

Potentiale der Ingenieurgeodäsie im Maschinenbau

1 Motivation

Der Fertigungsprozess entwickelte sich mit steigenden Forderungen nach Wettbewerbsfähigkeit von der Handfertigung, bei der noch eine einzelne Person für Design, Konstruktion und Fertigung verantwortlich war, zum so genannten Austauschbau. Zueinander passende Bauteile zusammen zu suchen, war nicht mehr wirtschaftlich. Es mussten überall passende, also austauschbare Komponenten, zur Verfügung stehen, womit das Toleranzwesen und damit auch verstärkt Messaufgaben in die Fertigung einzogen. Heute stehen das Produkt sowie der Kunde mit vielfältigen Wünschen im Zentrum, was zu Simultaneous Engineering geführt hat. Hierfür müssen ständig und überall Informationen, zu denen auch geometrische gehören, über den aktuellen Zustand des Produkts zur Verfügung stehen. Somit hat sich das Aufgabenspektrum der Vermessungsaufgaben erheblich erweitert. Die optische Messtechnik gewinnt an Bedeutung: während 1999 noch etwa 75% der Unternehmen rein taktile Messgeräte einsetzten, vertrauten 2003 bereits 41% auf berührungslose und Multisensorsysteme [Bauer, 2006]. Die Nachfrage nach kostengünstigen und flexiblen Vermessungsmethoden wird zukünftig weiter ansteigen. Es soll aufgezeigt werden, wie die Ingenieurgeodäsie einen Lösungsbeitrag liefern kann.

2 Was braucht der Maschinenbau

2.1 Trends

Wie in vielen anderen Bereichen, steht die Kostensenkung auch im Maschinenbau an zentraler Stelle. Eine Kostensenkung lässt sich durch Verkürzung der Durchlaufzeiten erreichen. Dies trifft nicht nur auf den Fertigungsprozess, sondern auf die komplette Produktentwicklung zu. Es wird nahezu zeitgleich entworfen, konstruiert und die Fertigungsstrasse sowie Wartungs- und Verkaufsstrategien geplant. Dies bedeutet, dass ständig und überall im Planungs- und Fertigungsprozess Informationen über die aktuelle Produktgeometrie vorhanden sein müssen. Diesen Prozess nennt man Simultaneous Engineering. An einigen Standorten wird die virtuelle Produktentwicklung bereits praktiziert. Dies bedeutet, dass weitgehend (mit dem Ziel vollständig) auf die Prototypenfertigung verzichtet wird. Die virtuelle Fabrik schließt schließlich auch die vollständig digitale Planung, Entwicklung und Führung der Fabrik einschließlich Infrastruktur und Personal mit ein.

Die Minderung des Ausschusses kann nur durch ein hoch stehendes Qualitätsmanagement erreicht werden, wodurch kontrollierende Messaufgaben auch während des Fertigungsprozesses erforderlich werden. Durch eine optimierte Qualitätssicherung lassen sich die Ausschussraten mindern. Letztendlich führt eine umfassende Flexibilisierung zu weiteren Kostensenkungen und kommt darüber hinaus auch den Kundenwünschen entgegen, weil nämlich dann speziellen Zielvorstellungen durch die modulare Bauweise und Fertigung leicht Genüge getan werden kann.

2.2 Vermessungsaufgaben

Aus den aufgezeigten Trends ergibt sich eine Vielzahl von Vermessungsaufgaben. Zunächst wächst die Bedeutung von CAD. Weil im Maschinenbau der Plan (bzw. das CAD-Modell) gilt und nicht das „Maß am Bau“, kann nur wirtschaftlich konstruiert und gefertigt werden, wenn für bestehende Objekte ein vollständiges CAD-Modell vorliegt. Hier sind Neuvermessungen von nur (noch) teilweise auf Plänen verfügbaren Objekten erforderlich. Außerdem muss Abnutzung, Verschleiß etc. erfasst werden. Reverse Engineering macht einen nicht zu vernachlässigen Anteil an der Tätigkeit eines Betriebs aus. Auch wenn einige Firmen noch mit herkömmlichen Plänen arbeiten, werden sie sich langfristig dem Charme einer perspektivischen, farbigen, am Bildschirm demontierbaren Konstruktion nicht entziehen können. Das gilt nicht nur bei Kundenpräsentationen, sondern auch, um die Fehleranfälligkeit in der Konstruktion zu reduzieren. Moderne CAD-Systeme erlauben beispielsweise auch (De-)Montierbarkeitsstudien (DMUs = Digital Mock Ups). Steht ein Objekt im CAD-System zur Verfügung, können Belastungs- und thermische Verformbarkeitsstudien wesentlich kostengünstiger durchgeführt werden. Die Nachfrage nach Neuvermessungen mit CAD-Integration wird also steigen.

Zur Verkürzung der Durchlaufzeiten wird der Verzicht auf Formlehren beitragen – was gleichzeitig auch die Wirtschaftlichkeit des Betriebs fördert, da ein großer logistischer Aufwand entfällt und viel flexibler auf Kundenwünsche reagiert werden kann. Formlehren können durch Absteckungs- und Prüfmessungen zum Beispiel mit optischen Methoden ersetzt werden. Echtzeitmessung und Qualitätskontrolle werden heute schon vereinigt, denn die Neuaufnahme eines abgesteckten Moduls von einem anderen Standpunkt aus, wird als QS-Maßnahme akzeptiert. Kalibrierte Roboter weisen nicht nur eine hohe Reproduzierbarkeit in der Positionierung, sondern auch eine hohe Absolutpositioniergenauigkeit auf. Allerdings sind die Kalibrierparameter vom Betriebszustand (Belastung etc.) abhängig, weswegen eine online Kalibrierung zur Wirtschaftlichkeit beitragen würde und gleichzeitig einen flexiblen Produktionsablauf ermöglichen würde. Mehr und mehr werden Echtzeitkalibrierungen verlangt werden, um aktiv in die Steuerprozesse der Roboter einzugreifen – was allerdings noch Forschungspotential sowohl auf der Roboterseite als auch auf der Vermessenseite birgt.

Um den Ausschuss zu minimieren und Qualitätsstandards bei der Fertigung zu garantieren, werden Echtzeit-Produktprüfungen immer bedeutender. Allerdings forderte ein nicht zu vernachlässigender Anteil von Prüfungen bisher die Entnahme des Prüflings aus dem Prozess (um ihn beispielsweise auf einer Koordinatenmessmaschine zu vermessen). Hier sind online-Verfahren beizusteuern, die das Objekt an Ort und Stelle belassen – letzteres ist eine Bedingung, die für den Ingenieurgeodäten selbstverständlich ist. Allerdings sind die Prüfergebnisse in einem verständlichen Dialekt anzugeben. Der Aufbau einer digitalen Fabrik fordert schließlich das Management von Geometrie- und Zusatzinformation, also die Implementierung von GIS-ähnlichen Strukturen.

2.3 Wandel der Messaufgaben

Während in der klassischen Industrievermessung auf die Anlage fokussiert wurde, muss heute das Werkstück im Mittelpunkt stehen, und damit neben Absteckung und Positionierung auch die Geometrieerfassung und die Prüfung sowie die Kalibrierung von Maschinen. Bisher stand dem Ingenieurgeodät ein Zeitfenster für seine Arbeiten zur Verfügung, heute muss sich seine Aufgabe vermehrt in den PDCA-Zyklus und in den Produktionsablauf eintakten – und das buchstäblich bis zu Taktraten von mehreren Dutzend Hertz mit einer Synchronisationsforderung von bis zu 1 μ s. Die Genauigkeitsanforderungen liegen zwar noch bei 10^{-5} - 10^{-6} , bilden aber nun wegen der geringeren Objektgröße eine erhebliche Herausforderung, vor al-

lem im Management von Störeffekten (Antastverformung, Staub etc.). Während der Vermessungsingenieur früher bei der Angebotserstellung seines Projekt den Fertigungsprozess meistens nicht zu berücksichtigen brauchte, muss er heute eine kostenoptimierte Lösung unter Berücksichtigung der Implementierung in den Fertigungsprozess erarbeiten. Und die Ergebnisse werden oftmals online in Entscheidungsprozesse einfließen müssen, während bisher manchmal das „ok“ einer Justierung ausreichte.

2.4 Anforderungen

Da die Messergebnisse nicht von Konstruktion und Fertigung losgelöst zu betrachten sind, ist die Vermaßung eines Objekts immer funktions-, konstruktions- oder fertigungsorientiert. Deswegen kann ein Vermessungsergebnis auch nur in diesem Kontext bestehen. Nur mit einem ordentlichen Grundverständnis der Konstruktion, der Fertigung, der geplanten Bearbeitung und der Funktion des Werkstücks kann es nützlich vermessen werden. Dies gilt für die Mess- sowie für die Auswertestrategie. Das Mess- bzw. Prüfergebnis sollte unmittelbar zugänglich sein. Dies wird oft eine online-Berechnung von Regelgeometrien beinhalten und in eine ja-nein-Entscheidung bezüglich der Toleranzeinhaltung resultieren, nicht mehr und nicht weniger.

Dies bedeutet, dass Toleranzangaben durchdrungen und verstanden sein müssen, als Standardwerk empfiehlt sich [Hoischen, 1979]. Und es ist abzuklären, wie viel Vermessungstoleranz dem gesamten Toleranzbudget zugestanden wird. Typischerweise beansprucht der Konstrukteur die gesamte Toleranz für sich. Allerdings führen die immer enger werdenden Toleranzen und die steigenden Ansprüche in Kostensenkungsmaßnahmen und Qualitätssicherung zu Diskussion, inwieweit auch Vermessungstoleranzen zuzulassen sind. Hier sind entsprechende Normen zu berücksichtigen EN ISO 1101 [2006], DIN 7168 [1991], DIN 7150-2 [1977], DIN V ENV 13005 [1999]. Zumindest sollte als gemeinsamer Nenner der Leitfaden für die Angabe der Unsicherheiten beim Messen (Guide to the expression of uncertainties in measurements, GUM) verinnerlicht sein. Eine Kommentierung von Genauigkeitsmaßen findet sich in [Hennes, 2007].

Werden dem Maschinenwesen vertraute Messtechniken und Sensoren verwendet, steigt das Zutrauen in die ingenieurgeodätische Leistung. Vor allem sollte zuvor der Kalibriernachweis erbracht werden; teilweise wird auch strenge Rückführung verlangt. Zu beachten ist, dass das Messverfahren beschädigungs- und deformationsfrei arbeitet. Freiformflächen sind CAD-gerecht zu modellieren.

3 Was liefert die Ingenieurvermessung

3.1 Kompetenzen

Allem voran sei das hohe Qualitätsbewusstsein des Ingenieurgeodäten genannt, das ihn vom Prinzip her geschult hat, viele der oben genannten Anforderungen zu erfüllen: Er kontrolliert üblicherweise alle Messungen vor Ort, untersucht a-priori die zu erreichenden Genauigkeiten und ist daran gewöhnt, Störeinflüsse zu analysieren. Er optimiert Messvorgänge und -abläufe diesbezüglich mühelos.

Für die Verhältnisse im Maschinenbau beherrscht ein Vermessungsingenieur große Messvolumen, wodurch er unumstritten eine Nische füllen kann. Er beherrscht weiterhin Transformationen zwischen unterschiedlichen Bezugssystemen und hat Techniken zum Rechnen auf gekrümmten Flächen gelernt.

Von besonderer Bedeutung ist, dass optische Messverfahren für Geodäten üblich, aber für Maschinenbauingenieure neu sind, so dass ersterer sich schneller in diese neuen Technologien

und ihre Störeinflüsse einfinden wird. Hervorzuheben ist auch, dass geodätische terrestrische Messverfahren mobil und flexibel sind – etwas Besonderes im Vergleich zu den üblichen 2D- und 3D-Messverfahren des Maschinenbaus.

3.2 Trends in der Ingenieurvermessung

Zu den Trends in der Ingenieurvermessung gehören CAD-basierte Visualisierungen, die eine gute Basis bilden, den Anforderungen von CAD-Modellen zu genügen. Durch Robotta-chymetrie, Navigationssysteme und Baumaschinensteuerung hat ein Vermessungsingenieur bereits Kontakt zu kinematischen Vermessungen bekommen. Kinematische Vermessung wird in der Ingenieurvermessung weiter optimiert werden und so einen bedeutsamen Beitrag für die Anforderungen des Maschinenbaus bilden. Auch die Kombination von hybriden Messverfahren (sowohl instrumentell als auch auswertetechnisch) wird einen Beitrag zu den zukünftigen Aufgaben im Maschinenbau bilden. Es ist davon auszugehen, dass sich die Ingenieurgeodäsie und die Bildverarbeitung weiter der Erfassung von Punktwolken und Freiformflächen widmen werden, was gewinnbringend in die Messaufgaben des Maschinenbaus einfließen kann. Nicht zuletzt wird die Entwicklung des 3D-GIS einen entscheidenden Teil zur digitalen Fabrik beisteuern können.

4 Messverfahren des Maschinenbaus

4.1 Klassische Messverfahren

Klassische Messverfahren sind zu unterteilen in handgerätbasierte und fest montierte Systeme. Zu Handgeräten zählen unter anderem Schieblehre, Messtaster, Maßstäbe, Triangulationstaster und Formlehren. Sie haben den Vorteil, dass sie – wie geodätische Methoden auch – zum Objekt gebracht werden. Allerdings ist ihr Arbeitsbereich klein (maximal 1 m, eher 1 dm), ihr Messergebnis zwar hochauflösend (bis 1 μm), allerdings nur umständlich in ein CAD-Modell zu integrieren. Zu den fest montierten Instrumenten zählen Koordinatengeräten (KMG), die eine extrem hohe Genauigkeit aufweisen (typisch: wenige μm), allerdings ein beschränktes Messvolumen besitzen (typisch: weniger als 1m^3). Sie erfassen ein Objekt in der Regel auch antastend, aber mit sehr geringen Antastkräften. Einige sind mit Scannern oder Bildverarbeitungssystemen ausgestattet und damit berührungslos. Immer muss das zu vermessende Objekt zum Messsystem gebracht werden und im Arbeitsbereich (sinnvoll) aufgestellt werden (können). Messergebnisse einer KMG sind dreidimensional und sofort in ein CAD einlesbar, meistens wird die Vermessung anhand eines CAD-Modells geleitet. Als Zwitter sind so genannte Messarme zu nennen, die prinzipiell wie mechanisierte Polygonzüge aufgebaut sind. Sie können zum Messobjekt gebracht werden, haben einen Arbeitsradius von etwa 1m ... 3 m bei geringerer Messgenauigkeit als ein KMG (10 μm ... 100 μm) und sind etwas umständlich zu handhaben.

4.2 Zukünftige Messtechniken

Die oben genannten Verfahren werden aufgrund ihrer Vorzüge (Preis, Genauigkeit) vorläufig ihren Einsatzbereich behalten, jedoch haben moderne optische Messtechniken das Potential, eine Reihe von Messaufgaben effizienter zu lösen oder überhaupt lösbar zu machen. Hierzu zählen die Lasertracker, die rasant den Markt erobern. Als hochpräzise polare Systeme (10 $\mu\text{m}/\text{m}$) benötigen sie zwar noch einen Reflektor als aktives (antastendes) Ziel, decken aber einen Messbereich von bis zu 40 m Radius ab. Darüber hinaus ermöglicht ihre Messrate von 1000 Hz die Vermessung von Trajektorien bis zu etwa 6m/s. Gleichzeitig macht diese hohe Messrate in Kombination mit einem speziellen Messtaster (T-Probe, Leica) und einem Kamerasystem (T-Cam, Leica) die Vermessung mit kleinen Tastspitzen und die Erfassung verdeckter Punkte möglich. Außerdem kann ein Handscanner getrackt werden, so dass dessen geringes Arbeitsvolumen (wenige dm) auf große Volumen mit Lasertrackergenauigkeit ausgeweitet werden kann. Handscanner arbeiten wie Nahbereichsscanner (ebenfalls beschränkt auf wenige dm) meist nach dem Triangulationsverfahren mit Auflösungen bis zu wenigen μm . Neben Triangulationsscannern existiert mit dem Laserradar eine EDM-basierte Lösung, die momentan von metris vertrieben wird. Dieses Gerät soll eine Genauigkeit von 10 μm auf 10 m aufweisen und ist mit einem Arbeitsbereich von bis zu 60 m zu haben.

Mit der T-Mac (sowie T-Probe und T-Scan) bietet Leica gleichzeitig ein 6DOF-System an, dessen räumliche Orientierungen abfragbar sind. Die Firma API bietet ein trackergestütztes 6DOF-System (Smarttrack) an, das mit Neigungssensoren arbeitet. Mit einer hohen Taktrate (1000 Hz) können quasi-gleichzeitig Einzelpunkte mit der K-Serie (Metris) bestimmt werden (ca. 50 μm), wodurch auch eine 6DOF-Problemstellung lösbar wäre. Ein auf diesem Prinzip basierender Handtaster wird mit angeboten. Das System arbeitet mit drei CCD-Zeilen auf fester Basis, die Messanordnung ähnelt dem räumlichen Vorwärtsschnitt. Das iGPS (ebenfalls Metris) erlaubt eine variable Basis, die aus Sendern optischer Signale gebildet wird. Metris verspricht etwa gleich hohe Positioniergenauigkeiten im Arbeitsvolumen von bis zu 300 m.

Über diese – aus der Sichtweise des Maschinenbaus der Large-Scale-Metrology zuzurechnenden – Messsysteme hinaus existieren zahlreiche Messsysteme für den extremen Nahbereich, auf deren Darstellung hier verzichtet werden soll. Es ist festzustellen, dass fast alle modernen optischen Messverfahren auf geodätischen Grundprinzipien beruhen, die leicht von einem Ingenieurvermesser verstanden werden können. Deswegen hat er auch hier gute Voraussetzungen für den Einstieg in die Anwendung im Maschinenbau.

5 Potential der Ingenieurvermessung

5.1 „Soll-Ist“

Um das Ziel, die Integration ingenieurgeodätischer Methoden in den Fertigungsprozess, zu verwirklichen, bestehen gute Voraussetzungen. Das erforderliche Basiswissen in optischer Messtechnik übersteigt in der Regel das eines Maschinenbauingenieurs. Qualitätsbewusstsein und mathematische Grundlagen sind ausreichend vorhanden. Die Optimierung von Messvorgängen gehört zu den alltäglichen Aufgaben in der Ingenieurgeodäsie.

Doch müssen einige Hürden genommen werden. Zunächst muss sich der Geodät von einigen „Klassikern“ verabschieden: Horizontierung, Zwangszentrierung, Dreifüße, Stative und klassisches Instrumentarium werden nur noch in ganz seltenen Ausnahmefällen anwendbar sein – und dann wohl nicht den heutigen Anforderungen gerecht werden. Außerdem sind die in der Geodäsie eingebürgerten Genauigkeitsbegriffe mit höchster Vorsicht und Sorgfalt zu verwenden: Sie werden weder unmittelbar verstanden noch beschreiben sie geforderte Aussagen sachgerecht. Es ist ein Umdenken erforderlich, das die Genauigkeitsforderungen ver-

ständiglich macht und teilweise machbarer erscheinen lässt. Hierzu gehören auch die Aneignung einiger Fachbegriffe sowie das Einfinden in die konstruktions- und funktionsorientierte Denkweise.

Lösungen für die dreidimensionale Erfassung, Modellierung, die Visualisierung der räumlichen Realität sowie geodäsienahe Mess- und Auswertetechniken sind zwar verfügbar, müssen jedoch in die Denkweise des Maschinenbaus übertragen und CAD-gerecht aufbereitet werden. Die geodätischen mobilen und flexiblen Verfahren müssen teilweise mit den vorhandenen Verfahren verknüpft werden; und mehr und mehr müssen echtzeitfähige Auswerteverfahren entwickelt werden. Generell ist die Denkweise vom Fixpunkt hin zum referenzrahmenbildenden Formelement zu wandeln. Das hochwertige Unsicherheitsmanagement der Geodäsie ist an die fachüblichen Qualitätsmaße anzupassen, was aber aufgrund des umfangreichen Grundverständnisses statistischer Zusammenhänge unproblematisch sein dürfte.

5.2 Chancen und Risiken

Die Chancen der Ingenieurvermessung ist die Verfügbarkeit und die Beherrschung mobiler und flexibler optischer Messverfahren gepaart mit einem hohen Qualitätsbewusstsein, weil die klassischen Mittel des Maschinenbaus oft unzureichend sind und die Verkürzung der Durchlaufzeiten oft effiziente Messverfahren erfordert. Eine große Chance besteht in der Modifizierung unserer Verfahren zur Echtzeitqualitätskontrolle. Geodäten bringen CAD-Erfahrung und Erfahrung im Management großer Datenmengen mit. Dies ist gemeinsam mit GIS-Kompetenz für den Aufbau von digitalen Fabriken ein bedeutsamer Vorteil gegenüber anderen Disziplinen.

Ein Risiko besteht darin, dass die geodätische Lösung nicht akzeptiert wird. Dies lässt sich vermindern, indem so weit irgendwie möglich auf Geodätisch-spezifisches verzichtet und aus der geodätischen Lösung eine Ingenieurlösung produziert wird. Nebenbei bemerkt: Einem „Vermessungsingenieur“ wird möglicherweise mehr (kleinskalige) metrologische Kompetenz zugetraut als einem „Ingenieurgeodäten“. Wie in jedem anderen interdisziplinären Arbeiten ist mangelnde Kommunikationsfähigkeit (und –bereitschaft) äußerst hinderlich. Allerdings mag die Konzentration auf das Ingenieurdenken schon Abhilfe schaffen. Problematisch könnte die Fehleinschätzung der Vermessungsleistung sein, die insbesondere beim Blick auf Produktentwicklungskosten unterschätzt werden kann.

6 Ausblick

Da das Messen nicht Kernaufgabe des Maschinenbaus ist und die Tendenz zu optischen Messverfahren im Maschinenbau wächst, bestehen gute Chancen für die Ingenieurvermessung im modernen Maschinenbau. Da die Verwandtschaft der aktuellen Instrumentenentwicklungen zu geodätischen Instrumenten sehr eng ist, sollte die Einarbeitung recht problemlos erfolgen können. Die Voraussetzung ist allerdings die Auseinandersetzung mit der andersartigen Denkweise. Durch ingenieurorientierte Präsentation von Referenzobjekten könnte ein skeptischer Auftraggeber mehr Zutrauen fassen.

7 Literatur

BAUER, N. [2006]: Berührungslose Messtechnik auf dem Vormarsch. Praxis Profiline, Vogel Verlag und Fraunhofer Allianz Vision, S. 3.

HENNES, M. [2007]: Konkurrierende Genauigkeitsmaße - Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. AVN, S. 136-146.

HOISCHEN, [1979]: Technisches Zeichnen. 17. Auflage, Girardet-Verlag, Essen.

EN ISO 1101 [2006]: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf und Beiblatt1: Technische Zeichnungen; Form- und Lagetolerierung; Tolerierte Eigenschaften und Symbole; Zeichnungseintragungen, (1992)

DIN 7168 [1991]: ersetzt durch ISO 2768-1: Allgemeintoleranzen; Längen und Winkelmaße, Form und Lage; nicht für Neukonstruktionen, Beuth-Verlag, Berlin.

DIN 7150-2 [1977]: ISO-Toleranzen und ISO-Passungen - Prüfung von Werkstück-Elementen mit zylindrischen und parallelen Passflächen, Beuth-Verlag, Berlin.

DIN V ENV 13005 [1999]: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. ENV 13005. Beuth-Verlag.

<http://apisensor.de/smarttrack.html>

http://www.leica-geosystems.com/corporate/de/ndef/lgs_66262.htm

<http://www.metris.com/>