

GeLiS - RTRS Vermessungssystem für Tunnelnetze höchster Genauigkeit

Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen werden beim DESY Hamburg seit mehr als 40 Jahren betrieben. Für die nächste Generation dieser Beschleuniger am Standort Hamburg wurde im Frühjahr 2003 durch den Beschluss des Bundesministeriums für Bildung und Forschung grünes Licht gegeben. Der XFEL-Röntgenlaser kommt!

Die neue Beschleunigergeneration wird aufgrund der höheren Energien der beschleunigten Teilchen nicht mehr als Ringbeschleuniger verwirklicht, sondern als Linearbeschleuniger gebaut. Das bedeutet höhere Genauigkeitsanforderungen an alle strahlführenden Komponenten, da der Teilchenstrahl einen geringeren Querschnitt hat. Zur geometrischen Verwirklichung werden zwei Konzepte verfolgt - ein geometrisch gerader oder ein der Erdkrümmung folgender Beschleuniger.



Abbildung 1: Luftbild DESY Hamburg mit Beschleunigern

Geodätische Aufgabenstellung

Die strahlführenden Komponenten beim XFEL müssen über eine große Strecke mit hoher Genauigkeit positioniert werden. Hierbei wird eine Standardabweichung von

$$\sigma = 0,3 \text{ mm in Lage und Höhe}$$

über eine Entfernung von 500 m gefordert. Weil der Beschleuniger mehrere Strahlwege enthalten soll, die voneinander getrennt aufgestellt und justiert werden, ist es nicht wirtschaftlich, jeden Strahlweg einzeln zu vermessen. Vielmehr wird zunächst ein Grundlagennetz geschaffen, von dem aus die unterschiedlichen Komponenten abgesteckt werden.

Dieses Grundlagennetz im Tunnel muss somit einer höheren Genauigkeit genügen, um die Absteckung und Positionierung der Beschleunigerkomponenten mit der geforderten Genauigkeit vornehmen zu können.

Der Einfluss der Refraktion auf einer Strecke dieser Länge macht es unmöglich, die geforderte Genauigkeit mit klassischen Methoden zu erreichen.

Theoretischer Ansatz

Die Justierung der Magnete und strahlüberwachenden Diagnoseinstrumente wird in zwei Teilschritten durchgeführt. In einem ersten Schritt wird ein permanentes Grundlagennetz an der Tunnelwand geschaffen, von dem aus dann in einem zweiten Schritt die einzelnen Strahlwege vermessen werden.

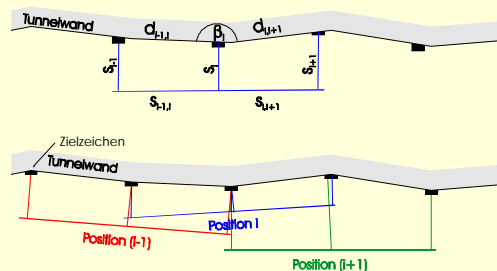


Abbildung 2: Konzept für das geodätische Grundlagennetz

Dieses Grundlagennetz besteht aus Festpunkten, die in einer Äquidistanz von 4,5 m an der Tunnelwand angebracht werden. Die Punkte erhalten 3D-Koordinaten, die aus einer kombinierten Lage- und Höhenmessung gewonnen werden.

In der Lage werden über ein Alignment die Einflüsse der Refraktion eliminiert, indem die Entfernungen s_i zwischen einer Geradheitsreferenz und den Zielzeichen gemessen werden. Aus den bekannten Abständen $s_{i,i+1}$ bzw. $s_{i,i-1}$ und den Messwerten s_i können die Entfernungen d und der Horizontalwinkel β für den mittleren Punkt berechnet werden, was den Messelementen eines Polygonzuges entspricht. Die Höhe wird über ein hydrostatisches Nivellement bestimmt.

Das Messkonzept wurde in Kooperation mit der Bauhaus-Universität Weimar, Professur für Geodäsie und Photogrammetrie entwickelt.

GeLiS - RTRS Vermessungssystem für Tunnelnetze höchster Genauigkeit

Lagemessung

Geradheitsreferenzen können über kurze Entfernungen mittels einer mechanisch invarianten Struktur realisiert werden. Bei Messpunktabständen von 4,5 m ist dies aber besser mittels eines gespannten Drahtes auszuführen. Der Draht wird über 25 m Länge, geschützt in einem Rohr, für sechs Messpunkte gleichzeitig als Referenz dienen. Die Anzahl der Punkte ermöglicht eine ausreichende Überbestimmung des Netzes.

Der Draht und die Abstandsmessungen zu den Zielzeichen werden in einem aus sechs Messwagen gekoppelten Zug namens GeLiS-RTRS¹ durchgeführt, der aufgrund seiner Konfiguration genügend Überbestimmungen in der Netzkonfiguration liefert. Dieser fährt, wie in Abbildung 3 zu sehen, auf einer Schiene an der Tunnelwand und führt dort automatisch seine Messungen aus.

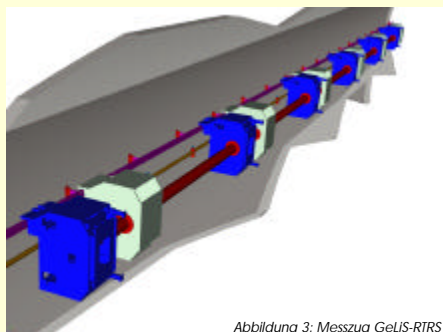


Abbildung 3: Messzug GeLiS-RTRS

Die Entfernungen zwischen den Referenzpunkten (A) und dem Draht (C) werden mit 3D-Positionssensoren (B, D) und zwei Inkrementaltastern (E, F) gemessen.

Die Ablesung des hydrostatischen Messsystems (G) wird mit der Lageinformation des Referenzpunktes verbunden, um 3D-Koordinaten für diesen Punkt zu berechnen. [Abbildung 5]

Der Abstand zwischen Draht und Referenzpunkt muss auf wenige Mikrometer genau gemessen werden. Hierzu wird als interne Verbindung der Sensoren eine Invarsäule verwendet, die neben Kameras und Tastern zusätzlich Neigungssensoren aufnimmt.

Prototyp Messwagen

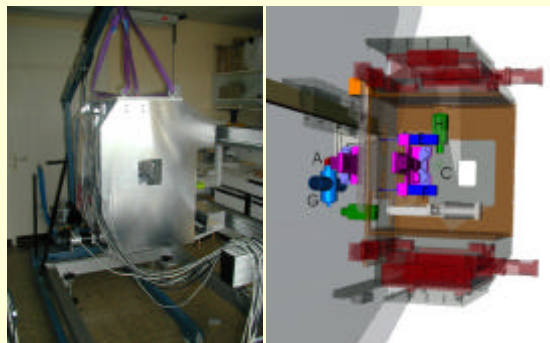


Abbildung 4, 5: Messwagen zur Messung des Grundlagentznetzes

Der Prototyp dieses Messwagens dient zur Überprüfung der mechanischen Konstruktion und daraus resultierender Erkenntnisse über das Verhalten im Betrieb. Ferner können das Zusammenspiel der einzelnen Sensoren am Objekt und die dazugehörige Softwareentwicklung betrieben werden. Ziel ist es, nach der Programmierung erste Tests zur Mess- und Wiederholgenauigkeit eines einzelnen Messwagens durchführen zu können.

Als weitere Entwicklungsschritte stehen die Konstruktion der Fahrwagen, der Koppelmodule zwischen den Wagen und der Drahtspannmodule an. Zudem ist nach den Tests am Prototyp eine Überarbeitung und Optimierung der Konstruktion durchzuführen, die dann als Vorlage für einen Messzug von drei Messwagen dient. Hierbei ist besonders eine gleichbleibende Stabilität trotz deutlicher Gewichtsreduzierung anzustreben.

Höhenmessung

Um bei einer klassischen Schlauchwaage Temperatur und Luftdruckeffekte zu erfassen, muss ein sehr hoher Aufwand betrieben werden. Dem kann entgegengewirkt werden, indem ein geschlossenes System verwendet und die vertikalen Wassersäulen der Schlauchwaage auf die Länge Null reduziert werden. Daher wird mit einer freien Wasseroberfläche in einem horizontal verlegten, halb gefüllten Rohr gearbeitet.

¹ Geodätischer Messzug für Linearbeschleuniger und lineare Synchrotronstrahlungsquellen
Rapid Tunnel Reference Surveyor

GeLiS - RTRS Vermessungssystem für Tunnelnetze höchster Genauigkeit

Das entwickelte System kann neben Temperatureffekten auch noch Sensordriften eliminieren. Dies geschieht durch eine "in situ" Kalibrierung, wobei die Größen D_1 und D_2 vorab im Labor kalibriert werden und die Strecken R_1 , R_2 und OF bei der Messung quasi gleichzeitig erfasst werden.

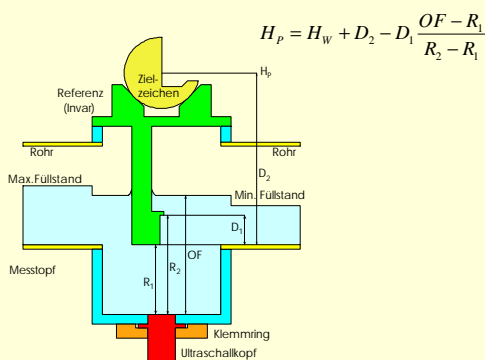


Abbildung 6: HLS Messtopf

Geoidbestimmung

Da Höhenbestimmungen immer auf das Geoid bezogen werden und der Beschleuniger einer anderen geometrischen Figur folgen wird, ist die Bestimmung der Undulation unausweichlich. Untersuchungen zur Erstellung eines geeigneten Geoids werden in Zusammenarbeit mit der Universität Hannover durchgeführt.

Absteckung strahlführender Komponenten

Die Absteckung, Justierung und Aufmaß der Strahlwege erfolgt ausgehend vom Grundlagennetz. Mittels einer freien Stationierung können mit Lasertracker oder Tachymeter an einer beliebigen Stelle im Tunnel Messungen durchgeführt werden.

In der Kombination aus Grundlagennetz und optischer Vermessung werden die Genauigkeitsforderungen erfüllt.

Prototyp Absteckung

Es wurde zur Absteckung der strahlführenden Komponenten ein Wagensystem entwickelt, das die Messinstrumente aufnimmt. Dieses Wagensystem wird zu einem späteren Zeitpunkt ebenfalls automatisiert werden. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, kann ein Tachymeter zur Absteckung verwendet werden. Ebenso sind Vorrichtungen zur Aufnahme eines Lasertrackers vorgesehen. Beide Systeme werden in TTF II² zum Einsatz kommen, um ihre Nutzbarkeit zu testen.



Abbildung 7: Messwagen zur Positionierung von Komponenten

Zusammenfassung

Dieses neuartige Vermessungssystem wird am DESY für den Einsatz in geradlinigen Beschleunigern mit verschiedenen Aufgabenstellungen konzipiert. Die Verwendung ist jedoch auch für andere großräumige, gestreckte Tunnelnetze denkbar.

Ziel des Projektes ist es, ein automatisiertes Messsystem zu entwickeln, welches ein Referenznetz im Tunnel erzeugt. Ein hoher Grad an Automatisierung wird notwendig sein, um Netze dieser Güte und Größe in einer angemessenen Zeit zu bestimmen, da die Messzeiten während der Betriebsunterbrechungen des Beschleunigers nur sehr kurz sind.

Die theoretischen Betrachtungen zeigen eine grundsätzliche Machbarkeit, was auch die Tests der einzelnen Sensoren beweisen. Dieser erste Prototyp wird nun für einen genaueren Aufschluss über das Zusammenwirken der Sensoren ein wichtiger Baustein sein.

² TESLA Test Facility - Ausbaustufe II