

Messtechnische Entwicklungen für die Zukunftsprojekte „Linearbeschleuniger“

Jörg Albert und Willfried Schwarz, Weimar

Zusammenfassung: Bei der Vermessung der Zukunftsprojekte „Linearbeschleuniger“ werden Genauigkeitsanforderungen an die Justierung gestellt, die mit herkömmlichen geodätischen Messverfahren wegen der in Tunneln unvermeidbaren Zielstrahlkrümmung (Refraktion) nicht erreichbar sind. Infolgedessen sind für diese Aufgabenstellung neue Messverfahren zu entwickeln und zu erproben. Für die Lagevermessung wird ein auf wenige Mikrometer präzises Alinement-System vorgestellt, basierend auf gespannten Drähten als Geradlinigkeitsreferenz, die in einen mobilen Messzug eingebunden sind. Die Abstandsmessungen erfolgen mit einem neuartigen Positionssensor, der durch ein vor eine CCD-Kamera gesetztes Prismensystem ein Doppelbild für eine räumliche Auswertung der Zielmarke liefert. Für die Höhenmessung werden Untersuchungen zu einem hydrostatischen Messsystem mit einer freien Wasseroberfläche vorgestellt. Die Abtastung der Wasseroberfläche erfolgt mit einem Ultraschall-Messkopf.

1 Zukunftsprojekt „Linearbeschleuniger“

Mit den grundlegenden Fragen zum Aufbau unserer Materie und ihrem Zusammenhalt hat sich die Menschheit schon immer beschäftigt. Heute stehen den Physikern mit den Teilchenbeschleunigern „Super-Mikroskope“ zur Verfügung, mit denen sich dank modernster Techniken (extrem schnelle Elektronenschaltungen, Supraleitung, Hochvakuum usw.) Strukturen untersuchen lassen, die 100.000 mal kleiner sind als der Atomkern mit einem Durchmesser von 10^{-14} m. Beim Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) in der Nähe von San Francisco und beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg werden Linearbeschleuniger der nächsten Generation mit Längen über 30 km geplant und zwar die Projekte NLC (Next Linear Collider) beim SLAC und TESLA (TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator) beim DESY. Während beim TESLA-Projekt für die Beschleunigung und für die Steuerung der Teilchen Magnetstrukturen mit supraleitenden Eigenschaften eingesetzt werden sollen, sind beim NLC-Projekt die Komponenten normalleitend. Mit diesen Beschleunigern sollen Elementarteilchen (Elektronen, Positronen) auf quasi Lichtge-

schwindigkeit beschleunigt werden. Nachdem die Teilchen eine Energie im Bereich eines Tera-Elektronenvolts erreicht haben, werden sie zur Kollision gebracht und in sogenannten Experimenten weiter untersucht. Die Beschleuniger eröffnen neue Perspektiven sowohl in der Grundlagenforschung als auch für anwendungsnahe Forschungen in verschiedenen Naturwissenschaften. Es sollen die Frage nach dem Ursprung der Materie geklärt und Einblicke in die atomaren Dimensionen des Lebens gewonnen werden.

An der Bauhaus-Universität Weimar, Professur Geodäsie und Photogrammetrie, wurden im Rahmen einer Kooperation mit dem Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY Messverfahren entwickelt und untersucht, die für die Vermessung der Zukunftsprojekte eingesetzt werden sollen. In diesem Beitrag werden die Entwicklungen vorgestellt, die in Weimar bearbeitet werden.

2 Geodätische Aufgabenstellung

Für den Betrieb der in Planung befindlichen Linearbeschleuniger ist es erforderlich, dass die strahlführenden Komponenten der Anlagen mit einer sehr hohen Genauigkeit zueinander ausgerichtet werden. Es wird z. B. beim TESLA-Projekt gefordert, dass in jedem beliebigen Abschnitt, dessen Länge durch die Betatronwellenlänge (= 576 m) festgelegt wird, die Komponenten mit einer Nachbargenauigkeit (Standardabweichung) von

0,5 mm in der Horizontalen quer zur Strahlrichtung und
0,2 mm in der Vertikalen

justiert werden. Die Betatronwellenlänge ist eine charakteristische Kenngröße eines Beschleunigers. Da im Beschleuniger mehrere Strahlführungswege mit eigenen Komponenten aufgebaut werden sollen, ist geplant, nicht jeden Strahlführungsweg eigenständig zu vermessen. Es soll vielmehr eine Art Basisvermessung mit Referenzpunkten an der Tunnelwand des Beschleunigers durchgeführt werden, von denen dann die Komponenten eines jeden einzelnen Strahlführungsweges separat justiert werden können.

Es ist vorgesehen, Referenzpunkte mit der Zwangszentrierung nach Taylor-Hobson [Schwarz 1998], die eine dreidimensionale Punktfestlegung ermöglichen, an der Tunnelwand zu montieren. Weil auf den dicht an der Tunnelwand anzubringenden Referenzpunkten Vermessungsinstrumente nicht aufgebaut werden können, soll ein verschiebbarer Wagen als Standpunkt dienen, der auf einer Schiene entlang der Tunnelwand geführt wird. In einer ersten Vermessung

können die Koordinaten der Referenzpunkte mit Präzisionstachymetern bestimmt werden.

Die Messungen im Tunnel werden insbesondere durch die Zielstrahlkrümmung (Refraktion) beeinträchtigt. Eine Überschlagsrechnung zeigt, dass bereits bei einem konstanten Temperaturgradienten von nur 0,1 K/m quer zur Tunnelachse mit einer Abweichung des Zielstrahles aus der Geraden von 4,5 mm über einen Entfernungsbereich von 600 m zu rechnen ist [Schwarz 1996]. Damit würde die zulässige Abweichung bereits um das zehnfache überschritten.

Im Folgenden werden Messverfahren vorgestellt, die die klassische Vermessung mit Präzisionstachymetern ergänzen und bei denen die Refraktionsproblematik nicht so dominant ist.

Ausgehend von den dann mit entsprechender Genauigkeit bestimmten Referenzpunkten können anschließend die Komponenten der Strahlwege mit Präzisionstachymetern oder anderen polarmessenden Systemen (z. B. Lasertracker, Laserradar) nach der Methode der freien Standpunktwahl vermessen werden.

3 Lagemesssystem

3.1 Messprinzip

Für die horizontale Gerademessung wird ein auf überlappenden, gespannten Drähten als Geradlinigkeitsreferenz beruhendes Verfahren vorgeschlagen. Werden die jeweiligen Abstände von drei Tunnelpunkten in Bezug zu einer mechanisch realisierten Geradheitsreferenz gemessen, kann daraus 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 einzelnen Brechungswinkel bestimmen (Abb. 1).

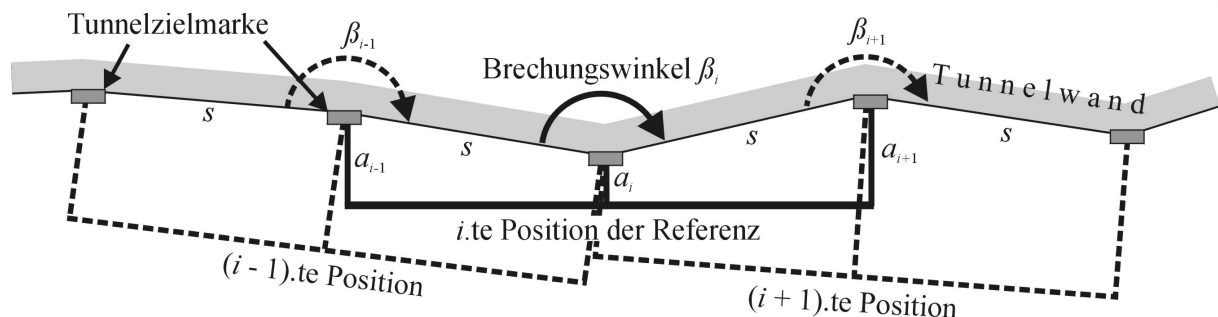


Abb. 1: Grundprinzip des 3-Punkt-Alignment-Verfahrens

Die Genauigkeit dieses Messverfahren lässt sich steigern, indem die Abstände zwischen den Referenzpunkten vergrößert werden und die Abstände nicht nur zu drei, sondern zu weiteren Punkten gemessen werden. Eine Optimierungsrechnung hat ergeben, dass unter Abwägung verschiedenster Gesichtspunkte Abstandsmessungen zu sechs jeweils 4,5 m entfernten Referenzpunkten sinnvoll sind. Eine Genauigkeitsanalyse ergibt, dass bei dieser Kombination von Redundanz und Zielmarkenabstand die einzelnen Abstände mit einer Standardabweichung von 5 μm zu bestimmen sind [Albert 2002]. Die Gesamtlänge der mechanischen Referenz beträgt dann 22,5 m, die z. B. in Form von gespannten Drähten realisiert werden kann.

3.2 Messwagenkonzept

Das Messsystem soll im Endzustand aus sechs einzelnen Messwagen bestehen, die zu einem Messzug gekoppelt sind und voll automatisch auf einer Schiene entlang der Tunnelwand fahren. Der Draht wird zwischen erstem und letztem Messwagen frei eingespannt, ein starrer, durchgehender Messwagen wird damit entbehrlich (Abb. 2).

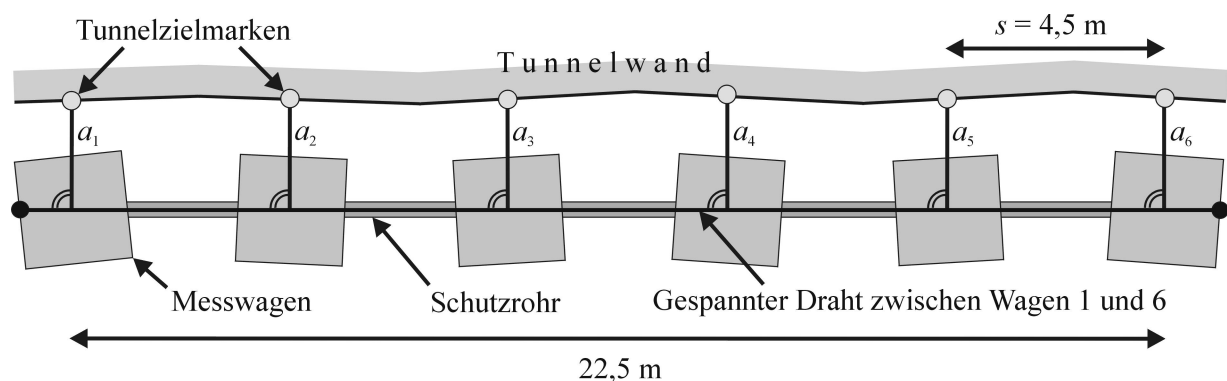


Abb. 2: Konzept des Messzuges

Abb. 3 zeigt den konzeptionellen Aufbau eines einzelnen Messwagens. Die einzelnen Messwagen sind identisch aufgebaut. Die Abstandsmessungen zur Zielmarke A und zum Draht B werden separat mit zwei der in Kap. 3.3 beschriebenen Positionssensoren C und D durchgeführt. Um die Messbereiche der Positionssensoren zur Genauigkeitssteigerung auf etwa 1 mm zu reduzieren und gleichzeitig die Tunnelfehler von mehreren Zentimetern ausgleichen zu können, werden die Messwagen automatisch grob horizontalisiert und die Positionssensoren in allen Koordinatenrichtungen über Linearführungen einzeln auf die Zielmarken bzw. Drähte ausgerichtet. Die Verfahrenseinheiten zur Grobpositionierung sind zur Übersichtlichkeit in Abb. 3 nicht dargestellt. Die Relativverschiebung und Kantung zwischen den beiden Positionssensoren wird mit zwei Inkremental-

Messtastern E erfasst. Ein zweiachsiger Neigungssensor F misst die (Rest-) Neigung des Messwagens. Für die Grobpositionierung werden drei zusätzliche Standard-CCD-Kameras G, H, I mit größerem Gesichtsfeld eingesetzt. Unterhalb der räumlichen Tunnelzielmarke befindet sich, fest installiert an der Tunnelwand, das hydrostatische Messsystem K für die Höhenübertragung (siehe Kap. 4).

Die gewünschte Abstandsmessung setzt sich zusammen aus der Abstandsmessung mit Positionssensor C zum Zielzeichen A, der inkremental gemessenen Verschiebung der beiden Positionssensoren zueinander, der Abstandsmessung mit Positionssensor D zum Draht B und einem zuvor zu kalibrierenden Offset.

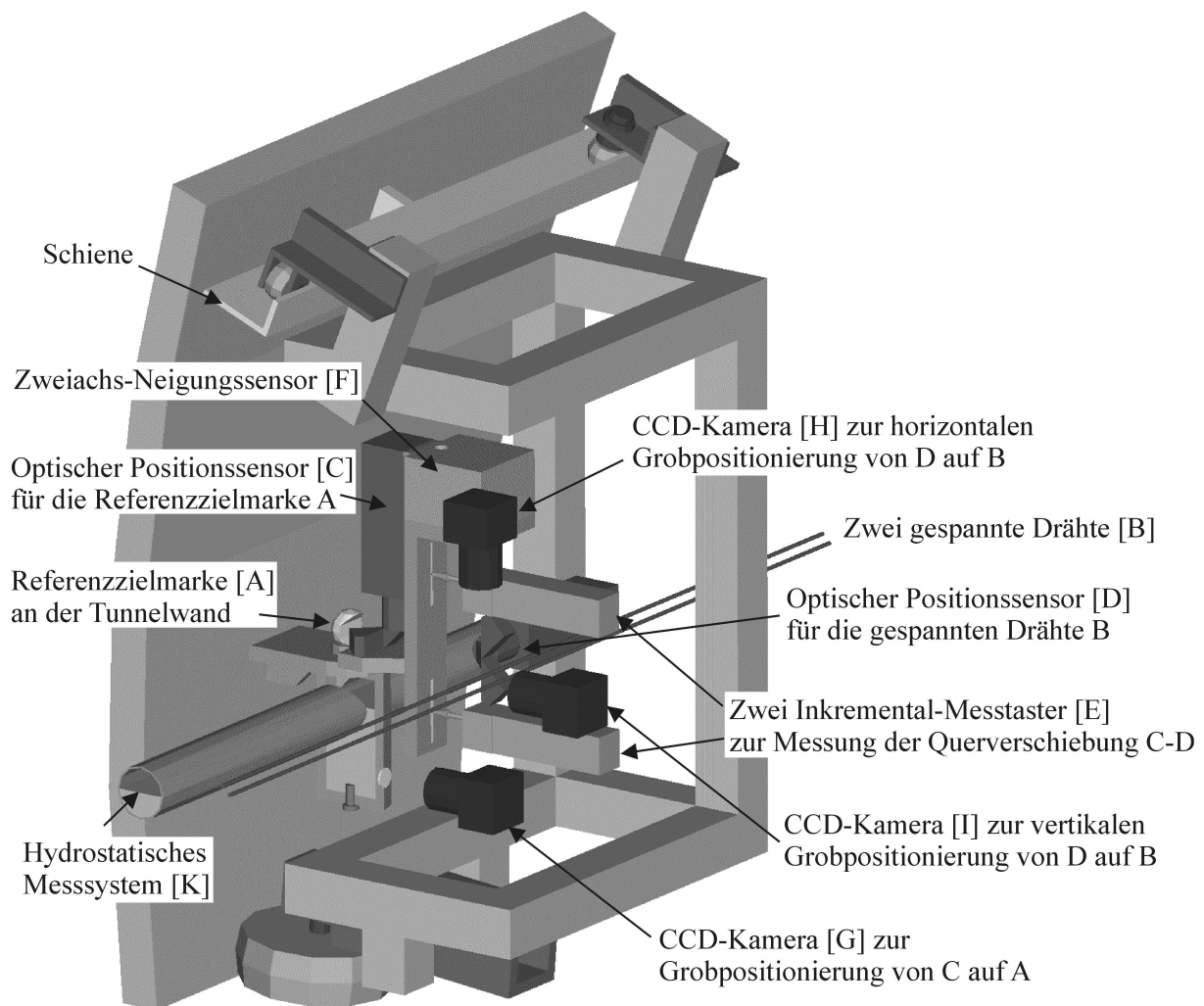


Abb. 3: Prinzipskizze eines einzelnen Messwagens

3.3 Positionssensor

Die Position der Tunnelzielmarke und der gespannten Drähte ist dreidimensional und berührungslos zu erfassen. Für diesen Zweck wurde an der Bauhaus-Universität Weimar ein Positionssensor entwickelt. Zwei vor dem Objektiv angebrachte Umlenkprismen dienen als Strahlteiler. Der Zielpunkt wird hierüber als Doppelbild auf dem CCD-Sensor einer hochauflösenden CCD-Kamera abgebildet. Entfernt sich der Zielpunkt vom Prismensystem, bewegen sich die beiden Bildpunkte auseinander (Abb. 4). Da die Halbbilder auch als Stereobildpaar mit konstanter relativer Orientierung auswertbar sind, ist eine dreidimensionale Koordinatenbestimmung möglich. Die beiden Umlenkprismen sind auf einer gemeinsamen Quarzglasplatte aufgekittet. Dadurch wird die Stabilität des Messsystems wesentlich verbessert; Instabilitäten der CCD-Kamera in Bezug zur Quarzglasplatte sind für die Abstandsmessung von untergeordneter Bedeutung.

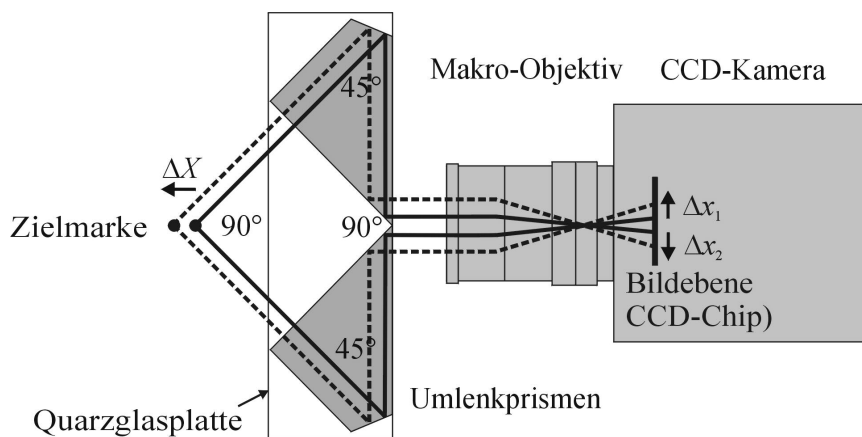


Abb. 4: Funktionsweise des Positionssensors I

Die Abstandsänderung lässt sich nach der folgenden Formel aus den Änderungen der Bildkoordinaten berechnen

$$\Delta X = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \beta} \cdot \Delta x \quad (1)$$

mit ΔX : Abstandsänderung,
 Δx : Bildkoordinatenänderung,
 β : Vergrößerungsfaktor des optischen Systems.

Aus Platzgründen werden die Strahlen über ein Pentagonprisma rechtwinkelig umgelenkt (Abb. 5a, 5b); die Messwagen können dadurch entsprechend schmaler gefertigt werden und ragen weniger in den Tunnel hinein.

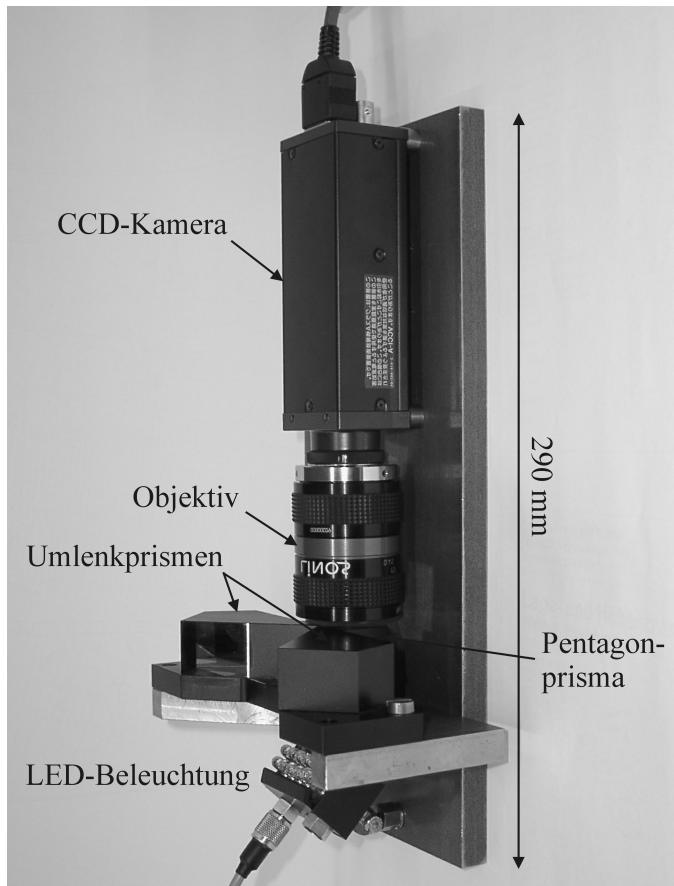


Abb. 5a: Positionssensor II auf Montageplatte

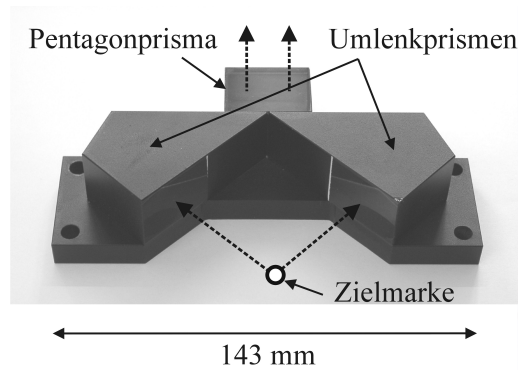


Abb. 5b: Prismensystem II

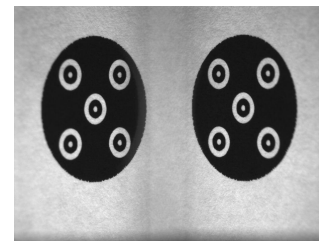


Abb. 5c: Messbild der Zielmarke

Mit zwei unterschiedlichen hochauflösenden CCD-Kameras mit jeweils 1024 x 768 Bildelementen und zwei Prismensystemen, aber jeweils mit identischem Messobjektiv *Linos-MeViS-C* (Brennweite 35 mm), wurden Untersuchungen zur Genauigkeit der relativen Abstandsmessung durchgeführt. Abb. 6a zeigt das Ergebnis der Abstandsmessung mit einer Kamera *The Imaging Source DMD 5013* mit PCI-Bilderfassungskarte mit deutlich erkennbarem systematischen Fehleranteil. In Abb. 6b sind zwei Messreihen in zueinander senkrechter Verschiebungsrichtungen mit einer Kamera *Sony XCD-X700* mit IEEE 1394-Bus (FireWire) dargestellt. Mit beiden Positionssensoren sind je nach Messbereich und Modellierung systematischer Abweichungen (verursacht z. B. durch die Verzeichnung der Objektive und Prismensysteme) relative Verschiebungen mit einer Standardabweichung besser als $0,2 \mu\text{m}$ bestimmbar.

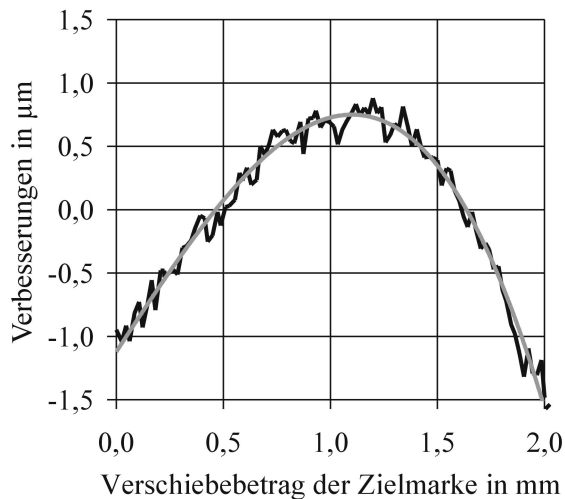


Abb. 6a: Genauigkeit des Positionssensors I bei Abstandsmessungen; Messwerte und ausgleichendes Polynom

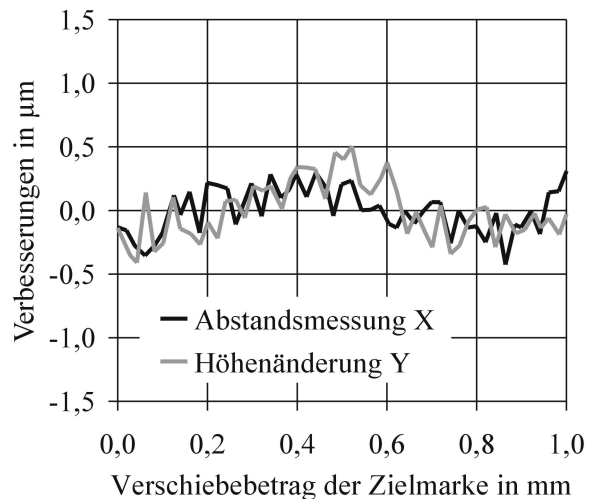


Abb. 6b: Genauigkeit des Positionssensors II bei Abstands- und Höhenmessungen

4 Höhenmesssystem

4.1 Untersuchungen zur freien Wasseroberfläche

Da der Linear-Beschleuniger in der Vertikalen der Erdkrümmung folgen und damit auf einer Niveauläche verlaufen wird, bietet sich das hydrostatische Messverfahren für die Höhenübertragung an. 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.

Um das Messsystem über eine größere Länge zu untersuchen, ist in einem Tunnel im Thüringer Wald ein einen Kilometer langer Testaufbau installiert worden [Albert u. a. 2002]. Seit April 2001 wurden dort Versuche u. a. zum Ausbreitungsverhalten von künstlich induzierten Wellen der Wasseroberfläche mit unterschiedlichen Amplituden und Frequenzen in Rohren mit verschiedenen Durchmessern, zur Langzeitstabilität des Messsystems, zu Auswirkungen von einseitigen Temperaturänderungen und zum Einlaufverhalten der Wasseroberfläche bei plötzlichen Punktbewegungen durchgeführt. Ergebnisse der Untersuchungen werden in [Albert u. a. 2002] und [Schlösser u. a. 2002] diskutiert.

Bei dieser Höhenbestimmung bildet die freie Wasseroberfläche (Niveauläche) die Referenz. Es ist zu klären, welche Form eine Wasseroberfläche in ihren Mikrostrukturen tatsächlich hat. Daher sind entlang der Trasse des Linearbeschleu-

nigers die Geoidundulationen mit einer Standardabweichung von $< 0,2$ mm (als Nachbarschaftsgenauigkeit bezogen auf einen Entfernungsbereich von 600 m) genau zu bestimmen, um gegebenenfalls damit die Höhenlage der Komponenten der Beschleuniger korrigieren zu können. Das Institut für Erdmessung der Universität Hannover führt zur Zeit entsprechende Untersuchungen durch; es werden Geoidbestimmungen nach der gravimetrischen und nach der astronomischen Methode vorgenommen [Feest u. a. 2003]. Erste 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.

4.2 Aufbau des Messtopfes

Die Schallgeschwindigkeit im 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 inneren Referenzstrecke und deren mechanischer Länge, die mit übergeordneter Genauigkeit ausgemessen worden ist, abgeleitet. Bei der aus Abb. 7 ersichtlichen Anordnung der Referenzstrecke zum Messtopf wird das Messergebnis von lokalen Instabilitäten und Driften des Sensors nicht beeinträchtigt. Lediglich die Referenzstrecke und der Höhenpunkt müssen mechanisch zueinander stabil sein.

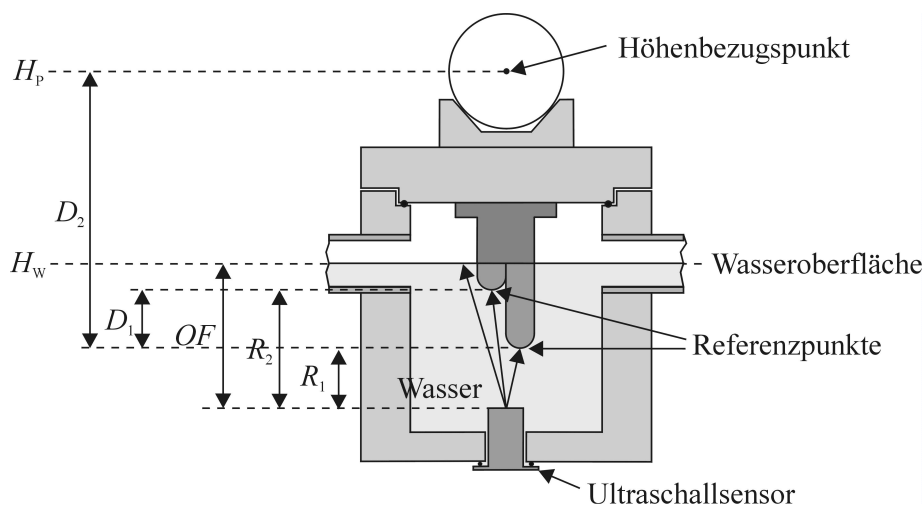


Abb. 7: Schemazeichnung des Messtopfes

Die von Driften und der Ausbreitungsgeschwindigkeit unbeeinflusste Höhe erhält man aus [Schlösser u. a. 2002]:

$$H_P = H_W + D_2 - D_1 \cdot \frac{OF - R_1}{R_2 - R_1} \quad (2)$$

- mit H_P : Höhe des Höhenpunktes über Bezugshöhe,
 H_W : Höhe der Wasseroberfläche über Bezugshöhe,
 D_1 : Kalibrierte Länge der Referenzstrecke,
 D_2 : Kalibrierter Abstand unterer Referenzpunkt - Höhenpunkt,
 OF : Gemessener (vertikaler) Abstand zur Wasseroberfläche,
 R_1 : Gemessener (vertikaler) Abstand zum unteren Referenzpunkt,
 R_2 : Gemessener (vertikaler) Abstand zum oberen Referenzpunkt.

4.3 Untersuchungen mit dem verwendeten Ultraschall-Sensor

Die Wasseroberfläche selbst wird berührungslos mit Ultraschall eingemessen. Für die Abtastung wird ein Ultraschallprüfgerät *USM25* in Verbindung mit Prüfköpfen *H10 KB3* der Firma *Agfa NDT* eingesetzt, die ursprünglich für Aufgaben in der Materialprüfung entwickelt worden sind. Der Sensor mit einem Durchmesser von 5 mm befindet sich am Boden eines jeden Messtopfes.

Der Sensor, der zugleich Empfänger ist, misst nach dem Laufzeitverfahren den Abstand zur Wasseroberfläche durch das Medium Wasser. Er sendet als Ultraschallsignal Nadelimpulse mit einer Frequenz von 10 MHz aus. Im Wasser mit einer Temperatur von ca. 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, das entspricht in Wasser einer Streckenauflösung von 3 µm. Die Standardabweichung der Messung zur Wasseroberfläche wurde in mehreren Vergleichsmessungen zu 16 µm bestimmt [Helmholz 2003], was völlig ausreichend ist für die anstehende Messaufgabe. Die Endflächen der Referenzstrecke sollten nicht plan sein, sondern durch Kugeln mit einem Durchmesser von 2 mm bis 3 mm festgelegt werden. Nur bei Kugeln ist der Reflexionspunkt des Ultraschallsignals eindeutig definiert.

Beim verwendeten Prüfkopf beträgt die Nahfeldgrenze 40 mm. Genaue Streckenmessungen sollten außerhalb des Nahfeldes des Ultraschall-Sensors durchgeführt werden, da es bei der Wellenausbreitung des kohärenten Senders zu ausgeprägten Interferenzen kommt. Die Interferenzen äußern sich in räumlich starken Intensitätsschwankungen des Signals und beeinflussen damit die Abstandsmessungen. Um die Auswirkungen von Inhomogenitäten der Strahlenkeule zu untersuchen, wurden Intensitäts- und Abstandsmessungen bei einem sich über einem vertikal ausgerichteten Prüfkopf horizontal in Wasser bewegendem Taststift durchgeführt [Helmholz 2003]. Innerhalb des Nahfeldes des

verwendeten Prüfkopfes sind andeutungsweise zwei Signalmaxima erkennbar (Abb. 8a), die Abstandsmessungen weisen unregelmäßige Variationen von bis zu 0,12 mm auf (Abb. 8b). Außerhalb des Nahfeldes fällt die Signalstärke bei radialer Entfernung von der Messachse kontinuierlich ab (Abb. 8c). Der radiale Anstieg der Abstands-Messwerte um 0,07 mm ist vorrangig auf den sich radial verändernden Abstand zwischen Prüfkopf und Tastspitze zurückzuführen (Abb. 8d). Nach geometrischer Reduktion auf Vertikalstrecken liegen die verbleibenden Messwertschwankungen bei $< 0,01$ mm. Bei sorgfältiger Ausrichtung des Ultraschallsensors und geometrischer Reduktion der Abstandsmessungen sind die gewünschten Messgenauigkeiten erreichbar.

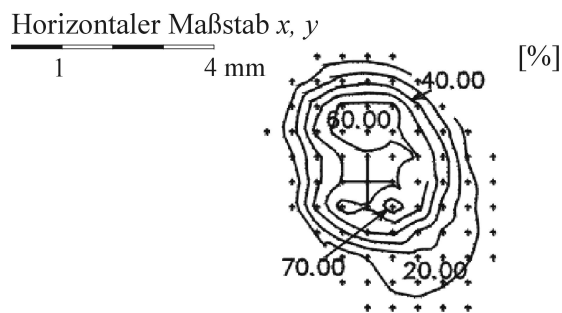


Abb. 8a: Signalstärke des Ultraschall-Sensors (Höhe $z = 28,5$ mm)

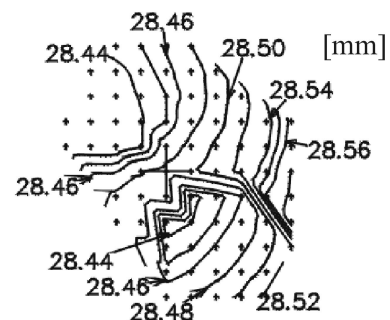


Abb. 8b: Abstandsmessung mit Ultraschall-Sensor (Höhe $z = 28,5$ mm)

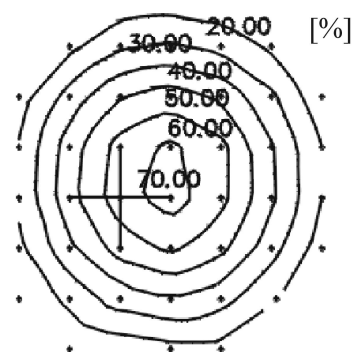


Abb. 8c: Signalstärke des Ultraschall-Sensors (Höhe $z = 115$ mm)

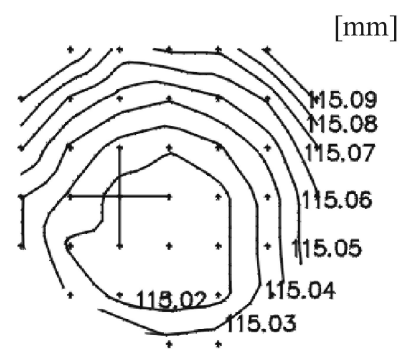


Abb. 8d: Abstandsmessung mit Ultraschall-Sensor (Höhe $z = 115$ mm)

5 Ausblick

Im Rahmen einer zurückliegenden Kooperation mit dem Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY Hamburg konnten neue Messverfahren für die Bewältigung der anstehenden Messaufgaben entwickelt und in den bisherigen Untersuchungen die prinzipielle Eignung nachgewiesen werden. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um z. B. den Nachweis zu erbringen, dass ein gespannter Draht im Grundriss als Geradheitsreferenz im geforderten Genauigkeitsbereich verwendbar ist. Unter Umständen sind alternative Messsysteme – z. B. ein im Vakuum geführter Laserstrahl [Bingham 2002] – zu betrachten.

Eine Entscheidung über den Bau des TESLA-Linearbeschleunigers ist von der Bundesregierung im Februar 2003 zurückgestellt worden. Wegen der immensen Kosten wird – wenn überhaupt – weltweit nur ein Projekt in internationaler Zusammenarbeit realisiert. Die internationalen Abstimmungsgremien werden die Grundsatzentscheidung zu treffen haben, ob das Zukunftsprojekt aus supra- oder aus normalleitenden Komponenten bestehen soll. Nur bei einer Entscheidung zugunsten der Supraleitung gibt es eine Chance für die Realisierung des TESLA-Projekts.

Literatur:

- ALBERT, J.; SCHLÖSSER, M.; SCHWARZ, W. [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, S. 142 – 153
- BINGHAM, R. u. a. [2002]: The Linear Collider Alignment and Survey (LiCAS) Project. In: Proceedings of the 7th International Workshop on Accelerator Alignment, SPring-8 (Japan), 2002, p. 439 – 451
- 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
- HELMHOLZ, P. [2003]: Einsatz von Ultraschall bei hydrostatischen Messverfahren. Diplomarbeit, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik der Technischen Universität Berlin, unveröffentlicht
- SCHLÖSSER, M.; HERTY, A. [2002]: High precision Survey and Alignment of large Linear Colliders - Vertical Alignment. Proc. of 7th International Workshop on Accelerator Alignment IWAA 2002, p. 343 – 355
- SCHWARZ, W. [1996]: Geodätische Aufgabenstellungen in der Grundlagenforschung der Hochenergiephysik. In: Ingenieurvermessung 96, Beiträge zum XII. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung in Graz, Band 2, Ferd. Dümmler's Verlag, Bonn 1996, S. E 1
- SCHWARZ, W. [1998]: Die Vermessung von Teilchenbeschleunigern unter besonderer Berücksichtigung des geplanten, über 30 km langen Linearbeschleunigers. In: Schriftenreihe des DVW, Band 32, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart 1998, S. 127 – 140
- SCHWARZ, W. [2002]: Hydrostatisches Messverfahren mit Ultraschall. In: Messtechnische Überwachung von Stauanlagen, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida (FH), Nr. I, 2002, S. 163 – 170

Anschriften:

Bauhaus-Universität Weimar:
Prof. Dr.-Ing. Willfried Schwarz
Fakultät Bauingenieurwesen
Professur Geodäsie und Photogrammetrie
Marienstraße 9
99423 Weimar
willfried.schwarz@bauing.uni-weimar.de

Dipl.-Ing. Jörg Albert
Lyonel-Feininger-Straße 7
99425 Weimar
joerg.albert1@gmx.de