

Vermessungen im Sub-Millimeter-Bereich Anwendungsbeispiele aus der Industrie- und Präzisionsvermessung¹



Teil 1

Willfried Schwarz

1 Einleitung

Der Bereich der Ingenieurgeodäsie wird geprägt zum einen durch die Vielfalt der in der Praxis auftretenden Aufgabenstellungen, die unter den jeweils herrschenden Umfeld- und Randbedingungen zu bearbeiten sind, und zum anderen durch die geforderten Genauigkeiten. Die Aufgabenfelder reichen von den klassischen Vermessungen im Zuge der Realisierung von Bauvorhaben, der Steuerung und Positionierung von Baumaschinen, den anspruchsvollen Vermessungsarbeiten beim Bau von Tunnelbauwerken mit ihren speziellen Problemen zur Bestimmung bzw. zur Reduzierung von Refraktionseinflüssen, der Überwachung von sicherheitsrelevanten Bauwerken, wie z. B. Staumauern und Staudammanlagen, bis zu den hochpräzisen Vermessungen im Bereich des Maschinenbaus und der Hochenergiephysik zur Justierung vorhandener Teilchenbeschleuniger einschließlich der Erstellung von Messkonzepten für zukünftige Linearbeschleuniger. Durch die Weiterentwicklungen, insbesondere im Bereich des Instrumentenbaus in den letzten Jahren, stehen leistungsfähige Messtechnologien zur Verfügung; sie eröffnen in der Praxis neue Möglichkeiten und erschließen weitere Anwendungsfelder. Hervorgehoben werden soll nur bei den Tachymetern die reflektorlose Streckenmessung mit Reichweiten in den Bereich von einigen 100 m und die Steigerung der Messfrequenz bis zu 10 Hz. Das Spektrum der geforderten Genauigkeiten erstreckt sich über den Millimeterbereich bis in den Mikrometerbereich hinein. Wie in der Ingenieurgeodäsie üblich, werden die Genauigkeiten zumeist als relative Genauigkeiten (Nachbargenauigkeit) gefordert. Dieser Gedanke sollte von Geodäten auch bei der Angabe von Genauigkeiten seinem Auftraggeber gegenüber, der in der Regel ein Nichtgeodät ist, beachtet werden. Es ist wenig sinnvoll, die Genauigkeitssituation durch datumsabhängige Konfidenzellipsen zu beschreiben. Geeigneter und für den

¹ Diese Veröffentlichung stellt die schriftliche Fassung der unter gleichem Titel am 10.02.2006 in München und am 17.03.2006 in Würzburg im Rahmen der Wintervortragsreihe 2005/2006 des DVW-Bayern e. V. gehaltenen Vorträge dar.

nichtgeodätischen Auftraggeber einsichtiger sind datumsunabhängige Genauigkeitsmaße, die entsprechend der jeweiligen Aufgabenstellung als Funktionen der Unbekannten in der Ausgleichung berechenbar sind. Weiterhin sollte der Bezug für die Genauigkeiten mitgeteilt werden. Punkte über einen Bereich von z. B. 10 m auf 0,5 mm in einer Geraden einzurichten ist nicht weiter schwierig; Punkte hingegen über einen Bereich von z. B. 600 m, wie es die zukünftigen Linearbeschleuniger verlangen, mit dieser Genauigkeit zu vermessen, ist mit dem bekannten und zur Zeit verfügbaren Messinstrumentarium kaum möglich; es sind neue Messtechnologien dafür zu entwickeln.

In diesem Beitrag, der wegen seines Umfangs in zwei Teilen erscheint, sollen im ersten Teil unter dem Gesichtspunkt von Vermessungen im Sub-Millimeter-Bereich in einem Überblick die dafür einsetzbaren Messsysteme vorgestellt werden sowie die messtechnischen Aufgabenstellungen bei vorhandenen und bei zukünftigen Teilchenbeschleunigern diskutiert werden. Im zweiten Teil, der im Heft 1/2007 erscheinen wird, werden weiterhin Möglichkeiten der Schwingungsmessungen an Bauwerken und des Einsatzes faseroptischer Sensoren sowie die Möglichkeiten der Industriephotogrammetrie im Bauwesen angesprochen. Diese Auswahl ist mehr oder weniger willkürlich; sie erhebt nicht den Anspruch all das, was die Ingenieurgeodäsie ausmacht, abzudecken.

2 Überblick der Messsysteme

Moderne *Tachymeter* zählen zu den Universalinstrumenten der Geodäten. Servotachymeter können mit der automatischen Zielerfassung Reflektorpunkte selbsttätig anzielen und Messungen dahin ausführen. Sie eignen sich damit besonders bei Online-Anwendungen, wie z. B. bei der permanenten Überwachung von Bauwerken. Aufgrund ihrer Messfrequenz von bis zu 10 Hz können sie auch bei kinematischen Anwendungen, wie z. B. der Steuerung von Baumaschinen, eingesetzt werden. Mit den modernen Tachymetern lassen sich Strecken zu Prismen und zu Punkten messen, die mit einer Reflexfolie markiert sind. Darüber hinaus sind berührunglose Streckenmessungen in einem Entfernungsbereich von einigen 100 m möglich. Besonders diese Weiterentwicklung eröffnet neue Möglichkeiten, z. B. bei der Bestandsdokumentation bestehender Bauwerke. Tachymeter arbeiten in einem gemeinsamen Bezugssystem; die aufgenommenen Punkte werden in einem übergeordneten Koordinatensystem erfasst. Tachymeter benötigen keine Messbasis wie viele z. B. im Bauwesen eingesetzte Weg- und Abstandssensoren. Mit Präzisionstachymetern können die Horizontalrichtung und der Zenitwinkel mit einer Standardabweichung von 0,2 mgon (entspricht 0,2 mm auf 50 m) und die Strecken im Nahbereich bis z. B. 100 m mit einer Standardabweichung von 0,2 mm bestimmt werden.

Mit dem Verfahren der *Autokollimation* können mit einem Autokollimationsfernrohr Richtungsänderungen eines Oberflächenplanspiegels mit hoher Genauigkeit bestimmt werden /Schwarz (1993), Seite 139ff/. Wird dieser Autokollimationsspiegel auf einen Verschiebeschlitten montiert, so lassen sich hochpräzise Geradheitsmessungen ausführen. Dazu wird der Verschiebeschlitten in Intervallen, die dem Abstand seiner Fußpunkte entsprechen, längs der zu untersuchenden Struktur versetzt. In den jeweiligen Positionen werden mit dem Autokollimationsfernrohr die durch die Form der Struktur hervorgerufenen Richtungsänderungen der Spiegelnormalen gemessen. Die Richtungsänderungen multipliziert mit dem Fußabstand werden summiert; es ergibt sich daraus der Geradheitsverlauf der Struktur. Mit diesem Verfahren lassen sich in einem Arbeitsgang horizontale und vertikale Ablagen bestimmen. Wird eine Richtungsänderung auf $0,5'' (= 0,15 \text{ mgon})$ gemessen, so ergibt sich die relative Lageabweichung zweier mit einem Fußabstand von z. B. 100 mm benachbarter Messpunkte auf $0,2 \mu\text{m}$. Danach sollte es möglich sein, die Geradlinigkeit einer z. B. 10 m langen Struktur auf wenige Mikrometer genau zu bestimmen. Allerdings wird die Genauigkeit des Verfahrens durch die Summationen ungünstig beeinflusst.

Mit dem Verfahren der *Laserinterferometrie* lassen sich Wegänderungen auf Bruchteile eines Mikrometers genau messen /Heister (1993), Seite 79ff/. Dazu werden zwei Lichtwellen so überlagert, dass beim Verschieben der beiden Wellen zueinander Lichtinterferenzen in Form von periodischen Helligkeitsschwankungen entstehen. Die Anzahl der dabei eintretenden Interferenzen multipliziert mit der Wellenlänge des Lichts ergibt den Verschiebebetrag einer Welle in Bezug zur anderen. Interferenzen können aber nur beobachtet werden, wenn zwischen den beiden Wellenzügen eine konstante Phasenbeziehung besteht, die beiden Wellen also kohärent sind. Für die interferometrische Längenmessung eignen sich wegen ihrer großen Kohärenzlänge besonders frequenz-stabilisierte Helium-Neon-Laser mit einer Wellenlänge von 633 nm. Die Kohärenzlänge beträgt in der Regel bis zu ca. 60 m, kann bei speziellen Lasern aber auch 240 m erreichen. Im Vergleich dazu hat »weißes Licht« eine Kohärenzlänge von nur $1,5 \mu\text{m}$. Aufgrund der Kohärenzlänge ist der Messbereich der Interferometrie auf ca. 30 m begrenzt. Über spezielle optische Komponenten können mit einem Laserinterferometer auch Winkelmessungen und Geradheitsmessungen vorgenommen werden. Da bei einem Interferometer die Helligkeitsschwankungen gezählt werden, es also inkrementell arbeitet, ist z. B. bei der Bestimmung einer Distanz der Reflektor vom Anfangspunkt bis zum Endpunkt der Strecke kontinuierlich ohne Signalunterbrechung zu verschieben. Die Messfrequenz ist bei einem Interferometer verhältnismäßig groß; es können über 10 000 Messungen in einer Sekunde vorgenommen werden. Damit eignen sich Laserinterferometer zur Messung dynamischer Vorgänge, z. B. für Schwingungsmessungen.

Eine Weiterentwicklung des interferometrischen Verfahrens stellt das *absolutmessende Halbleiterinterferometer* dar, das auch als *Frequency Scanning Interferometry (FSI)* bezeichnet wird. Bei diesem Interferometertyp muss für eine Messung der Reflektor nicht mehr vom Anfangs- zum Endpunkt der auszumessenden Strecke verschoben werden. Ähnlich wie bei der elektrooptischen Distanzmessung wird auf dem Endpunkt der auszumessenden Distanz ein Reflektor fest aufgebaut und das absolutmessende Interferometer bestimmt direkt die gesamte Distanz. Dazu wird das diesmal von einer Diode emittierte Licht aufgeteilt und einem Referenzinterferometer sowie dem eigentlichen Messinterferometer zugeführt. Bei der eigentlichen Messung, bei der die Laserdiode in ihrem Frequenzbereich durchgestimmt wird, ergibt sich auf der Strecke des Mess- und des Referenzinterferometers jeweils eine unterschiedliche Anzahl von Interferenzänderungen, aus denen bei bekannter Länge des Referenzinterferometers die absolute Distanz berechenbar ist /Lang, Thiel (1993), Seite 93f/.

Bei der *Weißlichtinterferometrie* nutzt man die sehr kurze Kohärenzlänge des weißen Lichts aus. Immer wenn zwei optische Wege im Bereich der Kohärenzlänge – also auf wenige Mikrometer – gleich lang sind, gibt es Interferenzeffekte. Ein Aufbau zur Kalibrierung von Endmaßen ist aus Bild 1 ersichtlich /Schröder, Treiber (2002)/. Die Vorderfläche des Endmaßes ist verspiegelt und auf seiner Endfläche ist ein seitlich überstehender Spiegel angesprengt. Ist der optische Weg zwischen dem verschiebbaren Spiegel S_1 und der Vorderfläche des Endmaßes (S_3) bzw. dem Spiegel an der Endfläche des Endmaßes (S_2) gleich lang, können Interferenzeffekte beobachtet werden. Der Verschiebebetrag des Spiegels S_1 zwischen den beiden Positionen (S_2 und S_3), an denen die Interferenzeffekte auftreten, entspricht der Länge des Endmaßes.

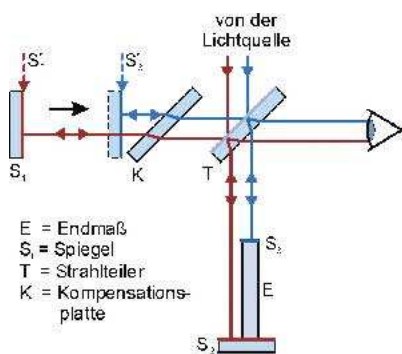


Bild 1: Weißlichtinterferometrie zur Kalibrierung von Endmaßen nach /Schröder, Treiber (2002), Seite 159f/

Seit einigen Jahren gibt es *Lasertracker*, bei denen der Laserstrahl eines Interferometers über einen schwenkbaren Spiegel zu einem Reflektor abgelenkt wird.

Ein Teil des im Reflektor zurückgeworfenen Laserstrahls wird im Lasertracker auf eine Positionsdiode gegeben. Verändert der Reflektor seine Raumposition, so trifft der Laserstrahl die Positionsdiode nicht mehr zentrisch. Aus den Ablagen kann ein Signal abgeleitet werden, um den Spiegel so nachzusteuern, dass der reflektierte Laserstrahl wieder zentrisch auf der Positionsdiode auftrifft. Mithin kann der Reflektor frei im Raum bewegt werden, ohne den Bezug zum Laserstrahl zu verlieren. Die Entfernungsänderungen des Reflektors in Bezug zu einer festen Position am Lasertracker (Home-Position) werden interferometrisch gemessen. Mit der richtungsmäßigen Erfassung der Spiegelstellung ist somit eine dreidimensionale Positionsbestimmung des Reflektors online mit einer Messfrequenz von einigen kHz möglich. Um den Nachteil der Interferometrie, dass bei einer Unterbrechung des Laserstrahls mit den Messungen neu begonnen werden muss, zu reduzieren, verfügen Lasertracker zusätzlich über einen absolutmessenden Distanzmesser mit einer Auflösung von $< 10 \mu\text{m}$. Damit kann bei einer etwaigen Signalunterbrechung der absolute Bezug sofort wiederhergestellt werden. Lasertracker werden u. a. eingesetzt im Automobilbau zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der dort für die Montage verwendeten Roboter, beim Flugzeugbau sowie bei der Vermessung und Justierung von Teilchenbeschleunigern. In den letzten Jahren ist die Funktionalität der Lasertracker der Firma Leica um einen Handtaster und einen Handscanner erweitert worden /*NN-AICON*/. Über eine auf den Tracker aufgesetzte Kamera werden Leuchtdioden am Handtaster bzw. am Handscanner beobachtet, um daraus die räumliche Orientierung abzuleiten. Die räumliche Position des Handtasters bzw. des Handscanners wird mit dem Tracker zu einem auf diesen Einheiten festinstallierten Prisma gemessen. Mit dem Handtaster können somit verdeckte Punkte manuell angetastet und räumlich im Koordinatensystem des Trackers eingemessen werden. Mit dem Handscanner, der auch dreidimensional arbeitet, lassen sich seine Messwerte ebenfalls ins Koordinatensystem des Trackers transformieren. Damit können Oberflächen, z. B. von Fahrzeugen, mit einer hohen Punktdichte digitalisiert werden.

3. Vermessung von Teilchenbeschleunigern

Im Bereich der Hochenergiephysik werden Teilchenbeschleuniger benötigt, um den Aufbau unserer Materie zu verstehen. Es werden die kleinsten Teilchen des Universums gesucht und die Kräfte, die diese zusammenhalten. Den Physikern stehen dafür heutzutage Teilchenbeschleuniger als »Super-Mikroskope« zur Verfügung, mit denen sich dank modernster Techniken (extrem schnelle Elektroschaltungen, Supraleitung, Hochvakuum usw.) Strukturen untersuchen lassen, die 100 000 mal kleiner sind als der Atomkern mit einem Durchmesser von 10^{-14} m. Es werden also Strukturen untersucht, die kleiner als 10^{-19} m sind. In einem Teilchenbeschleuniger werden Elektronen, Positronen bzw. Protonen

in einem Vakuumrohr mit Hilfe elektromagnetischer Felder quasi auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, um sie dann in den sogenannten Experimenten gegenseitig zur Kollision zu bringen. Teilchenbeschleuniger gibt es in der klassischen kreisförmigen Anordnung ihrer Komponenten wie z. B. den Beschleuniger HERA beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg mit einem Umfang von 6,4 km bzw. den LEP-Beschleuniger beim CERN in Genf mit einem Umfang von ca. 27 km oder in einer geradlinigen Anordnung wie z. B. beim geplanten *Internationalen Linearcollider ILC*² mit einer Länge von über 30 km. Bei der Justierung der Beschleuniger kommt es darauf an, dass benachbarte Komponenten zueinander präzise aufgestellt werden. Es wird eine hohe Nachbargenauigkeit für die beiden Richtungen quer zum Strahlverlauf gefordert. Die Genauigkeit, mit der die Komponenten der Beschleuniger zu justieren sind, ist unterschiedlich. Bei den klassischen Kreisbeschleunigern wie z. B. beim DESY wird eine Nachbargenauigkeit von 0,2 mm bis 0,4 mm über einen Entfernungsbereich von maximal 100 m gefordert. Beim zukünftigen Linearbeschleuniger wird hingegen gefordert, dass seine Komponenten mit einer Nachbargenauigkeit (Standardabweichung) von 0,5 mm in der Lage quer zur Strahlrichtung und von 0,2 mm in der Höhe jeweils über einen Entfernungsbereich von 600 m zu justieren sind. Obwohl die Genauigkeitsforderungen dem Betrage nach in der gleichen Größenordnung liegen, ist doch der Entfernungsbereich beim Linearbeschleuniger im Vergleich zum Kreisbeschleuniger wesentlich größer. Entsprechend höher sind die Anforderungen an die Messtechnik, diese Genauigkeitsforderungen zu befriedigen.

3.1 Kreisbeschleuniger

Das Grundprinzip der Justierung eines Kreisbeschleunigers soll am Beispiel der Protonen-Maschine des HERA-Beschleunigers erläutert werden /Schwarz (1998)/. Die wesentlichen Komponenten des Beschleunigers sind Quadrupol- und Dipolmagnete (Bild 2). Ein prädestiniertes Verfahren zur Erreichung einer hohen Nachbargenauigkeit besteht darin, auf der Komponente selbst Winkelmessungen zu seinen Nachbarn vorzunehmen. Bei einer Winkelmessgenauigkeit von 0,3 mgon wird bei einem Abstand der Nachbarn von jeweils 50 m die radiale Lagekomponente mit einer Standardabweichung von 0,12 mm bestimmt. Die Streckenmessgenauigkeit ist dabei von untergeordneter Bedeutung. Dieses Messverfahren wurde beim DESY lange Zeit praktiziert. Erst durch die Entwicklung von Präzisionsdistanzmessern mit Streckenmessgenauigkeiten von < 0,3 mm wurde dieses Verfahren abgelöst.

² Der Ort, an dem der Linearbeschleuniger aufgebaut werden soll, ist noch nicht festgelegt worden.

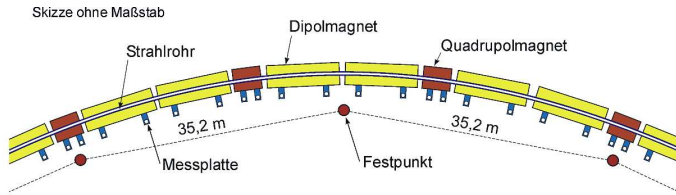


Bild 2: Struktur der Protonen-Maschine des HERA-Beschleunigers

An die Komponenten des Beschleunigers sind jeweils zwei Messplatten montierbar, die in ihrer Mitte eine kegelförmige Bohrung zur Aufnahme einer Taylor-Hobson-Kugel mit einem Durchmesser von 88,9 mm haben (Bild 3). Dieses dreidimensionale Zentriersystem ist erforderlich, weil HERA in einer schrägen Ebene mit einer maximalen Neigung von ca. 1% aufgebaut worden ist. Für die Richtungsmessungen sind die Taylor-Hobson-Kugeln mit einem Zielzeichen und für die Streckenmessungen mit einem Reflektor ausgestattet. Das Zielzeichen befindet sich in der Mitte der Kugel, so dass die Kugel lediglich in die Aufnahme zu legen ist; eine Horizontierung, wie bei den klassischen geodätischen Zielzeichen, ist hier nicht erforderlich. Beim DESY wurde ein Untersatz konstruiert, mit dem auch Vermessungsinstrumente auf die Messplatten zentriert werden können (Bild 3). Auf den Messplatten befinden sich jeweils zwei in radialer Richtung angeordnete Kugeln, so dass mit einem Neigungssensor die Querneigung der Komponente gemessen und justiert werden kann.

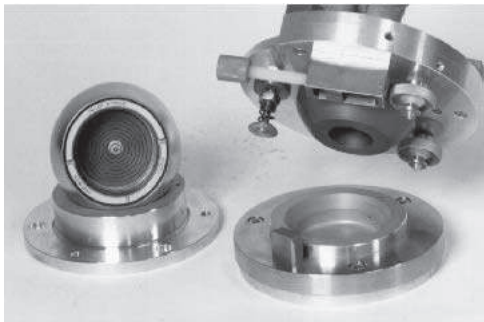


Bild 3: Zielkugel und Instrumentenadapter für das Taylor-Hobson-Zentriersystem

Mit einem Präzisionstachymeter wird der gesamte Beschleuniger als räumlicher Polygonzug mit übergreifenden Richtungen aufgemessen. Punkte zwischen den Instrumentenstandpunkten werden doppelt polar aufgemessen. Insgesamt fallen bei einer Vermessung der Protonenmaschine ca. 10 000 Beobachtungen an. Aus diesen Beobachtungen werden in einer Ausgleichung nach vermittel-

den Beobachtungen die ca. 5 000 Koordinatenunbekannten einschließlich der Orientierungsunbekannten berechnet. Ein Vergleich mit den Sollkoordinaten liefert Abweichungen in radialer Richtung (Bild 4) und in der Höhe. Die Komponenten werden nun nicht im Rahmen der Justierung um die berechneten Ablagen verschoben, sondern sie werden entsprechend der Forderung nach einer hohen Nachbargenauigkeit nur um die Beträge justiert, die von einer ausgleichenden Funktion (Spline-Funktion) abweichen.

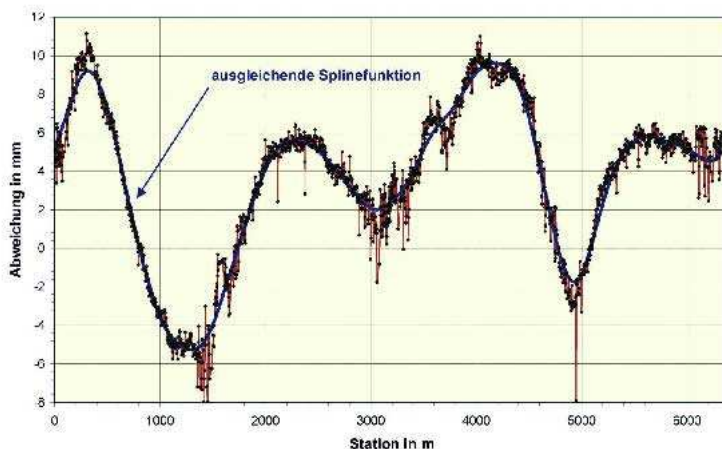


Bild 4: Radiale Abweichungen der Protonenmaschine im HERA-Tunnel vor der Feinjustierung

Wie bereits erwähnt, ist es heutzutage nicht mehr unbedingt erforderlich, die Messungen auf den Komponenten selbst auszuführen. Aufgrund der vorhandenen Streckenmessgenauigkeiten moderner Tachymeter können andere Messkonzepte angewendet werden. Ebenso werden Lasertracker bei der Vermessung von Teilchenbeschleunigern erfolgreich eingesetzt.

3.2 Zukünftige Linearbeschleuniger

Bereits vor 5 Jahren wurde vom DESY eine Projektstudie zu einem Linearcollider TESLA (TESLA = TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator) vorgelegt. Nach der Grundsatzentscheidung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Februar 2003 sollen aber die Arbeiten am TESLA-Projekt nur noch insofern weitergeführt werden, um die Beteiligung Deutschlands an einem späteren globalen Linearcolliderprojekt (z. B. beim mittlerweile initiierten ILC-Projekt) zu ermöglichen. Die weiteren Ausführungen in diesem Beitrag beziehen sich trotzdem auf das TESLA-Projekt, da die Genauigkeitsanforderungen für die Justierung von Linearbeschleunigeranlagen auch bei anderen Projektvarianten

vergleichbar sind. An der Bauhaus-Universität Weimar, Professur Geodäsie und Photogrammetrie, wurden im Rahmen einer bis Ende 2003 bestandenen Kooperation mit dem DESY Messverfahren entwickelt und untersucht, die für die Justierung des geplanten Linearbeschleunigers unter Beachtung der bereits angesprochenen Genauigkeitsforderungen eingesetzt werden können.

Da im TESLA-Beschleuniger mehrere Strahlführungswege mit eigenen Komponenten aufgebaut werden sollen, ist geplant, nicht jeden Strahlführungsweg eigenständig zu vermessen, sondern es soll vielmehr eine Art Basisvermessung mit Referenzmarken an der Tunnelwand des Beschleunigers erfolgen, von denen dann die Komponenten eines jeden einzelnen Strahlführungsweges separat justiert werden können /Albert, Schwarz (2004)/. Diese Referenzpunkte können allerdings nur als Zielpunkte dienen, da der zum Aufbau eines Vermessungsinstrumentes erforderliche Freiraum nicht vorhanden ist. Das Vermessungsinstrument kann auf einen längs des Tunnels verschiebbaren Wagen aufgesetzt werden, der in entsprechenden Schienen läuft und mit Klemmvorrichtungen festgesetzt wird.

Eine Genauigkeitsanalyse zeigt, dass mit einem Polygonzug mit übergreifenden Richtungen unter Verwendung eines Präzisionstachymeters die Genauigkeitsforderungen eingehalten werden können /Schwarz 1998/. Dabei wurde aber nicht beachtet, dass die Messungen durch systematische Einflüsse beeinträchtigt werden können. Als besondere Einflussgröße ist hier die Refraktion (Zielstrahlkrümmung) zu nennen. Die Refraktion wird in erster Linie durch den Temperaturgradienten der Atmosphäre bestimmt, in der sich der Zielstrahl ausbreitet. Ein im ganzen Tunnel als konstant angenommener Temperaturgradient von nur 0,1 K/m quer zur Tunnelachse bewirkt, dass über den Bereich von 600 m eine maximale Abweichung von der Geradheit von 4,2 mm auftritt. Dieser Wert übersteigt die geforderte Genauigkeit von 0,5 mm um fast das 10-fache. Außerdem ist der der Modellrechnung zugrunde liegende Temperaturgradient sehr klein; tatsächliche Temperaturgradienten können in einem Tunnel wesentlich größer sein. Deshalb wird vorgeschlagen, als Ergänzung und zur Kontrolle des optischen Messverfahrens, die Lagemessungen mit gespannten Drähten und die Höhenmessung hydrostatisch vorzunehmen.

Das Grundprinzip des Verfahrens mit gespannten Drähten besteht darin, die Abstände von drei Tunnelpunkten in Bezug zu einer mechanisch realisierten Geradheitsreferenz, z. B. in Form eines gespannten Drahtes, zu messen. Aus den gemessenen Abständen kann der Brechungswinkel auf dem mittleren Punkt zu den beiden Nachbarpunkten ermittelt werden. Indem die Referenz in Intervallen der Punktabstände längs des Tunnels geführt wird, lassen sich nacheinander die Brechungswinkel auf den Referenzpunkten bestimmen. Da dieses Verfahren

nicht redundant ist, ist geplant, bei Punktabständen von 4,5 m einen insgesamt 22,5 m langen Draht als Geradheitsreferenz zu benutzen. In jeder Drahtposition werden dann die Abstände zu 6 Referenzpunkten gemessen. Die Genauigkeitsanalyse ergibt, dass die geforderte maximale Standardabweichung in der Lage von 0,5 mm über 600 m eingehalten wird, wenn jede einzelne Abstandsmessung mit einer Standardabweichung von 5 μm ausgeführt wird. Bei diesem Verfahren gibt es keine Refraktion wie bei optischen Messverfahren. Allerdings gibt es andere Faktoren, denen Beachtung zu widmen ist. Durch entsprechende Vorkehrungen ist z. B. dafür zu sorgen, dass Luftströmungen im Tunnel den Draht nicht aus seiner Ruhelage einseitig auslenken. Auch ist sicherzustellen, dass der gespannte Draht auch tatsächlich als Geradheitsreferenz (nur für den Grundriss) angesehen werden kann. Zur weiteren Erhöhung der Redundanz ist vorgesehen, nicht nur mit einem Draht zu messen, sondern zwei einzusetzen.

Für die berührungslose Antastung des Referenzpunktes an der Tunnelwand und des gespannten Drahtes wurde an der Professur Geodäsie und Photogrammetrie der Bauhaus-Universität Weimar ein Positionssensor entwickelt, der den Zielpunkt über zwei vor dem Objektiv einer CCD-Kamera montierten speziellen Glasprismen als Doppelbild auf dem CCD-Sensor abbildet (Bild 5). Bewegt sich der Zielpunkt in Richtung der Kamera, so verändert sich der Abstand der beiden Bilder. Untersuchungen haben gezeigt, dass mit diesem Positionssensor Entfernungsänderungen in einem Messbereich von ca. 2 mm mit einer Standardabweichung von $< 1 \mu\text{m}$ (Bild 6) erfasst werden können /Albert u. a. (2002)/. In jedem der 6 vorgesehenen Messwagen (Bild 7) ist jeweils ein Sensor für die Einmessung des Referenzpunktes und ein weiterer für die Erfassung der Drahtposition vorgesehen.

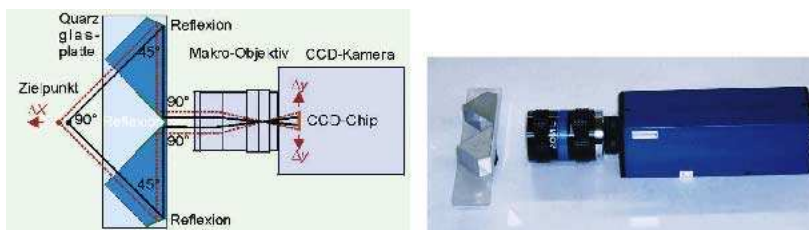


Bild 5: Positionssensor – Prinzipskizze und Abbildung

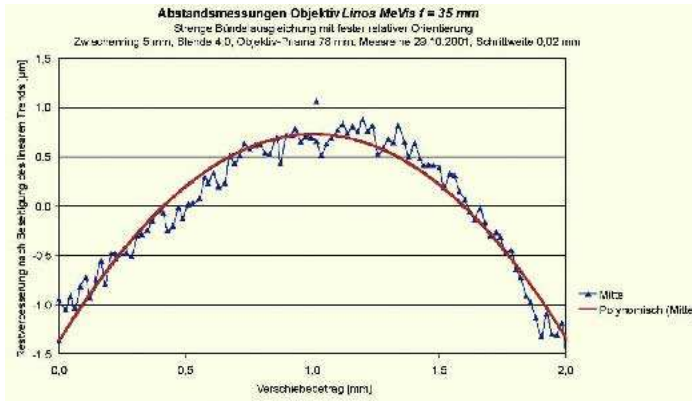


Bild 6: Kalibrierergebnis des Positionssensors

In Bild 7 ist das Prinzip des Zusammenwirkens der Einzelkomponenten eines Messwagens dargestellt. Neben den angesprochenen Sensoren werden zusätzlich Neigungssensoren, CCD-Kameras für die Grobpositionierung usw. benötigt. Auch können die beiden Positionssensoren – einer misst den Referenzpunkt an der Tunnelwand an, der andere nacheinander die beiden Drähte – um größere Beträge in vertikaler Richtung und quer zur Tunnelrichtung verschoben werden, um mögliche Tunnelfehler in der Größenordnung von mehreren Zentimetern und den Durchhang der gespannten Drähte ausgleichen zu können. Diese Verschiebungen werden mit zwei Wegaufnehmern gemessen.

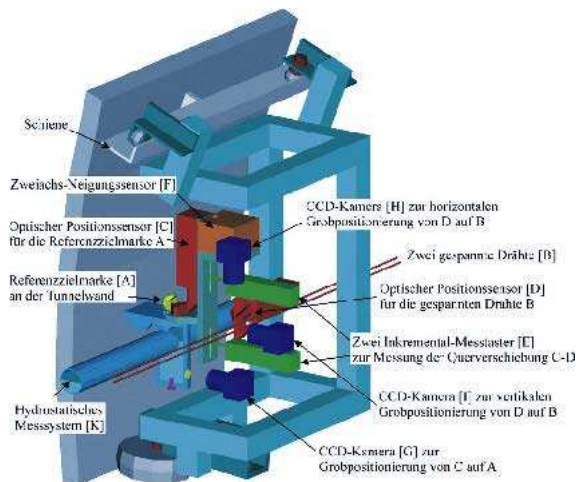


Bild 7: Prinzipskizze eines Messwagens

Eine Alternative zu diesem Messverfahren besteht in der Anwendung eines Lasermessverfahrens (Bild 8). Dieses Verfahren, das für DESY von der Oxford University, Subdepartment of Particle Physics (UK) entwickelt wird, besteht aus den beiden Hauptkomponenten **Laser Straightness Monitoring (LSM)** und **Frequency Scanning Interferometry (FSI)** /Prenting u. a. (2004)/, /Grzelak u. a. (2004)/. Der Grundgedanke bei diesem System ist der gleiche wie beim Drahtmesssystem, nur dass als Geradheitsreferenz nicht Drähte, sondern Laserstrahlen verwendet werden. Die Referenzpunkte an der Tunnelwand werden hierbei mit absolutmessenden Interferometern (vgl. Abschnitt 2) räumlich (Bogenschnitt) eingemessen. Bei der Geradheitsmessung nach dem LSM-Verfahren durchläuft ein Laserstrahl den gesamten Messzug. In den einzelnen Messwagen werden über Strahlteiler Anteile des Laserstrahls ausgekoppelt und auf CCD-Sensoren umgelenkt. Aus den Positionsänderungen der auf die CCD-Sensoren fallenden Laserpunkte können dann Rotationen und Translationen eines jeden Messwagens in Bezug zum ersten und letzten Wagen ermittelt werden. Zur Minimierung der bereits angesprochenen Refraktionseffekte soll das System im Vakuum aufgebaut werden.

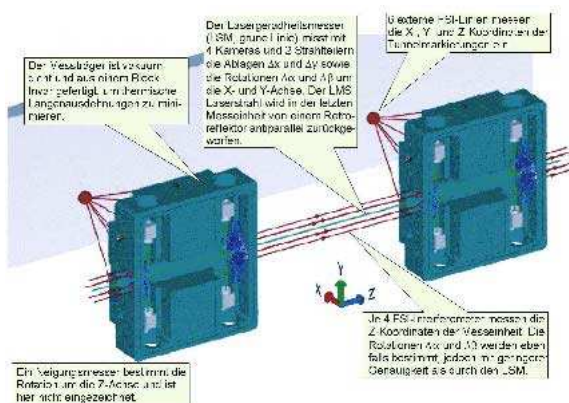


Bild 8: Prinzipieller Aufbau des Lasermessverfahrens (Ausschnitt mit 2 Messwagen) nach /Karyotakis 2004/ und nach /Grzelak u. a. 2004/

Für die Höhenmessung bietet sich, wie bereits erwähnt, das hydrostatische Messverfahren an, da der Beschleuniger der Erdkrümmung folgen und damit auf einer Niveaufläche verlaufen soll. Um Temperatureffekte von vertikalen Wassersäulen, die bei hydrostatischen Messsystemen von besonderer Bedeutung sind, zu minimieren, soll mit einer freien Wasseroberfläche gearbeitet werden. Hierbei wird ein näherungsweise horizontal verlegtes Rohr ungefähr bis zur Hälfte mit Wasser gefüllt, so dass keine vertikalen Wassersäulen entstehen und der Druckausgleich innerhalb des Rohres selbst erfolgen kann, ohne einen zusätzlichen Luftschlauch verlegen zu müssen. Die Wasseroberfläche selbst wird

berührungslos mit Ultraschall eingemessen /Schwarz 2002/. Der Sensor des Typs USM25 der Firma Agfa NDT (ehemals Firma Krautkrämer), der ursprünglich für Aufgaben aus den Bereichen der Materialprüfung entwickelt worden ist, befindet sich am Boden eines jeden Messtopfes; er misst nach dem Laufzeitverfahren den Abstand zur Wasseroberfläche durch das Medium Wasser (Bild 9). Der Sensor wird als Sender und als Empfänger eingesetzt.

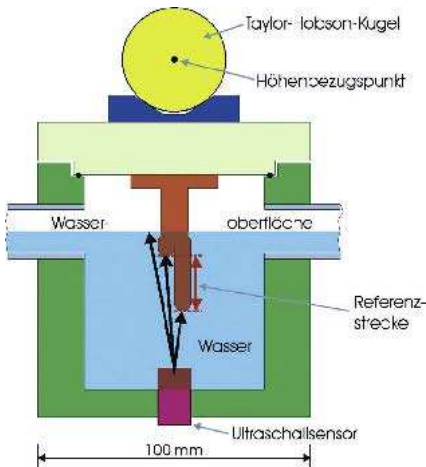


Bild 9: Schemazeichnung des Messtopfes

Der Sensor mit einem Durchmesser von 5 mm sendet als Ultraschallsignal Nadelpulse mit einer Frequenz von 10 MHz aus. Im Wasser mit einer Temperatur von z. B. 10 °C beträgt die Schallgeschwindigkeit 1440 m/s und damit die Wellenlänge 0,144 mm. Die Laufzeit kann auf 4,2 ns genau aufgelöst werden. Damit ergibt sich im Wasser in der Abstandsbestimmung eine Auflösungsgenauigkeit von 3 µm. Die Schallgeschwindigkeit in Wasser wird in erster Linie von der Temperatur des Wassers bestimmt. Um die Schallgeschwindigkeit stets aktuell und mit hoher Genauigkeit zu bestimmen, wird sie aus dem Vergleich der Laufzeiten zu den Endflächen einer Referenzstrecke und deren mechanischer Länge, die mit übergeordneter Genauigkeit ausgemessen worden ist, abgeleitet. Bei der aus Bild 9 ersichtlichen Anordnung der Referenzstrecke zum Messtopf wird das Messergebnis von lokalen Instabilitäten des Sensors nicht beeinträchtigt. Es ist nur wichtig, dass die Referenzstrecke und der Höhenpunkt zueinander stabil sind. Untersuchungsergebnisse über das Messsystem sind in /Albert u. a. 2002/ und /Schlösser 2004/ veröffentlicht.

Bei dieser Höhenbestimmung bildet die freie Wasseroberfläche (Niveaufläche) die Referenz. Um die eingangs angesprochenen Genauigkeitsforderungen einzuhalten, sind entlang der Trasse des Linearbeschleunigers die

Geoidundulationen mit einer Standardabweichung von $< 0,2$ mm (als Nachbar-genauigkeit bezogen auf den Entfernungsbereich von 600 m) zu bestimmen, um gegebenenfalls damit die hydrostatisch bestimmten Höhen der Komponenten der Beschleuniger korrigieren zu können. Das Institut für Erdmessung der Universität Hannover hat dazu entsprechende Untersuchungen durchgeführt. Es wurden Geoidbestimmungen nach der gravimetrischen und nach der astronomischen Methode vorgenommen /Feest u. a. 2003/. Die Ergebnisse in einem Testgebiet in Norddeutschland mit einer Größe von 600 m x 600 m zeigen, dass Geoidundulationen von $> 0,2$ mm durchaus vorkommen können und dass sie besonders mit der astronomischen Methode mit der geforderten Genauigkeit in verhältnismäßig kurzer Zeit bestimmt werden können.

3.3 Sondermessungen

3.3.1 Geradheitsmäßige Überprüfung von Cavity-Strukturen

In Rahmen des TESLA-Projektes bestand die Aufgabe, 6 m lange Cavity-Strukturen (Bild 10), die aus ca. 180 zylinderförmigen aneinandergelöteten Tassen aus reinem Kupfer mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 33,325 mm bestehen, auf Geradlinigkeit zu untersuchen. Für den Betrieb des Linearbeschleunigers ist es erforderlich, dass jede Tasse mit einer Genauigkeit von $10 \mu\text{m}$ in Lage und Höhe auf einer durch alle Tassen definierten vermittelnden Geraden liegt. Die Geradlinigkeitsüberprüfungen wurden u. a. mit dem Verfahren der Autokollimation und nach dem Verfahren der laserinterferometrischen Geradheitsmessungen durchgeführt. Weitergehende Beschreibungen zum Versuchsaufbau sind in /Schwarz 1996/ enthalten. Aus den Bild 11 und 12 ist die hohe Reproduzierbarkeit eines jeden Messverfahrens und die gute Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen beiden Verfahren ersichtlich.



Bild 10: Cavity-Struktur

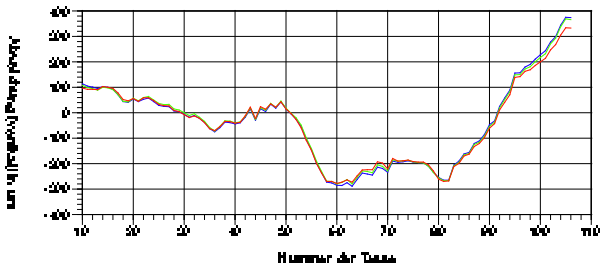


Bild 11: Ergebnisse von Geradheitsmessungen mit dem Verfahren der Auto-kollimation

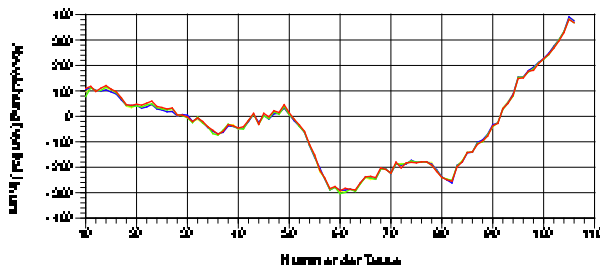


Bild 12: Ergebnisse von interferometrischen Geradheitsmessungen

3.3.2 Qualitätskontrolle sphärischer Oberflächenspiegel

In einem Experiment sind ca. 80 sechseckige, sphärische Spiegelsegmente mit einem Durchmesser von 0,6 m zu einem Kugelsegment zusammensetzen. Im Rahmen der Qualitätskontrolle ist der konstruktionsmäßig mit 10 m festgelegte Radius eines jeden Einzelspiegels zu überprüfen, und es ist ein Qualitätsmaß für die Schliffgüte anzugeben.

Im Versuchsaufbau wird näherungsweise im Brennpunkt des Spiegels (= Radius/2) ein Präzisionstheodolit aufgebaut und die Spiegelachse bei horizontalgestelltem Theodolitfernrohr nach dem Verfahren der Autoreflexion auf das Fernrohrobjektiv ausgerichtet (Bild 13). Eine Platte mit einem regelmäßigen Gitter (Gitterabstand: 60 mm) wird anschließend vor dem Fernrohrobjektiv so positioniert, dass die Platte senkrecht zur Spiegelachse verläuft und die Gitterlinien horizontal bzw. senkrecht stehen. Ein Loch (Durchmesser 60 mm), das sich im Nullpunkt des auf der Platte in Form der Gitterlinien gezeichneten Koordinatensystems befindet, gestattet es, mit dem Theodolit über den Spiegel die Schnittpunkte der Gitterlinien anzumessen. Der Nullpunkt des Koordinatensystems auf der Platte wird als Schnittpunkt zweier gespannter Fä-

den kenntlich gemacht; er wird in die Spiegelachse gelegt. Mit dem Theodolit werden nun über den Spiegel zu den Gitterpunkten die Horizontalrichtungen und Zenitwinkel gemessen; als Nullrichtung wird die Richtung zum Nullpunkt des Gitterkoordinatensystems, also die Spiegelachse, definiert. Die Abstände des Theodolits von der Platte in Bezug zum Spiegel werden mit einem Messband gemessen. Da der Theodolit näherungsweise im Brennpunkt des Spiegels steht, verlaufen seine vom Spiegel umgelenkten Strahlen annähernd parallel zur Spiegelachse, so dass hinsichtlich der Genauigkeit der Abstände keine besonderen Forderungen bestehen. Bei bekanntem Spiegelradius lassen sich nun mit den gemessenen Werten die Koordinaten der Gitterpunkte berechnen. Aus den Abweichungen dieser Ist-Werte zu den Soll-Koordinaten kann man jetzt auf den wirklichen Spiegelradius schließen. Zu diesem Zweck wird im funktionalen Modell der Spiegelradius solange verändert, bis die mittlere quadratische Restabweichung der Koordinatendifferenzen am kleinsten ist. Der so gefundene Spiegelradius stellt dann quasi den mittleren Radius des einzelnen Spiegelsegments dar. Die Größe der mittleren quadratischen Restabweichung kann als Maß für die Schliiffgüte des Spiegels angesehen werden (Bild 14).

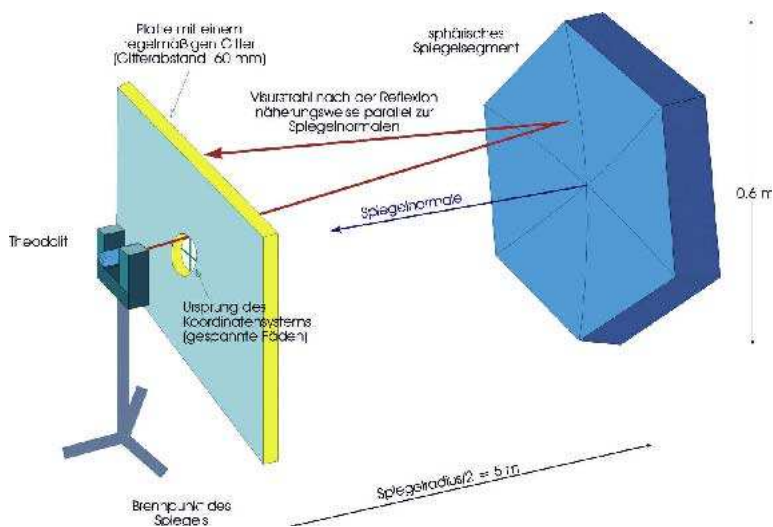


Bild 13: Versuchsaufbau zur Spiegelvermessung

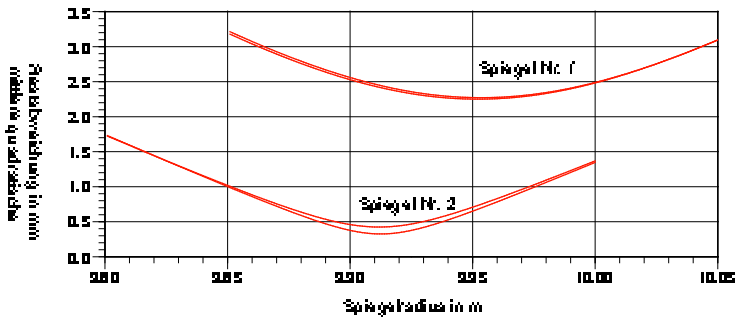


Bild 14: Ergebnisse von Spiegelüberprüfungen

3.3.3 Berührungslose Antastung von Drähten nach dem chromatischen Prinzip

Für die Vermessung zukünftiger Linearbeschleuniger wurde im Abschnitt 3.2 das Gerademesssystem mit gespannten Drähten, die als Geradheitsreferenz verwendet werden, vorgestellt. Für die berührungslose Antastung wurde ein Positionssensor entwickelt, mit dem der Draht mit einer Genauigkeit von $< 1\mu\text{m}$ erfasst werden kann. Die Drahtposition kann auch durch direkte Streckmessungen in einer Ebene senkrecht zur Drahtachse erfolgen. Es wird der Abstandssensor lotrecht ausgerichtet und senkrecht zur Drahtachse in kleinen Intervallen parallel zu sich verfahren. In jeder Position wird der Abstand zur Drahtoberfläche berührungslos gemessen. Aus den Scann-Daten können dann die Mittelpunktkoordinaten des Drahtes (Drahtposition) und der Drahtradius berechnet werden.

Für die hochgenaue Abstandsmessungen für kurze Entfernungen kann die chromatische Längsaberration eines Spezialobjektivs genutzt werden. Spektral breitbandiges Licht wird in einen Lichtwellenleiter eingekoppelt und zu einem Objektiv mit einem ausgeprägten Farblängsfehler geführt (Bild. 15). Das Objektiv fokussiert das Licht wellenlängenabhängig auf die anzumessende Objektoberfläche und erzeugt dort einen Messfleck mit einem Durchmesser von wenigen Mikrometern. Eine scharfe Abbildung ergibt sich dort aber nur für eine Wellenlänge ($= \lambda_1$). Umgekehrt wird auch das reflektierte Licht derselben Farbe scharf auf das Faserende des Wellenleiters abgebildet und mit hoher Effizienz wieder in den Lichtwellenleiter eingekoppelt. Andere Wellenlängen werden wegen der unscharfen Abbildung stark unterdrückt. Das reflektierte Licht gelangt über den Faserkoppler in ein Spektrometer. Das dort gemessene Spektrum zeigt bei der betreffenden Wellenlänge λ_1 einen scharfen Peak (Bild 15). Durch Kalibrierung kann aus der gefundenen Wellenlänge der gesuchte Abstand zur Objektoberfläche bestimmt werden. Der Arbeitsbereich des Objektivs liegt zwi-

schen dessen Brennweiten für die kürzeste und längste nutzbare Wellenlänge λ_{\min} und λ_{\max} (Bild 15). Das für die Messungen erforderliche Messgerät ist in Bild 16 ersichtlich.

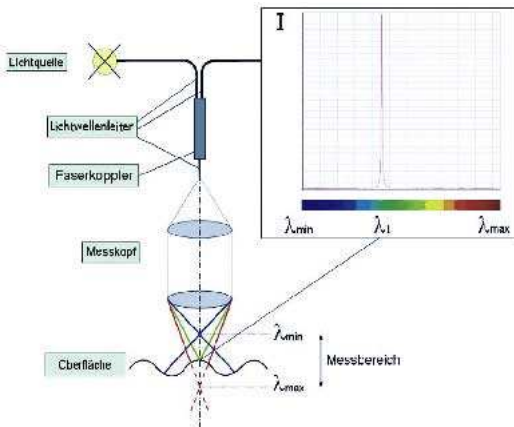


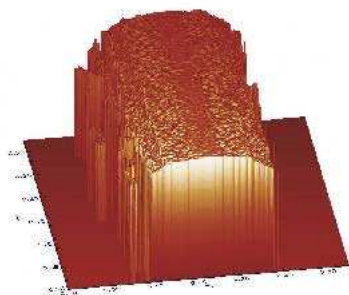
Bild 15:
Prinzip einer Abstandsmessung nach dem Verfahren der chromatischen Längsaberration nach /Kunkel, Schulze (2005)/



Bild 16:
Abstandsmessgerät der Firma Precitec Optronik GmbH (<http://www.precitec-optronik.de>)

Für die Abstandsmessungen steht eine Reihe von Messköpfen zur Verfügung, die sich in der Auflösung, der Messgenauigkeit, im Messbereich und im Messabstand unterscheiden. Es können 30 bis 1000 Messungen in einer Sekunde durchgeführt werden.

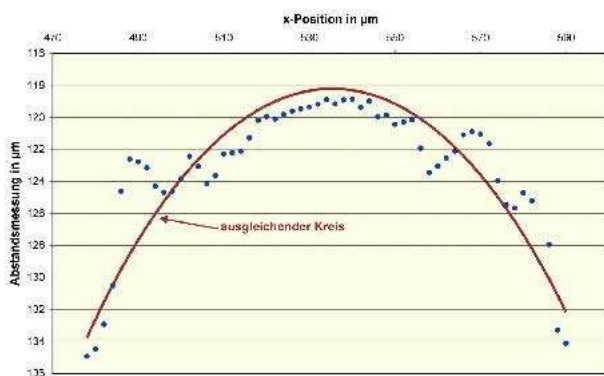
Um zu sehen, ob das Verfahren der Abstandsmessung für die Bestimmung von Drahtpositionen geeignet ist, hat die Firma Precitec Optronik GmbH einen 0,2 mm dicken Beryllium-Draht über einen Bereich von 1 mm x 1 mm in Schritten von jeweils 2 μm mit einem 600- μm -Messkopf gescannt (Bild 17).



*Bild 17:
3D-Visualisierung der Abstandsmessungen
zu einem Beryllium-Draht
(Durchmesser: 0,2 mm)*

Aus Bild 17 erkennt man, dass in einem Bereich von 50 μm beiderseits der Drahtachse noch Abstandsmessungen möglich sind. Dies entspricht den Angaben in den Datenblättern, wonach der Winkel zwischen der Sensorachse und der Normalen der Objektoberfläche bis zu 30° betragen kann.

Für jedes der 500 gescannten Drahtprofile konnte ein ausgleichender Kreis berechnet werden. Dabei wurden die Mittelpunktkoordinaten und der Radius des Drahtes als Unbekannte in die Ausgleichung eingeführt. Werden die benachbarten Ergebnisse der Profile 1-2, 3-4, 5-6 usw. als Doppelmessungen aufgefasst, so beträgt die Standardabweichung der Mittelpunktcoordinate des Drahtes (in horizontaler Richtung) $0,6 \mu\text{m}$. Bild 18 zeigt die Restverbesserungen der Ausgleichung beispielhaft für das Profil 1. Deutlich ist zu erkennen, dass in den Randbereichen die Residuen ansteigen.



*Bild 18:
Ergebnisse der Ausgleichung mit einem Kreis beim Profil 1*

Aufgrund dieser Ergebnisse ist das Verfahren der senkrechten Abstandsmessung nach dem chromatischen Prinzip zur Positionsbestimmung von gespannten Drähten geeignet; die Drahtposition kann mit einer Standardabweichung von $< 1 \mu\text{m}$ erfasst werden. Weitere Untersuchungen sind erforderlich,

um das Verfahren praxisreif zu machen. Dieses Verfahren könnte auch bei der Bestimmung von Deformationen bei Bauwerken, wie z. B. Talsperren, Brücken, eingesetzt werden.

4. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Teil des Beitrages wurde ein Überblick über Messfahren gegeben, die im Bereich der Ingenieurgeodäsie eingesetzt werden können. Es wurden besonders die Leistungspotenziale der Servotachymeter, der Autokollimation, der Laserinterferometer sowie das Verfahren der Weißlichtinterferometrie und der Lasertracker angesprochen. Die Weißlichtinterferometrie wird allerdings erst im zweiten Teil für die Erklärungsweise faseroptischer Sensoren benötigt. Im anwendungsbezogenen Teil des Beitrages wurde auf der Vermessung bestehender Kreisbeschleuniger, z. B. beim DESY in Hamburg, eingegangen. Es wurden die zu erbringenden Messgenauigkeiten, die Messverfahren und das eingesetzte Instrumentarium vorgestellt und an ausgewählten Beispielen demonstriert. Breiten Raum nahm die Vorstellung der Messkonzepte für die Vermessung zukünftiger Linearbeschleuniger mit einer Länge von ca. 30 km ein. Die extrem hohen Genauigkeitsforderungen erfordern die Weiterentwicklung neuer Messtechnologie, um z. B. die Effekte der Refraktion auf ein ertragbares Maß zu reduzieren. Es wurden Entwicklungen, die an der Professur Geodäsie und Photogrammetrie der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt werden, vorgestellt. Weiterhin wurden Sondermessungen, die für die Entwicklung zukünftiger Linearbeschleuniger erforderlich sind, diskutiert. Ein wichtiger Punkt dabei sind Geradheitsmessungen, die mit dem Verfahren der Autokollimation und mit dem laserinterferometrischen Verfahren vorgenommen werden. Weiterentwicklungen zur berührungslosen Erfassung gespannter Drähte nach dem Prinzip der hochgenauen Abstandsmessung nach dem Verfahren der chromatischen Aberration wurden anhand von Testmessungen erläutert.

Im zweiten Teil des Beitrages werden laserinterferometrische Schwingungsmessungen an Bauwerken vorgestellt und es werden die Möglichkeiten von faseroptischen Sensoren für die Bereiche der Ingenieurgeodäsie diskutiert. Die Leistungspotenziale der Industriephotogrammetrie werden an einigen wenigen Beispielprojekten aus dem Bereich des Bauingenieurwesens aufgezeigt.

5. Literatur

Albert, J. u. a. (2002): Measuring System for the high-precision Alignment of planned Linear Colliders. In: Kahmen, H.; Niemeier, W.; Retscher, G. (Eds.): 2nd Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Berlin 2002, Seite 142-152.

- Albert, J.; Schwarz, W. (2004): Messtechnische Entwicklungen für die Zukunftsprojekte „Linearbeschleuniger“. In: Ingenieurvermessung 2004 – 14th International Course on Engineering Surveying, ETH Zürich, Beiträge/Contributions, Herausgeber: Ingensand, H.; ISBN 3-906467-46-5, Seite 39-50.
- Feest, C. u. a. (2003): Hochpräzise Bestimmung von physikalischen Höhenbezugsflächen mit Zenitkamera, GPS und Gravimetrie für die Justierung von linearen Teilchenbeschleunigern. Abschlussbericht Projektseminar Erdmessung 2002/2003, Hannover 2003, unveröffentlicht.
- Grzelak, G. u. a. (2004): Hochgenaue Vermessung und Justierung zukünftiger Linearbeschleuniger (Poster). Ingenieurvermessung 2004 – 14th International Course on Engineering Surveying, ETH Zürich; http://geo.desy.de/verffentlichungen/index_ger.html
- Heister, H. (1993): Interferenzmeßtechnik und Optical Tooling. Vortrag im Rahmen des 30. DVW-Seminars »Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau« vom 8. bis zum 10. März 1993 beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg. Veröffentlicht in: Schwarz, W. (Herausgeber): Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau. Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 28, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1995.
- Karyotakis, Y. (2004): WP 7: Metrology and Mechanical Stabilisation. EUROTeV Kick-Off Meeting, DESY, November 1st, 2004; <http://www-flc.desy.de/eurotev/desy011104.html>
- Kunkel, M.; Schulze, J. (2005): Mittendickenmessung von Linsen – berührungslos. In: Optolines – Fachmagazin für Optomechanik und Optoelektronik Nr. 5 (2005), Seite 9-11; <http://www.linos-katalog.de/de/info/optolines.html>
- Lang, M.; Thiel, J. (1993): Interferometrische Anwendungen. Vortrag im Rahmen des 30. DVW-Seminars »Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau« vom 8. bis zum 10. März 1993 beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg. Veröffentlicht in: Schwarz, W. (Herausgeber): Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau. Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 28, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1995.
- NN-AICON: Leica Tracker – Die mobile Koordinatenmessmaschine. Druckschrift der Firma AICON – 3D Systems GmbH in 38114 Braunschweig; <http://www.aicon.de>
- Prenting, J. u. a. (2004): High Precision Survey and Alignment of Large Linear Accelerators. 8th International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA), 4.-7. October 2004, CERN; http://geo.desy.de/verffentlichungen/index_ger.html
- Schlösser, M. (2004): Ein hydrostatisches Meßsystem mit in-situ-Kalibrierung. Ingenieurvermessung 2004 – 14th International Course on Engineering Surveying, ETH Zürich, Tutorial; http://geo.desy.de/verffentlichungen/index_ger.html
- Schröder, G.; Treiber, K. (2002): Technische Optik – Grundlagen und Anwendungen. 9., erw. Auflage, Vogel Buchverlag (Kamprath-Reihe), Würzburg 2002.
- Schwarz, W. (1993): Fluchtungsmessungen. Vortrag im Rahmen des 30. DVW-Seminars »Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau« vom 8. bis zum 10. März

1993 beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg. Veröffentlicht in: Schwarz, W. (Herausgeber): Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau. Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 28, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1995.

- Schwarz, W. (1996): Geodätische Aufgabenstellungen in der Grundlagenforschung der Hochenergiephysik. In: Ingenieurvermessung 96 – Beiträge zum XII. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, TU Graz, Herausgeber: Brandstätter, Brunner, Schelling; ISBN 3-427-78111-9, Beitrag E1.
- Schwarz, W. (1998): Die Vermessung von Teilchenbeschleunigern unter besonderer Berücksichtigung des geplanten, über 30 km langen Linearbeschleunigers. In Schwarz, W. (Redaktion): Ingenieurvermessung aktuell. Schriftenreihe des DVW (Band 32), Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1998.
- Schwarz, W. (2002): Hydrostatisches Messsystem mit Ultraschall. In: Workshop Messtechnische Überwachung von Stauanlagen, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida (FH); Nr. 1, 2002, Seite 163-170 und in Wasserwirtschaft 94(2004)1-2, Seite 61-64.