Hochgenaue Vermessung und Justierung zukünftiger Linearbeschleuniger

RTRS[1] Vermessungssystem für Tunnelnetze höchster Genauigkeit

DESY - die Abkürzung steht für Deutsches Elektronen-Synchrotron - wurde 1959 in Hamburg gegründet und beschäftigt heute ca. 1500 Mitarbeiter und 3400 Gastwissenschaftler aus 35 Nationen.

Abb. 1: DESY-Gelände

Zur Zeit werden bei DESY verschiedene Beschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen betrieben, z.B. PETRA[2], DORIS[3] und HERA[4]. Alle diese Anlagen sind bisher Ringbeschleuniger und liegen aus Strahlenschutzgründen unter der Erde. Um höhere Energien erreichen zu können, werden zukünftige Projekte jedoch nicht mehr als Ring-, sondern als Linearbeschleuniger gebaut werden.

Als Synchrotronstrahlungsquelle der nächsten Generation wird ab 2006 bei DESY der XFEL[5], ein neuartiger Röntgenlaser, entstehen.

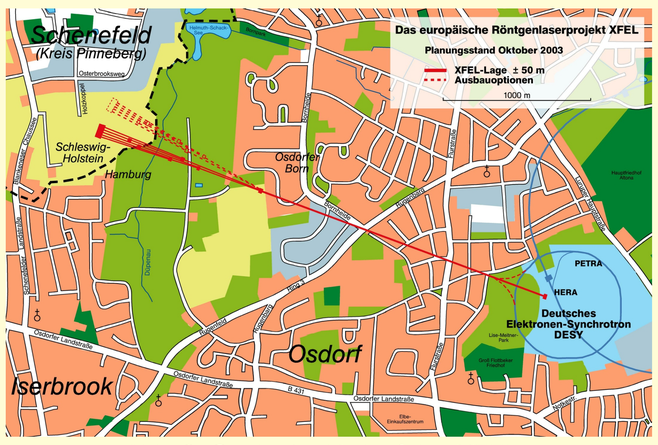


Abb. 2: Geplanter Verlauf des XFEL

Geodätische Aufgabenstellung

Die Genauigkeitsforderung für die Justierung der Komponenten des XFEL liegt bei

= 0,3 mm in Lage und Höhe

über eine Entfernung von 500m. Da der Beschleuniger mehrere Strahlwege enthalten wird und es aus technischen Gründen nicht möglich ist, diese Strahlwege durchgängig zu erreichen, wird im Tunnel ein Referenznetz hoher Genauigkeit geschaffen, von dem aus dann in einem zweiten Arbeitsgang manuell oder automatisch die Justierung (Absteckung) oder Aufnahme der einzelnen Strahlwege erfolgt.

Die Entwicklung des LiCAS-Systems[7)] erfolgt in Zusammenarbeit zwischen der LiCAS Group[a)] der Unversität Oxford, UK und der Vermessungsabteilung des Deutschen Elektronen-Synchrotrons DESY[b)], Hamburg, Deutschland.
Die Entwicklung des GeLiS-Systems[6)] erfolgte als Zusammenarbeit zwischen dem Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), CA, USA, der Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland und der Technischen Universität Dresden, Deutschland, unter Federführung der Vermessungsabteilung DESY[b)].

R. Bingham[a)], E. Botcherby[a*)], M. Dawson[a)], J. Green[a)], **G. Grzelak[a)]**, A. Herty[b*)], M. Jones[a)], **A. Mitra[a)]**, J. Nixon[a*)], B. Ottewell[a)], C. Perry[a)], **J. Prenting[b)]**, **A. Reichold[a)]**, **M. Schlösser[b)]**

*) ehemaliges Mitglied der jeweiligen Gruppe

Messkonzept

Der Einfluß der Refraktion macht es unmöglich, dieses Referenznetz mit klassischen, optischen Methoden zu schaffen. Hinzu kommt der Zwang, die Vermessung des Referenznetzes möglichst schnell durchzuführen, um die Stillstandszeiten des Beschleunigers gering zu halten.
Aus diesen Gründen wurde ein Meßzug (RTRS[1]) entwickelt, der die Vermessung des Grundlagenetzes autonom und mit der geforderten Genauigkeit durchführen kann.

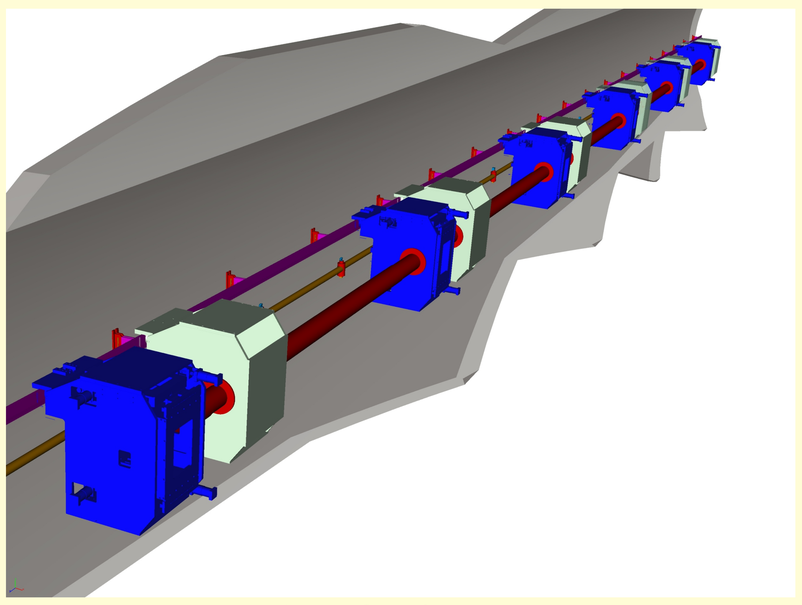


Abb. 3: RTRS-Meßzug im Tunnel

Theoretischer Ansatz

Das Meßprinzip basiert darauf, daß innerhalb des Zuges eine Geradheitsreferenz aufgebaut wird (gespannter Draht bei GeLiS[6)], Laserstrahl im Vakuum bei LiCAS[7)]), von der aus die senkrechten Abstände zu den Referenzzielzeichen an der Tunnelwand gemessen werden. Zusammen mit den Entfernungen der einzelnen Referenzpunkte untereinander ergeben sich die Meßelemente eines klassischen Polygonzuges.

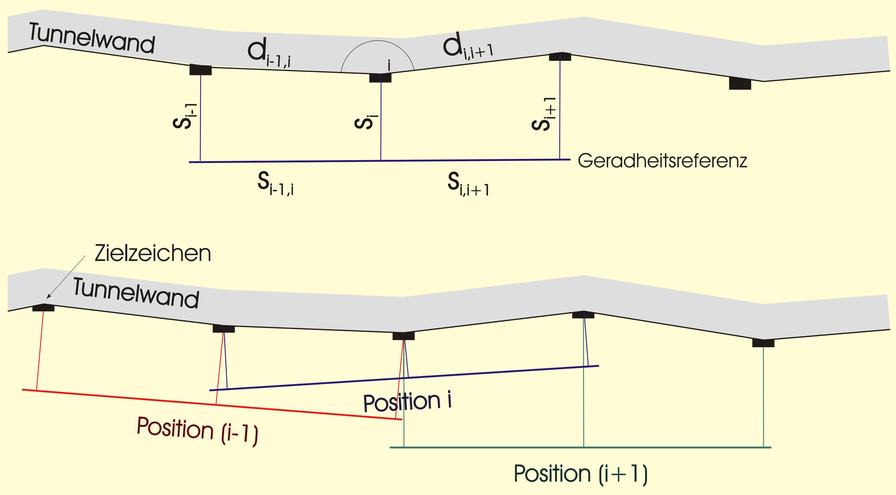


Abb. 4: Meßprinzip

Um die Anzahl der Überbestimmungen und somit die Genauigkeit zu erhöhen, wird der Meßzug aus sechs Wagen bestehen, so daß sechs benachbarte Referenzpunkte gleichzeitig von der Geradheitsreferenz überdeckt werden.

[1)] RTRS: **R**apid **T**unnel **R**eference **S**urveyor
[2)] PETRA: **P**ositron-**E**lektron-**T**andem-**R**ing-**A**nlage
[3)] DORIS: **Do**ppel-**Ri**ng-**S**peicher
[4)] HERA: **H**adron-**E**lektron-**R**ing-**A**nlage
[5)] XFEL: **X**-ray **F**ree **E**lectron **L**aser
[6)] GeLiS: **Ge**odätischer Meßzug für **Li**nearbeschleuniger und **S**ynchrotronstrahlungsquellen
[7)] LiCAS: **Li**near **C**ollider **A**lignment and **S**urvey

Deutsches Elektronen-Synchrotron
Applied Geodesy - MEA2
22603 Hamburg
Germany

www.desy.de
www-gds.desy.de

Hochgenaue Vermessung und Justierung zukünftiger Linearbeschleuniger

GeLiS[1]-RTRS Vermessungssystem für Tunnelnetze höchster Genauigkeit

Lagevermessung

Als Geradheitsreferenz dient bei GeLiS-RTRS ein gespannter Draht, der in der Projektion auf die Horizontalebene gerade ist. Der Draht wird, durch ein Hüllrohr vor äußeren Einflüssen geschützt, vom ersten bis zum letzten Wagen durchgeführt.

In jedem einzelnen Messwagen wird die Distanz zwischen dem Referenzpunkt (A) und dem Draht (C) mit optischen 3D-Positionssensoren (B,D) und zwei Inkrementaltastern (E,F) gemessen. Die Kameras (H) dienen zur Grobpositionierung, (G) ist der Meßtopf eines hydrostatischen Systems (s.u.).

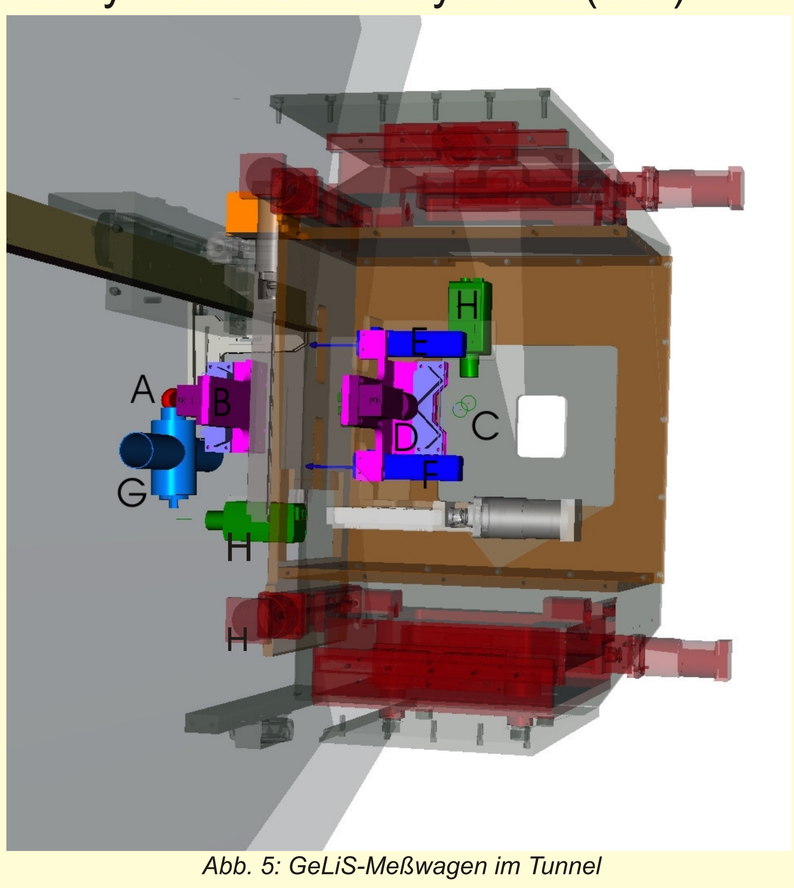


Abb. 5: GeLiS-Meßwagen im Tunnel

Da der Meßbereich der optischen Positionssensoren nur wenige Millimeter beträgt, der Tunnel aber eine Bautoleranz von mehreren Zentimetern hat, sind insgesamt sieben Verstellachsen nötigt, die die Sensoren translatorisch bewegen. Weiterhin wird die Neigung des Sensorträgerblockes gemessen (H) und mit den Stellantrieben auf Null gebracht.

3D - Positionssensor

Die berührungslose Abtastung des Zielzeichens und des Drahtes wird mit einem Positionssensor durchgeführt, der aus einer Kamera mit einem vorgeschalteten Bildteiler besteht.

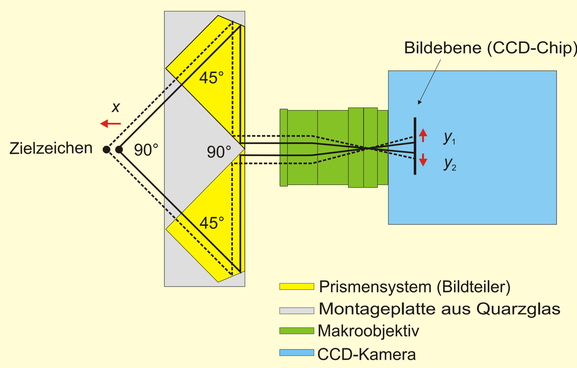


Abb. 6: 3D-Positionssensor

Der Vorteil gegenüber einer Zwei-Kamera-Lösung besteht darin, daß die Stabilitätsforderung nicht mehr für die relative Orientierung der Kameras mit ihren CCD-Chips besteht, sondern nur noch für das Prismensystem, was sich technisch leichter verwirklichen lässt.

Höhenvermessung

Da der gespannte Draht aufgrund des Durchhangs nur bedingt zur Höhenübertragung geeignet ist und der Beschleuniger in einigen Teilen der Erdkrümmung folgt, wird die Höhenkomponente bei GeLiS mit Hilfe eines hydrostatischen Systems (HLS[2)]) bestimmt. Um Fehler durch Temperatureinflüsse minimal zu halten, wird ein System mit einer freier Flüssigkeitsoberfläche verwendet, die berührungslos von einem Ultraschallsensor mit einer In-Situ-Kalibriereinrichtung abgetastet wird.

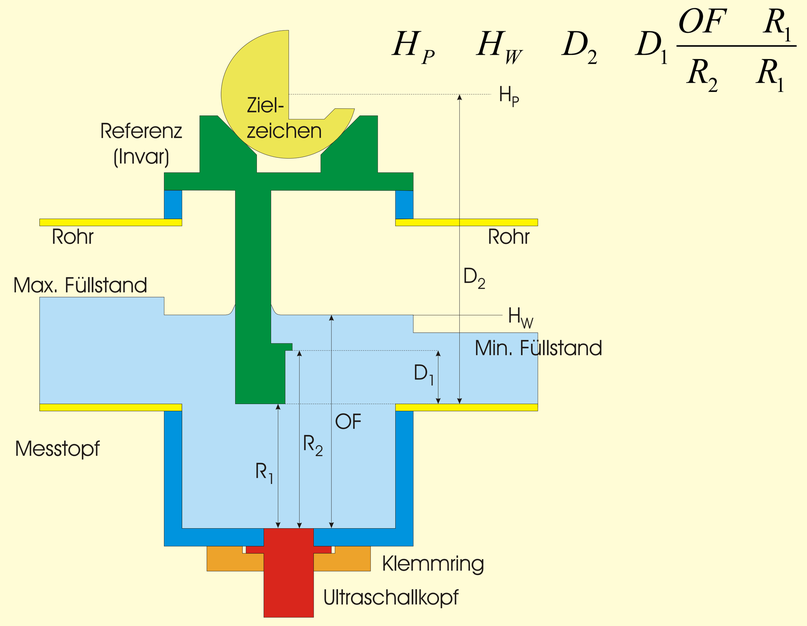


Abb. 7: HLS-Meßtopf

Mit den vorab kalibrierten Distanzen D_1 und D_2, sowie den gemessenen Distanzen R_1, R_2 und OF läßt sich die von Temperatureffekten und elektrischen Driften freie Höhe des Referenzpunktes H_P bestimmen.

Prototyp

Zum jetzigen Zeitpunkt existiert ein mit Sensorik bestückter Prototyp eines Meßwagens, mit dem Untersuchungen zur Funktionalität und zur Wiederholgenauigkeit angestellt werden. Zeitgleich erfolgt eine Verbesserung der mechanischen Konstruktion und der Auswerteelektronik.

Abb. 8, 9: Meßwagen, Blick zur Tunnelwand (links), Blick von Tunnelwand (rechts)

Ein Prototyp aus zunächst drei Meßwagen soll 2005 für weitere Experimente zur Verfügung stehen. Das HLS wird bereits jetzt im HERA-Tunnel für Überwachungsmessungen eingesetzt.

[1)] GeLiS: **Ge**odätischer Meßzug für **Li**nearbeschleuniger und **S**ynchrotronstrahlungsquellen
[2)] HLS: **H**ydrostatic **L**evelling **S**ystem

Deutsches Elektronen-Synchrotron
Applied Geodesy - MEA2
22603 Hamburg
Germany

www.desy.de
www-gds.desy.de

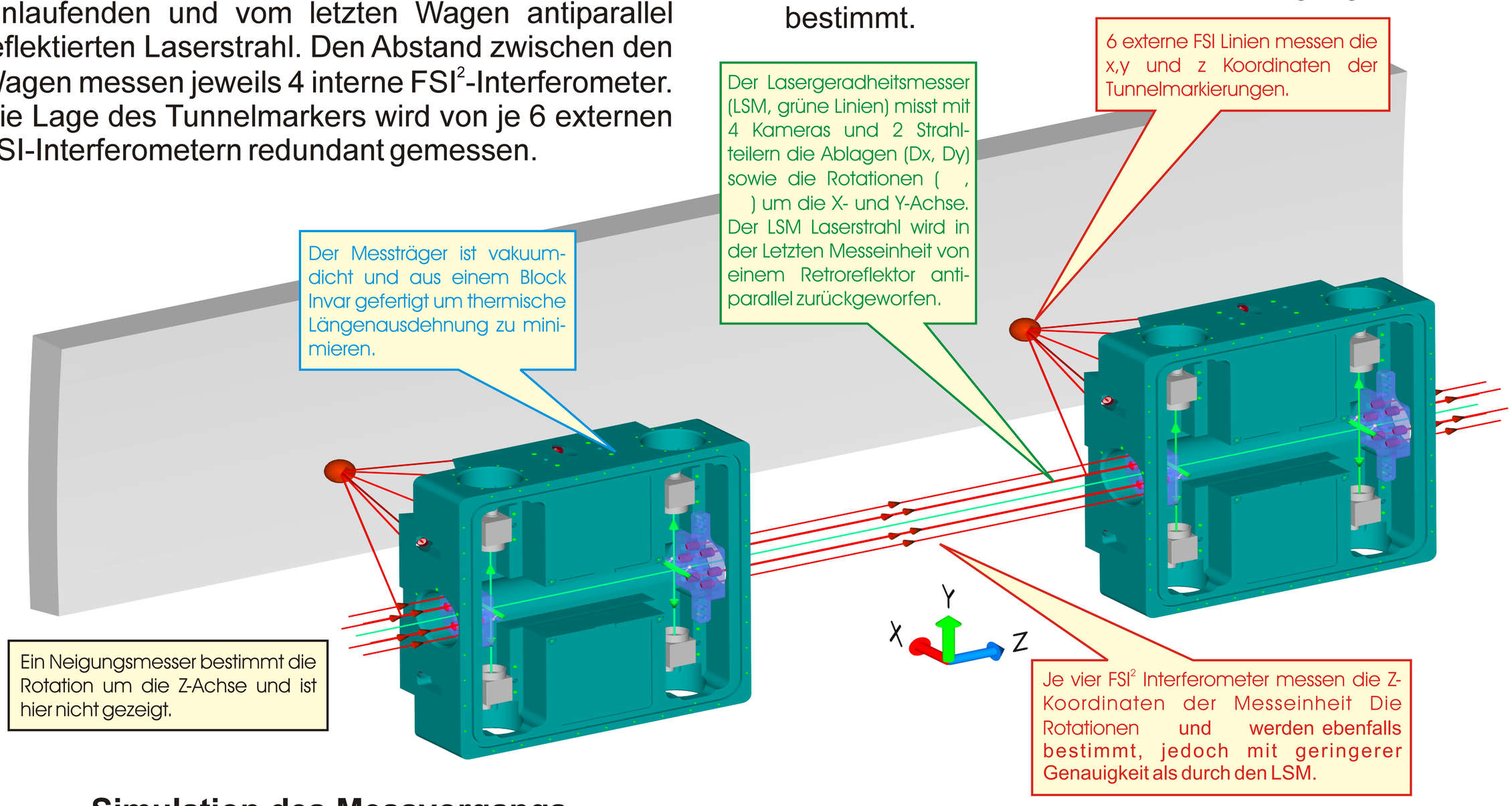
Hochgenaue Vermessung und Justierung zukünftiger Linearbeschleuniger

LiCAS-RTRS[1] Vermessungssystem für Tunnelnetze höchster Genauigkeit

Messprinzip des LiCAS-RTRS

Jede Messeinheit kann sowohl ihre eigenen 6 Freiheitsgrade, als auch die 3 Koordinaten des zugehörigen Tunnelmarkers messen. Der Lasergeradheitsmesser (LSM[1]) misst, mit zwei mal zwei Kameras die transversalen Ablagen (x, y) und die Rotationen um die X- und Y-Achse mit Bezug auf den einlaufenden und vom letzten Wagen antiparallel reflektierten Laserstrahl. Den Abstand zwischen den Wagen messen jeweils 4 interne FSI[2]-Interferometer. Die Lage des Tunnelmarkers wird von je 6 externen FSI-Interferometern redundant gemessen.

Alle internen Messungen finden im Vakuum statt (Vakuumrohr im Bild nicht gezeigt) um den Einfluss der Refraktion auf die langen Messungen zwischen den Wagen zu eliminieren. Eine Längenauflösung von 1 m für FSI und LSM wird erwartet. Rotationen um die Z-Achse werden von einem Neigungsmesser bestimmt.



Simulation des Messvorgangs

Die Messfehler werden zunächst mit einer optogeometrischen Simulation mit dem Program SIMULGEO[3] bestimmt. Ergebnisse für einen Stop sind in Figur 1 gezeigt. Da dies wegen des großen Rechenaufwandes nur bis zu etwa 15 Messstops (ca. 80m) möglich ist, wird für längere Simulationen ein Random-Walk-Model verwendet. Die Parameter[4] für das Model werden durch einen Fit an die SIMULGEO Resultate bestimmt (Figur 2). Die Fehler in den Koordinaten der Tunnelmarkierungen lassen sich in diese Models für den n.ten Schritt analytisch bestimmen (siehe unten). Die Fehler wachsen asymptotisch mit $n^{3/2}$ und somit schneller als bei einem Markovprozess.

$$\sigma_n = \sqrt{l^2\sigma_\alpha^2 \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} + \sigma_x^2 n}$$

n: Nummer der Tunnelmarkierung
l: Abstand zwischen zwei Messeinheiten des RTRS
: Modelparameter für Winkelfehler um die X-Achse
$_x$: Modelparameter für Fehler entlang der X-Achse
$_n$: Fehler der n.ten Tunnelmarkierung in der X-Achse
Analog gilt diese Formel auch für die Y-Achse

Monte-Carlo Simulationen mit dem Random-Walk-Model über 600m und eine Darstellung der Abweichung von einer Ausgleichsgeraden sind in Figur 3 zu sehen. Die Abweichung bleibt auf einer Stecke von 600m unter 100 m.

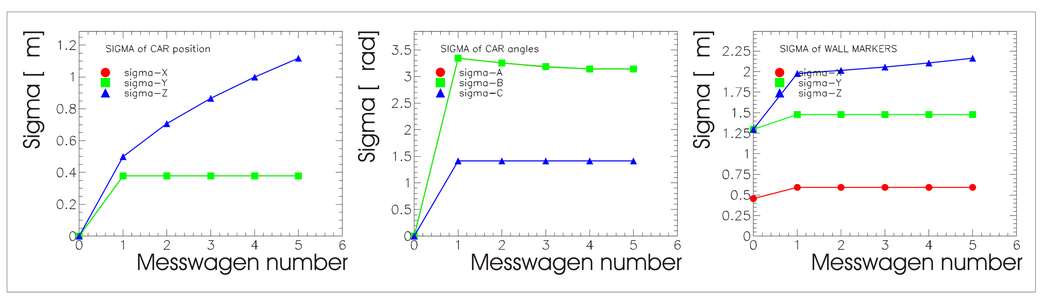


Fig 1: SIMULGEO Fehlerfortpflanzung für einen einzelnen Stop des RTRS

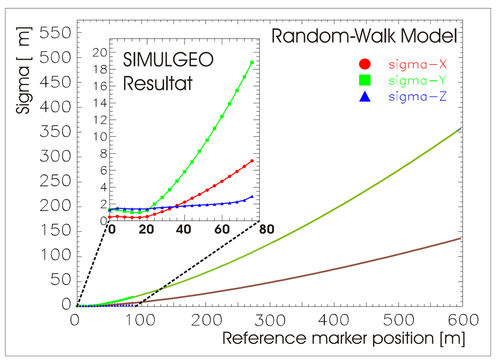


Fig 2: SIMULGEO Fehlerfortpflanzung über 15 Stops und Fit des Random Walk Models mit extrapolation über 600 m.

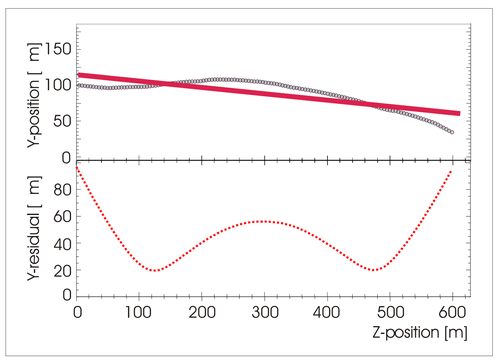


Fig 3: Abweichungen einer Monte-Carlo-Simulation mit dem Random-Walk-Model von einer Ausgleichsgeraden über 600m.

(1) LSM = Laser Straightness Monitor
(2) FSI = Frequency Scanning Interferometry (Details siehe folgendes Poster)
(3) SIMULGEO: *Simulation and reconstruction software for optogeometrical systems*, L.Brunel, CERN,CMS note 1998/079.
(4) Zwei transversale Versatzfehler und zwei Winkel-fehler.

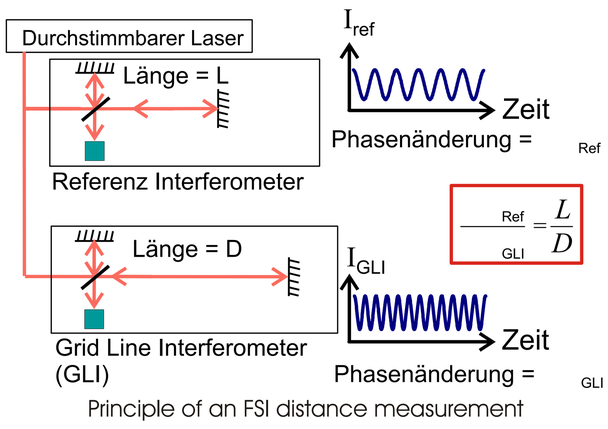
Hochgenaue Vermessung und Justierung zukünftiger Linearbeschleuniger

LiCAS-RTRS[1] Vermessungssystem für Tunnelnetze höchster Genauigkeit

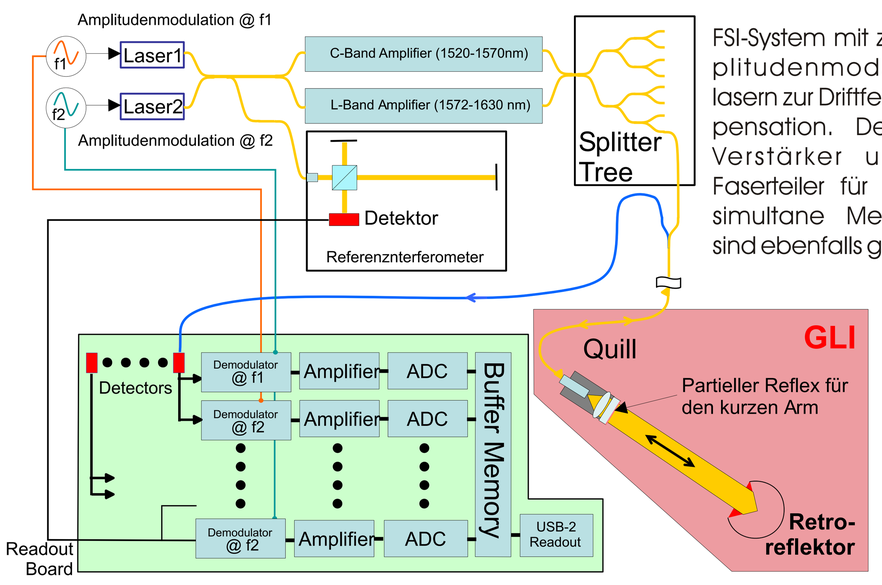
Frequency Scanning Interferometry (FSI)

FSI Technique

FSI ist eine Technik zur absoluten Abstandsmessung. Zwei Interferometer werden mit Laserlicht variabler Wellenlänge betrieben. Die Weglängendifferenz des unbekannten Interferometers (GLI) wird durch Vergleichen der in den beiden Interferometern erzeugten Phasenänderung wie oben beschrieben gemessen.



Principle of an FSI distance measurement



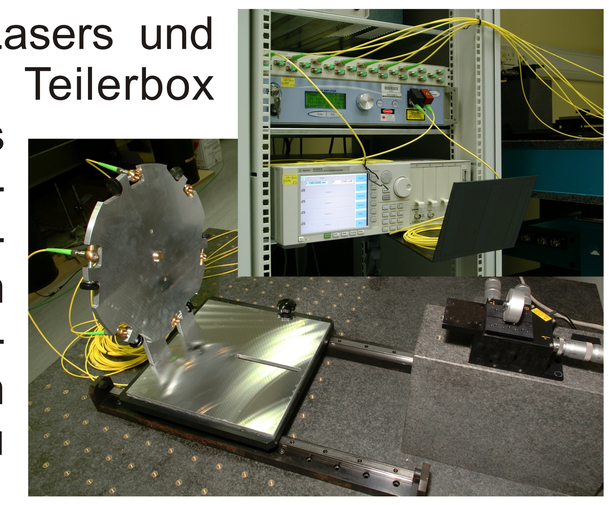
FSI-System mit zwei amplitudenmodulierten lasern zur Driftfehlerkompensation. Der EDFA-Verstärker und die Faserteiler für mehrere simultane Messungen sind ebenfalls gezeigt.

Stimmt man simultan zwei Laser in entgegengesetzter Richtung durch, so kann man Fehler aus Längendrift der Interferometer kompensieren.

Um die Signale zu trennen werden beide Laser mit unterschiedlichen Frequenzen Amplitudenmoduliert und in separaten Auslesekanälen demoduliert.

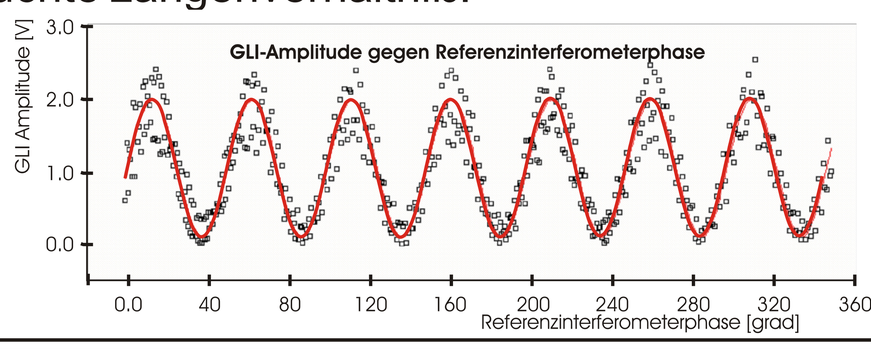
FSI Implementation

Fotografie des FSI-Lasers und EDFA1-Verstärkers, Teilerbox und Prototypen des externen 6-Linien FSI-Systems. Der Retroreflektor sitzt in einem hoch präzisen 3-Achsen-Versteller um das System zu kalibrieren.



FSI Analyse

Um Längen aus Zeitreihen von GLI- und Referenzintensitäten zu bestimmen, berechnet man erst die Phase des Referenzinterferometers als Funktion der Zeit. An die Graphen von GLI- und Referenzintensität gegen Referenzphase wird je ein Sinus angepasst. Das Verhältniß der Perioden dieser Sini ist das gesuchte Längenverhältniß.



Laser Geradheits Monitor (LSM[1])

Aufgabe

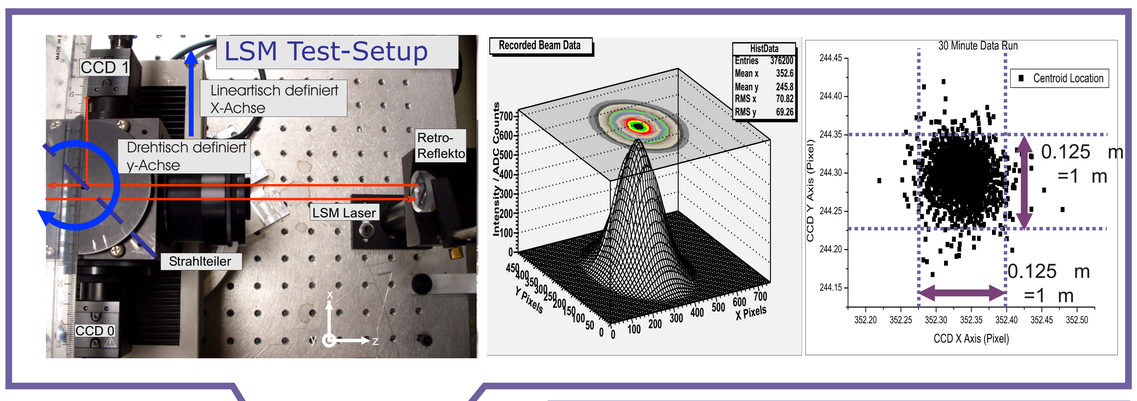
- Messung der transversalen Ablagen und Rotationen um die X- und Z-Achse.

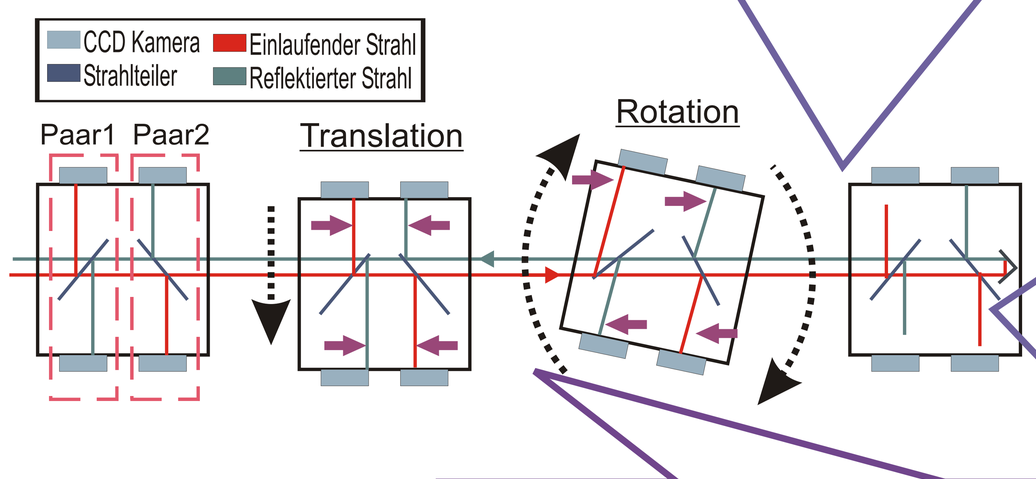
Funktionsprinzip

Der LSM misst die Lage und Orientierung des Messwagens relativ zu einem Laserstrahl der den Wagen zweimal durchläuft. Der Strahl wird im letzten Wagen von einem Retroreflektor reflektiert.

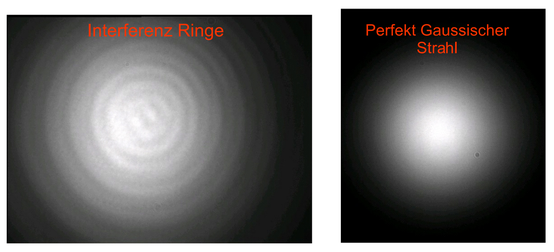
Jeder Wagen hat ein paar paralleler, extrem dünner Strahlteiler die den Parallelversatz bei der Teilung minimieren. 4 CCD-Kameras geben 8 Koordinatenmessungen der abgeteilten Strahlen. Jede dieser Messungen hat eine Genauigkeit von 1 m. Die Abstände zwischen den Kameras sind maximiert um die Sensitivität des LSM auf Rotationen zu erhöhen. Die Summe aller LSM Messungen bestimmt auch den Versatz der retroreflektierten Strahls.

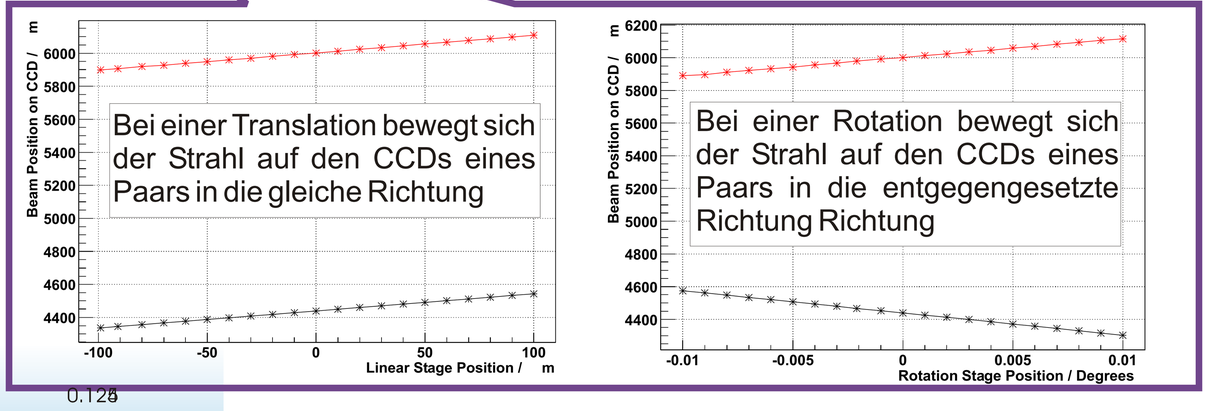
(1) LSM = Laser Straightness Monitor





Laser extrem niedriger Kohärenzlänge werden verwendet um Interferenzeffekte wie unten sichtbar zu vermeiden.





0.125

Oxford University
Subdepartment of Particle Physics
Denys Wilkinson Building
Keble Road
Oxford
Ox1 3RH
UK