

Präzises und kinematisches Prüfen

Möglichkeiten der Präzisions-High-Speed-Linearmessbahn (PHL) des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe

Maria Hennes

Zusammenfassung

Zur Prüfung kinematischer Messsysteme wurde am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe (TH) eine Präzisions-High-Speed-Linearmessbahn entwickelt. Diese zeichnet sich durch ein Zahnriemenantriebssystem aus, das vergleichsweise hohe Beschleunigungen und Geschwindigkeiten erlaubt. Untersuchungsergebnisse zeigen, dass es typische Erwartungen hinsichtlich der Positionierungsunsicherheit ($\pm 0,1$ mm) übertrifft. In diesem Beitrag werden außerdem zukünftige Anwendungsmöglichkeiten der Präzisions-High-Speed-Linearmessbahn aufgezeigt.

Summary

For inspection and testing of object tracking systems a high-precision-high-speed linear track is developed at the Geodetic Institute of Universität Karlsruhe (TH). It distinguishes itself by a tooth drive belt, which allows comparatively high accelerations and high speeds. It outranges typical expectations with respect to positioning accuracy. This is demonstrated by examination results. Furthermore, future applications are demonstrated.

1 Motivation

Interferometrisch gestützte Messbahnen sind seit vielen Jahren in geodätischen Instituten im Einsatz. Sie werden vorwiegend für die Kalibrierung von EDM-Modulen und Nivellierlatten (bzw. Nivelliersystemen) genutzt (z.B. Schlemmer (2005) und andere Beiträge im gleichen Heft). Da nun seit den letzten Jahren die Bedeutung kinematischer Messverfahren immer mehr wächst, liegt es nahe, auch die verwendeten Sensoren unter kinematischen Bedingungen sowohl zu prüfen als auch zu untersuchen und zu kalibrieren. Dies gilt nicht nur für geodätische Instrumente, sondern auch für dimensionelle Sensoren der Nachbardisziplinen (zum Beispiel iGPS, indoor-GPS, Smart-Track™, Handheld-CMMs, Sensoren von Gleismesswagen etc.). Bislang fanden Prüfungen hierzu überwiegend in Testfeldern mit beschränkter Punktdichte statt. Teilweise wurden auch Dreharme verwendet (z.B. Bayer 1992). Diese reichen jedoch für die Beurteilung primär linear messender Systeme nicht aus, so dass am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe (GIK) neben Präzisionsdreharmen auch eine kinematische Linearmessbahn entwickelt wurde, um die Anforderungen zukünftiger Prüfaufgaben zu erfüllen. Dieser Beitrag zeigt die Leistungsfähigkeit dieser Linearmessbahn nach Abschluss der ersten Entwicklungsphase auf und erläutert mögliche Anwendungen.

2 Realisierung

2.1 Anforderungen

Die Linearmessbahn soll sowohl zur hochpräzisen Prüfung und Kalibrierung distanzsensitiver Messsysteme wie auch zur Realisierung kinematischer Untersuchungen dienen. Weil die erlaubte Reflektorgeschwindigkeit handelsüblicher Interferometer mit typischerweise 0,7 m/s deutlich unter den erwünschten Verfahrensgeschwindigkeiten liegt und für hohe Verfahrensgeschwindigkeiten die erforderliche Distanzmessgenauigkeit des Referenzsystems weniger hoch ist, sind zwei Betriebsmodi vorgesehen, die bezüglich Genauigkeit bzw. Kinematik optimiert sind. Für diese Modi wurden folgende Anforderungen definiert:

Im Betriebsmodus »Interferometer« soll eine Distanzurückführung mit einer Unsicherheit von 0,01 mm (für geodätische Instrumente 0,1 mm) möglich sein, wobei bei ruhendem Wagen und relativ zu einer vorab definierten Ausgangsposition gemessen wird. Die Messung erfolgt also statisch und im Stop-and-Go-Betrieb, wobei für die meisten Anwendungsfälle eine Grobpositionierung (interferometerfrei) auf 1 mm als ausreichend erachtet wird. Die Absolutmessung soll in Bezug zu einer geodätischen Zwangszentrierung mit einer Unsicherheit von 0,2 mm möglich sein. Ein Interferometer soll die Rückführung zum PTB-Normal garantieren. In der ersten Ausbaustufe ist die Kalibrierung von Nivellierlatten bzw. Nivelliersystemen nicht beabsichtigt, weil derartige Prüfverfahren bei nahezu allen der Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel e.V. (GKGM) angeschlossenen Institutionen realisiert sind.

Im Betriebsmodus »kinematisch« soll eine Verfahrensgeschwindigkeit von mindestens 8 m/s mit einer möglichst kurzen Beschleunigungsstrecke erreicht werden, so dass mindestens 15 m Fahrweg bei Höchstgeschwindigkeit zur Verfügung stehen. Die aktuelle Position des Wagens soll bei Maximalgeschwindigkeit mit einer Unsicherheit von 10 mm und bei Minimalgeschwindigkeit mit einer Unsicherheit von 1 mm bekannt sein. Die Minimalgeschwindigkeit ist als kleinstmögliche gleichmäßige Geschwindigkeit definiert und sollte 0,2 m/s nicht unterschreiten.

2.2 Konstruktive Realisierung

Diese Forderungen führten zu einer vollständig neuen Konzeption. Lediglich die Führungsschienen der beste-

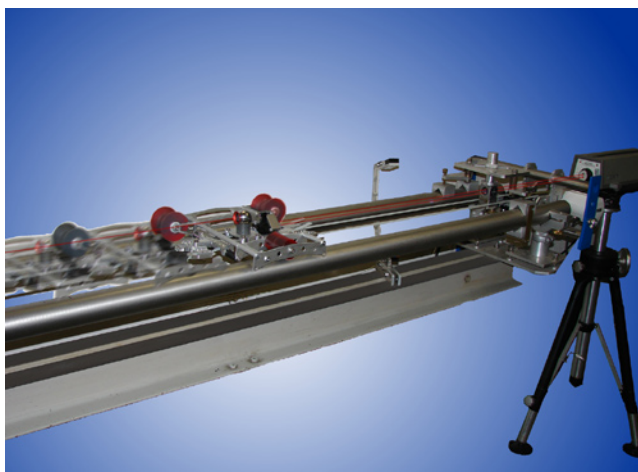


Abb. 1: Hochgeschwindigkeitsmessbahn, Betriebsmodus »kinematisch«

henden Linearbahn (Länge 24 m, vgl. Abb. 1) und die interferometrische Rückführung (HP-Interferometer Typ Agilent 5519A in Kombination mit Agilent 10885A PC Axis Board) wurden in der ersten Entwicklungsphase beibehalten. Die geforderten Verfahrensgeschwindigkeiten von 9 m/s bei minimaler Beschleunigungsstrecke konnten nur durch ein neues Antriebs- und Kraftübertragungssystem gewährleistet werden.

Bemerkenswert ist das Kraftübertragungssystem, das aus einem doppelt parallel geführten Zahnriemen besteht (in Abb. 2 orange dargestellt). Dieser liegt auf Rollen und greift jeweils an der Vorder- bzw. Hinterkante des Wagens an. Durch die Parallelführung des Zahnriemens wird eine konstante Krafteinleitung bei gleichzeitiger optischer Freihaltung im Bereich der Wagenlängsachse gewährleistet. Nur so kann eine optimale Ablothemöglichkeit für die

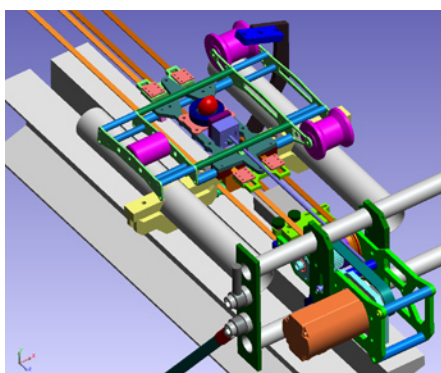


Abb. 2: Zahnriemenführung (Zahnriemen sind in orange, Führungsrollen des Wagens in pink dargestellt)

Referenzierung zu geodätischen Zentriersystemen unter Einhaltung des Abbé'schen Komparatorprinzips gewährleistet werden. Die Übertragung des interferometrisch gesetzten Nullpunktes auf die geodätische Zentrierung geschieht über einen Glastmaßstab (Abb. 3).

2.3 Zusatzeinrichtungen

Für die klassische Nutzung der Messbahn zur Bestimmung der Additionskorrektur im Nahbereich muss der Nullpunkt des Prüflings (Stehachse) einer definierten Wagenposition zugeordnet werden, damit aus dieser und der Summe der an jeder Wagenposition von Prüfling und Interferometer gemessenen Distanzen die Abweichung des Prüflings berechnet werden kann. Hierzu dient ein unterhalb der Führungsschienen angebrachter Glastmaßstab, mit dem zuvor durch Ablotung die Streckendifferenz zwischen den Stehachsen von Reflektor in Wagennullposition und Prüfling ermittelt wird (vgl. Abb. 3). Insgesamt kann so für die Bestimmung der Additionskorrektur eine Unsicherheit von 0,2 mm garantiert werden. Dieser Absolutbezug zur Prüflingsstehachse liefert in der jetzigen Ausführung den größten Beitrag zum Unsicherheitsbudget. Wohl deswegen wird der Stehachsbezug nur von sehr wenigen Kalibrierstellen realisiert.

Die für Präzisionsmessungen erforderliche Korrektur wird aus repräsentativen Temperatur-, Druck- und Feuchtemessungen abgeleitet. Die hierzu erforderlichen Sensoren werden permanent automatisch ausgelesen (s.u.). Wegen der Sensitivität der Distanzmessungen auf Temperatur und deren großer Variabilität wurden sechs Pt100-Sensoren des Typs GTF 401 (Greisinger, 1/10 DIN B) (Abb. 4) so entlang der optischen Strahlwege positioniert, dass eine Erfassung der integralen Temperatur auf 0,1 °C möglich ist. Vorab wurden diese Sensoren mit einem rückgeführten Präzisionssensor des Typs GMH3750 (Greisinger) nachkalibriert, wobei ihre spezifizierte Unsicherheit unterschritten wurde. Zudem wurde das Raumklima des Labors untersucht, um repräsentative Fühlerpositionen festlegen zu können. Eventuell auftretende Vertikalgradienten werden durch weitere drei Temperatursensoren ebenfalls messtechnisch erfasst und berücksichtigt. Letztendlich kann durch die meteorologische Korrektur eine Maßstabsunsicherheit von 0,1 ppm (ent-

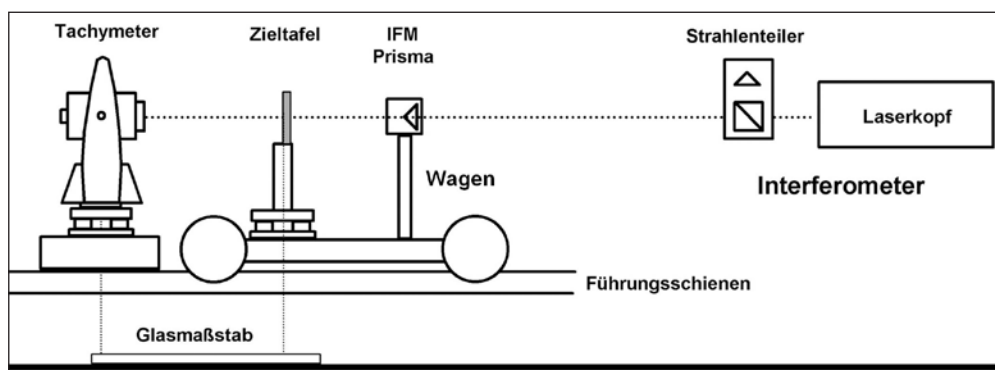


Abb. 3: Prinzipzeichnung am Beispiel des Betriebsmodus »Interferometer«, Startposition



Abb. 4: Temperaturmesssystem

sprechend $2,4\mu\text{m}$ über die gesamte Bahnlänge) gewährleistet werden.

2.4 Steuerung

Die Steuerung und die Messwerterfassung erfolgt über das speziell für diese Anwendung am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe entwickelte Softwarepaket COMET-PRO (Control and MEasuring Tool for Precise Rapid Object-tracking). COMET-PRO hat vielfältige Aufgaben. Es besteht bisher aus den Modulen »fast-track-control« für die Betriebsart »kinematisch« und »fast-track-meas-control« für die Betriebsart »Interferometer«. COMET-PRO sammelt und verarbeitet gleichzeitig Daten externer Sensoren. Somit sind (quasi-)gleichzeitige Messungen möglich. Es basiert auf der Programmierumgebung Labview, die hervorragend geeignet ist, mit Hardwarekomponenten zu kommunizieren und eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche zu gestalten.

Sowohl für die Betriebsart »kinematisch« als auch für die Betriebsart »Interferometer« steuert COMET-PRO den Antrieb, wobei es die Steuerparameter und den Verfahrensweg gemäß den Benutzervorgaben für das automatische Verfahrensprogramm an den Treiber für den AC-Servo-Verstärker des Motors weitergibt. Um eine gleichmäßige Beschleunigung zu garantieren, werden unterschiedliche Steuerparametersätze für beide Betriebsmodi verwendet. Die Nullposition wird durch eine Lichtschranke eingelesen, wobei durch einen speziellen Prozessablauf eine genaue Referenzierung garantiert wird. Darüber hinaus dient das Auslesen weiterer Lichtschranken an den Bahnenenden der Betriebssicherheit, denn ein Überfahren dieser Lichtschranken führt zur Vollbremsung. Der Wagen wird nach Benutzervorgaben zu beliebigen Positionen mit kleinsten Schrittweiten von $18\mu\text{m}$ verfahren, wobei die exakte Länge des Positionierschritts vorab durch Kalibrierung bestimmt und als Steuerparameter dem Treiber übergeben wird. Die Positionierungsvorgaben können sehr flexibel gehandhabt werden: Sie können als beliebige Werte für Position und/oder Schrittweite manuell über das Bedienfenster oder durch eine Liste vorgegeben werden. Die jeweiligen Verfahrensgeschwindigkeiten werden ebenfalls vom Benutzer in Stufen gewählt. Die momentan erreichte Position und die momentan und die maximal

bei der letzten Fahrt erreichte Geschwindigkeit werden im Kontrollfenster dargestellt. Zusätzlich werden Geschwindigkeits- und Drehmomentdiagramme generiert.

In der Betriebsart »Interferometer« erfolgt die Positionierung nach demselben Prinzip, wobei nun die Position hochgenau durch die Interferometermessung bestimmt wird. Hierbei sind Messungen auch während der Fahrt möglich; der Wagen wird nur für Anwendungen im Stop-and-Go-Modus angehalten. Die meteorologische Korrektur erfolgt online, so dass der korrigierte Interferometerwert im Interferometerkontrollfenster dargestellt und gespeichert wird.

Darüber hinaus wird der Prüfling gesteuert und dessen Distanzen ausgelesen. Momentan sind Routinen für die modernen Tachymeter von Leica implementiert. Aufgrund der modularen Programmierertechnik sind jedoch auch (Distanz-)Messinstrumente anderer Hersteller, deren Schnittstellen offen gelegt sind, implementierbar. Auch deren Distanzmessergebnisse werden, basierend auf der räumlichen Modellierung des Brechungsindexes, meteorologisch korrigiert, so dass aus den gespeicherten Daten unmittelbar ein Soll-Ist-Vergleich vorgenommen werden kann.

Eine Implementierung des Lasertrackers in den automatisierten Messablauf ist für die folgende Entwicklungsphase geplant. Laserscanner sollen zukünftig ebenfalls eingebunden werden. Auch die (quasi-)gleichzeitige Datenakquisition von dynamischen Systemen, die auf dem Wagen implementiert sind, ist denkbar.

2.5 Spezifikationen

Die oben genannten Anforderungen sind mit der nun verfügbaren Neukonstruktion eingehalten. Hervorzuheben ist die Maximalgeschwindigkeit von 9 m/s ($= 32\text{ km/h}$) bei einer Beschleunigungs- bzw. Bremsstrecke von nur jeweils $3,5\text{ m}$. Damit wird die Beschleunigung eines Porsche Cayman um das Doppelte übertroffen. Im Betriebsmodus »High-speed« erfolgt die Positionierung unmittelbar über den Zahnriemenantrieb. Hierbei ist die über die Gesamtlänge erreichbare Positionsgenauigkeit unmittelbar von der dem kleinsten Positionsschritt zugeordneten Längensicherheit, der Teilungsgenauigkeit des Zahnriemens sowie der Führungsqualität des Zahnriemens (Durchhang!) und dem thermischen Verhalten der die Gegenlager tragenden Gebäudeteile abhängig. Neben diesen geometrischen Aspekten kommen Abweichungen im Regelkreis



Abb. 5: Bedienoberfläche für automatisierte Messabläufe

Tab. 1: Spezifikationen der Präzisions-High-Speed-Linearmessbahn

Technische Daten	
Bahnlänge	24 m
größte Geschwindigkeit (v_{\max})	9 m/s
kleinste Geschwindigkeit (v_{\min})	0,09 m/s
Nutzlänge bei v_{\max}	17 m
größte Beschleunigung	12 m/s ²
theoretische »Positioniergenauigkeit« (kleinster Positionierschritt)	18 μm
Nutzlast (bis 3 m/s)	3 kg
Nutzlast (bei v_{\max})	0,4 kg
Kraftübertragung mittels	Zahnriemen (zweifach über 50 m)
Spezifikationen Betriebsart »Interferometer«	
Rückführung	Interferometer
Unsicherheit ¹ der Distanzmessung relativ (in IFM-Strahlhöhe)	2 μm
Unsicherheit ¹ der Distanzmessung <i>relativ</i> (in Bezug auf herkömmliche EDM-Reflektoren)	0,1 mm
Unsicherheit ¹ der Distanzmessung <i>absolut</i> (in Bezug auf Wild-Zentrierungen)	0,2 mm
Maßstabsunsicherheit ¹	0,1 ppm
davon Unsicherheit der meteorologischen Korrektion	0,1 ppm
davon Unsicherheit des Interferometers (gemäß Kalibrierschein)	0,01 ppm
Spezifikationen Betriebsart »High-Speed«	
Wiederholgenauigkeit statische Positionierung	0,01 mm
Standardabweichung der statischen Relativpositionierung ²	0,04 mm
Bandbreite der statischen Positionsabweichungen	$\pm 0,1$ mm

¹ Kombinierte Unsicherheit nach DIN V ENV 13005, Betriebsart »Interferometer«

² Nach Kalibrierung

der Motorsteuerung hinzu, die durch Abweichungen im implementierten Encoder überlagert sein können. Die Diskussion der Vor- und Nachteile unterschiedlicher Antriebsarten in Fräger (2006) zeigt die große Herausforderung hinsichtlich der Stabilität der Positionierung mittels Zahnriemen. Dort wird aufgrund von theoretischen Betrachtungen empfohlen, den Verfahrensweg bei Zahnriemen auf 10 m zu begrenzen. Mit der realisierten zahnriemenbasierten Konstruktion am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe können die in Fräger (2006) geäußerten Bedenken jedoch weitgehend zerstreut werden, wie Vergleichsmessungen gegen ein HP-Interferometer und den Lasertracker zeigten. Im Folgenden und in Tab. 1 werden die Ergebnisse vorgestellt.

Im Hinblick auf die Wiederholgenauigkeit einer Positionierung ist zunächst der theoretische Quantisierungsfehler (Annahme Rechteckverteilung) zu betrachten, der bei einem kleinsten Positionierschritt von 18 μm einer Standardabweichung von etwa 5 μm entspricht. Dieser Wert wird von der empirischen Wiederholgenauigkeit unterschritten, solange die Anfahrtrichtung beibehalten wird. Dies unterstützt die Annahme der Rechteckverteilung

mit den Intervallgrenzen von 18 μm . Beim zweiseitigen Anfahren wirkt sich die Umkehrspanne aus. Sie beträgt im Mittel über alle Bahnpositionen 0,04 mm und zeigt an den einzelnen Bahnpositionen unterschiedliche, aber signifikante Beträge. Unter Berücksichtigung einer mittleren Umkehrspanne erhält man eine Wiederholgenauigkeit für das zweiseitige Anfahren von 0,01 mm, die immer noch verblüffend nah an den Quantisierungsfehler heranreicht. Da diese Angaben für jede Bahnposition gelten, gelten sie ebenfalls für einen beliebig gesetzten Nullpunkt.

Die folgenden Betrachtungen gelten dem Maßstab. Zunächst ist festzustellen, dass die Maßstabsdifferenz zwischen Hin- und Rückfahrt etwa 1 ppm beträgt. Obwohl ihre Wirkung klein ist (ca. 0,03 mm am Bahnde), kann sie aufgrund ihrer Signifikanz kor-

rigierend berücksichtigt werden. Innerhalb eines Tages bleibt der Maßstab auf weniger als 0,5 ppm stabil. Inzwischen liegen auch experimentelle Erkenntnisse über die Langzeitstabilität des Maßstabs vor: Aus Beobachtungen über ein Jahr empfiehlt sich eine monatliche Neukalibrierung (bzw. vor Anwendungen mit entsprechenden Genauigkeitsforderungen), wenn die Positionierung genauer als 0,3 mm erfolgen soll. Die Ursachen zu diesem Verhalten werden weiter untersucht, wobei unterschiedliche Aspekte wie Neuspannen der Riemen, Modifikationsarbeiten an der Zahnriemenführung etc. in Frage kommen. Aufgrund der stabilen Temperaturverhältnisse im Tiefgeschoss konnte eine thermische Verformung der Gebäudeteile, die die Kraft der Zahnriemenlager aufnehmen, nicht festgestellt werden. Nach einer Neukalibrierung – die leicht realisierbar ist, weil ja immer auch Messungen in der Betriebsart »Interferometer« möglich sind – weichen die real angefahrenen Positionen mit einer Standardabweichung von 0,04 mm von der Zielposition ab. Ohne korrigierende Berücksichtigung der Umkehrspanne wird etwa 0,1 mm erreicht. Aufgrund der hohen Reproduzierbarkeit der Positions-

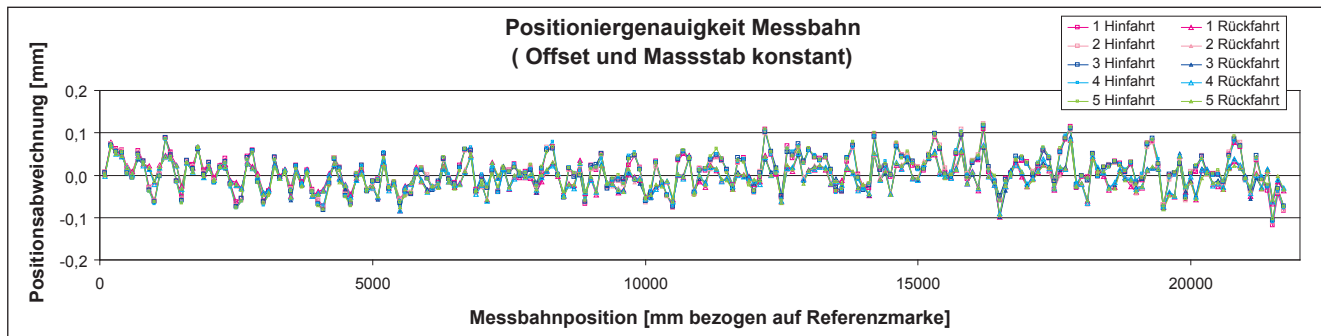


Abb. 6: Positionsabweichungen Präzisions-High-Speed-Linearmessbahn (PHIL)

abweichungen (Abb. 6) besteht noch Optimierungspotential. Trotzdem können bereits jetzt Prüfungen ohne Interferometer durchgeführt werden, deren Genauigkeitsforderungen eine Unsicherheit in den Referenzwerten von 0,3 mm zulassen. Somit eignet sich diese flexible und kostengünstige Antriebstechnologie für interferometerfreie kinematische Linearprüfsysteme mit mittleren Genauigkeitsansprüchen. Weitere wesentliche Spezifikationen sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Neben diesen in der geodätischen Welt geläufigen Genauigkeitsangaben seien die Spezifikationen nach der DIN 230-2 (Prüfregeln für Werkzeugmaschinen. Teil 2: Bestimmung der Positionierunsicherheit und der Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteuerten Achsen) und DIN V ENV 13005 (Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen) angegeben und diskutiert, um Vergleichbarkeit mit anderen Konstruktionen und Denkweisen zu ermöglichen. Grundsätzlich zielt die DIN 230-2 auf die Angabe von maximalen Intervallen ab, in denen die Positionierung erfolgt. Die Begriffe der DIN 230-2 sind – wohl aus der Übersetzung der ISO 230-2 – nicht immer mit den eingebürgerten Denkweisen identisch, weswegen hier auf die wichtigsten Aspekte hingewiesen werden soll. Im Gegensatz zur DIN 55350 wird in DIN 230-2 unter »Wiederholpräzision der Positionierung« meistens die maximale Standardabweichung der aus der Menge an allen Bahnpositionen empirisch aus Soll-Ist-Vergleichen abgeleiteten Standardabweichungen verstanden, also ein Sachverhalt, der nach geodätischem Sprachgebrauch eher mit »Genauigkeit« bezeichnet wird. Hingegen wird die Wiederholgenauigkeit (Präzision) einer Soll-Ist-Differenz in DIN 230-2 mit »Schätzwert der einseitigen Standardunsicherheit der Positionierung an einer Position« bezeichnet – auch konträr zum Unsicherheitsbegriff nach DIN V ENV 13005 (Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen). Zusätzlich werden in DIN 230-2 die Spannen von Maximal- und Minimalbeträgen von absoluten Abweichungen angegeben, die mit »Positionsabweichung« bezeichnet werden. In DIN 230-2 wird ebenfalls der Begriff der Positionierunsicherheit verwendet, der aber nicht konsistent zum Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen ist: Unter Positionierunsicherheit versteht DIN 230-2 die um die vierfache »Standardunsicherheit« (nach DIN 230-2) vergrößerte maximale Spanne der Positionsabweichungen.

Nach DIN 230-2 wird die Positionierunsicherheit also wesentlich pessimistischer angegeben als nach den gängigen Prinzipien (vgl. Tab. 2). Sie beschreibt eher eine Worst-case-Situation für die Positionierung entlang der gesamten Messbahn. Die Vermutung liegt nahe, dass der zum Worst-case-Szenario gehörende Gedanke der »einmaligen Absteckung« (Ergebnisverbesserung durch wiederholtes Messen nicht möglich) ebenfalls implementiert ist. Dieser wird jedoch nicht konsequent angewendet. Unsicherheitsangaben gemäß DIN V ENV 13005 lassen sich nur in Kombination mit der Qualität der Führungsschienen und abhängig vom Abstand der zu prüfenden Linie zur Zahnriemenführung machen.

Höhenabweichungen der Führungsschienen bewirken zusätzlich Positionsabweichungen, wenn die Distanzreferenzpunkte auf dem Wagen oberhalb des Zahnriemens liegen. Die hieraus resultierenden Positionsabweichungen verschlechtern die Positionierung hoher Aufbauten (typischerweise Reflektorhöhe) um bis zu Faktor drei. Korrekturen können prinzipiell aus der Führungsschienengeometrie abgeleitet werden, weil der Wagen auf drei Rädern

Tab. 2: Positionierunsicherheit nach DIN 230-2 am Beispiel einer Untersuchungsreihe

Positionierunsicherheit nach DIN 230-2	
<i>einseitige Wiederholpräzision der Positionierung</i>	
Hinfahrt	0,04 mm
Rückfahrt	0,03 mm
einer Achse	0,09 mm
<i>einseitige systematische Positionsabweichung einer Achse</i>	
Hinfahrt	0,23 mm
Rückfahrt	0,18 mm
zweiseitige systematische Positionsabweichung einer Achse	0,23 mm
gemittelte zweiseitige Positionsabweichung einer Achse	0,19 mm
<i>einseitige Positionsunsicherheit</i>	
Hinfahrt	0,25 mm
Rückfahrt	0,19 mm
Achse	0,25 mm

gelagert ist. Gegenwärtig wird die Qualität der Modellierung einer Nickkorrektur untersucht, aus der sich die Forderungen für eine eventuelle Nachjustierung der Führungsschienen in einer der folgenden Entwicklungsphasen ergeben. Angestrebt wird, auch für hohe Messaufbauten die hervorragende Positionierung durch den Zahnriemenantrieb voll auszuschöpfen. Vorübergehend werden die Versuchsaufbauten möglichst niedrig (d.h. in Zahnriemennähe) gehalten.

Über die beschriebenen Effekte hinausgehende Merkmale werden momentan durch unabhängige Untersuchungen evaluiert. Weil die Positionsunsicherheiten im kinematischen Betrieb eng mit den Zeitunsicherheiten verknüpft sind, können beide nur im Zusammenhang betrachtet werden. Hier liegt eine weitere Herausforderung, denn die Zeitunsicherheit sollte in der Größenordnung $1 \mu\text{s}$ liegen, um bei Maximalgeschwindigkeit der Positionierungsunsicherheit zu entsprechen. An der Realisierung wird momentan gearbeitet. Trotzdem sei bemerkt, dass der Vergleich mit einem Formel-1-Wagen im metaphorischen Sinn in verschiedener Hinsicht gerechtfertigt ist, denn mit der am GIK verfügbaren Messbahn sind sehr gute interferometerfreie Positionierungen und die – im Vergleich zu Linearbahnen anderer geodätischer Institutionen – mit Abstand größten Geschwindigkeiten erreichbar.

3 Anwendungen

3.1 Kinematisch

Die kinematischen Anwendungen sind vielfältig. Eine fast schon klassische Anwendung ist die Bestimmung der Zeitverzögerung zwischen Richtungs- und Distanzmessung bei polaren Messsystemen. Noch unkomplizierter lässt sich die Reaktion eines zielverfolgenden (trackenden) Messsystems auf lokale räumliche Abschattungen untersuchen. In diesem Zusammenhang wird die Hochgeschwindigkeitsmessbahn zur Ermittlung der Leistungsgrenzen von zielverfolgenden Systemen – nicht nur aus dem geodätischen Bereich – beitragen, weil nun ein geometrischer Soll-Ist-Vergleich von linearen Trajektorien möglich ist. Hierbei werden alle (drei) polaren Messelemente angesprochen, wenn der Messkopf deutlich höher oder tiefer als die Trajektorie positioniert ist. Diese Untersuchung kann hinsichtlich Objektbeschleunigung und/oder Abschattung durchgeführt werden. Darüber hinaus lassen sich aufgrund der hohen Beschleunigungsmöglichkeiten des Messwagens Objektschwingungen realisieren, so dass auch eine real getestete Aussage über die Eignung von ATR-Systemen zur Schwingungsmessung möglich wird.

Prinzipiell gelten diese Aussagen auch für Lasertracker. Allerdings wird in der jetzigen Ausbaustufe die Untersuchung auf den unteren Geschwindigkeitsbereich des Lasertrackers beschränkt bleiben müssen, weil für diese Genauigkeitsklasse die Unsicherheit der Zahnriemenposi-

tionierung zu groß ist und das implementierte Interferometer nur beschränkte Verfahrensgeschwindigkeiten erlaubt. Dieses Hindernis werden zu entwickelnde Simultankalibriermethoden überwinden. Einen wesentlichen Beitrag wird die Messbahn bei der Untersuchung der Ankopplung der Interferometerdistanz eines kinematisch messenden Trackers an seine ADM-Distanz leisten. Sowohl bei den oben angesprochenen polaren punktmessenden Systemen wie auch bei Laserscannern wird die Ermittlung des realen raumzeitlichen Auflösungsvermögens gelingen, wobei der untersuchte Scanner sowohl im Punkt- wie auch im Profilmodus betrieben werden könnte. Letztendlich können auch spezielle Fragestellungen wie beispielsweise nach einem eventuell vorhandenen Spaltenjitter bei klassischen Flächenscannern untersucht werden.

Des Weiteren lassen sich Objektbewegungen simulieren. Dies kann zur Planung und Bewertung von kinematischen Messabläufen von erheblichem Vorteil sein, weil so das reale Objekt zunächst nicht benötigt wird. Außerdem können zusätzliche Störeinflüsse auf einen bewegten Sensor studiert werden. Insbesondere bei dynamisch messenden Systemen wie Neigungsmessern (beispielsweise implementiert in Gleismesswagen und SmartTrack™) ist dieser Einfluss nicht unerheblich.

3.2 Stop and Go

In der Betriebsart »Interferometer« werden Präzisionsmessungen im Stop-and-Go-Modus durchgeführt. Hierzu zählen die klassischen Kalibrierungen wie die Ermittlung der Additionskorrektur von EDM-Geräten und Tachymetern auf Reflektoren sowie die Ermittlung der (materialabhängigen) Additionskorrektur von reflektorlos messenden Distanzmessern, Tachymetern (vgl. Juretzko, 2006) und Laserscannern. Natürlich können auch andere Positioniereinrichtungen wie iGPS untersucht werden. Darüber hinaus lassen sich Winkelmesseinrichtungen durch interferometrische Rückführung prüfen – was von Anwendern in der Industrie verlangt wird. Die Überprüfung interferometrischer Längenmesssysteme (geringerer Genauigkeit) ist wegen der leicht realisierbaren Strahlführung ebenfalls möglich. Vorteilhaft ist, dass alle Prüfungen und Kalibrierungen dank des modularen Aufbaus von COMET-PRO vollautomatisch ablaufen können.

4 Ausblick

Der aktuelle Ausbaustand der Präzisions-High-Speed-Linear-messbahn lässt schon jetzt Raum für vielfältige Untersuchungen, sowohl im Präzisions- als auch im kinematischen Anwendungsbereich. Die folgende Entwicklungsphase sieht die Untersuchung und Optimierung der kinematischen Eigenschaften der Einrichtung vor. Dann können auch anspruchsvolle kinematische Messaufgaben

mit hoher raumzeitlicher Auflösung durchgeführt werden. Nicht zuletzt setzt die Realisierung der Krafteinleitung durch Zahnriemen einen Meilenstein in der Linearbahntwicklung. Dadurch konnte die mit Abstand schnellste Messbahn im geodätischen Prüfbereich realisiert werden, die zudem noch im Betriebsmodus »Interferometer« bezüglich der Kalibrierung und Untersuchung der Eigenschaften von (geodätischen) Distanzmesssystemen keine Wünsche offen lässt.

Dank

Ich danke unserem Informationselektroniker Michael Barth für die sorgfältige und umsichtige Erstellung von COMET-PRO und unserem Konstrukteur Dipl.-Ing. Peter Runge für die couragierte und erfolgreiche Realisierung einer eher ungewöhnlichen Kraftübertragungstechnologie.

Literatur

Bayer, G.: Zur hochgenauen automatischen Führung langsam bewegter Objekte mit Zielverfolgungssystemen im Nahbereich. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Dissertation, Reihe C, Heft Nr. 398, 1992.

Juretzko, M.: Leistungsfähigkeit des reflektorlosen Distanzmessmoduls R300 der Tachymeterserie TPS1200 von Leica. FuB, 2/2006, S. 90–95, 2006.

Schlemmer, H.: 30 Jahre Laser-Interferenzkomparatoren für Präzisionsnivellierlatten. AVN 6/2005, S. 198–199, 2005.

Fräger, C.: Zwei mit dem Hang zur Bewegung – Vergleich von Leistungsdaten von Linearachsen mit Zahnriemen und Linearmotoren. KEM, 6/2006, S. 46–49, 2006.

DIN 230-2: Prüfregeln für Werkzeugmaschinen. Teil 2: Bestimmung der Positionierunsicherheit und der Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteuerten Achsen. Beuth-Verlag, Berlin, 2000.

DIN V ENV 13005: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (Deutsche Fassung ENV 13005). Beuth-Verlag, 1999.

DIN 55350: Teil 13: Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen. Beuth-Verlag, 1999.

Anschrift der Autorin

Prof. Dr.-Ing. Maria Hennes
 Universität Karlsruhe (TH)
 Geodätisches Institut
 Englerstraße 7, 76128 Karlsruhe
 hennes@gik.uni-karlsruhe.de