



R. Staiger

Zur Bedeutung der Messtechnik – oder gibt es die Kunst des Messens noch?

Unsere Messtechnik hat sich in den letzten 30 Jahren stark gewandelt. Waren früher geodätische Beobachtungen langwierig, mühsam und direkt von den Fertigkeiten des Beobachters abhängig, sind wir heute mit einer veränderten Situation konfrontiert: Das Messen ist, aufgrund der vielen Innovationen durch die Hersteller, viel einfacher und effizienter geworden. Gleichzeitig ist der direkte Einfluss des Anwenders auf die Ergebnisse stark zurückgegangen. In diesem Zusammenhang ist die Frage nach der noch existierenden Kunst des Messens zu stellen. Für eine Antwort wird zunächst die grobe Entwicklung der Vermessungstechnik und ihrer Instrumente nachgezeichnet. Es folgt eine Beschreibung und Analyse der aktuellen Messtechnik aus verschiedenen Blickrichtungen. Damit ist eine Basis geschaffen, um die eigentliche Frage beantworten zu können. Die Kunst des Messens besteht heute nicht mehr im „sorgfältigen Koinzidieren und Anzielen“, sondern in der Beherrschung des gesamten Mess- und Auswerteprozesses von der Planung bis zum Endergebnis. Ein besonderer Augenmerk ist dabei auf eine umfassende und möglichst unabhängige Kontrolle des gesamten Messprojektes zu richten.

1 Einleitung

„Drück den Knopf – Messen ist heute ganz einfach“. So lassen sich viele Werbeslogans der Instrumentenhersteller zusammenfassen. Tatsächlich haben die konsequenten Weiterentwicklungen an allen geodätischen Hauptinstrumenten dazugeführt, dass die Messungen heute sehr viel schneller und einfacher ausgeführt werden können als früher. Damit sind in den vergangenen Jahrzehnten alle Hersteller einem Aufruf von Heinrich Wild gefolgt, der bereits 1939 forderte: „...die hier skizzierten Instrumenten-Konstruktionen sollen nicht dazu führen, daß die vorgeschriebenen Toleranzen, d.h. die noch zulässigen Fehler der Meß-Endresultate noch verkleinert werden, denn die diesbezüglichen Ansprüche sind heute schon zum Teil übertrieben. Sie sollen vielmehr ermöglichen, diese End-

resultate in einfacherer Weise, in kürzerer Zeit und mit geringerer Anstrengung zu erhalten ...“ [1].

Wenn Messen heute tatsächlich so einfach ist, stellen sich mehrere Fragen:

- Welchen Stellenwert hat die Messtechnik heute noch in Ausbildung und Praxis?
- Über welche Kenntnisse und Fähigkeiten muss ein Vermessungsingenieur heute beim Praxiseinsatz der aktuellen Messtechnik noch verfügen?
- Gibt es die Kunst des Messens noch? Oder kann heute jeder, ohne fundierte Kenntnisse und spezielle Fähigkeiten zur Messung und Auswertung, Vermessungsarbeiten einfach durchführen?

Um diese Fragen beantworten zu können, wird zunächst die historische Entwicklung des geodätischen Instrumentenbaus grob nachgezeichnet. Daran schließt sich eine Analyse der aktuellen Situation aus unterschiedlichen Blickwinkeln an, um schließlich auf die „Kunst des Messens“ näher einzugehen.

1.1 Was ist eigentlich Messen?

Leonhard Euler (1701–1783) beschrieb den Vorgang des Messens: „Es lässt sich aber eine Größe nicht anders bestimmen oder ausmessen, als dass man eine andere Größe derselben Art als bekannt annimmt und das Verhältnis angibt, in dem diese zu jener steht“ [2]. Diese mehr als 250 Jahre alte Definition ist im Grunde heute noch gültig und lautet aktuell: Messen heißt vergleichen, indem einer unbekanntes Größe das Vielfache einer bekannten Größe zugewiesen wird. Zum Stellenwert der Messtechnik schrieb der berühmte Schweizer Mathematiker weiter: „Die Physik ist überhaupt nichts anderes, als eine Wissenschaft der Größen, welche Mittel ausfindig macht, wie man letztere ausmessen kann.“

Metrologie ist die Wissenschaft vom sorgfältigen Messen und als solche vermutlich so alt wie die Technikgeschichte der Menschheit. Hermann von Helmholtz gilt als Vater der modernen Metrologie, indem er 1887 eine einheitliche Methodologie des Messens in den Naturwissenschaften schuf [3]. Dazu gehören auch Verfahren zur konsistenten Bewertung experimentell gewonnener Daten und ein ordnendes Regelwerk für die Anwendung in Technik und Wirtschaft.

Die wesentlichen Gründe, weshalb wir messen, sind der Wunsch nach:

- *Wissenszuwachs und Erkenntnistheorie.* Max Planck bemerkte dazu 1929 „Das Wesen der physikalischen Gesetzmäßigkeit und der Inhalt der physikalischen Ge-



setze lässt sich nicht durch reines Nachdenken erschließen ..., so versteht sich von selbst, dass der Fortschritt aller physikalischen Erkenntnis auf das Engste verknüpft ist mit der Verfeinerung der physikalischen Instrumente und mit der Technik des Messens“.

- *Objektivität und Verbraucherschutz.* Alle Waren und Dienstleistungen, die öffentlich gehandelt werden, unterliegen auch dem Eichgesetz, in welchem die Gültigkeit, Prüfung und Zulassung von Messgeräten geregelt wird. Nach Anhang A zu § 8 der Eichordnung [4] sind Messgeräte im öffentlichen Vermessungswesen und im Marktscheidewesen ausdrücklich von der Eichpflicht ausgenommen [5]. Unabhängig davon existieren in einigen Bundesländern Eich- und Prüfvorschriften für hoheitliche Vermessungen.
- *Automatisierung, Qualitätskontrolle und -steigerung.* Ein Schlüsselement zur teil- oder gar vollautomatischen Fertigung von Bauteilen oder kompletten Produkten ist die sog. Fertigungsmesstechnik, die den hohen Automatisierungsgrad erst ermöglicht.
- *Sicherheit.* In Transportsystemen aller Art (Autos, Züge, Flugzeuge, Seilbahnen, Aufzüge usw.) dienen Messsysteme in erster Linie der Verkehrssicherheit.

2 Historische Entwicklung der Vermessungsinstrumente

Messen und Vermessen sind nicht nur Tätigkeiten die unsere Vorfahren bereits Hunderte und Tausende von Jahren vor uns ausübten, sondern stellen auch einen ganz wesentlichen Teil unserer Zivilisationsgeschichte dar. Die Entwicklung der geodätischen Messsysteme kann grob in vier Phasen unterteilt werden (Abb. 1).

Die Archaische Phase dauerte Jahrtausende und endete 1590 mit der Erfindung des Fernrohrs. Die anschließende Optische Phase erlebte ihren Höhepunkt mit der Erfindung des ersten modernen Theodoliten ZEISS TH II durch Heinrich Wild. Dieses Instrument zeichnete sich neben den Teilkreisen aus Glas vor allem durch eine völlig geschlossene Bauweise aus, die es ermöglichte in wenigen Minuten messbereit zu sein. Alle vorherigen Instrumente

mussten, z.T. auf jedem neuen Standpunkt, in 1 bis 2 Stunden zusammengebaut und aufwendig justiert werden.

Die wesentlichen Errungenschaften in der anschließenden Elektrooptischen Phase sind die Einführung der elektronischen Streckenmessung durch elektrooptische Streckenmesser (AGA, 1953) und Mikrowellengeräte (Tellurometer, 1957) sowie das erste registrierende Tachymeter (ZEISS, 1968). Ende der 80er Jahre verfügen die meisten elektronischen Tachymeter über Halbleiterspeicher, einen koaxialen Strahlengang und die Möglichkeit, die polaren Messelemente bereits im Instrument in kartesische Koordinaten umzurechnen.

1990 beginnt die heute noch andauernde Phase der Multi-sensorik. In diesem Jahr wird das erste Digitalnivellier (WILD NA 2000) und das erste motorisierte Tachymeter (Geodimeter 4000), konzipiert als 1-Mann-Tachymeter, der Öffentlichkeit vorgestellt. Gleichzeitig wird GPS zur neuen Universalmethode der Positionsbestimmung deklariert, die nebenbei die bekannten terrestrischen Verfahren überflüssig mache. In der Folgezeit setzt eine rege Entwicklungstätigkeit, zur Verbesserung der Effizienz und Funktionalität aller Messsysteme, ein.

In Abb. 2 sind diese für das Tachymeter und den GPS-Empfänger, der mit der Nutzung von GLONASS und GALILEO-Signalen zutreffender als GNSS-Empfänger bezeichnet wird, skizziert. Heute spricht übrigens niemand mehr von der Substitution der Tachymetrie durch satellitengestützte Verfahren. Stattdessen wird die kombinierte Nutzung beider Technologien propagiert.

3 Vermessungstechnik heute

Die Hauptinstrumente des Vermessungsingenieurs sind heute das Digitalnivellier, das Tachymeter und der GNSS-Empfänger. Auf dem tachymetrischen Prinzip, der kombinierten Winkel- und Streckenmessung zur polaren Punktbestimmung im zwei- oder dreidimensionalen Raum, basieren mehrere Gerätetypen, die es lohnt separat zu betrachten (Tab. 1).

Das terrestrische Laserscanning ist prinzipiell zwar ein tachymetrisches Verfahren, jedoch unterscheidet es sich in der Anwendung stark von den anderen Methoden (Tab. 2).

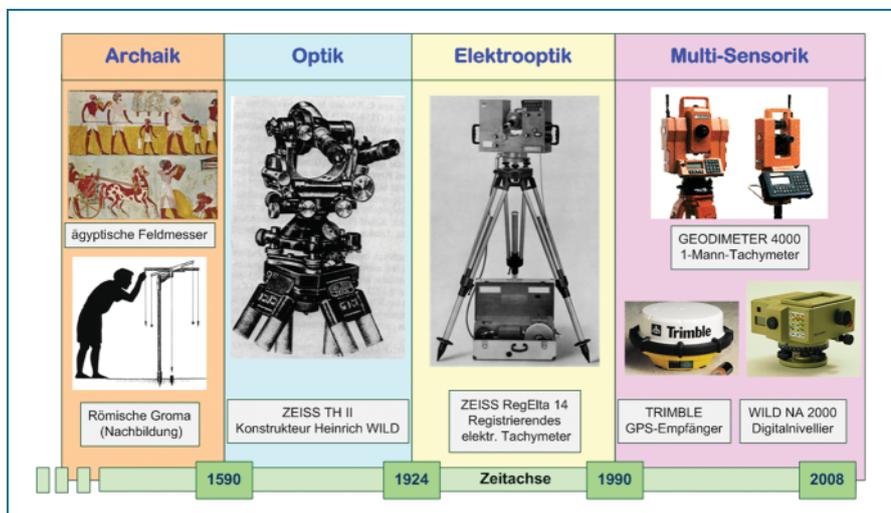


Abb. 1: die vier Phasen der Geodätischen Messtechnik

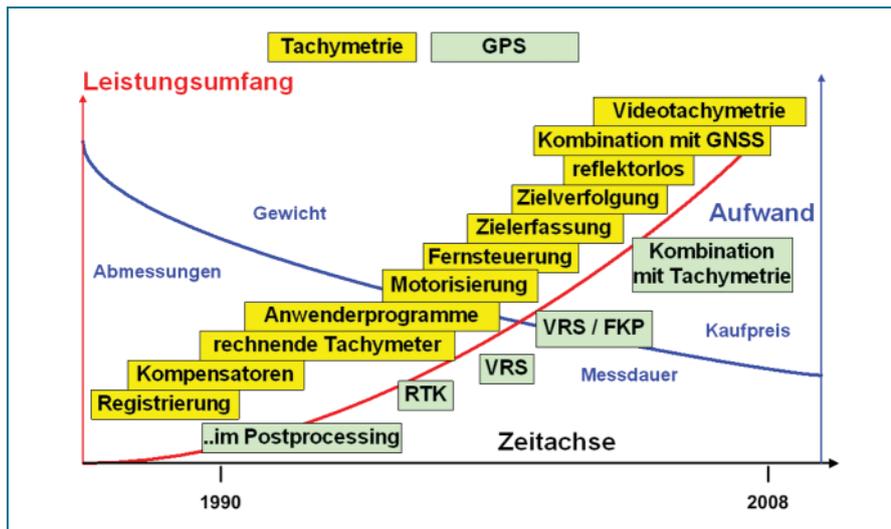


Abb. 2: Entwicklungsschritte für Tachymetrie und GPS in den letzten 20 Jahren

Tab. 1: Instrumentelle Realisierungen des tachymetrischen Messprinzips

Kriterium	Tachymeter	Fernglas ¹	Lasertracker	Laserradar	Laserscanner
Kooperatives Ziel?	Mit/ohne	ohne	Mit	ohne	Ohne
Reichweite	2–5000 m	2–300 m	0,4–80 m	1–50 m	1–500 m
Genauigkeit	> 0,5 mm	> 1 m	> 0,05 mm	> 0,05 mm	> 1–20 mm
Messgeschwindigkeit	0,2–10 Hz	0,3 Hz	0,5–2 kHz	1–0,05 Hz ³	> 1–500 kHz
Streckenmessmethode	Phase/Puls	Puls	Interferometrisch; ADM ⁴	Hybrid-Messung	Phase/Puls
Anwendung	Bekannt; vielfältig	GIS	IMT ²	IMT ²	vielfältig

¹ mit integriertem Kompass und reflektorlose Streckenmessung

² Industriemessetechnik

³ abhängig von der Genauigkeit

⁴ Absolute Streckenmessung (vermutlich Phasenmesstechnik)

Tab. 2: Systemische Unterschiede zwischen punkt- und elementorientierten Messmethoden

Punktbezogene Methoden – Tachymetrie, Nivellement, GNSS, ...	Elementbezogene Methoden – Laserscanning, taktile Messtechnik
Messung von „Punkt“ zu „Punkt“ Kontrolle durch Überbestimmung	eine Einzelbeobachtung ist weder repräsentativ noch kontrolliert
wenige Punkte werden präzise beobachtet	eine riesige Punktmenge wird beobachtet
Aufwand pro Punkt ist hoch	Aufwand pro Punkt ist minimal
Punkte sind repräsentativ (z.B. Hausecke) und produzierbar	zufällige Punkte (nicht repräsentativ, regelmäßiges Raster)
Punktauswahl erfolgt „vor Ort“	„Punktauswahl“ bei der Auswertung
Qualitätsmaße aus Punkten	Qualitätsmaße aus geometrischen Elementen
Oft wird Lage und Höhe getrennt	3D-Verfahren

Die bisherigen Messverfahren des Vermessungsingenieurs sind punktorientiert, während das Laserscanning für ein elementorientiertes Messverfahren steht. Die Erfindung der elektronischen Tachymetrie und der Satellitenempfangssysteme haben überwiegend substituierenden Charakter, indem eine Punktmessmethode durch eine effizientere ersetzt wird. Das Endprodukt (die Punkt-Koordinate, die Absteckung usw.), die Kunden und die potenziellen Anwendungen bleiben jedoch gleich. Anders das Laserscanning: Durch die schnelle und detailreiche Erfassung komplexer Objekte eröffnen sich vielfältige Möglichkeiten neue Produkte, für neue Kunden und neuen

Anwendungen, zu schaffen, die mit der bisherigen Messtechnik nicht möglich sind. Damit der Laserscanner künftig ein Standardinstrument der täglichen Vermessung wird, muss auch der Anwender die systemischen Unterschiede (Tab. 2) erkennen und entsprechend handeln.

3.1 Charakterisierung der aktuellen Messtechnik

Es ist ein Verdienst der Instrumentenhersteller, dass in den letzten 20 Jahren die Funktionalität der Instrumente enorm gesteigert wurde. Alle aktuellen Messsysteme sind Multi-Sensor-Systeme, die neben den mechanischen,

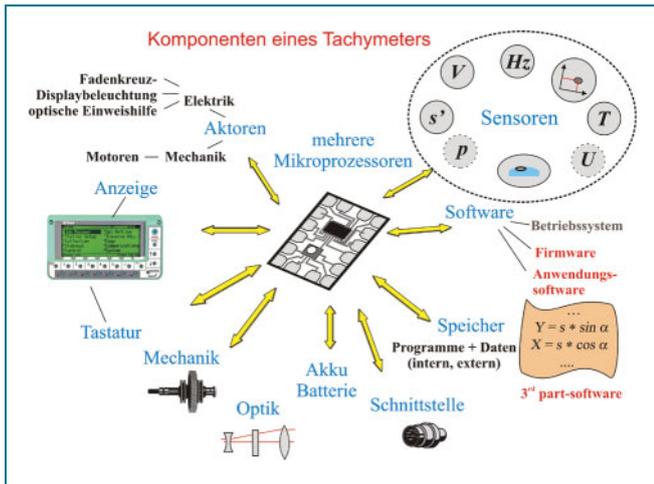


Abb. 3: Komponenten eines Tachymeters

elektronischen und optischen Komponenten aus mehreren Sensoren bestehen. Der Messvorgang wird von mehreren Mikroprozessoren gesteuert und ausgewertet (Abb. 3). Originäre Messwerte, wie sie z.B. von der optischen Teilkreisablesung bekannt sind, gibt es nicht mehr. Die heutigen Messergebnisse resultieren aus Mehrfachmessungen, die zusätzlich um interne und für den Anwender zugängliche Parameter korrigiert werden. Die Mehrfachmessungen dienen sowohl der Validierung der Messwerte (Aufspüren von Ausreißern, die auch externe Ursachen, z.B. eine Strahlunterbrechung durch Personen oder Fahrzeuge, haben), als auch der Genauigkeitssteigerung durch Mittelbildung.

Ein moderner Tachymeter kann auch als mobiler PC mit geometrischen Sensoren bezeichnet werden. Die Messungen laufen intern völlig autonom ab. Der Beobachter (mit direktem Einfluss und Zugriff auf die Messwerte) wird zum Anwender oder Nutzer, der die Messwerte nur noch mittelbar beeinflusst. Die inneren Abläufe bleiben dem Anwender verborgen und die Hersteller veröffentlichen kaum Informationen zur konkreten Messtechnik im Instrument, weshalb hier von einer Black-Box zu sprechen ist. Viele Instrumente können heute auch, z.B. für Überwachungsmessungen, autonom und quasi kontinuierlich genutzt werden.

Die Komplexität der heutigen Multi-Sensor-Systeme sei am Beispiel eines Lasertrackers mit Handscanner verdeutlicht (Abb. 4). Die Bestimmung der Position und der Orientierung des Handscanners erfolgt in Echtzeit durch eine kombinierte Winkel- und Streckenmessung (Position) kombiniert mit Videogrammetrie (Orientierung). Die Objektkoordinaten selbst werden dazu (relativ zum Handscanner) gleichzeitig mit einem 2D-Laserfächer ermittelt. Die Genauigkeit der heutigen Messsysteme wurde gegenüber den früheren Instrumenten nicht immer gesteigert. Digitalnivelliere machen eine Höhenmessung schneller und einfacher, aber nicht genauer. Als Kenngröße ist 0,3–0,4 mm/km Doppelnivellement zu nennen. Ähnlich verhält es sich mit der Richtungs- bzw. Winkelmessung. Hier wurde die Messgenauigkeit ebenfalls nicht gesteigert (Abb. 5). Dagegen verbesserten die Hersteller die Genauigkeiten der elektronisch gemessenen Strecken signi-

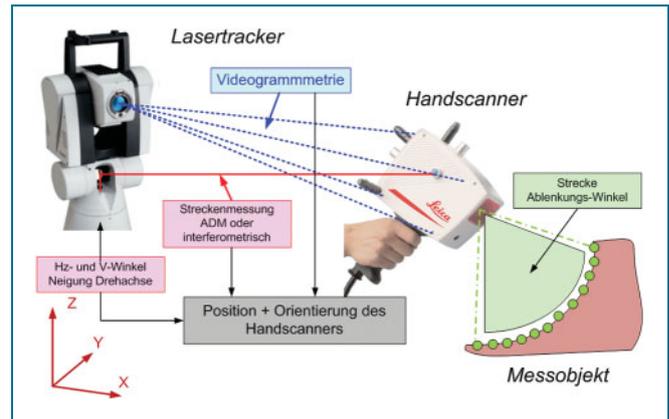


Abb. 4: Lasertracker mit Handscanner als Beispiel für ein Multi-Sensor-System

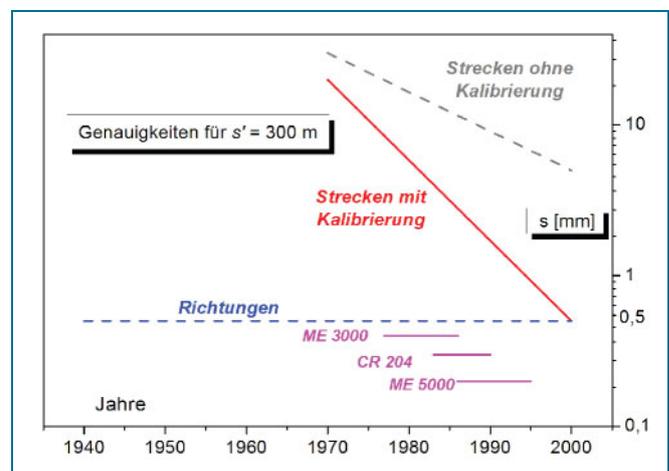


Abb. 5: Genauigkeitsentwicklung für Winkel- und Strecken für eine Länge von 300 m

fikant. Die Entwicklung dazu ist in in Abb. 5 für die repräsentative Strecke von 300 m grafisch dargestellt.

3.2 Messen aus Sicht der Anwender

Die Messtechnik und ihre Anwendung hat sich für den Anwender stark gewandelt. Charakteristisch dafür ist:

- Der Anwender bedient eine Black-Box, d.h. er hat keine oder nur diffuse Vorstellungen über die Abläufe im Instrument. Die Funktionalität der Anwendersoftware (im Instrument oder bei der Auswertung) ist so umfangreich, dass nur ein Bruchteil davon genutzt wird.
- Es gibt keine originären Messwerte mehr. Viele Anwender interessieren sich auch nicht für Beobachtungselemente, sondern arbeiten direkt mit kartesischen Koordinaten.
- 80 % der Messungen sind unkontrollierte Einzelmessungen
- Der Nutzer denkt seine Ergebnisse sind „richtig“; eine regelmäßige Prüfung der Messausrüstung ist daher überflüssig.
- Die Produktlebenszyklen eines Instrumentes (i.d.R. 3 bis 5 Jahre) sind für den Anwender zu kurz.

3.3 Messen aus Sicht der Hersteller

In den letzten 20 Jahren ist ein starke Marktkonzentration zu beobachten. Die Firmen LEICA, TOPCON und TRIMBLE teilen sich praktisch den Weltmarkt auf. Wirtschaftlich betrachtet ist die „Vermessung“ kein einfaches Geschäft: zwar gibt es nur wenige Anbieter, jedoch stellt die Vermessungstechnik keine Wachstumsbranche dar; hinzukommen anspruchsvolle Kunden, die nur selten als investitionsfreudig gelten. Für die Hersteller ist festzustellen:

- Alle Instrumente und Messsysteme sind heute leistungsfähig und gleichzeitig einfach zu bedienen.
- Die Hersteller werden heute im Markt mit chinesischen Raubkopien ihrer Produkte konfrontiert. Das Kopieren beschränkt sich nicht nur auf technische Innereien, sondern erstreckt sich auch auf das Design, das Bedienkonzept, bis hin zum Layout der Prospekte!
- Ein Hersteller bringt ein neues Produkt aus unterschiedlichen Gründen auf den Markt. Oft treffen mehrere Gründe zu und nur der hier erstgenannte ist für den Anwender offenkundig:
 - **Innovation.** Eine neue Funktionalität wird in den Markt eingeführt, z.B. die Möglichkeit der automatischen Zielerfassung oder -verfolgung.
 - **Verfügbarkeit der elektronischen Komponenten.** Sind die im Gerät verbauten OEM-Komponenten nicht mehr verfügbar, ist der Hersteller praktisch gezwungen, das Instrument zu überarbeiten, obwohl aus Kundensicht kein Bedarf besteht.
 - **Senkung der Herstellkosten.** Zur Senkung der Herstellkosten ist nur eine gründliche Überarbeitung, die meist einer Neukonstruktion gleichkommt, zielführend.
- Nicht alles was technisch machbar ist, wird heute gebaut und als kommerzielles Produkt angeboten. Der wirtschaftliche Erfolg, sprich der zu erwartende Return on Invest (ROI) auf die Entwicklungskosten, muss entsprechend hoch sein. Dazu zwei Produktideen, die vermutlich mangels wirtschaftlicher Erfolgsaussichten bisher nicht realisiert wurden:
 - **Vollautomatisches Nivelliersystem.** Alle Hersteller sind heute technologisch in der Lage ein vollautomatisches Nivelliersystem zu entwickeln, welches nur aufgestellt werden müsste. Der Rest (Horizontierung, Suche der Latten im Messraum, Lattenablesung, Auswertung, Kontrollrechnung, usw.) könnte vollautomatisch erfolgen.
 - **Präzisionsstreckenmessung.** Das genaueste geodätische Streckenmessgerät ist nach wie vor das KERN Mekometer ME 5000. Als reines Streckenmessgerät, benötigt es für eine Einzelmessung ca. 2 Minuten Zeit. Heute könnte man, basierend auf dieser 20 Jahre alten Technologie, ein ähnlich genaues Streckenmessteil in ein Tachymeter integrieren um in wenigen Sekunden vergleichbare Resultate zu erzielen.

3.4 Messen aus Sicht der Metrologen

- Alle Instrumente erfüllen heute die Leistungsangaben ihrer Hersteller. Trotz des hohen Automatisierungsgrades der Instrumente gibt es aus Sicht der Metrologie noch eine Reihe von Einflussmöglichkeiten durch den Anwender. Am Beispiel der Standardmessaufgabe – Bestimmung der geometrischen Beziehungen zweier Bodenpunkte A und B – wird dies verdeutlicht (Abb. 6a). Neben den manuellen Tätigkeiten Zentrieren, Horizontieren und Messen der Stand- und Zielpunkthöhen, sind dies: die Berücksichtigung instrumenteller, atmosphärischer und geometrischer Korrekturparameter. Hinzukommen alle geodätischen Berechnungen, die heute im Instrument ausgeführt werden sowie die Möglichkeit der allgemeinen Fehlbedienung (Abb. 6b).
- Die Rückführung geodätische Messungen auf nationale und internationale Standards ist nur bedingt möglich. Dies gilt insbesondere für die Streckenmessung, denn dort gibt es kein fachlich anerkanntes Verfahren, das von der Messmethode selbst unabhängig ist.
- Angaben zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit von GNSS-Messungen sind generell kritisch zu betrachten. Diese Messungen unterliegen einer Vielzahl externer Einflüsse, wie Satellitenkonstellation, Genauigkeit der Bahndaten, Mehrwegeeffekte und Einfluss der Iono-

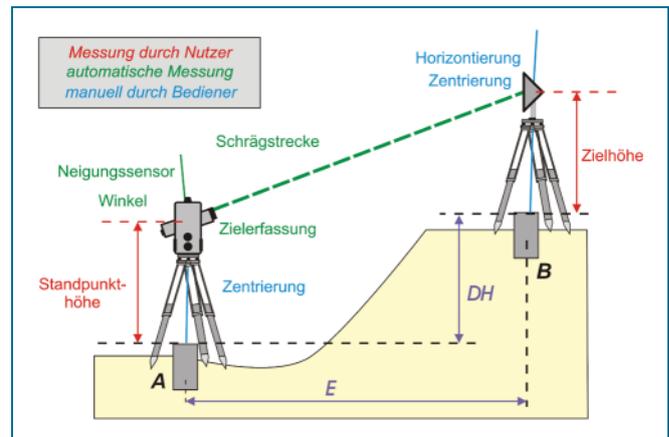


Abb. 6a: Messung zwischen zwei vermarkten Bodenpunkten

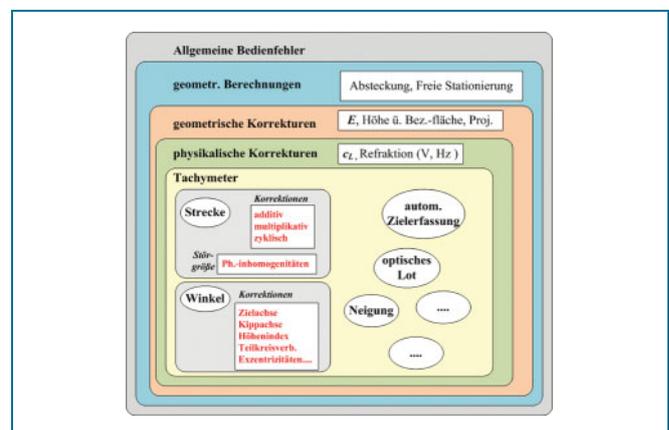


Abb. 6b: Schalenmodell der möglichen Fehler bei der Tachymetrie



sphäre. Die Qualität der Messungen ist, neben dem Beobachtungszeitpunkt und der Beobachtungsdauer, vor allem von diesen Faktoren abhängig. Streng genommen ist eine Prüfung und Qualitätsangabe nur für diesen Zeitpunkt und diese Konstellation gültig.

Diese Umstände sind bereits aus den technischen Angaben der Hersteller ersichtlich: Zitat aus den Spezifikationen eines Herstellers: „...Die Angaben gelten für normale bis gute Bedingungen. Die Beobachtungszeiten können ebenfalls nicht genau angegeben werden. Die benötigte Beobachtungszeit hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie der Anzahl der Satelliten, deren Geometrie, Ionosphärenbedingungen, Mehrwegeeffekten usw. Die Genauigkeit kann durch bestimmte Faktoren wie z.B. Mehrwegeausbreitung, Satellitengeometrie und atmosphärische Störungen beeinträchtigt werden. Richten Sie sich immer nach den vorgeschriebenen Vermessungspraktiken“.

– Für die Ausnahme im Eichgesetz (vgl. 1.1) gibt es keine schlüssige Begründung.

3.5 Genauigkeitsgrenzen gestern und heute

Ein Messsystem umfasst grundsätzlich alle Komponenten, die zum Messergebnis beitragen bzw. dieses verfälschen können; dazu gehören nicht nur das Messinstrument mit Zubehör, sondern auch die zu messende Größe, der Messraum, das Mess- und Berechnungsverfahren und nicht zuletzt der Beobachter (Nutzer oder Anwender).

3.5.1 Die Genauigkeitsgrenzen früher

Die tatsächliche Messgenauigkeit wurden vor einigen Jahrzehnten im wesentlichen vom Beobachter und der ungenauen Messausrüstung bestimmt. Damals galt:

- Alle Messungen wurden -mit Ausnahme der optischen Tachymetrie – wiederholt und überbestimmt ausgeführt
- Der Beobachter hatte einen direkten Einfluss auf die Qualität der Messung (Anzielung, Koinzidenz, usw.). Das Messen war ein Handwerk, welches viel Erfahrung und manuell-visuelles Geschick bedingte.
- Die wiederholten Messungen waren erforderlich, weil i.d.R. die Genauigkeit einer Einzelmessungen den Anforderungen nicht genügte. Zusätzlich konnten damit weitere Ziele verfolgt werden:
 - Das Aufdecken grober Fehler
 - Die Bestimmung der aktuellen Beobachtungsgenauigkeit durch Betrachten der Messdifferenzen.
 - Eine Genauigkeitssteigerung durch Mittelbildung und Ausführung in zeitlich und geometrisch bewusst gewählten Konstellationen, um gezielt Fehlereinflüsse zu eliminieren oder zu reduzieren. Als Beispiel seien hier die 2-Lagen-Messung und die Reihenfolge einer Satzmessung (Lage I: $Z_1, Z_2, \dots, Z_{n-1}, Z_n$, Lagenwechsel $Z_n, Z_{n-1}, \dots, Z_2, Z_1$) angeführt.

3.5.2 Die Genauigkeitsgrenzen heute

Mit der automatisierten Messtechnik inkl. der automatischen Zielfindung mutiert der Beobachter, mit einem direkten Einfluss auf die Qualität aller Messungen, zum Nutzer oder Anwender, der nur noch indirekten Einfluss auf einen Teil der Messungen hat. Allerdings werden

heute mögliche Verfälschungen durch den Anwender oft unterschätzt (vgl. 5).

Aktuell begrenzen die Komponenten *Messraum* und *Messausrüstung* unsere erreichbaren Genauigkeiten:

- *Messraum*. Damit ist die physikalische Umgebung, insb. der Einfluss der Atmosphäre auf unsere Messungen, gemeint. Der refraktive Einfluss begrenzt sowohl die Winkelmessung (Seiten- und Höhenrefraktion) als auch die Streckenmessung (Brechungsindex der Atmosphäre). In den letzten 20 Jahren konnte die innere Streckenmessgenauigkeit der Instrumente um den Faktor 10 gesteigert werden. Um diese Genauigkeitssteigerung auch bei längeren Strecken (> 200 m) wirksam nutzen zu können, muss der Anwender im Feld die repräsentativen atmosphärischen Parameter (im wesentlichen Lufttemperatur und Luftdruck) genau erfassen [6].
- *Messausrüstung*. Die Genauigkeit einer Einzelmessung ist für die Mehrzahl der Fragestellungen völlig ausreichend. Allerdings wurden nicht bei allen Zubehörteile weder der technischen Wandel noch die Genauigkeitssteigerungen berücksichtigt. An zwei Beispielen sei dies verdeutlicht:

- *Stative*. Kein Hersteller bietet heute hochwertige Stative an, die auch den Anforderungen der motorisierten Tachymetrie genügen. Verschiedene Untersuchungen zeigen signifikante Schwingungseinflüsse [7] und horizontale Verdrehungen [8] der Stative bei der Nutzung motorisierter Tachymeter.
- *Optische Lote*. Instrumentell sind heute Messungen im Submillimeterbereich möglich. Soll die hohe Messgenauigkeit auch auf Bodenpunkte übertragen werden, scheitert dies an den optischen Loten, die in den letzten 30 Jahren keine Verbesserung erfuhren.

Oft ist auch mangelnde Sorgfalt bei der praktischen Messung zu beobachten: der Nutzer ist der Auffassung mit einem „fehlerfreien Instrument“ zu messen, das keiner besonderen Behandlung, wie z.B. dem Schutz vor Sonnenstrahlen, bedarf. Das Gegenteil ist jedoch der Fall: Untersuchungen [9] zeigen, dass bei Digitalnivellieren die Variationen der Ziellinie, in Abhängigkeit von der Instrumententemperatur, deutlich größer sind, als bei vergleichbaren analogen Instrumente. Wird kein Feldschirm verwendet, kommen noch weitere Effekte durch die einseitige Erwärmung hinzu.

4 Die Kunst des Messens früher

Bereits vor 300 Jahren muss es Diskussionen über erforderliche Qualifikationen zur Feldmessung gegeben haben. Weshalb sonst äußerte sich 1684 der Schweizer Mathematiker Jakob Bernoulli zu diesem Thema mit den Worten: „Die Feldmesskunst kann nur von jemand, der in der Mathematik Erfahrungen besitzt, mit Recht ausgeübt werden; daher soll im Staate deren Besorgung entgegen einem seltsamen Vorurteil nicht ungebildeten und gewöhnlichen Bürgern übertragen werden“ [10].

Traditionell wurde von einem Vermessungsingenieur eine große Vielseitigkeit erwartet. Er musste:

- feinmechanische Fähigkeiten zum Zusammenbau und Justieren des Instrumentes auf dem Standpunkt besitzen,

Tab. 3: Einflüsse des Beobachters auf die Messergebnisse (Bsp. Tachymeter)

Ausbaustufe des Instruments	Justierung erforderlich?	Aufstellung	Anzielung	Ablesung	Feldbuchführung	Berechnungen
Optisch-mech. Theodolit – offene Bauweise	●	●	●	●	●	●
Optisch-mech. Theodolit – geschlossene Bauweise	–	●	●	●	●	●
Elektronische Tachymeter (T) ohne Registrierung	–	●	●	● ¹	●	●
Elektronische Tachymeter (T) mit Registrierung				–	–	–
– Manuelle Anzielung	–	●	●	–	–	–
– Automatische Anzielung	–	●	–	–	–	–

¹ nur im Sinne eines groben Fehlers

- Fertigkeiten im Rechnen vorweisen,
- ein scharfes Auge haben und
- über körperliche Robustheit gegen die Wettereinflüsse verfügen,

Mit fortschreitender Verbesserung der Instrumente wurde das Anforderungsprofil Schritt für Schritt reduziert. Für Instrumente mit automatischer Zielerfassung, bleibt heute nur noch die körperliche Robustheit als Anforderung übrig. In Tab. 2 sind die erforderlichen manuellen Tätigkeiten bei der Winkelmessung in Abhängigkeit vom Modernisierungsgrad des Instrumentes zusammengestellt.

Bevor die Frage nach der noch existierenden Messkunst diskutiert wird, erscheint es sinnvoll, zunächst nach grundsätzlichen Prinzipien der Messtechnik zu suchen, die sich mit fortschreitender Technisierung nicht verändern.

5 Zeitlose Prinzipien der Messtechnik

Auf der Suche nach zeitlosen Prinzipien der Messtechnik findet man kaum Hinweise in der Fachliteratur. Peter Byrne und Gail Kelly [11] präsentierten 2007 einen interessanten Beitrag mit dem Titel „The ABC of XYZ“. Darin werden 21 Prinzipien (oder Regeln) für das fachgerechte Vermessen formuliert, die in drei Kategorien *Application*, *Behaviour* und *Context* unterteilt sind (Daher der Titel). In unserem Zusammenhang, der Messkunst, interessiert besonders die Kategorie A-Anwendung. Dort wird der Umgang mit Wissenschaft und Technik diskutiert. Die Kategorie B beschreibt das Verhalten zu Kunden, Mitarbeitern und Behörden. Und schließlich wird in C direkt auf das Geschäftsverhältnis mit dem Kunden eingegangen. Die beiden Autoren geben in jeder Kategorie 7 Empfehlungen, die für A sinngemäß übersetzt wurden (Tab. 4). Die Regeln 1, 2, 3, 4 und vor allem 6 beziehen sich direkt auf die fachgerechte Messung und Auswertung. Sie können nach Ansicht des Verfassers zusammengefasst werden in der Aufforderung: „Beherrsche den gesamten Messprozess“. Alle Regeln sind zeitlos, denn es werden keine Aussagen gemacht, die sich auf eine bestimmte technische Entwicklungsstufe beziehen. Das muss der Anwender jeweils für sich, auf die gestellte Aufgabe und in Kombination mit den zur Verfügung stehenden Mess- und Auswertmöglichkeiten, anpassen.

Tab. 4: Die 7 Empfehlungen zu A-Application [10]

A – Application	A – Anwendung
1. First, consider the whole	1. Betrachte zunächst das Ganze
2. Know the tools	2. Kenne die Werkzeuge
3. Consider contributing errors	3. Erstelle ein Unsicherheitsbudget
4. Record defining parameters	4. Weise die Bezugsgrößen nach
5. Beware the bounds of Convention	5. Berücksichtige die Interessen des Auftraggebers
6. Build proof into the process	6. Überprüfe den Prozess
7. Engage the user	7. Beziehe den Kunde ein

Zu der Beherrschung des Messprozesses zählen:

- die Wahl des optimalen Mess- und Auswertverfahrens und
- das Beherrschen des gewählten Mess- und Auswertverfahrens. Dazu gehören
 - die Entwicklung einer geeigneten Mess- und Auswertstrategie,
 - die Überprüfung der Messausrüstung und der Messwerte und
 - die Prüfung und Validierung des Gesamtsystems und der Endergebnisse.

6 Die Kunst des Messens heute

Früher bestand die Kunst des Messens aus Fertigkeiten, die direkt auf die Messwertgewinnung und auf die Beherrschung des Messgerätes abzielten. Durch die obligatorische Mehrfachmessung wurden nicht nur grobe und systematische Fehler eliminiert, sondern auch die Genauigkeit der Messungen insgesamt gesteigert (vgl. 3.5.1). Eine Wahl des Messverfahrens und der Messausrüstung war – im Gegensatz zu heute – nicht erforderlich bzw. nicht möglich, denn die Aufgaben der hoheitlichen Vermessung wie Grundlagenvermessung (Netz 1. Ordnung, 2. Ordnung, usw.), Punktverdichtung, Katastermessung, Höhenmessung, usw. waren vorgegeben und es gab dafür vollständige und detaillierte Vorschriften, die keinerlei Gestaltungsspielraum bei der Ausführung zuließen. Wurde gemäß dieser Vorschriften gemessen und ausgewertet, war auch die erforderliche Kontrolle von Mess- und Berechnungsergebnissen sichergestellt.

Heute ist das, insbesondere bei technischen Vermessungen, anders: Das „Beherrschen des Messprozesses“ ist weit mehr als nur die Messwertgewinnung. Es stehen verschiedene Messverfahren und -methoden zur Verfügung. Angenommen, es gilt für einen größeren Geländeabschnitt ein genaues digitales Geländemodell zu erstellen, um schließlich das Volumen zu ermitteln. Die Datenerfassung kann prinzipiell mit Laserscannern, GNSS-Empfänger, elektronischen Tachymetern, Digitalnivellieren oder Rotationslaser erfolgen. Alle Verfahren haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Das gilt gleichermaßen für die Auswertung. Es ist nun die Aufgabe des ausführenden Ingenieurs das optimale Mess- und Auswerteverfahren im Kontext der Aufgabe – mit allen Rahmenbedingungen – zu wählen.

Für diese fachgerechte Auswahl sind vertiefte Kenntnisse erforderlich, die zur heutigen Kunst des Messens zählen:

- Kenntnisse in Mathematik, Physik, Fortpflanzung von Messunsicherheiten und Ausgleichsrechnung.
- Kenntnisse über die verschiedenen Messverfahren (Prinzipielle Vor- und Nachteile, Abhängigkeiten, potenzielle Stör- und Einflussgrößen).
- Kenntnisse über Prüfmethode der aktuellen Messausrüstungen.
- Kenntnisse über die verschiedenen Auswerteverfahren (Voraussetzungen und Limitierungen)

Mit der Wahl der Messstrategie ist eine konkrete Abschätzung der zu erwartenden Messunsicherheiten, z.B. durch eine Netzplanung, verbunden (Abb. 7). Daran schließt sich die Planung der konkreten Messung an (Messausrüstung, Wahl der Standpunkte, Beobachtungszeitpunkt und -dauer, Verknüpfung der Punkte). Vor der eigentlichen Messung ist die Messausrüstung mit Zubehör (Optische Lote, Reflektoren, usw.) zu prüfen. Während und unmittelbar nach Abschluss der Feldarbeiten ist das gesamte Datenmaterial auf systematische Einflüsse und grobe Fehler (Punktverwechslungen, falsche Anschlusshöhen, ...) zu untersuchen. Die bereinigten Messwerte sind in einem möglichst überbestimmten Verfahren auszuwerten. Ein wichtiger Bestandteil dabei ist die Bestimmung der Messunsicherheiten, die auch mit den Voranschlägen zu vergleichen sind. Das Endergebnis gilt nur zusammen mit Genauigkeitsangaben als vollständig.

Ein wichtiger Punkt bei der Beherrschung des Messprozesses ist Empfehlung 6: „Prüfe den Prozess“ (Tab. 4). Damit ist insbesondere die möglichst unabhängige Prüfung des gesamten Systems (Projekt, Messauftrag, usw.) gemeint. Bei einer fachgerechten Durchführung sind die realisierten Genauigkeiten der Endprodukte oft völlig ausreichend; es sei denn „irgendwo im Projekt“ stecken noch grobe Fehler (nicht sorgfältige Arbeit) oder systematische Verfälschungen (Planungs- oder Ausführungsfehler), die es durch eine unabhängige Kontrolle möglichst früh aufzudecken gilt.

An einem spektakulären Beispiel der unbemannten Raumfahrt sei dies verdeutlicht: Vor 10 Jahren schickte die NASA den Satelliten MCO (Mars Climate Orbiter) zum Mars, um die dortige Atmosphäre zu erforschen. Nach neunmonatigem Flug führte die NASA mehrere Kurskorrekturen zum Einschwenken des Satelliten in die Marsumlaufbahn durch. Dabei ging der Satellit unwie-

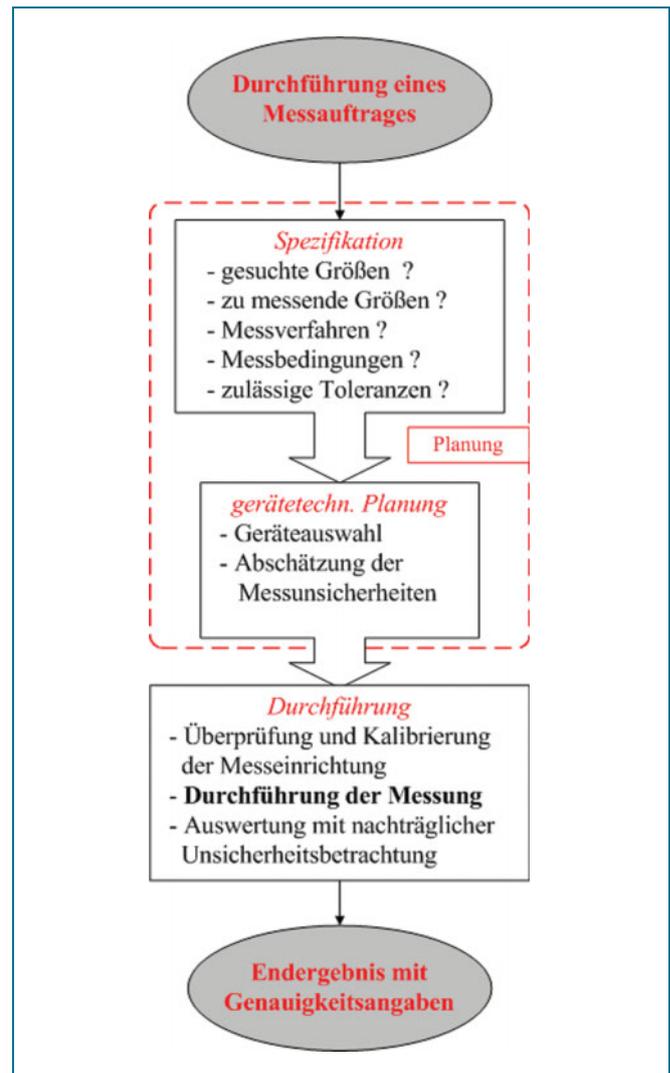


Abb. 7: Phasen eines Messauftrages

derbringlich verloren. Was war die Ursache für den Verlust? Aufgrund des asymmetrischen Sonnenpanels war der Satellit mit Steurdüsen ausgerüstet, die der Eigenrotation des Satelliten entgegenwirkten. Geliefert wurden die Steurdüsen inkl. der Steuersoftware von der Firma Martin-Marietta. Nachforschungen nach dem Verlust ergaben, dass die Steuersoftware mit imperialen Pfund als Einheit für die Schubkraft programmiert wurde, während die NASA, als Betreiber des Systems, von metrischen Pfund ausging und entsprechende Steuerkommandos gab. Der Faktor zwischen beiden Systemen beträgt ungefähr 4. Der Untersuchungsbericht über den Verlust schließt mit der Feststellung, dass der Fehler in der Programmierung aufgrund der beobachteten Abweichungen in den Navigationsdaten, während des neunmonatigen Fluges hätte rechtzeitig erkannt werden können.

Was ist die Lehre aus diesem Verlust? Zwischen den Projektpartnern fand zu wenig Kommunikation statt. Fehlende Absprachen führten zur Katastrophe. Die Fehlbedienung wurde nicht erkannt, weil während der Flugphase zu wenig Personal zur Verfügung stand; gewisse Anomalien fielen zwar auf, denen jedoch nicht ernsthaft nachgegangen wurde. Der Fehler ist der Kategorie „Schlampe-

rei“ zuzuordnen und als solche nicht branchenspezifisch, sondern auf viele große Ingenieur-Projekte übertragbar. Weitere Beispiele für Fehlschläge der Raumfahrt und ihre Ursachen finden sich z.B. unter [11].

7 Fazit

Der Stellenwert der Messtechnik innerhalb unseres Berufes ist nach wie vor groß. Die Kunst des Messens existiert noch heute, jedoch in völlig anderer Form. Wettererprobte Rechenkünstler mit scharfen Augen waren früher gefragt. Die Kunst des Messens beschränkte sich dabei auf das Beobachten genauer und zuverlässiger Messwerte. Heute sind Systemspezialisten gefordert, die den gesamten Mess- und Auswerteprozess beherrschen. Die Datenerfassung ist dank der Automatisierung viel einfacher und effizienter geworden. Das bedeutet jedoch nicht, dass wir fehlerfrei und ohne Abweichungen messen. Viele Kollegen setzen die einfache Messwertgewinnung mit einem insgesamt einfachen Messprozess gleich. Dieser Schluss ist falsch. Der gesamte Mess- und Auswerteprozess ist außerdem vielfältiger und komplexer geworden. Kein Messauftrag gleicht dem anderen, weshalb heute ein besonderes Augenmerk auf die möglichst unabhängige und ganzheitliche Überprüfung des Prozesses und seiner Ergebnisse zu legen sind. Und genau darin besteht die heutige Kunst des Messens.

Literatur

- [1] WILD, H.: „Die neuere Entwicklung einiger geodätischer Instrumente“. Festschrift „Vermessung- Grundbuch-Karte“ Zürich, CH, 1939
- [2] SCHLEMMER, H.: Kolloquium TU Dresden „Professor Fritz Deumlich 80 Jahre“ , Dresden, 29. Januar 2003
- [3] HELMHOLTZ, H. v.: „Messen und Zählen erkenntnistheoretisch betrachtet“. 1887
- [4] Eichordnung: BGBI I 1988, Seite 1657, zuletzt geändert durch Art. 8 G v. 13.12.2001, BGBI. I, Seite 3586, 2001
- [5] FUHLBRÜGGE, H.- J.: „Untersuchungen zur Prüfung von GPS-Echtzeitsystemen als Beitrag zur Qualitätssicherung im Vermessungswesen“. Dissertation, Uni Bonn, 2004
- [6] DEUMLICH, F.; STAIGER, R.: „Instrumentenkunde der Vermessungstechnik“. 9. Auflage, Wichmann-Verlag, Heidelberg, 2002
- [7] INGENSAND, H.: „Systematische Einflüsse auf praktische Messungen mit dem Tachymeter und Digitalnivellier“. 54. DVW-Seminar „Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik“. DVW-Schriftenreihe Band 42, Seite 120–137, 2001
- [8] DEPENTHAL, C.: „Stativbewegungen bei der Verwendung von Robottachymetern“. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), Heft 6, S. 227–233, 2004
- [9] STAIGER, R.: „Zur Überprüfung moderner Vermessungsinstrumente“. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 105 (1998) 11/12, 1998, S. 365 – 372
- [10] FUETER, E.: „Geschichte der exakten Wissenschaften in der schweizerischen Aufklärung.“ Sauerländer Verlag, Aarau 1941

- [11] BYRNE, P.M.; KELLY, G.: „The ABC of x, y, z – 21 Principles for Consideration by Surveyors and Other Geospatial Professionals“, FIG Working week, Hong Kong, 2007
- [12] LEITENBERGER, B.: „Schlampereien in der Raumfahrt“. <http://www.bernd-leitenberger.de/schlamperei.shtml>. Letzter Zugriff: Dezember 2008

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. RUDOLF STAIGER, Hochschule Bochum, FB Vermessungswesen und Geoinformationen, Lennerhofstraße 40, 44805 Bochum, E-Mail: rudolf.staiger@uni-due.de

Summary

The entire geodetic measurement technique changed significantly in the last 30 years. In former days we made tedious and difficult observations; the quality of the field depended directly from the capabilities of the man behind the instrument. Today our surveying instruments are automatic measuring devices; their results do no longer depend on the sharp eyes of the users. „Push the button – and the rest will be done automatically“ This is one important advertising slogan from all the manufacturers. And it describes the reality: we do not know what is going on inside our instruments, but today the data acquisition itself is easier and much more efficient than it was decades before. The flow of our data is automatic as well as the entire process of data treatment and calculation. So is there any „art of measurement“ left or still needed?

In order to answer this question the different eras of surveying will be described and analyzed carefully. The data acquisition became much easier, but this does not mean that our measurement results are error-free. This does also not mean that we control the entire measurement process! Are there still blunders in our data? How do we have to control our measurements in order to prevent undetected outliers or significant systematic deviations? Can we estimate our overall precision and accuracy?

The „art of measurement“ still exists, but it is different from the traditional one. It consists very generally spoken in the successful control of the entire measurement process. What this means will be explained in detail. And it will be certainly much more than just „Pushing the Button“.