Ein Gassystem für die äußeren Spurkammern von HERA-B

Klaus R. F. Bätjer, Oliver Despang

Einleitung

Das Standardmodell zur Beschreibung der Materie und der in ihr herrschenden Kräfte weist einige Lücken auf. Das Experiment HERA-B soll nach dem theoretischen nun auch den experimentellen Beweis dafür liefern, warum Materie und Antimaterie nach dem Urknall nicht in gleichen Anteilen im Universum vorzufinden ist.

Es wird im folgenden ein Gassystem für eine Detektor-komponente von HERA-B, dem „Äußeren Spurkammer-system“ beschrieben. Um die Funktion dieses Gasdetektors aufrecht zu erhalten, müssen die 26 Module an ein Gassystem angeschlossen sein, welches in jedem Modul einen Volumenaustausch des Detektorgases pro Stunde und einen Differenzdruck gegenüber der Atmosphäre von $(0 \pm 0,5)$ mbar gewährleistet. Um zu bestimmen, wie ein solches Gassystem ausgelegt werden muß, und ob es möglich ist, mehrere Module mit einer Druck-regulation zu betreiben, wurde ein Testgassystem auf-gebaut, welches die Bedingungen von HERA-B simulie-ren soll.

Das DESY-Experiment HERA-B

Am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Ham-burg werden ab 1999 die Detektoren für das HERA-B-Experiment zusammengebaut. Es werden die Wechsel-wirkungen zwischen beschleunigten Protonen aus der Ringspeicheranlage HERA (Abb. 1) und einem Alu-miniumdraht untersucht. Dabei wird ein extrem selte-

ner Zerfall von Teilchen gesucht, der, wenn er nachge-wiesen werden kann, in das Standardmodell übernom-men wird.

Die Detektoren haben die Aufgabe, ein Teilchen zu iden-tifizieren, dessen Impuls und Energie zu bestimmen, sowie Meßdaten zur Rekonstruktion der Flugbahn zu liefern. Zur Erfassung dieser Meßdaten dient unter an-derem das „Äußere Spurkammersystem“.

Die Wabendriftzellen des „Äußeren Spurkammersystems“

Das „Äußere Spurkammersystem“ ist aus Wabendrift-zellen aufgebaut. Jede Driftzelle (Abb. 2) gibt ein Signal, wenn ein geladenes Teilchen sie durchfliegt. Es löst aus

Flugbahn eines ionisierenden Teilchens (r_0 ist der kürzeste Abstand zwischen Flugbahn und Anodendraht)

Abb. 2: Schematische Darstellung einer Driftzelle

Abb. 1: Teilchenbeschleuniger des DESY

den Gasatomen Elektronen heraus, die durch ein ange-legtes elektrisches Feld beschleunigt werden und wei-tere Elektronen auslösen (Gasverstärkung). Die Zahl der freien Elektronen steigt lawinenartig an. Diese Elektro-nenwolke liefert den elektrischen Impuls, der ausgewer-tet wird. Das „Äußere Spurkammersystem“ besteht aus 120.000 Driftzellen, die bis zu 4,5 m lang sind und ei-nen Durchmesser von 5 mm bzw. 10 mm haben. Ferti-gungsbedingt ist die hexagonale Zellenstruktur, die ent-steht, indem die Folien miteinander verklebt werden (Abb. 3).

75 μm dicke Polycarbonatfolien mit einem Rußanteil von 10 % werden vorgeformt und zur Verbesserung der Leitfähigkeit und der Oberflächenhomogenität mit 50 nm Kupfer und mit 40 nm Gold beschichtet.

Abb. 3: Schematische Darstellung der Fertigung der Wabendriftyellen

Die Metallschicht der Zellen bildet die Kathode, die Anode ist ein mit Gold beschichteter Wolframdraht von 25 μm Durchmesser. Um möglichst große Zählraten zu erreichen, besteht das Zählgas aus einem Gemisch von 65 % Argon (Ar), 30 % Tetrafluormethan (CF_4) und 5 % Kohlendioxid (CO_2).

Das Gassystem des „Äußeren Spurkammersystems“

Bei der Gasverstärkung werden die Bindungen vom CF_4 gespalten, und die entstehenden Radikale bilden Polymerketten, die sich im Inneren des Detektors ablagern. Tests haben gezeigt, daß die Signale einer Driftzelle schwächer werden, wenn das Detektorgas nicht ausgetauscht wird. Aus diesem Grund muß der Detektor an ein Gassystem angeschlossen werden, das die Wabendriftyellen ständig mit neuem Gas versorgt. Aus Kostengründen sollte das Gas in einem Kreislauf strömen. Ein Reinigungssystem erhält die Reinheit des Gases, und Verluste durch undichte Stellen werden durch die stete Zugabe von neuem Gas ausgeglichen.

Um die Teilchenflugbahn so wenig wie möglich zu beeinflussen, ist das gesamte Detektorsystem mit möglichst wenig Material gebaut. Dies beeinträchtigt die Stabilität, so daß das Gassystem mit einer sehr guten Druckregulation ausgestattet werden muß. Diese sollte im Inneren des Detektors einen Druck von $(0 \pm 0,5)$ mbar gegenüber dem atmosphärischen Druck konstant halten.

Abb. 4: Schematische Darstellung des Gassystems für das „Äußere Spurkammersystem“ (mehrere Module werden durch eine Druckregulation betrieben)

Das Testgassystem

Das Testgassystem reguliert den Druck in einem Behälter, zwei bzw. vier Behältern und gibt Aufschluß darüber, mit welcher Genauigkeit mehrere Detektormodule mit einem Druckregelkreis betrieben werden können.

Das Testgassystem hat dieselben Parameter wie das endgültige Gassystem. Es werden dabei Leitungslängen, Leitungsquerschnitte, Volumenströme und Höhenunterschiede beachtet. Im Test wird ein Gas verwendet, welches mit seinen Eigenschaften dem des beim Experiment eingesetzten Gases so nahe wie möglich kommt, jedoch wesentlich billiger ist: Kohlendioxid (CO_2) erwies als optimales Gas.

Die Versuche

Es wurde mit einer einfachen Druckregulation in einem offenen 20-l-Volumen begonnen. Der zweite Versuch fand in einem 40-l-Volumen statt, wobei es sich aber im Gegensatz zum ersten Versuch um einen geschlossenen Gaskreislauf handelte.

Druckregulation in einem 20-l-Volumen

Die erste Druckregulation findet in einem 20-l-Volumen statt. Um den Aufbau (Abb. 5) einfach zu halten, sind alle Schlauchleitungen so kurz wie möglich.

Abb. 5: Aufbau der Druckregulation in einem 20-l-Volumen

Das Gas einer Druckflasche wird nach dem Durchlauf über eine Pumpe ins Freie geleitet. Ein Gasflußregler am Auslass hält den Volumenstrom konstant. Ein Druckaufnehmer gibt sein Signal dem Prozeßregler und dieser reagiert, indem er den Volumenstrom mittels des Gasflußreglers am Gaseinlaß reguliert.

Es ergibt sich eine Regelgenauigkeit von $(0 \pm 60) \mu\text{bar}$ bei einem Gasdurchfluß von etwa $0,5 \text{ l/min} = 30 \text{ l/h}$. Bei den weiteren Tests wird der Volumenstrom am Auslaß geregelt.

Druckregulation in einem 40-l-Volumen

Der Druck wird in einem 40-l-Volumen, einer ca. 5 m hohen Aluminiumbox, die innen 30 cm breit, 3 cm tief und 4500 cm hoch ist, geregelt. Die Gasflußregler sind in einer Höhe von etwa 8 m installiert. Die Abbildung 6 zeigt den Versuchsaufbau. Mit den 50 m langen Schlauchleitungen werden die Bedingungen von HERA-B beim DESY in Hamburg simuliert.

Abb. 6: Versuchsaufbau mit Verlegung der Schläuche bei der Druckregulierung in einem 40-l-Volumen

Die Druckregulierung findet bei einem Volumenstrom von etwa 40 l/h statt, dabei kann der Druck in der Mitte des Volumens bei $(0 \pm 10) \mu\text{bar}$ konstant gehalten werden, siehe Abbildung 7 und 8.

Abb. 7: Druckverlauf bei dessen Regulierung in einem 40-l-Volumen

Abb. 8: Verlauf der Volumenströme bei einer Druckregulierung in einem 40-l-Volumen

Bei den Tests mit dem 40-l-Volumen wird der Druck an drei Stellen gemessen. Der Druck in der Mitte des Behälters ist maßgebend für den Prozeßregler, da beim DESY-Experiment der Druck in der Mitte der Superlagenhälften bei $(0 \pm 500) \mu\text{bar}$ konstant gehalten werden soll. Bei einem Höhenunterschied von 5 m ergibt sich ein hydrostatischer Druck von $p_{\text{hyd}} = (+ 350) \mu\text{bar}$ am Boden des Volumens.

Der tatsächlich gemessene hydrostatische Druck in dem 5 m hohen Volumen beträgt $170 \mu\text{bar}$ und die Druckunterschiede im oberen und im unteren Teil des Behälters sind nicht symmetrisch. Aufgrund undichter Stellen des Systems handelt es sich nicht mehr um reines CO_2 , sondern um ein Gemisch aus Luft und CO_2 . Die gesamte Anlage muß mehrmals mit CO_2 gespült werden.

Diese Vorversuche zeigen, daß in nur einem Volumen der Druck problemlos geregelt werden kann.

Druckregelung in zwei unterschiedlichen Volumen

Es handelt sich um zwei Volumen von 650 l und 350 l. Um in beiden Voluminen einen Austausch pro Stunde zu gewährleisten, muß der Gesamtfluß von $1 \text{ m}^3/\text{h}$ in die zwei unterschiedlich große Einzelflüsse aufgeteilt werden. Zur Aufteilung in Einzelflüsse stehen verschiedene Varianten zur Diskussion, wobei mechanische Gasflußregler in jeder Zu- und Ableitung (Abb. 9) zur Aufteilung des Gesamtflusses gewählt werden.

Abb. 9: Asymetrische Aufteilung des Gesamtflusses mittels Rotameter

Obwohl dieser Aufbau höhere Kosten hervorruft, ist der Einsatz mechanischer Gasflußregler, Rotameter, die einzig sinnvolle Entscheidung. Von Vorteil ist die Flexibilität der Rotameter: mit ihnen kann die Aufteilung des Gasflusses bei laufendem Betrieb geändert werden.

Aufbau des Testgassystems

Das Gassystem besteht aus mehreren Komponenten. Das Gesamtvolumen beider Behälter und der Puffervolumen vor und hinter der Pumpe betragen etwa $1,25 \text{ m}^3$. Die Behälter sind 5 m lange aufrechtstehende Kunststoffrohre mit 30 cm und 40 cm Durchmesser, deren beiden Enden geschlossen sind. Der Gasanschluß für die Zuleitung befindet sich unten und der für die Gasableitung oben. Der Druck wird in der Mitte gemessen. Die Puffervolumen sind Kunststoffrohre von je 120 l mit 40 cm Durchmesser und einer Höhe von 1 m.

Die 650-l- und 350-l-Behälter stehen im Erdgeschoß; die Pumpe, der Prozeßregler, die Regelventile und die Ausleseelektronik befinden sich zwei Stockwerke höher. Die Länge der Schlauchleitungen beträgt 50 m pro Richtung und pro Behälter.

Das Testgassystem

Abb. 10: Schematische Darstellung des Testgassystems

Sicherheitseinrichtungen

Sicherheitsvorkehrungen vermeiden einen unkontrollierten Anstieg des Druckes. Der maximale Überdruck der Pumpe beträgt 1 bar, das kann zu einer Belastung von über einer Tonne für die Klebeverbindung zwischen Deckel und Rohr des Volumens ausmachen.

In den beiden Behältern von 650 l und 350 l, in denen der Druck durch die Regelung bei $(0 \pm 500) \mu\text{bar}$ gehalten werden soll, werden Sicherheitsventile installiert, die sich bei einem Überdruck von mehr als 70 mbar öffnen.

Bei den Puffervolumen liegen die maximalen Drücke (Über- und Unterdruck) der Pumpe an. Die Abbildung 11 zeigt die Anordnung der Puffervolumen.

Abb. 11: Anordnung der Puffervolumen

Bezeichnung in Abbildung 10	Beschreibung
B1	Behälter mit 350 l Volumen, in dem der Druck geregelt wird
B2	Behälter mit 650 l Volumen, in dem der Druck geregelt wird
D1	Elektronischer Druckaufnehmer mit einem Meßbereich von (-10 bis +10) mbar; er mißt den Differenzdruck gegenüber der Atmosphäre
D2	Elektronischer Druckaufnehmer mit einem Meßbereich von (-10 bis +10) mbar; er mißt den Differenzdruck gegenüber der Atmosphäre
D3	Mechanisches Barometer mit einem Meßbereich von (0 bis +8) bar; er mißt den Differenzdruck gegenüber der Atmosphäre
D4	Mechanisches Barometer mit einem Meßbereich von (-1 bis +7) bar; er mißt den Differenzdruck gegenüber der Atmosphäre
G	CO ₂ -Gasflasche (20 l) mit Druckminderer
G1	Elektronischer Gasflußregler; hält den Volumenstrom am Einlaß konstant
G2	Elektronischer Gasflußregler; wird vom Prozeßregler (PR) gesteuert und somit der Druck in B1 und B2 geregelt
P	Pumpe
P1	Puffervolumen (125 l) mit Überdruck mit äußerem Metallrahmen
P2	Puffervolumen (125 l) mit Unterdruck mit innerer Verformungsbegrenzung
P3	Kleines Puffervolumen (≈ 2 l) zur Zusammenführung zum Gesamtvolumenstrom
P4	Kleines Puffervolumen (≈ 2 l) zur Aufteilung des Gesamtvolumenstroms
PR	Prozeßregler; liest den Druck in B1 mit D2, vergleicht ihn mit dem Sollruck und steuert G2
R1	Mechanischer Gasflußregler (Rotameter) mit Anzeige
R2	Mechanischer Gasflußregler (Rotameter) mit Anzeige
R3	Mechanischer Gasflußregler (Rotameter) mit Anzeige
R4	Mechanischer Gasflußregler (Rotameter) mit Anzeige
S1	Sicherheitsventil mit 70 mbar Öffnungsdruck
S2	Sicherheitsventil mit 70 mbar Öffnungsdruck
S3	Sicherheitsventil mit 1,2 bar Öffnungsdruck
S4	Sicherheitsventil mit 70 mbar Öffnungsdruck
S5	Sicherheitsventil mit 1,2 bar Öffnungsdruck
V1	Regelventil als Bypass für die Pumpe
V2	Ventil zum schnellen Belüften von P1; während des Spülens mit CO ₂ geöffnet
V3	Ventil zum schnellen Belüften von P2
V4	Ventil zum Spülen mit CO ₂ (V4 geschlossen und V2 offen); Puffervolumen (P1) kann von der Anlage getrennt werden
V5	Ventil zum Trennen des Puffervolumens (P2) von der Anlage
V6	Ventil in der Zuleitung von der Gasflasche

Tabelle 1: Komponenten des Testgassystems der Abbildung 10

Messungen an dem Testgassystem

Messungen wurden mit verschiedenen Volumenströmen von 250 l/h und von 1000 l/h durchgeführt.

Die Abbildung 12 zeigt den Verlauf der Drücke in den beiden Behältern während eines Langzeitversuchs über 5 Stunden.

Abb. 12: Druckverläufe bei einem Langzeitversuch über 5 Stunden

Die Abbildung 13 zeigt den Druckverlauf während der Regelung mit einem Volumenstrom von 1000 l/h.

Abb. 13: Langzeitstabilität der Regelung bei einem Gesamtvolumenstrom von 1000 l/h

Schlußfolgerungen aus den Messungen mit dem Testgassystem

Der Druck kann bei normalem Betrieb in den geforderten Grenzen konstant gehalten werden. Störungen kommen dadurch zustande, daß der Prozeßregler den Druck nur aus einem Volumen liest und der Druck in dem anderen Behälter für ihn nicht zu erkennen ist.

Ein weiteres Problem sind die unterschiedlichen Volumina beider Behälter mit unterschiedlichen Einzelvolumenströmen. Die jeweiligen Gasflüsse werden an den Rotametern am Einlaß eingestellt. Die Rotameter am Auslaß werden danach so justiert, daß der Druck in dem 650-l-Volumen gleich Null ist. Sind die Rotameter einmal justiert, arbeitet die Druckregulation sehr genau. Wird jedoch der Gesamtvolumenstrom verändert, stimmen diese RotameterEinstellungen nicht mehr. Grund dafür sind die unterschiedlichen Strömungswiderstände

der Rotameternadelventile. Diese Widerstände verhalten sich bei Änderungen des Gasflusses nichtlinear, woraus die Druckunterschiede nach der Veränderung des Gesamtvolumenstroms folgen. Beim Gassystem des „Äußeren Spurkammersystems“ sollten also die Volumina der Superlagen, die mit einer Druckregulation arbeiten, nahezu identisch sein, damit auch die Einzelvolumenströme und somit die Strömungswiderstände der Nadelventile ähnlich sind.

Das erweiterte Testgassystem

Nach diesen Tests wird versucht, den Druck in vier Volumina mit nur einem Regelkreis zu steuern. Hierzu werden zwei weitere Kunststoffbehälter mit 125 l und 130 l Inhalt angefertigt und an das Gassystem angeschlossen. Die Abbildung 14 zeigt den Versuchsaufbau.

Abb. 14: Schematische Darstellung des Testaufbaus mit 4 Behältern

Der Prozeßregler ist mit dem Druckaufnehmer des 125 l Behälters verbunden, da dieser auf Druckschwankungen am empfindlichsten reagiert.

In der folgenden Abbildung 15 ist die Langzeitstabilität über 4 Stunden zu sehen.

Abb. 15: Langzeitstabilität des erweiterten Testgassystems

Auch bei dem Testgassystem mit vier Behältern funktioniert die untersuchte Art der Druckregelung. Die erreichte Genauigkeit von $(0 \pm 150) \mu\text{bar}$ ist zwar ausreichend, jedoch ist das Einstellen der Rotameter sehr problematisch. Nach der Justierung der Rotameter für das 650 l- und 350 l Volumen dauert es bis zu einer Stunde, bis die Drücke in den Volumen konstant bleiben. Bereits sehr geringe Verstellungen der Rotameter führen zu beträchtlichen Veränderungen der Drücke, wobei die vorgegebenen Grenzwerte von $(0 \pm 500) \mu\text{bar}$ mehrmals überschritten wurden. An jeder Superlagenhälfte sind damit Sicherheitsventile notwendig, die bei Überschreiten der Grenzwerte von $(0 \pm 500) \mu\text{bar}$ öffnen. Damit beim Öffnen der Ventile keine Außenluft eindringen kann, muß der Druckausgleich in einem Puffer volumen erfolgen, in dem sich ebenfalls das Detektorgasgemisch befindet.

Schlußfolgerungen

Es ist möglich, den Druck in mehreren Volumen gemeinsam mit einer Druckregulation zu steuern, jedoch treten bei beträchtlichen Volumenunterschieden der einzelnen Behälter Probleme auf. Beim Gassystem des „Äußeren Spurkammersystems“ sollte daher beachtet werden, daß sich die Volumen der einzelnen Superlagenhälften, die an eine Druckregulation angeschlossen sind, nur geringfügig unterscheiden.

Bei jeder Änderung des Gesamtvolumenstroms muß der Druck in den Superlagenhälften beobachtet werden und bei zu starker Abweichung vom Solldruck müssen gegebenenfalls die Einstellungen der Rotameter verändert werden.

Autoren

Klaus R. F. Bätjer

Technische Fachhochschule Wildau
Fachbereich Ingenieurwesen und
Wirtschaftsingenieurwesen
Bahnhofstraße
15745 Wildau
Tel. (0 33 75) 508-121

Oliver Despang

Angewandte Plasma-Vakuum-Verfahrenstechnik
APVV
Wilhelm-Beckmann-Straße 2
45307 Essen
Tel. (01 73) 205 21 52