

With compliments by the author

# Grundlegende Aspekte zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Robottachymetern

M. Hennes

## **Abstract:**

Today more and more total stations are equipped with tracking features, which enable the user to induce the instrument to aim at targets or to follow a moving prism automatically. These instruments are called robot tacheometers. After a brief review of their functionality and of possible applications, potential error sources relating to the additional features are discussed, regarding separately the static mode (including stop-and-go) and the cinematic mode. Furthermore, systematic and stochastic aspects are characterized. Evaluation strategies for the determination of the performance of robot tacheometers are presented: on the one hand the testing only procedures which prove the instruments' features according to the manufacturers' specifications and on the other hand the calibration functions with the possibility to increase the instruments' accuracy. The requirement for specific examination and calibration methods is shown, which is a demanding task, because a new dimension, time, is involved.

**Keywords:** Tacheometer, Robot Tacheometer, Automated Target Recognition, Performance

## **1 Einleitung**

Fast alle Hersteller bieten heute Totalstationen mit einem Autotracking-Modul an, das ein statisches Ziel selbständig erfaßt oder ein bewegtes verfolgt und dessen Position automatisch bestimmt. Im Hinblick auf die vielseitige Funktionalität scheint die Bezeichnung Robottachymeter gerechtfertigt, denn auf einen Beobachter im herkömmlichen Sinn kann weitgehend verzichtet werden. Derartige Instrumente bieten viele Vorteile, angefangen bei der gleichbleibenden (und beobachter-unabhängigen) Genauigkeit – selbst bei Messungen in der Dunkelheit. Darüber hinaus können derartige Instrumente mit einer Fernsteuerung ausgerüstet werden, so daß die Steuerung des Meßablaufs vollständig vom Zielpunkt aus erfolgen kann. Wenn das Instrument zusätzlich über ein Grob-Ortungsmodul verfügt, kann auf den Beobachter am Instrument vollständig verzichtet werden, weswegen das erste kommerziell angebotene System auch unter der Bezeichnung „one-man station“ offeriert wurde. Neben den herkömmlichen Applikationen wie tachymetrische Aufnahme und Absteckung ergeben sich jedoch noch eine Vielzahl weiterer Anwendungsgebiete, in denen nach einer erstmaligen Initialisierung vollständig auf einen Beobachter verzichtet werden kann. Darunter fallen z.B. automatisierte Deformationsmessungen und Baumaschinensteuerungen. Gerade hier lassen sich die Vorteile der Robottachymeter voll ausschöpfen. Bei der Bestimmung der Trajektorie zufällig bewegter Objekte ist das Autotracking-Modul in den meisten Fällen einer visuellen Beobachtung überlegen. Die Auseinandersetzung mit den technischen Möglichkeiten eines solchen Instrumentes wird außerdem weitere Anwendungsgebiete erschlie-

ßen, die erst durch die automatische Zielerfassung oder die Messung im kinematischen Mode realisierbar geworden sind.

All diesen Anforderungen versuchen die Instrumentenhersteller durch einen oder mehrere Instrumententypen gerecht zu werden, wobei notwendigerweise Schwerpunkte auf die eine oder andere Anwendung gelegt werden müssen. Auch aufgrund der mehr oder weniger unterschiedlichen Funktionsprinzipien der Instrumente weichen auch die Leistungsmerkmale voneinander ab. Unter anderem deswegen sind die Herstellerangaben nicht in allen relevanten Aspekten vergleichbar. Bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit müssen zusätzlich zu den üblichen Instrumentenfehlern jene spezifischen Eigenschaften, die das Tracking-Modul betreffen, berücksichtigt werden. Dies erfordert besondere Verfahren, die über die bisher verwendeten Untersuchungsmethoden hinaus gehen. Vor allem, wenn der kinematische Mode der Instrumente betrachtet werden soll, müssen diese Verfahren den zeitlichen Aspekt einbeziehen und bezüglich der hieraus resultierenden Anforderungen optimiert werden. Obwohl derartige Instrumente seit einigen Jahren auf dem Markt sind, stehen heute zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit erst rudimentäre Ansätze zur Verfügung.

Wie in diesem Beitrag gezeigt wird, ist der Mehraufwand für all diese Untersuchungen beträchtlich. Um die Gesamt-Performance eines Instrumententyps zu beurteilen, ist eine umfassende Untersuchung aller Aspekte erforderlich. Ökonomische Überlegungen zwingen jedoch zu einer Reduzierung. Diese sollte aus den mit der jeweiligen Applikation verknüpften Forderungen erwachsen. Im Gegensatz zur bisherigen Strategie zur Beurteilung der Instrumentenleistungsfähigkeit, die alle Systemkomponenten gleichermaßen einschloß, sind nun sinnvollerweise die Beurteilungs- und damit die Untersuchungskriterien aus den avisierten Anwendungen abzuleiten und für jedes Merkmal Bedingungen festzulegen. Dieser Beitrag soll durch eine Zusammenstellung relevanter Merkmale dem Anwender die richtige Auswahl des Instrumentes erleichtern, wobei hier der Schwerpunkt auf instrumententechnische Gesichtspunkte gelegt wird, denn weitere wichtige Aspekte wie Kompatibilität mit vorhandener Hardware, Bedienbarkeit der Software und Schulungsaufwand für die Mitarbeiter sind für den Anwender problemlos zu beurteilen.

## 2 Charakteristik der Robottachymeter

### 2.1 Anwendungsgebiete und Anforderungen

Bislang sind *tachymetrische Aufnahmen* und *Absteckungsarbeiten* die Hauptanwendungsgebiete für Robottachymeter. Abgesehen von schnellen Grob-Ortungsprozeduren haben sie die geringsten Leistungsanforderungen. In den meisten Fällen ist die Positionsgenauigkeit ausreichend; die *Meßmöglichkeit* zu einem bewegten Ziel ist weniger bedeutend. Allerdings sollte eine *Zielverfolgung* auch bei großen Geschwindigkeiten quer zur Visur möglich sein: Abbildung 1 zeigt in einem Beispiel, in dem ein Reflektor mit Schrittgeschwindigkeit tangential an einem Tachymeter vorbeibewegt wird, daß die resultierende Winkelgeschwindigkeit bei kurzen Distanzen deutlich zunimmt. Die große Distanzvariation (vgl. Abbildung 1 rechts) ist eher für Steuerungsprozesse von Bedeutung, in denen das Ziel nicht nur verfolgt, sondern auch die Position bestimmt werden soll. Die Winkel- und Distanzvariationen verhalten sich proportional zur Objektgeschwindigkeit. Tabelle 3 gibt an, bis zu welcher Geschwindigkeit die Instrumente in Lage sind, den Reflektor zu verfolgen oder anzu-messen. Auf Signalunterbrechungen sollten die Tracking-Algorithmen mit einer durchdachten Extrapolationsstrategie für die Trajektorie reagieren, auf die sich bei Mißerfolg ein Grob-Ortungsprozeß anschließt. Der Benutzer profitiert bei derartigen Aufgaben von einer leichten und einfach handhabbaren Reflektor-Ausrüstung, die sinnvollerweise auch eine Fernsteuerung und Datenerfassungseinheit enthält. Ein Display, der die aktuelle Position und die Sollposition anzeigt, ermöglicht wirtschaftliches Abstecken eines Punktes.

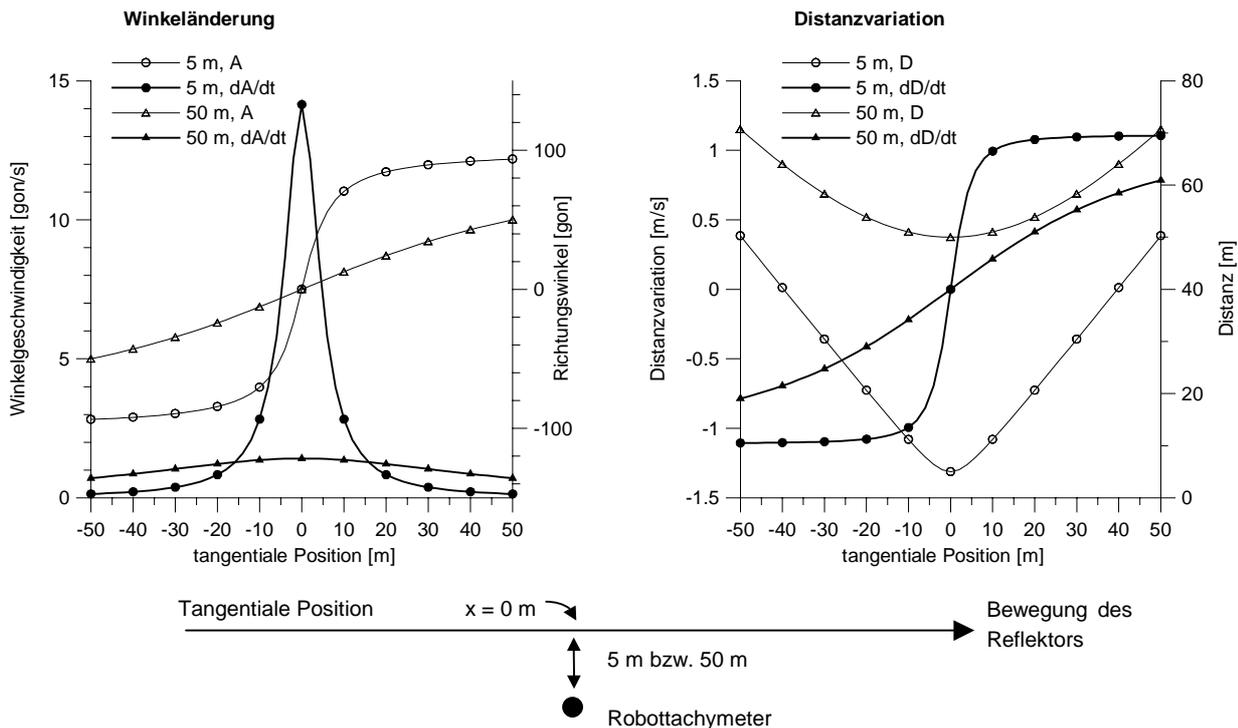


Abbildung 1: Winkel- und Distanzänderung für einen in einer Minimaldistanz von 5 m bzw. 50 m tangential an einem Tachymeter mit einer Geschwindigkeit von 4 km/h vorbei bewegten Reflektor

Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit bietet sich der Einsatz von Robottachymetern bei *Deformationsmessungen* an. Polare Messungen können nun vollautomatisch und kontinuierlich praktisch ohne Mehraufwand erfolgen. Die erforderliche Genauigkeit hängt vom Objekt ab: Hangrutschungen sind zwar deutlich weniger kritisch als Beobachtungen von Ingenieurbauwerken wie beispielsweise Staumauern, Dämme, Brücken, Tunnel, denn bei diesen sind Größenordnungen im Bereich von wenigen Millimetern anzustreben. Mit selbstzielenden Tachymetern sind periodische Überwachungen ökonomischer geworden, da sich durch den teach-in-mode eine weitgehende Automatisierung der Netzbeobachtung erreichen lässt, deren Genauigkeit außerdem vom Beobachter unabhängig ist [z.B. Haag et al., 1997]. Erstmalig sind auch quasi-kontinuierliche Überwachungen möglich geworden. Für beide Fälle qualifiziert sich ein System durch die Möglichkeiten und die Anpassungsfähigkeit der on-board-Software und durch die Datenspeicherkapazität. Bislang bieten die Instrumentenhersteller neben der automatischen Zielverfolgungsfunktion kaum mehr als eine automatisierte Satzwinkelmessung an, weswegen für die kontinuierliche Überwachung eine externe Ansteuerung notwendig sein wird, die neben der Messung auch eine (Vor-)Auswertung der Beobachtungen und gegebenenfalls eine Verknüpfung von mehreren Totalstationen vornimmt und die in Verbindung mit einer Kontrollstation steht, der Daten oder zumindest eine Alarmmeldung übermittelt werden [Flach, Naterop, 1999]. Hier ist die Verfügbarkeit von Instrumententreibern, die zur Kontrollsoftware kompatibel sind, von Bedeutung. Da im Fall der permanenten Überwachung das Instrument am Meßort verbleibt, ist die Robustheit des Instrumentes bezüglich rauher Umwelteinflüsse ein nicht zu unterschätzendes Kriterium. Dies betrifft nicht nur einen generellen Funktionsausfall, sondern auch die Stabilität einzelner Systemkomponenten wie Kompensator oder Ziellinie des Zielerkennungsmoduls gegenüber beispielsweise Temperaturvariationen. Weiterhin ist der Kostenaufwand für die Signalisierung zu berücksichtigen, der sich durch die Verwendung low-cost-Reflektoren minimieren lässt, wenn auch mit diesen die angestrebte Genauigkeit erreicht werden kann. Gerade hier liegt der Vorteil zu satellitengestützten Verfahren, bei denen die Punktausrüstung erheblich kostspieliger ist. Nur bei sehr wenigen Aufgabenstellung im Zusammenhang mit Deformationsbeobachtungen ist die Bewegung des Ziels zu berücksichtigen, da diese in der Regel sehr langsam erfolgt; die zeitkritischste Anwendung sind Bela-

stungsversuche, wobei auch Vibrationen des Objekts auftreten können, die, wenn sie in der Größenordnung der Meßfrequenz liegen, schwebungsartige Beobachtungsfehler generieren.

Anwendungen in der *Navigation*, die im engeren Sinne als die Planung und Überwachung von Fahrzeugbewegung in möglichst optimaler Weise definiert wird, sind eher als Maschinensteuerungsaufgaben bekannt. Sie schließen die erforderlichen Meßvorgänge mit ein, die mehr und mehr von Robottachymetern übernommen werden. Die zu positionierenden Maschinen sind vielfältig: Tunnelbohrmaschinen; Bulldozer, Grader, Deckenfertiger, Asphaltiermaschinen und Bagger im Strassenbau; Gleisverlegemaschinen im Eisenbahnbau. Im weitesten Sinne kann auch eine Roboter-Kalibrierung als Navigationsaufgabe betrachtet werden. Des weiteren eignen sich Robottachymeter auch zur Positionsbestimmung von bewegten Körpern wie zum Beispiel Barken für Brückenbau und Seetiefenvermessung, Flugobjekten [Mönicke, 1998], Bojen (Wasserstands- und Wellengangmeldung) oder Seilbahngondeln. Außerdem können aus der Trajektorie eines bewegten Objektes Zusatzinformationen abgeleitet werden, beispielsweise aus den Bewegungen eines Baufahrzeugs die Form einer Rampe oder Größe einer Deponie. Aus diesen Anwendungen ergeben sich sehr unterschiedliche Erwartungen an die Positionsgenauigkeit, die bezogen auf eine Richtung etwa zwischen 0.5 mgon und 20 mgon angesiedelt sind, beispielsweise für die Steuerung einer Baumaschine 1.5 cm auf 600 m bei 5 mm Nachbarschaftsgenauigkeit. Diese Angaben beziehen sich auf die Positioniergenauigkeit des sich bewegenden Objekts, also während der Bewegung des Reflektors, weswegen die Distanzmessung die kritische Komponente darstellt [Dietz, 1996]. Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß der Geschwindigkeitsbereich, in dem das Instrument noch in der Lage ist, Messungen auszuführen (erlaubte Geschwindigkeit für das *Autotracking*, s.u.), kleiner sein wird als die maximal erlaubte Geschwindigkeit für die *Zielverfolgung* (ohne Messung). Eine diesbezüglich anspruchsvolle Anwendung stellt die Gradersteuerung dar: Für die Höhenüberwachung werden 1-2 cm über 300 m gefordert, die aus instrumenteller Sicht auch während der Vorwärtsfahrt (üblicherweise 5 km/h) erreichbar sein sollten; allerdings treten beim Zurücksetzen des Fahrzeugs deutlich höhere Geschwindigkeiten (20 km/h) und Beschleunigungen auf, so daß der Signalverlust die weitaus kritischere Komponente bildet. Bei Teermaschinen können Refraktionserscheinungen über dem üblicherweise etwa 170°C heißen Asphalt zwar durch hoch montierte Reflektoren (3-4 m über Boden) reduziert werden, allerdings müssen dann höhere Vibrationen des Reflektors in Kauf genommen werden. Ähnlich kritisch sind Roboterkalibrierungen, die im Nahbereich auch bei großen Winkelgeschwindigkeiten Messungen erlauben müssen. Weil hier die höchsten Genauigkeitsanforderungen gestellt werden (etwa 1mm), ist die optimale Ausrichtung des Reflektors von großer Bedeutung. Da im Nahbereich gearbeitet wird und Distanzvariationen in der Größenordnung der halben maximalen Distanz auftreten können, wird es zu starken Änderungen der Reflexgröße und der Intensität des reflektierten Signals kommen, die Auswirkungen auf die Genauigkeit der Zielerfassung haben könnten.

## 2.2 Funktionen der Robottachymeter-Module

Im Hinblick auf die neuartige Technologie sollen an dieser Stelle kurz die die Robottachymetrie charakterisierende Begriffe definiert werden. Mit *Roboter* werden nach Meyers Lexikon selbstbewegliche Automaten bezeichnet, deren äußere Form mehr oder weniger stark der menschlichen Gestalt nachgebildet ist und die gewisse manuelle Funktionen eines Menschen ausführen können. Abgesehen von der Gestalt entspricht ein Robottachymeter dieser Definition, da er mit seiner Motorisierung, der automatischen Zielerkennung, der Zielverfolgung und der Grobortungsfunktion eine große Anzahl von Funktionen übernimmt, die bislang vom Beobachter bei der Benutzung eines herkömmlichen Tachymeters erfüllt wurden. Unter automatischer *Zielerkennung* versteht man die Identifizierung eines Ziels im Arbeitsbereich des Zielerkennungsmoduls, der meist ein Ausschnitt des Fernrohrsichtfelds (FOV, field of view) bildet. Die Zielerkennung schließt die Lokalisierung (Feindetektion) bezüglich der Zielachse mit ein, wobei die technische Realisierung der Richtungsbestimmung nicht festgelegt ist. Diese kann zum Beispiel durch Bildverarbeitung oder Scanprozesse erfolgen [Ingensand, Böckem, 1997]. Um Fehlereinflüsse gering zu halten, wird das Fernrohr meist nachgeführt, bis die Zielachse etwa (mgon-Bereich) in die Richtung des Reflektors weist. Für die beiden Prozesse, Identifizierung und Lokalisierung, wird oft die Abkürzung ATR (Automated Target Recognition) verwendet. Die *Zielverfolgung* gewährleistet nun die Nachführung des Fernrohrs bei einem bewegten Ziel in Form eines

Regelkreises, ausgehend von einem vorhergehenden ATR-Prozeß. Man spricht im englischen von „*Lock-Mode*“ (engl. lock = einrasten), falls nicht gleichzeitig die Zielposition ermittelt wird. Werden zusätzlich die Richtungs- und Distanzsensoren abgegriffen und die Position des Ziels bestimmt, spricht man vom „*Auto-tracking-Mode*“ (engl. track = Spur bestimmen). In der Regel sind die maximal erlaubten Objektgeschwindigkeiten für den Autotracking-Mode deutlich geringer als für den Lock-Mode. Strahlunterbrechungen (lost of lock) werden von einem Extrapolationsalgorithmus aufgefangen, der auf einem Bewegungsmodell basiert und eventuell auch einfache oder hochentwickelte Filter enthält. Wird der Reflektor danach nicht mehr gefunden, kann ein Suchprozeß gestartet werden, wobei die Suche in einem vorher festgelegten Bereich (Scan-Bereich) und nach einem je nach Instrumententyp mehr oder weniger vorgebbaren Ablauf stattfindet. Die *Grobsuche* (coarse location) ist ein Prozeß, bei dem das Ziel im gesamten (vorgebbaren) Objektraum gesucht wird und das Fernrohr derart positioniert wird, daß das zurückkommende Signal im FOV der ATR erfaßt werden kann. Eine Grobsuche ohne Vorinformation wird nicht von allen Instrumententypen unterstützt.

Hinsichtlich des Beobachtungsablaufs werden die Verfahren „*statisch*“ (Ziel in Ruhe), „*Stop and Go*“ (Ziel wird verfolgt, aber im statischen Zustand angemessen) und „*kinematisch*“ (bewegtes Ziel wird angemessen) ermöglicht und entsprechend in diesem Beitrag unterschieden. Der letzte Fall ist der technisch anspruchsvollste, weil alle Sensoren synchronisiert und gleichzeitig ausgelesen werden müssen, um den sehr kurzen Ansprech- und Meßzeiten vieler Aufgaben zu genügen (vgl. Kap 3.3.1). Details zu den technischen Realisierungen sind den folgenden Publikationen zu entnehmen: [Feist et al., 1998], [Zeiske, 1999], [Bayer, 1997], [Ingensand, Böckem; 1997], [Staiger, 1998a], weswegen an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen wird.

### 3 Evaluation der Leistungsfähigkeit

#### 3.1 Evaluationsstrategien

Die Leistungsfähigkeit eines Instruments kann zunächst aufgrund der Herstellerangaben abgeschätzt werden. Gerade im Hinblick auf die einen Robottachymeter kennzeichnenden Merkmale sind die Herstellerangaben oftmals unvollständig oder nicht unmittelbar vergleichbar. Die mangelhafte Angabe der Spezifikationen erklärt sich zum Teil durch den Anspruch, die Auflistung technischer Daten übersichtlich zu gestalten und nicht zu überladen. Die weiter unten aufgeführten Zusammenstellungen (vgl. Tabellen in den Kap. 3.2.1 und Kap 3.3.2) entstammen verschiedenen Quellen, wie Prospekten, Internet, Bedienungsanleitungen und in seltenen Fällen Rücksprachen mit den Herstellern, und sind, soweit der Vergleichbarkeit dienlich, in einheitliche Dimensionen umgerechnet worden. Trotzdem bleibt die Auswahl eines geeigneten Instruments insbesondere für Nicht-Standard-Anwendungen schwierig, weil sie nach sorgfältiger Evaluation der tatsächlichen Leistungsmerkmale erfolgen sollte. Dazu sind zusätzliche Maßnahmen notwendig, die von der einfachen Prüfung bis zur detaillierten Untersuchung eines speziellen Aspekts reichen können.

Durch *Prüfverfahren* gemäß der Definition, wie sie im Arbeitskreis 5 der DVW ausgearbeitet wurde (veröffentlicht in [Staiger, 1998b]) werden nur die Herstellerangaben hinsichtlich verschiedener Aspekte überprüft: zum Beispiel, ob ein neu erworbenes Instrument die Spezifikationen erfüllt oder ob es sie nach dem Einsatz unter rauen Umgebungsbedingungen immer noch einhält. Prüfverfahren im Sinne dieser Festlegung sind also nicht geeignet, zusätzliche Merkmale zu untersuchen, die ein klareres Bild über die Leistungsfähigkeit geben würden.

Bekanntlich liefern *Kalibrierungen* neben einem Überblick über die Leistungsfähigkeit des Instruments oft auch Modellfunktionen, mit denen Abweichungen und Fehler beschrieben werden können, was letztlich zu einer Steigerung der äußeren Genauigkeit führen kann. Denkt man an herkömmliche Tachymeter, erwartet der Anwender, daß fast alle Instrumentenfehler durch die Kalibrierung reduziert werden können (soweit sie nicht schon durch instrumenteninterne Korrekturfunktionen abgefangen werden, die in einer werksinternen

Kalibrierung bestimmt wurden). Dies setzt prinzipiell die Kenntnis über die Systematik des Fehlverhaltens und, nicht notwendiger- aber zweckmäßigerweise, seiner Ursache voraus. Diese Bedingung ist jedoch hinsichtlich der Funktionen eines Robottachymeters nicht bezüglich der Tracking-Funktionen erfüllt. Analoges gilt auch für die Reduktion spezifischer Instrumentenfehler durch spezielle Meßverfahren. Auch die Eliminierung von klassischen Instrumentenfehlern durch das Meßverfahren ist bei Robottachymetern nur selten sinnvoll, weil sie dem Vorteil der Beschleunigung des Meßprozesses entgegen stehen. In einigen Fällen sind sie sogar nicht mehr möglich, zum Beispiel wird bei Geodimeter die 2-Lagen-Messung im ATR-Mode nicht mehr unterstützt.

Andererseits ist die *Untersuchung aller* möglicher Fehlerquellen für den Anwender unökonomisch, weil nicht alle Merkmale seine spezielle Meßaufgabe beeinflussen. Deswegen sollte er seine Erwartungen in einem Anforderungskatalog festlegen, aus dem die Prüfkriterien abgeleitet werden. Zusätzliche Erfahrungen und Untersuchungen ermöglichen dann die Entwicklung von Prüf- oder Kalibrierverfahren. Schließlich können so allgemeine Prüf- und Kalibriervorschriften erstellt werden, die außerdem zu einer Zertifizierung führen können.

In jedem Fall müssen die Beobachtungsmodi eines Robottachymeters (statisch und kinematisch) separat behandelt werden. Auch bei der Benutzung als klassisches Tachymeter (visuelle Zielung) ist durch die Motorisierung eine angepasste Fehleruntersuchung (bzw. -betrachtung) notwendig. Die folgenden Abschnitte zeigen, in welcher Hinsicht die Leistungsfähigkeit eines Robottachymeters charakterisiert werden kann, wobei jeweils die Spezifikationen, das Verhalten während des Meßablaufs und die Genauigkeit betrachtet und etwaige Hinweise auf die Kalibrierbarkeit gegeben werden.

## 3.2 Verhalten im statischen Mode

### 3.2.1 Qualifizierung aufgrund von Herstellerangaben

Grundsätzlich wird das Verhalten eines Instruments sowohl durch die Hard- als auch durch die Software bestimmt. Hardware-Merkmale sind der mögliche Meßbereich, der Scan-Bereich, die Genauigkeit und die Module für Datenspeicherung und -transfer. Der Meßbereich gibt die minimale und die maximale Distanz an, in der die ATR arbeiten kann und schließt das ATR-FOV als den Winkelsektor ein, in dem ein Ziel ohne Fernrohrbewegung detektiert werden kann. Der Scan-Bereich markiert den Bereich, in dem ein Ziel mit zusätzlicher Bewegung des Fernrohrs gesucht wird, falls es nicht im ATR-FOV liegt. Diese Spezifikation ist nur für solche Anwendungen bedeutend, bei denen die Azimute nicht vorab näherungsweise bekannt sind oder nicht in einem vorher gehenden teach-in-Prozeß näherungsweise festgelegt wurden und wenn sich die Punkte aus dem ATR-FOV hinaus bewegen. In Abhängigkeit vom Hersteller lassen sich für den Scanbereich auf verschiedene Weise Vorgaben treffen, z.B. Setzen durch Tastatureingabe, Anpeilen mit dem Fernrohr... Zusätzliche Festlegungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel die Wahl der Art des Scan-prozesses bei Topcon, können bei einigen Aufgaben vorteilhaft sein. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Merkmale der Zielerfassungsbereiche.

	<b>Geodimeter ATS-PT</b>	<b>Leica TCA 1800</b>	<b>TOPCON AP-L1A</b>	<b>Zeiss Elta S 10</b>
Aktiver Bereich	Divergenz Tracker, Passiv-Mode: 3.3 mrad = 0.2 gon Aktiv-Mode: 50 mrad = 3.1 gon	ATR FOV: 0.5° (statisch) 1°33' (bewegt)	Akusto-optisches Modul, immer scannend	0.5°, ca. Sonnenkreis [Feist et al., 1998]
Scanbereich	30° oder setzbar (Bedienungsanleitung)	setzbar, 18° bei Fernsteuerung	setzbar	Beginnt außerhalb des Sonnenkreises [Feist et al., 1998]
Typ	Für Initialisierung: Mäanderförmig auf- oder abwärts nach loss of lock: Spiralen (Bedienungsanleitung)	spiralförmig	Wahlweise Linien oder Mäander	Ringpolygon [Feist et al., 1998]

Tabelle 1: Merkmale der Zielerfassung (ATR und Scan-Bereiche) beispielhaft für einige Instrumente

Bislang sind die durch den Hersteller gemachten Angaben bezüglich der erreichbaren Genauigkeit dürftig, weil sie u.a. die Randbedingungen (Zustand des Ausbreitungsmediums, Bewegungsrichtung usw.) unvollständig beschreiben. Es bleibt unklar, in welcher Art und Weise auf andere Entfernungsbereiche extrapoliert werden kann. Weiterhin wird – systembedingt – der wählbare Meßmodus die Genauigkeit entscheidend beeinflussen. Beim Vergleich der Werte muß unbedingt beachtet werden, ob es sich um eine absolute Genauigkeitsangabe handelt, um die Auflösung oder um die Reproduzierbarkeit. Gerade hier liefern Prüf- und Kalibrierprozesse eine größere Sicherheit.

	<b>Geodimeter ATS-PT</b>	<b>Leica TCA 1800 und TCA 1101 Professional</b>	<b>TOPCON AP-L1A</b>	<b>Zeiss Elta S 10 nach [Feist et al. 1998]</b>
Genauigkeit	Statisch: 0.3 mgon 5 Hz : 0.6 mgon Zieleinstellung: Statisch: 1mm + 7 ppm 5 Hz: 2 mm +14 ppm Reproduzierbarkeit bei 2000 m H: 18 mm V: 18 mm D: 7 mm <b>Kinematisch (4m/s)</b> H: 40 mm V: 35 mm D: 20 mm	Für TCA 1800: Standard: 100 m: 2mm (1.3 mgon) 500 m: 2-3 mm (0.4 mgon) 1000 m: 10 mm (0.13 mgon) Für TCA 1101: 3 mm + 3 ppm (Standard) 5 mm + 3 ppm (Quick and Tracking) 10 mm + 3 ppm (Rapid Tracking)	Statisch: 3 mm/ 200 m = 1 mgon bzw. 1.5 mgon (in anderer Broschüre) kinematisch (9 gon/s): 37 mgon 12 mgon (bei 11gon/s, in anderer Broschüre)	Statisch: 0.16 mgon Labor 0.3.. 0.5 mgon Feldbedingungen, Distanz: 1000...100 m
Bemerkungen	Keine Angabe über Bewegungsrichtung im kinematischen Mode	statisch	Keine Angabe über Bewegungsrichtung, unterschiedliche Angaben in den Herstellerinformationen	Herstellerinterne Untersuchung, nicht als technische Daten veröffentlicht

Tabelle 2: Genauigkeitsangaben nach Herstellerinformationen (Zeile 2) und eigene Anmerkungen (Zeile 3)

Das Design des Datentransfer-Moduls bestimmt die Palette der Anwendungsmöglichkeiten: Falls eine Telemetrie-Verbindung aufgebaut werden kann, kann das Instrument vom Zielpunkt her bedient werden. Dies ist entscheidend für alle Steuer- und Navigationsprozesse, bei denen sich die Maschine bzw. der Operateur gemeinsam mit dem Reflektor bewegen und auch, wenn der Meßprozeß an sich statisch ist, wie zum Beispiel bei der Geländeaufnahme oder beim Abstecken. Falls die Daten im Instrument gespeichert werden sollen, muß bezüglich des Typs und der Kapazität des Speichermediums berücksichtigt werden, daß mit Robottachymetern die Tagesleistung wächst und gerade bei Tracking-Anwendungen erheblich größere Da-

tenmengen anfallen als beim bisher praktizierten Vorgehen. Im Hinblick auf die Austauschbarkeit von Systemkomponenten tritt die Forderung nach einem herstellerunabhängigen Datenformat und einer identischen Schnittstelle in den Vordergrund.

Die Software sollte durch eine möglichst praxisnah aufgebaute Menüstruktur ein einfaches Bedienen der Auto-tracking-Steuermodule gewährleisten. Es ist zu prüfen, ob die Software dem geplanten Vorgehen genügt. Falls Modifikationen erforderlich sind, ist es vorteilhaft, wenn der Benutzer auf einfache Weise selbst Programm-Module (z.B. in einer mitgelieferten Entwicklungsumgebung auf dem PC) programmieren und dann auf das Tachymeter laden kann. Eine externe Steuerung des Meßablaufs ist immer dann sinnvoll, wenn zusätzliche Sensoren im Meßprozess involviert sind. Falls eine derartige Anwendung angestrebt wird, sollten entsprechende Treiber-Routinen für den ATR-Prozeß, für die Meßwerterfassung, für den Datentransfer und eventuell für die Grobortung verfügbar sein, vorzugsweise als Bibliothek von Unterprogrammen. Für übliche Vermessungsarbeiten hingegen ist ein vollkompatibles Interface zu handelsüblichen mobilen Feldrechnersystemen vorteilhaft. Bei komplexen Anwendungen kann es nützlich sein, wenn Instrumente und Datenerfassungsprogramme verschiedener Hersteller kompatibel sind.

### 3.2.2 Verhalten während der Messung

In diesem Abschnitt wird das Verhalten des Instruments während des Betriebs betrachtet. Selbst im statischen Mode sind Zeitaspekte von Bedeutung, denn mit der Reduktion der Positionierzeit steigt die Effizienz. Die Wirtschaftlichkeit üblicher Feldarbeit wie Abstecken und Aufnahme wird noch mehr durch die Leistungsfähigkeit der Grobpositionier-Algorithmen bestimmt. Hier ist auch die notwendige Ausrichtegenauigkeit des Reflektors und die Handhabbarkeit des Reflektorstocks in bezug auf lotrechtes Halten bei gleichzeitigem Prozess-Controlling an der Datenerfassungseinheit zu berücksichtigen. Für fast alle Stop-and-Go- und kinematischen Anwendungen ist die maximal erlaubte Reflektorgeschwindigkeit und -beschleunigung im Lock-Modus zu berücksichtigen. Hierbei sind insbesondere große laterale oder vertikale Bewegungen entscheidend, da diese mit großen Winkelgeschwindigkeiten einher gehen. Deswegen werden die maximal erlaubten Bewegungsgeschwindigkeiten oftmals als Winkelgeschwindigkeiten spezifiziert. Beschleunigte Rotationen um die Stehachse können den Kompensator beeinflussen, insbesondere, wenn er mit einem Flüssigkeitshorizont arbeitet, der nicht in der Stehachse positioniert ist und nicht integrierend über die gesamte Oberfläche abgegriffen wird: Da erst dann mit einer fehlerfreien Beobachtung gerechnet werden kann, sobald der Kompensator eingespielt ist, ist nach beschleunigten Rotationen mit einer Verzögerung des Meßablaufs oder gar mit Fehlmessungen zu rechnen. Vibrationen, die zum Beispiel von der Maschine übertragen werden, auf der das Tachymeter stationiert ist, können ähnliche Effekte hervorrufen. Bis jetzt ist nichts über implementierte Filteralgorithmen zur Verminderung derartiger Fehlereinflüsse publiziert. Leica bietet als Abhilfe die Wahl verschiedener Kompensator-Modi an: falls kompensatorbedingte Fehlmessungen im Laufe eines Meßvorgangs zu erwarten sind, kann der Benutzer die *vorab* ermittelte Stehachsschiefe als Korrekturwert wählen; in der TPS1000 professional-Serie ist der Kompensator in Stehachsnähe angeordnet. Weiterhin kann der Anwender durch eine hinsichtlich der Minimierung der Alhidadenrotation optimierten Punktauswahl den Kompensatoreinspielfehler reduzieren. Durch die unumgängliche Motorisierung können weitere systematische Abweichungen entstehen, da Rutschkupplungen die Grobtriebsklemmen ersetzen, Rotationen etwas schwergängiger werden und nicht vernachlässigbare Drehmomente auf den Unterbau, das Stativ oder gar den Pfeiler verursachen, die zu systematischen Richtungsänderungen führen. Im Prüflabor der geodätischen Messtechnik am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich (*geomETH*) sind detaillierte Analysen derartiger Effekte geplant.

Die Reaktion eines Instrumentes auf eine Signalunterbrechung charakterisiert die Leistungsfähigkeit eines Robottachymeters sowohl im stop-and-go-Mode als auch im kinematischen Mode. Zufriedenstellend arbeitende Instrumente benutzen zumindest eine einfache Extrapolationsstrategie, die die letzte Reflektorbewegung berücksichtigt. Im einfachsten Fall ist dies ein lineares Modell, ausgeklügeltere könnten sogar Fuzzy-Algorithmen enthalten. Die vorherberechnete Reflektorposition bestimmt, wo der neue Suchprozeß startet, wobei natürlich das Verfahren versagt, falls sich der Reflektor nicht in der Nähe der vorhergesagten Position

befindet. Eine ausgereifte Lösung offeriert für diesen Fall verschiedene Möglichkeiten, den Meßablauf fortzusetzen. Außerdem können Fremdstrahlung und Reflektionen den ATR-Prozeß ebenfalls negativ beeinflussen: die meisten Störungen können zwar durch die Verwendung modulierter Strahlung für die ATR und durch instrumenteninterne Analyse eliminiert werden, aber ein zweiter Reflektor im FOV der ATR kann automatisch nur dann in korrekter Weise behandelt werden, wenn er einen Code liefert (z.B. benutzt das Zeiss Elta S Space für die Codierung die Telemetrie-Verbindung). Wenn bei schlechten Sichtbedingungen ein Mehrfachreflektor benutzt werden muß, entsteht eine zusätzliche Fehlerquelle durch eine nicht intensitätsbalanzierte Prismenanordnung.

### 3.2.3 Präzision und Genauigkeit

Zusätzlich zu allen üblicherweise bei Totalstationen auftretenden Instrumentenfehlern bestimmen weitere Effekte die Genauigkeit von Robottachymetern. Zunächst ersetzt die Auflösung der ATR den üblicherweise vorhandenen Zielfehler, der vom Beobachter und von den Sichtverhältnissen abhängt. Obwohl die Auflösung der ATR eher als zeitlich konstant anzusehen ist, kann sie vom Signal/Rauschverhältnis abhängig sein – womit sie also distanzabhängig werden kann. Da die ATR-Einheit in der Regel nicht über ein panfokales Fernrohr verfügt und das reflektierte Signal nicht fokussiert wird, bildet sich das Prisma bzw. der reflektierte Strahlkegel in unterschiedlicher – distanzabhängiger – Größe ab, was ebenfalls die Auflösung beeinflussen kann. Neben der natürlichen Hintergrundstrahlung, die den Kontrast bestimmt, zusätzlichen Reflexen, die möglicherweise die Schwellwertfestlegung beeinflussen, treten Szintillationseffekte auf, da das Ausbreitungsmedium als turbulent angesehen werden muß. Letztere werden vom menschlichen Beobachter durch die Trägheit seiner Sinne und mit gewissen Erfahrungswerten ausgemittelt, die von dem Mittelungsprozeß der ATR abweichen werden. Neben diesen äußeren stochastischen Einflüssen treten innere auf, die auf die (opto-)elektronischen Komponenten der ATR zurückzuführen sind. Möglicherweise können einige Effekte zusammengefaßt und deterministisch als ATR-Ziellinie beschrieben werden. Diese sind dann leicht bestimmbar und in Form einer Kalibrierfunktion anwendbar. Weiterhin wird die ATR-Ziellinie um einen festen Betrag von der Zielachse abweichen, der mit einer gewissen Genauigkeit im Rahmen eines instrumenteninternen Kalibrierprozesses ermittelt werden kann. Die genaue Bestimmung des Offsets ist von Bedeutung, wenn manuelle und automatische Anzielungen in einem gemeinsamen Richtungssatz durchgeführt werden. Falls die Zielachse des ATR-Modul nicht koaxial zur optischen Zielachse ist (Geodimeter), entsteht ein Offset, mit dem die Richtungsangabe für beide Fernrohrlagen korrigiert werden muß.

Im Hinblick auf die erreichbare Genauigkeit ist ein Robottachymeter als Gesamtsystem zu sehen, das auch die Zielseite einschließt. Bei üblichen Prismen bildet ihre Ausrichtung eine bekannte Fehlerquelle: beispielsweise verursacht die Verschwenkung um  $20^\circ$  einen Distanz- und einen Richtungsfehler von bis zu 5 mm (Wild GDR 11) – wobei die Werte von der Lagerung des Glaskörpers relativ zur Stehachse des Reflektors abhängig sind. Um die manuelle Handhabung des Reflektorstabes am Zielpunkt zu erleichtern und um eine universelle Baumaschinensteuerung zu ermöglichen, wurden  $360^\circ$ -Prismen entwickelt, die nicht mehr ausgerichtet werden müssen. Untersuchungen am geomETH zeigten allerdings Abweichungen bis zu einigen Millimetern in Abhängigkeit von der Prismenorientierung und der Steilheit der Visur [Favre, Flach, 1999]. Hierzu könnte zwar eine Kalibrierfunktion angegeben werden, ihre Anwendung ist nur sinnvoll, wenn auch die Orientierung des Prismas bekannt ist (was eventuell bei fest installierten Prismen bei der Deformationsmessung gegeben wäre).

## 3.3 Verhalten im kinematischen Mode

### 3.3.1 Die Unschärfebeziehung

Zusätzlich zu allen oben erwähnten Abweichungen und Genauigkeitseinbußen beeinflussen weitere Effekte die Leistungsfähigkeit im kinematischen Mode. Sie sind weit mehr auf die zeitliche Dimension bezogen, weil in diesem Fall die Datenerfassung während der Bewegung des Ziels stattfindet. Dies bedeutet, daß die drei Koordinaten, die einen Punkt definieren sollen, seien sie polar (wie meßtechnisch erhoben) oder kartesisch, an einem exakt identischen Zeitpunkt erhoben werden müssen. Soll beispielsweise ein Objekt, das sich mit

einer Geschwindigkeit von 1 m/s bewegt, mit einer Auflösung von 1 mm getrackt werden, muß der gesamte Meß- und Datenübertragungsprozeß innerhalb von 1 ms abgeschlossen sein; oder andersherum ausgedrückt: wird ein Zeitbereich von 1 ms für die gesamte Messung zugelassen, ist das Koordinatentripel bereits um bis zu 1 mm fehlerbehaftet. Dieser Wert ist direkt proportional zur Geschwindigkeit des Objekts (vgl. Abbildung 2). Dieser Zusammenhang kann als Unschärfebeziehung formuliert werden: Bei einer vorgegebenen Datenerfassungszeit oder -rate kann ein bewegtes Objekt nicht besser als ein definierter Wert lokalisiert werden; und umgekehrt: wenn die Position oder die Trajektorie eines bewegten Objekts mit einer bestimmten Genauigkeit bestimmt werden muß, muß die Datenerfassung innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne erfolgen. Hinsichtlich des resultierenden Fehlertyps ist die Art des Bewegungsvorganges und der zeitliche Ablauf der Datenerfassung maßgebend: sind beide systematisch, ist auch die Abweichung systematisch und modellierbar, ansonsten ist sie als stochastisch mit einer mehr oder weniger hohen Korrelation zu Bewegungs- und Meßablauf aufzufassen.

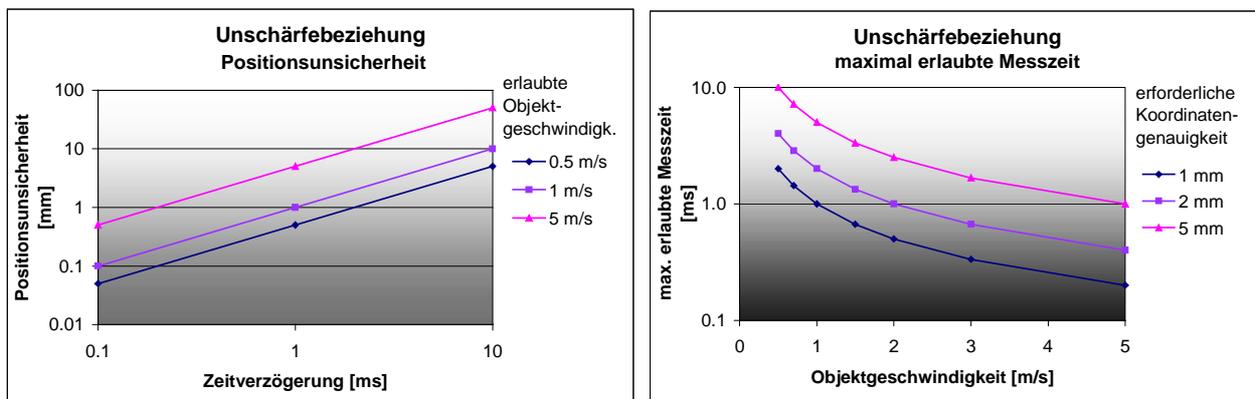


Abbildung 2: Unschärfebeziehung

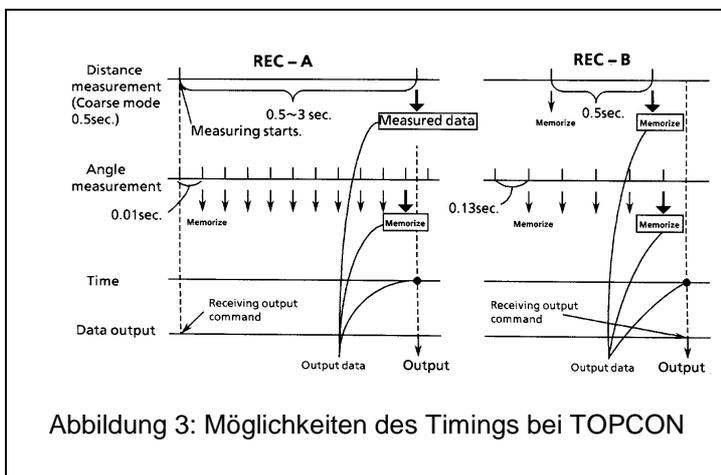


Abbildung 3: Möglichkeiten des Timings bei TOPCON

Das Beispiel veranschaulicht die hohen Anforderungen an die Datenerfassung, wobei sowohl die Sensorik – in Form der Richtungsabgriffe, der ATR, der Distanzmessung und der Kompensatorauslesung – als auch die Datenübertragung eingeschlossen sind. Diese Prozesse erstrecken sich über unterschiedlich lange Zeiträume: der Richtungsabgriff ist der schnellste Prozeß; eine vollständige Distanzmessung dauert länger als die Bestimmung einer kleinen Distanzänderung; Distanzmessung, ATR und Stehachsschiefenbestimmung sind zusätzlich noch von äußeren Einflüssen überlagert, die eine zeitliche Verzögerung zur

Folge haben können. In jedem Fall ist eine möglichst weitgehende Parallelisierung der Einzelprozesse anzustreben. Zusammenfassend: die Bestimmung eines Koordinatentripels hängt von dem langsamsten Einzelprozeß ab und fordert wohlgedachte Algorithmen. Einen einfach zu realisierenden Ansatz in Form des zeitpunktsymmetrischen Erfassens der Koordinatentripel (z.B. r, z, d, d, z, r) schlägt Mönicke [1998] vor, jedoch ist zu prüfen, ob der Anwender die zeitliche Abfolge der Messung der Einzelkomponenten tatsächlich beeinflussen kann. Abbildung 3 zeigt die bei TOPCON-Instrumenten gegebenen Möglichkeiten.

### 3.3.2 Qualifizierung aufgrund von Herstellerangaben

Die Leistungsfähigkeit eines Robottachymeters im kinematischen Mode ist hauptsächlich durch die maximal erlaubte Objektgeschwindigkeit und –beschleunigung, bei der noch eine Messung möglich ist, beschreibbar. Dabei sagt die Meßmöglichkeit noch nichts über die bei Maximalgeschwindigkeit erreichbare Genauigkeit aus. Darüber hinaus können sehr weitgehende Extrapolationsalgorithmen zur Überbrückung einer eventuellen Strahlunterbrechung den Meßprozeß verlangsamen. Im Hinblick auf Anwendungen (z.B. Navigation), die gegebenenfalls erst bei einer nachfolgenden Datenverarbeitung den Zusammenhang zu weiteren Sensordaten herstellen, ist die exakte Beobachtungszeit von Interesse. Diese zusätzliche Information wird im Moment noch von keinem Hersteller geliefert. Weil die Unschärfebeziehung natürlich auch auf die einzelnen Koordinatenkomponenten anwendbar ist, könnte, falls jede ursprüngliche Beobachtung der einzelnen Robottachymetermodule mit einer Zeitmarke versehen wäre, eine Genauigkeitssteigerung beim post-processing erreicht werden. Die Forderung nach einem verzögerungsfreien Datentransfer kann am besten durch eine Interruptsteuerung entsprochen werden, jedoch wird sie nicht vollständig durch alle Programmierhochsprachen unterstützt.

	Geodimeter ATS-PT	Leica TCA 1800 und TCA 1101 Professional	TOPCON AP-L1A	Zeiss Elta S 10
<b>Mode:</b> Locking: <b>L</b> Tracking: <b>T</b> <b>Ergebnis:</b> Winkel: <b>A</b> 3D-Position: <b>F</b>	30 gon/s radial 4 m/s axial	TPS1000 system: - <b>L:</b> 3.1 gon/s (ohne Tracking) - <b>T:</b> 0.63 gon/s (mit ATR), wahrscheinlich <b>F</b> Professional series - <b>L:</b> 50 gon/s (ohne Messung) - <b>T:</b> 4 m/s (mit ATR), wahrscheinlich <b>F</b>	<b>T, A:</b> 63 km/h in 100 m = 17.6m/s in 100 m = 11 gon/s	<b>L:</b> 5 m/s in 100 m 10m/s bei Ziel in 100 m = 6.4 gon/s [Feist et a., 1998]
<b>Bemerkung</b>	Unklar, ob Locking oder Tracking	Distanzangabe fehlt beim Tracking des TCA 1101	Keine Angabe über Locking, für Tracking nur Winkelmessung!	Keine Angabe über Tracking

Tabelle 3: Herstellerangaben zu maximalen Lock- und Meßgeschwindigkeiten

### 3.3.3 Genauigkeitsaspekte

Wie bereits oben erwähnt, wird die Genauigkeit durch die nicht absolut gleichzeitig erfolgende Datenerfassung reduziert. Weiterhin wird die Genauigkeit dann reduziert, wenn zugunsten einer hohen Meßgeschwindigkeit die Anzahl der instrumenteninternen Wiederholungsmessungen vermindert wird. Die Unschärfebeziehung greift abermals: Weil nur bei einer hohen Meßfrequenz eine ausreichend dichte Punktbestimmung eines schnell bewegten Objektes erfolgen kann, müssen Zugeständnisse an die Positionsgenauigkeit gemacht werden. Im Hinblick auf die Maximierung der Meßfrequenz kann es weiterhin zu einer Reduzierung von internen Referenzmessungen kommen, die zu fast schon systematisch zu nennenden Abweichungen führen. Derartige Effekte bis zu 5 mm wurden bei der Distanzmessung zu einem festen Ziel festgestellt, wenn die Messung im kinematischen Mode unmittelbar nach Einschalten des Instrumentes erfolgte (vgl. Abbildung 4). Detaillierte Untersuchungen legen nahe, daß der Hersteller den Distanzmeßprozeß auch hinsichtlich der Datenerfassungsgeschwindigkeit zu optimieren versuchte, denn die Messungen der inneren Referenzstrecke (feststellbar durch das signifikante „Klack“-Geräusch) fanden in ungleichmäßigen zeitlichen Abständen statt, aber derart, daß die Abweichungen scheinbar einen festgelegten Schwellwert nicht übertrafen. Neben der Drift der herkömmlichen Meßelemente ist auch eine Drift der ATR denkbar. Mehr noch als im stop-and-go-Mode kann das Kompensatorverhalten bei beschleunigten Rotationen einen Einfluß auf die erreichbare Genauigkeit ausüben. Derartige Abweichungen könnten durch Kalibrierfunktionen reduziert werden, wenn sie zusätzliche Parameter wie Zeit oder abgeleitete Größen wie Rotationsbeschleunigung berücksichtigen.

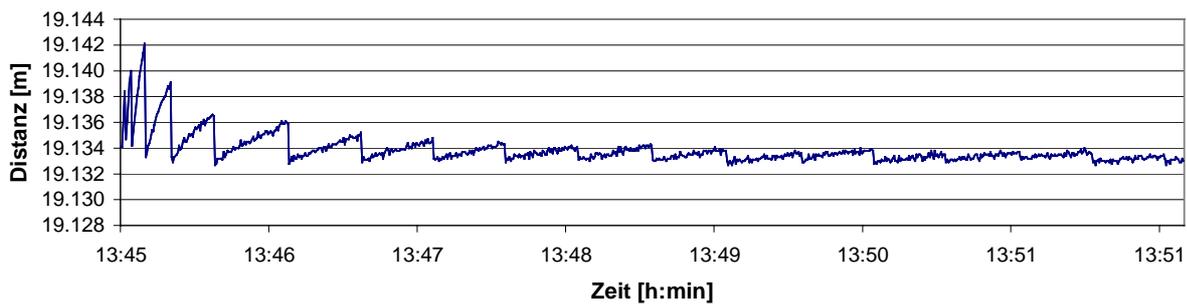


Abbildung 4: Distanzvariation bei unbewegtem Reflektor

## 4 Abschließende Bemerkungen

Mit den Zusatzmodulen zur automatischen Zielerkennung, Zielerfassung und Zielverfolgung sind bei Robottachymetern eine Vielzahl von Anwendungen möglich geworden, die vielseitige und teilweise widersprüchliche Forderungen an die Leistungsfähigkeit des Instruments stellen. Der Instrumentenhersteller versucht zwar, diesen möglichst weitgehend nachzukommen, muß aber teilweise Kompromisse eingehen, die nicht zuletzt durch die Unschärfebeziehung bedingt sind. Gleichzeitig treten Verhaltensweisen und Abweichungen von den Spezifikationen auf, über deren Art, Auswirkung, Ursache und Größenordnung bisher noch wenig bekannt ist. Dieser Beitrag will nun einen Überblick über mögliche Fehlerkomponenten geben, die für Robottachymeter spezifisch sind, ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Des weiteren können erst detaillierte Untersuchungen zeigen, inwieweit die dargestellten Effekte vernachlässigbar sind. In erster Linie soll der Anwender durch diese Überlegungen hinsichtlich der Ressourcen eines Instrumentes sensibilisiert werden.

Obwohl auf den ersten Blick die Genauigkeit von Robottachymetern für übliche Feldvermessungsaufgaben ausreichend erscheint, ist es empfehlenswert, zumindest die Herstellerangaben auch für diesen Einsatz aus Gründen der Qualitätssicherung und der Zertifizierung zu verifizieren. Hierfür sind einfache Prüfverfahren ausreichend. Jedoch stehen mit den Robottachymetern Instrumente zur Verfügung, die für weitaus anspruchsvollere Vermessungsaufgaben wie automatisierte Deformationsüberwachung oder die Steuerung von Baumaschinen geeignet sind. Hier sind Prüf- und Kalibrierverfahren notwendig, die die zeitliche Dimension berücksichtigen. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit sollte der Prüfkatalog allerdings nur die für die Meßaufgabe notwendigen Kriterien und Anforderungen enthalten, deren Bestimmung neuartige Untersuchungsmethoden erfordern. Weil aufgrund der Unschärfebeziehung die Synchronisation zwischen Prüfling und Referenz in Strenge gewährleistet sein muß, stellt die Entwicklung derartiger Methoden eine sehr anspruchsvolle und herausfordernde Aufgabe im geodätischen Kalibrierwesen dar, weil eine weitere Dimension, nämlich die Zeit, hinzugekommen ist.

## 5 Literatur

BAYER, G. [1997]: Dynamic Aspects Of The TCA 1800 Automatic Total Station. O3D-Measurement Techniques IV 1997, Wichmann, Karlsruhe, S.319-326.

- DIETZ, E.-N. [1996]: Baumaschinenführung mit zielverfolgendem Theodolit. Beitrag zu: 39. DVW Seminar "Hybride Vermessungssysteme" 19. - 20. 6.1995 UniBW München, Schriftenreihe des DVW, Band 22, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1996, S. 54-97.
- FAVRE, C.; FLACH, PH. [1999]: Stations totales motorisées: Etat de la technique et perspectives d'avenir. VPK 3/99, S. 96-100.
- FEIST, W.; DONATH, B.; GÖRING, H.; KÖHLER, M.; SEEBER, M.; MONZ, L. [1998]: Elta S 10 und Elta S 20 von Carl Zeiss, Systemtachymeter einer neuen Generation. VR 60/2+3, S. 104-127.
- FLACH, PH.; NATEROP, D. [1999]: Neue Analysetechniken für Deformationsmessungen in permanenten Robotertachymeter-Netzen. In Druck für AVN 8-9 / 1999.
- HAAG, R.; BAYER, G.; ZIMMERMANN, M.; SCHERRER, R. [1997]: Vermessen mit der automatischen Feinzielung des TCA 1800 von Leica. In: Mensuration, Photogrammetrie, Génie rural 7/97, S.466-471.
- 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.
- MÖNICKE, H.-J. [1998]: First Results with a Target Tracking Tacheometer in Kinematic Applications. in: Kahmen, Brückl, Wunderlich, Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Eisenstadt, April, 20.-22.1998.
- STAIGER, R. [1998a]: Verfahren der automatisierten Zielpunkterfassung und -verfolgung. Beitrag zu: 44. DVW Seminar "Hybride Vermessungssysteme" 19. - 20. 6.1997 UniBW München, Schriftenreihe des DVW, Band 29, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1998, S. 109-124.
- STAIGER, R. [1998b]: Zur Überprüfung moderner Vermessungsinstrumente. AVN 11-12/1998, S. 365-372.
- ZEISKE, K. [1999]: TPS 1000 Professional Series - Eine neue Tachymetergeneration von Leica. VR, S.82-90.

Anschrift der Verfasserin:

Dr. M. Hennes  
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie  
ETH Zürich  
8093 Zürich  
Tel xx41-1-633 3041  
Fax xx41-1-633 1101  
hennes@geod.ethz.ch