

# Freie Bahn für kleinste Teilchen

Vakuumtechnische Herausforderungen an Linearbeschleunigern und Transferstrecken

Dirk Budelmann und Andreas Schopphoff

Teilchenbeschleuniger sind Maschinen, die Partikel mithilfe elektromagnetischer Felder auf sehr hohe Geschwindigkeiten beschleunigen. Damit das elektromagnetische Feld Energie auf die Partikel übertragen kann, müssen diese elektrisch geladen sein. Um eine Interaktion der Partikel untereinander und unerwünschte Reaktionen zu vermeiden, ist eine Umgebung mit Ultra-Hochvakuum (UHV) zwingend.

Der Betriebsdruck in den Strahlrohren variiert bei modernen Beschleunigern vom UHV ( $< 10^{-8}$  hPa) bis zum extremen UHV ( $< 10^{-12}$  hPa). In diesem Bereich besitzen die Partikel eine sehr große mittlere freie Weglänge: Die Wahrscheinlichkeit, dass sie aufeinander treffen und sich gegenseitig stören, ist sehr gering.

Bremsstrahlung entsteht, wenn ein äußeres elektromagnetisches Feld elektrisch geladene Teilchen auf relativistische Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Kreisbeschleuniger bringen elektrisch geladene Partikel mithilfe von Ablenkmagneten auf eine gekrümmte Bahn, sodass sie einen großen Ring durchlaufen. Entlang der gekrümmten Flugbahn entsteht eine besondere Form der Bremsstrahlung: Synchrotronstrahlung wird in tangentialer Richtung abgestrahlt und seitlich in eine Experimentierstrecke außerhalb des Rings ausgekoppelt. Große Ringbeschleuniger heißen daher auch Synchrotrons. Eine effektive Anwendung liegt darin, den Ring zur „Speicherung“ hochenergetischer Partikel zu nutzen, die zuvor ein Linearbeschleuniger auf



Abb. 1 Supraleitender Beschleuniger SPIRAL2 bei GANIL

die gewünschte Geschwindigkeit gebracht hat. Die Teilchen behalten im Speicherring ihre Energie und lassen sich seitlich an mehreren Stellen auskoppeln. Sie stehen für Experimente oder die weitere Beschleunigung zur Verfügung. Sogenannte Zyklotrons beschleunigen die Partikel auf einer spiralförmigen Strecke von innen nach außen und können sehr viel kompakter gebaut werden als Synchrotrons.

Die Synchrotronstrahlung besteht aus einem kontinuierlichen Spektrum vom Infrarot bis zu hochenergetischer Röntgenstrahlung. Da meist nur monochromatische Strahlung benötigt wird, sortieren Filter eine bestimmte Energie aus. Danach fokussieren spezielle Optiken die Strahlung und führen sie auf die zu untersuchende Probe. Synchrotronstrahlung eignet sich hervorragend, um die physikalischen Eigenschaften von Materie zu untersuchen, zum Beispiel von neuen Materialien, Festkörperkristallen oder biologischen Proben.

Bei Anlagen, die sich über mehrere Gebäude erstrecken, ist es notwendig, Partikel zwischen einzelnen Beschleunigern und Experimentierplätzen hin- und herzutransportieren. Sogenannte Transferstrecken (Transfer Lines) überbrücken meist größere Distanzen und versorgen die unterschiedlichen Gebäude auf dem Campus mit Teilchenstrahlung. Da es sich um gerade Strecken handelt, stellen sich andere technische Herausforderungen als in Ringbeschleunigern. Die Bremsstrahlung wird nur in Flugrichtung abgestrahlt. Die Wahrscheinlichkeit ist dadurch sehr viel geringer, dass die Strahlung im direkten Umfeld verbaute Elektronik schädigt. Doch es gibt andere Herausforderungen.

## Beispiel: GANIL

Der Grand Accélérateur d'Ions Lourds (GANIL) befindet sich in Caen im Norden Frankreichs und ist einer der größten seiner Art weltweit. Die Forschung am GANIL

dreht sich um die Eigenschaften von Ionen, Kernphysik, Astrophysik und Radiobiologie. Dazu gehören die Fragen: Wie entstand die Materie unseres Universums? Wie fügten sich die Elemente zusammen? Was sind die Grenzen der Materie? Um sie zu beantworten, gibt es am GANIL viele große Instrumente, zum Beispiel unterschiedliche Beschleuniger wie Zyklotrons und den supraleitenden Linearbeschleuniger SPIRAL2 (Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne de 2e génération, **Abb. 1**).

Zwischen dem GANIL und anderen Laboratorien weltweit gibt es eine enge Kollaboration, auch mit dem GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt. Neben dem Austausch von Ergebnissen geht es auch um die gegenseitige Unterstützung bei der Beschaffung von Komponenten oder Vakuumbauteilen.

### Anforderungen an die Technik

Für den Aufbau des neuen Linearbeschleunigers SPIRAL2 sowie der Experimentierhalle DESIR (Désintégration, Excitation et Stockage d'Ions Radioactifs) ergeben sich besondere Herausforderungen. Hier dreht sich die Zusammenarbeit von GANIL und GSI sowohl um den Beschleuniger selbst als auch um die Transferstrecke zwischen Beschleuniger und Experimenten. Beschaffung und Qualifikation der

vakuumentechischen Komponenten teilt ein Inkind-Projekt zwischen den beiden Forschungseinrichtungen auf. Im Speziellen betrifft dies die technische Spezifikation, um allen besonderen Anforderungen der Anlage gerecht zu werden. Neben der Sauberkeit sind Flansche und Abmaße zu berücksichtigen. Um das UHV-System als große Anlage zu realisieren, braucht es speziell bearbeitete Strahlführungsrohre: Kammern oder Kreuzstücke mit den entsprechenden Flanschen erlauben es, Pumpen oder Messtechnik anzuschließen. Da große Beschleuniger mehrere hundert Meter lang sein können, setzen sie sich aus einzelnen Segmenten zusammen. Bei der Montage dieser Segmente gilt es, extrem enge Toleranzen einzuhalten.

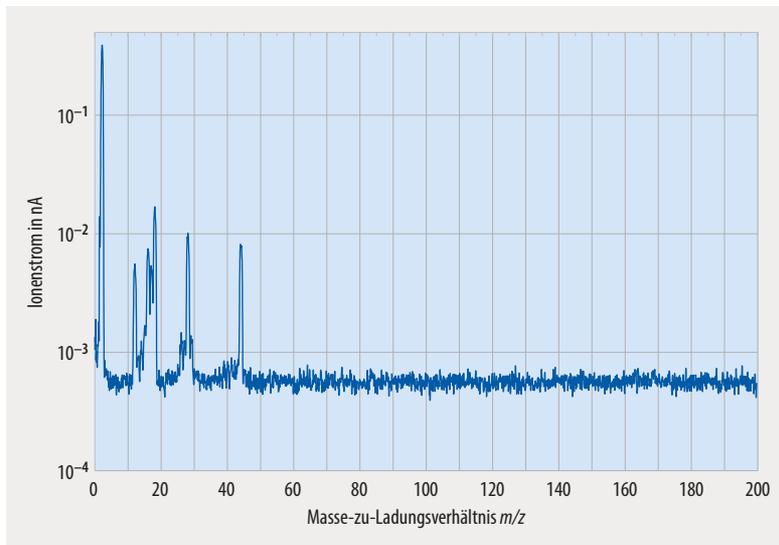
Die Vakuumkomponenten müssen aus einem Material bestehen, dessen magnetische Suszeptibilität die Ablenkmagnete möglichst wenig stört. Zudem müssen alle Komponenten nachweislich frei von Fremdpartikeln und Kohlenwasserstoffen sein, um die empfindlichen Installationen nicht zu verschmutzen oder zu beschädigen. Die maximal erlaubten Konzentrationen an Verunreinigungen im Restgas unterscheiden sich je nach Beschleuniger und Anwendung. Typischerweise sollte das Restgas weniger als 0,1 Prozent Kohlenwasserstoffe und weniger als 0,01 Prozent einiger Halogene enthalten. Manche moderne

Beschleuniger liegen eine Größenordnung darunter und stellen erhebliche Anforderungen an die Empfindlichkeit des Messaufbaus. Im strahlenden Umfeld kommen spezielle Pumpen und Messgeräte zum Einsatz, die dort längere Zeit betriebsicher arbeiten können. Als limitierende Komponente hat sich meist die eingesetzte Elektronik herausgestellt – durch strahlungsbedingte Schäden an den Halbleiterbauteilen. Dabei trifft entweder die Synchrotronstrahlung selbst das Bauteil oder die sogenannte Sekundärstrahlung. Sie entsteht, wenn Synchrotronstrahlung auf ein Material trifft und dabei ionisierende Strahlung erzeugt. Die Halbleiter degradieren durch die Bestrahlung mit den hochenergetischen Partikeln, weil Defektstellen entstehen, welche die Dotierung ändern können. Sekundärstrahlung lässt sich nur sehr aufwändig vermeiden und abschirmen. Daher funktioniert die Vakuumtechnik am sichersten, wenn die empfindliche Elektronik vollständig in sicherer Entfernung platziert ist, um generell eine Strahlenexposition zu vermeiden.

Aus den hohen Qualitätsanforderungen beim Bau von Beschleunigern folgen umfangreiche Tests im Vorfeld und ein entsprechendes Handling der einzusetzenden Produkte: Restgasanalyse, integrale Dichtheitsprüfungen und elektrische Funktionstests stehen hier im Vordergrund.



**Abb. 2** Die Detailansicht eines elektrostatischen Steuerers zeigt die vier Ablenklplatten. Die angeschlossene Steuerelektronik erzeugt ein elektromagnetisches Feld, das den Strahl elektrisch geladener Partikel in die gewünschte Richtung ablenkt.



**Abb. 3** Das Restgasspektrum eines Vakuumbauteils in Rezipienten mit  $10^{-10}$  hPa Druck zeigt Ausschläge bei charakteristischen Masse-zu-Ladungsverhältnisse  $m/z$ .

Die Transferstrecke zwischen SPIRAL2 und DESIR führt den Partikelstrahl zu den einzelnen Experimenten. Den richtigen Weg finden die Partikel durch elektrostatische Steerer und Quadrupolmagnete. Für das geforderte saubere Hochvakuum in den Strahlführungsrohren braucht es eine ausgesprochen leistungsfähige und zuverlässige Vakuumherzeugung. Alle Dichtungen in den Flanschverbindungen mussten deshalb in metallischer Bauweise ausgeführt werden; Elastomere ließen die technischen Anforderungen nicht zu.

### Fertigung der Bauteile

Bauteile mit unterschiedlichen Funktionen leiten den Strahl im Beschleunigersystem. Beispielsweise dienen elektrostatische Steerer dazu, den Strahl mittels eines elektrischen Feldes abzulenken, das Aluminiumelektroden im Inneren erzeugen (**Abb. 2**). Über die optimale Funktionalität entscheidet die genaue Ausrichtung der Elektroden zueinander sowie zum umgebenden Gehäuse. Die angestrebten Toleranzen für montierte Baugruppen bewegen sich im Bereich von

0,1 mm. Um dies auch ohne aufwändigere Justagemöglichkeiten zu realisieren, kommen Einzelteile mit Längen-, Form- und Lagetoleranzen von weniger als 0,05 mm zum Einsatz.

Ob sich UHV im Beschleunigersystem erreichen und aufrecht erhalten lässt, entscheidet neben der Pumpleistung die Oberflächenbeschaffenheit und Sauberkeit der Komponenten. Elektropolierte Innenoberflächen reduzieren effektiv die reale Oberfläche, erleichtern die Bauteilreinigung und dienen dazu, die Ausgasrate der Bauteile unter den Grenzwert von teils  $10^{-12}$  mbar  $\text{l s}^{-1} \text{cm}^{-2}$  zu reduzieren. Dafür ist es nötig, die Bauteile unter Vakuum bei bis zu  $300^\circ\text{C}$  auszuheizen. Das beschleunigt die Desorption molekularer Verbindungen von der inneren Oberfläche. Speziell Kohlenwasserstoffe mit einem Masse-zu-Ladungsverhältnis  $m/z$  zwischen 45 und 100 werden fast vollständig aus den Bauteilen entfernt. Die Restatmosphäre der Bauteile bei einem Druck von  $10^{-10}$  hPa lässt sich anschließend per Massenspektrometrie mit einem Quadrupol-Massenspektrometer analysieren.

Die Partialdrücke der unerwünschten Verbindungen dürfen dabei meist einen Grenzwert von einem Promille des Gesamtdrucks nicht überschreiten. Im Spektrum lassen sich neben den Restbestandteilen von Luft auch unerwünschte Verunreinigungen wie Halogene (Fluor  $\text{F}^+$  bei  $m/z = 19$ ) oder Kohlenwasserstoffe ( $m/z > 45$ ) detektieren und quantifizieren.

Liegt das Messsignal der Verunreinigungen im Restgasspektrum unterhalb der vom Teststand detektierbaren Grenze (**Abb. 3**), ist zu beachten, dass diese zur Spezifikation passt. Sollen zum Beispiel in einem auf  $5 \cdot 10^{-10}$  hPa abgepumpten Bauteil Fremdstoffe in der Größenordnung um 0,001 Prozent nachgewiesen werden, muss das Massenspektrometer einen Partialdruck um die  $5 \cdot 10^{-15}$  hPa der entsprechenden Masse detektieren können.

In einer modernen Fertigung mit standardisiertem Handling reicht es in vielen Fällen aus, stichprobenartig die Vakuumkammern durch eine Restgasanalyse hinsichtlich Sauberkeit zu kontrollieren. Kritische Vakuumkomponenten erfordern dagegen meist eine aufwändige Hundert-Prozent-Prüfung.

Eine der wichtigsten Voraussetzungen stellt jedoch die Dichtigkeit der Vakuumbauteile dar. Hochqua-



**Abb. 4** Vollmagnetische Turbopumpe mit DN 160 ISO-F Flansch

litative Schweißnähte ohne Porenbildung stellen diese sicher; eine integrale Heliumdichtheitsprüfung verifiziert dies. Bei der Langzeitlecksuche wird das Bauteil integral in einer Einhausung mit annähernd 100 Prozent Helium getestet. Der im Innern des Bauteils detektierte Helium-Gasstrom darf nach 10 Minuten nicht größer sein als  $10^{-10}$  mbar  $l s^{-1}$ .

### Besondere Dichtungen

Die verwendeten Turbopumpen (Abb. 4) zeichnen sich durch kompakte Bauweise, hohen Gasdurchsatz und niedrigen Energieverbrauch aus. Ihre elektromagnetischen Lager heißen auch „aktive Magnetlager“, weil die Rotorposition permanent kontrolliert und in Echtzeit nachgeregelt wird. Diese Kompensation sichert einen verschleißfreien und vibrationsarmen Lauf mit äußerst langlebiger Stabilität des Rotors und den Verzicht von konventionellen öl- oder fettgeschmierte Kugellagern. Wegen ständig steigender technischer Anforderungen der Beschleuniger erfolgt eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Turbopumpen.

Um den benötigten Druck weit unterhalb von  $10^{-8}$  hPa zu erreichen, kommen für die Flanschverbindungen metallische Dichtungen zum Einsatz. Die häufig in der Vakuumtechnik verwendeten Dichtungen aus Elastomeren wie Fluorkautschuk eignen sich aufgrund der Permeationseigenschaften nicht für UHV-Anwendungen. Metallische Dichtungen weisen keine Permeation auf und lassen sich zudem problemlos auf eine Temperatur größer 200 °C aufheizen. Ein Nachteil ist der höhere Anpressdruck, der benötigt wird, um die Flanschverbindung zwischen Turbopumpen und Transferstrecke mittels metallischer Dichtungen herzustellen. Daher müssen die Dichtflächen aus einem Material bestehen, das signifikant härter ist als Aluminium.

Am GANIL galt es, die Flansche der Turbopumpen als genormte ISO-F-Festflansch auszuführen. Um sicherzugehen, dass die Dichtflächen des Turbopumpenflansches bei wiederholtem Befestigen und Lösen eine hohe Langlebigkeit und Dichtigkeit aufweisen, war es nötig, die Dichtflächen und damit das Pumpengehäuse als Sondervariante aus Edelstahl zu fertigen.

Bei der Montage der Turbopumpen wird generell auf extreme Sauberkeit geachtet: Die Vorreinigung aller verwendeten Bauteile erfolgt sorgfältig in einer industriellen Waschstraße. Die Montage der Pumpen selbst findet anschließend in einem speziellen Reinraum statt: Sie müssen zahlreiche technische Abnahmetests bestehen. Für die Anwendung bei GANIL bestand ein wichtiger Abnahmetest darin, dass die Pumpen im Test ohne Ausheizen innerhalb von 24 Stunden bereits ein Vakuum kleiner  $10^{-8}$  hPa erreichen konnten (Abb. 5).

### Turbopumpen bei der DESIR

Nach dem Test im Labor des Herstellers folgt die Installation der Pumpen am vorgesehenen Einsatzort bei GANIL inklusive einem weiteren Test in Gruppen von je

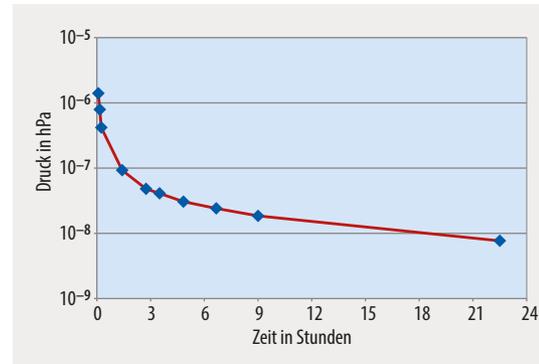


Abb. 5 Bei einer frisch produzierten Turbopumpe wird zu Beginn des Pumpens hauptsächlich Wasserdampf von den inneren Oberflächen des Vakuumsystems desorbiert. Ohne Ausheizen dauert es mehrere Stunden, den gewünschten Zieldruck zu erreichen.

drei Pumpen (Abb. 6). Als Dichtung kommt eine Aluminiumdichtung zum Einsatz. Diese zeichnet sich wie gewünscht durch eine wesentlich geringere Leck- und Permeationsrate aus als die sonst für ISO-Flanschverbindungen verwendeten O-Ring-Dichtungen aus Elastomeren.

### Kontakt

Dr. Dirk Budelmann, Market Manager  
 R&D, Pfeiffer Vacuum GmbH, Berliner  
 Straße 43, 35614 Aßlar, Tel.: +49 6441 802-1874,  
 E-Mail: Dirk.Budelmann@pfeiffer-vacuum.com,  
 www.pfeiffer-vacuum.com



Abb. 6 Montierte Turbopumpen an dem Teststand bei DESIR