

Baumaschinenführung und -steuerung – Von der statischen zur kinematischen Absteckung

Werner Stempfhuber und Hilmar Ingensand

Zusammenfassung

Die Aufgabenstellungen der Baumaschinenführung und -steuerung muss als Teilbereich der Ingenieurgeodäsie bzw. -navigation betrachtet und verstanden werden. Die erforderlichen Aufgaben wie Datenerfassung und -verifizierung, die Erstellung der Planungsdaten sowie die Berechnung der Navigationsparameter werden hierbei in enger Zusammenarbeit mit den Fachdisziplinen der Maschinenkonstruktion, der Kybernetik und der Baufachkräfte durchgeführt. Somit wird hier das gesamte Spektrum der geodätischen Messtechnik benötigt. Zudem ist das geometrische Verständnis zwischen der 3D-Trajektorie, den entsprechenden Zusatzinformationen wie der Maschinenorientierung, der Längs- und Querneigung in Bezug zu den Rechenpunkten am Werkzeug und der Designdaten erforderlich. Der nachfolgende Artikel soll den Stand der Technik und die Rolle der Ingenieurgeodäsie beschreiben und gleichzeitig die daraus ableitbaren neuen Anforderungen für unseren Berufsstand hervorheben.

Summary

Machine Control and Machine Guidance is a subarea of Engineering Geodesy. All required tasks such as data collection and -verification, design data processing, calculation of the control parameters have to be in a close collaboration with the machine construction engineer, the experts in the field of cybernetics and the fore man of the construction site. This new technology covers the full range of Geodetic Metrology and Engineering Geodesy. Furthermore, an overall understanding of the geometric configuration between the 3D-trajectory, all additional information such as the machine orientation, the long- and cross slope related to all control points and the interaction of the design data. The aim of this report is to describe and to define all requirements of our professional skills.



1 Einleitung

Bei Aufgaben des Tiefbaus wie z.B. Tunnel-, Gleis-, Flughafen- und Straßenbau kommen schwere Baumaschinen zum Einsatz. Traditionell werden Maschinen wie Motorgrader, Fräsen, Asphalt- und Gleitschalungsfertiger mittels einer mechanischen Abtastung von Leitdrähten in Lage und Höhe gesteuert. Arbeiten mit Baggern, Raupeen oder Walzen wurden bislang nur indirekt, d.h. durch klassische Vermessungsarbeiten kontrolliert. Seit etwa 20 Jahren existieren bereits Systeme, die eine horizontale oder leicht geneigte Ebene eines Rotationslasers als direkte Höhenreferenz bei Planierungsarbeiten verwenden. Des Weiteren werden seit vielen Jahren Systeme, die eine optische Abtastung von Leitdrähten oder das »Kopieren« einer Referenzhöhe (z.B. einer alten oder abgefrästen Straßendecke) mittels Ultraschallsensoren für die Höhenanzeige oder auch die Höhenregelung, verwendet. Mitte der 90er-Jahre ergab sich durch die instrumentellen Weiterentwicklungen im Bereich der zielverfolgenden Tachymeter und auch der »Real-Time-Kinematic«-fähigen GPS-Empfänger die Möglichkeit, eine Bewegung im Bereich weniger Zentimeter zu beschreiben. Etwa zum selben Zeitpunkt begann der Einsatz dieser 3D-Sensoren zur Führung oder Steuerung von Baumaschinen. Neben der Steuerung von Tunnelbohrmaschinen mit zielverfolgenden Tachymetern war die leitdrahtlose 3D-Steuerung eines Wirtgen Gleitschalungsfertigers zur ICE-Neubaustrecke zwischen Frankfurt und Köln eines der ersten Projekte zur Baumaschinensteuerung (www.wirtgen.com). Etwa in demselben Zeitraum wurden Asphaltfertiger und Fräsen bei einem Autobahnabschnitt in der Nähe von St. Gallen mittels zielverfolgenden Tachymetern gesteuert (Zimmermann 2004) (s. Abb. 1).



Abb. 1: Pilotprojekte: 3D-Steuerung eines Gleitschalungsfertigers an der ICE-Neubaustrecke zwischen Frankfurt-Köln, 1999 (links) und 3D-Steuerung eines Asphaltfertigers während der Autobahnsanierung St. Gallen/Schweiz, 2000 (rechts)

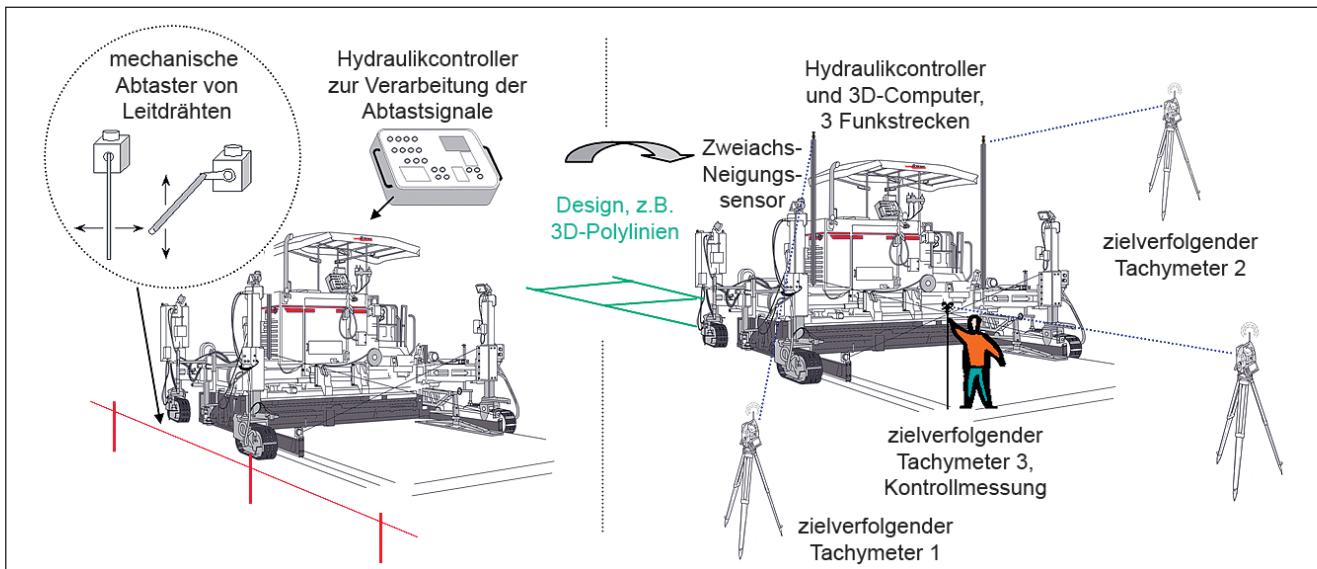


Abb. 2: Klassisches Leitdrahtverfahren / Leitdrahtloses 3D-Verfahren von Gleitschalungsfertigern (Stempfhuber 2006)

Heutzutage werden für Erdarbeiten oder Aufgaben zur Planierung sowie für den Einbau und die Verdichtung von Asphalt- oder Betondecken immer häufiger Systeme zur visuellen Führung, zur Höhenregelung oder aber auch zur voll-automatischen 3D-Steuerung verwendet. Dieser Ansatz, basierend auf der permanenten 3D-Echtzeit-Positionierung, der Längs- und Querneigungsreduktion sowie der Bestimmung der Maschinenorientierung, muss deshalb als Teilbereich der Ingenieurgeodäsie betrachtet werden. Am Beispiel eines konventionellen sowie eines leitdrahtlosen Systemaufbaus für Gleitschalungsfertiger wird dieser Übergang deutlich (s. Abb. 2).

2 Klassifizierung der einzelnen Anwendungsbereiche

Bei einem Großbauprojekt wie z.B. einer Autobahnneubaustrecke werden die einzelnen Arbeitsschritte unterteilt

in Datenerfassung, Grundlagenvermessung, Datenprozessierung und Modellerstellung, Erd- und Planierungsarbeiten, Verdichtung sowie den Deckeneinbau und die Deckenversiegelung.

Hieraus lassen sich 1D- oder 3D-Systeme zur Führung oder semi-automatischen Steuerung bzw. zur voll-automatischen Steuerung klassifizieren (s. Abb. 3).

Zunächst jedoch sind die Bereiche der Datenerfassung mit der entsprechenden Design-Erstellung des digitalen Geländemodells oder der 3D-Polylinien zu diskutieren. Wegen der Vielzahl der unterschiedlichen Datenformate nimmt dieser Arbeitsschritt bereits eine zentrale Stellung im Gesamtprozess ein. Verschiedene Systemanbieter haben einen mehr oder weniger durchgängigen digitalen Datenfluss mit entsprechender Officesoftware, einen Datenlogger für GNSS-Empfänger und Tachymeter mit Kontroll- und Verifizierungsfunktionen realisiert. Die Schwierigkeit besteht im Allgemeinen beim Austausch verschiedener Planungs- und Messdaten unterschiedlicher Herkunft. Darüber hinaus fehlt bei der Verwendung der Baumaschi-

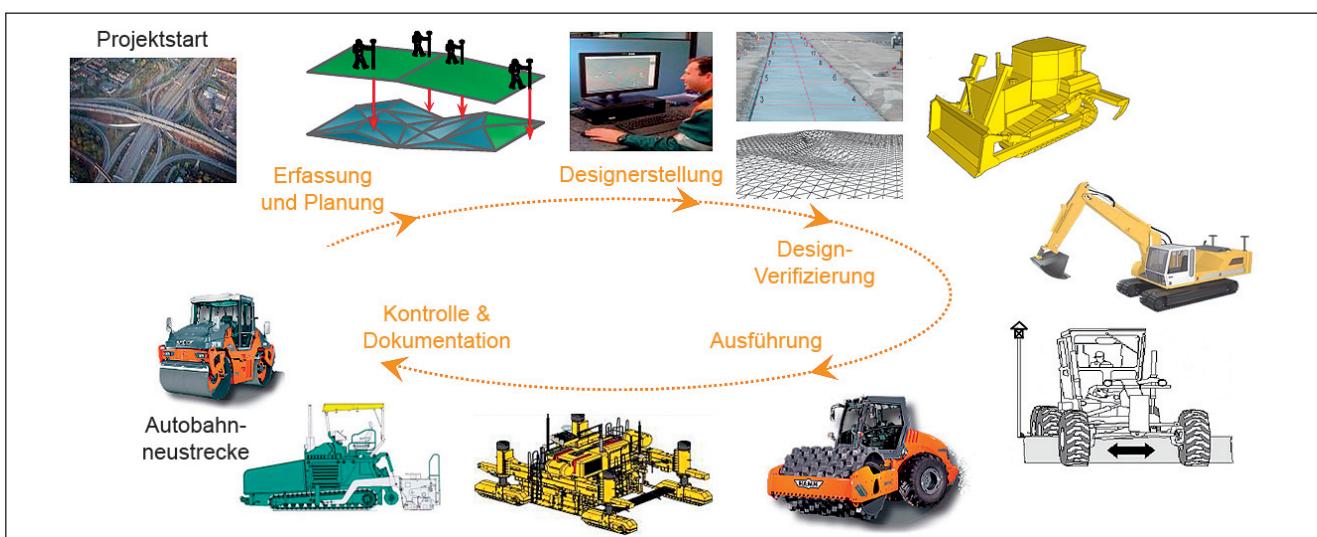


Abb. 3: Anwendungen bei einer Autobahnneubaustrecke

nensteuerung die visuelle Orientierung bzw. Kontrolle der Leitdrähte auf den Baustellen. Einzelne Softwarepakete bieten jedoch Plausibilitätskontrollen wie z.B. Nachbarschaftsbeziehung der häufig verwendeten TIN-Vermaschung (Triangular Irregular Network) mit maximal definierten Gradienten an. Die Designdatenverifizierung ist jedoch vor dem Maschineneinsatz wegen der fehlenden optischen Referenz zwingend erforderlich. Eine einfache Design-Erstellung ist zum Teil bereits im Feld direkt nach dem Aufmaß realisierbar und kann anschließend direkt auf den Maschinencomputer geladen werden.

2.1 Unterteilung in Führungs- und Steuerungssysteme

Grundsätzlich muss bei einer genaueren Betrachtung zwischen Führungssystemen, auch Leitsysteme genannt, und Steuerungssystemen unterschieden werden. Systeme zur automatischen Steuerung werden für eine automatische Höhenregelung oder eine 3D-Regelung eingesetzt. Eine Unterteilung der einzelnen Bereiche ergibt sich wie folgt:

Führungssysteme

Führungssysteme (Englisch = Indicate or Guidance Systems) sind Verfahren, bei denen einem Maschinenfahrer visuelle Informationen zum manuellen Betrieb der Maschine bzw. des Werkzeugs (z.B. Baggerschaufel oder Raupen- bzw. Graderschar) bereitgestellt werden. Dies können 1D- mit Höhenangaben, 1D- mit Neigungsinformation und 3D-Informationen sein. Ein Eingriff in den Hydraulikkreislauf der Maschine ist hier nicht gegeben. Da der Operateur die Baumaschine weiterhin manuell steuert, sind bei diesen Systemen sicherheitsrelevante Gesichtspunkte nicht oder nur in geringem Maße zu beachten. Gute Resultate erfordern hier jedoch noch immer einen erfahrenen Maschinenführer.

Semi-automatische Systeme

Bei semi-automatischen Systemen (Englisch = Control Systems or Grade Control) wird die 2D-Maschinenposition in Bezug zu den Designdaten grafisch dargestellt und die

Werkzeughöhe mit entsprechender Querneigung an der Maschinenhydraulik automatisch geregelt. Das Prinzip der Höhenregelung ist sowohl bei den konventionellen als auch bei den auf der 3D-Position basierenden Verfahren gleich. Die Höhenabweichungen zwischen dem Soll- und Ist-Wert werden als Stellgrößen mit entsprechender Filterung an den Hydraulikkreislauf übergeben. Ein universeller Controller übernimmt hier die Kommunikation mit dem Messsystem und den Hydraulikventilen. Solche Systeme kommen vorwiegend bei Motorgrädern, Raupen, Kaltfräsen aber auch bei Asphaltfertigern zum Einsatz, wobei die Höhenregelung einer schwimmenden Bohle beim Asphalteinbau einen komplexen Prozess darstellt. Der Maschinenoperateur muss hier die Maschine noch selbst fahren und lenken, die Steuerung des Werkzeugs oder der Schar erfolgt durch den geschlossenen Regelkreis automatisch. Erste Systeme zu einer semi-automatischen Höhenregelung der Baggerschaufel existieren ebenfalls.

Voll-automatische 3D-Steuerungssysteme

Voll-automatische 3D-Steuerungssysteme (Englisch = 3D-Control) kommen zurzeit ausschließlich bei Gleitschalungsfertigern, d.h. für den Betoneinbau zum Einsatz. Hierbei erfolgt sowohl die Höhen- als auch die Richtungssteuerung, d.h. die Navigation der Maschine autonom. Der 3D-Soll-Ist-Vergleich definiert hierbei die Hydraulikstellgrößen, vom Maschinenfahrer wird nur noch die Geschwindigkeit reguliert. Diese Anwendungen mit Genauigkeitsanforderungen im Bereich von etwa 5 mm stellen sehr hohe Anforderungen an das Gesamtsystem dar und können nur erfüllt werden, wenn zum einen das Messinstrumentarium diese hohen Leistungsanforderungen erfüllen kann und zum anderen alle Sensoren ausreichend synchronisiert sind.

Ein geschlossener Regelkreis bildet sowohl bei der semi-automatischen als auch bei der voll-automatischen Steuerung die Grundlage. Die in Abb. 4 beschriebenen Teilschritte werden in der Software sequenziell durchgeführt.

Eine Auflistung der häufigsten Anwendungen, gruppiert in Baumaschinen mit entsprechender Unterteilung in Führungs- oder Steuerungssysteme sowie einer Zuord-

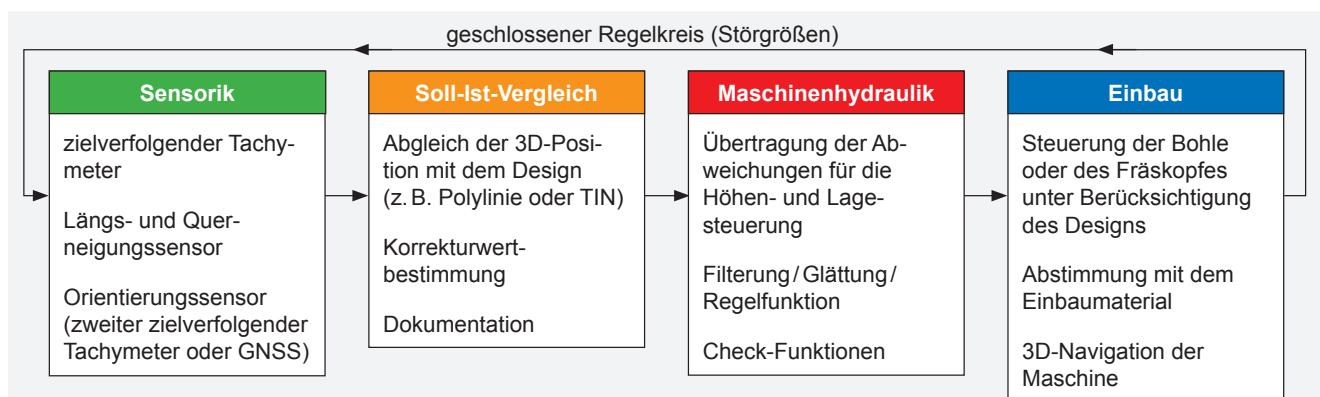


Abb. 4: Geschlossener Regelkreis am Beispiel einer voll-automatischen 3D-Steuerung

Tab. 1: Klassifizierung der Anwendungsgebiete

Parameter Maschine	Höhen- genauigkeit	Position- genauigkeit	Geschwindigkeit	Maschinen- führung	Maschinen- steuerung
Motorgrader	10–20 mm	20–30 mm	bis 35 km/h	✓	nur Höhe
Raupe	20–30 mm	20–50 mm	bis 12 km/h	✓	nur Höhe
Bagger	20–30 mm	20–50 mm	–	✓	✗
Asphaltfertiger	5 mm	5 mm	bis 10 m/min	✗	nur Höhe / 3D
Betonfertiger	5 mm	5 mm	bis 3 m/min	✗	✓
Curb & Gutter	5 mm	5 mm	bis 5 m/min	✗	✓
Fräse	5–10 mm	10–20 mm	bis 15 km/h	✗	nur Höhe / 3D
Walze	–	10–20 mm	bis 10 km/h	✓	✗

✓ = Systeme existieren, ✗ = Systeme existieren (noch) nicht

nung der Genauigkeitsanforderung und der maximalen Geschwindigkeit kann zur Übersicht verwendet werden (Tab. 1). Diese Tabelle wird sicherlich im weltweiten Kontext der jeweiligen Straßenbauprojekte variieren.

1D-Leitsysteme mit Querneigungen werden in der Baumaschinensteuerung und -führung oftmals als 2D-Systeme und die semi-automatischen Systeme als 3D-Steuerungssysteme bezeichnet. Diese Definition ist aus geodätischer Sicht unüblich.

2.2 Systemanbieter

Hersteller von geodätischen Messinstrumenten wie Trimble (www.trimble.com/construction) und Topcon/ Sauer-Danfoss (www.topconpositioning.com und www.tsdcontrols.com) sind gleichzeitig Anbieter von Systemen zur Baumaschinenführung und -steuerung. Die Produkte von Leica Geosystems sind bis auf wenige Ausnahmen zusammen mit den Firmen SBG, Mikrofyn, Scanlaser und Topolaser in der Hexagon Machine Control Division vereint (www.hexagon.se), doch stehen diese nicht unter einem gemeinsamen »Brand Label«. Weitere Systeme werden u.a. von den Firmen Carlson, Moba, Wirth, Novatron, Romar, Prolec, Novariant und Axiomatic angeboten. 3D-Systeme basierend auf der GNSS-Technologie oder auf zielverfolgenden Tachymetern stellen hierbei nur einen geringen Prozentsatz des weltweit auf über mehrere 100 Mio. Euro geschätzten Marktes dar. Dieser Teilbereich definiert jedoch die Schnittstelle zwischen der Ingenieurgeodäsie und dem Bereich der 3D-Baumaschinensteuerung bzw. -führung.

3 Messsensorik

Anwendungen, die nicht auf 3D-Positionssensoren basieren, verwenden Rotationslaser, Ultraschallsensoren, optische oder mechanische Leitdrahtabtaster in Zusammenhang mit Neigungssensoren zur Bestimmung der Regelparameter. Der Rotationslaser definiert eine horizontale oder leicht geneigte homogene Ebene im Bereich einiger hundert Meter. Durch einen oder zwei angebrachte Laserempfänger an der Maschine kann so die relative oder aber auch die absolute Höhe angezeigt und auch als Steuerparameter für die Höhenregelung verwendet werden (Stempfhuber 2007). Ultraschallsensoren »kopieren« die Höhendifferenz zur gemessenen Straßendecke und können mit einer zusätzlichen Querneigungsregelung die linke und rechte Höhe des Werkzeugs steuern. Der Moba Big Sonic Ski beispielsweise kombiniert die einzelnen Entfernungsmessungen der Ultraschallsensoren und berechnet so einen mittleren Abstand zur bestehenden Straßenoberfläche (s. Abb. 5). Dieses Verfahren wird bei nahezu allen Asphaltfertigern weltweit angewandt.

3D-Messsensoren kommen überall dort zum Einsatz, wo inhomogene Designmodelle verwendet werden. Außerdem stellen sie die wesentliche Grundlage bei der vollautomatischen 3D-Steuerung dar.

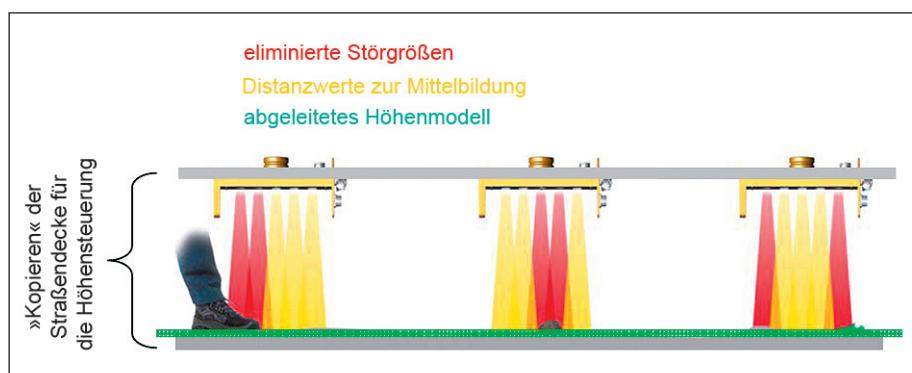


Abb. 5: Höhenübertragung aus den Distanzmessungen mehrerer Ultraschallsensoren, z.B. Moba Big Sonic Ski (www.moba.de)

3.1 GNSS-Empfänger

Alle Hersteller und Anwender versuchen möglichst viele Anwendungen durch die allgemein akzeptierte GNSS-Technologie abzudecken. Sicherlich ist bei entsprechender Systemkonfiguration und Einrichtung der Koordinatentransformation der Einsatz für die Maschinenfahrer einfacher als bei zielverfolgenden Tachymetern. Basierend auf den Parametern der Satellitenkonstellation (Satellitenanzahl und DOP-Werten) wird der individuelle Einsatz gestützt und evaluiert. Die Transformationsparameter des Projektsystems werden in der Regel zusammen mit den Designdaten vom Geodäten erstellt und auf das

Topcon (mmGPS) über unterschiedliche Technologien angeboten. Bei Straßenbauprojekten über mehrere Kilometer ist zusätzlich noch die Korrektur orthometrischer oder ellipsoidischer Höhen sowie Normalhöhen anzumerken.

Neben der Höhen- und Positionsinformation ist bei vielen Maschinen auch gleichzeitig die Maschinenorientierung bzgl. des Projektdesigns im Bereich unter 1° zu erfassen. Deshalb verwenden viele Applikationen eine zweite Roverantenne zur Bestimmung der Basislinie. So mit lassen sich die exzentrischen Kontrollpunkte oder auch die Maschinenpositionen absolut zum Design berechnen. Die Fa. Caterpillar hat bereits im Jahr 1995 erste Patente

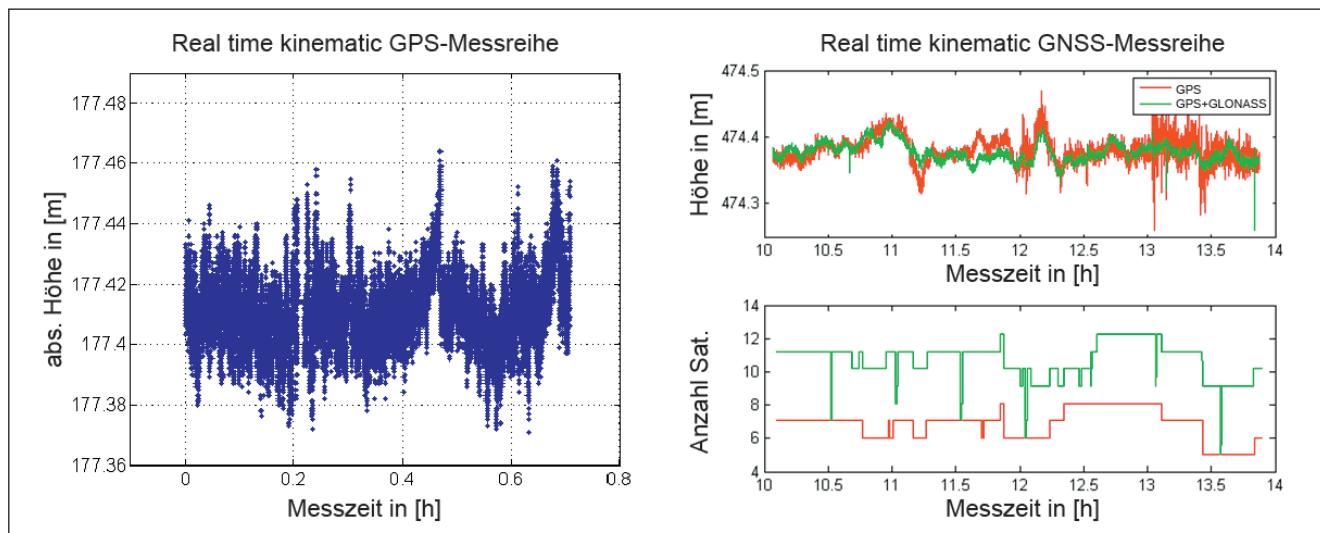


Abb. 6: Höhengenauigkeit von kinematischen GNSS-Messungen eines statischen Messpunktes

Steuersystem der Maschine geladen. Diesem Aufgabenbereich muss jedoch zusammen mit der Datenverifizierung eine gesonderte Bedeutung zugemessen werden. Bei Abschattungsproblemen oder bei Echtzeitanwendungen mit einer absoluten Höhengenauigkeitsanforderung von 1–2 cm stößt man hier an die physikalischen Grenzen des Systems. In Abhängigkeit des Einsatzortes liefern Echtzeitanwendungen von GNSS-Empfängern Höhengenauigkeiten von mehreren Zentimetern (vgl. Abb. 6 und 7). Ein typischer Höhenplot horizontaler Bewegungen zeigt dies an einem Beispiel exemplarisch.

Die Verifizierung von GNSS-Beobachtungen mit und ohne GLONASS-Satelliten muss wegen der Komplexität gesondert diskutiert werden. Eine Aussage bzgl. der Genauigkeitssteigerung durch die zusätzlichen GLONASS-Satelliten kann hier nicht erfolgen. Anders als in der rechten Abbildung können die Einflussgrößen der GLONASS-Satelliten ggf. auch genauigkeitsmindernde Auswirkungen haben. Sicherlich ist die höhere Verfügbarkeit ein wesentlicher Schritt in Richtung einer gesteigerten Akzeptanz dieses Messverfahrens. Eine Kombination eines Rotationslasers mit den GNSS-Empfängern zur Steigerung der Höhengenauigkeit wird sowohl von Trimble (GCS900 Laser Augmentation) als auch von

hierzu angemeldet. Die auf der L1-Frequenz basierenden Richtungssensoren (z. B. GPS-Kompass) mit kurzen Basislinien können solche Anforderungen zur genauen Richtungsbestimmung nicht erfüllen. Testmessungen ergaben bei ungünstigen Satellitenkonstellationen kurzfristige Abweichungen bis zu 10° . Ein Magnetfeldsensor ist wegen der metallischen Störgrößen keine oder nur eine sehr begrenzte Alternative. Ein völlig neuer Ansatz ist die Bestimmung der Absolutorientierung einer GNSS-Antenne durch eine definierte Abschaltung der Satellitensignale. Dieser Ansatz wird zurzeit im universitären Umfeld des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) an der ETH Zürich verifiziert und erforscht (Grimm 2007).

3.2 Zielverfolgende Tachymeter

Zielverfolgende Tachymeter werden für präzise Positionsbestimmungen langsam bewegter Objekte eingesetzt. Unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren sind hier Messungen bis etwa 50 m im Bereich von 5–10 mm realisierbar. Mit zunehmender Entfernung zwischen dem 360° -Prisma und dem Instrument steigt die Lage- und

Höhengenauigkeit schnell im Zentimeterbereich an. Verschiedene Arbeiten beschäftigten sich in der Vergangenheit mit Genauigkeitsuntersuchungen sowie Komponenten- und Systemkalibrierungen (Hennes 1999, Kuhlmann 1999 oder Stempfhuber 2004). Mittlerweile wurden vor allem wegen der Anforderungen aus der Baumaschinensteuerung die zielverfolgenden Tachymeter für kinematische Anwendungen optimiert. So bieten gegenwärtig die Firmen Topcon, Leica, Trimble und Sokkia Instrumente für solche Anforderungen an. Systematische Fehlereinflüsse, wie z.B. durch unzureichend synchronisierte Winkel- und Streckenmessungen, werden durch zeitabhängige Interpolationen reduziert (Wagner 2006). Für

terrestrischen Messinstrumente für die präzise 3D-Positionbestimmung der Baumaschinensteuerung im Vergleich zu GNSS niedrig. Beginnend bei der Instrumentenkonfiguration, der Einrichtung der Funkstrecken zur Maschine über die lokale Einmessung der Maschine und der freien Stationierung ergeben sich hierbei viel mehr Arbeitsschritte. Die Fehleranfälligkeit und die Notwendigkeit einer direkten Sichtverbindung sind zusätzliche Kriterien einer geringeren Akzeptanz. Außerdem ist durch die Genauigkeitseinschränkung bei langen Zielweiten ein häufiger Instrumentenwechsel notwendig. Der direkte Vergleich dieser beiden unterschiedlichen Messverfahren hilft jedoch bei der Wahl des Instrumentariums. Ein

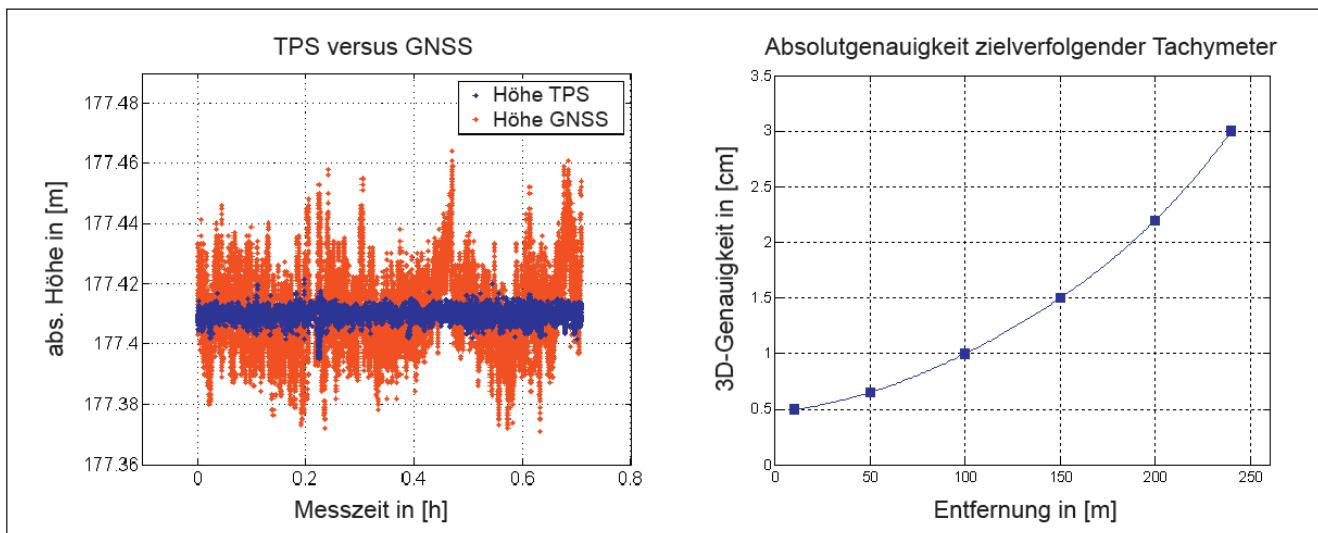


Abb. 7: Höhenvergleich eines zielverfolgenden Tachymeters mit GNSS/Abschätzung der Genauigkeit eines zielverfolgenden Tachymeters (Stempfhuber, 2007)

genaue Anwendungen zur 3D-Steuerung müssen folgende Einflussgrößen optimiert werden:

- Lock Stabilität (Qualität der Zielverfolgung),
- Zusammenspiel der Zielverfolgung und der Servomotorik (Regelalgorithmus),
- Geschwindigkeit der Servomotoren,
- Stabilität der Datenübertragung (Funkverbindung), Reduzierung der Störsignale,
- Verfahren zur schnellen Prismensuche,
- Verwendung des Zweiachskompensators bei kinematischen Anwendungen,
- ausreichende Messfrequenz von mindestens 10Hz,
- Minimierung der Latenzen (relativ und absolut),
- Robustheit des Instruments unter Baustellenbedingungen,
- Qualität und Genauigkeit der 360°-Prismen,
- Benutzerfreundlichkeit der Onboard-Applikationen,
- absolute Positionsgenauigkeit kinematischer Messungen.

Diese Parameter beschreiben die Feldtauglichkeit und Genauigkeit der zielverfolgenden Tachymeter und müssen so bei der Evaluierung für kinematische Anwendungen berücksichtigt werden. Generell ist die Akzeptanz dieser

Vergleich der GNSS-Höhenkomponenten im linken Plot mit zeitgleichen Beobachtungen eines zielverfolgenden Tachymeters im Nahbereich bestätigt diese Aussage (horizontales Design, Geschwindigkeit der Baumaschine etwa drei m pro Minute). Eine theoretische Abschätzung aller Einflussgrößen in Abhängigkeit der Zielweite ergibt die rechte Übersicht in Abb. 7.

Diese Genauigkeitsaussagen werden zurzeit an der Messbahn des IGP der ETH Zürich mit verschiedenen Instrumenten genauer verifiziert. Die Referenz stellt hier ein Laserinterferometer dar. Zusätzlich wird versucht, die Qualität der Zielverfolgung genauer zu analysieren. Wie bereits in Absatz 3.1 erwähnt, wird hier die Maschinenorientierung einfach aus einer zweiten 3D-Position abgeleitet. Das kann ein GNSS-Roverempfänger mit entsprechender Basislinie oder ein zweiter zielverfolgender Tachymeter sein, wobei die zwei Reflektoren die Zielverfolgung eines Instruments häufig stören. Neben der 3D-Positionsinformation und der Absolutorientierung der Maschine ist zeitgleich die Quer- und meist auch die Längsneigung in Abhängigkeit zum Design zu bestimmen. Hierbei werden Neigungssensoren basierend auf unterschiedlichen Messverfahren eingesetzt.

3.3 Zweiachsneigungssensoren

Zweiachsneigungssensoren bestimmen zwei Parameter der sechs Freiheitsgrade zur Baumaschinennavigation. Moderne Sensoren wurden hinsichtlich der Stabilität des Nullpunkts, des Aufheizverhaltens, des Verhaltens bei Temperaturvariationen sowie des kinematischen Verhaltens an der TU Graz untersucht (Brunner 2006). Die wichtigsten Gesichtspunkte sind hier jedoch das Verhalten unter Maschinenbedingungen sowie die genaue Definition der Latenzzeit. Eine idealisierte Sensorkonfiguration muss immer ein Abwegen zwischen der Länge und Art der Mit-

4 Berechnung der Stellgrößen

Die Bestimmung der Sollhöhen bei 1D-Anwendungen (Motorgrader und Raupen) errechnet sich sehr einfach. Meist wird am Rotationslaser ein absoluter Höhenbezug zu einem Referenzpunkt eingestellt. An der Maschine wird dieser Messstrahl durch die Höhendifferenz zum Regelpunkt reduziert. Es gibt Systeme mit einem Laserempfänger und einer Koppelung des Querneigungssensors sowie Systeme mit zwei Laserempfängern auf der linken und rechten Seite der Schar. Der Arbeitsbereich ist durch die Größe des Laserempfängers auf wenige De-

Tab. 2: Zusammenstellung verschiedener Messverfahren für die Baumaschinensteuerung und -führung

Sensor	Messgröße/-ausgabe	Kinematische Genauigkeit	Reichweite	Messfrequenz	Totzeit
GNSS-Empfänger	abgeleitet: XYZ und Zeit	Lage: 2–3 cm Höhe: 3–5 cm	RTK Funk (ca. 5–6 km Reichweite in Europa)	20 Hz	20–50 ms
zielverfolgende Tachymeter	Strecke und Winkel/XYZ	Lage: 1 cm Höhe: 1 cm (in Abhängigkeit der Distanz, vgl. Abb. 7)	ca. 200–250 m, Messungen bis ca. 1000 m sind bei idealen Bedingungen möglich	10–20 Hz	50–250 ms
Rotationslaser	relative oder absolute referenzierte Höhen	2–5 mm bis 100 m	200–300 m		< 10 ms
Neigungs-sensoren	Längs- und Querneigungen	0.1–0.3°	direkt am Objekt	> 100 Hz	80–500 ms
GPS-Orientie- rungssensor	Azimut	10°	direkt am Objekt	10 Hz	< 10 ms
Ultraschall-sensoren	Distanz	1 mm	wenige Meter	> 100 Hz	keine Angaben

telwertbildung sein. Bei kurzen Ansprechzeiten ist folglich das Messrauschen zu hoch, bei einer längeren Mittelbildung aus vielen Einzelmessungen kann die Ansprechzeit schnell über 500 ms betragen. Gegenüberstellungen der optimierten Neigungs- und 3D-Positionsmessungen bestätigen dies in verschiedenen Untersuchungen. Somit muss die Konfiguration dieser in der Regel auf CAN Bus basierenden Sensoren auf die entsprechende Anwendung abgestimmt werden.

Als Übersicht der gegenwärtigen Messsensoren für Anwendungen der Baumaschinensteuerung und -führung kann Tab. 2, aufbauend auf den Angaben in Bayer 2004, definiert werden.

Da Inertialmesssysteme bei der Baumaschinenführung und -steuerung nicht angewendet werden, sind sie in dieser Übersicht nicht aufgeführt.

zimeter eingeschränkt. Verschiedene Systeme führen jedoch die Masthöhe mechanisch nach und erweitern so den Arbeitsbereich. Die semi-automatischen Steuerungssysteme basieren auf einem identischen Ansatz. Hierbei werden der linke und rechte Ablagenwert nicht grafisch angezeigt, sondern über den Hydraulikkreislauf ausgegeregelt. Designdaten werden nicht benötigt, es wird lediglich eine Ebene als Referenz verwendet.

Bei 1D-Anwendungen des Baggersystems werden ebenfalls ein Rotationslaser in Kombination mit Winkelgebern am Baggerarm zur Berechnung der Sollhöhe an der Schaufel benutzt. Sollen komplexe Designs wie z.B. unterschiedlich geneigte Böschungen erstellt werden, so kommt ein 3D-Baggersystem zum Einsatz. Die Absolutposition und -orientierung der zwei GNSS-Roverantenennen auf dem Bagger-Chassis wird über eine identische Rechenmethode zum 3D-Design reduziert (s. Abb. 8).

Systeme zur semi-automatischen Steuerung, d. h. einer automatischen Höhenregelung, sind durch einen linken und rechten Kontrollpunkt definiert. Am Beispiel einer Höhensteuerung am Motorgrader werden diese Rechen-

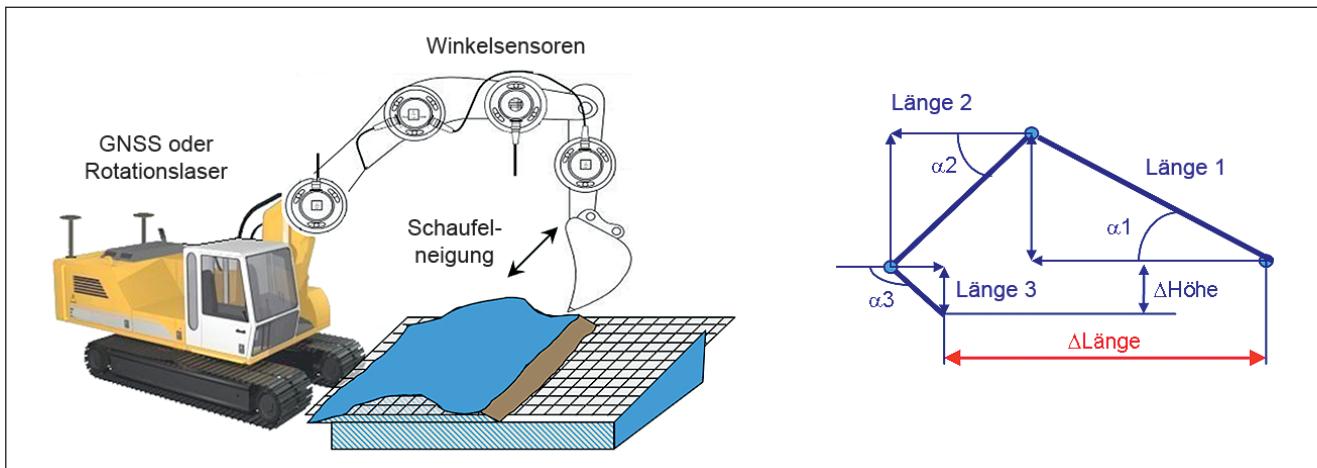


Abb. 8: 1D- oder 3D-Baggersysteme (Stempfhuber 2006)

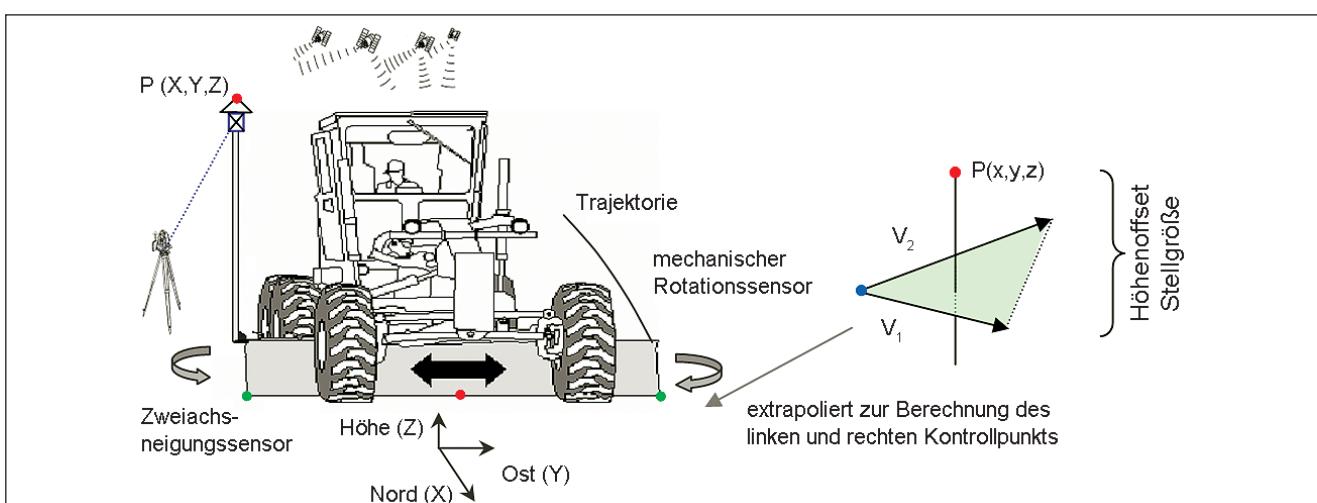
schritte erläutert, sie können direkt für Anwendungen der Raupe, der Fräse und des Asphaltfertigers über die definierte Bohlenkante übertragen werden. Hierbei werden aus einem Messpunkt in 3D (GNSS oder zielverfolgenden Tachymeter) mit der Orientierungsinformation (aus der Trajektorie oder durch einen Zusatzenzessor) und den Neigungswerten die beiden Sollwerte am Werkzeug errechnet. Folgende Berechnungsschritte werden sequenziell im Regelalgorithmus abgearbeitet (s. a. Abb. 9):

- Erfassung der 3D-Position (Messfrequenz ca. 10–20Hz) ←
- Erfassung oder Berechnung der absoluten Maschinenorientierung im Design
- Reduktion der Längs- und Querneigung bzgl. eines mittleren Rechenpunkts auf der Schar
- Extrapolation aus den lokalen Einmessungen zur Bestimmung der linken und rechten Scharunterkante
- Korrektur der Scharrotation und der seitlichen Verschiebung (nur bei Grader)
- Transformation dieser beiden Absolutpositionen ins Design (in der Regel ein DGM mit Dreiecksvermaßung)
- Bestimmung der linken und rechten Höhenabweichung, ggf. Extrapolation an der Designkrone
- Multiplikation mit den Tuningparametern (ggf. Datenfilterung)
- Senden der Regelparameter an die Hydraulikventile

In Zukunft werden sicherlich die mechanischen Regelventile an der Baumaschine elektronisch ansteuerbar sein. Somit können dann die Höhen- oder 3D-Stellwerte direkt auf den Maschinen-Bus geschrieben werden. Eine Umwandlung der analogen Signale für den Maschinencontroller ist somit obsolet.

Im Gegensatz dazu sind bei Gleitschalungsfertigern vier Höhenkontrollpunkte an den Bohlenecken und zwei Längekontrollpunkte entweder an der linken, an der rechten Bohlenkante oder in der Bohlenmitte definiert. Das Vorgehen der einzelnen Berechnungsschritte ist vergleichbar, wobei die Maschinenorientierung hier ausnahmslos durch eine zweite 3D-Position bestimmt werden muss.

Die Vorgehensweise zur Bestimmung einzelner Kontrollpunkte und der Soll-Ist-Berechnung zu einem Designmodell basiert im Wesentlichen immer auf einem ähnlichen Ansatz. Einfache geometrische Reduktionen ermöglichen das exzentrische Messen der Stellgrößen (s. Abb. 10).

Abb. 9: Berechnung der Stellgrößen für den Motorgrader/
Bestimmung des Durchstoßpunkts im TIN-Design

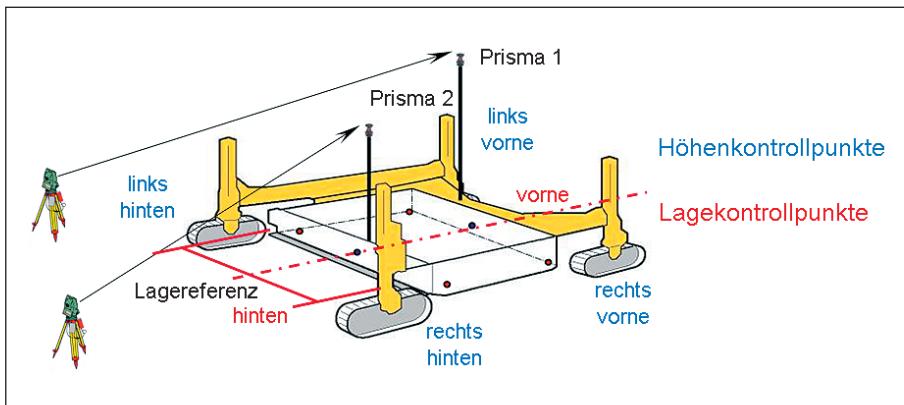


Abb. 10: Kontrollpunkte bei einem großen Gleitschalungsfertiger (Stempfhuber 2007)

5 Ausblick

Seit Ende der 90er-Jahre verbreitet sich dieser weltweite Trend auf den verschiedensten Baustellen. Als Motivation für die Verwendung von kinematischen Absteckungsverfahren anstelle der konventionellen Absteckmethoden werden hier immer Kriterien wie die Steigerung der Effizienz und der Genauigkeit sowie die Reduzierung der Personal- aber auch der Materialkosten angeführt. Traditionelle Aufgaben, wie die Absteckung der Leitdrähte oder die Kontrolle von Erdbauarbeiten verschwinden. Neue Aufgabenbereiche, wie die Designerfassung und -modellierung, eine Systembetreuung sowie die Verifizierung entstehen. Dieser Übergang zu einer virtuellen Welt stellt grundlegende Veränderungen in der Ingenieurgeodäsie dar. Der Aufgabenbereich eines Vermessungsingenieurs wandelt sich hin zu einem Systemingenieur. Hierbei betreut er den gesamten Arbeitsprozess (vgl. Abb. 3) und gewährleistet so einen reibungslosen und fehlerfreien Ablauf der Baumaschinenführung bzw. der -steuerung. Die Intensität der Betreuung hängt hier sehr stark von der Applikation ab. Im Bereich des Erdausbaus und der Planierung sind dies vorrangig Tätigkeiten der Arbeitsvorberarbeitung. 3D-Anwendungen von Gleitschalungsfertigern oder Asphaltfertigern werden von Geodäten kontinuierlich betreut. Diese Neuorientierung der Aufgabenbereiche setzt sich gegenwärtig aus der Einführung der digitalen Designdaten, zusammen mit den kinematischen Absteckverfahren, durch.

Die rasanten Entwicklungen sowohl bzgl. der Kommunikation zwischen dem Messsystem und der Maschine als auch die Optimierung der verwendeten Instrumente haben hier einen wesentlichen Beitrag geleistet. Man steht jedoch erst am Anfang dieses weltweiten Wachstumssegments. In der nächsten Stufe werden sich sicherlich, ähnlich den Navigationssystemen bei der Automobilindustrie, integrierte Systeme durchsetzen. Die Mess- und Auswertesysteme müssen noch mehr diesen neuen Herausforderungen angepasst werden. Die Ingenieurgeodäsie muss mit diesen rasanten Entwicklungen Schritt halten. Keine andere Fachgruppe deckt durch die Bandbreite der Ausbildung diesen Bereich besser ab.

Literatur

- Bayer, G.: Geometrische Führung von Baumaschinen. In: DVW-Schriftenreihe Band 45/2004, Kinematische Messmethoden, Vermessung in Bewegung, S. 215–232, Wißner-Verlag, Augsburg, 2004.
- Brunner, K.: Neigungssensoren: Untersuchungen. In: Sitzung der Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel, ETH Zürich, 2006.
- Grimm, D.: GPS Direction Finding, Neringa 2007. In: GEODESIIJA IR KARTOGRAFIJA, (in Vorbereitung, www.vtu.lt/leidiniai), 2008.
- Hennes, M.: Grundlegende Aspekte zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Robottachymetern. AVN 106, S. 374–385, 1999.
- Kuhlmann, H.: Sensorik – zielverfolgender Tachymeter. In: Mitteilungen des Landesvereins Baden-Württemberg des DVW, 46. Jahrgang, Heft 2, Stuttgart, 1999.
- Schwieger, V.: Optimierung von Regelalgorithmen zur Baumaschinensteuerung am Beispiel eines Simulators. In: Brunner, F. (Hrsg.), Ingenieurvermessung 07, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz, S. 355–368, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007.
- Stempfhuber, W.: Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen. DKG-Reihe C, Heft Nr. 576, 2004.
- Stempfhuber, W.: 1D and 3D Systems in Machine Automation. FIG 3rd IAG/12th FIG Symposium, Baden, 2006.
- Stempfhuber, W.: Herausforderungen der 3D-Baumaschinensteuerung. In: Brunner, F. (Hrsg.) Ingenieurvermessung 07, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz, S. 343–354, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007.
- Wagner, M.: Trimble ATS-Totalstation: Moderne hochgenaue Tracking-Systeme für Anwendungen in der Baubranche. (www.trimble.com/ats_wp.asp), 2006.
- Zimmermann, D.: Dreidimensional gesteuerte Baumaschinen. In: Ingensand, H. (Hrsg.), Ingenieurvermessung 04, 14th International Course on Engineering Surveying, ETH Zurich, S. 193–204, 2004.

Anschrift der Autoren

Dr.-Ing. Werner Stempfhuber
Prof. Dr.-Ing. Hilmar Ingensand
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich
Wolfgang-Pauli-Straße 15
8093 Zürich, Schweiz
stempfhuber@geod.baug.ethz.ch
ingensand@geod.baug.ethz.ch