Aufbau und Inbetriebnahme eines Teststands für Siliziumdetektoren des HERA-B Vertexsystems

Diplomarbeit von
Harald Fox

Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Angefertigt am
Max-Planck-Institut für Physik
Werner-Heisenberg-Institut

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

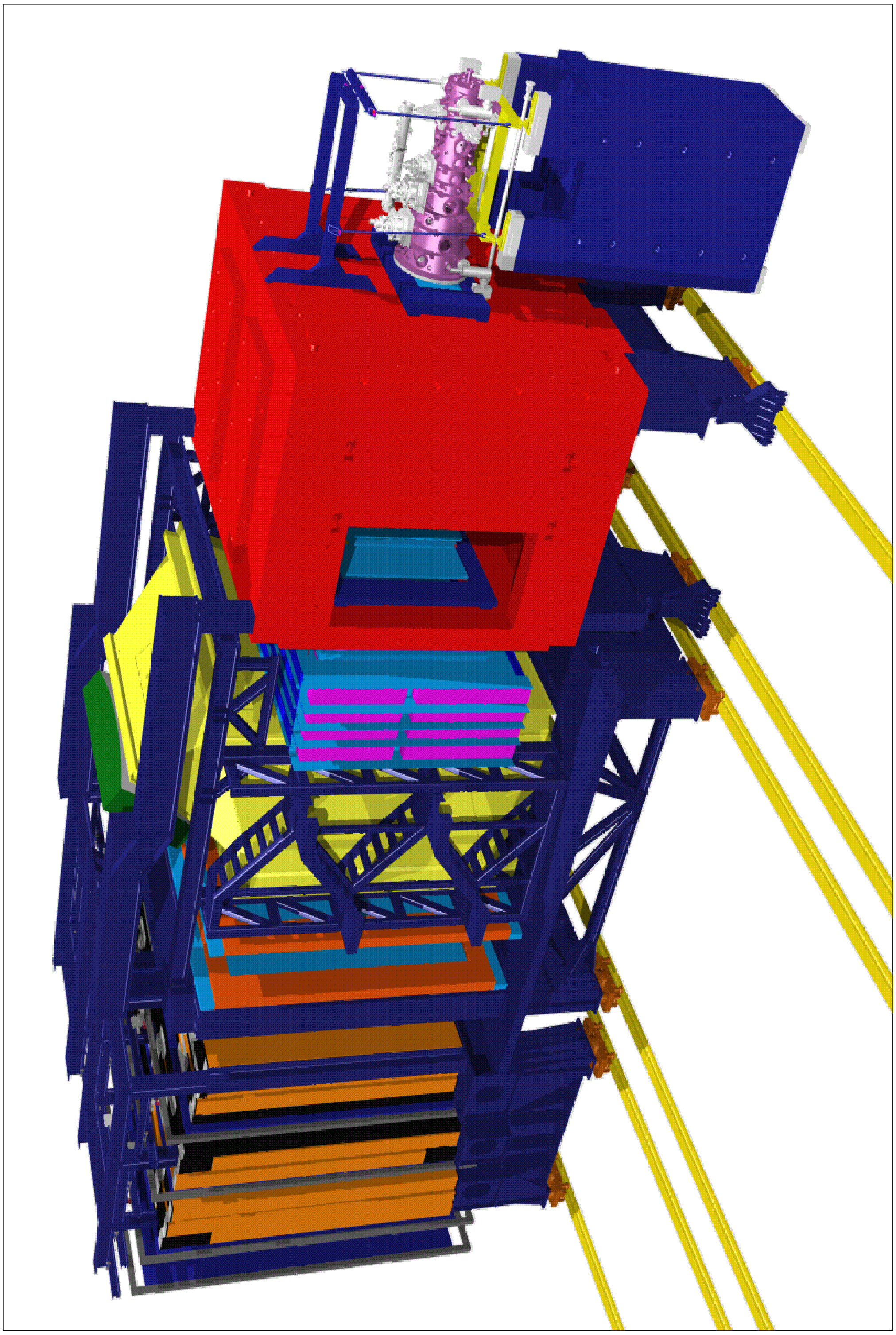

Abbildung 1: *Der HERA-B Detektor.*

1 Einleitung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war der Aufbau eines Teststands zum Test von Streifenzählern für den Vertexdetektor des HERA-B Experiments. Dazu war es notwendig, die verwendeten Detektoren zu untersuchen, so daß optimale Betriebsbedingungen etabliert werden konnten. Der Teststand war so zu konfigurieren, daß er bei der Produktion des Vertexdetektors zur Qualitätskontrolle aller Module, die die Streifenzähler tragen, benutzt werden kann. Es mußte also auch ein zur Elektronik der Module passendes Auslesesystem entwickelt werden.

Das HERA-B Experiment wird zur Erforschung der CP-Verletzung im B-System am DESY[1] in Hamburg aufgebaut. Eine wichtige Anforderung an das Experiment ist die Spurrekonstruktion und die Identifizierung von Zerfallsvertices. Diese Aufgabe wird mit Hilfe des Vertexdetektors erfüllt. Dazu werden doppelseitige Siliziumstreifenzähler verwendet. Vor ihrem Einsatz im Experiment muß die Qualität dieser Detektoren und ihre Funktion auf dem Modul im Labor untersucht werden.

Im zweiten Kapitel wird auf das HERA-B Experiment und den Vertexdetektor eingegangen. Die Anforderungen, die der Beschleuniger und die physikalischen Meßgrößen an ihn stellen, werden beschrieben, und sein Aufbau wird dargestellt.

Das dritte Kapitel behandelt die prinzipielle Funktionsweise von Siliziumstreifenzählern und Besonderheiten der hier verwendeten Detektoren. Außerdem werden Wirkungsweise und Folgen von Strahlungsschäden erläutert.

Das vierte Kapitel beschreibt Messungen, die zur Untersuchung der Folgen von Strahlenschäden an Testdetektoren durchgeführt wurden, und den dazu verwendeten Aufbau. Ein Teil dieser Messungen wurde mit α-Strahlung durchgeführt. Diese Ergebnisse werden mit Ergebnissen verglichen, die mit einem Laser erzielt wurden.

Im fünften Kapitel werden der Testaufbau und Labormessungen an den ersten Prototypmodulen, die am Experiment eingesetzt werden, beschrieben. Das wichtigste Instrument zur Untersuchung der Detektoren war der Laser, der es ermöglichte, die Detektorstreifen gezielt zu untersuchen.

Das sechste Kapitel beschreibt erste Messungen, die an den im Experiment eingebauten Prototypmodulen durchgeführt wurden. Dazu wurde das für den Teststand entwickelte Datennahmesystem verwendet.

Im siebten Kapitel wird eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf die weitere Verwendung des Teststands gegeben.

[1] **D**eutsches **E**lektronen **Sy**nchrotron

2 Das Experiment HERA-B

Das Experiment HERA-B [1, 2] wird am Protonring des HERA[2]-Speicherrings des DESY in Hamburg aufgebaut. Dies hat den Vorteil, daß der Beschleuniger schon vorhanden ist und bereits betrieben wird. Für die Experimente, die CP-Verletzung mit $e^+ - e^-$-Beschleunigern messen wollen, müssen dagegen eigene Beschleuniger gebaut werden [3, 4].

Ziel des Experiments ist es, CP-Verletzung im B-System [5], insbesondere den Winkel β des Unitaritätsdreiecks, zu messen.

2.1 Der HERA-B Detektor

Im Halo des Protonenstrahls befinden sich 8 Kupferdrähte, mit denen die Protonen wechselwirken. Abbildung 1 zeigt den gesamten HERA-B Detektor. Der Siliziumvertexdetektor und Spurkammern dienen zur Rekonstruktion von Spuren geladener Teilchen und zur Bestimmung von Zerfallsvertices. Zur Teilchenidentifizierung gibt es einen RICH[3] und einen TRD[4]. Neben einem Dipolmagneten gibt es außerdem ein elektromagnetisches Kalorimeter und Myonkammern.

Das Hauptinteresse der HERA-B Kollaboration gilt dem „goldenen“ Zerfallskanal $B^0, \bar{B}^0 \to J/\Psi K_S^0$ [1][5]. Ein B^0 im Anfangszustand hat zwei Möglichkeiten, in den Endzustand $J/\Psi K_S^0$ zu zerfallen: Es kann direkt zerfallen ($B^0 \to J/\Psi K_S^0$), oder es kann durch Mischung indirekt über den Zwischenzustand $\bar{B}^0$ zerfallen ($B^0 \to \bar{B}^0 \to J/\Psi K_S^0$). Beide Möglichkeiten tragen zur Zerfallsamplitude bei. Der CP-gespiegelte Prozeß hat das entgegengesetzte Vorzeichen in der CKM-Phase [6], die in die $B^0 - \bar{B}^0$ Mischung eingeht. Durch Interferenz mit dem direkten Zerfall erhält die CKM-Phase eine physikalische Bedeutung und führt zu unterschiedlichen Amplituden in CP-konjugierten Prozessen. Diese CP-Asymmetrie läßt sich durch Messen der unterschiedlichen Zerfallsraten von B^0 und $\bar{B}^0$ in $J/\Psi K_S^0$ bestimmen.

Der Nachweis des Endzustands $J/\Psi K_S^0$ erfolgt dabei durch die vollständige Rekonstruktion seines Zerfalls. Der Anfangszustand wird durch den Zerfall des in assoziierter Produktion entstandenen Partnerteilchens bestimmt.

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Parameter des Beschleunigers und der erwarteten Ereignisraten des beschriebenen Zerfallkanals für HERA-B zusammengefaßt.

Um etwa 1000 Ereignisse $B^0, \bar{B}^0 \to J/\Psi K_S^0$ pro Jahr nachzuweisen, muß man eine Wechselwirkungsrate von 40 MHz, d. h. vier Wechselwirkungen pro passierendem Teilchenpaket, erzeugen. Diesem Nachteil steht die klare Signatur des $J/\Psi K_S^0$ Zerfalles gegenüber. Rekonstruiert wird der Zerfall des J/Ψ in zwei Leptonen und des K_S^0 in zwei geladene Pionen. Die Spuren der beiden Leptonen und der beiden Pionen müssen je einen gemeinsamen Vertex bilden; Massenschnitte unterdrücken Untergründe. Da das

[2]**H**adron **E**lektron **R**ing **A**nlage
[3]**R**ing **I**maging **Ch**erenkov Zähler
[4]**T**ransition **R**adiation **D**etector
[5]Hier wird K_S^0 mit K_1^0 identifiziert, so daß $J/\Psi K_S^0$ ein CP-Eigenzustand ist.

Protonenenergie	820 GeV
Frequenz der Teilchenpakete	$10,4$ MHz
Anzahl der Teilchenpakete	210
Teilchen pro Paket (nominell)	2×10^{13}
Ereignisrate mit HERA-B Target	ca 40 MHz
$\sigma_{b\bar{b}}/\sigma_{inel}$	4.6×10^{-7} - 1.3×10^{-6}
$b\bar{b}$ Erzeugungsrate	18 - 52 Hz
Anteil nachgewiesener $B^0, \bar{B}^0 \to J/\Psi K_S^0$ Zerfälle	
an erzeugten $b\bar{b}$	$4,2 \times 10^{-6}$
nachgewiesene $B^0, \bar{B}^0 \to J/\Psi K_S^0$ Zerfälle pro Jahr (10^7 s)	700 - 2000

Tabelle 1: *Parameter des HERA Protonrings und des Nachweises des $B^0, \bar{B}^0 \to J/\Psi K_S^0$ Zerfalls.*

B^0-Meson eine mittlere Lebensdauer besitzt, die es im Mittel eine Strecke von 9 mm zurücklegen läßt, kann seine Lebensdauer zur Identifikation verwendet werden, indem Ereignisse gewählt werden, bei denen der rekonstruierte B-Zerfallsvertex vom primären Wechselwirkungspunkt entfernt ist. Die Zerfallsvertices müssen mit einer Genauigkeit von 25 μm senkrecht zur Strahlachse und 500 μm in Richtung der Strahlachse [2, Seite 12] bestimmt werden, um einen Schnitt bei 70% der Lebensdauer effektiv zu machen.

2.2 Der Vertexdetektor bei HERA-B

Das Auflösungsvermögen des Vertexdetektors wird nicht nur durch das intrinsische Auflösungsvermögen der Detektormodule selbst bestimmt, sondern ist auch durch Vielfachstreuung der Teilchen auf ihrem Weg vom Entstehungsvertex bis zum Nachweis im Detektor beschränkt [2]. Um die Wahrscheinlichkeit für Streuung der zu messenden Teilchen zu minimieren, muß das Material, das die nachzuweisenden Partikel durchqueren müssen, auf ein Minimum reduziert werden. Zu diesem Zweck wird im Bereich des Vertexdetektors darauf verzichtet, die Protonen durch ein Strahlrohr zu führen[6]. Statt dessen wird ein trichterförmiger Vakuumtank verwendet, der in seinem Zentrum den Protonenstrahl enthält, und in den die Detektormodule seitlich eingeschoben werden. Abbildung 2 zeigt einen Längsschnitt durch den Vertexdetektortank. Die Module selbst befinden sich in einem sekundären Vakuum, das vom primären HERA-Ringvakuum nur durch eine 100 μm [7] dicke Aluminiumkappe separiert ist. Die Teilchen müssen also nicht unter einem flachen Winkel ein massives Strahlrohr durchdringen, sondern durchqueren nahezu senkrecht einfallend dünne Aluminiumschichten.

Um einen Winkelbereich von 10 mrad bis 250 mrad abzudecken, ist es nötig, die

[6] Lediglich 1996 wird ein Strahlrohr, das mit Löchern und Schlitzen versehen ist, verwendet, um hochfrequente Resonanzen zu vermeiden. Später soll die Abschirmung durch Drähte geschehen.

[7] Für 1996 ist die Kappe 400 μm dick.

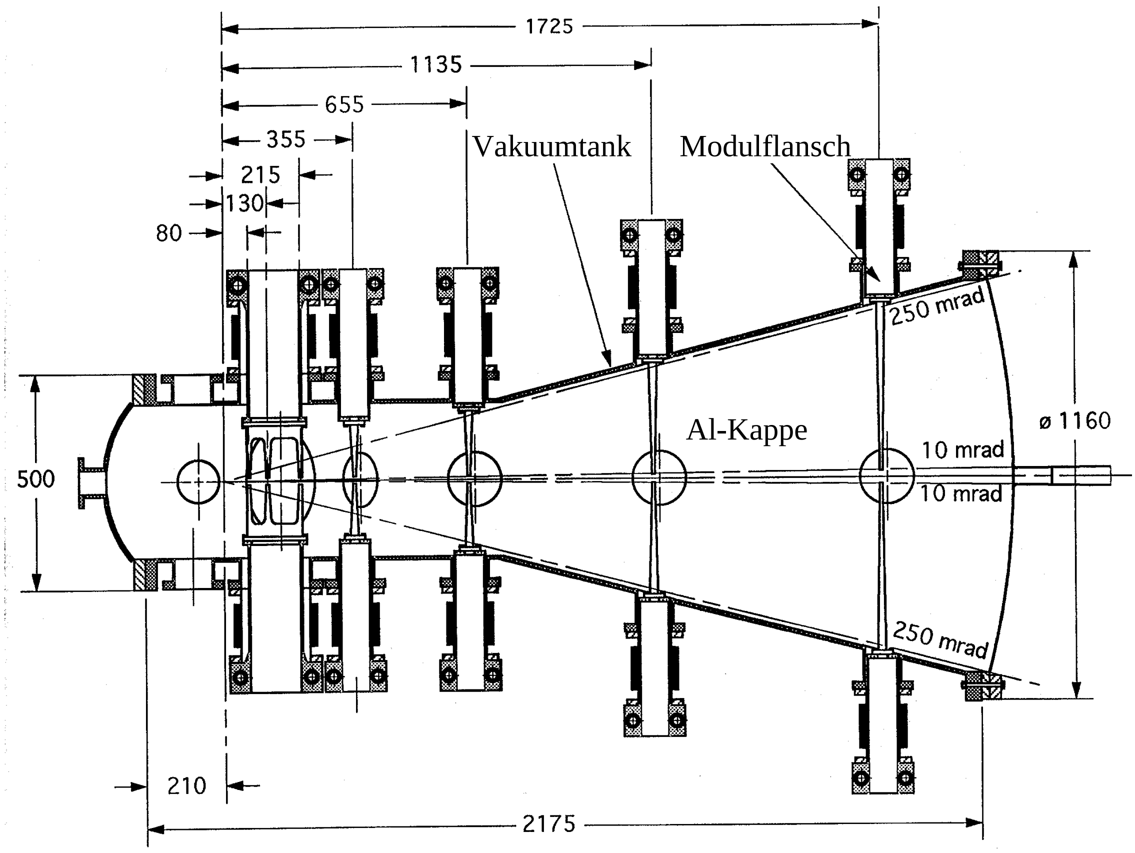

Abbildung 2: *Längsschnitt durch den Vertexdetektortank. Die ersten drei Detektorebenen befinden sich im ersten Modulflansch. Die letzte Detektorebene ist außerhalb des Vakuumtanks.*

Module so nah wie möglich an die Strahlachse heranzubringen. Dies hat eine hohe Strahlenbelastung zur Folge. Für HERA-B erwartet man einen totalen Teilchenfluß Φ von

$$\Phi(R) = \Phi_1 \cdot \left(\frac{r_1}{R}\right)^2, \qquad (1)$$

wobei $\Phi_1 = 3 \times 10^7 \mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ der Fluß bei $r_1 = 1$ cm ist [2]. Der Fluß wird dabei von hochenergetischen Pionen dominiert. Der Teilchenfluß ist nur vom Abstand R von der Strahlachse und nicht von der Entfernung vom Wechselwirkungspunkt abhängig.

Um die Strahlenbelastung bei Injektion und Beschleunigung der Protonen zu minimieren, können die einzelnen Module durch Manipulatoren um etwa 20 cm zurückgezogen werden. Bei normalem Betrieb hingegen werden die Module so nah wie möglich an die Strahlachse herangefahren. Die Grenze wird dadurch festgelegt, daß die Aluminiumkappen der Detektormodule nicht die Akzeptanz des Beschleunigers bestimmen dürfen. Gleichzeitig sollten die Detektoren mindestens ein Jahr funktionsfähig sein.

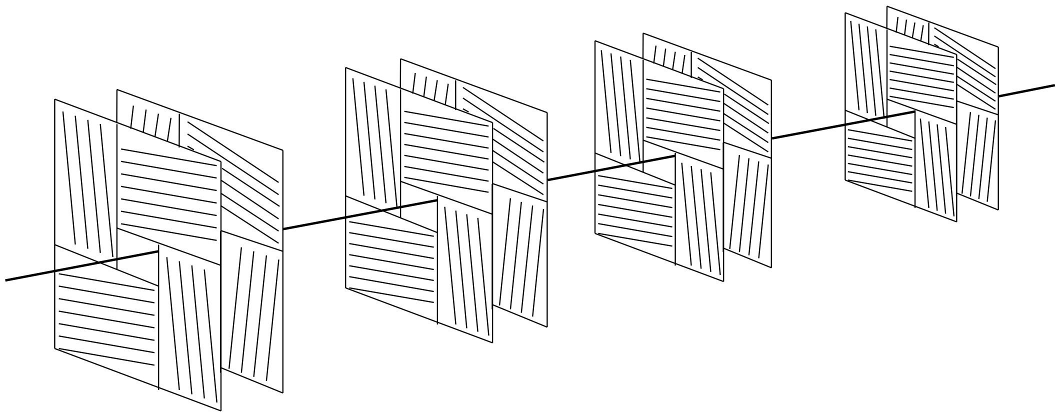

Abbildung 3: *Schematische Ansicht von vier der acht Ebenen des Vertexdetektors.*

Im Augenblick ist ein Strahlabstand von ungefähr 1 cm geplant, was einem Fluß von $\Phi = 3 \times 10^{14}\mathrm{cm}^{-2}$ pro Jahr[8] entspricht. Die Detektorbereiche, die weiter entfernt von der Strahlachse sind, erhalten eine wesentlich geringere Strahlendosis.

Die Anforderungen und Restriktionen führen zu dem geometrischen Aufbau des Vertexdetektors, der in Abbildung 3 schematisch dargestellt ist. Der Vertexdetektor besteht aus 8 Detektorebenen, die je 2 Lagen enthalten. Die Streifen zweier Lagen sind um einen Winkel von 5° zueinander gedreht. Eine Lage besteht aus vier Modulen mit doppelseitigen Detektoren, deren Streifen auf Vorder- und Rückseite um 90° gedreht sind. Man erhält also pro Detektorebene vier sensitive Flächen mit Stereowinkeln. Die vier Module einer Lage werden einander überlappend um den Strahl herum angeordnet. Ein Modul hat eine sensitive Fläche von $5 \times 7\mathrm{cm}^2$.

Bereits im April 1996 wurden drei Ebenen des Vertexdetektors mit je einem Modul bestückt.

[8]Für ein Jahr werden 10^7 s Betriebszeit gerechnet.

3 Aufbau und Funktion der Detektoren

3.1 Funktionsweise einer Halbleiterdiode

Hier sollen nur die wichtigsten Grundlagen für Halbleiterdetektoren kurz beschrieben werden. Genauere Darstellungen findet man in einer Vielzahl von Lehrbüchern (siehe z. B. [8, 9, 10]).

Eine Silizium Halbleiterdiode besteht aus einem Siliziumsubstrat, das auf der einen Seite mit Fremdatomen, die im Vergleich zu Silizium ein überzähliges Valenzelektron haben, Donatoren, dotiert wird. Diese Schicht wird n-leitend genannt. Auf der anderen Seite wird das Substrat mit Fremdatomen, die ein Valenzelektron weniger haben, Akzeptoren, dotiert. Dies ist die p-leitende Schicht. Die jeweiligen Majoritätsladungsträger (Elektronen im n-Gebiet und Löcher im p-Gebiet) diffundieren über die Grenzschicht und können im anderen Gebiet rekombinieren. An diesem pn-Übergang bildet sich eine von freien Ladungsträgern verarmte Region, eine nichtleitende Sperrschicht oder Verarmungszone, und eine Raumladungsdoppelschicht aus. Im thermischen Gleichgewicht sind der Diffusionsstrom der Majoritätsladungsträger und der Feldstrom der Minoritätsladungsträger, der durch das Feld der Raumladungszone initiiert wird, entgegengesetzt gleich groß.

Dotiert man das Siliziumsubstrat schwach mit Donatoren (n^-)[9], und sind die p-leitende und die n-leitende Schicht stark dotierte dünne p^+- und n^+-Oberflächenschichten, wie das bei Streifenzählern der Fall ist, so ändert sich die oben beschriebene Situation nicht. Insbesondere bildet sich die Verarmungszone weiterhin am pn-Übergang aus, der nun aber nahe an der Oberfläche der p-Seite liegt.

Legt man von außen an die Diode eine Spannung in Sperrichtung an, also an die n^+-Seite eine gegenüber der p^+-Seite positive Spannung, so kann diese zusätzliche Spannung nur über der nichtleitenden verarmten Region abfallen. Dies hat zur Folge, daß sich die Breite der Verarmungszone vergrößert. Die volle Verarmungsspannung V_{VVS} ist die Spannung, bei der das n^--Substrat über die gesamte Breite verarmt ist.

Eine weitere Folge der von außen angelegten Spannung ist, daß sich Diffusions- und Feldstrom nicht mehr im Gleichgewicht befinden. Der daraus resultierende Leckstrom oder Dunkelstrom steigt ebenfalls mit der Spannung an.

Die volle Verarmungsspannung und der Leckstrom hängen außerdem von den jeweiligen Ladungsträgerkonzentrationen der Diode ab. Der Leckstrom ist zusätzlich von der Temperatur T abhängig. Für eine ideale Diode gilt [8, Seite 168]:

$$I(V_{\mathrm{Det}}, T) = I(V_{\mathrm{Det}}, T_0) \left(\frac{T}{T_0}\right)^3 \cdot \exp\left(\frac{E_G}{kT_0} \cdot \frac{\Delta T}{T}\right). \tag{2}$$

Dabei ist $I(V_{\mathrm{Det}}, T_0)$ der Leckstrom in Abhängigkeit von der Detektorspannung bei Zimmertemperatur $T_0 = 300$ K, $\Delta T = T - T_0$, $E_G = 1,12$ eV die Bandlücke von Silizium und $kT_0 = 2,69 \times 10^{-2}$ eV der Boltzmannfaktor. Bei einer Temperatursenkung von 8 K

[9]Dabei steht „n“ oder „p“ für die Art der Dotierung und „$^+$“ oder „$^-$“ für die Stärke der Dotierung, in diesem Fall steht „n^-“ also für eine schwache Dotierung mit Donatoren.

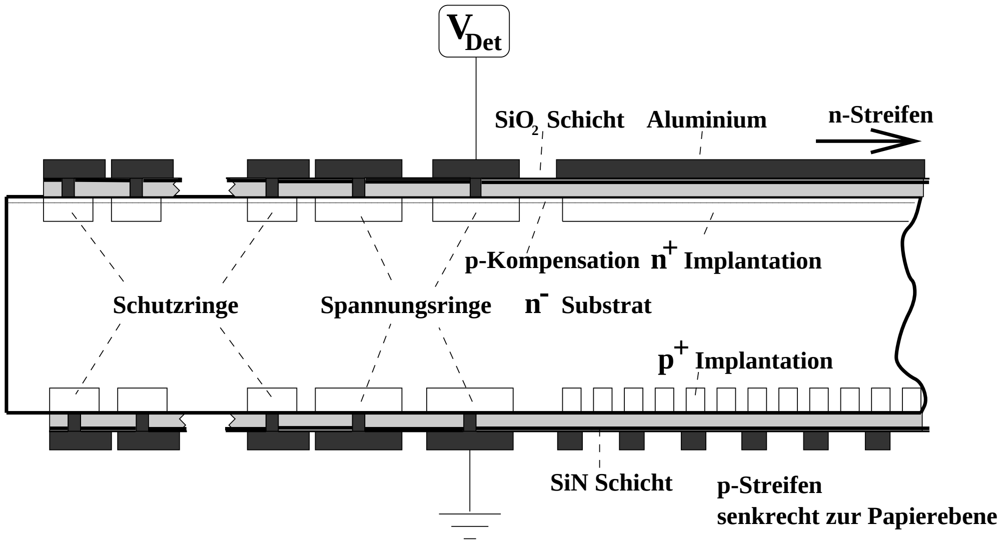

Abbildung 4: *Schnitt durch den Prototypdetektor. Nicht maßstabsgetreu.*

auf 292 K sinkt der Sperrstrom nach dieser Gleichung auf einen Wert $I_{T=292\mathrm{K}} = 0,3 I_{T_0}$ ab. Diese Temperaturabhängigkeit wird bei HERA-B ausgenutzt, um durch Kühlung der Module den Leckstrom zu senken.

Trifft ein ionisierendes Teilchen die Halbleiterdiode, so generiert es entlang seines Weges Elektron-Loch-Paare. Die Elektronen und Löcher, die in der Verarmungszone generiert werden, können durch das äußere Feld getrennt werden und durch den voll verarmten Körper der Diode zu den Elektroden driften. An den Elektroden können die Elektronen bzw. Löcher mit Hilfe von ladungsempfindlichen Vorverstärkern nachgewiesen werden. Für ein Elektron-Loch-Paar ist im Mittel eine Energie von [7]

$$E_{\mathrm{ELP}} = 3,6 \ \ \mathrm{eV} \tag{3}$$

zur Erzeugung nötig. Die Ladungssammelzeit für Elektronen beträgt dabei etwa 10 ns [10].

3.2 Doppelseitige HERA-B Streifenzähler

Bei doppelseitigen Streifenzählern sind die p$^+$- und die n$^+$-Implantationen streifenförmig unterteilt. Abbildung 4 zeigt einen schematischen Schnitt durch den Prototypdetektor als Beispiel. Zur Auslese der Streifendioden werden über den Implantationen auf der Detektoroberfläche Aluminiummetallisierungen aufgebracht, die mit einer Verstärkerelektronik verbunden werden. Die von einem ionisierenden Teilchen erzeugten Elektron-Loch-Paare werden von einzelnen Streifen auf beiden Seiten des Detektors nachgewiesen und liefern so die Ortsinformation.

Am p$^+$n$^-$-Übergang zwischen den Implantationen der p-Seite und dem n$^-$-Substrat bilden sich Verarmungszonen aus, die die Streifen der p-Seite voneinander elektrisch isolieren. Die Streifen der n-Seite dagegen sind kurzgeschlossen, wenn keine Detektorspannung anliegt.

Die Detektorspannung wird beim sogenannten „Punch Through Biasing“ [12] über einen Spannungsring anlgelegt, der außen um die Streifen herum verläuft. Der Spannungsring besteht dabei aus einer p^+- bzw. einer n^+-Implantation, die direkt mit einer Aluminisierung verbunden ist. Legt man an die Spannungsringe eine Spannung in Sperrichtung an, so breitet sich die Verarmungszone um die Implantation des Spannungsrings der p-Seite in alle Richtungen aus. Mit steigender Detektorspannung bildet sich auf der gesamten p-Seite eine großflächige Verarmungszone, die sich in Richtung n-Seite ausdehnt. Bei der vollen Verarmungsspannung V_{VVS} schließlich ist der gesamte Detektorkörper vollständig verarmt.

Das verarmte Substrat zwischen den Implantationen stellt eine Potentialbarriere dar. Dies führt zu einem Spannungsabfall zwischen den Implantationen der Streifen und der Spannungsringe, die sich somit auf einem anderen Potential befinden. Dies führt beim Betrieb des Detektors dazu, daß die Elektronik, die mit den Streifen verbunden ist, unter Umständen[10] nicht mit der Detektorspannung betrieben werden kann. Das Elektronikpotential muß dann dem Potential der Streifenimplantationen angepaßt werden.

Damit der Leckstrom der Streifendioden nicht direkt in die Verstärkerelektronik fließt, sind die Streifen kapazitiv gekoppelt. Die Koppelkapazität ist hier direkt in den Detektor integriert. Dies erreicht man dadurch, daß eine Siliziumdioxidschicht als Dielektrikum an der Oberfläche zwischen den hochdotierten Streifen und der Metallelektrode wirkt [11].

An der Grenzfläche zwischen Silizium und Siliziumdioxid gibt es positive Ladungen, die zur Folge haben, daß sich hier Elektronen ansammeln. Auf der n-Seite würden diese Elektronen die Streifen kurzschließen. Eine großflächige p-Kompensationsimplantation auf der n-Seite verhindert diesen Effekt.

Eine Besonderheit der Detektoren, die bei HERA-*B* zum Einsatz kommen, sind ihre Schutzringe [13]. Die Aufgabe der Schutzringe ist es, die Potentiale zum Rand des Detektors hin stufenweise, definiert abfallen zu lassen. Dadurch kann auch bei hohen Detektorspannungen die Feldstärke im Detektor nicht so hoch werden, daß sie zur Generation von Elektron-Loch-Paaren ausreicht und es zu einem Stromdurchbruch kommt.

Dies ist besonders wichtig, weil bei HERA-*B* wegen der erwarteten Strahlenschäden hohe Detektorspannungen benötigt werden. Da doppelseitige Streifenzähler vollständig verarmt sein müssen, muß die Detektorspannung immer größer als die volle Verarmungsspannung sein, die jedoch mit Bestrahlung ansteigt und große Werte annehmen kann.

[10] Dies hängt von weiteren Parametern wie z. B. Ablagerungen an der Detektoroberfläche, Bestrahlung und Dauer der Messung ab.

3.3 Strahlenschäden

Bei Strahlenschäden unterscheidet man zwischen Schäden durch ionisierenden Energieverlust und durch nicht ionisierenden Energieverlust der Teilchen, die den Detektor durchqueren. Untersuchungen dazu finden sich z. B. in [14, 15, 16, dortige Referenzen].)

1. **Strahlenschäden durch ionisierenden Energieverlust.**
   Im Körper eines Halbleiterdetektors erzeugt ionisierender Energieverlust keine bleibenden Schäden. Die erzeugten Elektron-Loch-Paare können rekombinieren oder werden von den Spannungsringen aufgenommen. Phononen werden in Wärme umgesetzt.

   Permanente Schäden können jedoch an Grenzflächen und isolierenden Schichten an der Oberfläche auftreten. Diese Effekte können die Änderung von Betriebsparametern erforderlich machen.

2. **Strahlenschäden durch nicht ionisierenden Energieverlust.**
   Durch Stoßprozesse der Teilchen mit Gitteratomen im Körper des Detektors werden Fehlstellen im Gitter erzeugt. Diese Fehlstellen wirken einerseits wie eine Dotierung mit Akzeptoren und können andererseits vorhandene Donatoren neutralisieren. Außerdem können die Fehlstellen freie Elektronen einfangen und mit unterschiedlichen Zeitkonstanten wieder freisetzen. Für einen Halbleiterdetektor hat das folgende Konsequenzen:

   - Der Dunkelstrom steigt an, da er von der thermischen Generation von Elektron-Loch-Paaren an Störstellen erzeugt wird. Dies erhöht das Detektorrauschen. Diesem Effekt wird durch Kühlung (Gleichung 2) entgegengewirkt.
   - Durch die Änderung der effektiven Dotierung wird nach einer Fluenz von ca 10^{12} Teilchen aus dem schwach n-dotierten ein p-dotiertes Siliziumsubstrat, es tritt eine Typinversion ein. Dies hat zur Folge, daß sich die Verarmungszone nach Typinversion von der n-Seite her ausbreitet. Bis zum Erreichen der vollen Verarmungsspannung sind also nun die Streifen auf der p-Seite kurzgeschlossen, während die n-Streifen von Anfang an voneinander isoliert sind.
   - Die volle Verarmungsspannung steigt mit der effektiven Dotierungskonzentration an. Während eines HERA-*B* Betriebsjahres fällt die volle Verarmungsspannung zunächst ab, bis sie 0 V am Punkt der Typinversion erreicht. Danach steigt sie mit wachsender Fluenz wieder an und kann dabei Werte über 200 V annehmen.
   - Die Ladungssammlungseffizienz nimmt ab und damit auch die Signalamplitude. Diesem Effekt kann durch Erhöhen der Detektorspannung über die volle Verarmungsspannung hinaus begegnet werden [2].
   - Nach Ende der Bestrahlung kommt es nicht nur zur Ausheilung von Fehlstellen, sondern es tritt auch Antiausheilung auf, die Strahlenschäden noch

	Testdetektor	Prototypdetektor	
Dicke der Siliziumscheibe	280 μm	280 μm	
Substrat	n-Typ	n-Typ	
Dotierung des Substrats	ca 2×10^{12}cm^{-3}	ca 2×10^{12}cm^{-3}	
Länge $\times$ Breite	$1,2$ cm $\times$ $1,2$ cm	$5,3$ cm $\times$ $7,3$ cm	
Sensitive Fläche	$0,77$ cm^2	35 cm^2	
Breite der Streifenaluminisierung	75 μm	$14,0$ μm	
Breite der Streifenimplantation	79 μm	$18,4$ μm	
Anzahl der Spannungsringe	2	2	
Anzahl der Feldstreifen	-	2	
Kopplung an die Elektronik	kapazitiv	kapazitiv	
Siliziumnitridschicht	nein	ja	
Dicke der Nitridschicht	-	50 oder 100 nm je nach Detektor	
		n-Seite	p-Seite
Anzahl der Streifen	100	2561	2049
Anzahl der Auslesestreifen	100	1280	1024
Streifenabstand	84 - 99 μm	$27,314$ μm	$24,4$ μm
Ausleseabstand	84 - 99 μm	$54,628$ μm	$48,8$ μm
p-Kompensationsimplantation	ja	-	ja
Anzahl der Schutzringe	22	38	21

Tabelle 2: *Parameter der verwendeten Detektoren.*

lange Zeit nach Beendigung der Bestrahlung wirksam werden läßt. Diesem unerwünschten Effekt kann man ebenfalls durch Kühlung des Detektors entgegenwirken.

Die Höhe der vollen Verarmungsspannung, der Leckstrom und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis sind Parameter, die für den Betrieb der Detektoren bestimmend sind. Deswegen wurde der Teststand so konzipiert, daß diese Größen untersucht werden können und so auch die Betriebsfähigkeit eines strahlengeschädigten Detektors untersucht werden kann.

3.4 Der Testdetektor

Zunächst wurden Messungen an $1,2 \times 1,2$ cm^2 großen Testdetektoren durchgeführt (siehe auch [15]). Diese Testdetektoren sind kleine, doppelseitige Streifenzähler mit 100 Streifen auf beiden Seiten. Die Streifen auf p- und n-Seite sind dabei um 90° gedreht.

Bei den hier verwendeten Detektoren sind für Diagnosezwecke zwei Spannungsringe vorhanden. Falls beide Spannungsringe kontaktiert sind, fließt der Diodenleckstrom durch den Körper des Detektors und durch den inneren Spannungsring. Der Strom, der durch den Randbereich des Detektors fließt und durch die Bruchkante beeinflußt wird,

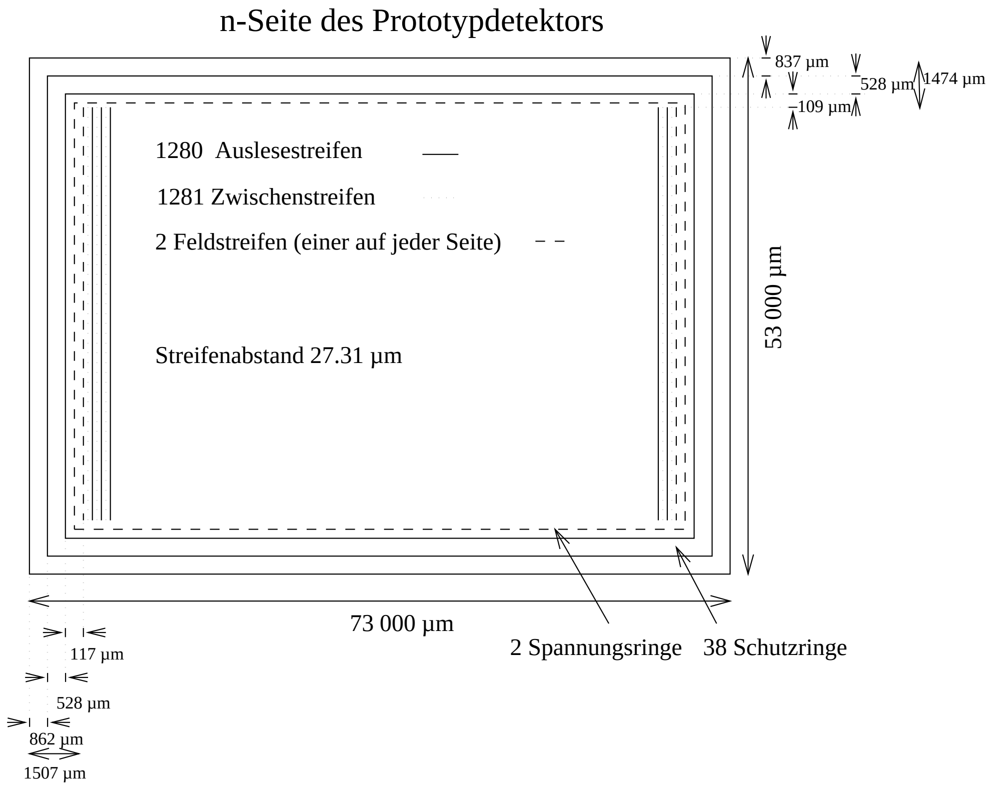

Abbildung 5: *Struktur der n-Seite des Prototypdetektors für 1996.*

fließt durch den äußeren Spannungsring. Für die mit den Testdetektoren durchgeführten Tests wurden beide Spannungsringe verwendet. Im Normalbetrieb wird nur der innere Spannungsring zum Depletieren benutzt.

Für Messungen sind die Testdetektoren auf Rahmen geklebt. Durch Bonddrähte sind auf beiden Seiten des Detektors die beiden Spannungsringe und 23 Streifen mit Leiterbahnen verbunden.

3.5 Prototypdetektoren

Die Prototypdetektoren (Abbildungen 4 und 5) haben eine Fläche von $5,3 \times 7,3$ cm^2. Auf der n-Seite befinden sich 2561 Streifen mit einem Abstand von $27,3$ μm und auf der p-Seite 2049 Streifen mit einem Abstand von $24,4$ μm voneinander. Von diesen Streifen besitzt nur jeder zweite eine Aluminiumelektrode, über die er ausgelesen werden kann. Die Zwischenstreifen, die nur aus Implantationen bestehen, dienen zur Ladungsteilung durch die kapazitive Kopplung [17] der Streifen untereinander. Durch Schwerpunktsbildung der gemessenen Ladung, die über mehrere Streifen verteilt ist, wird eine höhere Auflösung erreicht, ohne die Anzahl der Auslesekanäle zu verdoppeln.

Um die Streifen herum befinden sich auch hier zwei Spannungsringe, von denen der innere zur Spannungsversorgung benutzt wird. Die beiden Feldstreifen zwischen dem äußersten Streifen und dem inneren Spannungsring haben die Aufgabe, die Auslesestreifen vor Oberflächenspannungen zu schützen, die von den Spannungsringen ausgelöst werden. Die Spannungsringe sind auf der n-Seite von 38 und auf der p-Seite von 21 Schutzringen umgeben.

Eine Neuerung gegenüber den Testdetektoren stellt eine Siliziumnitridschicht (Si_3N_4) zwischen dem Siliziumdioxid und den Metallisierungen dar. Diese Schicht hat drei Aufgaben:

1. Sie schützt zusätzlich zum Siliziumdioxid vor einem Kurzschluß von Metallisierung und Implantation der Streifen („pin hole“).

2. Durch ihre Restleitfähigkeit sorgt sie für einen Potentialausgleich an der Oberfläche des Detektors.

3. Sie stellt als Passivierungsschicht eine Diffusionsbarriere gegen prozeßbedingte Verunreinigungen dar.

Die wichtigsten Parameter der Testdetektoren und Prototypdetektoren sind in Tabelle 2 zusammengefaßt.

3.6 Prototypmodule

Die Detektoren sind mit der p-Seite auf die Modulträger aus Alunid (AlN) geklebt (Abbildung 6). Da die Ausleseelektronik sehr empfindlich auf Strahlung reagiert, muß sie eine größere Entfernung zur Achse des HERA-*B* Protonenstrahls als die Detektoren haben. Die benötigte Distanz wird durch Mikroadapter, die die Detektorstreifen mit den Eingängen der Verstärkerchips verbindet, überbrückt. Die Detektorstreifen sind über Bonddrähte mit den Leiterbahnen der Adapter verbunden. Da die Streifen auf Vorder- und Rückseite des Detektors um 90° gedreht sind und sich die Auslesekontakte jeweils am Ende der Streifen befinden, wird auf der p-Seite ein längerer Adapter verwendet, dessen Leiterbahnen zusätzlich gewinkelt sind.

Zur Auslese der Detektoren werden sogenannte APCs [22] als integrierte Verstärkerbausteine verwendet. Eine kurze Darstellung ihrer Funktionsweise wird in Abschnitt 5.1 auf Seite 32 gegeben. Auf der n-Seite werden zehn und auf der p-Seite acht APCs benötigt. Jeweils fünf bzw. vier der APCs sind auf einen Elektronikhybriden geklebt. Der Hybrid ist dazu da, die benötigten Spannungen und Sequenzen an die APCs zu verteilen und ihre Ausgaben zu verketten und weiterzuleiten. Die APCs sind mit den Leiterbahnen der Mikroadapter verbunden. Die digitalen Verstärkersignale werden über Kaptonfolien an die Hybride herangeführt. Die elektrische Verbindung erfolgt wiederum über Bonddrähte. Eine weitere Platine verbindet die beiden Kaptonfolien über Stecker mit einem handelsüblichen Flachbandkabel. Die Detektorspannung wird über zwei Drähte direkt zu den Mikroadaptern geführt.

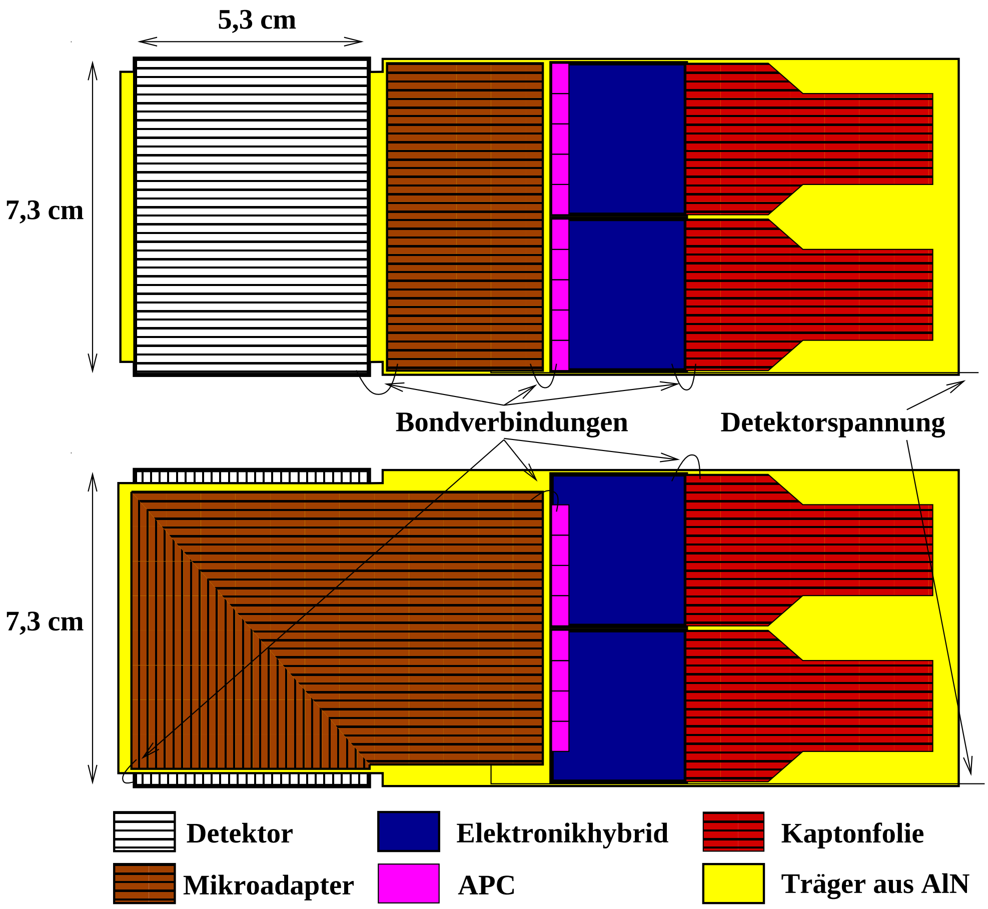

Abbildung 6: *Vertexdetektormodul von der n-Seite (oben) und von der p-Seite (unten) gesehen.*

4 Messungen an Testdetektoren

Ziel dieser Messungen war es, die Funktionsfähigkeit doppelseitiger Detektoren nach Bestrahlung zu untersuchen. Dazu wurde einer von zwei Testdetektoren mit 21 MeV-Protonen bestrahlt. Der andere, baugleiche Testdetektor wurde als Referenz verwendet. Für Messungen während der Bestrahlung siehe [15, 16]. Hier werden nur Messungen nach Abschluß der Bestrahlung beschrieben.

Da doppelseitige Streifendetektoren auch nach Bestrahlung voll depletierbar sein müssen, wurde neben der Strom-Spannungskennlinie die volle Verarmungsspannung als Meßgröße ausgewählt. Die volle Verarmungsspannung wurde dabei durch den Nachweis von α-Strahlung bestimmt.

Bei einem unbestrahlten Detektor sind vor Erreichen der vollen Verarmungsspannung die Streifen der n-Seite kurzgeschlossen, bei einem bestrahlten Detektor nach Typinversion sind es die p-Streifen. Da ein α-Teilchen eine geringe Eindringtiefe von etwa 28 μm [18] in Silizium hat, ist das Erreichen der vollen Signalhöhe ein Merkmal für das Erreichen der vollen Verarmungsspannung.

4.1 Beschreibung des Testaufbaus

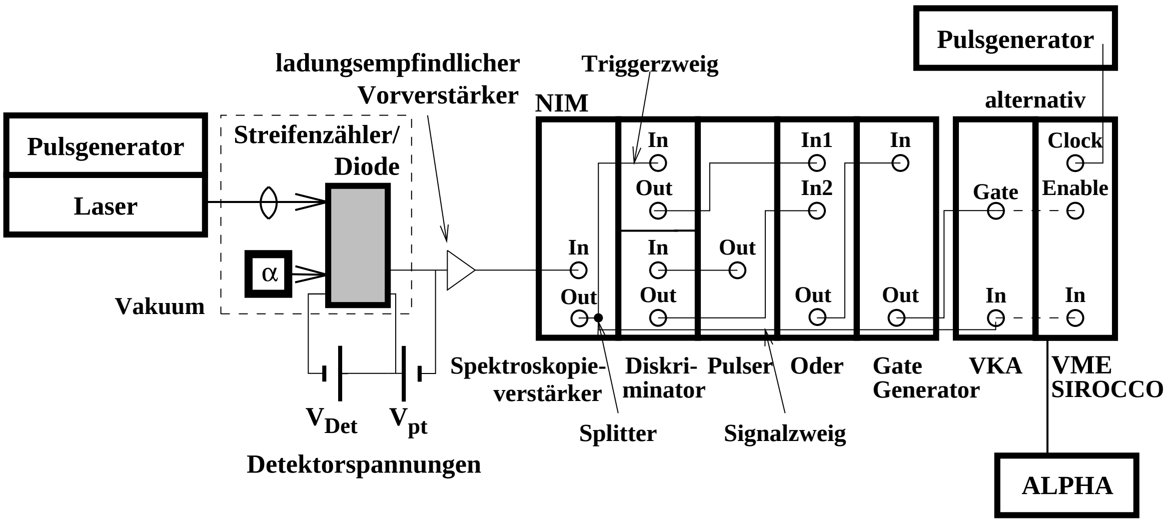

Abbildung 7: *Signalwege bei Verwendung diskreter Elektronik.*

Der Testaufbau (Abbildung 7) bestand wahlweise aus einer α-Quelle oder einem Laser als Strahlungsquelle und einem Testdetektor oder einer Diode als Detektor. Der Laser und die Diode wurden verwendet, um Probleme, die sich bei den Messungen mit α-Teilchen ergaben, zu untersuchen. Nach Verstärkung wurde das Signal zur Verarbeitung in Logikkomponenten zum Bereitstellen eines Triggers geteilt. Die Signalanalyse erfolgte mit einem Vielkanalanalysator.

Vorverstärker Ortec 142A	
mögliche Detektorkapazität	0 - 100 pF
Rauschen bei 0 pF	$1,6$ keV
Rauschen bei 100 pF	$3,4$ keV
Temperaturinstabilität	$<$ 50 ppm/°C
Temperaturbereich	0 - 50 °C
Sensitivität	nominell 45 mV/MeV
Anstiegszeit bei 0 pF	$<$ 5 ns
Anstiegszeit bei 100 pF	$<$ 12 ns
Abklingzeit	nominell 500μs
Vakuumtauglichkeit	ja
Spektroskopieverstärker Ortec 571	
Verstärkungsfaktor	1 - 1500
Pulsform	gaußisch, unipolar oder bipolar
Anstiegszeit[11]	$2,2\tau$
Pulsweite	$2,9\times$Anstiegszeit $= 6,38\tau$
maximale Pulsrate	150000 Pulse pro Sekunde

Tabelle 3: *Spezifikationen der Verstärker.*

Als α-Quelle wurde eine offene Ameritiumquelle (Am^{241}) verwendet. Die Energie solcher α-Teilchen ist mit $5,5$ MeV das 65-fache des Energieverlusts eines minimalionisierenden Teilchen im Körper des Detektors[12]. Ein α-Teilchen erzeugt also gemäß Gleichung 3 eine Ladung von 245 fC[13].

Da auch während der Bestrahlung Signale genommen wurden, wurde eine diskrete Elektronik zur Auslese verwendet, da eine ausreichend strahlungsharte, integrierte Elektronik nicht zur Verfügung stand.

In der Labormessung traf die α-Strahlung den Testdetektor aus etwa 1,5 cm Entfernung. Das Signal der Ausleseelektrode des jeweiligen Detektors wurde von einem ladungsempfindlichen Vorverstärker und einem Spektroskopieverstärker verstärkt und geformt. Die Spezifikationen der Verstärker sind in Tabelle 3 zusammengefaßt. Der Vorverstärker versprach durch Anpassung an die niedrige Eingangskapazität, die sich aus Detektorkapazität und Kapazität der Zuleitungen zusammensetzt und insgesamt wenige 10 pF betrug, und durch Anpassung an die Ladungssammelzeit von Halbleiterdetektoren ein gutes Signal-zu-Rausch-Verhältnis.

Abbildung 8, linke Seite, zeigt das Signal eines mit einem unbestrahlten Testdetektor gemessenen α-Teilchens nach dem Vorverstärker (unten) und direkt nach dem

[11] τ ist die eingestellte Zeitkonstante.

[12] Ein minimalionisierendes Teilchen erzeugt in einem 280 μm dicken Siliziumdetektor etwa 23300 Elektron-Loch-Paare [7].

[13] Es ist $1\text{fC} = 10^{-15}\text{C}$.

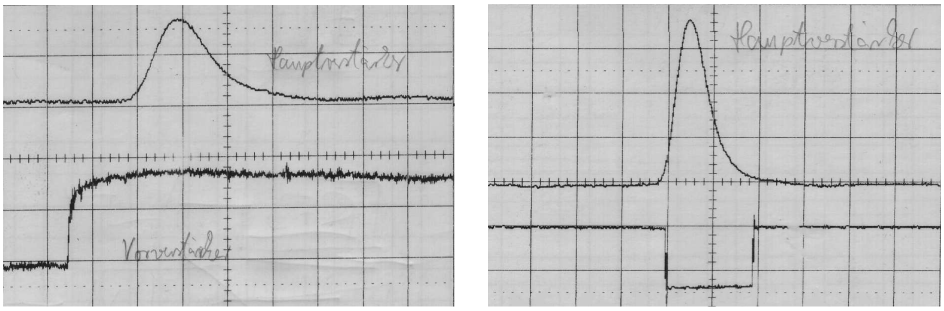

Abbildung 8: *Verstärkersignale und Triggerfenster. Das Signal wurde von einem α-Teilchen produziert und mit einem unbestrahlten Testdetektor gemessen. Links oben: Signal direkt nach dem Spektroskopieverstärker, 200 mV/Einheit, unten: Signal nach dem Vorverstärker, 10 mV/Einheit. Rechts oben: Signal des Spektroskopieverstärkers nach dem Signalteiler, 50 mV/Einheit, unten: Triggerfenster 0,5 V/Einheit. Die Zeitbasis war in allen Fällen 2 μs/Einheit.*

Spektroskopieverstärker (oben). Nach dem Spektroskopieverstärker wurde das Signal für den Triggerzweig und den Signalzweig geteilt. Abbildung 8 zeigt rechts oben das Signal im Signalzweig nach der Teilung.

Für die weitere Signalverarbeitung in einem Vielkanalanalysator wurde ein Zeitfenster benötigt, in dem das Signal liegen mußte. Das invertierte Signal wurde dazu in einen Diskriminator gespeist. Ein „Gate-Generator" lieferte das Fenster zur Datennahme, wenn die Diskriminatorschwelle überschritten wurde, oder ein Pulser einen Zufallstrigger lieferte. Dieser wurde benötigt, um gleichzeitig auch das Grundrauschen zu messen. Abbildung 8, rechte Seite, zeigt unten ein von einem α-Teilchen ausgelöstes Triggerfenster.

Der zur Signalanalyse verwendete Vielkanalanalysator war nur in einem Bereich von umgerechnet 20 - 300 fC linear. Das hatte zur Folge, daß Lage und Breite des gemessenen Rauschens nicht aussagekräftig waren. Wichtig war nur, daß das Rauschen gut von den α-Signalen separiert war.

Vakuumkammer. Unter normalen Laborbedingungen können sich Schmutzfilme, die hauptsächlich aus Wasser und organischen Stoffen bestehen, auf der Detektoroberfläche ablagern. Diese verändern die elektrischen Eigenschaften des Detektors. Da sich die Detektoren bei ihrem Einsatz bei HERA-B im Vakuum befinden und dort dieser Schmutzfilm verdampft, ist es notwendig, Tests unter vergleichbaren Bedingungen durchzuführen. Zu diesem Zweck wurde eine Vakuumkammer am Institut gebaut.

Die Größe der Vakuumkammer ist so angelegt, daß sie ein HERA-B Modul von rund 20 cm Länge mit Anschlußplatine und Verkabelung und die Positioniereinheit für die Bestrahlungsquellen gut aufnehmen kann. Neben zahlreichen Vakuumdurchführungen für LEMO-, BNC- und mehrere Flachbandkabel ist auch eine Durchführung für ein Glasfaserkabel vorhanden. Dies erlaubt es, den Laser außerhalb der Kammer zu betreiben. Die Spezifikationen des Vakuumtanks können Tabelle 4 entnommen werden.

Durchmesser	42 cm
Höhe	35 cm
Volumen	$48,5$ l
Erreichbarer Enddruck	5×10^{-5} mbar
Durchführungen	3×20 polig
	2×34 polig
	2×9 polig
	$51 \times$ LEMO
	$19 \times$ BNC
	1 monomode Glasfaser

Tabelle 4: *Spezifikationen der Vakuumkammer.*

Als Vakuumpumpen wurden eine Turbo-Molekularpumpe und eine Drehschieberpumpe als Vorpumpe verwendet. Theoretisch war mit diesen Pumpen ein Druck von bis zu 10^{-10} mbar erreichbar. Zwei Meßköpfe, einer, der den Druck nach der Penning Methode über die Ionisierbarkeit des Gases und einer, der den Druck über die Temperatur eines Heizfadens mißt, deckten den gesamten möglichen Druckbereich ab. In der Praxis wurde mit dieser Kammer ein Druck von bis zu 5×10^{-5} mbar erreicht. Dies entspricht in etwa dem Druck des sekundären Vakuums, in dem sich die Module bei HERA-*B* befinden.

4.2 I-V Kurve

Eine der einfachsten Messungen, die man durchführen kann, ist die Messung einer I-V Kurve. Anhand der Kennlinie läßt sich der Spannungsbereich festlegen, in dem der Detektor ohne Stromdurchbruch betrieben werden kann. Um den Detektor vollständig depletieren zu können, muß die Durchbruchspannung kleiner als die volle Verarmungsspannung sein. Außerdem ist das Detektorrauschen stromabhängig. Will man ein gutes Signal-zu-Rausch-Verhältnis erzielen, darf der Leckstrom einen gewissen Wert nicht überschreiten. Wir gehen bei HERA-*B* von einer Grenze von 1,5 μA pro Streifen aus.

Die Spannungsabhängigkeit des Streifenstroms sollte bei einem funktionierenden, unbestrahlten Detektor den Verlauf einer Diodenkennlinie haben. Bei einem bestrahlten Detektor ist der Leckstrom wesentlich höher. Er sollte aber qualitativ immer noch dem Verlauf einer Diodenkennlinie folgen. Die Detektoren sind so konstruiert, daß sie nach Bestrahlung eine größere Durchbruchspannung haben als vor der Bestrahlung.

Abbildung 9 zeigt die Spannungsabhängigkeit des Stromes eines Testdetektors vor und nach Bestrahlung für die Polung in Sperrichtung. In diesem Fall wurden zwei Ströme gemessen: der Strom, der durch den inneren und der, der durch den äußeren Spannungsring floß (vgl. Abschnitt 3.4).

Die Durchbruchspannung des unbestrahlten Detektors lag zwischen 180 und 190 V.

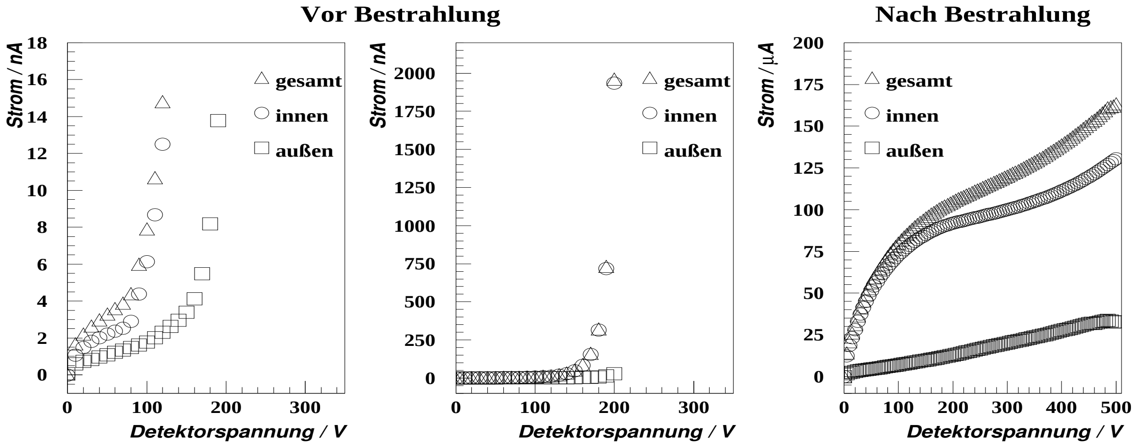

Abbildung 9: *I-V Kurven eines Testdetektors vor und nach Bestrahlung. Gemessen wurden die Ströme, die durch den inneren Spannungsring und durch den äußeren Spannungsring flossen. Die Testdetektoren waren in Sperrichtung gepolt. Links: Ausschnitt der Kennlinie des unbestrahlten Detektors. Mitte: Gesamte Kennlinie des unbestrahlten Detektors. Rechts Kennlinie des bestrahlten Detektors.*

Der Strom, der durch den äußeren Spannungsring floß, war geringer als der Leckstrom der Streifendioden. Insbesondere wurde die Durchbruchspannung nicht vom Randbereich des Detektors bestimmt.

Die Kennlinie des Leckstroms der Streifen zeigt bereits zwischen 80 und 90 V einen Knick. Dies ist der Wert der vollen Verarmungsspannung, der sich aus Messungen mit α-Teilchen und mit dem Laser ergab.

Nach Bestrahlung war der Leckstrom des Testdetektors bei 200 V einen Faktor 40 höher. Der typische Verlauf einer Diodenkennlinie zeigt sich nur sehr undeutlich. Ein Grund dafür ist die inhomogene Bestrahlung, die über den Detektor um einen Faktor vier variierte. Die Kennlinie des Testdetektors setzte sich aus den Kennlinien der inhomogen bestrahlten Streifendioden zusammen.

Wichtig ist, daß der Detektor nach Bestrahlung ohne Probleme mit Detektorspannungen von bis zu 500 V betrieben werden konnte.

4.3 Bestimmung der vollen Verarmungsspannung

Zur Messung der vollen Verarmungsspannung wird ausgenutzt, daß sich die Verarmungszone vor Typinversion von der p-Seite her ausbreitet, nach Typinversion von der n-Seite. Die Streifen der gegenüberliegenden Detektorseite sind bis zum Erreichen der vollen Verarmungsspannung kurzgeschlossen. Da nur bei isolierten Streifen ein Signal gesehen werden kann, ergibt sich aus der Spannungsabhängigkeit der Signalhöhe die volle Verarmungsspannung. Die α-Teilchen werden von der Kurzschlußseite eingestrahlt, da sie ihre gesamte Energie an der Oberfläche verlieren und die Diffusion durch den Detektor die Interpretation der Ergebnisse erschwert.

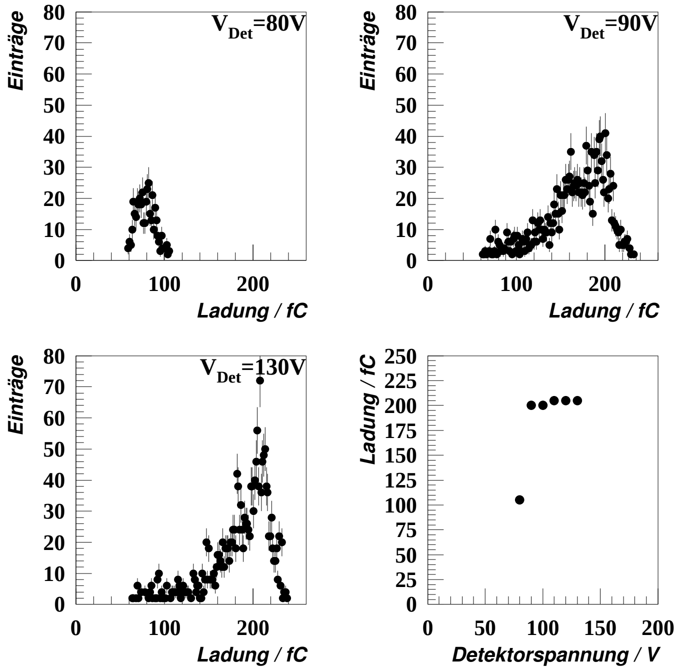

Abbildung 10: *Spannungsabhängigkeit der α-Spektren des unbestrahlten Testdetektors. Bestrahlungs- und Ausleseseite war die n-Seite.*

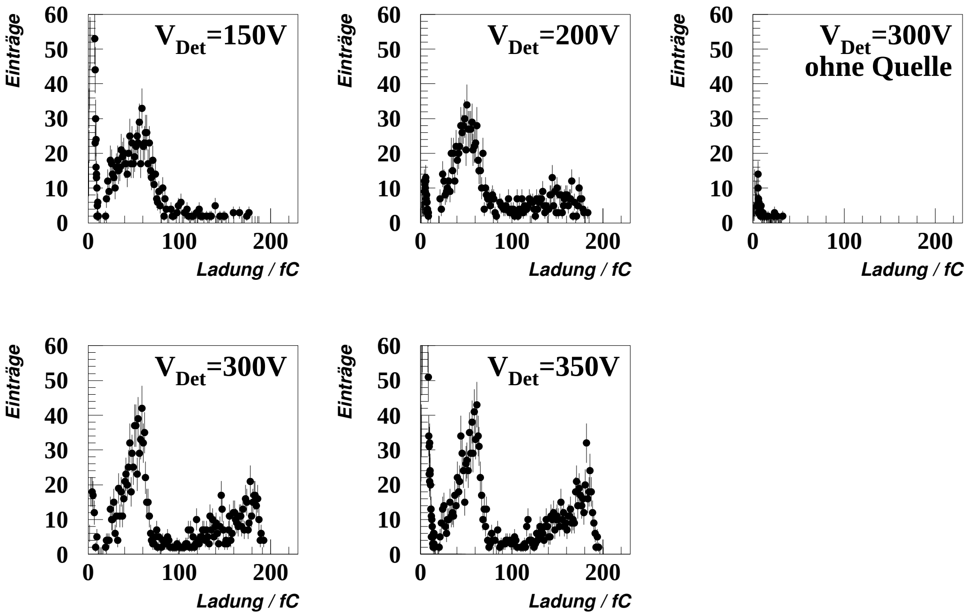

Abbildung 11: *Spannungsabhängigkeit der α-Spektren des bestrahlten Testdetektors. Bestrahlungs- und Ausleseseite war die p-Seite.*

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse der Messung an dem unbestrahlten Detektor. Die Spektren wurden im Vakuum aufgenommen. Unterhalb einer Spannung von 80 V war kein Signal zu sehen. Zwischen 80 und 90 V erreichte das gemessene Signal seine maximale Höhe von 200 fC. Die volle Verarmungsspannung ergab sich somit als (85 ± 5) V.

Zum Vergleich zeigt Abbildung 11 die α-Spektren des bestrahlten Detektors bei verschiedenen Spannungen. Man erkennt schon bei 150 V Signale der α-Quelle, die bei 60 fC liegen. Diese Signale zeigen keine Spannungsabhängigkeit. Ab einer Spannung von 200 V bildet sich ein zweites Signal aus, das sich bei weiterer Erhöhung der Spannung verstärkt. Dieses Signal liegt ähnlich wie beim unbestrahlten Detektor bei 190 fC. Aus der Spannungsabhängigkeit dieses Signals ergibt sich eine volle Verarmungsspannung zwischen 200 und 300 V.

Das Signal bei 60 fC ist bislang unverstanden. Bei diesen Spektren ist zu bedenken, daß ein Streifen sehr inhomogen bestrahlt wurde. Das kann dazu führen, daß die volle Verarmungsspannung über die Länge des Streifens variiert. Sollte eine Region des Detektors nicht typinvertiert sein, könnte dies eine Erklärung für die Beobachtung sein. Dieser Effekt führt auch dazu, daß die volle Verarmungsspannung nicht genau definiert ist. Es kann nur ein Bereich angegeben werden, in dem die volle Verarmungsspannung liegt.

Bei den Messungen ergaben sich folgende Probleme:

1. Bereits die Spektren des unbestrahlten Detektors zeigen eine breite Signalverteilung, wie sie nicht von einer monoenergetischen Strahlungsquelle erwartet wird.

2. Die Streuung von α-Teilchen innerhalb der Quelle und am Versuchsaufbau ist nicht auszuschließen. Das kann zu einer unerwünschten Struktur des Spektrums führen.

3. Die Aufnahme von α-Spektren ist sehr zeitintensiv.

Um die Struktur der α-Spektren zu untersuchen und um auszuschließen, daß die Natur der Quelle die Resultate des Testdetektors verfälscht, wurde der Testdetektor durch eine Diode ersetzt. Diese Diode ist auf der n-Seite vollständig aluminisiert und besitzt auf der p-Seite einen Spannungsring im Außenbereich der Diode. Die α-Strahlung fiel von der p-Seite ein, die zugleich Ausleseseite war. An der Diode, die sich im Vakuum befand, lag eine Spannung von 10 V.

Abbildung 12 zeigt das Ergebnis dieser Messung. Es sind zwei verschiedene Signalspitzen zu erkennen, die bei 185 fC bzw. 216 fC liegen. Beide Signalspitzen waren von der angelegten Detektorspannung abhängig. Die gemachte Beobachtung kann also die zweite Signalspitze im Spektrum des bestrahlten Testdetektors nicht erklären. Trotzdem zeigt diese Messung, daß die Verwendung von α-Quellen problematisch ist.

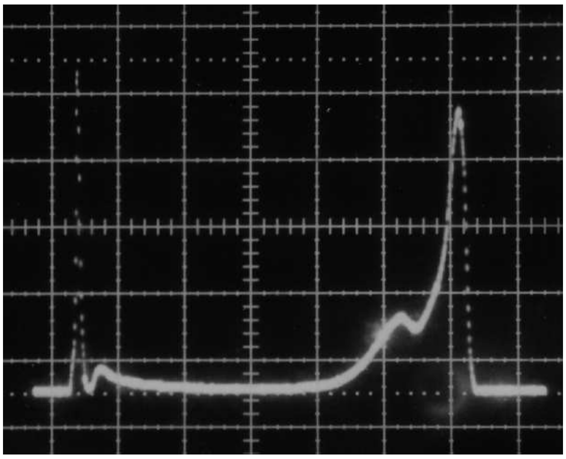

Abbildung 12: *α-Spektrum einer Diode im Vakuum aufgenommen. Die erste Signalspitze liegt bei 185 fC, die zweite bei 216 fC.*

4.4 Testaufbau mit dem Laser

Zur Lösung der oben beschriebenen Probleme wurde ein Laser als Strahlungsquelle verwendet:

1. Der Laser besitzt eine einstellbare und genau definierte Pulshöhe.

2. Die Position des Laserstrahls ist bekannt und über eine Positioniereinheit veränderbar. Dadurch können lokale Unterschiede untersucht werden.

3. Der Laser besitzt eine hohe Pulsfrequenz, die zudem an den verwendeten Aufbau angepaßt werden kann. Die Zeit zur Aufnahme eines Spektrums kann wesentlich reduziert werden.

Wellenlänge	813 nm
Eindringtiefe in Si	15 μm
Maximale Pulsrate	40 kHz
Pulslänge	$\mathcal{O}(\mu s)$
Energie	0,5 mW im Dauerbetrieb
Anstiegszeit	1 μs
Modulationstiefe	90 %
Typ	Diodenlaser
	an eine Faser angekoppelt

Tabelle 5: *Spezifikationen des verwendeten Lasers.*

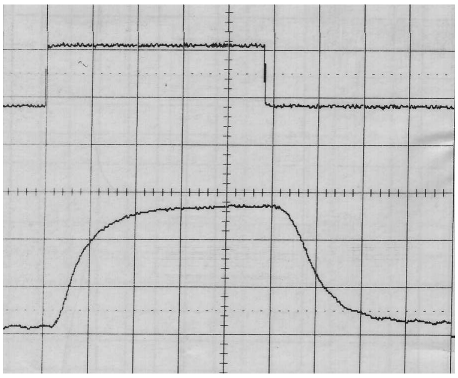

Abbildung 13: *Modulation des Lasersignals (unten) mit einem Pulsgenerator (oben). Zeitbasis: 1 μs pro Einheit.*

Der verwendete Diodenlaser hat eine maximale Leistung von 0,5 mW und eine Wellenlänge von 813 nm, was zu einer Eindringtiefe von 15 μm [19][14] in Silizium führt. Der Laser kann durch einen Pulsgenerator mit einer Frequenz von bis zu 40 kHz moduliert werden. Die Modulationstiefe beträgt etwa 90%; es ist also immer Restlicht vorhanden. Über eine monomode Glasfaser und eine Vakuumdurchführung wird das Lichtsignal in die Vakuumkammer gebracht. Der Laserstrahl wird von einer Linse gebündelt und trifft dann auf den Detektor.

Abbildung 13 zeigt die Modulation des Diodenlasers mit einem Pulsgenerator. Oben ist das invertierte Signal des Pulsers zu sehen, unten das Lasersignal, das mit einer Siliziumdiode aufgenommen wurde. Die Verzögerung des Lasersignals beträgt etwa 0,4 μs, die Anstiegszeit 1,6 μs.

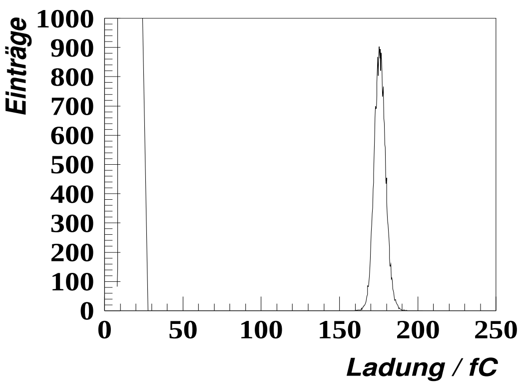

Abbildung 14: *Laserspektrum mit einer Diode und dem SIROCCO aufgenommen.*

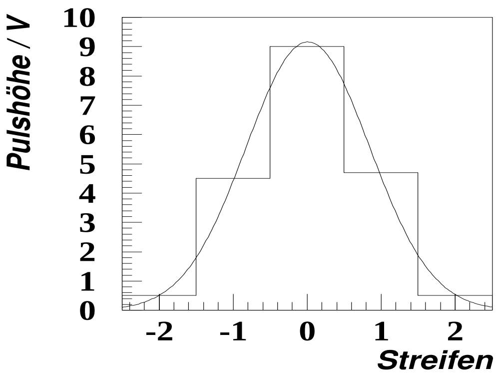

Abbildung 15: *Verteilung des Laserpulses auf die Streifen der p-Seite des unbestrahlten Testdetektors.*

Als Referenz wurde zunächst das Laserspektrum mit einer Diode aufgenommen. Für die Messung traf der Laserstrahl die Diode auf der p-Seite, die gleichzeitig ausge-

[14]Abfall auf 1/e der Anfangsintensität.

lesen wurde. Die Leistung des Lasers wurde so weit reduziert, daß die Pulshöhe am Verstärkerausgang ungefähr derjenigen entsprach, die bei einem α-Teilchen gemessen wurde.

Abbildung 14 zeigt das Ergebnis dieser Messung. Im Gegensatz zur Verwendung von α-Strahlung (Abbildung 12) ist mit dem Laser als Strahlungsquelle bei ansonsten gleichem Aufbau nur eine einzige Signalspitze zu sehen.

Es wurde außerdem die Verteilung des Laserstrahls auf die Streifen des Testdetektors gemessen. Zu diesem Zweck wurde der Laser auf eine Position auf der p-Seite des Detektors fixiert und nacheinander fünf p-Streifen ausgelesen. Abbildung 15 zeigt die an den verschiedenen Streifen mit einem Oszilloskop gemessenen Pulshöhen nach dem Spektroskopieverstärker. Der Streifenabstand betrug 99 μm und der Abstand des Detektors vom Strahl etwa 6 cm. Ein Gaußfit an die gemessene Verteilung ergab eine Strahlbreite[15] von 106 μm.

Das VME-System. Die anfallende Datenmenge erhöht sich bei einem Laseraufbau um mehrere Größenordnungen. Der Vielkanalanalysator wurde durch eine Datennahme ersetzt, die mit VME[16]-Modulen aufgebaut wurde und die es ermöglichte, einzelne Ereignisse zu untersuchen. Das VME-System besteht aus

- einer CPU als Steuereinheit, auf der alle Prozesse laufen, die zur Steuerung und Datennahme des Teststands nötig sind.
- einem Analog-zu-Digital-Konverter (SIROCCO).
- einem Schnittstellenmodul, das die Ansteuerung von Geräten mit dem IEEE[17]-Protokoll erlaubt.

Der SIROCCO. Der VME-SIROCCO ist im Prinzip ein ADC[18] mit integriertem Speicher. Er ist in der Lage, positive Spannungen kleiner als 1 V zu digitalisieren. Der Zeitpunkt der Digitalisierung wird durch einen externen NIM[19] oder TTL[20] Puls (Clock) angegeben. Als zusätzliche Bedingung kann gefordert werden, daß an einem zweiten Eingang (Enable) gleichzeitig eine negative Spannung anliegen muß. (Siehe auch Abbildung 7.)

Das analoge Signal wird in einen 10 Bit-Wert (0 bis 1023) konvertiert. Dabei sind maximal 4096 Digitalisierungen möglich. Verschiedene Einstellmöglichkeiten zur Anpassung des dynamischen Bereichs und zur Anpassung an verschiedene Logikfamilien sind durch Potentiometer und steckbare Brücken gegeben.

[15]Ein σ der Gaußverteilung.
[16]**V**ersa **M**odule **E**urocard [20]
[17]**I**nstitute of **E**lectrical and **E**lectronic **E**ngineers
[18]**A**nalog to **D**igital **C**onverter
[19]**N**uclear **I**nstrument **M**odule [21]
[20]**T**ransistor-**T**ransistor **L**ogic [21]

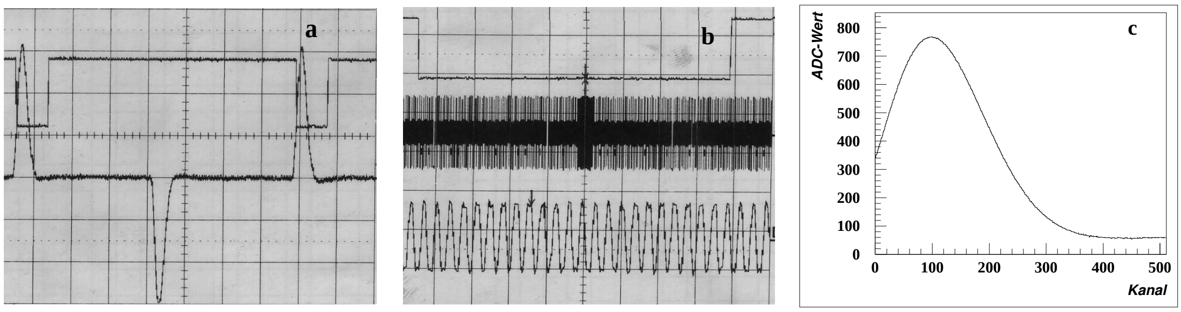

Abbildung 16: *Prinzip der Datennahme mit dem SIROCCO. a) Verstärkersignal (unten) mit Triggerfenster (Enable, oben). b) Triggerfenster (oben) mit Digitalisierungssignalen (mitte und unten) für den SIROCCO. c) Das vom SIROCCO digitalisierte Signal. Es stimmt mit dem Verstärkersignal innerhalb des Triggerfensters aus (a) überein. Die jeweilige Skala ist im Text angegeben.*

Die Signale für den SIROCCO sind in Abbildung 16 gezeigt. (a) zeigt unten das Signal des Spektroskopieverstärkers. Eine Einheit entspricht 200 mV. Die Zeitbasis ist 50 μs pro Einheit. Das Signal wurde von einem Pulsgenerator erzeugt, der einen langen Rechteckpuls lieferte. Deshalb gab es sowohl positive Signale (aufsteigende Flanke des Testpulses) als auch negative Signale (fallende Flanke des Testpulses). Da der SIROCCO zu Beginn einer Digitalisierungssequenz eine Totzeit hat, war eine lange Zeitkonstante für den Spektroskopieverstärker notwendig, die in dem abgebildeten Beispiel 6 μs betrug.

Oben ist das Enable-Signal der Triggerlogik gezeigt. Der Trigger bestand aus einer positiven Diskriminatorschwelle und generierte ein Triggerfenster, das das Maximum des Signals einschloß.

Ein weiterer Pulsgenerator lieferte die Digitalisierungspulse für den SIROCCO. Diese sind in Abbildung 16 (b) mitte zusammen mit dem Triggerfenster (oben) zu sehen. Die Zeitbasis beträgt hier 5 μs pro Einheit. Unten ist die Vergrößerung des schwarzen Bereichs in der Mitte zu sehen. Hier beträgt die Zeitbasis 200 ns pro Einheit. Eine Messung ergab eine Digitalisierungsfrequenz von 14 MHz.[21]

Abbildung 16 (c) zeigt das Signal des Spektroskopieverstärkers, wie es vom SIROCCO digitalisiert wurde. Es stimmt mit dem Signal des Verstärkers innerhalb des Triggerfensters aus Abbildung 16 (a) überein.

Diese Konfiguration, mit Enable-Signal und Clock, wurde bei der Aufnahme von Daten des Testdetektors in diesem Abschnitt verwendet. Aus der maximalen, digitalisierten Pulshöhe wurde das Pulshöhenspektrum ermittelt.

[21] Obwohl nominell eine Digitalisierungsfrequenz von 20 MHz möglich sei soll, war dies die maximal mögliche Frequenz.

Das IEEE-System. Mit Hilfe des IEEE-Protokolls werden folgende Geräte gesteuert:

- Die Spannungsversorgung des Detektors
- Strommeßgeräte
- Die Positioniereinheit

Positioniereinheit. Die Positioniereinheit befindet sich innerhalb des Vakuumtanks und wurde so gewählt, daß sie den Laserstrahl über den gesamten Detektor verfahren kann. Sie besteht aus zwei senkrecht aufeinander stehenden Linearverstellern, die einen Verfahrweg von jeweils 80 mm mit einer Genauigkeit von 1 μm haben. Die vakuumtauglichen Linearversteller können sowohl manuell als auch mit einem Motor betrieben werden. Die Steuereinheit für die Motoren kann wiederum manuell oder über den IEEE-Bus betrieben werden.

4.5 Bestimmung der vollen Verarmungsspannung mit dem Laser

Abbildung 17 zeigt Messungen von Laserspektren bei verschiedenen Spannungen am unbestrahlten Detektor. Es ist ebenfalls die Messung eines Rauschspektrums zu sehen.

Man sah erste Signale des Lasers ab einer Spannung von 60 V. Die Signalhöhe stieg bis zu einer Spannung von 100 V an und blieb danach praktisch konstant. Diese Messung bestätigte damit den Wert der vollen Verarmungsspannung, der durch die Messungen mit α-Strahlung ermittelt worden war.

Der Laser ermöglichte durch die kürzere Meßzeit eine genauere Untersuchung. Abbildung 18 zeigt die genaue Abhängigkeit der Signalhöhe von der Detektorspannung. Die Signalhöhe wurde für diesen Zweck nach dem Spektroskopieverstärker von einem Oszilloskop abgelesen. Die Signalhöhe stieg bis zu einer Spannung von 90 V steil an. Zwischen 95 und 190 V zeigte die Signalhöhe nur noch eine geringe Spannungsabhängigkeit. Die Überhöhung der Signale bei 90 V ist bislang ungeklärt. Eine beobachtete Zeitabhängigkeit deutet auf einen Einfluß von Oberflächeneffekten hin.

Aus dieser Messung ergab sich der genaueste Wert der vollen Verarmungsspannung von (90 ± 3) V.

Eine Untersuchung der vollen Verarmungsspannung und insbesondere von lokalen Unterschieden des bestrahlten Detektors mit dem Laser war leider nicht möglich. Zu dem Zeitpunkt, zu dem der Laser zur Verfügung stand, war mehr als ein Jahr seit seiner Bestrahlung vergangen. Der Vorverstärker zeigte am bestrahlten Detektor Oszillationen, die nicht umgangen werden konnten. Damit konnte der bestrahlte Detektor nicht mehr untersucht werden.

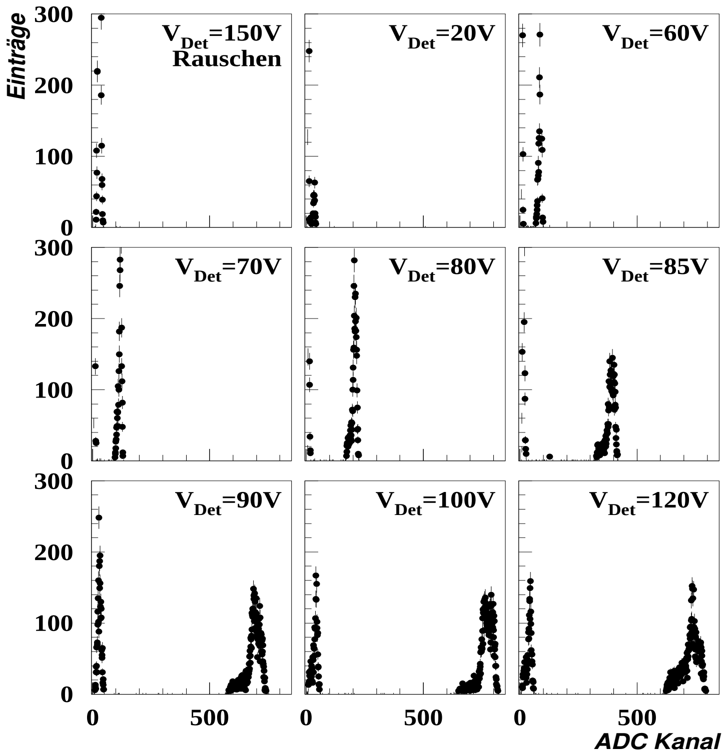

Abbildung 17: *Laserspektren am unbestrahlten Testdetektor bei verschiedenen Spannungen zur Bestimmung der vollen Verarmungsspannung. Es wird mit dem Laser die n-Seite bestrahlt und ausgelesen.*

4.6 Laserspektren des Testdetektors

Es wurden Laserspektren des unbestrahlten Testdetektors untersucht, insbesondere die Abhängigkeit von der Ausleseseite bei Bestrahlung von beiden Seiten. Mit einem Zufallstrigger wurde auch das Grundrauschen gemessen. Aus der Kalibration ist zu entnehmen, daß der Laserstrahl so eingestellt war, daß er rund sechs mal mehr Ionisation als ein α-Teilchen erzeugte. Abbildung 19 zeigt die Ergebnisse dieser Messung für jeweils 50000 Ereignisse.

In der Messung zur oberen Reihe der Abbildung befand sich der Laserstrahl auf der p-Seite des Detektors, für die untere Reihe auf der n-Seite. Für die linke Spalte wurde ein p-Streifen ausgelesen, für die rechte ein n-Streifen. Die Detektorspannung betrug 90-100 V. Da die Pulsrate des Lasers größer als die Frequenz des Zufallstriggers war, gab es mehr Signalereignisse als Rauschereignisse. Das Signal war wie zur Aufnahme eines α-Spektrums durch eine Diskriminatorschwelle selbsttriggernd.

Die gemessenen Spektren können folgendermaßen erklärt werden:

- Bestrahlung und Auslese der p-Seite: Hier ergab sich das höchste Signal. Diese Konfiguration wurde als Referenz benutzt.

- Bestrahlung von der p-Seite, Auslese eines n-Streifens: Die Elektronen müssen

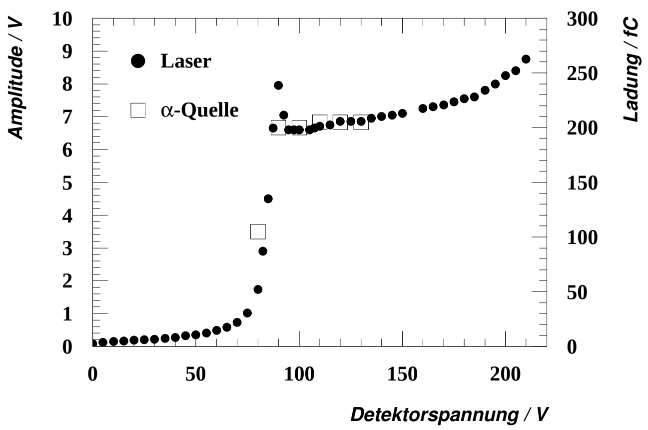

Abbildung 18: *Pulshöhe (linke Skala) des Lasersignals in Abhängigkeit von der angelegten Detektorspannung zur Bestimmung der vollen Verarmungsspannung des unbestrahlten Detektors. Bestrahlungs- und Ausleseseite ist die n-Seite. Zum Vergleich sind die Ladungen (rechte Skala) aus der Spannungsabhängigkeit der α-Spektren mit eingezeichnet. (Vgl. Abbildung 10.)*

durch den gesamten Detektor driften. Durch Diffusion und Elektroneneinfang an Störstellen nimmt die Signalhöhe ab.

- Bestrahlung und Auslese der n-Seite: Die Signalhöhe ist stark von der Detektorspannung abhängig. Hier wurde eine Spannung kurz vor Erreichen der vollen Depletion gewählt.

- Bestrahlung von der n-Seite, Auslese eines p-Streifens: Die n-Seite ist aufgrund ihrer Kompensationsimplantation komplizierter aufgebaut als die p-Seite. Der Laser erzeugt den Hauptteil der Elektron-Loch-Paare direkt an der Oberfläche zwischen den Aluminisierungen der n-Seite. Durch die p-Kompensationsimplantation ergibt sich für positive Ladungen eine Potentialbarriere, deren Maximum von etwa $+0,5$ V gegenüber den n-Streifen ca 4 μm unterhalb der Oberfläche liegt. Der Bereich von der Oberfläche bis zu dieser Zone ist quasi feldfrei. Die in dieser Zone generierten Löcher müssen auf ihrem Weg zur p-Seite den Potentialwall überwinden. Dies führt zu Ladungssammelzeiten von $\mathcal{O}(ms)$, so daß ein Hauptteil der generierten Löcher nicht nachgewiesen werden kann. Die Elektronen müssen dagegen keinen Potentialwall überwinden und werden praktisch vollständig nachgewiesen.

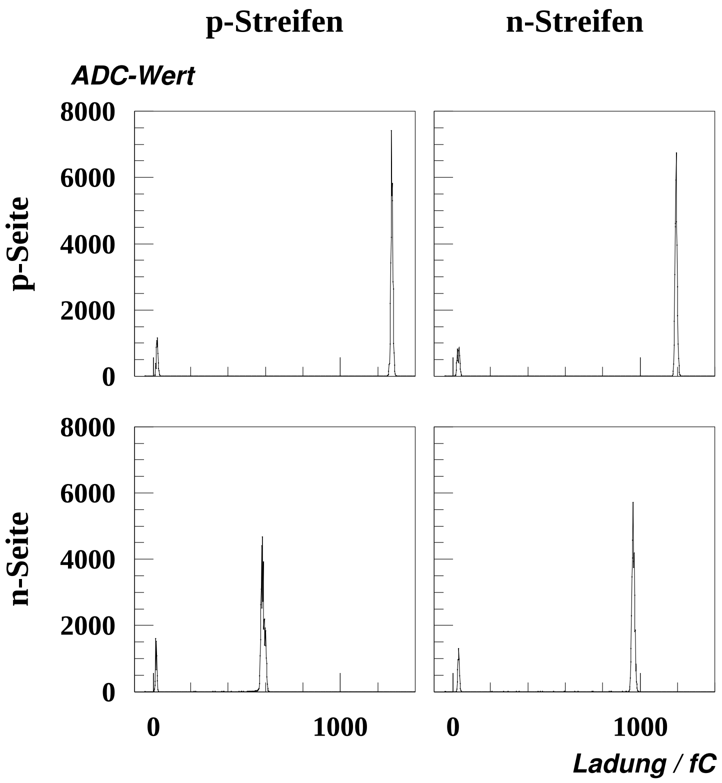

Abbildung 19: *Laserspektren am unbestrahlten Testdetektor für alle Kombinationen: Der Laserstrahl ist oben auf der p-Seite, unten auf der n-Seite. Links wird ein p-Streifen ausgelesen, rechts ein n-Streifen.*

5 Messungen an Modulen

Ziel der Messungen war es, die ersten Prototypmodule vor ihrem Einbau in den Gesamtdetektor auf ihre Eigenschaften hin zu untersuchen. Als erstes wurden I-V Kennlinien gemessen. Dabei wurde festgestellt, daß die Detektoren nach dem Kleben auf die Modulträger und dem Bonden einen erhöhten Leckstrom zeigten.

Das erste fertiggestellte Modul, das Modul mit der Seriennummer 3, konnte nur bis zu einer Detektorspannung von 30 V betrieben werden. Trotzdem konnte an ihm der Testaufbau überprüft werden, mit dem später weitere Module auf die Funktionsfähigkeit einzelner Streifen getestet wurden.

In diesem Abschnitt werden die ersten Tests an dem Modul mit der Seriennummer 2 vorgestellt[22]. Dieses Modul konnte mit einer Spannung von bis zu 280 V betrieben werden. Hier wurde die volle Verarmungsspannung bestimmt und Kalibrations- und Rauschmessungen durchgeführt. Abschließend wurde die Funktionsfähigkeit einzelner Streifen getestet.

5.1 Beschreibung des Testaufbaus

Zum Betrieb der integrierten Modulelektronik waren digitale Signale notwendig, die mit Hilfe eines Mustergenerators erzeugt wurden. Abbildung 20 gibt eine vollständige Übersicht über den Teststand.

Mustergenerator. Der Mustergenerator ist in der Lage, auf zwölf unabhängigen Kanälen ein frei programmierbares Bitmuster zu generieren. In Tabelle 6 sind die Signale der Kanäle des Mustergenerators zum Betrieb der integrierten Elektronik aufgelistet.

Über einen externen Takt wird der Generator zur nächsten programmierten Einstellung weitergeschaltet. Als zusätzlicher Anschluß steht ein „Jump-Eingang“ zur Verfügung. Der Status dieses Eingangs kann abgefragt und damit zur Steuerung des Programmablaufs genutzt werden. Am Experiment kann dadurch ein externer Trigger zur Steuerung der Auslese des Vertexdetektors verwendet werden.

Integrierte Elektronik. Als ladungsempfindliche, integrierte Vorverstärker werden zur Zeit APCs[23] [22] verwendet, die unter anderem beim Experiment H1 am DESY zum Einsatz kommen. Abbildung 21 zeigt ein Blockschaltbild eines Verstärkerkanals.

Ein einzelner Verstärkerchip besitzt 128 dieser Kanäle. Jeder Kanal besitzt einen Ringspeicher von 32 Zellen (analog pipeline), in denen das verstärkte Signal zwischengespeichert werden kann und von denen zwei in Abbildung 21 exemplarisch dargestellt sind. Diese Konstruktion hat den Vorteil, daß mehr Zeit bleibt, zu entscheiden, ob das aufgezeichnete Ereignis interessant ist oder nicht. Die 32 Zellen sind durch ein Schieberegister (Pipeline shift register) einzeln adressierbar. Die 128 Kanäle des APC

[22] Die zu den Seriennummern 2, 5 und 6 korrespondierenden Kennummern der in HERA-B eingebauten Module sind 303, 403 und 503.

[23] **A**nalog **P**ipeline **C**hip

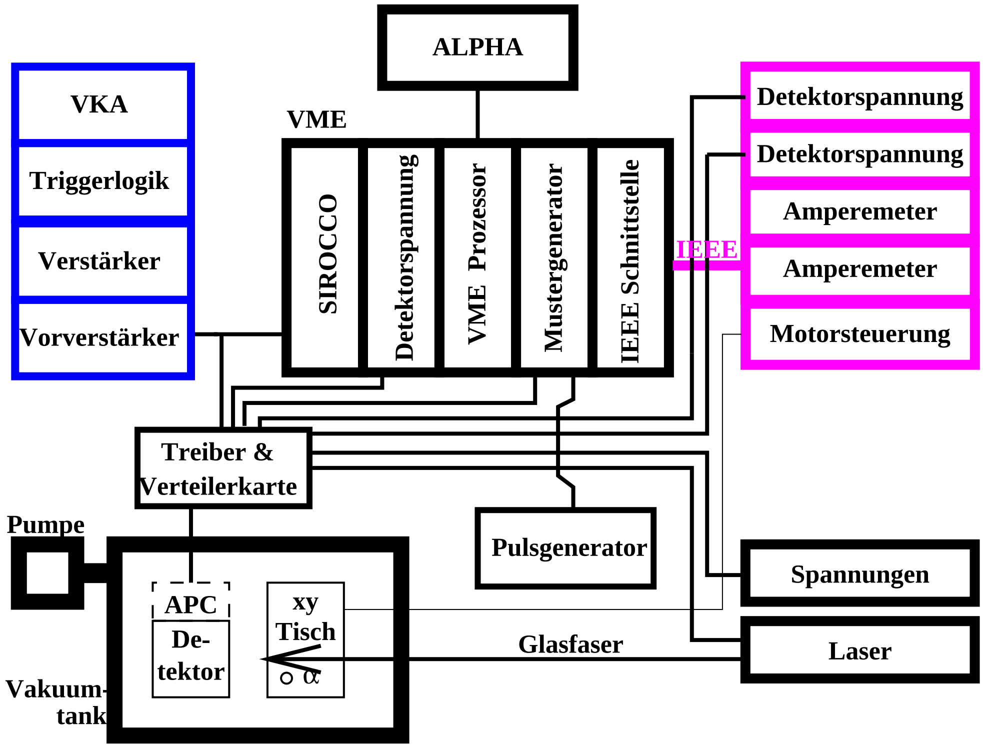

Abbildung 20: *Blockschaltbild des gesamten Teststands.*

sind durch ein weiteres Register, das Ausleseregister (Readout shift register) ansprechbar. Die Ausgaben mehrerer APCs können mit Hilfe des Ausleseregisters verkettet werden.

Insgesamt ergibt sich so eine Matrix, in der von 128 Detektorstreifen 32 Ereignisse in einem APC gespeichert werden können.

Beim Betrieb des Chips werden zwei Phasen unterschieden:

1. **Die Phase der Datennahme.** Während der Phase der Datennahme wird das von den Detektorstreifen kommende Signal kontinuierlich verstärkt und gespeichert, indem das Schieberegister von Speicherzelle zu Speicherzelle durchgetaktet wird. Werden mehr als 32 Ereignisse aufgenommen, so werden die zuerst genommenen Daten wieder überschrieben.

2. **Die Phase der Auslese.** In der Phase der Auslese wird die Verbindung zu den Detektorstreifen getrennt. Das Schieberegister wird zu der Zelle getaktet, in der das interessante Ereignis gespeichert ist. Bei einem Kalibrations- oder Lasersignal ist diese Stelle durch die fest programmierte Sequenz vorgegeben. Bei einem Ereignis, dessen Eintreten nicht a priori bekannt ist, muß dieses Ereignis durch einen Trigger a posteriori identifiziert werden. Das Triggersignal liegt am Jump-Eingang des Mustergenerators an und leitet so die Phase der Auslese ein. Kommt der Trigger eine genau definierte Zeitspanne nach dem eigentlichen Ereignis, so

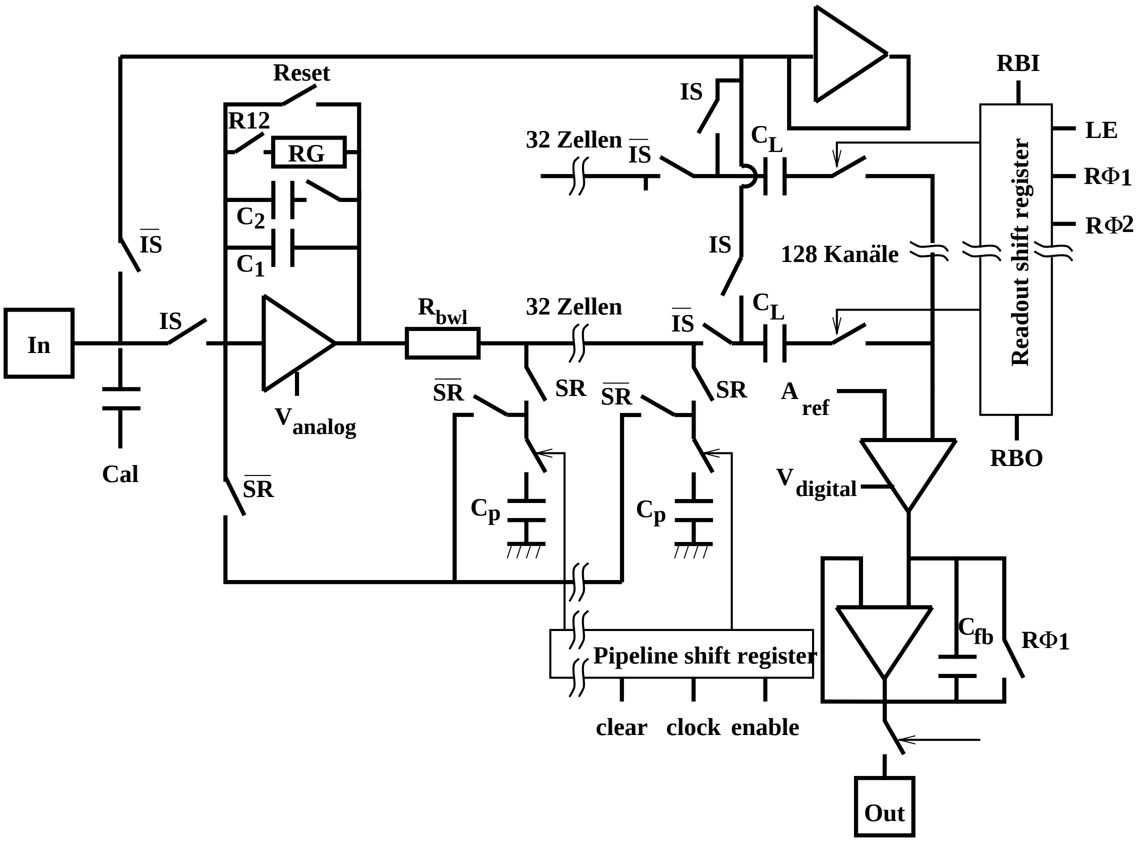

Abbildung 21: *Blockschaltbild des APC.*

muß das Schieberegister nur eine feststehende Anzahl von Zellen zurückgestellt werden. Die Differenz des Inhalts der gewählten Speicherzelle und einer weiteren, frei wählbaren Speicherzelle, wird erneut verstärkt. Durch der Vergleich verschiedener APC-Zellen wird gleichzeitig ein Untergrund abgezogen. Das Ergebnis dieser Operation wird anschließend für alle 128 Kanäle sequentiell auf den Ausgang gelegt.

Die Signale von vier APCs auf der p-Seite und von fünf APCs auf der n-Seite werden verkettet und von je einem SIROCCO digitalisiert. Der SIROCCO erhält zusätzlich, zeitlich auf die APC-Auslese abgestimmt, ein Signal zur Digitalisierung der Daten (Kanal 9 des Mustergenerators).[24]

Zur Kalibration liefert Kanal 5 des Mustergenerators einen Kalibrationspuls, der über ein Netzwerk von Kondensatoren und Widerständen auf die Kanäle des APC verteilt wird. Es werden dabei vier verschiedene Ladungsmengen für jeweils vier benachbarte Streifen erzeugt. Die Differenz zwischen zwei Ladungsmengen entspricht dabei in etwa der Ionisation eines minimalionisierenden Teilchens. Ein Ausschnitt einer Mes-

[24]Ein spezielles Triggerfenster oder Enable-Signal für den SIROCCO ist in diesem Betriebsmodus des SIROCCOS nicht erforderlich.

Kanal	Name	Bedeutung
1	SΦ2	Takt für das Schieberegister
2	SΦ1	Takt für das Schieberegister
3	SBI	Setzt ein Bit im Schieberegister
4	SEB	Ermöglicht den Zugriff auf die Speicherzellen
5	CAL	Kalibrationspuls für die APC-Eingänge *oder* Puls zur Ansteuerung des Lasers
6	RΦ2	Takt für das Ausleseregister
7	RΦ1	Takt für das Ausleseregister
8	RBI	Setzt ein Bit im Ausleseregister
9	SIROCCO Takt	Digitalisierungstakt für den SIROCCO
10	IS/SR	Schalter für Datennahme oder Auslesephase
11	RESET	Löschen der Koppelkapazität
12	LE	Ermöglicht den Zugriff auf die Kapazität C_L beim Zurücklesen aus dem Schieberegister.

Tabelle 6: *Die Belegung der Kanäle des Mustergenerators zum Betrieb des APC.*

sung der Ausgabe eines APC, an dem ein Kalibrationspuls anliegt, ist in Abbildung 22 gezeigt.

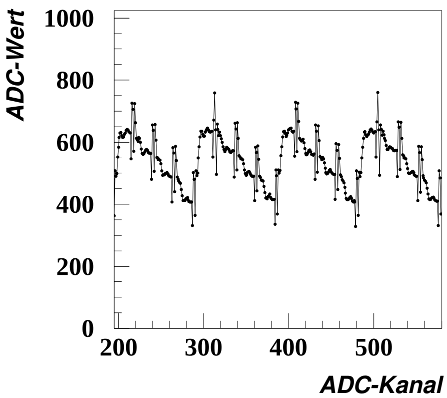

Abbildung 22: *Von einem SIROCCO digitalisierte Ausgabe eines Test-APC mit Kalibrationspuls. Es sind die vier unterschiedlichen Stufen von 16 APC-Kanälen zu sehen. Eine Stufe entspricht in etwa der Ionisation eines minimalionisierenden Teilchens.*

5.2 I-V Kurve

Zuerst wurde die Abhängigkeit des Leckstroms von der Detektorspannung gemessen. Im Gegensatz zum Testdetektor war nur ein Spannungsring des Moduls durch einen

Bonddraht kontaktiert, so daß lediglich eine Messung des Gesamtstroms möglich war und nicht zwischen Streifenstrom und Strom durch den Rand des Detektors unterschieden werden konnte.

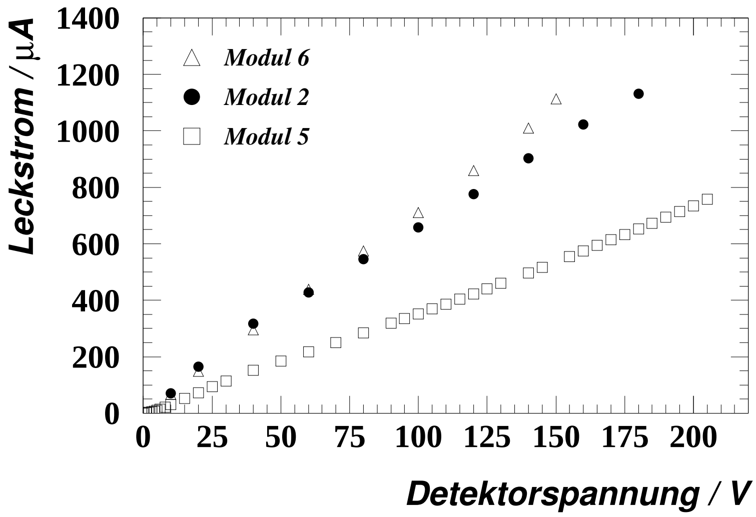

Abbildung 23: *Spannungsabhängigkeit des Gesamtstroms der Module 2, 5 und 6.*

Abbildung 23 zeigt die gemessenen I-V Kennlinien der eingebauten Module 2, 5 und 6 für die Polung in Sperrichtung. Man sieht nicht, wie das erwartet wurde, den Verlauf einer Diodenkennlinie. Die Ursache für das fast lineare Verhalten und den hohen Leckstrom wird noch untersucht. Die großflächige Klebung der Detektoren ist mit großer Wahrscheinlichkeit verantwortlich für den Anstieg des Leckstroms, der vor der Klebung um zwei Größenordnungen geringer war. Eine Messung an einem Spitzenmeßplatz ergab, daß der anormal hohe Stromfluß lokal begrenzt war und nur Blöcke von wenigen Streifen betraf.

Es mußte nun untersucht werden, inwieweit die Funktionsfähigkeit der Module beeinträchtigt war.

5.3 Auslese der Elektronik

Um Erfahrungen mit der Elektronik zu sammeln, wurde die Funktion der Verstärkerelektronik studiert. Dazu wurde ein einzelner APC verwendet, der an keinen Detektor angeschlossen war. Dieser APC wurde einmal mit und einmal ohne anliegenden Kalibrationspuls ausgelesen. Das Ergebnis ist in Abbildung 24 zu sehen.

Die Messung mit anliegendem Kalibrationspuls (Abbildung 24 oben) zeigt Unregelmäßigkeiten, die auch in der Nullmessung ohne Kalibrationspuls (mitte) vorhanden sind. Bildet man die Differenz von Kalibrations- und Nullmessung, so sieht man ein sehr regelmäßiges Nettosignal (unten). Ohne Abzug einer Nullmessung läßt sich keine effektive Signalhöhe bestimmen. Prinzipiell sind daher Nullmessungen für jede der 32

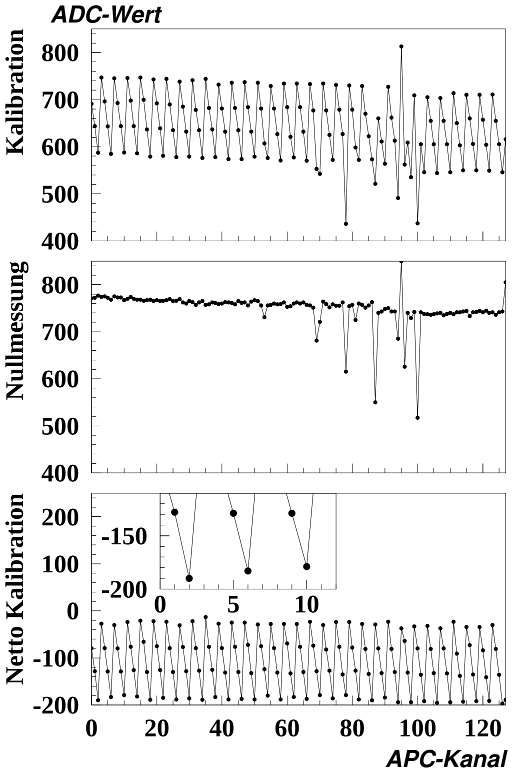

Abbildung 24: *Auslese des Test-APC mit und ohne Kalibrationspuls und Nettopulshöhe.*

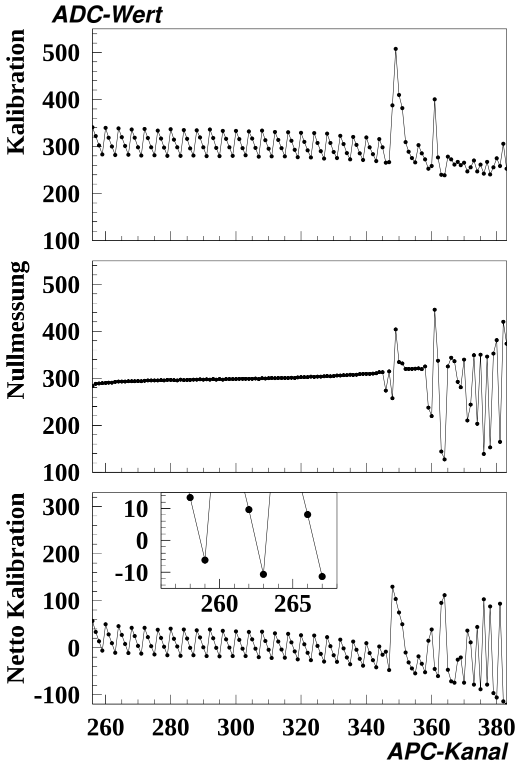

Abbildung 25: *Kalibrationspuls, Nullmessung und Nettopulshöhe des zweiten APC von Hybrid 10 auf der n-Seite von Modul 3.*

Speicherzellen erforderlich, da von vornherein nicht klar ist, ob sich alle Zellen gleich verhalten.

In Verbindung mit einem Detektor treten Änderungen beim Verhalten der Elektronik auf. Das Ergebnis für einen APC der n-Seite von Modul 3 ist in Abbildung 25 dargestellt.

An diesem APC zeigten die letzten 32 Kanäle einen Defekt. Da der Defekt lokal begrenzt ist, ist dies von untergeordneter Bedeutung. Wichtig ist, daß die Höhe des gemessenen Kalibrationspulses gegenüber der vorigen Messung um einen Faktor drei abgenommen hat. Dies ist durch das Vorhandensein des Detektors erklärbar. Die Kalibrationsladung teilt sich zwischen Detektor und Verstärker gemäß den jeweiligen Kapazitäten auf.

Nach [23] beträgt die Eingangskapazität der APCs etwa 100 pF. Bei einer Kapazität von 30 pF am Eingang der Vorverstärker wurde ein Signalverlust von 53% gemessen [23]. Bei den Detektormodulen erwarten wir eine Streifenkapazität von 1,3 pF/cm. Bei den Mikroadaptern wurde eine Kapazität von etwa 0,9 pF/cm gemessen. Für eine weitergehende Abschätzung des Signalverlustes ist eine genauere Analyse des Netzwerkes notwendig.

5.4 Lasersignal an Modul 3

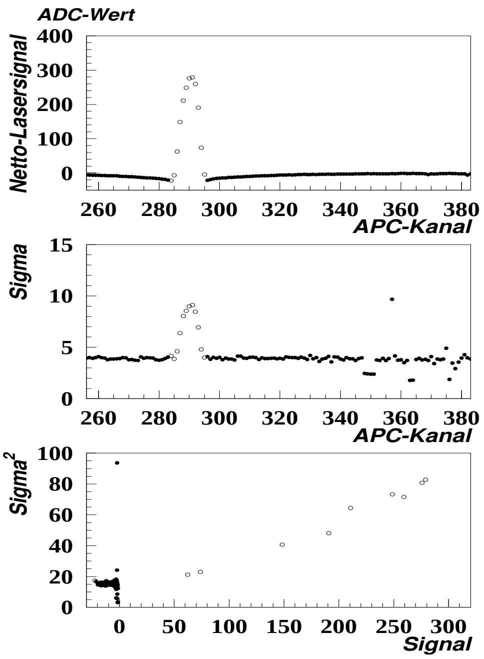

Abbildung 26: *Mittelwert und σ der Pulshöhenverteilung eines Lasersignals bei Modul 3. Unten ist die Abhängigkeit von σ^2 von der Pulshöhe zu sehen. Siehe auch Abbildung 27.*

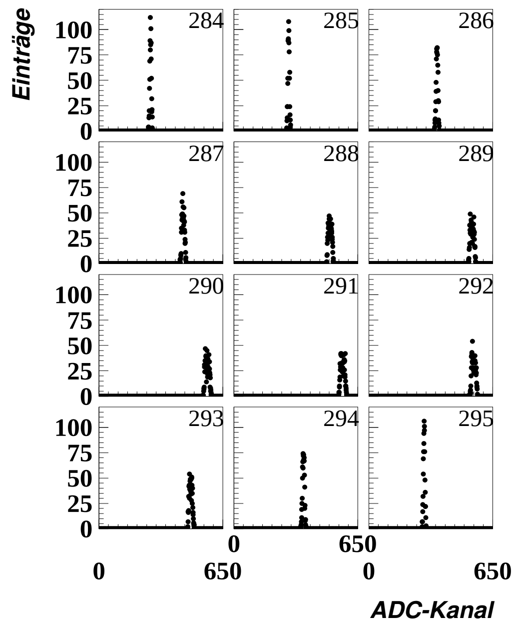

Abbildung 27: *Pulshöhenverteilung des Lasersignals von Streifen 284 bis 295 der n-Seite von Modul 3 (offene Kreise in Abbildung 26.)*

Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Streifen wurde der Laser als Strahlungsquelle verwendet. Gezeigt sind die Ergebnisse von Modul 3. Der Laserpuls traf die Region um den Streifen 290 der n-Seite, die gleichzeitig auch Ausleseseite war. Aufgenommen wurden 1000 Ereignisse.

Es zeigten etwa 11 Streifen ein Signal des Lasers (siehe Abbildung 26). Ein Gaußfit an die Pulshöhenverteilung ergab eine Breite[25] von 2,5 Streifen. In Abbildung 27 sind die Spektren für die getroffenen Streifen einzeln dargestellt. Die Signalhöhe stieg bis zu Streifen 290 an, je mehr sich der Streifen im Zentrum des Laserpulses befand.

Außerdem erkennt man, daß die Breite der Häufigkeitsverteilung mit wachsender Signalhöhe anwächst. Dies ist auch Abbildung 26 mitte zu entnehmen. Dies ist bei der Messung von Zählraten N, bei der die Meßunsicherheit mit $\sqrt{N}$ geht, auch zu erwarten. Abbildung 26 zeigt unten die Abhängigkeit von σ^2 von der Signalhöhe.

Abbildung 28 zeigt eine Messung der Verteilung des Lasersignals auf die Streifen bei verschiedenen Spannungen. Mit steigender Detektorspannung stieg die Signalhöhe und -breite an. Außerdem zeigte sich bei höherer Spannung eine Asymmetrie.

[25] Ein σ der Gaußverteilung.

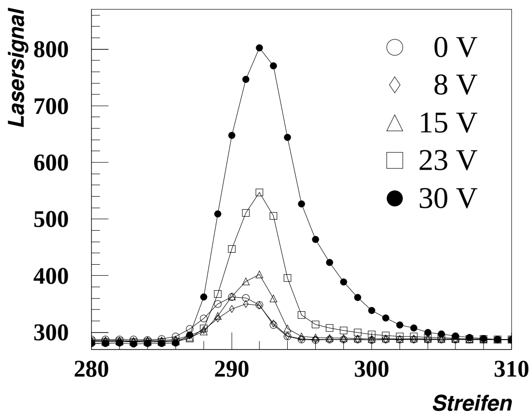

Abbildung 28: *Spannungsabhängigkeit des Lasersignals bei Modul 3.*

5.5 Bestimmung der vollen Verarmungsspannung über die Spannungsabhängigkeit des Lasersignals

Bei Modul 3 war die Spannung auf 30 V begrenzt, da durch diesen Detektor ein sehr hoher Strom floß. Modul 2 konnte man dagegen mit Detektorspannungen bis zu 280 V betreiben. Es war deshalb möglich, bei diesem Modul die volle Verarmungsspannung durch die Spannungsabhängigkeit der Höhe des Lasersignals zu bestimmen.

Abbildung 29 zeigt exemplarisch ein Oszilloskopbild eines Lasersignals, wobei die n-Seite bei einer Detektorspannung von 110 V bestrahlt wurde. Da bei Modul 2 nur jeder zweite Streifen gebondet ist, sieht man eine typische Wellenstruktur, deren Einhüllende eine Gaußglocke ist. Nur jeder zweite Streifen zeigt ein Signal; die anderen zeigen Rauschen.

Zur Bestimmung der Pulshöhe dieses Lasersignals bei verschiedenen Detektorspannungen wurde ein digitales Oszilloskop verwendet. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 30 zu sehen. Aus dieser Darstellung ergibt sich eine volle Verarmungsspannung von 100 V. Der Pfeil markiert die Spannung von 100 V, bei der die nachfolgenden Kalibrationsmessungen durchgeführt wurden.

5.6 Kalibration und Rauschen

An Modul 2 wurden Rauschmessungen und Kalibrationsmessungen durchgeführt. Die Abbildungen 31 und 32 zeigen die Ergebnisse, wobei die Kalibrationsmessung nullpunktskorrigiert wurde. In beiden Fällen wurde APC-Zelle 0 verwendet. Abbildung 33 zeigt dagegen die korrigierte Messung des Kalibrationspulses von APC-Zelle 1.

In allen drei Abbildungen sind die gebondeten Streifen in der linken Bildhälfte und

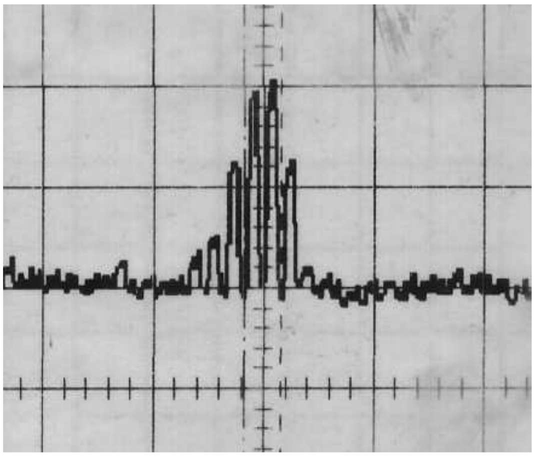

Abbildung 29: *Oszilloskopbild eines mit Modul 2 aufgenommenen Lasersignals. Es ist nur jeder zweite Streifen gebondet. Bestrahlt wurde die n-Seite. Skala: 200 mV/Einheit*

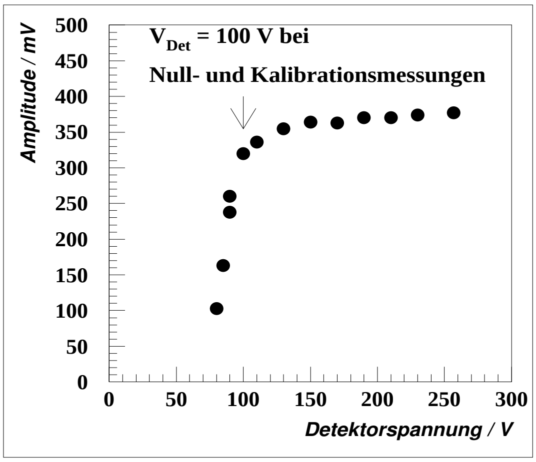

Abbildung 30: *Bestimmung der vollen Verarmungsspannung von Modul 2. Aufgetragen ist die gemessene Amplitude des Lasersignals gegen die Detektorspannung.*

die ungebondeten in der rechten Bildhälfte dargestellt. Die Trennung ist durch einen Strich in der Bildmitte angedeutet. Zur Messung auf der p-Seite des Moduls wurde der Signalpegel um 20 dB gedämpft, im Gegensatz zu 12 dB auf der n-Seite. Deshalb wurden die Meßwerte der p-Seite mit einem Faktor $2,512$ multipliziert. Die Spannung zwischen Spannungsring und Streifen betrug auf der n-Seite ca 3 V und auf der p-Seite ca 9 V. Sie wurde so gewählt, daß der Strom, der durch die Erdung der Elektronik floß, minimiert wurde.

Da der Kalibrationspuls vier unterschiedliche Pegel hatte und jeder zweite Streifen in der jeweils anderen Bildhälfte dargestellt wird, ergibt sich ein zweistufiges Signal, dessen Stufe in etwa der Ionisation zweier minimalionisierenden Teilchen entspricht.

Es ist deutlich zu erkennen, daß sich sowohl Kalibrationspuls als auch Rauschen gebondeter Streifen von ungebondeten unterscheiden. Dies ist einfach zu erklären:

1. Ein Detektor ist eine zusätzliche Kapazität am Eingang des Verstärkers. Eine injizierte Ladung teilt sich gemäß der jeweiligen Kapazitäten zwischen Detektor und Verstärker auf.

2. Das Verstärkerrauschen wächst mit steigender Kapazität am APC-Eingang gemäß $\mathrm{ENC} = 675\mathrm{e} + 56\mathrm{e/pF}$ [23][26].

3. Durch seinen Leckstrom ist ein Detektor eine Rauschquelle, die umso größer ist, je höher der Leckstrom ist. Gebondete Streifen sollten also ein höheres Rauschen zeigen.

[26]ENC steht für „**E**quivalent **N**oise **C**harge“

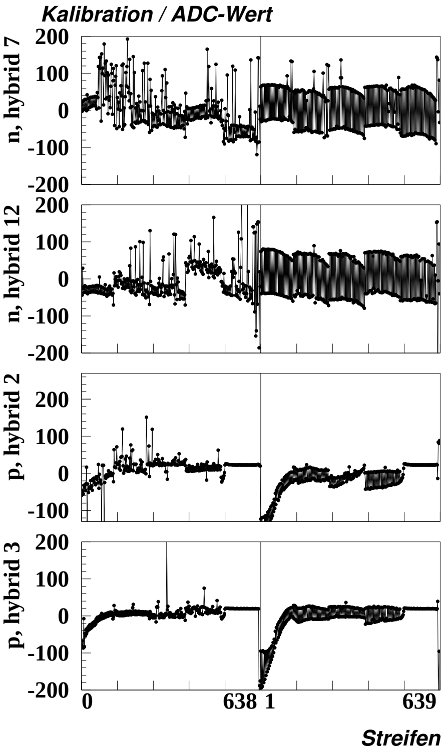

Abbildung 31: *Kalibrationsmessung für APC-Zelle 0 von Modul 2. Jeder zweite Streifen ist in die andere Bildhälfte verschoben, um gebondete (links) und ungebondete Streifen (rechts) getrennt darzustellen.*

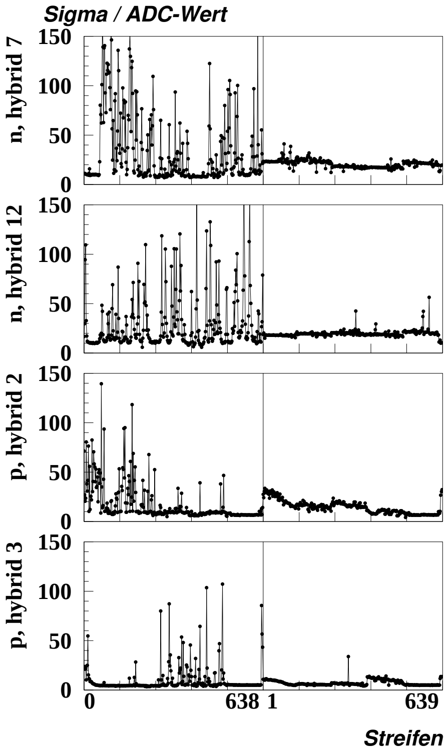

Abbildung 32: *Sigma der Nullmessung für APC-Zelle 0 von Modul 2. Gebondete und ungebondete Streifen sind wieder getrennt dargestellt.*

Die Messungen zu den Abbildungen 31 und 33 unterschieden sich nur darin, daß im ersten Fall APC-Zelle 0, im zweiten Fall APC-Zelle 1 verwendet wurde. Auf der p-Seite ist ein deutlicher Unterschied in der Höhe des gemessenen Kalibrationssignals zu erkennen. Der Unterschied betrifft nicht nur die absolute Signalhöhe der ungebondeten und gebondeten Streifen, sondern auch die relative Höhe zwischen gebondeten und ungebondeten Streifen. Eigentlich sollte kein Unterschied bei Verwendung verschiedener Zellen vorhanden sein. Daß dies dennoch der Fall ist, zeigt, daß die Sequenzen zum Betrieb des APC zum Zeitpunkt dieser Messung nicht vollständig verstanden waren[27]. Trotz dieser Schwierigkeiten war es mit den ersten drei Zellen möglich, die Funktionsfähigkeit des Detektors zu überprüfen.

Zur Bestimmung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses wurde auf der p-Seite der Kalibrationspuls von Zelle 1 und das Rauschen von Zelle 0 verwendet. Dies ist nur unter der

[27]Dieses Problem ist inzwischen gelöst. Bei späteren Messungen in Hamburg mit einer verbesserten Auslesesequenz trat dieses Phänomen nicht mehr auf.

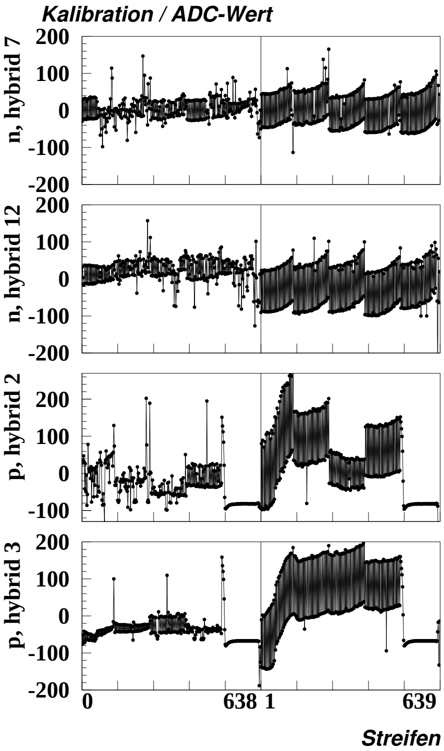

Abbildung 33: *Kalibrationsmessung für APC-Zelle 1 von Modul 2. Auf der p-Seite ist der gemessene Kalibrationspuls fürAPC-Zelle 1 größer als für APC-Zelle 0.*

Annahme erlaubt, daß die Zellenabhängigkeit des Kalibrationspulses nur ein Artefakt der Sequenzen ist. Leider standen keine vergleichbaren Rauschmessungen von Zelle 1 zur Verfügung. Spätere Messungen in Hamburg zeigten jedoch, daß dieses Verfahren erlaubt ist.

Alle Messungen wurden mit einer Korrektur auf eine gemeinsame Basisverschiebung („common mode“) durchgeführt. Eine Analyse einzelner Ereignisse zeigte jedoch, daß gebondete und ungebondete Streifen keine gemeinsame Verschiebung der Basislinie haben. Es ist daher besser, für gebondete und ungebondete Streifen getrennt zu korrigieren. Für obige Messungen wurde die Trennung der Korrektur nicht angewandt. Diese Verbesserung ist noch in die Programme zur Datennahme zu integrieren.

Ermittelt man eine gemeinsame Basis von gebondeten und ungebondeten Streifen und korrigiert auf eine Verschiebung dieser Basis bei verschiedenen Ereignissen, so sieht es im Endeffekt so aus, als würden sowohl gebondete als auch ungebondete Streifen um diese gemeinsame Basis oszillieren. Bei Ermittlung der Standardabweichung geht diese Oszillation direkt in die Rauschmessung ein und erhöht die gemessenen Rauschwerte. Das gemessene Rauschen gebondeter und ungebondeter Streifen wird so einander angeglichen. Dies ist der Grund, warum in Abbildung 32 der Rauschpegel ungebondeter Streifen so hoch erscheint.

	Kalibration				σ		S/N	
	Zelle 1		Zelle 0		Zelle 0		Zelle 0/1	
Hybrid	gb	ungb	gb	ungb	gb	ungb	gb	ungb
n, h7	50	90	35	130	9	17	3,9	7,6
n, h12	50	115	25	130	10	19	2,5	6,8
p, h2	65	130	10	40	10	10	6,5	13,0
p, h3	45	160	10	40	5	5	9,0	32,0

Tabelle 7: *Kalibration und Rauschen von APC-Zelle 0 und 1 von Modul 2. Für das Signal-zu-Rausch-Verhältnis wird auf der p-Seite der Kalibrationspuls von Zelle 1 und sigma von Zelle 0 genommen. Die angegebenen Signal-zu-Rausch-Verhältnisse (S/N) beziehen sich auf das Kalibrationssignal von etwa zwei minimalionisierenden Teilchen. Die Höhe von Kalibration und Rauschen ist in ADC-Werten angegeben.*

Das aus den Meßwerten ermittelte Signal-zu-Rausch-Verhältnis ist deshalb zu niedrig. Es ist eine untere Abschätzung. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis wurde aus dem Verhältnis der Höhe des Kalibrationssignals zum Sigma der Nullmessung bestimmt. Zur Bestimmung der Höhe des Kalibrationspulses und des Rauschens wurden exemplarisch Detektorstreifen betrachtet, die gut funktionierten, d. h. deutlich sichtbar die zweifache Struktur des Kalibrationspulses zeigten und die ein konstantes Rauschen in der Nähe der Basislinie hatten.

Diese Bedingung war auf der p-Seite bei nur ca 25% aller gebondeten Streifen erfüllt. Für diese Streifen wurde das in Tabelle 7 angegebene Signal-zu-Rausch-Verhältnis ermittelt. Bei den restlichen Kanälen war die Höhe des Kalibrationspulses entweder wesentlich geringer oder sie zeigten überhaupt kein Kalibrationssignal. Auf der n-Seite erfüllten etwa 80% der gebondeten Streifen die Bedingung. Das ermittelte Signal-zu-Rausch-Verhältnis war geringer, als es auf der p-Seite war. Auch hier waren Variationen in der Höhe des Kalibrationssignals zu beobachten.

Bei den ungebondeten Kanälen zeigten nahezu alle Streifen beider Seiten ein Kalibrationssignal konstanter Höhe. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis war bei den ungebondeten Streifen einen Faktor 2-3 größer, als es bei den gebondeten Streifen war.

Bei den in Tabelle 7 angegebenen Werten ist zu berücksichtigen, daß sie sich auf eine Signalhöhe von zwei minimalionisierenden Teilchen beziehen. Auf der anderen Seite zeigen spätere Messungen, daß das Rauschen einen Faktor 2-3 geringer ist.

Ungebondete Elektronikkanäle sind, abgesehen von der Zellenabhängigkeit, funktionstüchtig. An gebondeten Kanälen treten Probleme auf, die entweder durch Defekte am Detektor oder durch ungenügende Abstimmung zwischen Detektor und Elektronik auftreten können[28]. Bereits aus der Strommessung ist bekannt, daß begrenzte Detektorbereiche defekt sind, die sehr wahrscheinlich einen störenden Einfluß auf die Elektro-

[28]Der APC ist nicht der endgültige Verstärkerchip, der im fertigen Experiment eingesetzt werden soll. Daher sind solche Schwierigkeiten kaum zu vermeiden und vorläufig vertretbar.

nik haben, was, z. B. durch Kurzschlüsse, zu großflächigeren Problemen führen kann. Bei späteren Messungen in Hamburg an den Prototypdetektoren zeigten sich starke Abhängigkeiten von der Betriebsfrequenz der Elektronik. Dies deutet auf Probleme beim Zusammenwirken beider Komponenten hin.

5.7 Funktionstest mit dem Laser

Weitere Tests wurden mit dem Laser durchgeführt, um die Funktionstüchtigkeit einzelner Streifen zu überprüfen. Die Idee der verwendeten Meßmethode ist folgende:

Die Energie eines Laserpulses kann so groß gewählt werden, daß sie der Energiedeposition mehrerer α-Teilchen entspricht. Wenn der Laserstrahl den gesamten Detektor überstreicht[29], wird jeder Streifen einmal einen Maximalwert erreichen, der von einem Laserpuls produziert wird. Einen defekten Streifen kann man dadurch charakterisieren, daß eine bestimmte Pulshöhe nicht erreicht wird. Kennt man zusätzlich das Rauschen aus der Nullmessung, kann man auch das Nichterreichen eines bestimmten Signal-zu-Rausch-Verhältnisses als Ausschlußkriterium wählen.

Leider verursachte der Motor bzw. die dazugehörige Steuerung ein weit über das Normale hinausgehendes Rauschen. Dieser Untergrund ist zumindest von der gleichen Größenordnung in der Pulshöhe wie das Laserereignis selbst. Führt man nun die oben beschriebene Messung durch, so können auch defekte Streifen eine Pulshöhe zeigen, die den Kriterien für einen funktionierenden Streifen genügen.

Um das oben beschriebene Verfahren dennoch verwenden zu können, muß man ein Ereignis, das von einem Laser erzeugt wird, von einem Untergrundereignis unterscheiden können. Diese Möglichkeit besteht in der Anzahl der betroffenen Streifen.

Abbildung 29 zeigt, daß der Laserstrahl bei einem Modul, bei dem nur jeder zweite Streifen gebondet ist, nur etwa acht Streifen trifft. Von einem Laserereignis sollten maximal vier bis sechs Streifen betroffen sein. Streifen, an denen das Maximum des Laserstrahls bereits vorübergezogen ist, zählen dabei nicht.

Ein Untergrundereignis ist nicht wie ein Laserstrahl lokal begrenzt, sondern betrifft immer viele Streifen auf einmal. Die Möglichkeit zur Unterscheidung von Laserereignis und Untergrundereignis besteht also darin, zu jeder Änderung des Maximalwertes eines Streifens ebenfalls die Multiplizität, also die Anzahl der Streifen, die von demselben Ereignis betroffen sind, mit abzuspeichern. Als Kriterium für einen funktionierenden Streifen wird also nicht nur eine Mindestpulshöhe gefordert, sondern auch eine geringe Multiplizität, mit der diese Pulshöhe erreicht wird.

Eine Fehlerquelle dieser Methode tritt dann auf, wenn der Laser nicht die höchste Signalquelle ist. Produziert ein Untergrundereignis eine so große Pulshöhe, daß sie den Laser übertrifft, so wird das Maximum des Untergrundereignisses und die dazugehörige hohe Multiplizität für mehrere Streifen gespeichert, die damit als nicht funktionsfähig klassifiziert werden, obwohl sie es eigentlich sind.

Umgekehrt können defekte Kanäle als funktionierend mißidentifiziert werden, wenn sie von einem Untergrundereignis mit geringer Multiplizität betroffen sind.

[29] Aufgrund der Streifenstruktur ist hiermit eine eindimensionale Bewegung für eine Seite gemeint.

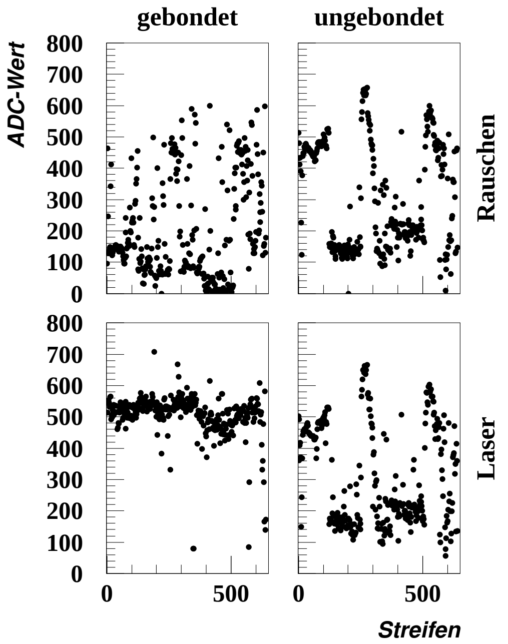

Abbildung 34: *Lasertest an Hybrid 12 der n-Seite von Modul 2. Auf der linken Seite sind die gebondeten Kanäle, rechts die ungebondeten dargestellt. Oben sind Rauschmessungen, unten die Messungen mit dem Laser.*

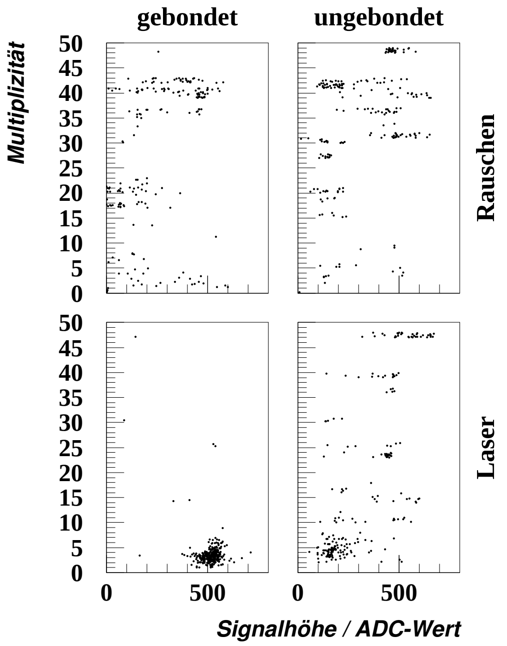

Abbildung 35: *Multiplizität in Abhängigkeit von der Signalhöhe für die Messung an Hybrid 12 der n-Seite von Modul 2. Auf der linken Seite sind die Messungen an gebondeten Kanäle, rechts an ungebondeten. Oben sind Rauschmessungen, unten die Messungen mit Laser.*

In Abbildung 34 ist die Signalhöhe für gebondete und ungebondete Streifen für eine Rauschmessung und für eine Lasermessung zu sehen. Die Abbildung zeigt auch ohne Laser ein hohes Signal sowohl für gebondete als auch für ungebondete Streifen. Erst wenn man zusätzlich zur Signalhöhe auch die Multiplizität betrachtet (Abbildung 35), kann man deutlich zwischen funktionierenden und defekten Streifen unterscheiden. Ohne Laser sind nur sehr wenige Streifen zu sehen, bei denen eine große Signalhöhe mit geringer Multiplizität gemessen wurde.

Bemerkenswert ist, daß der Laser bei Hybrid 12 auch bei den ungebondeten Streifen eine Veränderung bewirkte. Es handelte sich hier um ein Übersprechen benachbarter APC-Kanäle. Abbildung 36 zeigt eine Korrelation der Pulshöhe ungebondeter Kanäle mit der Pulshöhe vorangehender und nachfolgender, gebondeter Kanäle. Es zeigt sich, daß die vorangehenden Kanäle ein Übersprechen zeigen. Bei den anderen Hybriden des Moduls konnte dieses Phänomen nicht beobachtet werden.

Die Abbildungen 37 und 38 zeigen die Laser- und Rauschmessungen an den gebon-

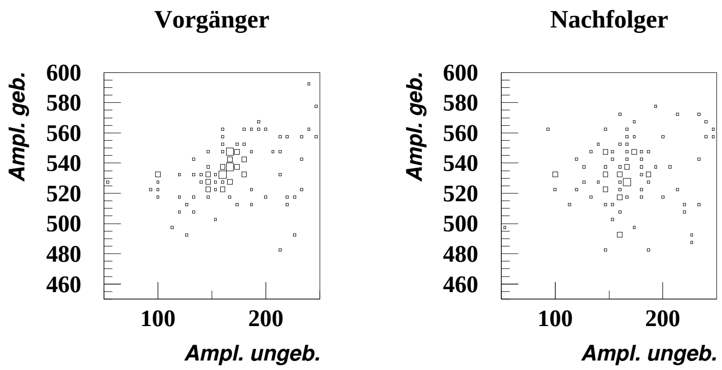

Abbildung 36: *Übersprechen des gebondeten Nachbarkanals auf den ungebondeten. Dargestellt ist die Pulshöhe gebondeter Kanäle gegen die Pulshöhe ungebondeter. Links: Der Vorgänger zeigt Übersprechen. Rechts: Beim nachfolgenden, gebondeten Kanal ist kein Übersprechen zu erkennen.*

deten Streifen von Modul 2. Auf der n-Seite ist deutlich der Einfluß des Lasers durch niedrige Multiplizität und hohe Signale zu erkennen. Auf der p-Seite ist dies schwieriger, aber nicht unmöglich. Hier ist zum einen die gemessene Signalhöhe des Lasers geringer, zum anderen zeigt die Rauschmessung insbesondere bei Hybrid 2 viele Kanäle mit niedriger Multiplizität und großer Signalhöhe, die fehlidentifiziert würden.

Zur Bestimmung der Anzahl der funktionierenden Streifen wurden folgende Kriterien verlangt, die durch Linien in den beiden zugehörigen Abbildungen illustriert werden:

1. **alle Hybride:** Eine Multiplizität von mindestens eins und maximal acht.
2. **n-Seite:** Eine Signalhöhe von mindestens 250 und maximal 800 ADC-Kanälen.
3. **p-Seite:** Eine Signalhöhe von mindestens 50 und maximal 500 ADC-Kanälen.

Die Ergebnisse für die Laser- und Rauschmessungen sind in Tabelle 8 zusammengefaßt. Insgesamt wurden auf der n-Seite 90,8% und auf der p-Seite 63,7% funktionierende Kanäle gemessen. Sowohl bei der Lasermessung als auch bei der Kalibrations- und Rauschmessung zeigte sich, daß die p-Seite, mit der der Detektor auf den Modulträger geklebt wurde, die Seite ist, bei der mehr Kanäle einen Defekt zeigen.

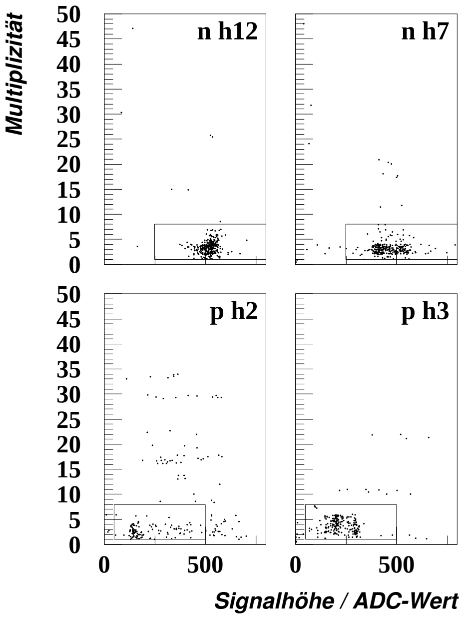

Abbildung 37: *Lasertest an allen Hybriden von Modul 2. Gezeigt sind die Meßergebnisse der gebondeten Streifen. Die Linien kennzeichnen die Schnitte zur Bestimmung der Anzahl der funktionierenden Streifen.*

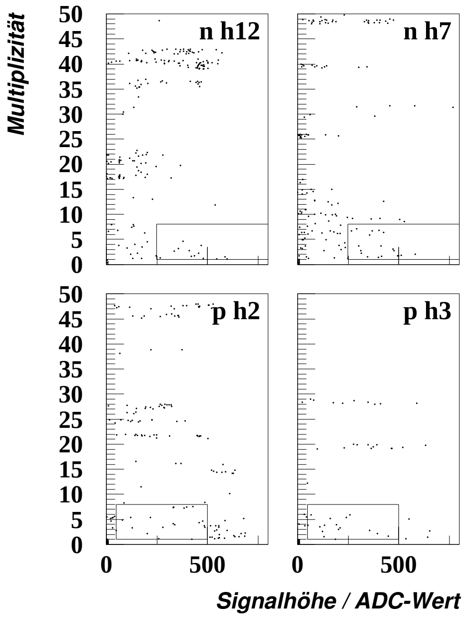

Abbildung 38: *Rauschmessung an allen Hybriden von Modul 2. Gezeigt sind die Ergebnisse der gebondeten Streifen. Die Linien kennzeichnen die Schnitte zur Bestimmung der Anzahl der fehlidentifizierten Streifen.*

	Anteil der Kanäle in %	
Hybrid	Laser	Rauschen
n, h7	95, 3	4, 1
n, h12	86, 3	6, 3
p, h2	42, 6	7, 8
p, h3	84, 8	5, 6

Tabelle 8: *Anteil der innerhalb der Schnitte liegenden Kanäle der Hybride von Modul 2 für die in Abbildung 37 gezeigte Lasermessung und die in Abbildung 38 gezeigte Rauschmessung.*

6 Messungen an eingebauten Prototypmodulen

Nach dem Einbau der Prototypmodule in das Experiment in Hamburg, mußten die Module wieder auf ihre Funktionstüchtigkeit hin überfprüft werden. Dazu war ursprünglich eine Prototypversion der HERA-*B* Datenaquisition vorgesehen, die aber noch nicht zur Verfügung stand.

Die Datenaquisition des Teststands hatte sich jedoch bewährt und war flexibel genug, sie an die Verhältnisse in Hamburg anzupassen, so daß sie in Hamburg aufgebaut werden konnte und für die Kalibrations- und Rauschmessungen verwendet werden konnte. Sie wurde auch zur Abschätzung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses benutzt.

Die Datenerfassung wurde so erweitert, daß mit ihr in Zukunft drei Module gleichzeitig während des Strahlbetriebs ausgelesen werden können.

6.1 Beschreibung des Aufbaus

Der Meßaufbau und die Elektronik sind im wesentlichen mit dem in Abschnitt 5 beschriebenen Aufbau identisch. Der Mustergenerator, die Spannungsversorgung und die SIROCCOS befinden sich im Kontrollraum. Der wichtigste Unterschied zum Laboraufbau besteht darin, daß die Übertragung aller Signale über die Strecke von etwa 50 m vom Kontrollraum bis zum Experiment mit Hilfe von Glasfaserkabeln realisiert ist. Die Aufgabe der Verteilung der Spannungen und der digitalen Steuersignale an die verschiedenen Module übernehmen sogenannte Detektorkontrollmodule am Experiment.

Die analoge Ausgabe der APCs durchläuft zunächst eine Treiberstufe und wird dann von den Detektorkontrollmodulen in optische Signale umgewandelt. Diese werden über Glasfaserkabel zu den SIROCCOS im Kontrollraum geleitet.

6.2 Kalibrations- und Rauschmessungen

Wie in Abschnitt 5.6 werden hier Messungen an Modul 2 beschrieben. Das Modul wurde mit einer Detektorspannung von 100 V bei einer Temperatur von etwa 0° im Vakuum betrieben. Die Spannung zwischen Spannungsring und Auslesestreifen betrug auf beiden Seiten des Detektors 0 V. Es wurden 100 Ereignisse von APC-Zelle 2 aufgenommen. Hatten mehr als 100 APC-Kanäle den ADC-Wert 0, wurde solch ein Ereignis durch einen Filter ausselektiert. Bis zu 12% der aufgenommenen Ereignisse zeigten diese untypische Topologie.

Es wurde auch hier wieder die Korrektur auf eine gemeinsame Basisverschiebung angewandt. Abbildung 39 zeigt, daß diese Korrektur die gemessenen Rauschwerte zwar insgesamt verringert, aber auch das gemessene Rauschen gebondeter und ungebondeter Kanäle angleicht. Es ist daher zu erwarten, daß das tatsächliche Rauschen der einzelnen Kanäle noch geringer ist, als das hier angegebene.

Es wurde eine starke Abhängigkeit der Ausgangssignale von der Betriebsfrequenz der Elektronik beobachtet. Für die Messungen bei den Hybriden der n-Seite und bei Hybrid 2 der p-Seite wurde eine Frequenz von 23 MHz und für Hybrid 3 der p-Seite

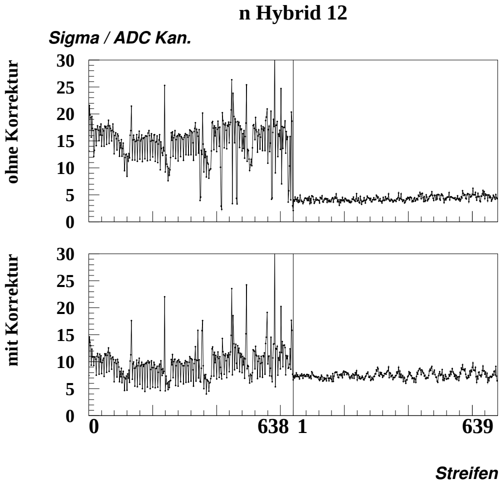

Abbildung 39: *Auswirkung der Korrektur einer gemeinsamen Basisverschiebung auf die Rauschmessung. Die gleichen Ereignisse wurden einmal ohne Korrektur (oben) und einmal mit Korrektur (unten) analysiert.*

eine Frequenz von 20 MHz gewählt. Ein Abweichen von diesen Frequenzen führte im Extremfall zum Verschwinden des Signals. Der Grund für diese Freuqeunzabhängigkeit wird derzeit noch untersucht.

Abbildung 40 zeigt die nullpunktskorrigierten Ergebnisse der Kalibrationsmessung und Abbildung 41 die Ergebnisse der dazugehörigen Rauschmessung. Die Ursache der unterschiedlichen absoluten Pulshöhen waren Unterschiede bei den Optokopplern der Übertragungskanäle.

Auf der n-Seite zeigten fast alle gebondeten und ungebondeten Kanäle das Kalibrationssignal. Im Vergleich zu den gebondeten Kanälen wurde bei den ungebondeten die doppelte Höhe des Kalibrationssignals gemessen. Auf der p-Seite dagegen war nur bei ca 30% der Kanäle von Hybrid 2 das Kalibrationssignal zu erkennen. Bei Hybrid 3 konnte dieses praktisch überhaupt nicht gemessen werden. Bei den funktionierenden Kanälen von Hybrid 2 war das Kalibrationssignal der ungebondeten Kanäle etwa das 6-fache des Signals der gebondeten Kanäle.

Das gemessene Rauschen war gegenüber der Labormessung geringer. Eine mögliche Ursache ist die Verwendung des Filters. Bei Hybrid 2 ist zu erkennen, daß die funktionierenden gebondeten Kanäle ein höheres Rauschen zeigten als die ungebondeten. Dies wurde bereits in Abschnitt 5.3 besprochen. Sie zeigten aber auch ein höheres Rauschen als die defekten Kanäle des gleichen Hybriden.

Insgesamt verhielt sich das Modul sehr ähnlich wie bei den Labortests, obwohl die experimentelle Umgebung einige zusätzliche Probleme erzeugte.

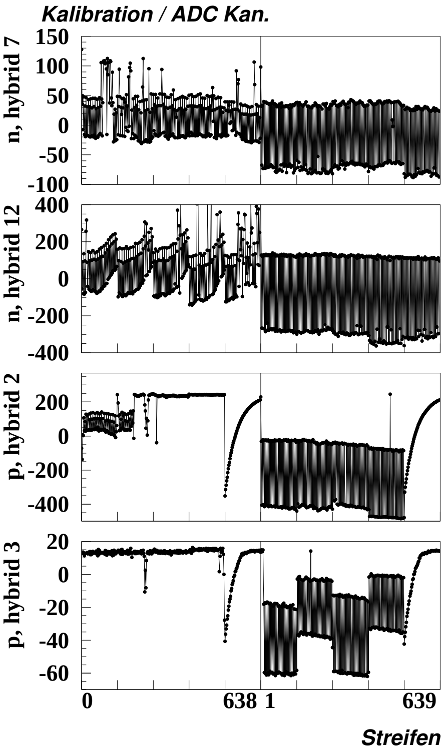

Abbildung 40: *Kalibrationsmessung von APC-Zelle 2 von Modul 2 am Experiment.*

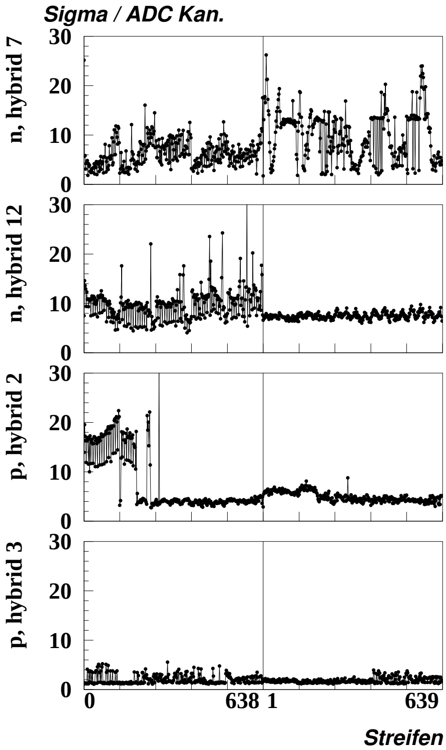

Abbildung 41: *Rauschmessung von APC-Zelle 2 von Modul 2 am Experiment.*

	Kalibration		σ		S/N	
Hybrid	gb	ungb	gb	ungb	gb	ungb
n, h7	55	105	6	8	9,2	13,1
n, h12	200	425	9	8	22,2	53,1
p, h2	80	380	15	4	5,3	95
p, h3	1-4	40	1	1	1-4	40

Tabelle 9: *Kalibration und Rauschen von APC-Zelle 2 von Modul 2. Die angegebenen Signal-zu-Rausch-Verhältnisse (S/N) beziehen sich auf das Kalibrationssignal von etwa zwei minimalionisierenden Teilchen. Die Höhe von Kalibration und Rauschen ist in ADC-Werten angegeben.*

6.3 Weiterer Aufbau in Hamburg

Obwohl der Transfer des Testsystems ausgesprochen erfolgreich war, ist nicht geplant, es in Zukunft zu erweitern. Der Aufbau verlangt pro Modul den Einsatz von vier SIROCCOS und ist damit recht aufwendig. Das System ist auch nicht geeignet, die Datenmengen, so wie dies später erforderlich ist, zu verarbeiten. Für die Datennahme wird es 1997 von der HERA-*B* Datenaquisition abgelöst werden. Als Testsystem wird es zum Test einzelner Module bestehen bleiben.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Arbeit war es, einen Teststand aufzubauen, mit dessen Hilfe die Module des Siliziumvertexdetektors für den HERA-B Detektor auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft werden können.

Um Erfahrungen zu sammeln und die nötigen Betriebsparameter zu bestimmen, wurden vorbereitende Messungen an Testdetektoren durchgeführt. Der resultierende Aufbau war geeignet, die ersten Prototypmodule zu untersuchen und ihre Funktionsfähigkeit zu bestätigen. Eine weitere Automatisierung des Auslesesystems ist möglich.

Der Ansatz, einen Laser zur Untersuchung von Detektoren einzusetzen, war sehr erfolgreich. Sowohl die Bestimmung der vollen Verarmungsspannung als auch die Untersuchung der Funktionsfähigkeit einzelner Streifen ist schnell und effektiv durchzuführen.

Der Teststand ist damit geeignet, die Module vor ihrem Einbau in den Gesamtdetektor zu überprüfen. Auch zur Bestimmung von Folgen von Strahlenschäden, insbesondere bei inhomogener Bestrahlung, kann der Teststand in Zukunft eingesetzt werden. Die Möglichkeit der genauen Steuerung des Lasers ermöglicht insbesondere die Untersuchung lokaler Phänomene, die z. B. durch inhomogene Bestrahlung auftreten können.

	Diodenlaser	Farbstofflaser
Wellenlänge	813 nm	600 - 1050 nm
Eindringtiefe in Si	15 μm	2,1 μm- 625 μm
Maximale Pulsrate	40 kHz	10 Hz
Pulslänge	$\mathcal{O}(\mu s)$	< 500 ps
Energie	0,5 mW im Dauerbetrieb	400 μJ pro Puls
Anstiegszeit	1 μs	-
Modulationstiefe	90 %	100 %
Typ	Diodenlaser	Stickstofflaser gepumpter Farbstofflaser
	an Faser angekoppelt	freier Strahl

Tabelle 10: *Vergleich der Spezifikationen der beiden Lasersysteme.*

Weitere Möglichkeiten bestehen bei einer Verbesserung des Aufbaus durch die Verwendung eines Lasers, der in der Lage ist, ein minimalionisierendes Teilchen zu simulieren. Die Eindringtiefe eines Lasers in Silizium ist abhängig von seiner Wellenlänge. Im Falle des verwendeten Diodenlasers beträgt sie 15 μm[30] [19]. Vergrößert man die Wellenlänge, so steigt die Eindringtiefe an, bis das Silizium bei einer Wellenlänge von ungefähr 1060 nm durchsichtig wird. Wenn man mit einem Laser ein minimalionisierendes Teilchen simulieren will, sollte man also in diesem Wellenlängenbereich arbeiten. In diesem Wellenlängenbereich ist jedoch kein preisgünstiger Laser verfügbar.

[30] Abfall auf $1/e$ der Anfangsintensität.

Eine Verbesserung des Aufbaus ist die Verwendung eines Farbstofflasers, der von einem Stickstofflaser gepumpt wird. Mit diesem System ist es möglich, sehr kurze Laserpulse zu erzeugen und die Wellenlänge, mit der der Laser arbeitet, zu variieren. Ein Nachteil dieses Systems ist die geringe Repetitionsrate von 10 Hz, mit der der Laser maximal betrieben werden kann. In Tabelle 10 sind die Spezifikationen beider Systeme einander gegenübergestellt.

Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mir bei der Durchrührung der Diplomarbeit geholfen haben.

Mein Dank gilt vor allem Frau Dr. Iris Abt, sowohl für die umfassende Betreuung und ihre Diskussionsbereitschaft, als auch für die freundliche Aufnahme in die Gruppe und die immer angenehme Arbeitsatmosphäre. Bei Dr. Richard St. Denis möchte ich mich für die gewährte Hilfe und Freundschaft bedanken. Ich habe viel von ihm über die Arbeit eines Physikers gelernt.

Herr Prof. Dr. R. Santo hat mir erst diese auswärtige Diplomarbeit ermöglicht. Dafür möchte ich mich herzlich bei ihm bedanken. Herrn Prof. Dr. N. Schmitz danke ich dafür, daß er die Begutachtung meiner Arbeit vor Ort in München vorgenommen hat.

Für die vielen Hinweise und Diskussionen und die Zusammenarbeit danke ich auch allen anderen Mitgliedern der HERA-*B* Gruppe und Angehörigen des Max-Planck-Instituts in München: Ladislav Andriček, Dr. Gerardo Ganis, Katja Harwat, Basil Moshous, Rainer Richter, Kirsten Riechmann, Dr. Michael Rietz, Ralf Rübsam, Dr. Henry Seywerd und Dr. Georg Wolf. Ich möchte mich auch bei meinen Kollegen der HERA-*B* Gruppe in Heidelberg bedanken. Hervorheben möchte ich hier Dr. Christian Bauer.

Literatur

[1] T. Lohse et al.: An Experiment to Study CP Violation in the B System Using an Internal Target at the HERA Proton Ring, Proposal, DESY-PRC 94/02, Mai 1994

[2] E. Hartouni et al.: An Experiment to Study CP Violation in the B System Using an Internal Target at the HERA Proton Ring, Design Report, DESY-PRC 95/01, Januar 1995

[3] An Asymmetric B Factory Based on PEP: Conceptual Design Report, SLAC-0372

[4] Physics and Detector of asymmetric B Factory at KEK, KEK-90-23

[5] Y. Nir, H. R. Quinn: CP Violation in B Physics, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 1992, 42: 211-250
B. Winstein, L. Wolfenstein: The search for direct CP violation, Rev. of Mod. Phys, Vol. 65, No. 4, Oktober 1993
A. J. Buras: CP Violation: Present and Future, MPI-PhT/94-30
J. L. Rosner: The CKM Matrix and B Physics, J. Phys. G18: 1575-1592, 1992

[6] B. Kayser: CP Violation and Quantum Mechanics in the B System, Preprint hep-ph/9509386, Moriond 1995: Electroweak: 373-388 (QCD161: R4: 1995: V.1)

[7] Particle Data Group: Physical Review D50, 1173 (1994)

[8] A. Rost: Grundlagen der Elektronik, 3. Auflage, Akademie Verlag, Berlin.

[9] Bergmann, Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 6, Walter de Gruyter, Berlin 1992

[10] K. Kleinknecht: Detektoren für Teilchenstrahlung, Teubner Studienbücher

[11] M. Caccia et al.: A Si Strip Detector with integrated coupling capacitors, Nuclear Instruments and Methods, A260 (1987) 124

[12] D. Hauff et al.: A Double-Sided Silicon Strip Detector with Capacitive Readout and a New Method of Integrated Bias Coupling, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 36, No. 1, 1988, S. 251

[13] A. Bischoff et al.: Breakdown protection and long-term stabilisation for Si-detectors, Nuclear Instruments and Methods, A326 (1993) 27-37

[14] K. Riechmann: Strahlenschäden durch Protonen und Pionen an Halbleiter-Detektoren, Diplomarbeit am MPI für Kernphysik, Heidelberg

[15] R. Rübsam: Untersuchung von doppelseitigen Silizium-Streifendetektoren mit neuartiger Schutzringstruktur, Diplomarbeit an der TU München

[16] I. Abt et al.: Irradiation Tests of Double-Sided Silicon Strip Detectors with a Special Guard Ring Structure, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 43, No 3, June 1996, 1113-1118

[17] E. Belau et al.: Silicon Strip Detectors with capacitive Charge Division, Nuclear Instruments and Methods, A235(1985), 481

[18] R. Richter, persönliche Mitteilung.

[19] Properties of Silicon, EMIS Data Reviews No. 4

[20] W. D. Peterson: The VMEbus Handbook, 3. Auflage, VFEA International Trade Association, Scottsdale, USA

[21] W. R. Leo: Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer-Verlag, Berlin

[22] R. Horisberger, D. Pitzl: A novel readout chip for silicon strip detectors with analog pipeline and digitally controlled analog signal processing, Nuclear Instruments and Methods A326 (1993) 92

[23] R. Horisberger, persönliche Mitteilung

[24] C. Bauer et al.: June 1996 Status Report Based on Prliminary Tests of the HERA-B Silicon Detectors for 1996, zur Veröffentlichung als HERA-B Note vorgesehen

Index