung einer bekannten Geometrie zurückgehen. Werden die Trägerplattformen nun sehr filigran, wie dieses bei UAVs der Fall ist, treten durch Wind, Flugmanöver und Rotorbewegungen kurzzeitige Änderungen dieser Kalibrierparameter auf. Die Entwicklung dieser Ansätze ist Gegenstand aktueller Forschung.

**Zeitliche Synchronisation und Regelkreise**

Ebenso wie die räumliche Zuordnung der Messelemente des sich bewegenden Objektes erforderlich ist, diese zeitlich eindeutige Zuordnung (Synchronisierung) kann messtechnisch durch eine Hardware-Lösung erfolgen, z. B. durch die Steuerung der Messauslösung durch einen elektrischen Impuls oder software-technisch durch Ermittlung des Zeitversatzes zwischen unterschiedlichen Messsensoren und Interpolation der Messdaten in einer gemeinsamen Zeitskala. Für Echtzeitanforderungen spielt die Geschwindigkeit des Objektes oder/und des Messensors eine Rolle. Zusätzlich zur Synchronisation muss die Totzeit, also die Zeit, die von der Erfassung von Daten bis zu deren abgeschlossener Verarbeitung vergeht, berücksichtigt werden. Beides hat in der Entwicklung von geregelten Messrobotern eine große Bedeutung. Die Anforderungen liegen zum Teil im Bereich von Millisekunden und darunter.

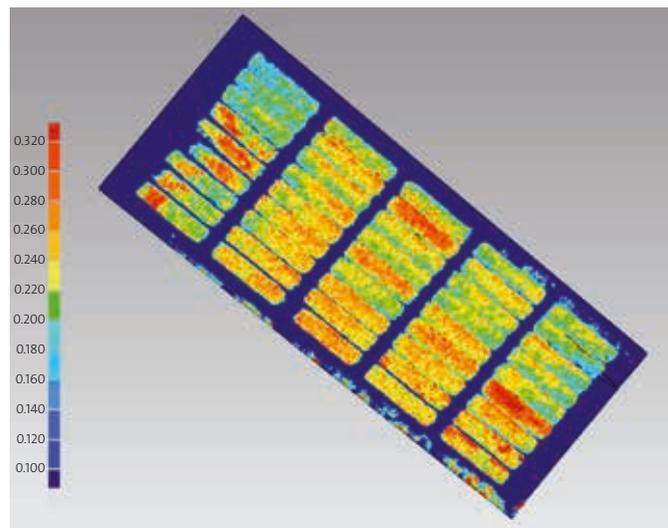
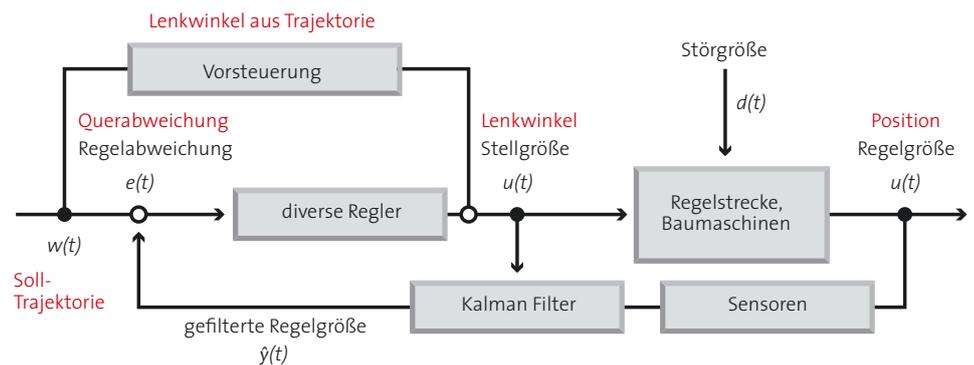
Auslösen von Aktionen an vordefinierten Positionen. Als Beispiel seien hier das Steuern einer Straßenfertigungsmaschine oder die koordinatengesteuerte Aussaat von Nutzpflanzen genannt. Dies mündet in eine Regelungsaufgabe, die exemplarisch am Beispiel einer Querreglung für eine Baumaschine gezeigt ist.

**Fazit**

Durch die neuartigen mobilen Messsysteme mit einer effizienten und damit preiswerten Datenerfassung eröffnen sich neue Anwendungsfelder. So wurden damit z. B. bereits die Wachstumsraten von Gerstepflanzen auf einem Versuchsfeld bestimmt, um die Pflanzenzüchtung zu verbessern.

In Zukunft muss neben der automatisierten und effizienten Geometrie der Messobjekte verstärkt an der automatischen Ableitung der Semantik aus der Punktwolke gearbeitet werden.

**Abb. 5: Querregelungskreis am Beispiel eines Baumaschinen-simulators.**



**Abb. 6: Wachstumsraten von Gerstepflanzen, mit Oktokopter erfasst.**

Für bestimmte Anwendungen ist nicht nur die mobile Erfassung erforderlich, sondern auch das