Beitrag zum XIII. Kurs für Ingenieurvermessung, München, 13.-17.3.2000

# Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit trackender Totalstationen

**Maria Hennes**

**Zusammenfassung:** Die Leistungsfähigkeit zielverfolgender Totalstationen wird neben den Kriterien für herkömmliche Tachymeter stark von den Eigenschaften der Zielverfolgungsmodule und durch die Dimension „Zeit“ (insbesondere bei kinematischen Anwendungen) bestimmt. In diesem Beitrag werden sowohl die für den stop-and-go- als auch für den kinematischen Betrieb relevanten Aspekte zusammengestellt. Die Eignung von Trajektorientests, bei denen ein Ziel auf einer vorgegebenen Bahn verfolgt wird, wird diskutiert.

## 1 Einleitung

Von fast allen Herstellern geodätischer Instrumente werden heute motorisierte Totalstationen angeboten, die durch Komponenten zur Zielerkennung und zur Zielverfolgung für die Messung im statischen bzw. kinematischen Modus erweitert sind. Derartige Instrumente finden ihre Anwendung bei einer Vielzahl von Aufgaben, die von der automatischen Anzielung von Punkten für (kontinuierliche) Überwachungsmessungen über one-man-Aufnahmeverfahren bis zur Steuerung von Baumaschinen im Tunnel- und Straßenbau bzw. zur kinematischen Verfolgung von mehr oder weniger schnell bewegten Objekten im 3D-Raum reichen. Da durch den Einsatz solcher Instrumente Personalkosten eingespart werden, finden sie vermehrt Verbreitung in der Praxis. Sie ermöglichen auch die Realisierung von Meßaufgaben mit schnell bewegten Objekten, die mit herkömmlichen Tachymetern und manuellen Meßtechniken nicht realisierbar sind. Gerade hier scheint bei den Anwendern eine gewisse Unsicherheit bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit vorzuherrschen, weswegen derartige Projekte nur zögernd angenommen werden.

Seitens der Hersteller wird die Leistungsfähigkeit eines derartigen Instrumentes hinsichtlich einer beschränkten Auswahl der Anwendungsmöglichkeiten optimiert, während die als zweitrangig eingestuften Verwendungen offensichtlich deutlich weniger berücksichtigt werden. Dies spiegelt sich bereits beim Versuch des Vergleichs der technischen Daten verschiedener Produkte wieder, denn ein bestimmtes Merkmal wird bei unterschiedlichen Herstellern durchaus nicht mit denselben Kriterien beschrieben. Insbesondere hinsichtlich des kinematischen Verhaltens werden nur wenige bis gar keine Angaben gemacht; eine Vergleichbarkeit ist somit nicht gewährleistet.

Wegen dieser zusätzlichen Möglichkeiten sind die bislang üblichen Kriterien und Prüfverfahren zur Beurteilung eines Tachymeters nicht mehr ausreichend: Sie sind im Hinblick auf die Zielerkennungscharakteristika und insbesondere bei den kinematischen Anwendungen unter Berücksichtigung der neu hinzukommenden Dimension „Zeit“ zu erweitern. Dies kann nur durch die Entwicklung spezifischer Untersuchungs- und Prüfmethoden geschehen.

## 2 Charakterisierende Funktionen

Trackende Totalstationen werden auch als Robottachymeter bezeichnet, weil sie gewisse manuelle Funktionen des Menschen ausführen können: Sie sind mit Modulen zur automatischen *Zielerkennung* ausgestattet, womit die Identifizierung eines Ziels im Arbeitsbereich dieses Moduls, der in etwa dem Fernrohrgesichtsfeld entspricht, erfolgt und die Bestimmung der Ablage bezüglich der Zielachse realisiert wird. Für diese beiden Prozesse wird auch die Abkürzung ATR (Automated Target Recognition) verwendet. Robottachymeter sind hinsichtlich der Nachführung der Zielachse bei einem bewegten Ziel (*Zielverfolgung*, „*Lock-Mode*“) sogar dem Menschen überlegen. Werden zusätzlich die Richtungs- und Distanzsensoren abgegriffen, spricht man vom „*Autotracking-Mode*“. Nicht alle Instrumente verfügen über einen Grobsuchmodus (coarse location mode), bei dem das Ziel im gesamten (bzw. in einem vorgebbaren) Objektraum gesucht wird.

Hinsichtlich des Beobachtungsablaufs werden die Betriebsarten „*statisch*“ (Ziel in Ruhe), „*stop-and-go*“ (Ziel wird verfolgt, aber im statischen Zustand angemessen) und „*kinematisch*“ (bewegtes Ziel wird angemessen) ermöglicht. Der letzte Fall ist der technisch anspruchsvollste, weil alle Sensoren synchron – und schnell – ausgelesen werden müssen, um den sehr kurzen Ansprech- und Meßzeiten vieler Aufgaben zu genügen. Weil sich die Leistungsmerkmale eines Robottachymeters für die drei oben genannten Beobachtungsmodi signifikant unterscheiden, sind sie immer für eine dieser Betriebsarten zu spezifizieren.

Es darf nicht vergessen werden, daß die für die statische Betriebsart bekannten Fehleranteile natürlich auch bei der kinematischen auftreten. Bisherige Untersuchungen zeigen bereits, daß die kinematisch bedingten Fehlereinflüsse betragsmäßig die herkömmlichen übersteigen. Beispielsweise sei die Distanzdrift nach dem Einschalten des Instrumentes erwähnt: Die notwendig gewordene Beschleunigung des Meßprozesses bedingte eine Reduzierung der geräteinternen Messungen des inneren Lichtweges, wodurch in den ersten Minuten nach dem Einschalten Abweichungen auftreten, die deutlich größer sind als die übrigen bei

der Distanzmessung bekannten (vgl. Abb. 1). Ein weiteres Beispiel ist der Kompensatorabgriff nach einer Rotation des Instrumentes: kinematische Messungen erlauben nicht immer, die Einschwingzeit des Kompensators abzuwarten, weswegen mit ähnlich den in Abb. 2 gezeigten Abweichungen zu rechnen ist.

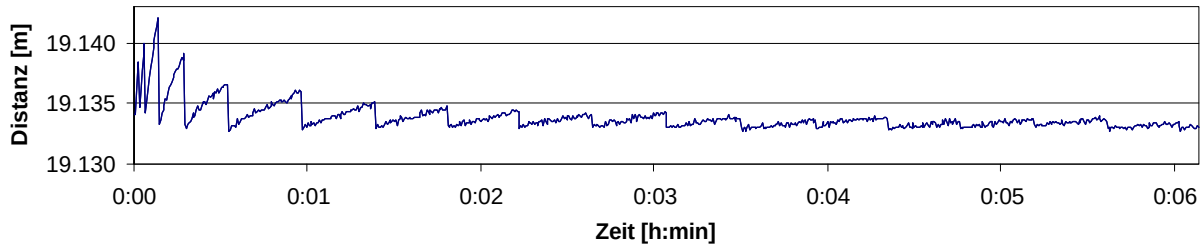


*Abb. 1: Drift nach dem Einschalten bei statischem Ziel*

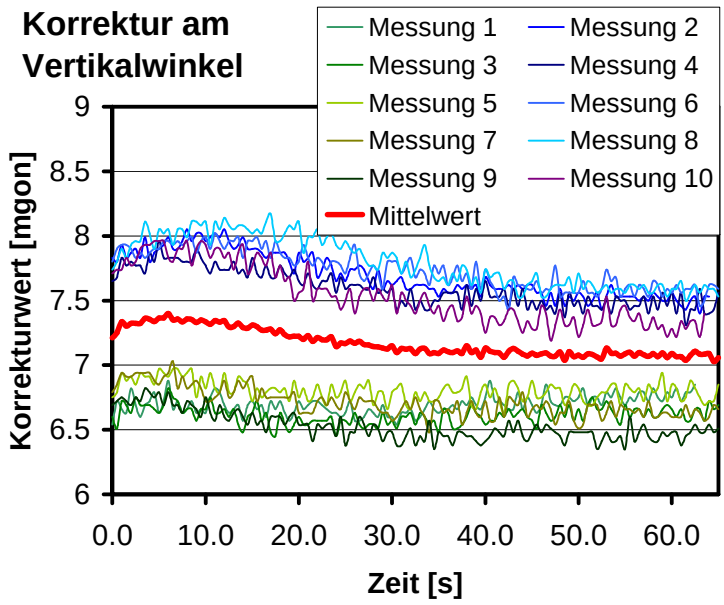


*Abb. 2: Kompensatoreinschwingen*

Allerdings sind für fast alle auftretenden Abweichungen übliche fehlereliminierende oder -reduzierende Meßverfahren, wie z.B. Zwei-Lagen-Messung, im kinematischen Modus sicher – da prozeßbedingt – und bei einigen Instrumententypen auch im statischen Modus – hier bautechnisch bedingt – nicht mehr möglich. Hinsichtlich des state-of-the-art der Kalibrierung von Robottachymetern ist festzuhalten, daß die hierzu notwendige Kenntnis der funktionalen Zusammenhänge in der Regel noch zu unvollständig ist, um eine durchgreifende Modellierung mit einer sinnvollen Parameterisierung vornehmen zu können.

## 3 Evaluationskatalog

Bevor jedoch eine Genauigkeitssteigerung durch Kalibrierung angestrebt wird, sollte der Anwender zunächst festlegen, welchen spezifischen Leistungsmerk-

malen das Instrument im geplanten Projekt genügen muß. Als Entscheidungshilfe wird der folgende Kriterienkatalog dienen können, der nach den Betriebsarten untergliedert ist. Es wird deutlich, daß neben den Genauigkeitsmerkmalen auch die übrigen technischen Daten die Leistungsfähigkeit in erheblichem Maße beschreiben. Im Hinblick auf die besonderen Eigenschaften der Robottachymeter werden hier nur die nicht-statischen Kriterien erwähnt.

## 3.1 Leistungsmerkmale „stop-and-go“

*Technische Merkmale, die das Instrument während des Meßprozesses charakterisieren:*

- Maximal benötigte Zeit $t_{max}$ für Lokalisierung und Positionsbestimmung
- zulässige $v_{max}$, $b_{max}$ während dem Verfolgen ohne Signalverlust
- Reaktion nach Signal-Unterbrechung mit Unterscheidung der Fälle: Reflektor bleibt stationär/Reflektor wurde zufällig verschoben
- Art der Extrapolations-Strategie
- Reaktion nach Signal-Verlust
- Einfluß von Fremdreflexionen (z.B. Sonnenlicht, Reflexion von Katzenaugen etc.; weitere Prismen im aktiven ATR-Bereich)
- Elastische Nachwirkungen auf die Alhidade nach einer Rotation bedingt durch Drehmoment auf Stativ, Dreifuß, Pfeiler

*Präzision, Genauigkeit und systematische Abweichungen*

Zusätzlich zu allen bei herkömmlichen Tachymetern auftretenden Abweichungen ist folgendes zu beachten:

- Instrumentenseitig:
  - Auflösung des ATR-Moduls
  - Abweichung zwischen ATR-Ziel-Achse und „visueller“ Ziellinie
  - Verlauf der ATR-Ziellinie (analog zur visuellen Ziellinie)
- Äußere Einflüsse:
  - Signal-Intensität
  - Fremdstrahlung
  - Turbulentes Ausbreitungsmedium
  - Verhalten bei Vibration
    - Einwandfreie Arbeitsweise des Kompensators gewährleistet
    - Filter-Prozeß implementiert? Insbesondere relevant für Maschinensteuerung
- Reflektor:
  - Mehrprismen-Reflektor: intensitätsbalanzierende Anordnung der Prismen
    - rotationssymmetrisch zur Visur
    - zentrisch zur Vertikalachse

- Herkömmliche Prismen: Fehlausrichtung
- 360° Prismen: verschiedene Bauformen zeigen unterschiedliche und orientierungsabhängige Additionskorrektionen

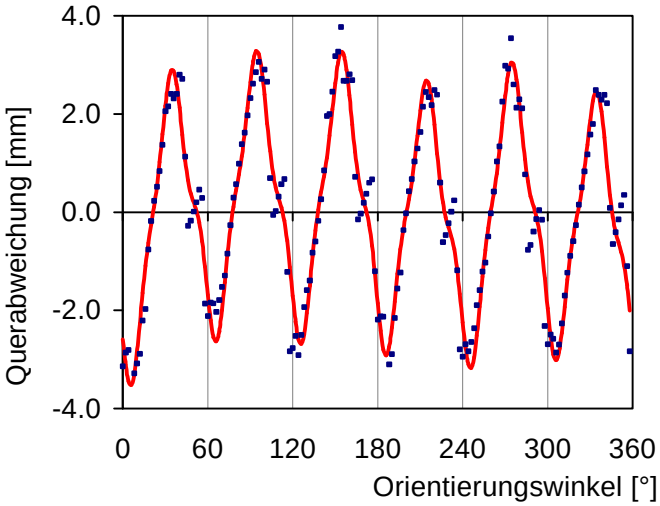


*Abb. 3: Orientierungsabhängige Additionskorrektion (Meßbeispiel)*

## 3.2 Leistungsmerkmale „kinematisch“

Zusätzlich zu “stop-and-go” sind folgende Kriterien zu berücksichtigen:

*Technische Merkmale*

- Maximal erlaubte Geschwindigkeit und Beschleunigung ($v_{max}$, $b_{max}$) während des Meßprozesses
- Dauer für die Bestimmung eines polaren Meßelementes
- maximal mögliche Datenrate zur Ermittlung eines Koordinaten-Tripels
- wählbare oder variierbare Abgriffstrategie?
- Zeitmarken vorhanden für Koordinatentripel bzw. polares Meßelement?

*Präzision, Genauigkeit und systematische Abweichungen*

- Meßelemente gehören nicht zu demselben Punkt, weil sie zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfaßt wurden: $t_d \neq t_V \neq t_{Hz} \neq t_{Transfer}$
- Reduktion der Genauigkeit der Meßelemente wegen Reduktion der internen Wiederholungsmessungen/Kalibrierungsmessungen
- Drift von Nullpunkten: insbesondere Distanz
- Drift der ATR-Ziellinie
- Verhalten des Kompensators während und nach der Beschleunigung
- Wirkung der Extrapolationsmethoden nach Signal-Unterbrechungen

## 4 Konsequenzen für die Untersuchungsmethoden

Da eine Prüfung, die gemäß den Herstellerangaben zu erfolgen hätte, keineswegs eine vergleichende Beurteilung der Leistungsfähigkeit zuläßt, muß dies durch neu zu entwickelnde *einheitliche* Untersuchungsmethoden geschehen. Zweckdienlicherweise sollten diese derart gestaltet sein, daß sie *ohne* Modifikation auf *alle* am Markt befindlichen Instrumente anwendbar sind. Hier bereitet bereits die unterschiedliche Kommunikations- und Befehlsstruktur eine erste Hürde, die reduziert werden kann, wenn man sich auf die Nutzung der geräteim-

plementierten Software und Speichermediums beschränkt und auf einen Zugriff über eine Schnittstelle verzichtet. Hierdurch wird allerdings auch die Aussagekraft hinsichtlich der Leistungsfähigkeit eingeschränkt. Weiterhin sollte das Untersuchungsverfahren derart gestaltet sein, daß mit wenig experimentellem Aufwand Angaben über eine Vielzahl von Aspekten ermöglicht werden.

Dies gelingt, wenn sich die zugehörigen Modelle hinsichtlich der zu untersuchenden Kriterien eindeutig parameterisieren lassen. Diesen Ansprüchen kommt die Kombination des Kreisformtests und des linearen Tests entgegen; hierbei werden bewegte Prismen verfolgt, die sich auf einer kreisförmigen bzw. linearen Trajektorie bewegen: Ist der Kreis vertikal angeordnet, wird die geringe Aussagekraft hinsichtlich des kinematischen Verhaltens bei Distanzänderung durch die Vorbeifahrt auf einer linearen, näherungsweise horizontalen Bahn ergänzt. Der Vorteil einer solchen Anordnung besteht darin, daß bereits ohne eine simultane Sollpositionsbestimmung erste Aussagen abgeleitet werden können, weil die Trajektorien definiert sind. Eine Sollpositionsbestimmung stellt hohe Anforderungen an das Controlling: alle Daten müssen zeitlich referenziert übertragen werden: beispielsweise bewirkt ein zeitlicher Zuordnungsfehler von lediglich 1ms bei einer Geschwindigkeit von 1m/s bereits eine Positionsunsicherheit von 1mm! Es muß betont werden, daß – solange keine Transformation der systematischen Anteile in geometrisch-zeitliche Parameter erfolgt – alle Abweichungen als stochastisch charakterisiert werden und eine Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen nur dann gewährleistet ist, wenn auch alle Parameter, die das jeweilige Experiment charakterisieren, definiert werden. Obwohl derartige Trajektorientests geeignet sind, einen Überblick über das generelle Instrumentenverhalten zu gewinnen, werden erst Untersuchungen einzelner Kriterien, die im Hinblick auf den Einsatzbereich des Instrumentes zu evaluieren sind, die Tauglichkeit des Instrumentes unter Beweis stellen können.

**Literatur:**

BAYER, G. [1997]: Dynamic Aspects Of The TCA 1800 Automatic Total Station. Optical 3-D-Measurement Techniques IV 1997, Wichmann, Karlsruhe, S.319-326.

FAVRE, C.; HENNES, M. [2000]: Zum Einfluß der geometrischen Ausrichtung von 360°-Reflektoren bei Messungen mit automatischer Zielerfassung. VPK, in Druck.

INGENSAND, H.; BÖCKEM, B. [1997]: Automatic Location and Pointing Techniques in Local Positioning Systems. In: Grün, A.; Kahmen, H.: 4th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Zürich 1997, S. 329-338.