

# Überlegungen zur genauen Beschleunigervermessung in aktivierten Bereichen mittels Photogrammetrie

Frank BOOCHS, Andreas MARBS

## Zusammenfassung

Die Größe, der geometrische Aufbau und die geplanten Betriebsformen des zukünftigen Beschleunigersystems der Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt (GSI) führen zu ganz neuen Aufgabenstellungen für die Einrichtung und Überwachung der strahlführenden Komponenten. Mit der Auslegung der Anlage stößt man nicht nur im physikalischen Bereich in ganz neue Dimensionen vor, sondern auch aus messtechnischer Sicht wird bisher nicht sicher beherrschtes Terrain betreten. Hierbei spielen neben der mindestens um Faktor zehn verschärften Genauigkeits-Größenrelation die Existenz von Maschinenbereichen, die nach Erstinbetriebnahme der neuen GSI-Anlage aufgrund der erwarteten sehr hohen Strahlungsemissionen nicht oder nur kurzzeitig unter starken Sicherheitsvorkehrungen begehbar sein werden, eine entscheidende Rolle. Die bewährte, auf Betreten der Örtlichkeit fußende Mess- und Regeltechnologie während der Wartungsphasen kann daher wegen der starken und anhaltenden Radioaktivität in diesen Bereichen definitiv nicht mehr eingesetzt werden. Es ist nun ein völlig neues Mess- und Justierkonzept notwendig, das sowohl die gewachsenen Genauigkeitsanforderungen erfüllt, als auch unter Berücksichtigung aller durch den Betrieb gegebenen Rahmenbedingungen praktisch anwendbar ist. Dieses Konzept soll entworfen, theoretisch wie praktisch abgesichert und zu einem für den Betrieb der neuen Anlage einsatzfähigen Ansatz fortentwickelt werden.

Der nachfolgende Beitrag schildert die bisherigen Überlegungen und beschreibt den Problembereich aus messtechnischer Sicht. Neben der Vorstellung des auf einem photogrammetrischen Ansatz basierenden Grundkonzeptes werden die bisherigen Untersuchungen im Rahmen eines Forschungsprojektes dargestellt.

## 1 Einführung

Die Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt betreibt eine weltweit einzigartige Beschleunigeranlage für Ionenstrahlen. Das Forschungsprogramm der GSI umfasst ein breites Spektrum, das von Kern- und Atomphysik über die Plasma- und Materialforschung bis hin zur Tumorthherapie reicht. Die wohl bekanntesten Resultate sind die Entdeckung von sechs neuen chemischen Elementen und die Entwicklung einer neuartigen Tumorthherapie mit Ionenstrahlen. Jährlich nutzen über 1000 auswärtige Wissenschaftler die Anlagen der GSI und es bestehen Kooperationen mit ca. 150 Instituten weltweit (GSI 2005).

Für den optimalen Betrieb einer Teilchenbeschleunigeranlage ist es erforderlich, dass die strahlführenden Komponenten präzise zueinander positioniert sind. Eine solche Anlage unterliegt jedoch permanenten geometrischen Veränderungen, sei es durch Reparatur und Austausch einzelner Komponenten oder durch lokale Bodenbewegungen bzw. -senkungen. Der Istzustand der Maschine ist daher regelmäßig zu kontrollieren und bei Bedarf in den

Sollzustand zurückzuführen („Alignment“). Zum Einsatz kommen hierbei überwiegend Mess- und Justierverfahren, die auf optischen Zielungen mit unterschiedlichen Präzisionsgeräten aufbauen und für die das ausführende Personal die Anlage betreten muss. Die hier verfügbare Technologie ist weit fortentwickelt und stellt sicher, dass die Geometrie der Beschleunigeranlagen die für einen ordnungsgemäßen Betrieb erforderlichen Rahmenbedingungen erfüllt.



**Abb. 1:** Bestehende und zukünftige Anlage der GSI

Aufbauend auf den Erfahrungen und technologischen Entwicklungen an der bestehenden GSI-Anlage und unter Einbeziehung neuer technologischer Konzepte soll in dem geplanten Projekt FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) bis zum Jahr 2013 eine Beschleunigeranlage der nächsten Generation entstehen. Diese wird Ionenstrahlen mit bisher unerreichter Intensität liefern, was zu neuen physikalischen Rahmenbedingungen und damit zu ganz neuen Aufgabenstellungen für die Messtechnik zur Überwachung der Beschleunigerkomponenten führt.

## 2 Problemkreis

Aufgrund der gegenüber der bestehenden Anlage deutlich höheren Strahlenergien wird es bei FAIR Maschinenbereiche geben, die einer starken Belastung durch Neutronenstrahlung und – dadurch ausgelöst – einer fortwährenden Aktivierung unterliegen. Während die Neutronenstrahlung nur während des Betriebs der Anlage auftritt, bewirkt die Aktivierung aber eine andauernde Emission von Gammastrahlung, die selbst nach einiger Abklingzeit noch so hohe Dosen aufweist, dass ein Betreten der Anlage nicht, oder nur unter großen Sicherheitsvorkehrungen möglich sein wird. Dies hat Konsequenzen für die bewährte Mess- und Regeltechnologie, die nun wegen der starken und anhaltenden Radioaktivität zum Schutze des Personals nicht mehr eingesetzt werden kann. Daher ist ein völlig neues Alignment-Konzept zu entwerfen, das unter Berücksichtigung dieser Bedingungen ohne den Einsatz

von Personal auskommt. Eine automatische, maschinell gesteuerte Vermessung und Korrektur der Anlage wird unumgänglich.

Neben den physikalischen Rahmenbedingungen werden auch in geometrischer Hinsicht hohe Anforderungen an die Messtechnik gestellt. Um die zu erzielende hohe Strahlqualität zu erreichen, sind relative Genauigkeiten zweier benachbarter Beschleunigerkomponenten (je etwa 6 m Länge) von ca. 0,1 mm gefordert. Dieses Ziel wird von der langgestreckten, nicht-linearen Geometrie der betroffenen Maschinenbereiche, die sich bis über 50 m Länge erstrecken können (z.B. am zukünftigen Super-Fragmentseparator, vgl. Abb. 2), ebenso beeinflusst, wie die begrenzten räumlichen Verhältnisse im Tunnel. Eine freie Wahl der Beobachtungspositionen ist aus diesen Gründen nicht möglich.



**Abb. 2:** Vorläufiger Plan des Super-FRS

Erschwerend für die Konzeptionierung eines Messsystems für die kontaminierten Bereiche von FAIR kommt hinzu, dass die Planungen der neuen Beschleunigeranlage noch nicht beendet sind. Daher gibt es bislang kaum gesicherte Angaben zu Geometrie, Strahlenbelastung und Genauigkeitsvorgaben. Aufgrund dessen können die gegenwärtigen Untersuchungen und Simulationen nur auf Annahmen und Schätzungen beruhen, die entweder von der bestehenden Anlage oder aus vorläufigen Planungen für FAIR übernommen werden.

### **3 „R A L F“ – Grundkonzept**

#### **3.1 Vorüberlegung**

Ein geeignetes geodätisches Messprinzip, das ohne den Einsatz von Personal am zu messenden Objekt auskommt, berührungsfrei arbeitet, flexible Messaufgaben erfüllen und sehr hohe Genauigkeiten erreichen kann, nutzt Präzisionsmessbilder und folgt den Gesetzmäßigkeiten der Photogrammetrie. Diese bewährte Technologie ist im industriellen Bereich

seit Jahren erfolgreich im Einsatz. Die Vorteile, das Objekt nicht betreten zu müssen, haben u.a. auch zum Einsatz der Photogrammetrie im Kraftwerksbau bzw. in der Überwachung von Kernkraftwerken geführt. Aus diesen Gründen sind photogrammetrische Verfahren für Messaufgaben in hoch aktivierten Bereichen bestmöglich geeignet.

Für ein Remote-System zur präzisen Justierung größerer Objekte sind ebenfalls Lösungsansätze bekannt. Fernsteuerbare Justiervorrichtungen werden aus unterschiedlicher Motivation an bestehenden Beschleunigeranlagen verwendet. Die Unterschiede in den jeweiligen Anforderungen erlauben zwar keine einfache Übertragung von bereits vorhandenen Lösungen auf die GSI-Problematik, lassen aber den erfolgreichen Einsatz von automatischen bzw. ferngesteuerten Verstelleinrichtungen realistisch erscheinen.

### **3.2 Vorgesehenes Konzept**

Das bei der GSI zu entwickelnde Alignmentsystem wird im Folgenden mit dem Arbeitstitel RALF – Remote Alignment on the Fly – bezeichnet. Erste Überlegungen sehen einen (oder mehrere) ferngesteuerten Kamerawagen vor, der sich über oder neben den Beschleunigerkomponenten entlang des Tunnels bewegt. Auf diesem befindet sich eine Anordnung mehrerer industrieller Digitalkameras. Dieses Kamerasystem wird aufgrund der langgestreckten Geometrie und der begrenzten Platzverhältnisse im Tunnel jeweils nur einen Teil der betroffenen Maschinenbereiche entlang des Strahlweges aufnehmen können. Daher muss eine sequentielle Aufnahme aller nötigen Bereiche mit anschließender Verknüpfung und gemeinsamer Ausgleichung erfolgen. Die zu vermessenden Magnete müssen entsprechend signalisiert werden, so dass sich einerseits durch definierte Punkte Rückschlüsse auf die Strahlachse ziehen lassen (was eine vorherige sog. Fiduzialisierung, also das Einmessen definierter Punkte gegenüber der Strahlachse, erfordert) und andererseits das langgestreckte photogrammetrische Netz die nötige Stabilität erhält. Das Ergebnis einer solchen Ausgleichung sollte Korrekturwerte für die Lage der Beschleunigerkomponenten liefern, die dann von motorisierten Positionierungssystemen an den Maschinen ausgeführt werden.

## **4 Bisherige Untersuchungen**

Die ersten Untersuchungen für RALF konzentrierten sich bislang auf die Bereiche Kameratechnik und Strahlung sowie Netzkonfiguration, da die Erkenntnisse daraus möglicherweise Einfluss auf die zu bauende Anlage haben und so noch rechtzeitig in die Planungen für FAIR einfließen können.

### **4.1 Kameras und Strahlung**

Von den an der Bilderzeugung beteiligten Kamerakomponenten Optik, Gehäuse und CCD-Chip ist sicherlich letzterer von Strahlung am ehesten in seiner korrekten Arbeitsweise zu treffen. Ein solcher Sensor besteht aus einer Vielzahl kleiner lichtempfindlicher Detektorelemente, die matrixförmig in einem Halbleiterbaustein angeordnet sind (LUHMANN 2000). Da die Siliziumkristallstrukturen der Bildelemente empfindlich für die Photonen des sichtbaren Lichts sind, ist davon auszugehen, dass auch ionisierende Strahlung entsprechende Einflüsse auf den Sensor hat. Dabei ist neben dem die Bildmessung beeinflussenden unerwünschten Erzeugen von Ladungsträgern aufgrund des Photoeffekts vor allem auch eine

dauerhafte Beschädigung der Siliziumstruktur bis hin zur Zerstörung des Chips zu befürchten. Schäden dieser Art können schnell zu einem K.O.-Kriterium für den Einsatz von Photogrammetrie in den aktivierten Bereichen von FAIR werden, daher waren zunächst die entsprechenden Gefahrenpotentiale zu prüfen und deren Konsequenzen für die Messtechnik zu bewerten.

#### **4.1.1 Auftretende Strahlung bei FAIR**

Die gegenüber der bestehenden GSI-Anlage deutlich höheren Energien der Ionenstrahlen bei FAIR führen überall dort zu starker Emission von energiereichen Neutronen, wo die auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigten Ionen auf Materie treffen. Teilweise wird dies gezielt herbeigeführt (z.B. beim Auftreffen auf ein Target), um wissenschaftliche Erkenntnisse aus den resultierenden Teilchen zu ziehen, teilweise tritt dies aber auch ungewollt auf, z.B. beim Übertritt in bzw. aus dem neuen Beschleunigerring SIS, wo wegen der starken Richtungsänderungen Teile des Ionenstrahls absorbiert und deren Energie in Form von ionisierender Strahlung in die Umgebung abgegeben wird. Diese Neutronenstrahlung wird allerdings nur in der Beam Time, also während des Betriebs der Anlage auftreten. Neutronenstrahlung hat eine große Reichweite, da sie elektrisch neutral ist und beim Durchtritt durch Materie nicht durch ihre Ladung wechselwirkt. Gleichzeitig ist ihr Zerstörungspotential bis zu zwanzig mal höher als z.B. bei Gammastrahlung, was bei der zukünftigen Anlage FAIR Abschirmung in Form von bis zu acht Meter dicken Betonmauern nötig macht.

Treffen Neutronen auf Materie, können die dort befindlichen Atome instabil werden und unter Emission von Gammastrahlung in andere Nuklide zerfallen. Dieser Vorgang bewirkt, dass die nun „aktivierte“ Materie fortwährend Gammastrahlung abgibt, selbst wenn keine Neutronenstrahlung mehr vorliegt. Die Zerfallsdauer ist von der Halbwertszeit der betroffenen Elemente abhängig. Nach ersten Schätzungen werden in einigen Bereichen von FAIR durch die Gammastrahlung etwa Dosisleistungen von 10 mSv/h bei einem Abstand zur Strahlungsquelle von 10 m erreicht (etwa nach zweitägiger Abklingzeit). Zum Vergleich: Grenzwerte für die maximale Dosisaufnahme des Menschen liegen bei 20 mSv pro Jahr (BMU 2001).

#### **4.1.2 Konsequenzen für die Kamerasensoren**

Welche Strahlendosen zur Beschädigung der Kamerasensoren führen, ist eher eine experimentelle als eine theoretische Frage und hängt u.a. stark vom verwendeten Sensor ab. Bei Bestrahlung mit Neutronen können bereits einzelne Ereignisse dauerhaften Schaden in der Siliziumstruktur anrichten. Der Schwellwert der dafür nötigen Neutronenenergie liegt bei lediglich wenigen Elektronenvolt, was bei FAIR sicher deutlich überschritten wird. Eine wichtige Erkenntnis für RALF ist daher, dass die Kameras unter allen Umständen vor Neutronenstrahlung geschützt werden müssen, da es sonst zu dauerhaften Schäden im Sensor kommt und die Bildqualität rapide nachlässt - bis hin zum Versagen des Chips. Oberste Priorität hat also ein Schutzraum, welcher das System vor jeglicher Neutronenstrahlung vollständig abschirmt. Dieser Schutzraum sollte sich in möglichst großer Entfernung vom Target befinden, das Kamerasystem könnte dann durch einen Schacht in den aktivierten Bereich fahren. Entsprechende bauliche Möglichkeiten sind baldmöglichst mit den Verantwortlichen zu klären.

Bei Gammastrahlung ist jedoch eine wesentlich höhere Energie nötig, um solche Schäden auszulösen. Sie liegt im Bereich von deutlich mehr als 10 MeV. Da die Energie der bei FAIR auftretenden Photonen mit max. 1,5 MeV zu gering ist, wird durch die Gammastrahlung vermutlich keine irreparable Schädigung des Chips eintreten. Grundsätzlich sollte das System aber so ausgelegt werden, dass die Einwirkung von Gammastrahlung auf den Sensor minimiert wird (Abstand zur Quelle, Aufenthaltsdauer, evtl. Abschirmung der Kamera).

Allerdings muss auch untersucht werden, inwieweit das Bild selbst durch temporäre Störungen geschädigt wird (z.B. erhöhtes Rauschen, Dunkelstrom oder Störpixel), da dies die Bildmessgenauigkeit und damit die erzielbare Genauigkeit am Objekt beeinflusst.

#### 4.1.3 Geometrische Kamerauntersuchungen

Um das Potential herkömmlicher Industriekameras fuer den Einsatz bei RALF zu prüfen, wurden zwei Kameras mit jeweils vier Megapixel auf ihre geometrische Stabilität hin untersucht und kalibriert. An einem räumlichen Punktfeld mit Retromarken und Maßstabsinformationen wurden Verbände mit bis zu 30 konvergenten Bildern aufgenommen und unter verschiedenen Konfigurationen ausgewertet. Einige Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1:** Ergebnisse der geometrischen Kameratests

	<b>SVS-Vistek SVS 4020 (CCD)</b>	<b>Teli CSB4000F (CMOS)</b>
<b>Objektiv</b>	17 mm	17 mm
<b>Auflösung</b>	2048 x 2048	2008 x 2044
<b>Pixelgröße</b>	7,4 $\mu\text{m}$	6,0 $\mu\text{m}$
<b>RMS Bildmessung</b>	0,26 $\mu\text{m}$ 1/28 Pixel	0,51 $\mu\text{m}$ 1/12 Pixel
<b>RMS X (mm)</b>	0,027	0,082
<b>RMS Z (mm)</b>	0,021	0,041
<b>RMS Z (mm)</b>	0,042	0,091
<b>RMS Scales (mm) (Maßstäbe bis 2m)</b>	0,061	0,087
<b>Preis (Euro)</b>	ca. 7000,-	ca. 4000,-

Es zeigte sich, dass zumindest eine der beiden Kameras fuer photogrammetrische Zwecke mit hohen Genauigkeitsanforderungen geeignet ist. Die SVS4020 erreichte Bildmessgenauigkeiten von bis zu 1/30 Pixel bei relativen Genauigkeiten im Objektraum von ca. 1:40.000. Unter Verwendung eines erweiterten Parametersatzes der inneren Orientierung (HASTEDT & LUHMANN 2002) zeigte sich eine hohe innere Stabilität dieser Kamera, da die Genauigkeit damit kaum gesteigert werden konnte und die Kameraparameter von Bild zu Bild nur sehr gering variierten. Bei der zweiten Kamera konnte mit Hilfe des erweiterten Ansatzes jedoch eine signifikante Verbesserung der Ausgleichung erreicht werden, was auf eine etwas instabilere innere Orientierung hindeutet.

## 4.2 Netzkonfiguration

Entscheidend für die Gewährleistung einer hohen Strahlqualität im Beschleuniger ist ein präzises Alignment der jeweils benachbarten und über eine Länge von 12 m ausgedehnten Beschleunigerkomponenten. Zu diesem Zweck konzentrieren sich die Simulationen zunächst auf die Aufnahme zweier benachbarter Magnete. Als Zielvorstellung sollen Punktgenauigkeiten von ca. 0,1 mm erreicht werden. Für die Simulation verschiedener Aufnahmeanordnungen wurde die Bündelausgleichungssoftware CAP verwendet. Sämtliche Berechnungen basieren dabei auf künstlich erzeugten Bildkoordinaten, die mit einem zufälligen Fehler versehen wurden, um die Bildmessgenauigkeit zu simulieren ( $s_0$  a priori 0,3  $\mu\text{m}$ ). Als Kamera wurde die SVS4020 mit vier Megapixel eingeführt (vgl. Tab. 1). Die Platzverhältnisse im Beschleunigertunnel wurden aus vorläufigen Plänen des Super-FRS (Abb. 2) übernommen.

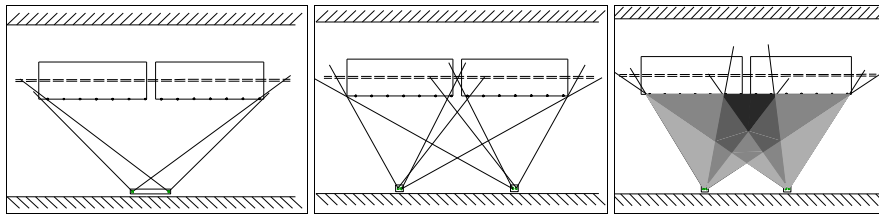


Abb. 3 Simulation verschiedener Netzkonfigurationen

### 4.2.1 Konfiguration 1

In einem ersten Versuch wurde ein geschlossener Kamerawagen mit vier Kameras, angeordnet in einem 2 mal 1,5 Meter großen Rechteck, angenommen (Abb. 3 links). Die Objektive der Kameras werden so gewählt, dass jeweils der komplette Messbereich von ca. zwölf Meter Breite abgedeckt wird, was zu Bildmaßstäben von ca. 1:1000 und relativ ungünstigen Strahlenschnitten führt. Die RMS-Werte der Objektkoordinaten sind mit 0,5 bis 1,0 mm dementsprechend groß. Eine Vergrößerung der Basis würde bessere Schnittbedingungen liefern, jedoch ist ein noch größerer Kamerawagen im Beschleunigertunnel kaum noch praktikabel und daher nicht wünschenswert.

### 4.2.2 Konfiguration 2

Um bessere Strahlenschnitte zu erzielen, werden nun zwei kleine Kamerawagen angenommen, sie sich voneinander unabhängig bewegen können (Abb. 3 Mitte). Jeder Wagen ist mit zwei Kameras ausgestattet, die nun nicht mehr den kompletten Bereich von 12 m abdecken sondern nur noch etwas mehr als die Hälfte. Die beiden Kameras jedes Wagens werden über die bekannte relative Orientierung miteinander verbunden. Dadurch kommen deutlich günstigere Bildmaßstäbe von 1:250 bis 1:500 zustande. Die RMS-Werte der Objektpunktkoordinaten verbessern sich auf ca. 0,2 mm. Jedoch ist die Anordnung durch den kleinen Überlappungsbereich in der Mitte relativ instabil, was sich in stark verformten Fehlerellipsen an den äußeren Punkten bemerkbar macht.

### 4.2.3 Konfiguration 3

Die Vergrößerung der Bildwinkel bewirkt bei Konfiguration 3 (Abb. 3 rechts) einen größeren Überlappungsbereich und damit eine stabilere Geometrie der Anordnung. Zwar verschlechtern sich die Bildmaßstäbe leicht auf bis zu 1:600, jedoch wird bei den Objektkoordinaten nun ein mittlerer quadratischer Fehler von 0,1 bis 0,2 mm erreicht, was in etwa den Zielvorstellungen entspricht.

## 5 Ausblick

Die ersten Untersuchungen hinsichtlich Kameraauswahl, Strahlungseinfluss und Netzkonfiguration haben gezeigt, dass eine photogrammetrische Lösung des Alignmentproblems in den aktivierten Bereichen von FAIR möglich und sinnvoll erscheint. Das weitere Vorgehen bei der Planung eines solchen Alignmentsystems bedarf jedoch noch vieler anderer Schritte. Dazu gehören unter anderem die Bestimmung der technischen Kriterien für die automatische, fernkontrollierte Justierung, der Entwurf der notwendigen Algorithmen für die Bildanalyse sowie die Entwicklung eines Konzeptes für die Integration in den laufenden Anlagenbetrieb. Die nächsten Schritte sind jedoch zunächst die Ermittlung von Zwängen für das Design der Beschleunigeranlage (Gebäudeplanung, Strahlenschutz), die Optimierung der photogrammetrischen Aufnahmeanordnung sowie die praktische Untersuchung der Auswirkung von radioaktiver Strahlung auf die Sensorik.

Das Forschungsprojekt zur „Entwicklung eines Lösungskonzeptes für die hochgenaue dreidimensionale Positionsbestimmung und Justierung von Beschleunigerkomponenten in stark aktivierten Bereichen“ steht noch am Anfang und ist insgesamt auf eine dreijährige Projektlaufzeit ausgelegt.

## 6 Literatur

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2001): *Strahlenschutzverordnung*. Teil 2, §5.
- Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH (2005): *GSI home page*. <http://www.gsi.de/>
- Hastedt H. & Luhmann T. (2002): *Image-variant interior orientation and sensor modeling of high-quality digital cameras*. ISPRS Commission V, Korfu, Griechenland, 2.-6. September
- Luhmann T. (2000): *Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Wichmann Verlag, Heidelberg
- Marbs A. & I. Pschorn (2004): *A High-Precision Survey and Alignment System in Inaccessible, High-Radiation Areas of FAIR: Fundamental Ideas*. 8<sup>th</sup> International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA 2004), Genf, Schweiz, 4.-7. Oktober 2004. <http://iwaa2004.web.cern.ch/iwaa2004/>