

# Zur Entwicklung von Untersuchungsverfahren zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Robot-Tachymetern

von Maria Hennes und Bernd Krickel

## *Summary*

*For several reasons the performance of tracking tacheometers is not known well enough to evaluate their possible applications. Therefore, test procedures have to be developed. This paper discusses two approaches: component test and system test. Furthermore, a test-catalogue is derived. Finally, considerations concerning an efficient test-equipment are presented.*

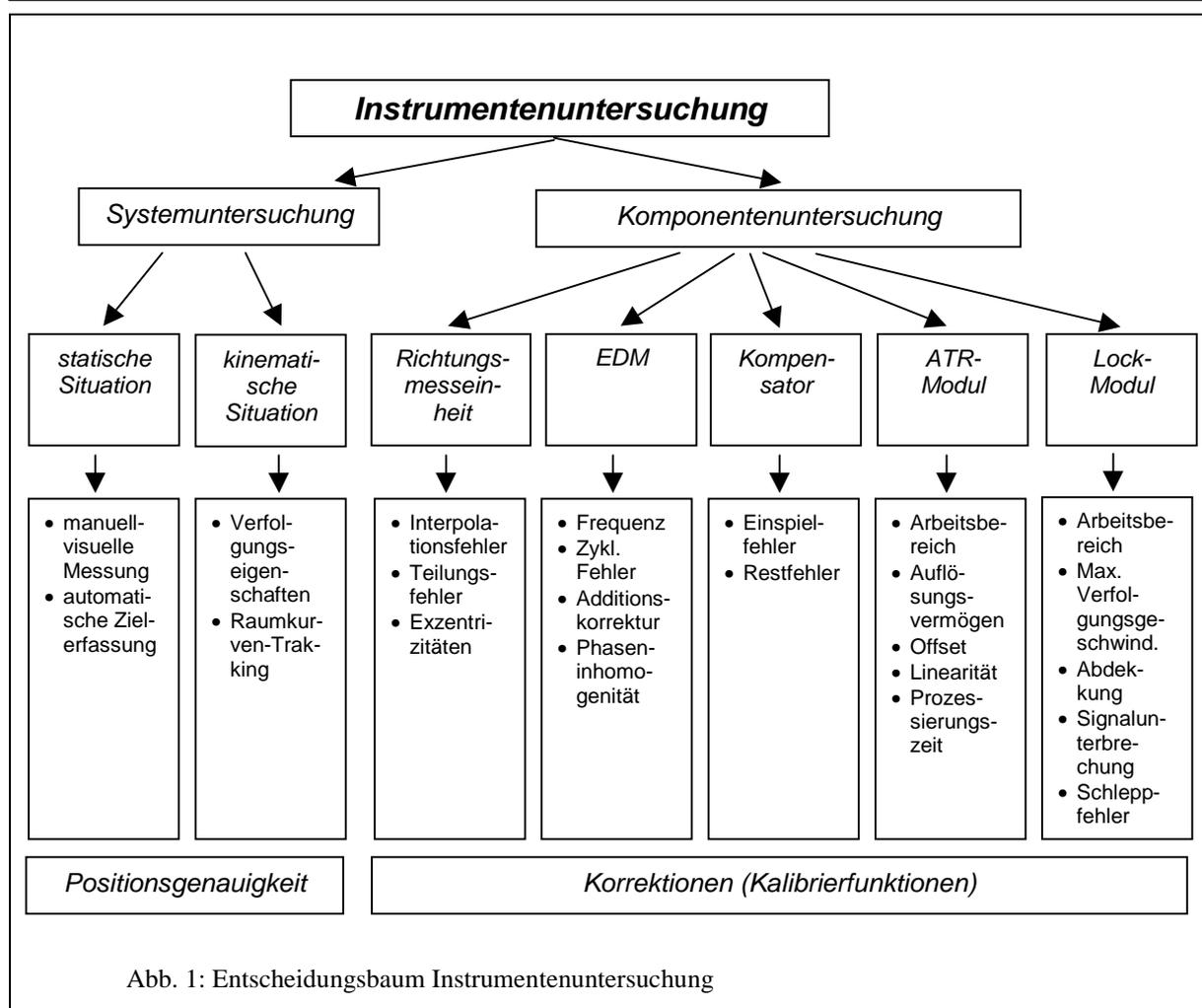
*Stichwörter/Keywords: Robot-Tachymeter, Tracking, Prüfeinrichtung, Kalibrierung, Kinematik*

## **1. Einleitung**

Die zunehmende Zahl der motorisierten Tachymeter mit automatischer Zielerfassung und Zielverfolgung erschließen neue Einsatzgebiete, weil durch die Motorisierung und Automatisierung der Robot-Tachymeter eine Vielzahl von Positionierungs- und Navigationsaufgaben effizient durchgeführt werden können. Um die Leistungsfähigkeit dieser Geräte beschreiben zu können, sind die heute für Tachymeter allgemein anerkannten Prüfmethode anzupassen und die zusätzlichen kinematischen Leistungsmerkmale durch entsprechende neu entwickelte Untersuchungsverfahren zu evaluieren. Nachdem in Hennes [1999] die betreffende Problematik aufgezeigt wurde, wird in diesem Aufsatz über die verschiedenen praktischen Verfahrensansätze zur Umsetzung neuer Prüfverfahren berichtet.

## **2. Verfahrensansätze**

Die erste zu behandelnde Frage ist die nach der grundsätzlichen Prüfmethodik. So muss zwischen der System- und der Komponentenprüfung entschieden werden. Als Entscheidungskriterium kann die gesuchte Zielgröße der Instrumentenprüfung herangezogen werden: Die Systemprüfung bietet sich an, wenn lediglich die Positionsgenauigkeit ermittelt werden soll, die Komponentenprüfung hingegen bietet die Grundlage zur Bestimmung von Korrekturen, aus denen sich Kalibrierfunktionen ableiten lassen.

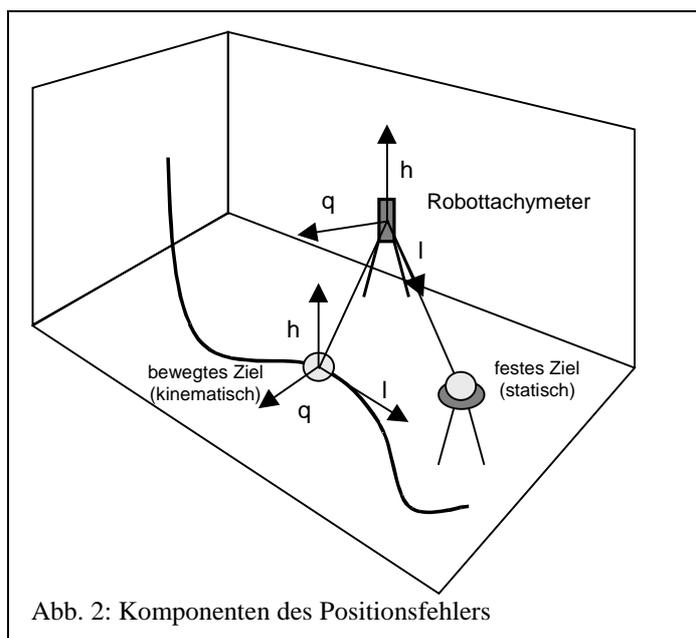


Entscheidet man sich bei der Untersuchung für die Komponentenprüfung, so ist die Vorgehensweise vom Ansatz her der klassischen Untersuchung einer Totalstation ähnlich und – insoweit identische Module betrachtet werden – sogar identisch. Hinsichtlich der Untersuchung der Zielerkennungseinheit (ATR = Automated Target Recognition-Modul) und der Zielverfolgungseinheit (Lock-Modul = Steuereinheit inklusive des implementierten Algorithmus) muss auf die Eigenschaften dieser neuen Funktionen abgezielt werden. Jedoch wird man so die tatsächliche Leistungsfähigkeit des Gerätes (besonders in kinematischen Einsatzbereichen) nur nach aufwendigen Experimenten beurteilen können. Die Komponentenuntersuchung wird durch die gestiegene Komplexität der Messsysteme und die herstellerseitige Integration von Kalibrierfunktionen in die einzelnen Module erschwert, da dem Anwender mehr und mehr aufgrund der Unkenntnis dieser Funktionen und der gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen Komponenten die Möglichkeit vorenthalten bleibt, das Verhalten einer einzelnen Komponente zu modellieren (beispielsweise [Hennes, 1992, S. 335], Heister [2000]). Bei der Entwicklung neuer Untersuchungsverfahren ist ferner zu entscheiden, ob sich diese Verfahren an heute bekannte Praxisanwendungen orientieren oder allgemein gehalten werden sollen. Unseres Erachtens ist letzteres anzustreben, da es nicht möglich ist, die Gesamtheit alle denkbaren praktischen Anwendungen zu kennen; weiterhin lässt sich mit einem allgemein gehaltenen Verfahren wesentlich flexibler auf Weiterentwicklungen in der Messtechnik reagieren. Andererseits kann auch ein weit gesteckter Rahmen der Untersuchungsmethode nicht die Gewährleistung bieten, für alle Einsatzgebiete ein vollkommen abdeckendes Ergebnis zu liefern. Das Ergebnis wird aber der Anforderung genügen, als Vergleichsgrundlage die unterschiedlichen Systeme im Hinblick auf die eigene spezielle Aufgabe beurteilen zu können.

Bei der Systemprüfung werden die Einflüsse aller Komponenten gleichzeitig betrachtet. Sie orientiert sich stark an praxisnahen Einsatzbedingungen, wodurch die aus ihr erhaltenen Ergebnisse, insbesondere die Positionsgenauigkeit, eine hohe Aussagekraft besitzen. Als System wird dabei nicht nur das Instrument alleine verstanden, sondern das Instrument in Verbindung mit der Betriebs- und Auswertesoftware und der dazugehörigen Gegenstation, z.B. dem Prisma. Zielt die Systemprüfung auf eine bestimmte Eigenschaft ab, kann bei einer entsprechenden Wahl der Versuchsanordnung und Auswertetechnik die Systemprüfung den Charakter einer Komponentenprüfung erhalten. Eine grundsätzliche Substitution der Komponentenprüfung durch die Systemprüfung ist aber nicht absehbar, da nur die Komponentenprüfung im Sinne einer Kalibrierung die Messgenauigkeit erhöhen kann, weil nur sie Korrekturfunktionen liefert.

Das Ergebnis einer Systemprüfung, die **Positionsgenauigkeit**, wird als eine dreidimensionale Größe dargestellt und ist ein Maß für die Abweichung einer berechneten Position zu der Sollposition, die sich aus zufälligen und systematischen Anteilen zusammensetzt. Die Positionsgenauigkeit ist in der Regel entfernungsabhängig und kann im Hinblick auf kinematische Anwendungen auch zeitabhängige Komponenten enthalten, wobei letztere wiederum von der Orientierung der Bewegungsrichtung zum Instrument abhängen. Da in der Regel bei einer Systemprüfung die systematischen Anteile nicht ausreichend in Abhängigkeit ihrer Einflussfaktoren modelliert werden können, wird sich für die praktische Anwendung empfehlen, alle Abweichungen als zufällig anzusehen.

Zur Quantifizierung der Positionsgenauigkeit können mehrere Ansätze genutzt werden. In der einfachsten Form wird der räumliche Lagefehler betragsmäßig in einem metri-



schen Maß angegeben und ist so ein leicht nachvollziehbarer Qualitätsmaßstab; es kann aber auch die vektorielle Aufspaltung des Positionsfehlers in drei orthogonale Elemente sinnvoll sein. Dabei ist die Frage der Orientierung des Dreibeins zu erörtern, die zum einen durch die Auswertestrategie und zum anderen durch die Zielsetzung der Systemprüfung bedingt ist: Durch die Wahl der Auswertestrategie ergeben sich folgende Einschränkungen: Falls die Sollpositionen für jeden Messzeitpunkt  $t$  genau bekannt sind, lassen sich die Abweichungen als polare Größen (im Bezugssystem Instrument) oder als Größen in einem übergeordneten (beliebig

gewählten) Koordinatensystem bestimmen, wobei die Hauptachsen der Fehlerellipsen jeweils den Koordinatenachsen folgen, d.h. mit 68%iger Wahrscheinlichkeit liegt die Sollposition in dem durch die Fehlerellipse um die Istposition aufgespannten Körper. Falls die Sollpositionen nur näherungsweise bekannt sind und durch Auffelderung eine Bestanpassung erreicht werden soll, legt die implizite Datumsfestlegung ebenfalls die Orientierung der Fehlerellipsen fest.

Eine solche Vorgehensweise kommt insbesondere bei kinematischen Anwendungen zum Einsatz. Zwar reduziert die Umkehrung der Aufgabenstellung („Wie groß ist die mittlere zeitliche Abweichung für das Einnehmen einer Position  $\underline{X}$  ?“) das Orientierungsproblem erheblich, ist aber hinsichtlich des geringen praktischen Nutzens wenig bedeutsam.

Die Zielsetzung verlangt Folgendes: Um das Ergebnis stark mit den Gerätekomponenten zu korrelieren, sollte das Fehlerellipsen-Koordinatensystem am Zielstrahl orientiert werden. Damit erhält man einen Längs-, Quer- und Höhenfehler, wobei letztere sich meist dann als stark entfernungsabhängig erweisen, wenn sie metrisch angegeben werden. Diese Darstellung eignet sich eher für statische Anwendungen, während es für die kinematische Situation zweckmäßig ist, das Achsendreibein entlang der Bewegungsachse zu orientieren. Damit liefern die Komponenten der Positionsgenauigkeit jeweils eine Aussage über die Positionierung quer und längs zur Bewegungsachse. Es wird auch der Tatsache Rechnung getragen, dass in den unterschiedlichen Anwendungsbereichen die Anforderungen an die Quer- und Längspositionsgenauigkeit deutlich unterschiedlich ausfallen können. Die Abhängigkeit der erreichbaren Genauigkeit von der Orientierung des Instruments sollte soweit als möglich einkalkuliert, zumindest aber quantifiziert werden.

### **3. Messprozess und Fehlereinflüsse**

#### **3.1 Messprozessbedingte Prüfstrategien**

Zur Schaffung geeigneter Untersuchungsmethoden ist es zweckmäßig, zuerst geräteinterne Abläufe einer Messung in einzelne Prozessschritte zu zerlegen. Diese lassen sich grob folgendermaßen charakterisieren, wobei es typenspezifisch zu Abweichungen kommen kann: Zunächst muss eine grobe Zieleinstellung vorgenommen werden, wobei hier von Systemen ausgegangen wird, bei denen dies manuell-visuell geschieht. Auch hier kommt bereits ein Automatisierungsprozess zum Tragen, weil die Bewegung des Feintriebs als Befehl interpretiert und an die Motorik weitergegeben wird, die letztendlich die Bewegung der Alhidade und des Zielfernrohres veranlasst. Bei eingeschalteter ATR wird gleichzeitig ein geeignetes Signal ausgesendet und die ATR analysiert in ihrem Gesichtsfeld, ob das Signal von einem (ggf. aktiven) Reflektor zurückkommt. Die Ablage des Reflexes von der ATR-Zielachse wird bestimmt und mit der Richtungsangabe der Teilkreise und der Kompensatorauslesung verrechnet und zur Anzeige gebracht bzw. auf Wunsch abgespeichert. Ist außerdem der Zielfolgemodus aktiv, wird – auch bei statischem Ziel – eine gegebenenfalls vorhandene Zielabweichung durch Nachstellen der Zielachse reduziert, um in einen optimaleren Messbereich der ATR zu gelangen. Bei bewegtem Ziel wird die Bewegungsrichtung und zumindest –geschwindigkeit aus den ATR-Daten abgeleitet, woraus neue Stellbefehle für die Motorik resultieren. Parallel dazu läuft der Entfernungsmessprozess. Inwieweit dieser durch die kinematischen Parameter in seinem Ablauf beeinflusst wird, ist dem Anwender (noch) nicht bekannt. Es sei jedoch auf die Offsets zwischen den Zeitpunkten der repräsentativen Richtungserfassung, der repräsentativen Neigungskomponentenerfassung, der repräsentativen Distanzmessung und der Datenausgabe hingewiesen.

In Abbildung 3 ist der Prozessablauf modulatorientiert dargestellt. Auf der Sensorebene wird die dimensionelle Messgröße in ein elektrisches Signal umgewandelt. Die Controller-Ebene bezeichnet auch die Software, in der die Sensorausgangssignale vorverarbeitet werden. Hier werden bereits Wechselwirkungen deutlich. Gestrichelt dargestellt sind weitere denkbare Prozessvarianten. Die gegenseitige zeitliche Zuordnung einzelner Teilprozesse, die bisher in den am Markt befindlichen Systemen nur sehr rudimentär verwirklicht ist, ist durch die Zeitmarkierung veranschaulicht. Diese ist von wesentlicher Bedeutung für die nur selten simultan ablaufenden Teilprozesse. Teilweise ist die sequentielle Abarbeitung auch systembedingt: Beispielsweise kann eine Distanzmessung erst nach einer ausreichend genauen Zieleinstellung erfolgen, und diese geschieht entweder halbautomatisch über die Feintriebe oder vollautomatisch über die Zielerkennungslogik. Letztere liefert allerdings einen Beitrag zu den Richtungskoordinaten. Während für statische Anwendungen die Teilprozesse einzeln betrachtet werden können, fordert für den kinematischen Modus die Unschärfebeziehung eine möglichst simultane Prozessbearbeitung und damit auch –betrachtung, um die Messunsicherheiten an

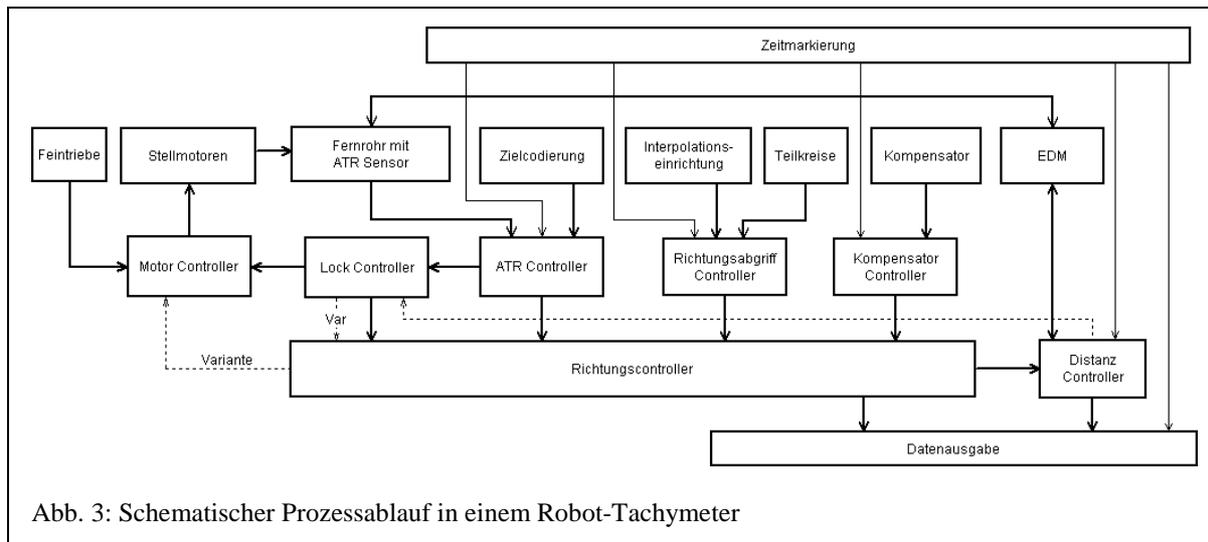


Abb. 3: Schematischer Prozessablauf in einem Robot-Tachymeter

bewegten Objekten zu minimieren. Dies trifft auf alle messenden Baugruppen zu. Für die Instrumentenprüfung sind deswegen hier genau determinierbare Bewegungsabläufe erforderlich, die Referenz wird also durch eine Solltrajektorie gebildet. Da in diesem Fall die Teilprozesse nicht trennbar sind, werden immer Kombinationen der Fehlerkomponenten einzelner Baugruppen auftreten. Die Trennung und Zuordnung erfordern somit wohldurchdachte Trajektorien, die so angelegt sein müssen, dass die zu betrachtenden Einflussparameter trennbar sind.

### 3.2 Effekte einzelner Baugruppen

Der für Robot-Tachymeter als relevant erkannte Fehlerhaushalt stellt sich folgendermaßen dar:

- **Richtungsmessung:**

Die Fähigkeit der Motorik, auch tatsächlich den vorgegebenen Richtungswert einzustellen, kommt als Quantisierungsfehler und ggf. Schlupf zu den herkömmlichen Elementen wie der Genauigkeit der Teilkreisablesung und der Achsjustierung hinzu.

- **Streckenmessung:**

Die Streckenmessung entspricht der eines klassischen Tachymeters. Lediglich bei Robot-Tachymetern, die ihr Ziel nicht exakt einstellen und die Ablage zur Richtungskorrektur verwenden, können Einflüsse der Phaseninhomogenität auftreten. Im Hinblick auf die kinematische Anwendung ist eine Beschleunigung des Messprozesses erforderlich geworden, wobei die Mittelungszeiten verkürzt werden müssen, was zu einem Anwachsen des stochastischen Anteils führen kann, und wobei die Anzahl interner Referenzmessungen vermindert werden muss, was zwischen diesen zu deutlichen Drifterscheinungen führen kann.

- **Zielerfassung:**

Die Fehlereinflüsse der ATR-Einheit fließen direkt in die Richtungsmessung ein. Grundsätzlich gilt es, die Ablage zwischen der optischen Achse und der ATR-Ziellinie zu erfassen, insbesondere wenn beide Beobachtungsverfahren nebeneinander verwendet werden. Einen weiteren systematischen Anteil kann die Orientierung und der Maßstab des ATR-Sensors bilden. Signalstärkevariationen und Fremdlichteinflüsse können sowohl systematische wie stochastische Abweichungen bei der Mittelpunktdefinition verursachen sowie das Messrauschen beeinflussen.

- **Zielverfolgung:**

Bei der Zielverfolgung kommt es darauf an, durch Nachführen des Fernrohrs zu gewährleisten, dass die ATR in ihrem optimalen Arbeitsbereich arbeitet, beziehungsweise zumindest ihren Arbeitsbereich nicht verlässt. Hier kommen also weit mehr als im Modus Zielerfassung die Eigenschaften der ATR im gesamten Messbereich zum Tragen. Gerade hier

kommt es auf das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten an, an das mit zunehmender Objektgeschwindigkeit wachsende Anforderungen gestellt werden.

- **Kompensator:**

Die Korrekturen der Richtungswerte bezüglich der Stehachsschiefe können durch die kompensatortypischen Fehler verfälscht sein. Durch die hohe Drehgeschwindigkeit des motorisierten Oberbaus können bei exzentrischer Lage eines Flüssigkeitskompensators Messfehler entstehen. Da die Messwerterfassung unmittelbar nach Beendigung der Drehung erfolgt, kann auch bei Glättung der Kompensatorablesung ein nicht zu unterschätzender Fehleranteil verursacht werden; diesem wird herstellerseitig teilweise entgegengewirkt durch die Möglichkeit der Verwendung einer vorab ermittelten Stehachsneigung, wodurch die Problematik mehr auf die systemgerechte Vorgehensweise des Anwenders verlagert wird.

- **Prisma:**

Das Prisma als Komponente des Zielerfassungssystems soll eine Übereinstimmung von geometrischem Mittelpunkt und Schwerpunkt der Reflexionsfläche mit der Stehachse gewährleisten. Bei mangelhafter Ausrichtung kann die Ablage des Reflexionsschwerpunktes von der Stehachse nicht zu vernachlässigende Beträge annehmen [Favre, Hennes; 2000].

- **Software:**

Bei elektronischen Messsystemen, die zentral von einem Prozessor gesteuert werden, nimmt die Betriebs- bzw. Steuerungssoftware eine entscheidende Stellung ein. Sie ist nicht nur für die Bedienerführung und Projektverwaltung zuständig, sondern auch die Ergebnisse von internen Justierprogrammen wirken unmittelbar auf das Messergebnis ein. Auch herstellerseitig abgelegte Korrekturen wirken typischen Komponentenfehlern entgegen. Bei Robot-Tachymetern beinhaltet die Software Algorithmen zur Zielerfassung und Zielverfolgung. Diese sind mitentscheidend für die Leistungsfähigkeit beim Einsatz des ATR- und des Lock-Moduls. Bei motorisierten Tachymetern kann die Software auch bei der Umsetzung der Feintriebsinkremente in Richtungsänderungen eine genauigkeitsbestimmende Funktion besitzen.

### 3.3. Prüfkatalog

Im Hinblick auf die praktischen Anwendungsbereiche wird der Prüfkatalog untergliedert in grundsätzliche Aspekte und solche, die nur beim statischen Einsatz oder nur beim kinematischen Einsatz zu betrachten sind. Weiterhin ist jeweils festzulegen, ob es sich um eine quantitative Bestimmung eines technischen Merkmals handelt – begründet durch die nicht immer einheitlichen und nicht immer vollständigen Herstellerangaben – , um die Evaluation einer Abweichung oder, eher selten, um die Untersuchung einer eher qualitativ zu beschreibenden Eigenschaft. Hinsichtlich der Abweichung ist zu unterscheiden, ob sie stochastisch auftritt oder ob sie systematische Anteile aufweist, die eventuell justiert oder kalibriert werden können. Entscheidet man sich für die Systemprüfung, muss der Prüfkatalog derart modifiziert werden, dass anstelle der Abweichungen einer speziellen Funktionsgruppe das Verhalten des Gesamtsystems steht.

Mit den weiter unten vorgeschlagenen Messaufbauten ist immer eine generell formulierte Systemprüfung möglich. Dieser Prüfkatalog könnte die Basis einer normierten Prüfung werden. Die mit „optional“ bezeichneten Punkte sind lediglich für spezielle Anwendungsfälle heranzuziehen. Umgekehrt wird erst in Zukunft durch praktische Erfahrungen Vollständigkeit und Ausgewogenheit zu erreichen sein.

#### **Grundsätzliche Aspekte:**

- G.1. Bestimmung des Arbeitsbereiches der ATR: Distanzbereich und angularer Scanbereich (Field of view, FOV) (quantitativ)
- G.2. Bestimmung des Auflösungsvermögens und der Wiederholgenauigkeit in Abhängigkeit – jeweils dreidimensional –

- G.2.1. der Startposition (stochastisch)
- G.2.2. des verwendeten Prismas und dessen Orientierung (stochastisch und evtl. systematisch in Abhängigkeit der Distanz, der Orientierung und des vertikalen Einfallswinkels),
- G.2.3. der Betriebsmodi: Statisch, stop and go (falls vorhanden), Tracking (stochastisch)
- G.2.4. des Signal/Rausch-Verhältnisses (stochastisch, optional)
- G.3. Verhalten bei Fremdlicht/mehreren Prismen im FOV der ATR (qualitativ)
- G.4. Bestimmung der Linearität der ATR (systematisch in Abhängigkeit von Horizontal- und Vertikalrichtung, optional)
- G.5. Stabilität der ATR-Ziellinie in Abhängigkeit der Temperatur und ihre Justiermöglichkeit (quantitativ bzw. qualitativ)
- G.6. Driften von Richtungs-, Distanz- und Neigungssensor (quantitativ)
- G.7. Stabilität der Orientierung (Drehmomente auf den Unterbau, verursacht durch Beschleunigung und Abbremsen des Oberbaus, quantitativ)
- G.8. Verhalten des Kompensators während der Bewegung und Nachschwingungen beim Stillstand (quantitativ)
- G.9. Phaseninhomogenität (quantitativ)

#### **Statische Aspekte:**

- S.1. Suchzeit der Grob- und Feindetektion in Abhängigkeit der Ausgangssituation (quantitativ)
- S.2. Ohne ATR: Bestimmung der motorischen Positionierungsgenauigkeit (stochastisch)
- S.3. Bestimmung des ATR-Zielachsfehlers für (Arbeits-) Distanz (systematisch, evtl. entfernungsabhängig)

#### **Kinematische Aspekte:**

- K.1. Bestimmung des Arbeitsbereichs des Lock-Moduls hinsichtlich der maximal möglichen Relativgeschwindigkeit in Abhängigkeit von (qualitativ)
  - K.1.1. der Bewegungsrichtung: radial, tangential und vertikal
  - K.1.2. der Distanz
- K.2. Bestimmung des 3D-Auflösungsvermögens in Abhängigkeit
  - K.2.1. der Geschwindigkeit (stochastisch)
  - K.2.2. der Bewegungsrichtung: radial und tangential (vertikal: optional)
  - K.2.3. des Betrages der Geschwindigkeit:  $v_{max}$  und  $v_{Vergleich}$ , (weitere  $v$ : optional)
- K.3. Bestimmen der Zeitverzögerungen zwischen
  - K.3.1. Zeitpunkt der Richtungsbestimmung (quantitativ)
  - K.3.2. Zeitpunkt der repräsentativen Distanzmessung (quantitativ)
  - K.3.3. Zeitpunkt der verwendeten Kompensorauslesung (quantitativ)
  - K.3.4. Zeitpunkt der Datenausgabe (quantitativ)
- K.4. Bestimmung der maximalen Tangentialgeschwindigkeit *innerhalb* des ATR-Arbeitsbereiches (optional, qualitativ)
- K.5. Verhalten bei Strahlunterbrechungen (quantitativ)
  - K.5.1. unterschiedlicher Dauer
  - K.5.2. unterschiedlicher Abdeckungsrichtung
- K.6. Verhalten bei zusätzlichem Erscheinen eines Prismas im FOV beim Tracken eines anderen (qualitativ)

## **4. Umsetzung in Prüfverfahren**

### **4.1 Allgemeine Aspekte**

Die Umsetzung des oben aufgegliederten Prüfkatalogs erfordert aufgrund seines Umfangs möglichst effiziente Untersuchungsverfahren, wobei die notwendigen Einrichtungen möglichst vielseitig eingesetzt werden können. Eine Reihe der Katalogeinträge können allein

mit der Funktionalität der Prüflingsausrüstung beantwortet werden (z.B. G.1, G.6-G.9, S.1, S.3), es sei denn, ATR-Messungen sind nur in einer Fernrohrlage möglich. Wenige andere benötigen eine herkömmliche Laborausrüstung wie einen Kollimator mit Strichplatte (z.B. S.2) oder eine lineare Verschiebeeinrichtung mit Ableseeinheit, beispielsweise einen mit Mikrometer ausgestatteten Kreuzschlitten (für G.2). Zur Bestimmung der prismenorientierungsabhängigen Additionskorrektur lässt sich zweckmäßig ein motorisierter Theodolit als programmierbarer Drehgeber „zweckentfremden“ [Favre, Hennes, 2000]. Dies ist von besonderer Bedeutung, da in der Regel für kinematische Verfahren eine Prismenausrichtung aus steuerungstechnischen Gründen viel zu aufwendig ist. Dies bedeutet gleichzeitig für alle angular variierenden Versuchsaufbauten, dass zwar ein 360°-Reflektor verwendet werden sollte, dessen spezielle Eigenschaften allerdings das Versuchsergebnis wesentlich beeinflussen wird.

Für alle (übrigen) Prüfungen im Raum-Zeit-Bereich, insbesondere die Systemprüfung, muss jedoch eine Solltrajektorie realisiert werden. Dies geschieht zweckmäßig mit einer automatisierten Messbahn, (vgl. 4.2, 4.3) und einem Kreisformtest (4.4). Diese Versuchseinrichtungen müssen Bewegungsgeschwindigkeiten bis zu 20 m/s radial bzw. 50 gon/s angular bei einer Datenrate von mindestens 200 Hz realisieren, um allen heutigen Instrumentenmerkmalen zu genügen. Selbst bei einer derart hohen Datenrate ist aufgrund der Unschärfebeziehung die erreichbare Positionsgenauigkeit zwar noch weit unter den für den statischen Modus angegebenen Positionsgenauigkeiten (vgl. [Hennes, 1999]), erste Untersuchungen zeigen jedoch, dass die oben genannten Anforderungen zur Prüfung des kinematischen Moduls eines Instrumentes nach heutigem Standard noch ausreichen. Weiterhin wird an der Entwicklung spezieller Auswertestrategien gearbeitet, mit denen geringer dimensionierte Systeme Defizite wirksam auffangen, beispielsweise [Stempfhuber, 2000].

#### 4.2 Automatisierte Messbahn

Bei diesem Aufbau wird ein Schlitten mit Prisma motorgesteuert auf einer Geraden bewegt, dessen exakte Position von einem Wegaufnehmer (beispielsweise ein Schrittmotor wie in Abb. 4 dargestellt oder stattdessen interferometrisch, wobei der Antrieb auf dem Wagen positioniert sein kann) erfasst und an einen Rechner (PC) weitergeleitet wird. Dieser kann den Motor so ansteuern, dass der Schlitten mit vorgegebener Geschwindigkeit definierte Positionen anfährt. Zusätzlich steuert er das angeschlossene Tachymeter. Alle Daten (zeitmarkierte Schlittenposition und Tachymetermessungen) werden ebenfalls durch diesen PC erfasst.

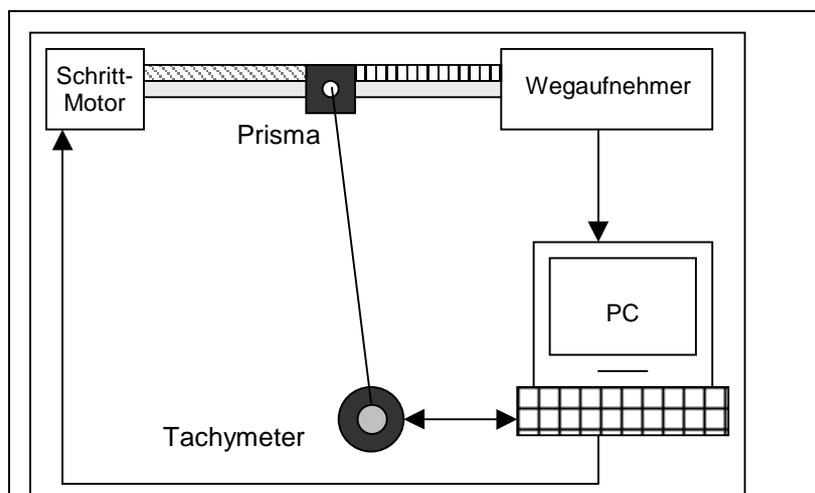


Abb. 4: Schematischer Aufbau einer Automatisierten Meßbahn

Dieser Aufbau ist in erster Linie für die Untersuchung der kinematischen Aspekte bestimmt, kann aber auch effizient für grundlegende Aspekte (G.1, G.2, G.4, G.5, G.9) eingesetzt werden. Durch unterschiedliche Orientierung der Verschiebungsachse (horizontal längs bzw. quer zum Instrument oder vertikal) spiegelt das Ergebnis die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Komponenten wieder. Die gezielte Bewegung des Schlittens in sehr

kleinen Schritten und die Möglichkeit, auch nach größeren Verschiebungen eine Ursprungsposition wieder einzunehmen, ermöglichen die Bestimmung folgender Größen:

- Auflösungsvermögen der Richtungs- und Distanzsensoren
- Wiederholgenauigkeit
- Scanbereich des ATR-Sensors
- Minimale signifikante Verschiebung bei unterschiedlichen Betriebsarten (z.B. Stop+Go oder Tracking)

Die Versuchsanordnung bietet Variationsmöglichkeiten bei der Entfernung zwischen Ziel- und Gerätestandpunkt. Durch unterschiedliche Beobachtungsreihenfolgen der Tachymetermesswerte können eventuelle Korrelationseffekte minimiert werden.

### 4.3 Modifizierte Automatisierte Messbahn

Durch die Wahl des Standpunktes in Relation zur automatisierten Messbahn können einzelne Komponenten des Instrumentes unterschiedlich stark gewichtet in die Ergebnisbestimmung einfließen. So wird beispielsweise bei einer Aufstellung in der Verlängerung der Translationsachse das Ergebnis nur von der Streckenmessung abhängig sein; mit zunehmender seitlicher Verlagerung des Standpunktes bekommen Richtungsmessung und Zielverfolgung eine größere Bedeutung.

Durch einen mobilen Aufbau sind auch Messungen in unterschiedlichen Entfernungsbereichen und unter unterschiedlichen äußeren Bedingungen (Feldeinsatz) leicht durchführbar. Dies erfordert aber eine Reduktion des oben beschriebenen Laboraufbaus: Der Prismenwagen sollte durch eine vereinfachte Antriebsart (beispielsweise durch Gewicht und Schwerkraft oder ggf. Mensch) bewegt werden. Seine Position zu einem Zeitpunkt  $t$  und damit seine exakte Geschwindigkeit sind dabei unbekannt. Letztere lässt sich zumindest näherungsweise aus den registrierten Messwerten ableiten. Werden die Messgrößen in Positionswerte umgerechnet, ist eine zweidimensionale Ablage als Quer- und Höhenkomponente bezüglich der Bewegungsrichtung bestimmbar. Das Maß der Abweichung sowie ihre räumliche Lage lässt unter Berücksichtigung der Aufbaugeometrie auch Rückschlüsse auf die Zeitverzögerung der Auslesung der einzelnen Sensoren und damit auf die Arbeitsweise der im Instrument eingesetzten Software zu. Stempfhuber [2000] weist mit einem solchen Aufbau den Zeitversatz zwischen Richtungs- und Streckenmessung eines bestimmten Gerätetyps nach.

Ergänzt man den Aufbau um eine Einrichtung zur zeitlichen Referenzierung festgelegter Positionen, können aus Redundanzgründen genauere Aussagen getroffen werden. Dazu sind entsprechende Sensoren an der Schiene anzubringen. Als einfachste Lösung bietet sich die Verwendung von Lichtschranken an. Um ein solches System sinnvoll einsetzen zu können, muss außerdem die zeitliche Zuordnung der Messwerte von Prüfeinrichtung und Instrument erfolgen.

Alle unter 4.1 und 4.2 genannten Verfahren sind prinzipiell auch in vertikaler Anordnung denkbar. Allerdings wird man sich in der Regel auf geringere Messbereiche beschränken müssen.

### 4.4 Kreisformtest

Bei allen Verfahren mit Bewegungen entlang einer geradlinigen Bahn wird immer die Distanzkomponente in die Messung einfließen. Allein kreisförmige Bewegungen, die eine Schnittmenge einer um das Zentrum des Instruments gelegten Kugel bilden, eliminieren die Distanzabhängigkeit. Derartige Kreisformtests lassen sich durch einen rotierenden Arm, an dem ein Prisma befestigt ist, leicht realisieren [Bayer, 1992]. Auch hier ist wieder die Abhängigkeit von der Prismenausrichtung zu beachten. Durch die Anordnung des Instrumentes relativ zur Rotationsachse lässt sich der – geometriebedingte – Einfluss der polaren Messele-

mente auf die räumlichen Soll-Koordinaten variieren, womit durch Kombination geeigneter Positionierungen Rückschlüsse auf das Verhalten einzelner Sensoren gezogen werden können. Die Nutzung derartiger Systeme geht mit der Entwicklung der Robot-Tachymetrie einher, wobei der Kreis als Sollkurve, in der Regel ohne Zeitbezug, im Vordergrund stand. Zeitlich Zuordnungen lassen sich auch hier punktuell durch Lichtschranken erreichen. Mit einer geeigneten Encoder-Getriebe-Kombination und die durch die Lichtschranken gegebenen Phaseninformation lässt sich eine kontinuierliche Raum-Zeit-Funktion realisieren.

## 5. Ausblick

Grundsätzlich sind der Ideenvielfalt bei der Realisierung von Prüfmethoden keine Grenzen gesetzt. So sind zur Untersuchung von vertikalen Anteilen Freifall-Versuche denkbar; für die horizontalen Komponenten ein Horizontalpendel, das ebenfalls einem physikalischen Gesetz folgt, aus dem sich die Solltrajektorie ableiten lässt. Prinzipiell ist auch die Realisierung einer beliebigen Trajektorie denkbar, deren Raum-Zeit-Verhalten durch einen Lasertracker bestimmt wird. Über die Realisierung von Kreisformtests wurde parallel mit dem Aufkommen von trackenden Positionssystemen berichtet, wobei mit zunehmender Popularität von Robottachymetern auch mit der Modifizierung im Sinne des Prüfkatalogs und der routinemäßigen Nutzung zu rechnen ist. Auch eine systemübergreifende Vergleichbarkeit wird auf diese Weise ermöglicht.

Immer wird es jedoch Korrelationen zwischen den beobachteten Größen und den gesuchten systembeschreibenden Prüfparametern geben. Die Analyse der hauptsächlich durch die Versuchsanordnungen gegebenen Korrelationen und die optimale, d.h. möglichst korrelationsarme, Bestimmbarkeit der gesuchten Größen wird Bestandteil der zukünftigen Arbeiten der Verfasser sein.

## 6. Literatur

- BAYER, G. [1992]: Zur hochgenauen automatischen Führung langsam bewegter Objekte mit Zielverfolgungssystemen im Nahbereich. Deutsche geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Dissertationen, Reihe C, Heft Nr. 398.
- FAVRE, C.; HENNES, M. [2000]: Zum Einfluss der geometrischen Ausrichtung von 360°-Reflektoren bei Messungen mit automatischer Zielerfassung. VPK 2/00, S. 72-78.
- HEISTER, H. [2000]: Zur Überprüfung geodätischer Instrumente. Festschrift zur 25-Jahrfeier des Instituts für Geodäsie der UniBW München, Heft 60, Bd 1, 21 S.
- HENNES, M. [1992]: Zur Maßstabsfestlegung bei elektrooptischen Distanzmeßgeräten. In: BDVI-Forum 2/1992, S.329-338.
- HENNES, M. [1999]: Grundlegende Aspekte zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Robottachymetern. AVN, S. 374-385..
- STEMPFHUBER, W.; SCHNÄDELBACH, K.; MAURER, W. [2000]: Genaue Positionierung von bewegten Objekten mit zielverfolgenden Tachymetern. Beitrag zu XIII Kurs f. Ingenieurvermessung, München, 13.-17.3.2000, in: Schnädelbach, K.; Schilcher, M.: Ingenieurvermessung 2000, Wittwer Verlag, Stuttgart, S. 144-154.