

Technische Universität Chemnitz-Zwickau
Fachbereich Physik

f. Jüger

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

DIPLOMPHYSIKER

(Dipl.-Phys.)

mit dem Thema:

**Untersuchung von Siliziumdetektoren für den 'Backward
Silicon Tracker' beim HERA Experiment H1**

vorgelegt von: Kerstin Stolze

geb. am: 17. 12. 1969 in Königs Wusterhausen

betreuender Hochschullehrer: Prof. Dr. P. Häussler

fachliche Betreuer: Dr. sc. nat. M. Klein, Dr. W. Lange

angefertigt im: DESY-Institut für Hochenergiephysik Zeuthen

eingereicht am: 03. 12. 1993

INHALT

1 Problemstellung	3
2 Einführung	6
2.1 HERA/H1	6
2.2 Halbleiterdetektoren - Grundlagen	9
2.2.1 Silizium als Detektormaterial	11
2.2.2 Arbeitsprinzip von Halbleiterdetektoren	12
2.3 Backward Silicon Tracker (BST-1)	16
2.3.1 Gesamtkonzept	16
2.3.2 r-strip-Detektoren	18
2.3.3 pad-Detektoren	21
3 Test der strip-Detektoren	26
3.1 Statische Messungen	26
3.2 Dynamische Messungen	31
3.2.1 Ausleseelektronik (Auslesechip APC)	31
3.2.2 Software	32
3.2.3 Experimenteller Aufbau	35
3.3 Aufnahme und Auswertung der Daten	37
3.3.1 Ladungseinkopplung über die Detektorrückseite	37
3.3.2 Laserpulse	41
4 Test der pad-Detektoren	46
4.1 Statische Messungen	46
4.2 Dynamische Messungen	51
4.2.1 Ausleseelektronik (Auslesechip PRC)	51
4.2.2 Experimenteller Aufbau	51
4.3 Datennahme - Test im Teilchenstrahl	53
4.4 Auswertung der dynamischen Messungen	53

Zusammenfassung - Thesen zur Diplomarbeit	60
Literaturverzeichnis	62
Anhang 1	64
Anhang 2	65

1 PROBLEMSTELLUNG

Die Grundlagenforschung mit Hilfe der Hochenergiephysik hat in den letzten Jahrzehnten große Bedeutung erlangt und durch den Bau leistungsstarker Beschleunigeranlagen einen gewaltigen Aufschwung genommen.

Eine dieser Anlagen ist HERA, die 1991 fertiggestellt und 1992 in Betrieb genommene Hadron-Elektron-Ring-Anlage (Abb. 1) des Deutschen Elektronen Synchrotrons (DESY) in Hamburg. Hier werden auf einem Umfang von 6,3 km Teilchenpakete von Elektronen und Protonen gespeichert und zur Kollision gebracht. Diese Kollisionen erfolgen an zwei Stellen des Speicherrings, an denen sich die Detektoren ZEUS und H1 befinden, um die stattfindenden Ereignisse zu registrieren und auszuwerten.

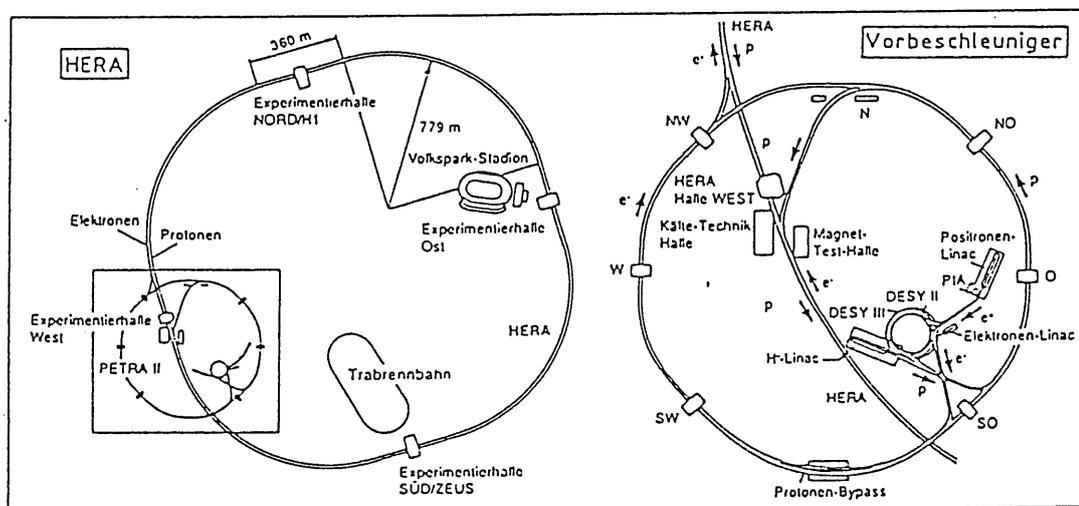


Abb. 1: Beschleunigerringe HERA und PETRA, in der Nordhalle des HERA-Rings befindet sich das H1-Experiment.

An der Nordseite des Ringes befindet sich der H1-Detektor, dessen Gesamtansicht in Abb. 2 dargestellt ist. Mit ihm werden die Photoproduktion sowie Probleme der tiefinelastischen Physik untersucht, wobei mit HERA etwa die 10-fache Schwerpunktsenergie im Vergleich zu früheren Lepton-Hadron-Experimenten an festen Targets zur Verfügung steht. Erste Ergebnisse der ersten Run-Periode im Sommer 1992 wurden im Februar 1993 publiziert /1/.

Es ist vorgesehen, den H1-Detektor im Jahr 1995 um zwei hochauflösende Ortsdetektoren im hinteren, strahlennahen Bereich zu erweitern. Die Genauigkeit der Untersuchungen wird dadurch stark verbessert und der Meßbereich erweitert.

Als hochauflösende Ortsdetektoren haben sich in den letzten Jahren besonders Siliziumdetektoren bewährt. Durch Anwendung der Planartechnologie läßt sich die Oberfläche nach Wunsch strukturieren. Mit Silizium-Streifendetektoren wird ein räumliches Auflösungsvermögen $< 10 \mu\text{m}$ erreicht, (bei einem minimalen Detektorvolumen, da die typischen Detektordicken zwischen 250 und 500 μm variieren).

Die neuen Silizium-Ortsdetektoren für H1 werden sich direkt am Strahlrohr, im zentralen und rückwärtigen Bereich, befinden. Der 'Central Silicon Tracker' (CST) dient der Untersuchung schwerer Quarks (c, b). Dazu verbessert der CST die Spurauflösung und die Vertexrekonstruktion im zentralen Bereich. Der 'Backward Silicon Tracker' (BST) dient dem Studium tiefinelastischer e-p-Streuung bei sehr kleinen Bjorken x. Dazu sind Elektronen nachzuweisen, die unter sehr flachem Winkel in Bezug auf die Flugrichtung des Elektronenstrahls gestreut werden.

Gegenstand dieser Arbeit sind Untersuchungen an Prototypen von Siliziumdetektoren, die in der ersten Phase des BST (BST-1) zur Anwendung kommen. Der BST-1 mit vier Detektorebenen soll 1995 fertiggestellt werden, die zweite Phase mit acht Ebenen (BST-2) wird später folgen.

Um mit dem BST die genaue Spur der Teilchen bestimmen zu können, werden im Abstand von 280 mm bis 860 mm vom Wechselwirkungspunkt in Rückwärtsrichtung* vier bzw. acht scheibenförmige Siliziumdetektoren konzentrisch um das Strahlrohr angeordnet. Diese Silizium-Scheiben oder -Ringe stehen senkrecht zum Teilchenstrahl und haben einen inneren sensitiven Radius von 59.0 mm und einen äußeren sensitiven Radius von 120.4 mm. Ein Silizium-Ring besteht aus 16 azimuthalen Sektoren bzw. Einzeldetektoren. Weiterhin setzt sich ein Silizium-Ring aus drei verschiedenen Silizium-Schichten zusammen /2/:

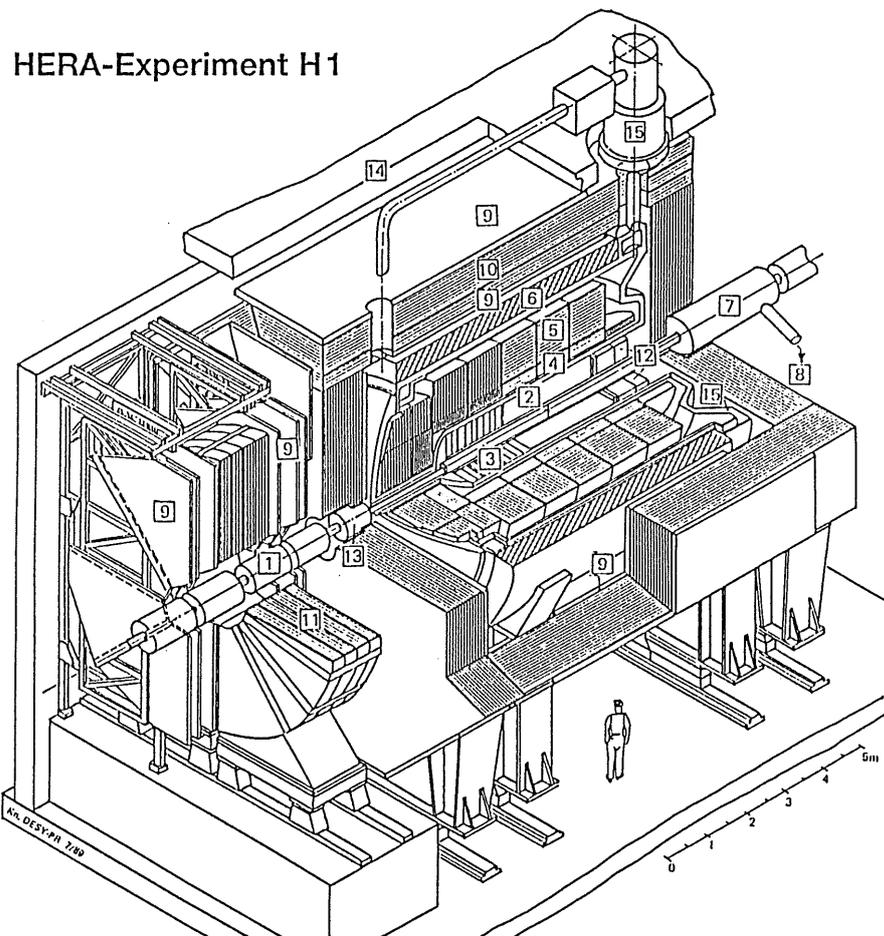
1. Siliziumdetektoren mit Flächensegmentierung (pad-Detektoren):
 - als neuer 'first level' (L1)-Trigger,
2. Siliziumdetektoren mit Streifen konzentrisch zum Strahl (r-strip-Detektoren):
 - zur Messung des Polarwinkels θ der Elektronen,
3. Siliziumdetektoren mit Streifen mit konstanten azimuthalen Winkeln (ϕ -strip-Detektoren):
 - zur Messung des Winkels ϕ , der seinerseits zur Bestimmung des Transversalimpulses von Hadronen und Elektronen dient. Diese Detektoren kommen erst in der zweiten BST-Phase zum Einsatz.

* Diese Festlegung bezieht sich auf die Flugrichtung der Protonen:
vorwärts = Protonenflugrichtung

Im einführenden Kapitel werden kurz die Rahmenbedingungen des H1-Experiments sowie das Gesamtkonzept des BST dargestellt. Ebenfalls wird auf den Aufbau und das Arbeitsprinzip der Siliziumdetektoren, die den BST bilden, näher eingegangen. Die nachfolgenden Kapitel befassen sich mit den Messungen der Prototypen dieser Detektoren und der Auswertung der Meßergebnisse.

Die Messungen an Prototypen der pad- und strip-Detektoren wurden sowohl statisch (an einem Spitzenmeßplatz - 'probe station') als auch angeschlossen an die neuentwickelte Ausleselektronik (= dynamisch) durchgeführt.

Die Auswertung erfolgte mit einem speziell geschriebenen FORTRAN-Programm, welches das in der H1-Kollaboration verbreitete Datenanalyse-system 'Look' benutzt.



1: Strahlrohr und Strahlmagnete, 2: Zentrale Spurenkammern, 3: Vorwärtsspurenkammern und Übergangsstrahlungsmodul, 4: Elektromagnetisches Kalorimeter (Blei), 5: Hadronisches Kalorimeter (Edelstahl), (4 und 5: Flüssig Argon), 6: Supraleitende Spule (1,2 T), 7: Kompensationsmagnet, 8: Helium-Kälteanlage, 9: Myon-Kammern, 10: Instrumentiertes Eisen, 11: Myon-Toroid-Magnet, 12: warmes elektromagnetisches Kalorimeter, 13: Vorwärts-Kalorimeter, 14: Betonabschirmung, 15: Flüssig-Argon-Kryostat. Abmessungen: 12 m x 10 m x 15 m; Gesamtgewicht 2800 Tonnen.

Abb. 2: Gesamtansicht des H1-Detektors. [3]

2 EINFÜHRUNG

2.1 HERA/H1

An der Hadron-Elektron-Ring-Anlage (HERA) des DESY Hamburg werden Protonen bis zu 820 GeV und Elektronen bis zu 30 GeV in übereinanderliegenden Ringen entgegengesetzt beschleunigt. An vier Wechselwirkungspunkten werden die Protonen- und Elektronen-Pakete ('bunches') aufeinandergeschossen; dabei ergibt sich eine Schwerpunktsenergie von maximal 314 GeV.

Am nördlichen Wechselwirkungspunkt wurde das Experiment H1 aufgebaut. Diese komplexe Detektoranlage besteht aus einer Vielzahl von Komponenten, die die Rekonstruktion und Analyse der bei den Kollisionen stattfindenden Ereignisse ermöglichen.

Eine Gesamtansicht des H1-Detektors zeigte Abb. 2. Im inneren Bereich sind mehrere zylindrische ('central tracking' (2)) bzw. planare ('forward tracking' (3)) Proportional- und Driftkammern angeordnet. Sie dienen zur Vertex- und Spurrekonstruktion. Aus der Krümmung der Spuren im Magnetfeld der supraleitenden Spule (6) werden Impulse und Ladung der Teilchen bestimmt. Die Energie der Teilchen wird in verschiedenen Kalorimetern (4, 5, 12, 13) gemessen. Ein Eisenjoch, das zur Rückführung des magnetischen Flusses der Spule dient, umschließt diesen Komplex. In ihm sind Plastik-Streamerröhren (10) und Myonkammern (9) zum Nachweis von Ausläufern hadronischer Schauer und zur Identifizierung und Impulsbestimmung hochenergetischer Myonen enthalten.

Zur genaueren Vertexbestimmung und Untersuchung von tiefinelastischer Streuung sind noch zwei weitere Detektorkomponenten direkt am Strahlrohr (1) geplant. Die neuen Detektoren bestehen aus Silizium als aktivem Medium und werden als Ortsdetektoren eingesetzt; im Zentralbereich der CST ('Central Silicon Tracker') zur Vertexrekonstruktion und im Rückwärtsbereich der BST ('Backward Silicon Tracker') zur Untersuchung von Ereignissen mit kleinem Bjorken x und großem Impulsübertrag Q^2 bei tiefinelastischen Streuprozessen. Das Strahlrohr wird zu diesem Zweck im Durchmesser verkleinert, von derzeit ca. 20 cm auf 9,4 cm.

Der Grund wird aus Abb. 3 ersichtlich. Bei der Wechselwirkung von Elektronen und Protonen entstehen aus dem angeregten Proton Quark- und Gluonjets, die sich aufgrund des großen Impulses (relativ zum Elektron) in Vorwärtsrichtung weiterbewegen. Das am Parton schwach gestreute Elektron

Wechselwirkungen auch Kollimatoren zur Abschirmung der Synchrotronstrahlung eingesetzt (Abb. 4).

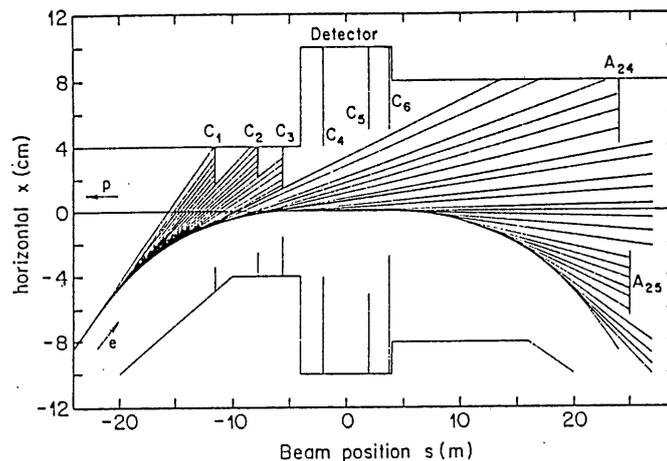


Abb. 4: Anordnung von Kollimatoren zum Schutz des H1-Detektors vor direkter Synchrotronstrahlung. [12/]

Nahe der Strahlachse ist die Dosis besonders hoch, weshalb die Strahlenresistenz der neuen Detektoren und ihrer Ausleseelektronik möglichst groß sein soll. Untersuchungen zur Strahlenbelastung am H1-Detektor wurden 1992 u. a. von R. Wunstorf /4/ und J. Ewert /5/ vorgenommen. In einer mehrtägigen Messung im Oktober 1993 wurde mit Siliziumdetektoren die Strahlenbelastung gemessen. Extrapoliert man diese Ereignisse bezüglich der erwarteten Luminosität, dann sollte die Strahlenbelastung bei etwa 100 rad/y liegen /37/. Von D. Pitzl /13/ wurde die Gesamtstrahlenbelastung bei voller Luminosität auf ≤ 1 krad/y abgeschätzt.

Die Strahlenschädigung von Siliziumdetektoren und der zugehörigen Ausleseelektronik wurde bei wechselnden Parametern untersucht, nähere Informationen sind den Arbeiten /6/ ... /11/, /20/ zu entnehmen. Die für das H1-Experiment vorgesehenen Siliziumdetektoren und ihre Ausleseelektronik wurden mit einer Co^{60} -Quelle auf ihre Strahlenresistenz geprüft. Die Siliziumdetektoren tolerieren eine Gesamtdosis von einigen Mrad, die Auslesechips waren bis zu einer Gesamtdosis von 240 krad funktionsfähig. Für eine angestrebte Lebensdauer von zehn Jahren sollte die gesamte Strahlenbelastung deshalb 15 krad pro Jahr nicht überschreiten /2/.

Wie sich aus den erwähnten Abschätzungen ergibt, wird das Problem bei HERA nicht im normalen Strahlbetrieb sondern in Strahlverlusten und deren zuverlässiger Vermeidung liegen.

2.2 Halbleiterdetektoren - Grundlagen

Halbleiterdetektoren werden schon seit längerer Zeit in der Hochenergie- und Kernphysik zum Nachweis ionisierender Strahlung eingesetzt /15/. Als Grundmaterial dienen hauptsächlich Silizium, aber auch Germanium und Gallium-Arsenid. Übliche Detektorstrukturen sind: p-n-Übergang, p-i-n-Struktur oder die Oberflächensperrschicht.

Wichtige Eigenschaften von Halbleiterdetektoren sind:

- Energieproportionalität: Wird ein ionisierendes Teilchen im Detektormedium vollständig absorbiert, entspricht die Anzahl von erzeugten Ladungsträgerpaaren der Teilchenenergie (Spektrometrie). Beim Durchgang eines Teilchens durch den Detektor sind die gemessenen Impulshöhen ein Maß für den differentiellen Energieverlust pro im Material zurückgelegter Wegstrecke (dE/dx). Der durch Ionisation verursachte Energieverlust schwerer geladener Teilchen mit Massen $m > m_e$ wird durch die Bethe-Bloch-Formel beschrieben /15/:

$$-\frac{dE}{dx} = \left(\frac{4\pi N_A z^2 e^4}{m_e v^2} \frac{Z}{A} \right) \left\{ \ln \left[\frac{2m_e v^2}{I(1-\beta^2)} \right] - \beta^2 \right\} \quad (2.1)$$

mit:	E	: mittlerer Energieverlust des Teilchens
	x	: im Medium zurückgelegter Weg
	m_e	: Elektronenmasse
	N_A	: Avogadrokonstante
	Z	: Ordnungszahl des Detektormediums
	A	: Massenzahl des Detektormediums
	I	: effektives Ionisationspotential des Detektormediums (Si: I=172 eV /16/)
	z	: Ladung des Teilchens
	$v = \beta c$: Geschwindigkeit des Teilchens

Die wichtigste Aussage der Bethe-Bloch-Formel ist die Unabhängigkeit des Ionisationsverlustes von der Teilchenmasse, d. h. bei gleicher Ladung spielt nur die Geschwindigkeit eine Rolle.

- Energieauflösung: Sie wird charakterisiert durch die Halbwertsbreite $(\Delta E)_{\text{HWB}}$ der Impulshöhenverteilung, die eine monoenergetische Strahlung

definierter Energie liefert. Beeinflussungen erfolgen durch: Schwankungen der Anzahl der erzeugten Ladungsträgerpaare, Schwankungen der Effektivität der Ladungsträgersammlung, Detektorrauschen, Verstärkerrauschen. Wegen der hohen Anzahl von Ladungsträgerpaaren/Energie erreichen Halbleiterdetektoren eine sehr gute Energieauflösung $\Delta E/E$.

- Zeitauflösung: Die Ladungsträgersammlung erfolgt sehr schnell, damit können auch schnell aufeinanderfolgende Impulse getrennt werden.

- Nachweiseffektivität: Schwere geladene Teilchen werden schon in dünnen Kristallschichten vollständig absorbiert, die Effektivität ist ≈ 1 ; bei energiereicher Photonenstrahlung beträgt die Nachweiseffektivität etwa 10^{-3} ... 10^{-2} . /17/

- Nulleffekt: Durch das kleine aktive Volumen sind Halbleiterdetektoren nur in geringem Maße empfindlich gegenüber kosmischer und Umgebungsstrahlung.

- Lebensdauer: Sie ist bestimmt durch Strahlungsschäden von schnellen Neutronen, schweren geladenen Teilchen und Synchrotronstrahlung, sowie die Stabilität des Halbleitermaterials.

- Rauschen: Auch ohne ionisierende Strahlung fließt in dem in Sperrichtung betriebenen Detektor ein Strom, der z. B. durch thermisch erzeugte Ladungsträger oder Oberflächenverunreinigungen erzeugt wird.

Zur Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares in Silizium (Germanium) sind nur 3.6 eV (2.8 eV) notwendig, im Gegensatz zu Gasen, wo zwischen 20 ... 40 eV benötigt werden /18/. Somit ist die Anzahl an generierten Ladungsträgerpaaren größer und die statistischen Fluktuationen im Energieverlust sind geringer.

Die Technologien zur Herstellung und Bearbeitung hochreiner Halbleitermaterialien wurden u. a. durch den Bau hochintegrierter Schaltungen vorangetrieben. Die Anwendung der Planartechnologie verschafft vielfältige Möglichkeiten zur Segmentierung der Oberfläche des Halbleitersubstrats. Mittels photolithographischer Methoden ist man heute in der Lage, Strukturen mit μm -Genauigkeiten herzustellen, weshalb diese Detektoren meist als hochauflösende Ortsdetektoren eingesetzt werden.

Weitere Verwendung finden Halbleiterdetektoren als Nachweisschicht in Sampling-Kalorimetern, Pixel-Detektoren (CCD's) oder als Festkörperdriftkammern.

2.2.1 Silizium als Detektormaterial

Silizium ist heute das am häufigsten verwendete Material für Halbleiterdetektoren. Der Energieverlust ionisierender Strahlung beim Durchgang durch das Silizium wird durch den Energie- und Impulsübertrag mittels Photonen auf Elektronen und Gitter des Halbleiterkristalls hervorgerufen. Bei einer Energie ≥ 3.6 eV kann ein Elektron vom Valenz- ins Leitungsband angehoben werden. Die hohe Dichte des Mediums reduziert den energetischen Bereich der Sekundärelektronen, was zu einer guten räumlichen Auflösung führt. Der mittlere Energieverlust in Silizium beträgt etwa $390 \text{ eV}/\mu\text{m}$, das sind ungefähr 108 Elektronen/ μm .

Zur Minimierung der Coulombstreuung sollte die Detektordicke so klein wie möglich sein. Eine praktische Grenze wird durch die mechanische Stabilität und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (S/N)* gesetzt. Typische Detektordicken liegen bei $300 \mu\text{m}$. Bei senkrechtem Teilchendurchgang (minimal ionisierendes Teilchen MIP, Bethe-Bloch-Formel) werden im Mittel etwa 32000 Elektronenloch-Paare erzeugt. Dieses Signal kann mit rauscharmer Ausleseelektronik aufgezeichnet werden. /19/

Einige physikalische Eigenschaften von Silizium sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Einige physikalische Eigenschaften von Silizium bei Raumtemperatur: /19/

Ordnungszahl	14
Atomgewicht	28.08
Dichte	$2.33 \text{ g}/\text{cm}^3$
Dielektrizitätskonstante ϵ_r	11.7
Elektronenbeweglichkeit μ_n	$1350 \text{ cm}^2 / (\text{Vs})$
Löcherbeweglichkeit μ_p	$480 \text{ cm}^2 / (\text{Vs})$
Elektronendiffusionskonstante	$34.6 \text{ cm}^2 / \text{s}$
Löcherdiffusionskonstante	$12.3 \text{ cm}^2 / \text{s}$
mittlere Ladungsträgerlebensdauer	10^{-3} s

* S/N = Signal to Noise

2.2.2 Arbeitsprinzip von Halbleiterdetektoren

Der Nachweis von Teilchen oder Strahlung im Siliziumdetektor basiert auf der elektromagnetischen Wechselwirkung der einfallenden Teilchen mit dem Detektormedium. Dabei werden entlang der Spur paarweise entgegengesetzt geladene Ladungsträger (Elektron-Loch-Paare) erzeugt, s. Abb. 5.

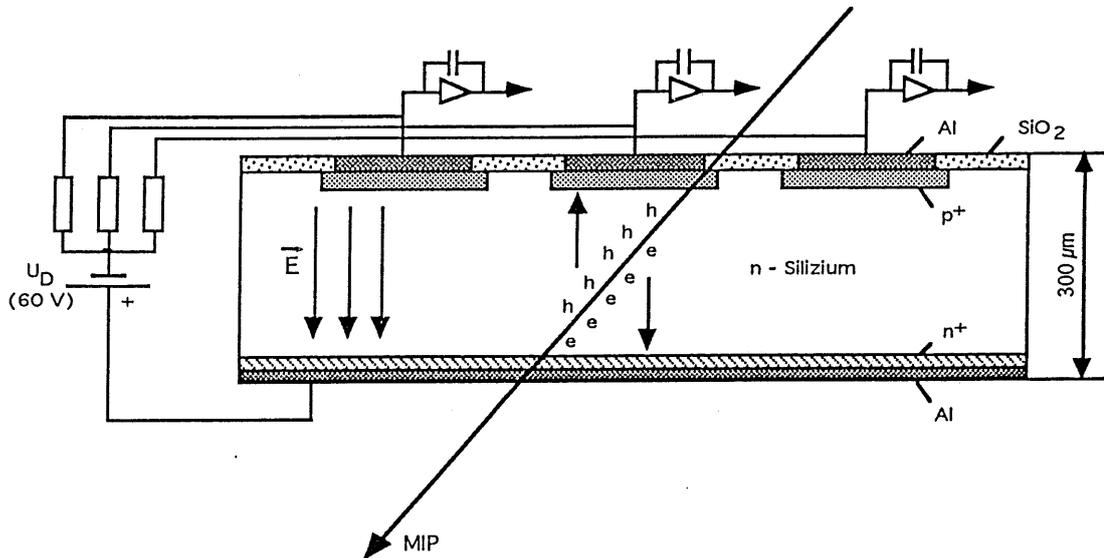


Abb. 5: Arbeitsprinzip eines in Sperrrichtung vorgespannten ('reverse biased') DC-gekoppelten Streifendetektors zum Teilchennachweis.

Bei der Stoßionisation können Anregungsenergien bis 20 keV auf die Kristallelektronen übertragen werden. Diese Energie wird allmählich abgegeben unter Erzeugung weiterer Elektron-Loch-Paare (Exzitonen) sowie Anregung von Gitterschwingungen (Phononen). Entlang der Teilchenbahn durch den Detektor bildet sich ein Plasmaschlauch mit hoher Elektron-Loch-Konzentration.

Eine Oberfläche des Detektors ist stark mit 3-wertigen Atomen (Bor) dotiert. An der Grenze dieser Schicht mit hoher Konzentration an positiven Ladungsträgern (p⁺-Schicht) und dem schwach n-dotierten Siliziumvolumen bildet sich ein p-n-Übergang. Um zu verhindern, daß die erzeugten Elektron-Loch-Paare sofort wieder rekombinieren, legt man eine äußere Sperrspannung an, die die Elektronen und Löcher trennt und zum jeweiligen Kontakt an der Oberfläche absaugt. Die Ladungssammlungszeit beträgt ca. 20 ns /16/. Die Sperrspannung bewirkt eine Ausdehnung der Verarmungs- oder Raumladungszone, die sich an dem p-n-Übergang ausbildet. Sie ist fast völlig frei von beweglichen Ladungsträgern, d. h. die Eigenleitung im Silizium und

damit auch das Rauschen aufgrund dieser Eigenleitung werden stark unterbunden.

Die räumliche Tiefe d der Verarmungszone hängt außer von der Sperrspannung von der jeweiligen Dotierungs- bzw. Ladungsträgerkonzentration ab. Bei einem n-typ Siliziumdetektor mit starker p-Dotierung auf einer Detektorseite ergibt sich für die Tiefe der Verarmungsschicht /20/:

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r U}{qn_D}} \quad (2.2)$$

mit d : Tiefe der Raumladungszone im n- bzw. p-dotierten Gebiet
 $\varepsilon_0\varepsilon_r$: Dielektrizitätskonstante von Silizium
 U : angelegte Sperrspannung
 n_D : Donatorkonzentration
 q : Betrag der Elektronenladung

Die Spannung, die nötig ist um das Substrat vollständig zu verarmen, erhält man durch Umstellen der Gleichung 2.2:

$$U = \frac{qn_D}{2\varepsilon_0\varepsilon_r} d_0^2 \quad (2.3)$$

mit d_0 : Substratdicke

Bei dieser Spannung wird der gesamte Detektorquerschnitt zum sensitiven Volumen. Bei einem Substratwiderstand von $5 \text{ k}\Omega \text{ cm}$ ist eine Spannung von ungefähr 60 V notwendig, um den Detektor vollständig zu verarmen. /21/

Weil der in Sperrichtung vorgespannte p-n-Übergang aus einer Isolationschicht (die Verarmungsschicht oder -zone) zwischen zwei leitenden Flächen (p^+ , n^+) besteht, kann er als Kondensator mit der Kapazität $C = \varepsilon_0\varepsilon_r A/d$ betrachtet werden. Mit Gleichung 2.2 folgt:

$$C = \sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r qn_D}{2U}} A \quad (2.4)$$

Die Kapazität verringert sich mit Erhöhung der angelegten Spannung und erreicht ein Minimum bei vollständiger Verarmung. Damit kann die C-U-Kurve (Kapazität als Funktion der Sperrspannung) genutzt werden, um die vollständige Verarmung des p-n-Übergangs festzustellen.

Bei einem in Sperrichtung betriebenen p-n-Übergang wird ein kleiner Stromfluß durch die Verarmungszone beobachtet. Dieser Leckstrom resultiert aus Oberflächen- und Volumeneffekten. Der Volumenleckstrom wird hauptsächlich durch thermische Anregung hervorgerufen und hängt ebenfalls von den Verunreinigungen oder Kristallfehlern des Detektormaterials ab. Für den Volumenleckstrom erhält man die Beziehung /20/:

$$I = \frac{1}{2} q \frac{n_i}{\tau_0} A d \quad (2.5)$$

$$I \sim \sqrt{U}$$

mit n_i : Elektronenanzahl
 τ_0 : effektive Ladungsträgerlebenszeit
 A : Fläche

Der Volumenleckstrom erreicht einen Maximalwert bei vollständiger Verarmung des p-n-Übergangs. Abb. 6 zeigt qualitativ die Tiefe der Verarmungsschicht, die Kapazität und den Volumenleckstrom als Funktion der angelegten Spannung.

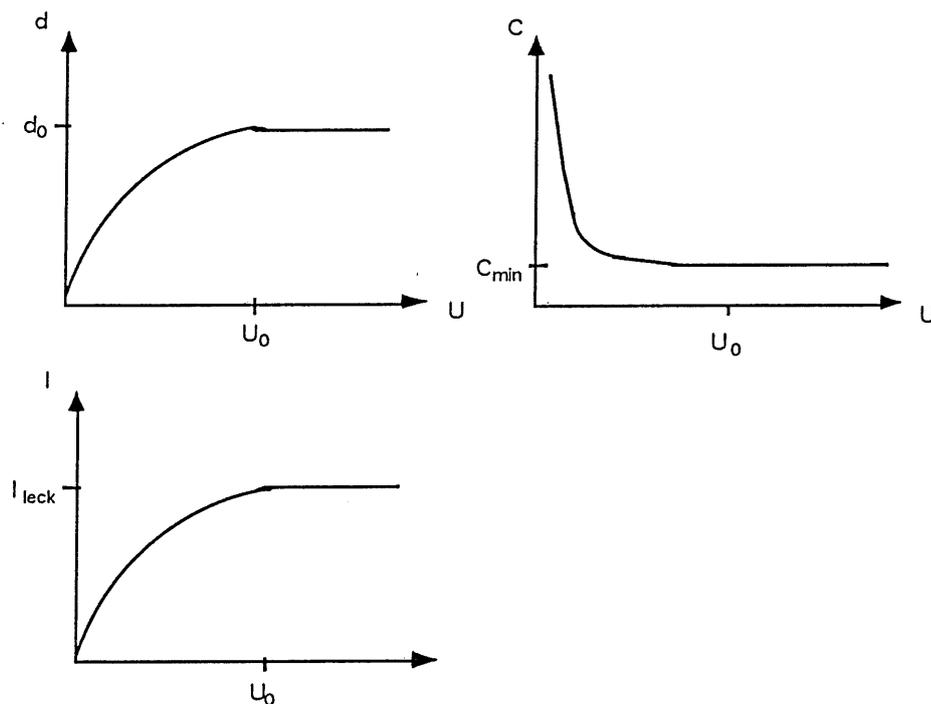


Abb. 6: Qualitative und idealisierte Kurven der Verarmungsschichttiefe d , der Kapazität C und des Volumenleckstroms I als Funktion der Sperrspannung. Bei U_0 ist der p-n-Übergang vollständig verarmt /20/.

Bei Strahlungsdetektoren wird die Forderung nach geringen Leckströmen durch Silizium-Einkristalle mit hohem Substratwiderstand erfüllt. Größe und zeitliche Stabilität des Leckstroms sind das Hauptkriterium bei der Bewertung der Qualität von Detektoren /20/.

Bei Streifendetektoren ist die p^+ -Schicht in wenige μm -breite Streifen (im folgenden p^+ -Streifen genannt) unterteilt. Die Ladung der positiven Ladungsträger wird auf diesen p^+ -Streifen in der Nähe des Durchgangsortes gesammelt. Diese Signalladung wird über Aluminium-Ausleseleitungen zu den VLSI-Auslesechips geleitet. Bei der Kopplung zwischen p^+ -Gebiet und Aluminium gibt es zwei Varianten. In Abb. 7 sind schematisch ein einfacher, DC-gekoppelter strip-Detektor und ein strip-Detektor mit integrierter Koppelkapazität (AC-gekoppelt) dargestellt.

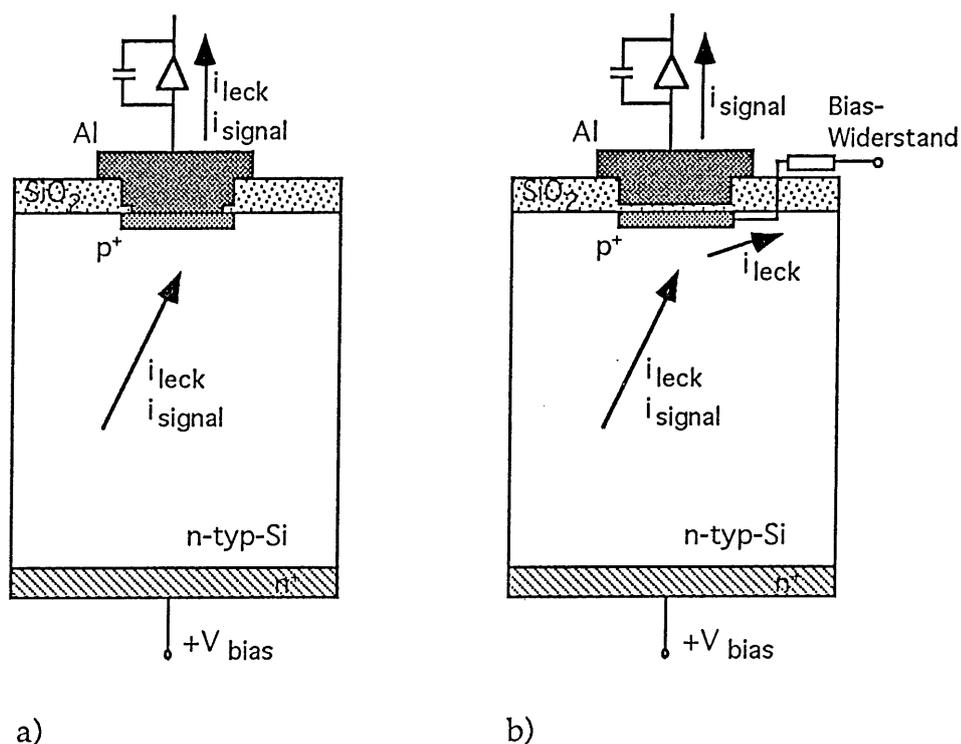


Abb. 7: a) Siliziumdetektor mit DC-Kopplung,
 b) Siliziumdetektor mit AC-Kopplung; durch p^+ -Gebiet und Aluminiumbeschichtung beidseits des dünnen (2000\AA) SiO_2 -Dielektrikums wird der Koppelkondensator gebildet.

Die Koppelkapazität wird gebildet aus dem p^+ -Gebiet als einer "Kondensatorplatte", dem SiO_2 als Dielektrikum und den Aluminiumstreifen als gegenüberliegender "Kondensatorplatte". Mit einer Oxiddicke von ungefähr 200 nm ist diese Koppelkapazität kaum anfällig gegen elektrische Durchschläge.

Der Leckstrom, der auf den p⁺-Streifen gesammelt wird, muß über einen Widerstand (BIAS-Widerstand) abfließen, der üblicherweise in der Detektorstruktur integriert ist. Außer dem schon erwähnten Polysilizium als BIAS-Widerstand werden häufig auch Feld-Oxid-Feldeffekttransistoren (FOX-FET) verwendet. Der Wert dieser BIAS-Widerstände beträgt einige MΩ, um den Hauptanteil der Signalladung zum Verstärker fließen zu lassen sowie den elektrischen Rauschbeitrag vernachlässigbar klein zu halten im Vergleich zum Rauschen der Ausleseverstärker /22/.

2.3 Backward Silicon Tracker (BST-1)

2.3.1 Gesamtkonzept

Die physikalische Motivation für den Bau des BST ist die Erforschung der Region sehr kleiner Bjorken x ($x \leq 10^{-4}$ /23/), wobei x im Partonmodell der Impulsanteil der Partonen ist. Wegen der hohen Schwerpunktsenergie erreichen die HERA-Experimente das bisher unerschlossene Gebiet von $x < 10^{-2}$ bei hohen Impulsüberträgen ($Q^2 > m_p^2$)*. In diesem Gebiet erwartet man, daß die Quark- und Gluondichten anwachsen, so daß bisher nicht relevante, nichtlineare Effekte der Quark-Gluon-Wechselwirkungen untersucht werden können /24/. Eine exakte Messung der Quark- und Gluonverteilungen ist ebenfalls wichtig, um die Teilchenproduktionsraten bei zukünftigen Hochenergie-Hadron-Beschleunigern berechnen zu können.

Durch Simulationsrechnungen wurde abgeschätzt, daß mehr als 90% der erzeugten tiefinelastischen Ereignisse mit $Q^2 \geq 4 \text{ GeV}^2$ in die vom BST erfaßte Winkelregion $167^\circ < \theta < 176^\circ$ gestreut werden. Abb. 8 zeigt die entsprechenden kinematischen Verteilungen, wobei der gestreifte Bereich den Anteil an Ereignissen zeigt, der vom BST nachgewiesen werden kann, im Vergleich zur Gesamtzahl generierter tiefinelastischer Ereignisse.

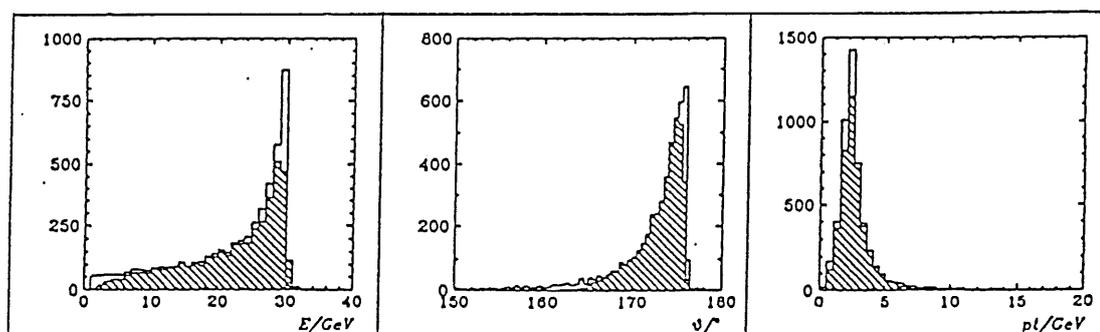


Abb. 8: Kinematische Verteilungen tiefinelastischer Ereignisse für $Q^2 \geq 4 \text{ GeV}^2$ /23/.

* m_p : Protonenmasse

Der Bau des BST ist in zwei Phasen geplant. In der ersten Stufe (BST-1, Abb. 9) werden vier, in der zweiten Stufe (BST-2) acht kreisförmige Ebenen senkrecht zum Strahlrohr montiert. Jede dieser Ebenen besteht aus zwei bzw. drei Lagen verschiedener Siliziumdetektoren, die wiederum aus je 16 trapezförmigen Einzelementen zusammengesetzt sind. Sie werden in Rückwärtsrichtung in einem Abstand von 280 mm bis 860 mm* vom Wechselwirkungspunkt (Vertex) der Elektronen und Protonen angebracht.

Der innere Radius des BST wird 55.0 mm betragen, begrenzt durch das neue dünnere Strahlrohr, der äußere Radius ist 143.5 mm, begrenzt durch die Abmessungen des H1-Zentraldetektors.

BST-1 wird den Winkelbereich von 168° bis 174° abdecken. Die vier Detektorebenen befinden sich an den Positionen - 612 mm, - 670 mm, - 732 mm und - 800 mm in Bezug auf den Vertex und die Proton-Strahlrichtung. Diese Maße ergeben sich aus Platzgründen und aus dem Triggerkonzept. Dieses fordert, daß zur Mustererkennung und Spurrekonstruktion mindestens in drei von vier Ebenen ein Signal (Hit) erkannt wird.

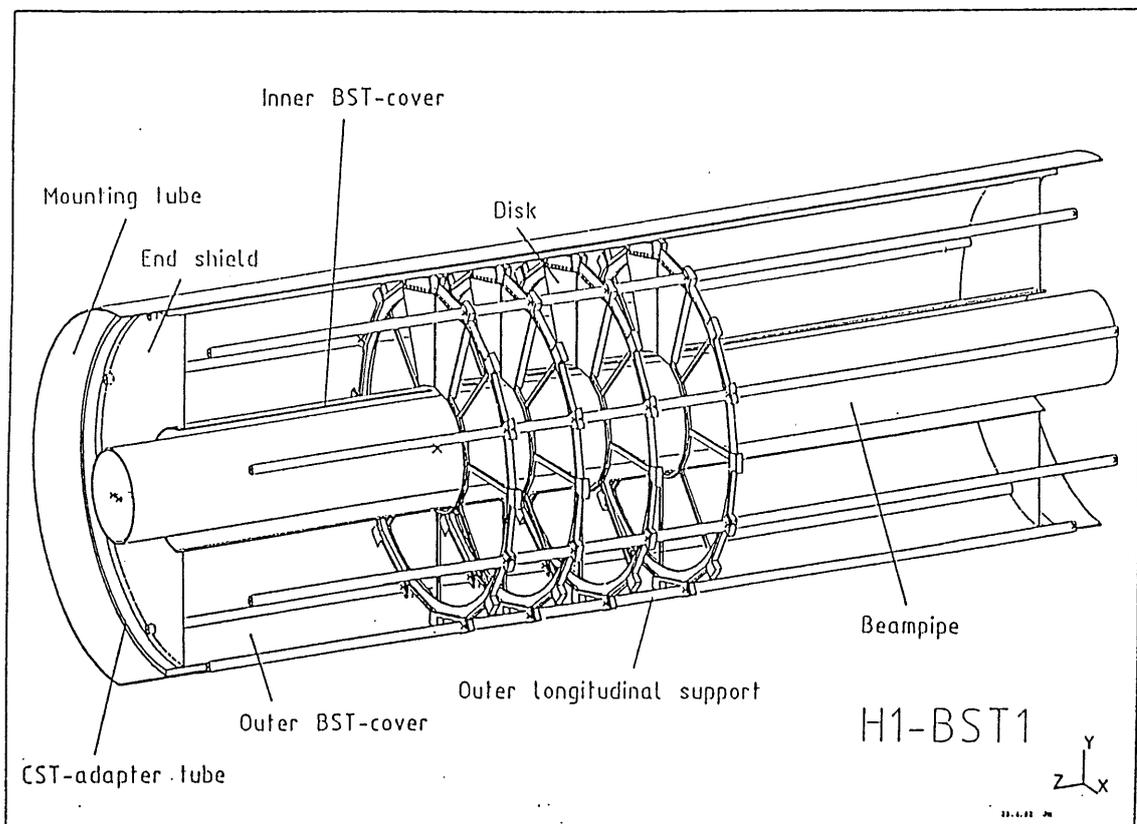


Abb. 9: Perspektivische Ansicht des BST-1.

* Diese Werte änderten sich während der Bearbeitungszeit dieses Diplomthemas. Hier im Text sind die aktuellen Werte angegeben, die sich durch Veränderungen des Strahlrohrdurchmessers ergaben, der größer als ursprünglich geplant ausfallen wird. Im Anhang 1 sind in Tabelle 5 die alten und neuen Werte aufgeführt. Die untersuchten Prototypdetektoren besitzen die alten Maße.

Jede Detektorebene besteht aus folgenden Siliziumdetektoren: beim BST-1: pad- und r-strip-Detektoren, beim BST-2 kommt noch eine Lage ϕ -strip-Detektoren dazu (Abb. 10).

- Die pad-Detektoren sind Bestandteil des Triggersystems. Sie realisieren einen 'first level' (L1)-Trigger (nähere Erläuterungen in Kapitel 2.3.3).
- Die r-strip-Detektoren messen den Polarwinkel θ der gestreuten Elektronen. Diese Detektoren werden im Kapitel 2.3.2 erläutert.
- Die ϕ -strip-Detektoren sind erst für die zweite Phase des BST geplant. Sie dienen zur Bestimmung von Ladung und Transversalimpuls der Elektronen und Hadronen.

(Auf die ϕ -strip-Detektoren wird in dieser Arbeit nicht eingegangen. Nähere Informationen erhält man aus /25/,/26/.)

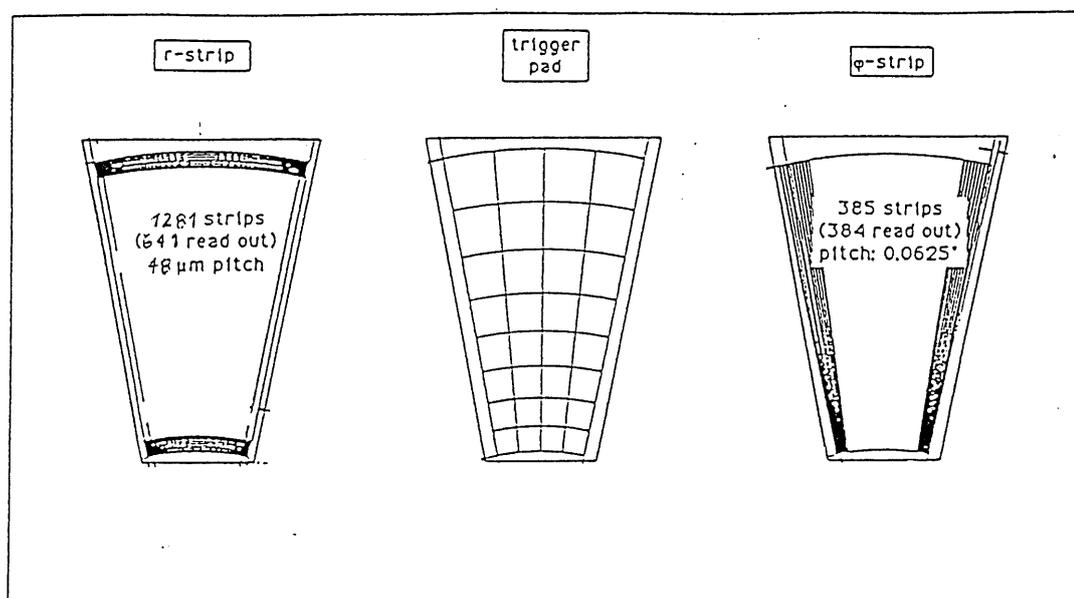


Abb. 10: Skizze der drei BST-Detektortypen [2].

2.3.2 r-strip-Detektoren

Die r-strip-Detektoren (im folgenden strip-Detektoren genannt) werden aus $280\ \mu\text{m}$ dünnen 4 inch-(111)-Siliziumwafern hergestellt, die leicht mit Phosphor (n-typ) vordotiert sind. Je 16 dieser keil- bzw. trapezförmigen Einzeldetektoren sind in einer Ebene um das Strahlrohr angeordnet. Auf einem Detektorsegment befinden sich 1281 p^+ -Streifen mit einem Radius zwischen 56.5 mm (innerer

Rand) und 123.0 mm (äußerer Rand) in Bezug auf die Strahlachse. Diese Streifen sind 10 μm breite, stark bordotierte Gebiete, mit einem konstanten Abstand von 48 μm ('strip pitch') zueinander (in radialer Richtung).

Der Aufbau der strip-Detektoren wird anhand der Herstellungsschritte, dargestellt in Abb. 11, erläutert. In das Ausgangsmaterial wurden zunächst durch Diffusion kontrolliert Fremdatome eingelagert: in der Vorderseite (oben), in sehr schmalen streifenförmigen Gebieten, Boratome, in der Rückseite vollflächig Phosphor, wodurch sich die n^+ -Schicht bildet. Die n^+ -Schicht dient als leitfähige Schicht an der Rückseite ('backplane'). Zum Schutz der empfindlichen Silizium-Kristalloberfläche wurde auf die Rückseite eine dünne Aluminiumschicht aufgebracht.

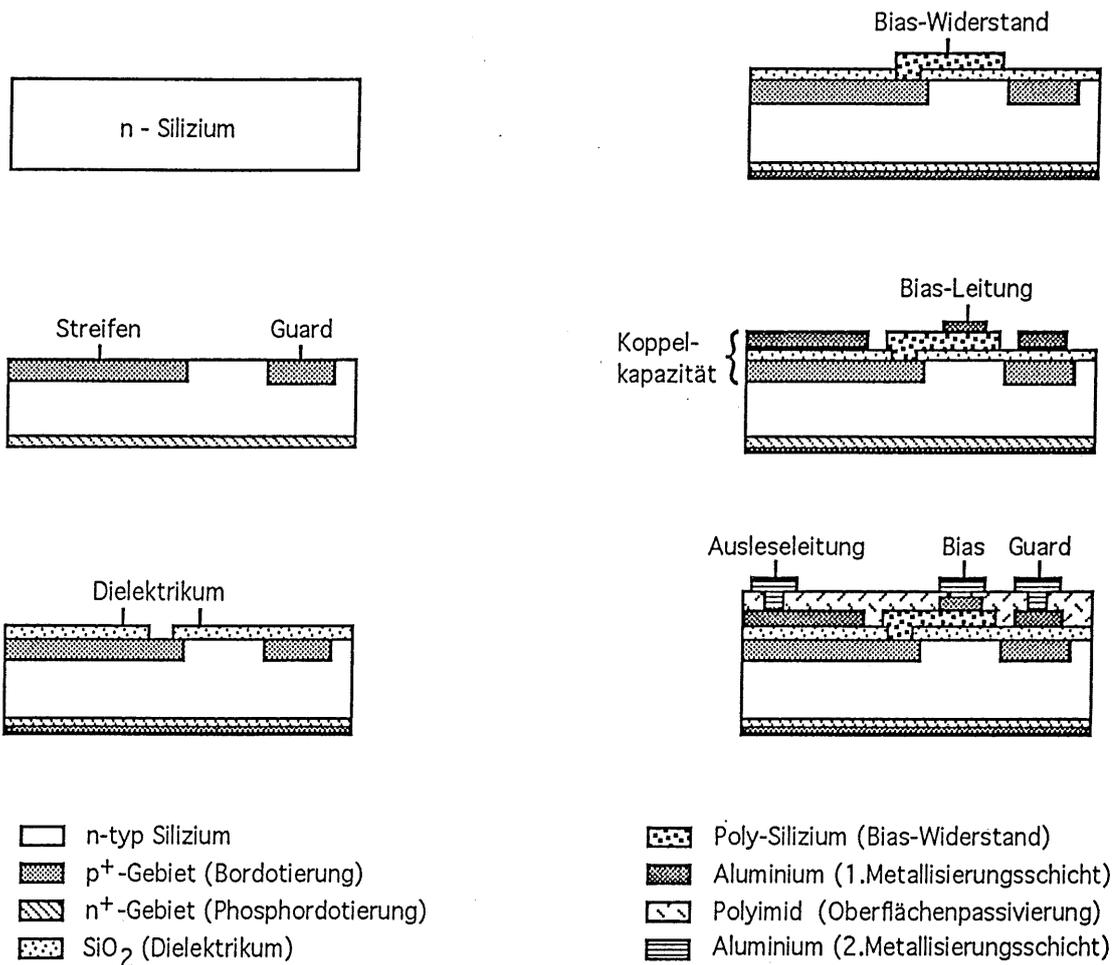


Abb. 11: Herstellungsschritte für einen AC-gekoppelten Siliziumdetektor mit Doppelmetallisierung (alle Dickenmaße sind stark vergrößert).

Im nächsten Schritt wurde eine ≈ 400 nm dünne dielektrische SiO₂-Schicht auf die Vorderseite aufgebracht, wobei kleinere Kontaktlöcher ausgespart wurden. Danach wurde Polysilizium aufgetragen, welches als Widerstand zwischen den einzelnen p⁺-Streifen und dem BIAS (Sammelleitung) dient. Die einzelnen p⁺-

Streifen sind über diesen Polysiliziumwiderstand alternierend an der rechten und linken Seite des Detektors mit der umlaufenden BIAS-Leitung verbunden. Die BIAS-Leitung wird in der darauffolgenden Stufe, der ersten Metallisierung, zusammen mit der Streifen- und Guardaluminisierung gefertigt. Der Guardring verläuft um den gesamten Detektorrand. Da er aus mehreren schmalen parallelen p⁺-Streifen besteht, erhält man eine sogenannte 'Multiguard'-Struktur. Der Guard dient dazu, Leckströme vom gesägten Rand des Detektors zu sammeln und abzuleiten und so das elektrische Feld im Detektorinneren zu stabilisieren /19/. Ein homogenes Feld ist notwendig, um das Driften der Ladungsträger zu minimieren und so eine gute Ortsauflösung zu erreichen.

Die Streifenaluminisierung der ersten Metallisierungsschicht ist geometrisch ähnlich dem p⁺-Gebiet aufgebaut. Dadurch werden MOS-Kapazitäten gebildet. Von jeder zweiten metallenen "Kondensatorplatte" dieser MOS-Kapazitäten verläuft, nochmals durch ein Dielektrikum (Polyimid) getrennt, eine Ausleseleitung aus Aluminium (2. Metallisierungsschicht) zum äußeren Rand des Detektors, wo sie an einem Anschlußpunkt ('Bondpad') endet. Da jeder zweite Streifen ausgelesen wird, ergeben sich 641 Ausleseleitungen für einen r-strip-Einzeldetektor.

Die fünf Auslesechips mit je 128 Kanälen befinden sich auf sogenannten 'Hybrids' (Keramikträgern) am äußeren breiten Rand der Detektoren. Die Verbindung mit den Detektoren erfolgt durch Ultraschall-Bonden (Mikrodraht-Schweißen) mit Aluminiumdraht (\varnothing 25 μ m).

In Abb. 12 a ist das Foto eines r-strip-Prototypdetektors zu sehen, Abb. 12 b zeigt einen vergrößerten Randausschnitt.

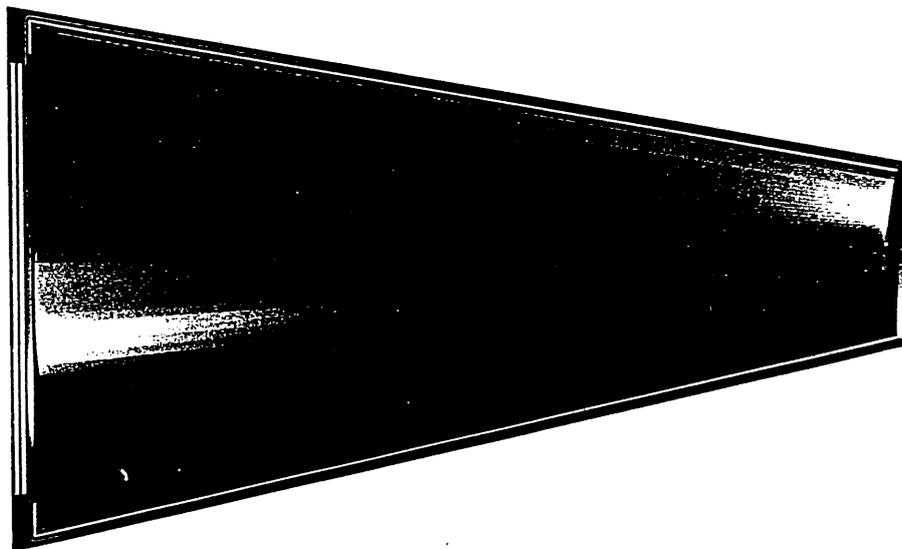


Abb. 12 a: Foto eines r-strip-Prototypdetektors.

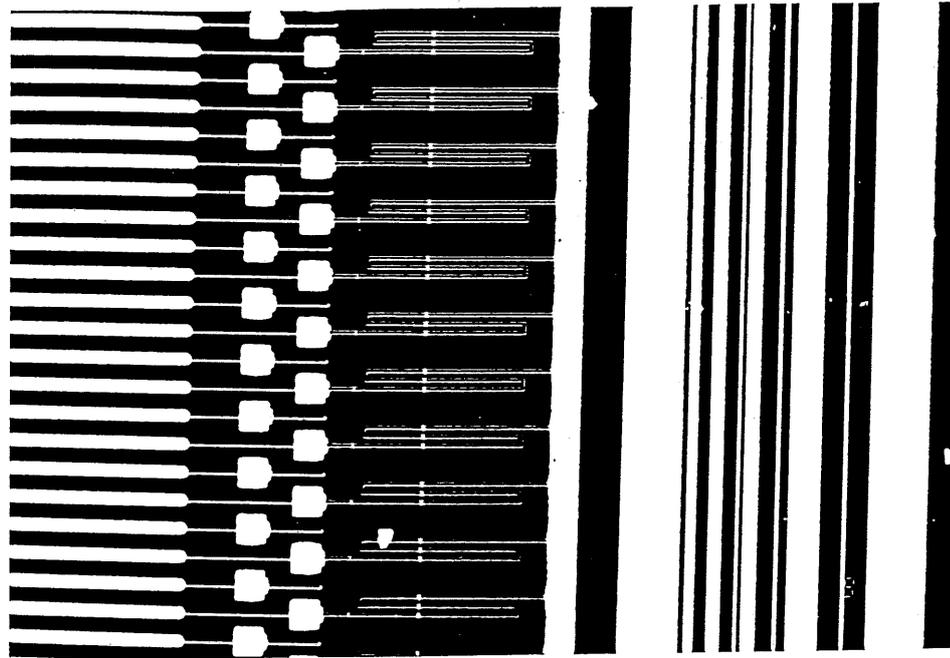


Abb. 12 b: Ausschnittvergrößerung vom Detektorrand: p^+ -Streifen (mit Aluminium bedeckt) - 'spy pads' - Polysiliziumwiderstände (enden in der:) - BIAS-Leitung - 'Multiguard'-Struktur (v.l.n.r.).

Mit dem r-strip-Detektor wird es möglich sein, den Winkel θ eines vom Vertex gestreuten Teilchens mit einer Genauigkeit von ≈ 0.4 mrad zu messen. Das Auflösungsvermögen der Detektoren in r wird $\approx 30 \mu\text{m}^\#$ betragen. (Werden in die Berechnung Rausch-Korrelations-Effekte mit einbezogen, kann Δr bei einer Auslesebreite von $100 \mu\text{m}$ und einem Teilcheneinfall unter 10° bis auf $8.5 \mu\text{m}$ bestimmt werden /27/.)

Durch die 16-fache Unterteilung der Ebenen um das Strahlrohr kann der Winkel ϕ mit $2\pi/16$ bestimmt werden. Die genaue Bestimmung von ϕ erfolgt in der zweiten Phase des BST mit den ϕ -strip-Detektoren.

2.3.3 pad-Detektoren

Die Herstellung der pad-Detektoren ist der der strip-Detektoren ähnlich. Als Ausgangsmaterial dient ebenfalls ein 4 inch n-typ (111)-Siliziumwafer. Im Unterschied zu den strip-Detektoren beträgt seine Dicke $380 \mu\text{m}$. Dadurch verringert sich die Kapazität und der Betrag der gesammelten Ladung wird erhöht.

Auflösungsvermögen = Auslesebreite ('readout pitch')/ $\sqrt{12}$

Auf der Vorderseite wurden großflächige p⁺-Gebiete (pads) implantiert, die in acht Kreisbogensegmente mit je vier pads angeordnet sind. Deren Fläche variiert zwischen 30,5 mm² und 137,5 mm² (Abbn. 13 und 14). Die Rückseite ist wie bei den strip-Detektoren als n⁺/Aluminium-Schicht ausgebildet. Die pad-Detektoren sind gegenwärtig DC-gekoppelte Detektoren, d. h. die p⁺-Gebiete auf der Vorderseite werden direkt mit Aluminium bedeckt. AC-gekoppelte pad-Detektoren (mit FOXFET-'biasing') sind in Entwicklung.

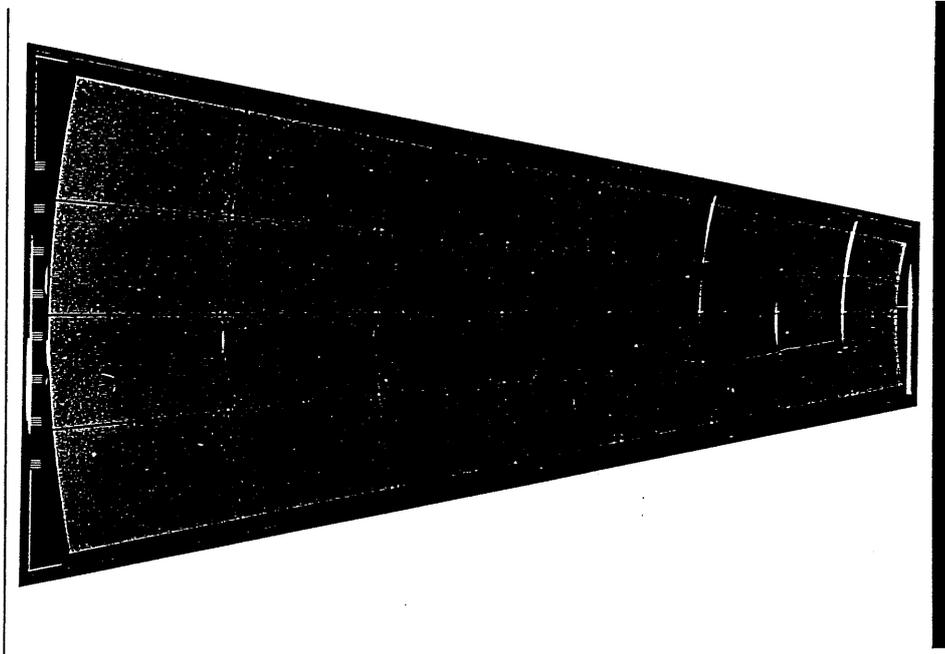


Abb. 13: Foto des pad-Detektors.

Probleme gibt es bei der Herstellung großflächiger DC-gekoppelter Detektoren; die Defektanzahl durch die großen Flächen ist relativ hoch. Als Kristalldefekte können Aluminiumatome in den Siliziumkristall eindiffundieren und so die intrinsische Struktur verändern. Das Problem wurde gelöst, indem die Padfläche mit einer dünnen Oxidschicht bedeckt wurde, so daß die darüberliegende Aluminiumschicht nur entlang eines schmalen Kontaktrings direkten Kontakt mit dem p⁺-Gebiet hat. Die gesamte Vorderseite, mit Ausnahme der Bondpads, ist mit Polyimid passiviert.

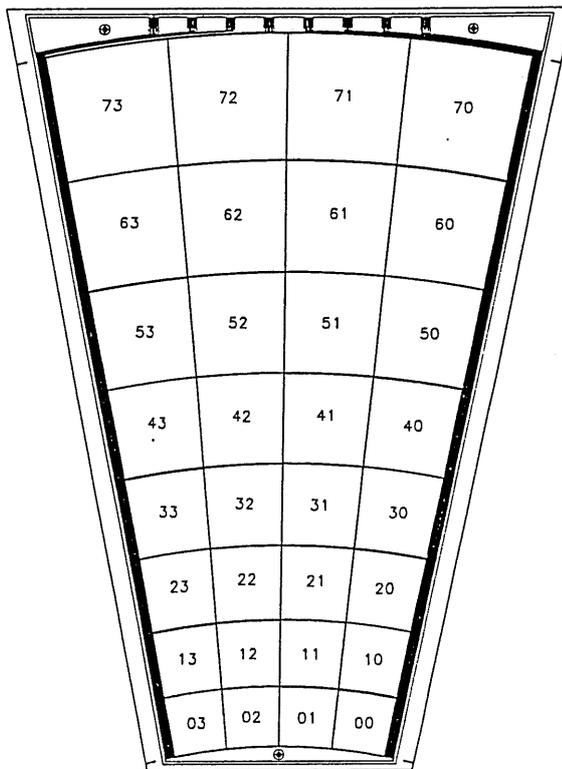


Abb. 14: Konstruktionszeichnung mit pad-Numerierung.

Die schematische Darstellung eines pad-Detektor-Querschnitts zeigt Abb. 15. (Alle Dickenmaße sind stark vergrößert.)

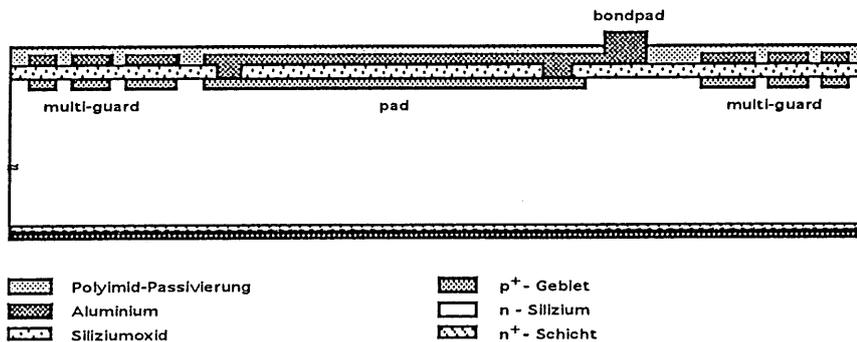


Abb. 15: Schematischer Querschnitt durch einen pad-Detektor.

Am Rand des Detektors verläuft ein Guardring, der bei den Prototypen aus mehreren verschieden breiten p⁺-Streifen aufgebaut ist ('Multiguard'-Struktur) und dessen Aufgabe darin besteht, das homogene elektrische Feld im Detektorinneren zu stabilisieren, d. h. Randeffekte zu kompensieren. Die geteilten Streifen stellen dabei eine selbstjustierende Struktur dar, die einen kontrollierten Potentialabfall zum Detektorrand gewährleisten soll /28/.

Die auf den Aluminium-Auslesepads gespeicherte Ladung wird über eine implementierte Leitung zu einer Reihe von Bondpads an der äußeren Seite des Detektors geführt. Hier wird der Detektor mittels Bonden an die speziellen Auslesechips auf dem Hybriden angeschlossen. Die pad-Detektoren dienen als zukünftiger level 1 - Trigger (L1). Der neue Trigger muß verschiedene Aufgaben erfüllen:

- Nachweis tiefinelastisch gestreuter Elektronen im Akzeptanzbereich des BST,
- Reduzierung der Untergrund-Triggerrate, die durch Protonen verursacht wird, indem alle Ereignisse, deren Spurursprung nicht im Vertex liegt, keine Messung auslösen.

Der BST-Trigger erhöht bei kleinen Elektronenenergien ($E < 10 \text{ GeV}$) die Zuverlässigkeit des existierenden Triggers 'BSET', welcher eine gewisse Energiedeposition im rückwärtigen Kalorimeter fordert. Ein Teilchen vom Vertex erzeugt in den pad-Detektoren Ladungssignale, deren Auswertung zur Triggerentscheidung führt. Eine positive Entscheidung erfordert eine vom Vertex ausgehende gerade Teilchenbahn durch einen der 16 Sektoren der vier Detektorebenen. Auf jedem Sektor befinden sich acht Ringabschnitte mit je vier pads, die vom inneren zum äußeren Rand die Numerierung 0 bis 7 tragen. Jede Teilchenbahn kreuzt einen dieser Ringabschnitte. Bei geraden, vom Vertex herrührenden Spuren ergeben sich bestimmte Nummernmuster, z. B. (1234). Dieses Muster beschreibt eine Spur im BST-1, wobei das Teilchen in der ersten Detektorebene den Kreisring Nr. 1, in der zweiten und dritten Detektorebene den 2. bzw. 3. Kreisring passiert und nach Durchquerung des Kreisringes Nr. 4 in der letzten Detektorebene den BST-1 verläßt (Abb. 16).

Indem bestimmte Muster bzw. Masken für eine Triggerentscheidung gefordert werden, wird die Untergrundrate reduziert.

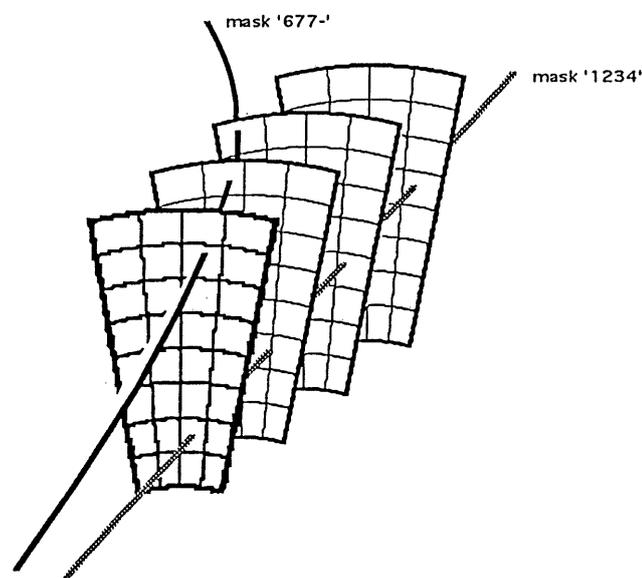


Abb. 16: Spurverläufe durch einen Sektor des BST-1 mit zugehörigen Masken.

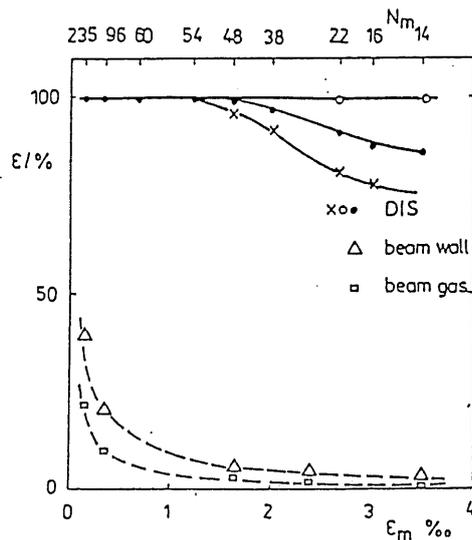


Abb. 17: Triggereffizienz als Funktion der Zahl der erlaubten "Masken" N_m für tiefinelastische (DIS) Ereignisse mit 0, 100 bzw. 200 mm Vertexverschmierung (oben) sowie Triggerrate durch Strahl-Wand- und Strahl-Gas-Ereignisse (unten) [29].

In Abb. 17 ist die Triggereffizienz als Funktion der erlaubten Masken dargestellt. 54 verschiedene Masken sichern eine vollständige Effizienz für den gesuchten Ereignistyp bei einer Verschmierung der z-Position des Vertex von maximal 200 mm. Die Triggerrate durch Strahl-Gas- oder Strahl-Wand-Effekte liegt im Prozentbereich, so daß der BST-Trigger gute Möglichkeiten zur besseren Untergrundreduktion bietet. Für den pad-Detektor ergibt sich die Forderung nach möglichst guter Trennung des Signals vom Untergrund ($S/N \geq 10$), um dadurch die Anzahl an Fehltriggern zu minimieren.

3 TEST DER STRIP-DETEKTOREN

Die Untersuchungen an den strip- wie an den pad-Detektoren umfaßten statische Messungen (Aufnahme von Strom-Spannungs- und Kapazitäts-Spannungs-Kennlinien) sowie dynamische Messungen, bei denen das Verhalten der Detektoren unter realitätsnahen Bedingungen (Einfall ionisierender Strahlung) aufgezeichnet und ausgewertet wurde. Um die physikalischen Eigenschaften und Meßprinzipien der Siliziumdetektoren kennenzulernen, wurden verschiedene Kennlinien und Meßwerte aufgenommen, deren Ergebnisse in den folgenden Kapiteln vorgestellt werden.

Von der Firma SINTEF (Oslo) wurden 1992 einige Prototypen von r-strip-Detektoren, wie sie für den BST-1 verwendet werden sollen, angefertigt. Angaben zum Design wurden im Kap. 2.3.2 gemacht. Die Spezifikationen der Herstellerfirma zu einigen Parametern der gelieferten Detektoren sind in Tabelle 2 aufgeführt.

3.1 Statische Messungen

Zur Überprüfung der spezifizierten Werte wurden an einem Spitzenmeßplatz folgende Messungen ausgeführt:

- C-U-Kennlinien : zur Bestimmung der Verarmungsspannung,
- I-U-Kennlinien : zur Messung der Leckströme,
- Widerstand des Polysiliziums (BIAS-Widerstand).

a) Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie

Zuerst wurde von jedem Detektor die Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie aufgenommen, um die Verarmungsspannung zu ermitteln. Die Kapazität wurde zwischen einem bzw. zwei Streifen und der 'backplane' gemessen. Typische C-U-Kurven sind in Abb. 18 dargestellt. Deutlich ist die Phase der Ausbreitung der Verarmungsschicht bei kleinen Spannungen zu erkennen, sowie der Übergang zur vollständigen Verarmung bei $U_{\text{Depl.}} = 60 \text{ V}$. Eine weitere Erhöhung der Spannung kann die Kapazität nicht mehr ändern, da die mechanische Detektordicke die Ausdehnung des verarmten Volumens begrenzt.

*Tabelle 2: Spezifikationen des Herstellers für die Prototypen der strip-Detektoren:
/30/*

<i>Geometrie</i>	
Anzahl konzentrischer Streifen	1281
Anzahl ausgelesener Streifen	641
Breite der Streifen	$(8.0 \pm 1.5) \mu\text{m}$
radialer Abstand zwischen den Streifen	$(45.0 \pm 1.5) \mu\text{m}$
Länge der Streifen	$2\pi R/16$ (mit $28.0 < R < 104.8$)
<i>Material</i>	
Wafer-Dicke	$(280 \pm 15) \mu\text{m}$
Wafer-Dotierung	Phosphor, n-typ
Substratwiderstand	$(4 \pm 1) \text{k}\Omega \text{ cm}$
Orientierung	(111)
Oxiddicke	400 nm
<i>elektrische Parameter</i>	
Verarmungsspannung	50 V
Streifenwiderstand	$(60 \pm 10) \Omega/\text{Fläche}$
Polysiliziumwiderstand	3 ... 15 M Ω
Leckstrom zwischen Streifen ('interstrip current')	< 100 nA (gemessen bei 1 V)
Koppelkapazität der Streifen	15 pF/cm
Leckstrom der Streifen (bei U = 60 V)	(- 200 ... - 500) nA
Leckstrom des Guardrings (bei U = 60 V)	< 240 nA

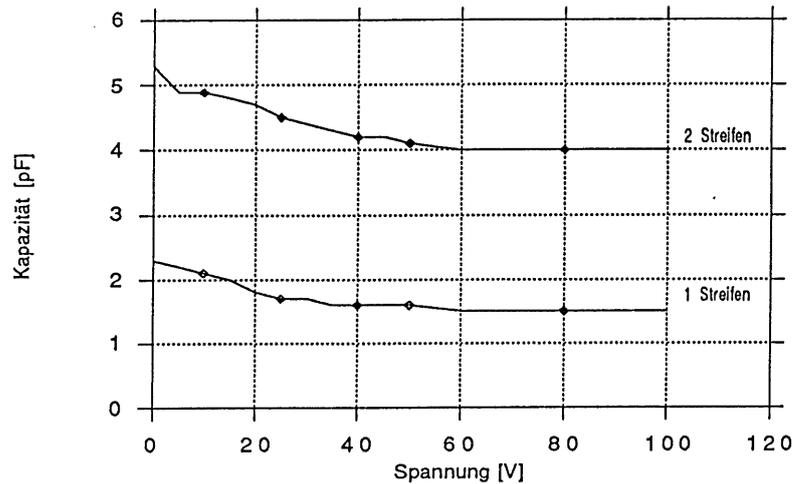


Abb. 18: Kapazität zwischen einem bzw. zwei Streifen und der 'backplane' in Abhängigkeit von der Verarmungsspannung eines strip-Detektors.

Die Meßergebnisse[#] stimmen gut mit Simulationswerten von /31/ und /32/ überein. Für einen Detektor mit dem Verhältnis Streifenbreite zu Streifenabstand = $8 \mu\text{m} : 45 \mu\text{m}$ wurde die Kapazität pro Einheitslänge zu 1.1 pF/cm berechnet. Die Länge der hier gemessenen Streifen betrug $\approx 1.5 \text{ cm}$ und damit die Kapazität etwa 1.0 pF/cm .

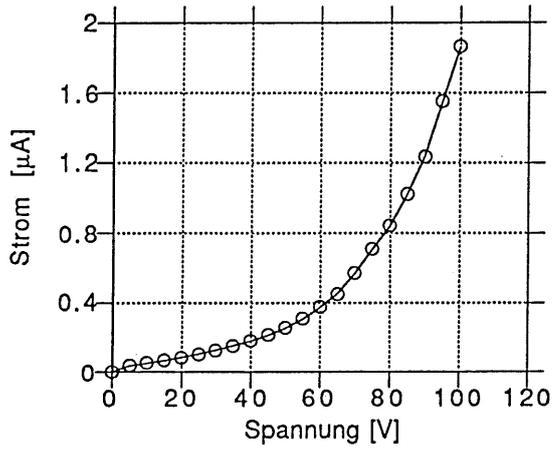
b) Strom-Spannungs-Kennlinie

Die Größe des Leckstroms in Abhängigkeit von der angelegten Sperrspannung wurde separat für den Guardring und für die Streifen gemessen. Als Streifenstrom wird hier die Summe des Stroms aller Streifen bezeichnet. Er wurde gemessen, indem der BIAS-Strom über der Verarmungsspannung aufgenommen wurde, da alle p^+ - Streifen über den Polysiliziumwiderstand mit dem BIAS verbunden sind. Die Kennlinien sind in Abb. 19 a, b dargestellt.

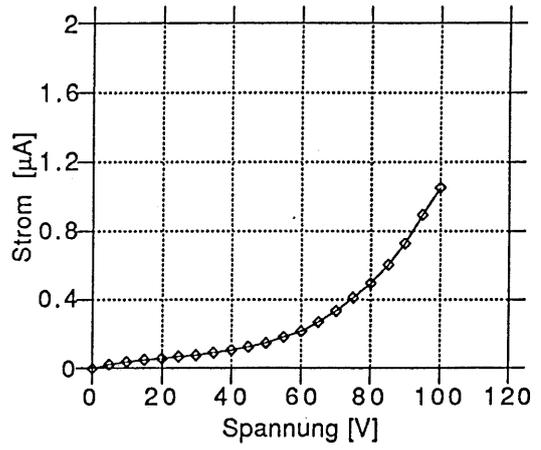
Bei diesen Messungen wurde festgestellt, daß der Guardstrom der meisten Detektoren weit über dem geforderten Maximalwert (Soll $\leq 1 \mu\text{A}$) liegt, wodurch sich das Rauschen dieser Detektoren durch elektrische Koppeleffekte auf die Streifen stark erhöht. Detektoren mit einem Guardstrom von einigen mA wurden als defekt eingestuft.

Beim Detektor (ZS 769 #3) mit den niedrigsten Leckströmen wurde deren Entwicklung über einen Zeitraum von einem halben Jahr beobachtet, indem einmal pro Woche die I-U-Kennlinien von Guard- und Streifenstrom aufgenommen wurden, s. Abb. 20 a, b. Die Werte schwankten in dieser Zeit, gingen aber weder wesentlich zurück noch stiegen sie weiter an.

[#] Die Fehlergrenzen für die statischen Messungen sind im Anhang 2 angegeben.

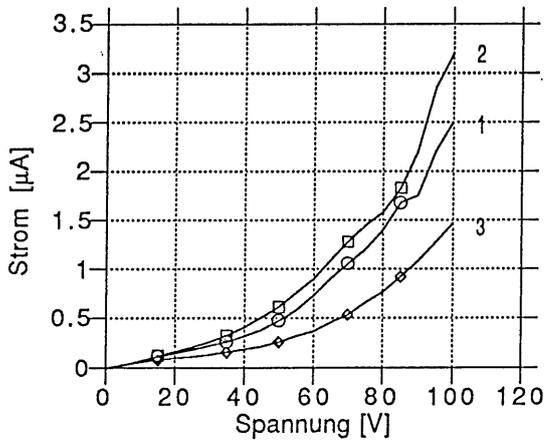


a)

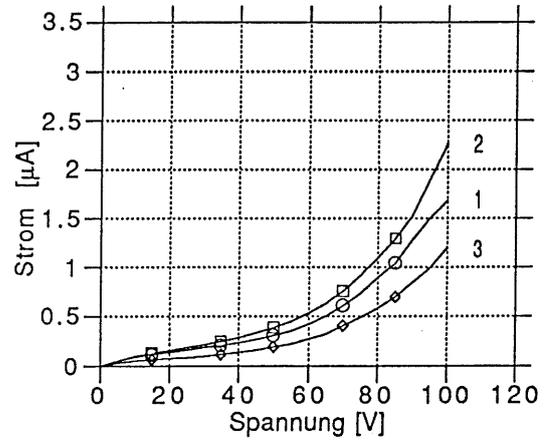


b)

Abb. 19: a) Strom-Spannungs-Kennlinie des Guard ,
b) Strom-Spannungs-Kennlinie der Streifen des Detektors (ZS 769 #3).



a)



b)

Abb. 20: a) I-U-Kennlinie Guard, b) I-U-Kennlinie Streifen des Detektors (ZS 769#3).

mit 1: Messung am 11. 02. 1993
 2: Messung am 25. 02. 1993
 3: Messung am 11. 03. 1993.

c) Polysiliziumwiderstand

Die Polysiliziumwiderstände wurden stichprobenartig untersucht - zehn an jeder Ecke eines Detektors. Ihre Werte lagen zwischen drei und vier $M\Omega$, die Homogenität ist ausreichend gut. In Abb. 21 sind die Widerstandswerte des Detektors (ZS 769 #3) aufgetragen. Aus jedem Bereich A bis D wurden 10 Widerstände gemessen, wobei A die obere linke, B die untere linke, C die untere rechte und D die obere rechte Ecke bezeichnen.

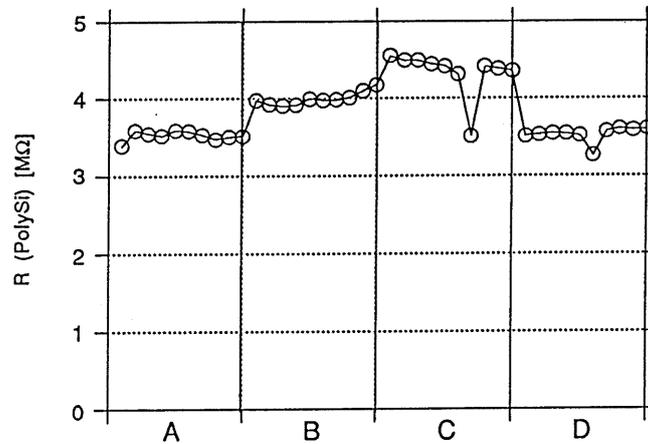


Abb. 21: Polysiliziumwiderstände des Detektors (ZS 769 #3) mit jeweils zehn Werten von jeder Detektorecke.

3.2 Dynamische Messungen

3.2.1 Ausleseelektronik (Auslesechip APC)

Die Entwicklung rauscharmer integrierter Auslesechips mit hoher Kanaldichte war eine grundlegende Bedingung für den erfolgreichen Einsatz von Silizium-Streifendetektoren in physikalischen Experimenten. Vertexdetektoren haben 10^4 bis 10^5 Auslesekanäle, aber der Platz für Ausleseelektronik und -kabel ist durch die Abmessungen des Strahlrohrs und die anderen Detektorkomponenten stark begrenzt. Zur Verfügung stehende Auslesechips enthalten 64 oder 128 ladungsempfindliche Vorverstärker und Ladungsspeicher, in denen die Analogsignale bis zur Triggerentscheidung (L1) gespeichert werden.

Beim Ringbeschleuniger HERA ist die Zeit zwischen den 'bunch crossings' beträchtlich kürzer als die Zeit zur Bildung des first-level-Triggers L1; sie beträgt nur 96 ns (das entspricht einer 'bunch crossing'-Rate von 10.4 MHz). Deshalb muß jeder Kanal in der Lage sein, mehrere Ereignisse in einer 'event pipeline' ("Stapelregister") während der Zeit der Trigger-Entscheidung zu speichern.

Von R. Horisberger /22/ wurde zu diesem Zweck ein neuer Auslesechip, der 'Amplifier and Pipeline Chip' (APC) entwickelt, der mit 'analog event pipeline' und digital kontrolliertem 'analog signal processing' die Verbindung zwischen Detektor und der Auslese- und Kontrolleinheit 'OnSiRoC'[†] herstellt.

Auf einer Fläche von $6.4 \times 3.6 \text{ mm}^2$ sind 128 Auslesekanäle mit einer Breite von $44 \text{ }\mu\text{m}$ pro Kanal angeordnet. Jeder Kanal besteht aus einem leistungs- und rauscharmen, ladungsempfindlichen Vorverstärker, an den sich eine 'multievent pipeline' anschließt, welche die Analogsignale von 32 aufeinanderfolgenden 'bunch crossings' speichern kann. Zur Datenauslese werden die Signale eines ausgewählten Ereignisses nacheinander auf eine gemeinsame Ausgangsleitung geschaltet. Prototyp-Chips mit 64 Kanälen erreichten eine Auslesegeschwindigkeit von 2.5 MHz. Die Messungen zum Rauschverhalten haben ein $\text{ENC}^* = 680 \text{ e} + 30 \text{ e/pF}$ ergeben. Für den wahrscheinlichsten Energieverlust (≈ 32000 Elektronen) eines minimal ionisierenden Teilchens (MIP) in $300 \text{ }\mu\text{m}$ Silizium und einer Eingangskapazität von 24 pF wird ein S/N-Verhältnis von 15 : 1 erwartet. /2/

Das Prinzipschaltbild des APC ist in Abb. 22 dargestellt. /22/

[†] 'OnSiRoC' = On-line Silicon strip Readout Controller

* ENC = equivalent noise charge

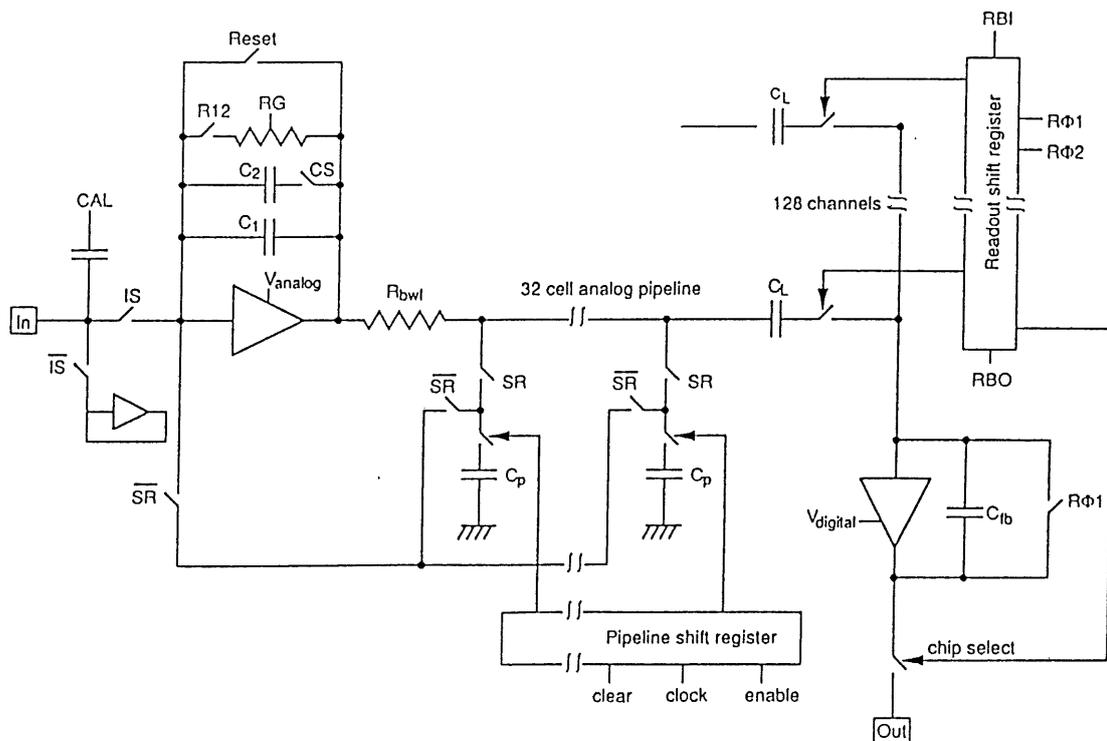


Abb. 22: Prinzipschaltbild des APC:

Der pipeline-Speicher hat 32 "switched capacitors" für jeden Kanal, um die Spannung des Vorverstärkers zu speichern. Während der Datennahme sind die Schalter IS und SR geschlossen. Das 'Pipeline Shift Register' verbindet zyklisch für jedes 'bunch crossing' einen Speicherkondensator mit dem Ausgang des Vorverstärkers. Bei positiver L1-Triggerentscheidung wird die Pipeline gestoppt und die Schalter IS und SR werden geöffnet, wodurch die Verbindung zwischen Vorverstärker und Detektor unterbrochen wird. Zur Auslese wird die Spannung vom Pipeline-Speicher, entsprechend einem bestimmten 'bunch crossing', über eine erneute Verstärkung auf dem Kondensator C_L gespeichert. Die Signale der 128 Speicherkapazitäten C_L werden dann nacheinander zum Ausgang übertragen ('Multiplex'). Die Kondensatoren C_L werden u. a. auch genutzt, um eine Pedestalsubtraktion parallel für alle Kanäle durchzuführen.

Für jeden strip-Einzeldetektor werden fünf APC's mit 128 Kanälen benötigt. Detektor und APC's werden auf einen Hybrid (Keramikunterlage) aufgeklebt und gebondet. Der Hybrid dient zugleich als mechanische Halterung. Für die im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführten Messungen wurden APC-Prototypen mit 64 Auslesekanälen verwendet.

3.2.2 Software

Für die Auswertung der bei den verschiedenen Tests aufgenommenen Daten wurde ein spezielles Programm (FORTRAN) geschrieben. Als Benutzer-

umgebung wurde das in der H1-Kollaboration verwendete Datenanalyseprogramm 'LOOK' /36/ gewählt. Mit diesem Programm können Histogramme erstellt und analysiert sowie interaktive Berechnungen durchgeführt werden.

Im folgenden werden die im Programm verwendeten Formeln zur Berechnung von 'pedestal'- und Signalwert, Standardabweichung, S/N etc. angegeben. Die nicht bearbeiteten Daten der dynamischen Messungen werden als Rohdaten bezeichnet. Für jedes aufgezeichnete Ereignis (durch das Triggersystem ausgelöste Messung) wurde der Wert der analogen Ausgangsspannung (Amplitude) jedes einzelnen APC-Kanals digitalisiert und zusammen mit der Nummer des jeweiligen Kanals gespeichert. Zur Rekonstruktion von Spuren ist eine Aufbereitung der Rohdaten nötig, die aus den aufgezeichneten Daten diejenigen herausfiltert, die den Durchgang eines Teilchens anzeigen.

Ein Datenfile (Datei bzw. Meßreihe) enthält die Amplituden aller Kanäle für jedes aufgezeichnete Ereignis:

$$A_k^i = \text{Amplituden (Rohdaten) in ADC-Einheiten}$$

mit i : Ereignisnummer
 $k = 1 \dots 64$: Kanalnummer

Diese Amplitude setzt sich aus drei Komponenten zusammen:

1. *'pedestal'-Wert*: Das 'pedestal' ist der Wert eines Kanals, der gemessen wird, ohne daß Ladung durch ionisierende Strahlung im Detektor deponiert wurde. In den geplanten e-p-Experimenten werden tiefinelastische Streueignisse nur mit einer Rate von etwa 1 Hz auftreten, wobei die Teilchenspuren aus diesen Ereignissen nur wenige der mehr als 1000 Streifen eines Detektorsegments treffen werden. Die Wahrscheinlichkeit eines Kanals, eine Signalladung zu registrieren, ist sehr gering, sodaß das 'pedestal' durch die Amplitudenmittlung über hinreichend viele ($n \geq 20$) Ereignisse gut berechenbar ist. Wegen möglicher zeitlicher Schwankungen wird p_k jeweils für die einem Ereignis vorangehenden n Ereignisse berechnet und somit ständig aktualisiert.

$$p_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_k^i \quad (3.1)$$

mit n : Anzahl der Ereignisse

Das 'pedestal' ist für alle Kanäle größer als Null. (Es wird durch ein Gleichspannungsoffset so eingestellt, um die Digitalisierung und Berechnung zu vereinfachen.)

2. 'common mode': Als 'common mode' werden kohärente Schwankungen aller k von einem ADC digitalisierten Kanäle bezeichnet (k entspricht i. a. der Streifenanzahl eines Detektors, in diesem speziellen Fall ist $k = 64$). Der 'common mode' eines Ereignisses i wird berechnet durch Summation aller Differenzen der aktuellen Amplitude und des zugehörigen 'pedestals' für den jeweiligen Kanal k des Detektors.

$$c^i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (A_k^i - p_k) \quad (3.2)$$

mit m : Anzahl der funktionierenden ("guten") Kanäle eines Detektors

3. *Signal*: Das Signal entspricht der Ladung, die von ionisierender Strahlung deponiert wurde. Um das Signal zu finden (und damit den genauen Ort des Teilchendurchgangs festzulegen), müssen das 'pedestal' und der 'common mode' von der registrierten Amplitude abgezogen werden.

$$S_k^i = A_k^i - p_k - c^i \quad (3.3)$$

Wegen des homogenen Feldes und der kleinen Drift (kein Querfeld) bei kurzen Ladungssammelzeiten (20 ns) wird die deponierte Ladung exakt auf die Streifen projiziert. Dort wird sie durch kapazitive Ladungsteilung auch auf die Nachbarstreifen übertragen. Durch Berechnung des Schwerpunktes dieser Ladungsverteilung ('peak') wird der genaue Durchgangsort des Teilchens bestimmt.

$$x_s = \frac{\left(\sum_{k=k_1}^{k_2} k \cdot A_k^i \right)}{\sum_{k=k_1}^{k_2} A_k^i} \quad (3.4)$$

mit x_s : Schwerpunkt
 k_1 : Streifennummer des 'peak'anfangs
 k_2 : Streifennummer des 'peak'endes

Mit dieser Methode kann der Durchgangsort mit einer Genauigkeit kleiner als der Streifenabstand bestimmt werden.

Die Schwankungen der 'pedestal'-Werte sind ein Maß für das Rauschen von Detektor und Elektronik.

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n (p_k^i - \bar{p}^i)^2 \right] \quad (3.5)$$

mit
$$\bar{p}^i = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n p_k^i - c^i \right) \quad (3.6)$$

\bar{p}^i : mittleres 'pedestal' eines Kanals k über eine bestimmte Anzahl von Ereignissen n

Damit kann das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (S/N) berechnet werden:

$$\frac{S}{N} = \frac{\sum_{k=k_1}^{k_2} S_k^i}{\sqrt{\sum_{k=k_1}^{k_2} \sigma_k^2}} \quad (3.7)$$

3.2.3 Experimenteller Aufbau

Die dynamischen Messungen an einem r-strip-Prototypdetektor wurden im Labor durchgeführt. Dabei wurde zur Messung kein Teilchenstrahl verwendet. Die Signalladung wurde mit zwei Methoden in den Detektor eingekoppelt:

- kapazitiv über die Detektorrückseite ('backplane') auf alle Streifen gleichzeitig, sowie
- mit einem von einem Halbleiterlaser erzeugten, fokussierten ($\varnothing < 10 \mu\text{m}$) Lichtblitz auf die p-Seite des Detektors. Verwendet man sichtbares Licht ($\lambda = 685 \text{ nm}$), schatten die Aluminiumstreifen der AC-Kopplung das Licht ab. Es war erforderlich, den Strahl in der Lücke zwischen den Metallisierungen zweier Streifen auftreffen zu lassen, damit die erzeugte photoelektrische Ladung den p-n-Übergang erreichen konnte.

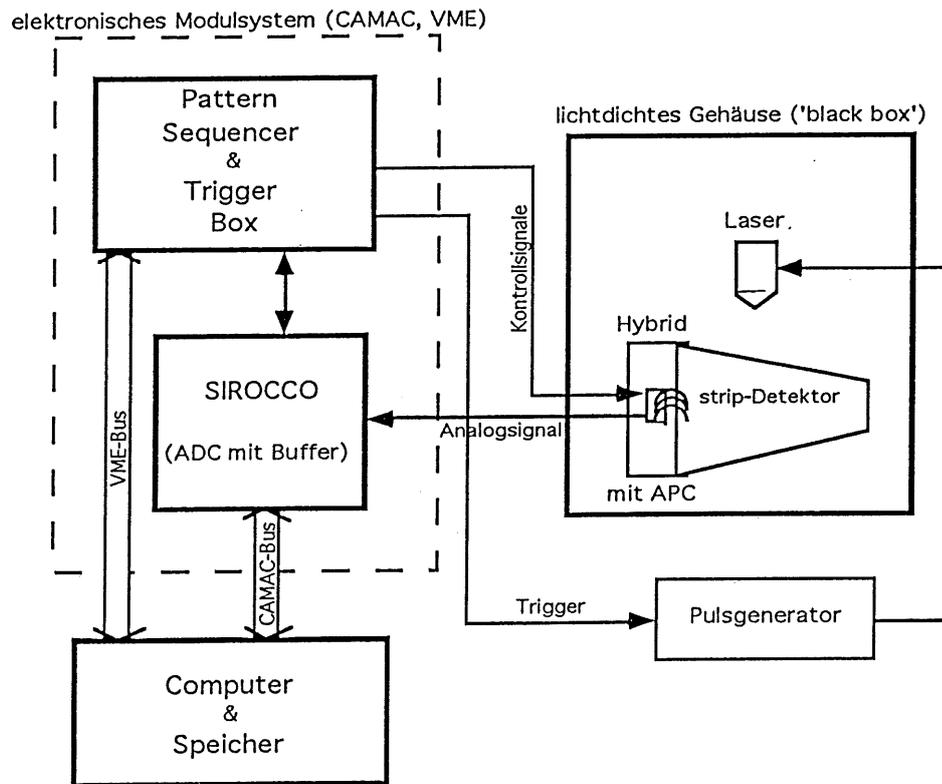


Abb. 23: Meßanordnung für die Lasertests.

Die Meßanordnung mit der Laserdiode ist schematisch in Abb. 23 skizziert. Detektor und Auslesechip wurden lichtgeschützt in einer 'black box' angeordnet. Die Laserdiode mit integrierter Optik konnte mittels einer μm -Schraube über dem Detektor bewegt werden. Die Signale des APC gelangen zum Analog-Digital-Wandler (SIROCCO), der seinerseits über den CAMAC-Bus vom Computer ausgelesen wurde. Die 14 Steuersignale für den APC wurden im 'Pattern Sequencer' erzeugt, einem freiprogrammierbaren Bitmuster-generator. Mit einem Rechnerprogramm wurden die erforderlichen Bitmusterfolgen (Sequenzen) generiert und dann in den 'Pattern Sequencer' geladen. Die 'Trigger Box' startete den 'Pattern Sequencer' und steuerte das Umschalten auf die jeweils erforderlichen Sequenzen (Initialisierung, Datennahme, Auslese, Pedestalsubtraktion). Die Datenspeicherung und Auswertung erfolgte mit dem auslesenden Computer.

3.3 Aufnahme und Auswertung der Daten

Am ausgewählten Streifendetektor wurde ein Prototyp-Auslesechip (APC) angebondet. Somit konnten (maximal) 64 Streifen ausgelesen werden. Der so eingeschränkte sensitive Bereich des Detektors ist in Abb. 24 skizziert.

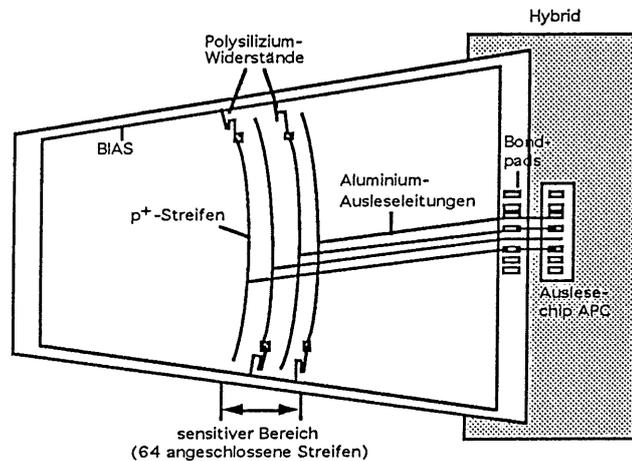


Abb. 24: Sensitiver Bereich des strip-Detektors mit 64 angeschlossenen Streifen.

Die Ausleseleitungen der anderen Streifen waren nicht angeschlossen; durch die angelegte Verarmungsspannung waren sie voneinander separiert. Bei allen Messungen mit dem strip-Detektor war eine Spannung von $U = 70 \text{ V}$ angelegt - der Detektor war vollständig verarmt.

3.3.1 Ladungseinkopplung über die Detektorrückseite ('pulsed backplane')

Die Spannungspulse wurden von einem Pulsgenerator synchron zur APC-Ansteuerung erzeugt und über den vorhandenen 'backplane'-Anschluß und die Rückfläche in den Detektor eingespeist. Im Ersatzschaltbild, Abb. 25, ist dargestellt, wie der Puls eingekoppelt wurde.

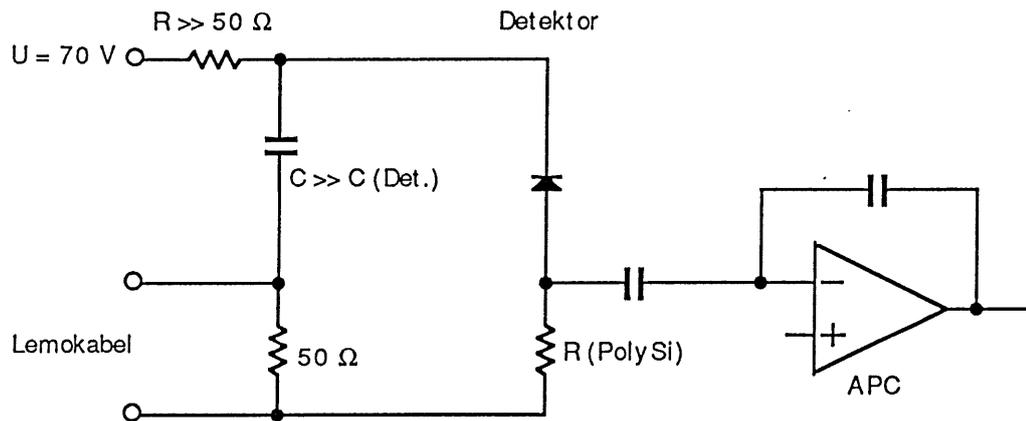


Abb. 25: Ersatzschaltbild für Streifendetektor und APC mit Einkopplung der Spannungspulse über den 'backplane'-Anschluß.

Über ein Lemokabel (mit einem $50\ \Omega$ Widerstand als Abschluß) wurde ein wenige Nanosekunden kurzer Spannungspuls eingekoppelt, der über den großen Kondensator, welcher den Detektor vom Pulsgenerator abtrennte, zum 'backplane'-Anschluß übertragen wurde. Um zu gewährleisten, daß der Puls vollständig durch den Detektor geht, wurde am Netzanschluß ein großer Widerstand eingebaut. Über die Detektorkapazität und die p^+/Al - Koppelkapazität wurde der Puls zum APC übertragen und von dort ausgelesen.

Das Ziel dieser Messungen war die Klassifizierung der einzelnen angeschlossenen Streifen in Bezug auf ihr Rauschverhalten und fehlerhafte Signalerkennung. Diese Einteilung erfolgt der Einfachheit halber in "gut" und "schlecht". Als "schlechte" Kanäle werden solche bezeichnet, bei denen bei einem Teilchendurchgang kein verwertbares Signal zu finden ist.

Die Kriterien dieser Klassifikation sind (die angegebenen Werte beziehen sich auf ADC-Einheiten):

- *Kanalinhalt liegt außerhalb des dynamischen Bereichs ('overflow')*:
die Pulshöhe des Kanals übersteigt den Digitalisierungsbereich des ADC (bei diesen Messungen beträgt die maximal mögliche Amplitude 1023);
mögliche Ursache: Schluß des Kondensators,
- *keine oder sehr geringe Pulshöhe*:
mögliche Ursachen sind: Unterbrechungen des p^+ -Streifens, des Aluminiums, Leitkanäle parallel zum elektrischen Feld (Defekte im Kristall),
- *zu großes Rauschen*:
das Rauschen des Kanals liegt im Bereich der zu erwartenden Signalpulshöhe, mögliche Ursache: zu hoher Dunkelstrom des Streifens und damit große Fluktuation ($>$ Signal).

Bei den Messungen mit 'pulsed backplane' wurden einzelne gleichgroße Pulse eingespeist (deren Höhe entsprach etwa 300 ADC-Einheiten), weshalb man für die einzelnen Streifen einen konstanten Wert erwartet, der nur von 'pedestal'- und 'common mode'-Schwankungen beeinflusst wird. Zur Kontrolle der Meßbedingungen werden bei den jeweils eingestellten Parametern ein 'pedestal'-, ein Signal- und nochmals ein 'pedestal'-File aufgenommen. Durch den Vergleich der beiden Pedestalverteilungen vor und nach dem Ereignis können Schwankungen festgestellt und bei der Auswertung korrigiert werden. (Bei den hier durchgeführten Messungen blieben die Bedingungen wegen der kurzen Meßzeiten konstant.)

Bei den Messungen mit gepulster Rückseite mußten nach dem Kriterium "keine oder sehr geringe Pulshöhe" die Streifen bzw. Kanäle 30 und 64 als "schlecht" charakterisiert werden. Ihre mittlere Pulshöhe ist deutlich geringer als bei den Streifen ihrer Umgebung. In Abb. 26 sind die Pulshöhenverteilungen eines "guten" und eines "schlechten" Kanals dargestellt. In einem Histogramm sind 600 Werte (Ereignisse) eingetragen.

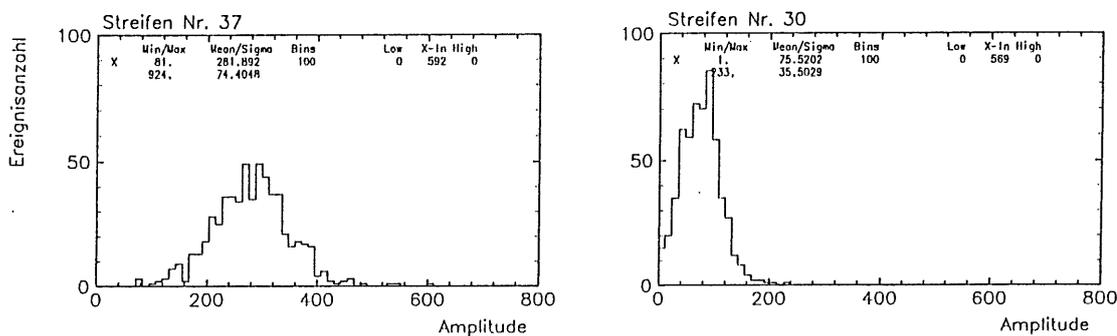


Abb. 26: a) Amplitudenverteilung eines "guten" Streifens (Nr. 37),
b) Amplitudenverteilung eines "schlechten" Streifens (Nr. 30).

Deutlich ist der Unterschied der mittleren Amplituden (alle Werte in ADC-Einheiten) zu erkennen. Bei Streifen 37 streuen die Meßwerte mit $\sigma = 63.0$ um den Mittelwert mit 277.0 ADC-Einheiten. Der Amplitudenmittelwert von Streifen 30 beträgt 75.5, die Standardabweichung $\sigma = 35.5$. Ursache für die geringe mittlere Pulshöhe und die geringere Streuung der Werte kann ein defekter Vorverstärker des APC sein. Die Streifen 30 und 64 wurden im Auswerteprogramm markiert und somit bei den anschließenden Lasertests nicht berücksichtigt.

In Abb. 27 sind die 600 Werte eines Files (Meßreihe) für alle Streifen dargestellt, a) 'pedestal', b) gepulste Detektorrückseite; analog dazu in Abb. 28 zwei Einzelereignisse.

Der Abfall der Amplitudenwerte bei den letzten Streifen ist auf einen internen Funktionsfehler des APC zurückzuführen. Dieses Phänomen wird näher untersucht. Es trat unveränderlich bei allen Messungen auf und konnte beim Signalfile durch die Pedestalsubtraktion korrigiert werden.

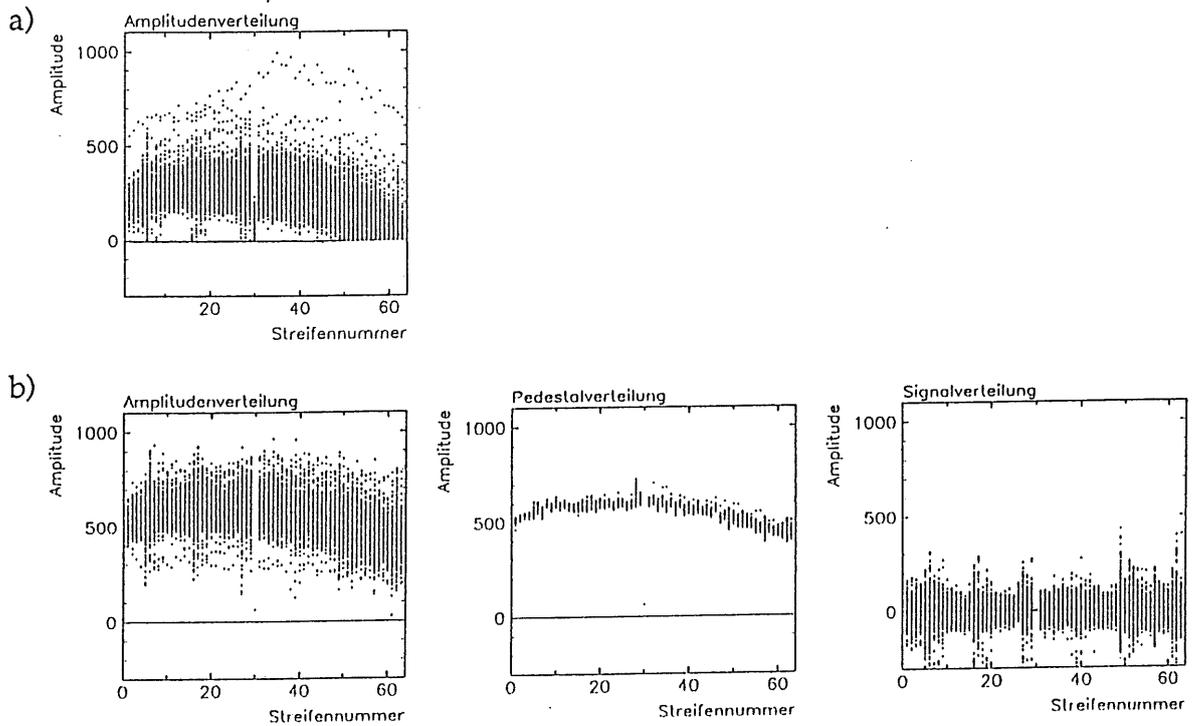


Abb. 27: a) Amplitudenverteilung des 'pedestal'-Files über 64 Streifen, b) Amplituden-, 'pedestal'- und Signalverteilung über 64 Streifen mit zusätzlichem Spannungspuls auf die Detektorrückseite.

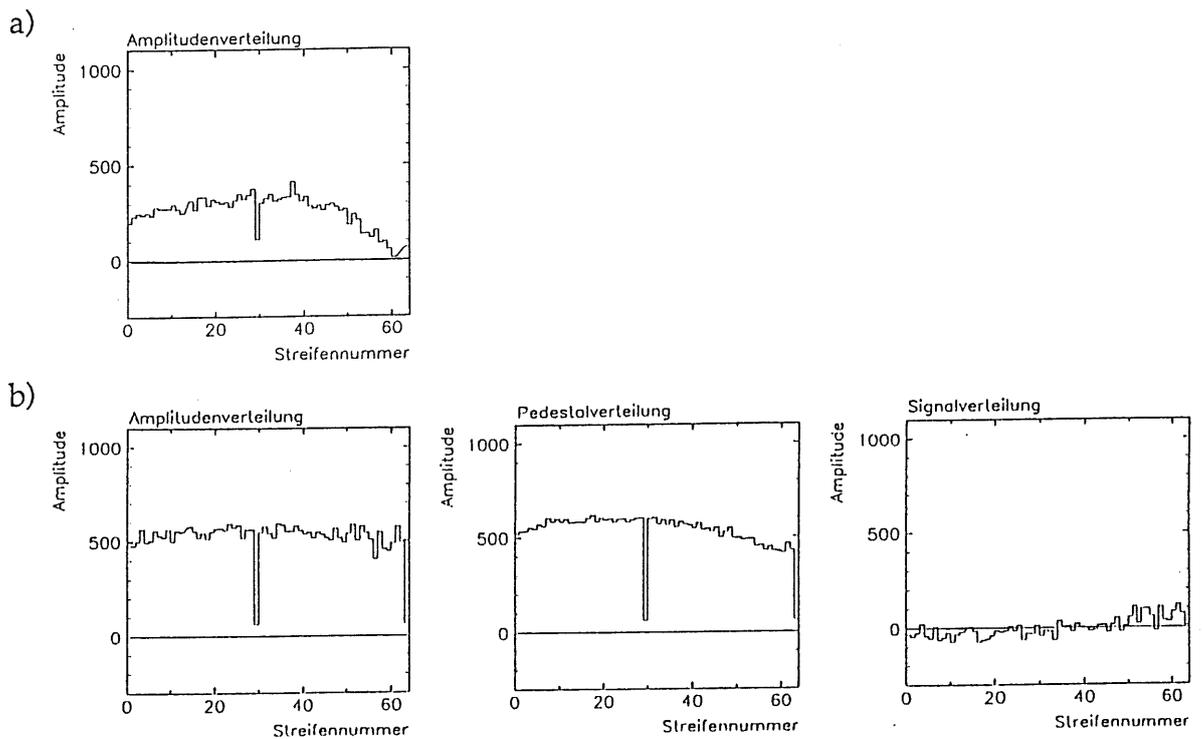


Abb. 28: a) Amplitudenverteilung eines Ereignisses ('pedestal'-File, 64 Streifen), b) Amplituden-, 'pedestal'- und Signalverteilung eines Ereignisses mit Spannungspuls auf die Detektorrückseite.

Der gleichmäßige Puls auf die Detektorrückseite wirkte wie ein erhöhtes 'pedestal', weshalb nach Abzug des mittleren 'pedestals' (welches aus dem selben File berechnet wurde) keine Signalladung übrigbleibt. Die Erhöhung gegenüber dem wirklichen 'pedestal' konnte nicht erkannt werden. Die Signalverteilung zeigt das hohe Rauschen des Detektors; die Amplitudenwerte streuen im Mittel um 55 ADC-Einheiten (Fehlerbetrachtung, s. Anhang 2).

3.3.2 Laserpulse

Mit dem Laserlicht, das scharf gebündelt auf den Detektor fiel, wurden die Bedingungen eines Teilcheneinfalls simuliert. Die Anzahl der Photonen hängt von Impulsdauer und Lichtintensität ab. Diese werden so gewählt, daß die Anzahl der erzeugten Ladungsträger mit dem Durchgang eines MIP vergleichbar ist. Der Unterschied zwischen Laserlicht und ionisierender Strahlung besteht darin, daß die Photonen schon an der Oberfläche des Detektors konvertieren, weshalb keine Volumenionisation erfolgt. Wegen dieser sehr geringen Eindringtiefe (wenige μm) sind Drift- und Diffusionsvorgänge der erzeugten Ladungsträger vernachlässigbar. Dies entspricht zwar nicht den späteren Einsatzbedingungen. Zum Testen der einzelnen p^+ -Streifen und der gesamten Auslekette ist die Lasermethode jedoch gut geeignet. Sie soll zur automatisierten Prüfung der Serien-Detektoren eingesetzt werden.

Die Laserdiode war fest über der Detektoroberfläche montiert. Aus diesem Grund traf der Strahl während einer Messung ständig auf einen bestimmten Ort. In der Realität ist jedoch die Wahrscheinlichkeit für ein mehrmaliges Treffen eines bestimmten Streifens äußerst gering. Die Laserdiode wurde im Pulsmodus synchron zur Auslese der Streifen angesteuert. Der Laserpuls hatte eine Länge von 100 ns.

Da schon bei den Messungen mit 'pulsed backplane' festgestellt wurde, daß die Meßbedingungen konstant blieben, wurden bei den Lasermessungen nur jeweils ein 'pedestal'- und ein Signalfile mit jeweils 1000 Ereignissen aufgenommen. In Abb. 29 sind die Amplitudenverteilungen des getroffenen Streifens 20 sowie seiner vier Nachbarstreifen histogrammiert, a) vom 'pedestal'-, b) vom Signalfile. In allen Histogrammen sind 1000 Amplitudenwerte eingetragen. Die Nachbarstreifen (18, 19, 21, 22) enthalten auch im Signalfile (d. h. mit eingeschaltetem Laserstrahl) nur ihren 'pedestal'-Wert, der im Mittel bei 400 ADC-Einheiten liegt. Die Ladung, die durch den Laserstrahl eingebracht und auf Streifen 20 gesammelt wurde, entsprach etwa 430 ADC-Einheiten, so daß der Amplitudenmittelwert dieses Streifens bei 804.0 liegt. Durch Kalibrierung mit einem pad-Detektor wurde ermittelt, daß diese

ca. 400 ADC-Einheiten der Hälfte der Ladung entsprechen, die ein minimal ionisierendes Teilchen (MIP) im Detektor deponieren würde*.

Die Amplitudenverteilungen der einzelnen Streifen können durch eine Gaußsche Normalverteilung beschrieben werden. Die Standardabweichung, die ein Maß für das Rauschen ist, beträgt bei allen Streifen ≈ 120 ADC-Einheiten. Die Meßfehler betragen im Mittel 20 bis 30 ADC-Einheiten. (Genauere Fehlerbetrachtung s. Anhang 2.)

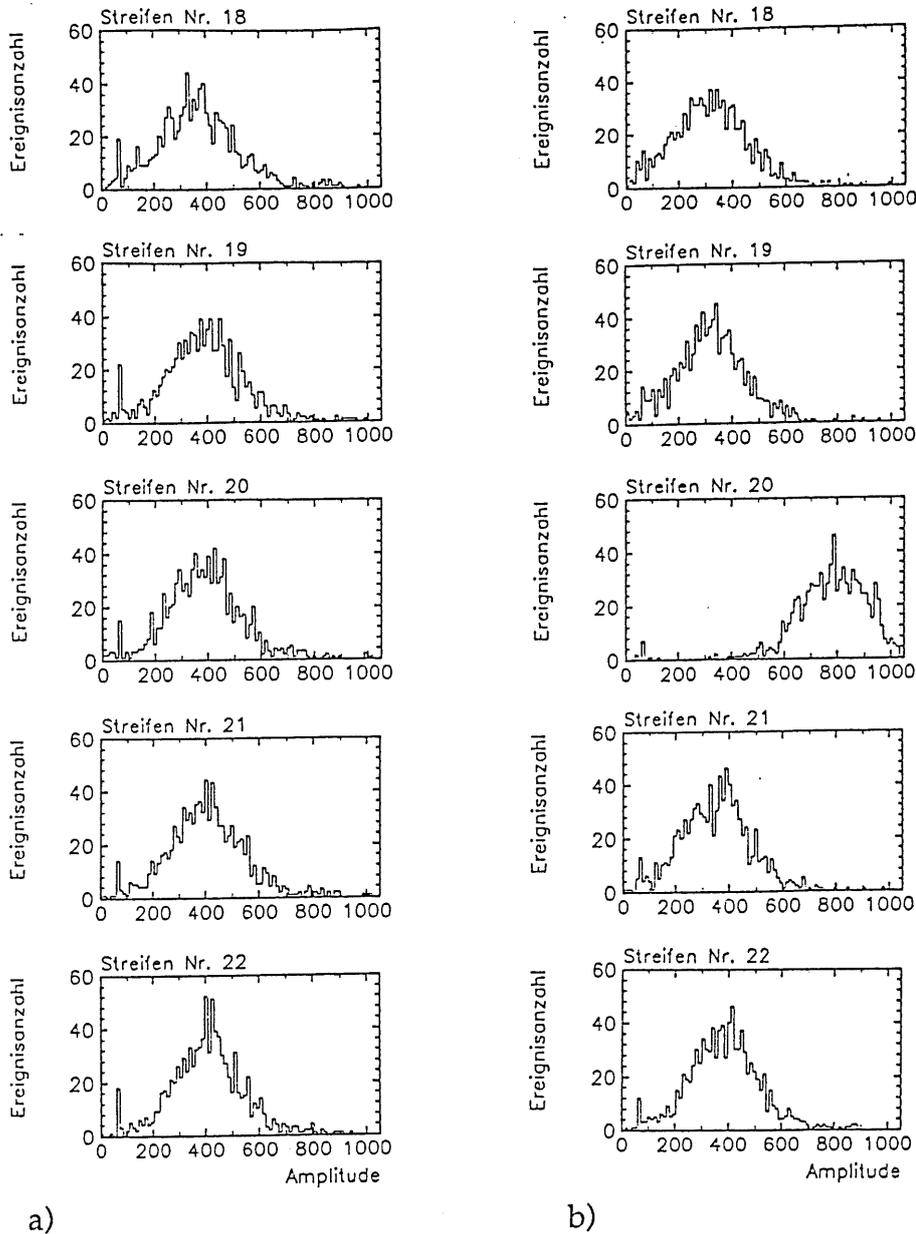


Abb. 29: Vergleich der Amplitudenverteilungen der Streifen 18 bis 22 mit 1000 eingetragenen Ereignissen, a) 'pedestal'-File, b) Signalfile (bei Streifen 20 erhöhte Ladung durch den Laserstrahl).

* Die Kalibrierung erfolgte, indem der pad-Detektor mit dem Laserstrahl der selben Stärke bestrahlt und das ausgelesene Signal mit dem Signal verglichen wurde, welches beim Teilchenstrahltest durch Pionen (= MIP) erzeugt wurde, s. Kap. 4.4.

Durch Abzug von 'pedestal' und 'common mode' bei jedem Streifen erhält man die Signalverteilung. Das 'pedestal' wird für jeden Streifen aus den Werten der vorangegangenen 40 Ereignisse berechnet. Falls der Amplitudenwert eines Kanals bei einem Ereignis größer als ein bestimmter festzulegender Schwellwert ist, d. h. eine Signalladung enthält, wird dieser Wert nicht in die 'pedestal'-Berechnung einbezogen. Diese Berechnungsmethode ist für reale Einsatzbedingungen konzipiert, wenn jeder Streifen nur sehr selten einen Teilchendurchgang registriert. Da bei den Lasermessungen ein bestimmter Streifen ständig getroffen wird, kann von diesem Streifen kein mittlerer 'pedestal'-Wert berechnet werden. Für die Lasertests - und nur für diese - wurde das 'pedestal' der getroffenen Streifen deshalb festgelegt zu : $p_k = p_{k-3}$. Die Differenz zwischen den Mittelwerten der Streifen 20 und 17 im 'pedestal'-File beträgt 14.6 ADC-Einheiten (zusätzlicher systematischer Fehler).

Die Berechnung des 'pedestals' der einzelnen Streifen wurde mit dem Auswerteprogramm vorgenommen (s. Kap. 3.2.2 Software). Hiermit wurden ebenfalls die Pedestalsubtraktion und die 'common mode' - Korrektur durchgeführt. Die Pedestalsubtraktion wird später vom SIROCCO bzw. OnSiRoC übernommen, wodurch dann Zeit und Speicherkapazität eingespart werden. Bei den Testmessungen kamen diese Optionen jedoch noch nicht zur Anwendung.

Abb. 30 zeigt die Amplituden-, 'pedestal'- und Signalverteilung aller Streifen mit jeweils 1000 Ereignissen. Man erkennt das große Rauschen des Detektors. Die maximale Amplitude ist 1023, größere Ladungen können nicht mehr ausgelesen werden. Kanäle mit Amplituden > 1023 befinden sich im sog. 'overflow' und werden im Auswerteprogramm herausgeschnitten.

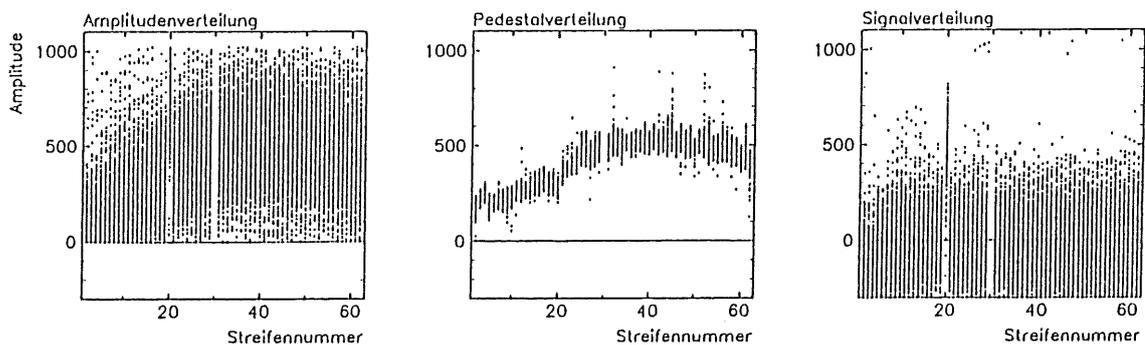


Abb. 30: Amplituden-, 'pedestal'- und Signalverteilung über 64 Streifen mit einem auf Streifen 20 gerichteten Laserstrahl (1000 Ereignisse je Streifen).

In den Amplitudenverteilungen (in Abb. 30) scheint das Signal des Lasers im Rauschen fast unterzugehen. Selbst die mittleren 'pedestals' (aus jeweils 40 Amplitudenwerten berechnet) schwankten innerhalb von 100 ADC-Einheiten. Die Werte für den 'common mode' bewegten sich im Bereich von 1.4 ± 80 ADC-Einheiten. Nach Abzug von 'pedestal' und 'common mode' hebt sich in der Signalverteilung der getroffene Streifen klar heraus. Allgemein schwanken

jedoch die Werte aller Streifen weiterhin in einem Bereich von mindestens 600 ADC-Einheiten, sodaß alle Streifen nach den oben genannten Qualitätskriterien als "schlecht" eingestuft werden müssen.

Ebenfalls wird in Einzelereignissen der Laserpuls gut erkannt. Durch das große Rauschen des Detektors werden allerdings neben dem Laserpeak in manchen Ereignissen auch weitere Signalpeaks gefunden, in den Abb. 31 und 32 durch Kreuze gekennzeichnet.

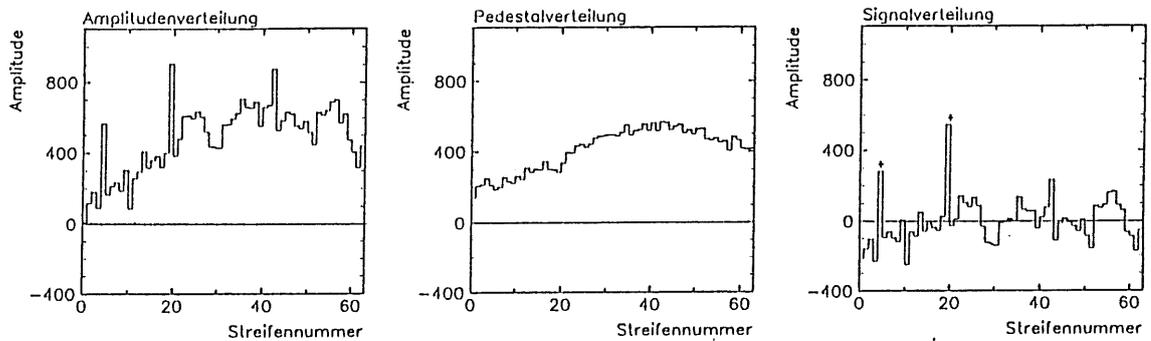


Abb. 31: Amplituden-, 'pedestal'- und Signalverteilung über 64 Streifen vom Einzelereignis Nr. 322 (mit Laserpuls auf Streifen 20).

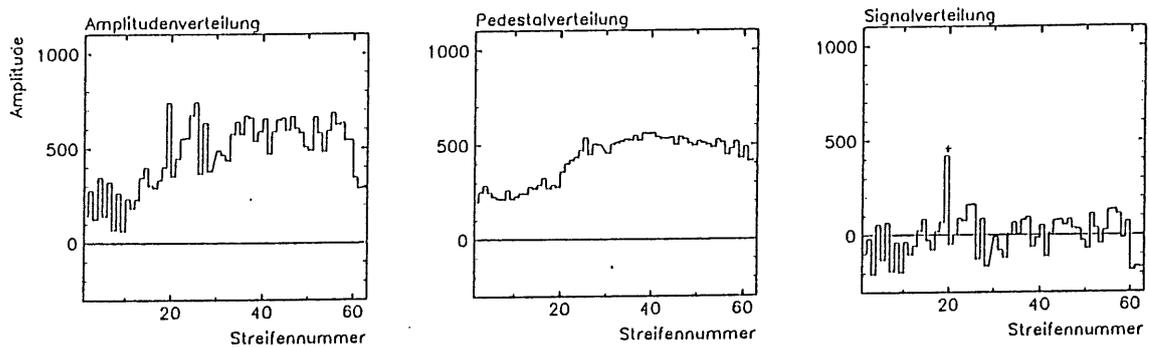


Abb. 32: Amplituden-, 'pedestal'- und Signalverteilung über 64 Streifen vom Einzelereignis Nr. 700 (mit Laserpuls auf Streifen 20).

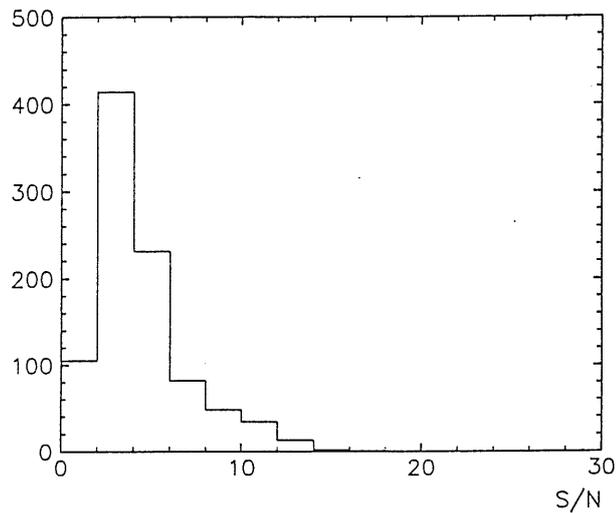


Abb. 33: Signal-zu-Rausch-Verhältnis des Streifendetektors mit Laserpuls.

Das S/N-Verhältnis ist dementsprechend schlecht, im Mittel nur 3:1, s. Abb. 33. Gefordert wird ein S/N von mindestens 10:1. Nun muß berücksichtigt werden, daß durch das Laserlicht nur etwa 50% der Ladung, die ein MIP erzeugen würde, im Detektor deponiert wurde, d. h. $S/N|_{MIP} \approx 6$.

Das Rauschen des untersuchten Prototypdetektors, das durch den hohen Guardstrom und den Kurzschluß zwischen BIAS- und Guardleitung verursacht wird, ist unakzeptabel hoch. Bei den Seriedetektoren müssen solche Defekte ausgeschlossen werden.

4 TEST DER PAD-DETEKTOREN

Pad-Detektoren wurden von zwei Halbleiterherstellern ("SINTEF Oslo" und "Halbleiterwerk Frankfurt/Oder") angefertigt. Die statischen Messungen dienen dem Vergleich der Detektoren. Mit den dynamischen Messungen wurden die Effektivität und das S/N-Verhältnis ermittelt.

Die Spezifikationen der gelieferten Detektoren von den Herstellerfirmen sind in Tabelle 3 aufgeführt.

4.1 Statische Messungen

An den pad-Detektoren wurden folgende statische Messungen vorgenommen.

- C-U-Kennlinie einzelner pads: zur Ermittlung der Verarmungsspannung,
- I-U-Kennlinie einzelner pads und des Guardrings: zur Messung der Leckströme.

a) Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie

Die Kapazität wurde zwischen einzelnen pads und der Detektorrückseite ('backplane') gemessen. Abb. 34 zeigt die C-U-Kurven dreier verschiedener pads eines Detektors der Firma SINTEF Oslo, Abb. 35 diejenigen eines pad-Detektors vom Halbleiterwerk Frankfurt/Oder. Hier gibt es keine gravierenden Unterschiede. Aus den verschiedenen Flächen resultieren die unterschiedlichen Kapazitätswerte. Ebenso wie bei den strip-Detektoren ist deutlich die Verarmungsphase und der Übergang zur vollständigen Verarmung bei $U_{\text{depl}} = 60 \text{ V}$ erkennbar.

Tabelle 3: Vergleich der von den Herstellerfirmen angegebenen Werte und Toleranzen für die pad-Detektor-Prototypen: /30/,/33/

	<i>SINTEF Oslo</i>	<i>HL.-werk Eft./O.</i>	<i>Einheit</i>
<i>Geometrie</i>			
Anzahl der konzentrischen Ringe	8	8	
Anzahl der azimutalen Sektoren	4	4	
Anzahl der pads	32	32	
Abstand zwischen pads einer Reihe	50	50	μm
größte Padfläche	175.0	175.0	mm^2
kleinste Padfläche	14.3	14.3	mm^2
<i>Material</i>			
Wafer-Dicke	(380 ± 15)	(350 ± 15)	μm
Wafer-Dotierung	n-typ (P)	n-typ (P)	
Substratwiderstand	(4 ± 1)	(4 ± 1)	$\text{k}\Omega \text{ cm}$
Orientierung	(111)	(111)	
<i>elektrische Parameter</i>			
Verarmungsspannung	60 (max. 90)	50	V
Kapazität (bei $U = 70 \text{ V}$)	(715 ± 7)	-	pF
Schichtwiderstand der p^+ -Gebiete	55 (max. 150)	(100 ± 10)	Ω/sqr
Isolationswiderstand zwischen pads	2 (bei 1 V)	≤ 10 (bei 5 V)	$\text{M}\Omega$
Leckstrom des Guard	(375 ± 415) (bei 70 V)	-	nA
Leckstrom des aktiven Gebietes	(230 ± 100) (bei 70 V)	$(8 \pm 6) 10^4$ (bei 50 V)	nA

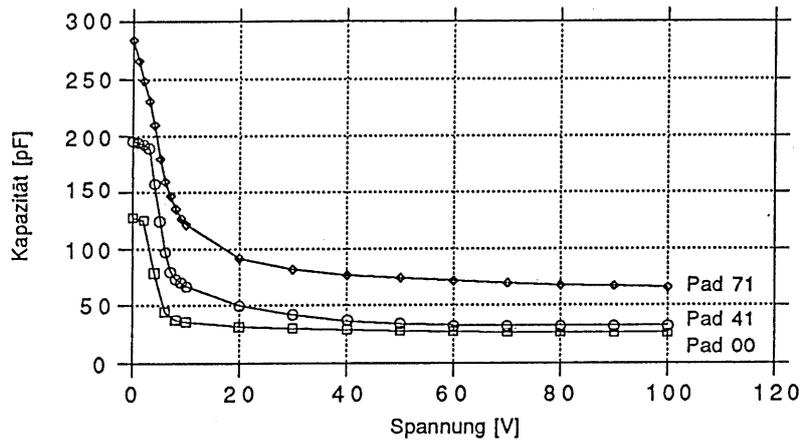


Abb. 34: Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie Detektor ZP32#4 aus Oslo.

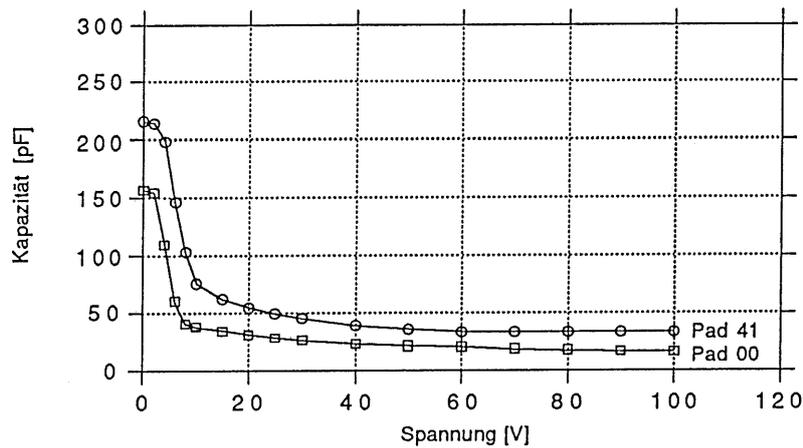


Abb. 35: Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie Det. #18 aus Frankfurt/Öder.

Eine Gegenüberstellung der erwarteten und gemessenen Werte für die Kapazität dieser pads eines vollständig verarmten Detektors enthält Tabelle 4. Die Erwartungswerte wurden bestimmt nach der Formel:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (4.1)$$

mit $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$

$\epsilon_r = 12 \text{ (Si)}$

$A_{00} = 20.8 \text{ mm}^2$

$A_{41} = 54.9 \text{ mm}^2$

$A_{73} = 175.0 \text{ mm}^2$

$d = 380 \text{ }\mu\text{m}$

Tabelle 4: Vergleich der Erwartungs- und Meßwerte der Kapazität ausgewählter pads je eines Detektors aus Oslo und Frankfurt/Oder:

pad-Nr.	pad - Fläche	Theorie - Wert	Meßwert (Oslo)	Meßwert (Fft./O)
00	20.8 mm ²	5.816 pF	26.0 pF	16.4 pF
41	59.9 mm ²	15.350 pF	32.9 pF	33.4 pF
73	175.0 mm ²	48.930 pF	66.0 pF	-

Die gemessenen höheren Werte gegenüber den theoretisch erwarteten hängen mit den Streu- bzw. Koppelkapazitäten zwischen den pads sowie zwischen den Ausleseleitungen, die pads und Bondpads verbinden, zusammen.

b) Strom-Spannungs-Kennlinie

Die Strom-Sperrspannungs-Kennlinien wurden für den Guard und einige ausgewählte pads gemessen.

Die Forderung, daß die Leckströme 1 µA nicht überschreiten sollen, konnte von den Detektoren des Halbleiterwerkes Frankfurt/Oder nicht eingehalten werden. Schon bei einer Spannung von $U = 70$ V wurden Ströme > 1 µA gemessen, s. Abb. 36. Der Verlauf der Kennlinie weist auf einen weiteren Anstieg der Leckströme hin. Die Ursache für dieses Verhalten liegt im Aufbau der pads begründet. Sie sind ganzflächig mit Aluminium bedeckt, wodurch die Defektanzahl erhöht ist. Auf dieses Problem wurde bereits im Kap. 2.3.3 hingewiesen. Die pads der Detektoren der Firma SINTEF Oslo sind weitestgehend mit einer dünnen SiO₂-Schicht bedeckt. Ihre Leckströme entsprechen sehr gut den Anforderungen. Sie liegen sogar nur im nA-Bereich, s. Abb. 37. Allerdings stieg der Guardstrom bei allen Detektoren auf einige µA (Abb. 38) und beim Dauertest über etwa 30 Stunden sogar auf 5 mA (Abb. 39)!

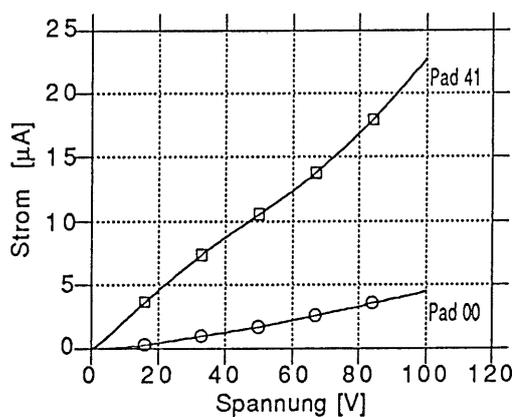


Abb. 36: I-U-Kennlinien Detektor #28 (Frankfurt/Oder).

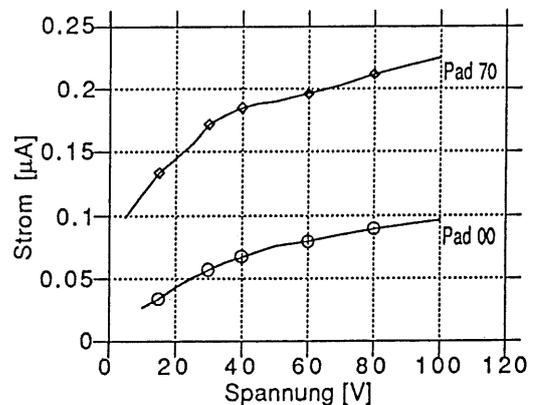


Abb. 37: I-U-Kennlinien ZP32#4 (Oslo).

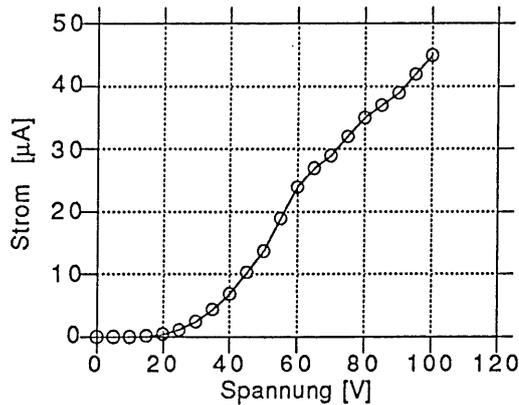


Abb. 38: I-U-Kennlinie Guard (ZP32#4).

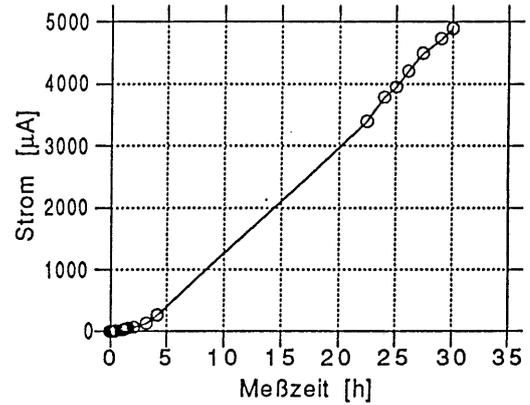
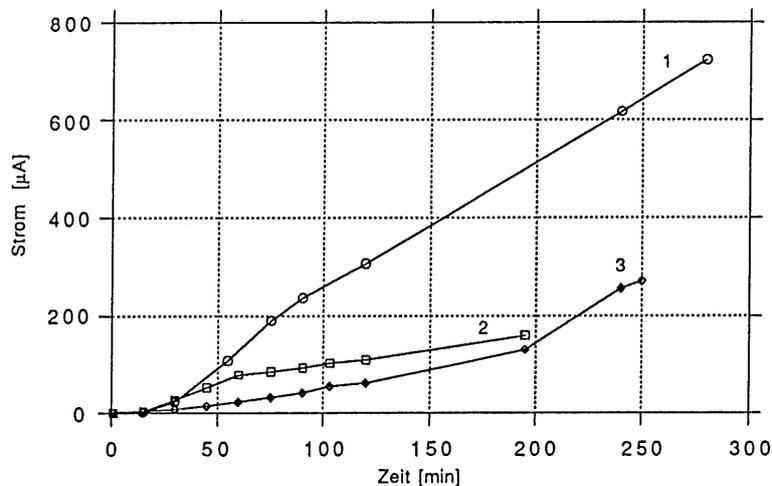


Abb. 39: Anstieg des Guardleckstroms bei $U = 70 \text{ V}$ innerhalb von 30 Stunden.

Als Ursache werden hygroskopische Eigenschaften der Polyimid-Passivierungsschicht vermutet. Es wird angenommen, daß Wassermoleküle an der Detektoroberfläche eindringen und, da sie Dipole sind, Polarisationsladungen an der Siliziumoberfläche induzieren, die ihrerseits Strompfade bilden. Daraufhin wurde der Detektor mehrere Tage bei $100 \text{ }^\circ\text{C}$ getempert und danach der Leckstrom bei einer Spannung von $U = 70 \text{ V}$ über einen Zeitraum von mehreren Stunden erneut aufgenommen. Diese Prozedur wurde zweimal wiederholt. Das Ergebnis ist in Abb. 40 dargestellt. Die Anstiegszeit des Guardstroms konnte durch die Trocknungsprozesse etwas herabgesetzt werden, aber weiterhin wurden Endwerte in der Größenordnung $> 100 \text{ } \mu\text{A}$ erreicht. Daraus muß geschlossen werden, daß ein grundsätzlicher Fehler in der Struktur des Guardrings oder bei den Herstellungsprozessen vorliegt, der im Moment noch nicht aufgeklärt ist.



- 1) 11. 09. 1992: 2 Tage getempert bei $100 \text{ }^\circ\text{C}$
- 2) 14. 09. 1992: nach weiteren 2.5 Tagen
- 3) 16. 09. 1992: nach weiteren 2 Tagen

Abb. 40: Anstieg des Guardstroms nach dreimaligem Temperungsprozeß ($100 \text{ }^\circ\text{C}$), gemessen mit der Spannung $U = 70 \text{ V}$ (Detektor ZP32#11).

4.2 Dynamische Messungen

4.2.1 Ausleseelektronik (Auslesechip PRC)

Entsprechend den Anforderungen, die an die pad-Detektoren gestellt werden, wurde von E. Nygård et al. /38/ ein spezieller 'pad detector readout chip' (PRC) entwickelt. Dieser Chip liest und verarbeitet die Signale von vier pads einer Reihe eines Detektorsegments. Für den BST-1 (BST-2) werden somit 512 (1024) pad-Auslesechips benötigt. Die PRC's mit den Abmessungen 0.95×5.7 mm² werden auf Hybrids an der äußeren Seite der Detektoren geklebt, ähnlich wie bei den strip-Detektoren.

Die Aufgabe eines Chips besteht in der Verstärkung und dem Vergleich der Ladungen von vier zu einem Ring gehörenden pads mit einem festgelegten Schwellwert (in einer Zeit von 45 ns) und der Weiterleitung des durch ein logisches "ODER" erhaltenen Signals. Für den durchgeführten Teilchenstrahltest wurde ein anderer ähnlich arbeitender Chip ('VIKING') verwendet, da zu diesem Zeitpunkt die endgültige Version des PRC noch nicht entwickelt war.

4.2.2 Experimenteller Aufbau

Auf der Grundlage der statischen Messungen wurde der pad-Detektor ZP32#11 der Firma SINTEF Oslo für die dynamischen Testmessungen ausgewählt. Dynamische Messung bedeutet hier die Bestrahlung mit dem Teilchenstrahl eines Beschleunigers. Diese Testmethode hat folgende Vorzüge:

- Die Beschleunigeranlagen sind in der Lage, verschiedenste Teilchensorten zu erzeugen und für die Tests bestimmte Teilchen nach Bedarf zur Verfügung zu stellen.
- Energie und Impuls des Teilchenstrahls können variiert werden. Der Bereich der Energie erstreckt sich über mehrere Größenordnungen bis hin zu Energien ≥ 100 GeV.
- Die Strahlintensität ist so hoch, daß kurze Meßzeiten möglich sind.

Ein Test im Teilchenstrahl stellt somit eine Möglichkeit dar, Detektoren, die in Experimenten der Hochenergiephysik eingesetzt werden sollen, unter realitätsnahen Bedingungen zu testen.

Die Messungen wurden in der Zeit vom 3. 6. 1993 bis 14. 6. 1993 mit einem Teilchenstrahl des Protonensynchrotrons (PS) des CERN in Genf durchgeführt. Als Teilchen wurden Pionen (π^-) mit einer Energie von 6 GeV verwendet.

Der experimentelle Aufbau am Teilchenstrahl ist im Bild 40 skizziert. Eine Anordnung von vier Szintillatoren, darunter ein Vetozähler, diente als Triggersystem zur Steuerung des ADC. Der pad-Detektor wurde direkt hinter dem ersten Szintillator angeordnet.

Beim pad-Detektor waren die vier pads der Reihe sechs (pad 60 ... 63) an den Vorverstärkerchip 'VIKING' angeschlossen. Alle anderen pads des Detektors waren auf Erdpotential gelegt.

Die Signale wurden zu einem ladungsempfindlichen (integrierenden) 10-bit-ADC weitergeleitet. Die Auslese der Daten aus den vier Kanälen des ADC erfolgte über einen Computer, die Rohdaten wurden auf Optodisks gespeichert.

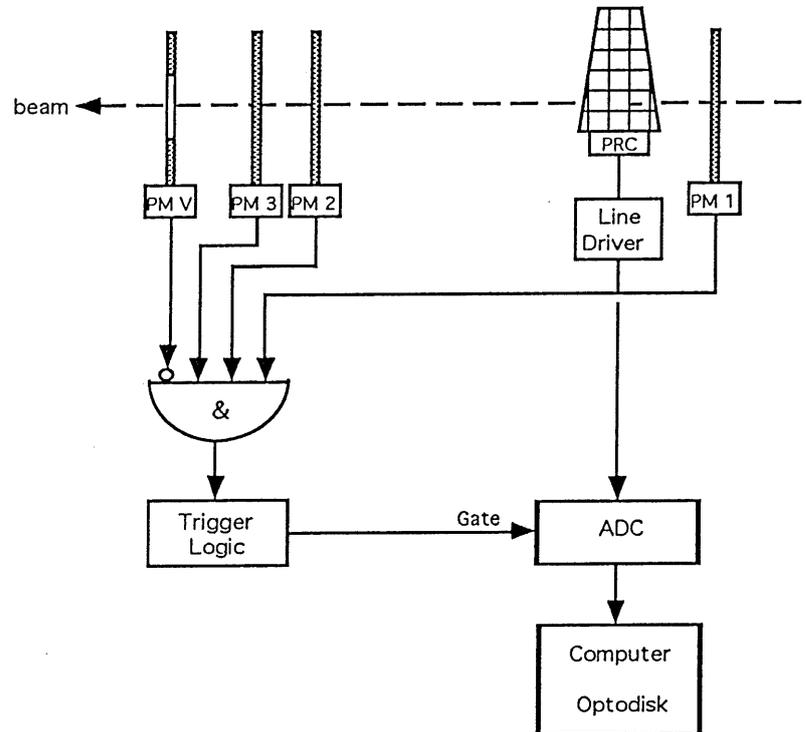


Abb. 41: Blockschaltbild des experimentellen Aufbaus am Teilchenstrahl.

4.3 Datennahme - Test im Teilchenstrahl

Bei einer bestimmten Einstellung der Meßparameter wurden drei Datenfiles aufgenommen: ein 'pedestal'-, ein Signal- und nochmals ein 'pedestal'-File. Jedes dieser Files (gespeichertes Datenpaket) besteht aus 10000 Ereignissen, wobei ein Ereignis vier Werte enthält - jeweils die Amplituden der vier pads. Ziel der Messung waren die Ermittlung der Effektivität des pad-Detektors, die dem Verhältnis zwischen Anzahl der Trigger und der Anzahl der von den pad-Detektoren "gesehenen" Signale entspricht und das S/N-Verhältnis.

Folgende Parameter wurden verändert:

- Verarmungsspannung des Detektors: 20 ... 100 V (in 10-Volt-Schritten),
- Position im Teilchenstrahl (durch Korrekturmaßnahmen).

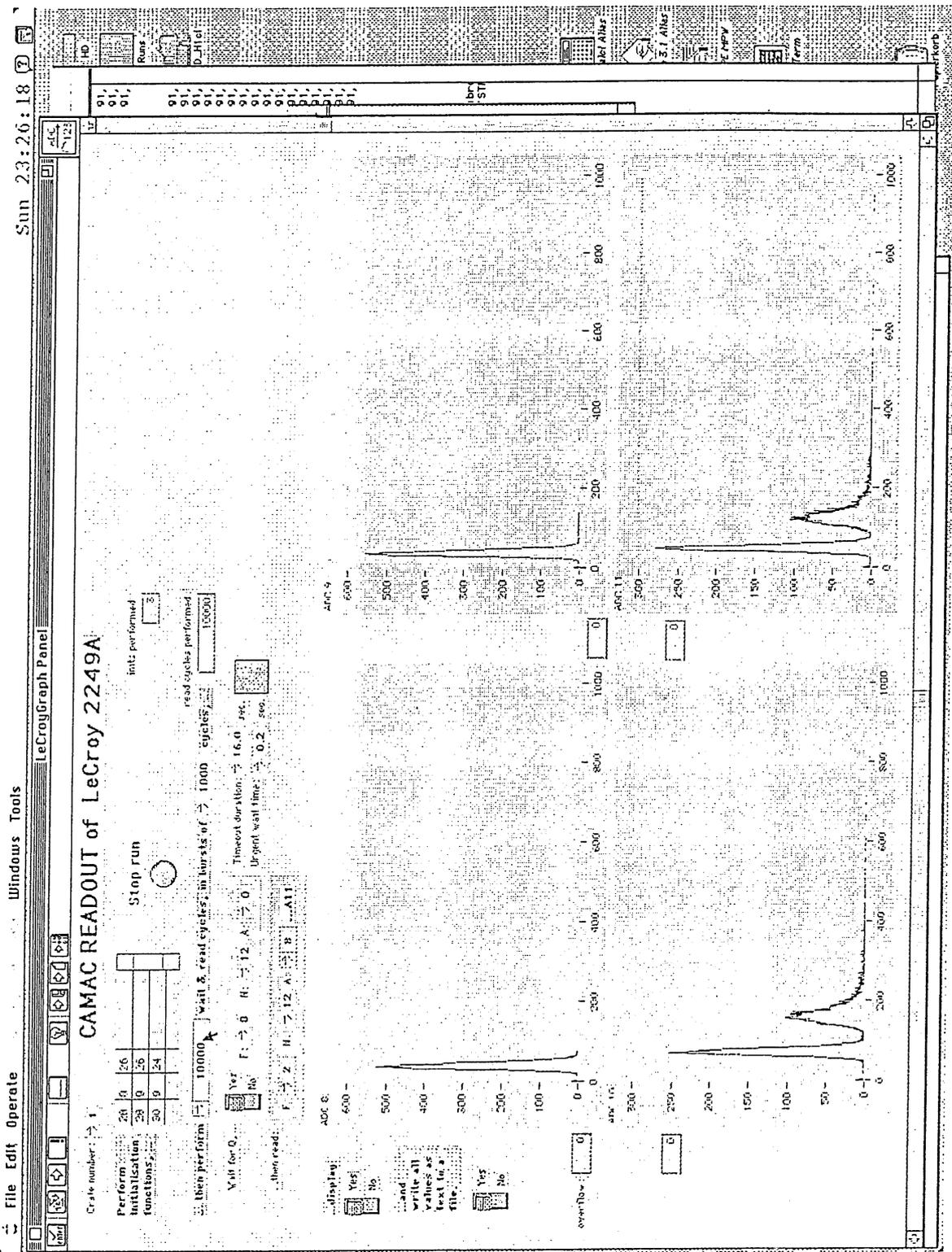
Der Auftreffpunkt des Teilchenstrahls war etwa auf die Mitte zwischen den pads 60 und 61 ausgerichtet. Daher war es äußerst unwahrscheinlich, im pad 63 ein Signal zu finden, hier wurden nur 'pedestal'-Werte gemessen. Auch pad 62 wurde kaum getroffen, erhöhte Amplitudenwerte könnten jedoch durch Kopplung zu Nachbarpads oder zwischen den Ausleseleitungen auftreten.

4.4 Auswertung der dynamischen Messungen

Die aufgenommenen Amplitudenwerte konnten schon während der Messungen im CERN histogrammiert auf dem Monitor beobachtet werden. Abb. 42 ist ein Bildschirmausdruck des Signalfiles, das bei der Detektorspannung $U = 80$ V aufgenommen wurde. Die Daten wurden anschließend mit dem 'Look'-Programm ausgewertet und ebenfalls in Histogramme eingetragen, s. Abb. 43. Die vier Histogramme entsprechen den vier pads, in der Reihenfolge 63, 62 (oben), 61, 60 (unten). In jedem Histogramm sind 10000 Werte eingetragen. Der schmale 'peak' (1) in allen vier Grafiken ist der 'pedestalpeak'. Er kann durch eine Gaußverteilung beschrieben werden. In den pads 61 und 60 treten Signalpeaks (2) auf, die die charakteristische Landauverteilung aufweisen (Fehlerbetrachtung s. Anhang 2).

In Abb. 44 sind die Mittelwerte der 'pedestalpeaks' (kurz mittlere 'pedestals') für jedes pad in Abhängigkeit von der angelegten Verarmungsspannung dargestellt. Die drei Meßpunkte je Spannung resultieren aus den o. g. drei aufgezeichneten Files. Es ergibt sich, daß die angelegte Spannung keinen Einfluß auf die mittleren 'pedestals' hat, ebensowenig wie die Tatsache, ob der Teilchenstrahl in Betrieb war oder nicht.

H1 BST CERN TESTS JUNE 1993



Zeuthen, RAL

Abb. 42: Bildschirmausdruck, aufgenommen während der Datenaufnahme mit einem Teilchenstrahl, der die pads 60 und 61 traf. Der Detektor war mit der Spannung $U = 80$ V verarmt.

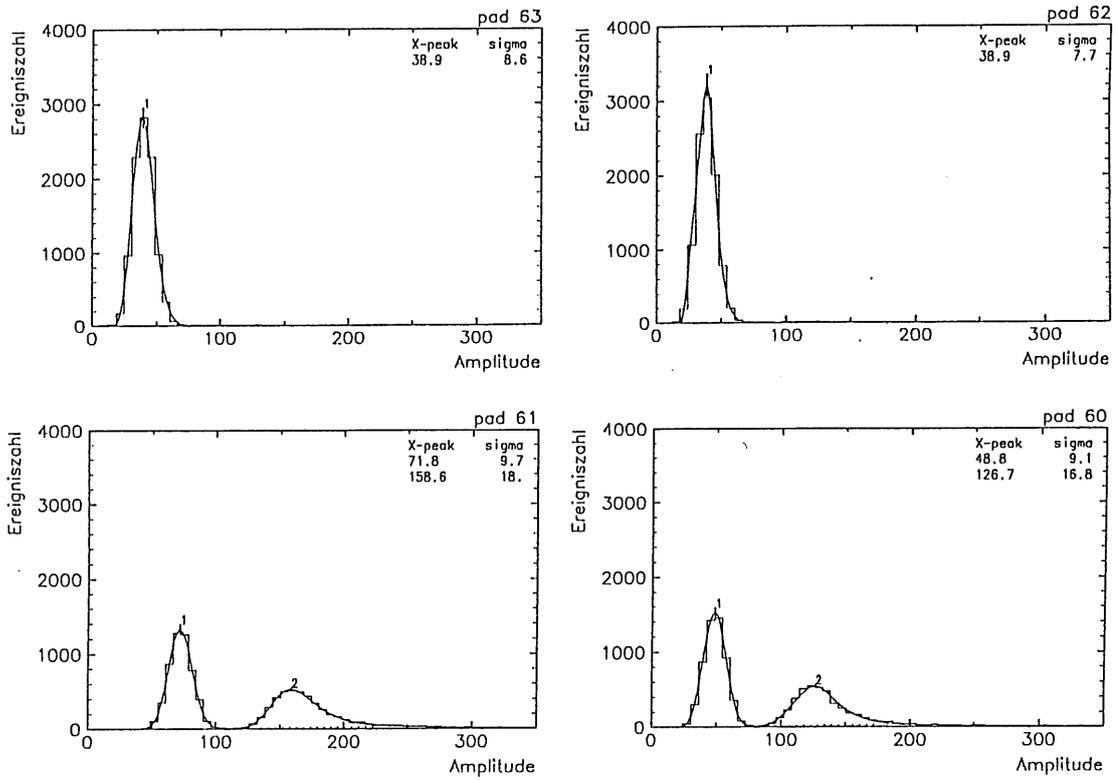


Abb. 43: Amplitudenverteilungen ('pedestal' und Signal) der vier ausgelesenen pads in der Reihenfolge: 63, 62, 61, 60 mit jeweils 10000 Ereignissen.

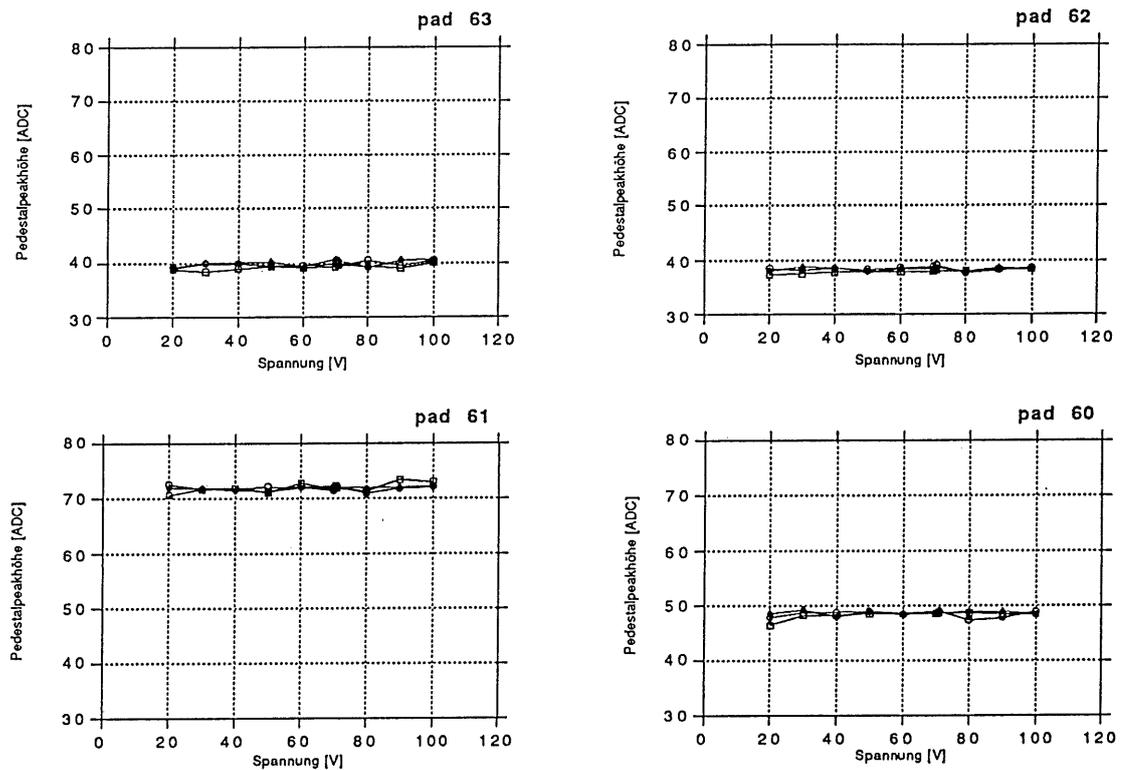


Abb. 44: Mittelwert der 'pedestalpeaks' der vier pads mit drei Messungen bei jeder Spannung.

Die mittlere quadratische Abweichung der 'pedestalpeaks' σ_{ped} kennzeichnet das Rauschen der ADC-Kanäle. In Abb. 45 sind in Anlehnung an die vorhergehende Abb. 44 die Standardabweichungen der vier Kanäle (für jedes pad) über der Spannung aufgetragen. Die drei Werte bei gleichen Spannungen unterscheiden sich kaum. Jedoch ist ein deutlicher Abfall der Standardabweichung bis etwa zur Verarmungsspannung $U = 70$ V zu erkennen, danach bleiben die Werte konstant. Damit bestätigt sich, daß das Rauschen auch von der Detektorkapazität abhängt und das ENC mit abnehmender Kapazität ebenfalls kleiner wird.

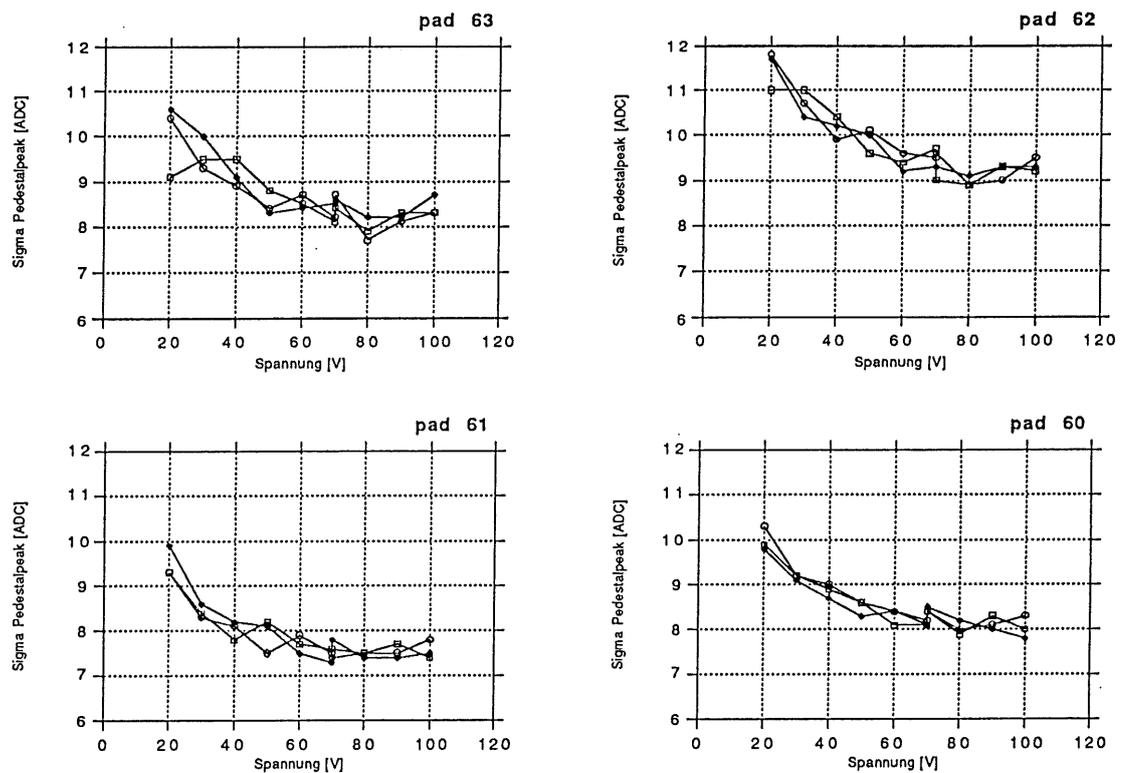


Abb. 45: Sigma (mittlere quadratische Abweichung) der 'pedestal'-Verteilungen der vier pads mit drei Messungen bei jeder Spannung.

Die wahrscheinlichsten Werte der Signal-(Landau)-verteilungen der beiden "getroffenen" pads 60 und 61 sind in eine Grafik (Abb. 46) eingetragen, ebenfalls in Abhängigkeit von der Spannung. Auch hier ist sehr schön zu sehen, wie der Anteil an generierten Ladungsträgerpaaren mit Ausweitung der Raumladungszone wächst, was sich durch einen Anstieg der Kurve bis zur charakteristischen Verarmungsspannung ausdrückt. Nachdem der Detektor vollständig verarmt ist, bleibt die mittlere Signalladung konstant. Das Rauschen des Signalpeaks σ_{sig} bleibt während aller Messungen nahezu gleich (Abb. 47).

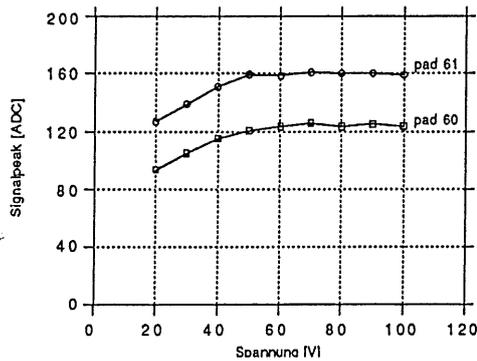


Abb. 46: Wahrscheinlichste Werte der Signalverteilungen der pads 60, 61.

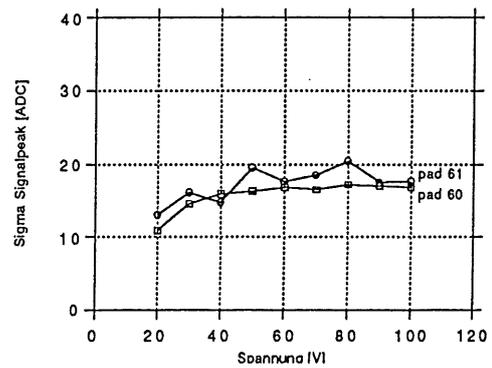


Abb. 47: Standardabweichung (Sigma) der getroffenen pads.

Aus den Werten mittleres Signal, mittleres 'pedestal' und Sigma des 'pedestals' kann nun das S/N-Verhältnis errechnet werden:

$$\frac{S}{N} = \frac{\overline{Sig} - \overline{ped}}{\sigma_{ped}}$$

In Abb. 48 ist es über der Spannung aufgetragen. Hier bestätigt sich noch einmal, was schon die vorhergehenden Grafiken zeigten. Unterhalb der angelegten Verarmungs-spannung $U = 70 \text{ V}$ überwiegt das Rauschen des Detektors; das Signal ist klein, da weniger Ladungsträger die Ausleseelektroden erreichen. Nach Eintreten der vollständigen Verarmung des Detektors bleibt das S/N-Verhältnis konstant. Es erreicht einen Wert von etwa 12 : 1 und entspricht damit gut den geforderten Werten. Man kann auf eine Verbesserung des Wertes hoffen, da der Prototypverstärker noch nicht rauschoptimiert war und der pad-Detektor einen zu hohen Guardstrom aufwies.

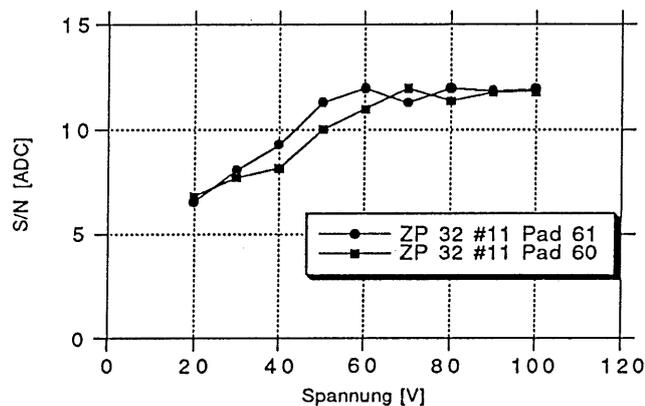


Abb. 48: Signal-zu-Rausch-Verhältnis der beiden getroffenen pads bei den eingestellten Spannungen zwischen 20 und 100 V.

Für das Signalfeld mit der angelegten Spannung von 60 V sind in Abb. 49 noch einige statistische Daten aufgeführt:

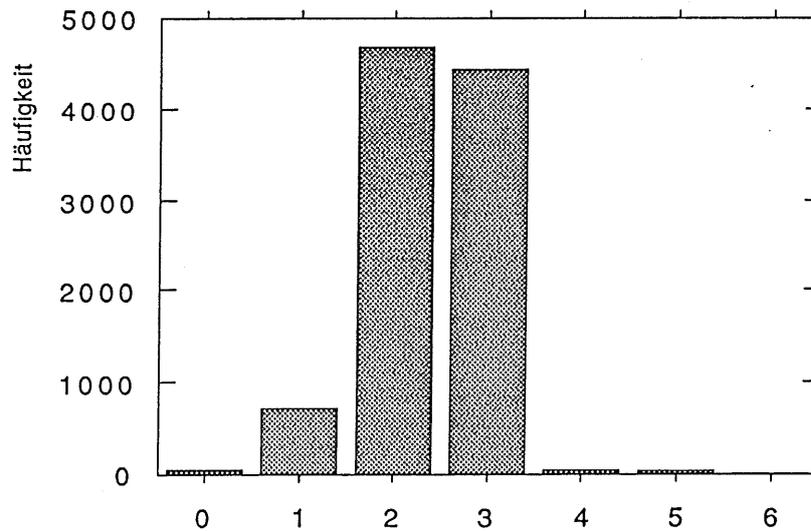
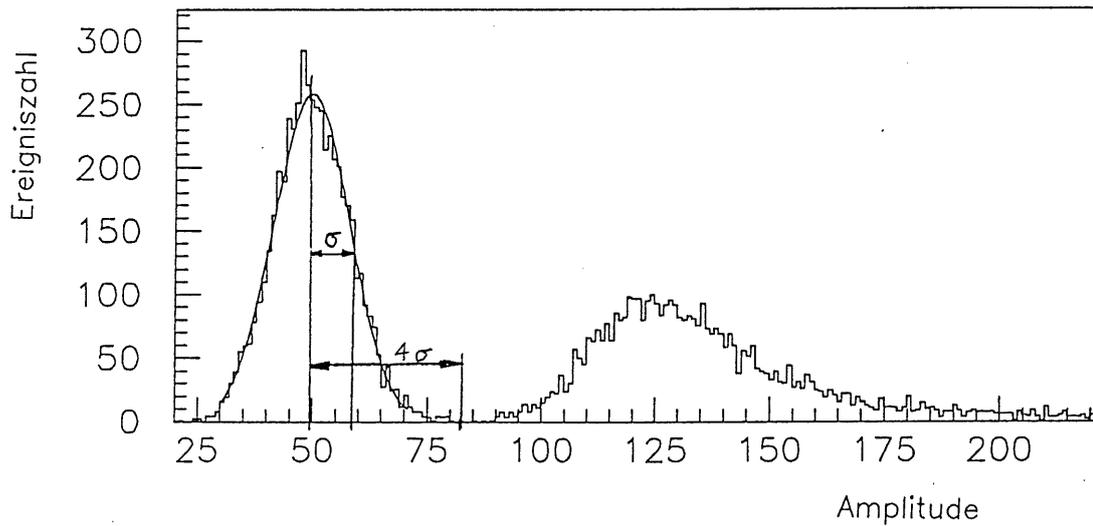


Abb. 49: Statistische Angaben zur Häufigkeit der folgenden Situationen:

0: Fehler der Ausleseelektronik und overflow:	0.59 %
1: Fehltrigger, d. h. kein Signal im pad-Detektor trotz Triggern durch die Szintillatoren:	7.18 %
2: Signal nur im pad 61 (in den anderen pads 'pedestal'):	46.83 %
3: Signal nur im pad 60 (in den anderen pads 'pedestal'):	44.30 %
4: Signal in den pads 60 und 61 (in den anderen pads 'pedestal'):	0.58 %
5: Signal nur im pad 62 (in den anderen pads 'pedestal'):	0.42 %
6: Signal in den pads 61 und 62 (in den anderen pads 'pedestal'):	0.10 %

Die "Fehler durch die Ausleseelektronik und 'overflow'" bedeuten 'hardware'-Fehler und sind hauptsächlich im SIROCCO entstanden. Mit 0.6% sind diese Fehler tolerierbar. Die große Anzahl an "Fehltriggern" kam folgendermaßen zustande: da der Strahlquerschnitt größer als die pad-Flächen war, haben die Teilchen, die das Triggersystem (Szintillatoren) auslösten, wahrscheinlich ein pad der Reihe fünf oder sieben passiert. Diese Vermutung müßte in einem weiteren Experiment überprüft werden, da die pads dieser Reihen nicht ausgelesen wurden. Durch die sehr gute Trennung von 'pedestal' und Signal (s. Abb. 50) kann jedoch abgeschätzt werden, daß die wahre Fehltriggerrate gegen Null geht, d. h. die Effektivität der Siliziumdetektoren wird gut 100% betragen.

Die weiteren Säulen zeigen die Verteilung der Signale bzw. Treffer auf die einzelnen pads. Da der Teilchenstrahl auf die Mitte zwischen den pads 60 und 61 gerichtet war, zeigen beide pads etwa die gleiche Anzahl von Treffern. Mit einem geringen Prozentsatz (knapp 0.6%) kamen Doppelereignisse vor, d. h. in beiden pads wurde ein Signal erkannt. Mit noch geringeren Anteilen wurden auch Signale im pad 62 und Doppelsignale in den pads 61 und 62 gefunden, allerdings lassen sich diese Ereignisse auch mit Kopplungen zwischen den pads erklären und sind eher den Fehlern zuzurechnen.



*Abb. 50: Amplitudenverteilung (pad 60, $U = 90\text{ V}$) mit 'pedestal'- und Signalpeak':
 $MW_{ped} = 49.7$, $\sigma_{ped} = 8.2$, $MW_{Sig} = 125.2$ ADC-Einheiten.*

Die Pedestalverteilung kann als Gauß'sche Normalverteilung angenähert werden. In einem Abstand $|4\sigma|$ vom Mittelwert MW_{ped} ist die Wahrscheinlichkeit, alle 'pedestal'-Werte innerhalb dieser Verteilung zu finden, größer 99.9%. D. h. mit einer Wahrscheinlichkeit $> 99.9\%$ werden die durch geladene Teilchen im Detektor deponierten Ladungen als Signale erkannt. Daraus ergibt sich die Schlußfolgerung, daß die Triggereffizienz des pad-Detektors $\approx 100\%$ betragen wird.

ZUSAMMENFASSUNG - THESEN ZUR DIPLOMARBEIT

Das Experiment H1 am neuen Beschleunigerring HERA des DESY Hamburg beschäftigt sich u. a. mit Forschungen in der tiefinelastischen Physik sowie Untersuchungen zu schweren Quarks. Um die Messungen genauer und effizienter zu gestalten, ist der Einbau zweier hochauflösender ortsempfindlicher Detektoren im zentralen und rückwärtigen Bereich nahe am Strahlrohr geplant.

Einer dieser neuen Detektoren ist der 'Backward Silicon Tracker' (BST). Er wird im Rückwärtsbereich eingebaut und soll dort unter kleinen Winkeln gestreute Elektronen, welche aus tiefinelastischen Streuprozessen stammen, nachweisen. Der BST besteht in der ersten Phase aus vier (zweite Phase acht) Ebenen verschiedener Siliziumdetektoren, die in definierten Abständen senkrecht um das Strahlrohr montiert werden. Diese verschiedenen Siliziumdetektoren werden sein:

- pad-Detektoren: als neuer 'first level' - Trigger,
- r-strip-Detektoren: zur Messung des Polarwinkels der gestreuten Elektronen,
- ϕ -strip-Detektoren (zweite Phase): zur Messung des Transversalimpulses gestreuter Teilchen.

Die Untersuchungen an Prototypen der pad- und r-strip-Detektoren für die erste Phase des BST sind Inhalt dieser Diplomarbeit. Die Detektoren wurden statischen und dynamischen Tests unterzogen:

Statische Tests:

r-strip-Detektor:

Zuerst wurde durch Aufnahme von Kapazitäts-Spannungs-Kennlinien die Verarmungsspannung der Detektoren ermittelt. Sie betrug $U = 60$ V.

Bei der Messung der Volumenleckströme wurde festgestellt, daß die Guardströme fast aller Detektoren über der angestrebten Obergrenze von einigen μ A lagen. Als Ursache wird ein Fehler in der Struktur des Guardrings oder ein Herstellungsfehler angenommen. Weiterhin wurden die Leckströme der Summe aller Streifen eines Detektor aufgenommen. Diese Werte lagen ebenfalls im μ A-Bereich.

Die BIAS-Widerstände (Polysilizium) wurden bei einigen Detektoren stichprobenartig vermessen, sie lagen konstant zwischen drei und fünf $M\Omega$.

pad-Detektor:

Es wurden mehrere Detektoren von verschiedenen Herstellern untersucht. Die Verarmungsspannung wurde aus der Kapazitätskennlinie ermittelt, hier wurden ebenfalls $U = 60 \text{ V}$ erreicht.

Die Volumenleckströme wurden vom Guardring und von einzelnen pads gemessen. Der Guardring der Detektoren aus Oslo besitzt die gleiche Struktur wie bei den Streifendetektoren ('Multiguard'-Struktur), so waren auch hier die Ströme unerwünscht hoch und zeitlich nicht konstant. Bei einem Dauertest stieg der Strom auf einige mA. Die Leckströme der pads waren dagegen sehr gering, sie befanden sich im nA - Bereich. Die Detektoren aus Frankfurt/Oder wiesen zwar normale Guardströme auf, allerdings waren hier die Ströme der AC-gekoppelten pads zu hoch.

Dynamische Tests:

r-strip-Detektor:

a) Testpulse auf die Detektorrückseite:

Von einem Pulsgenerator wurden gleichmäßige Spannungspulse erzeugt und zur Rückseite eines r-strip-Detektors übertragen. Von den 641 auslesbaren Streifen waren 64 an einen APC-Prototypchip angeschlossen. Mit Hilfe der Testpulse konnten zwei fehlerhafte Streifen (Nr. 30 und 64) ermittelt werden.

b) Laserpulse:

Von einem Pulsgenerator wurde eine Laserdiode angesteuert, deren Strahl auf die Detektoroberfläche fokussiert wurde. Durch Konvertierung der Photonen wurde eine Ladung, die etwa der Hälfte einer durch ein minimal ionisierendes Teilchen (MIP) induzierten Ladung entsprach, in den Detektor eingebracht. Während eines Meßvorgangs (Aufnahme von 1000 Werten pro Streifen) wurde die Auftreffposition nicht verändert. Durch diese Messungen wurde das S/N-Verhältnis ermittelt. Aufgrund des übermäßigen Rauschens des Detektors betrug es nur etwa 6 : 1 für ein MIP.

pad-Detektor:

Zur Messung der Effektivität und des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses (S/N) eines pad-Detektors wurde im Juni 1993 ein Test an einem Teilchenstrahl (π^-) im CERN durchgeführt. Bei diesem Detektor waren die vier pads der Reihe sechs an einen Verstärkerchip und die nachfolgende Ausleseelektronik angeschlossen. Das Triggersystem wurde aus vier Szintillatoren mit Photovervielfachern, darunter ein Vetoähler, gebildet. In einer Messung wurden 10000 Ereignisse aufgezeichnet. Die Verarmungsspannung des Detektors variierte zwischen 20 und 100 V.

Das Amplitudenspektrum der pad-Detektorsignale zeigt eine klare Trennung von Signal und 'pedestal', so daß man auf eine Effektivität nahe 100% schließen kann. Mit dem Detektor wurde ein S/N-Verhältnis von 12 : 1 erreicht.

Literaturverzeichnis

- /1/ De Roeck, A., Klein, M., First Measurements at HERA of Deep Inelastic Scattering at Low x, Hamburg, 1993, DESY 93-014
- /2/ H1 Collaboration, Technical Proposal to build Silicon Tracking Detectors for H1, DESY Hamburg, 1992, H1 06/92-226
- /3/ Eisele, F., Wolf, G., Erste Ergebnisse von HERA, Physikalische Blätter, Okt. 1992, 786
- /4/ Wunstorf, R., Systematische Untersuchungen zur Strahlenresistenz von Siliziumdetektoren für die Verwendung in Hochenergiephysik-Experimenten, Dissertation, Universität Hamburg, 1992
- /5/ Ewert, J., Strahlenbelastungen im H1-Detektor, Diplomarbeit, Universität Hamburg, 1992
- /6/ Benkert, M., Untersuchungen zur Strahlenschädigung von Silizium-Halbleiter-Detektoren durch hochenergetische Neutronen, Diplomarbeit, Universität Hamburg, 1991
- /7/ Borch, E., Bruzzi, M., Mazzoni, M. S., Thermally stimulated and leakage current analysis of neutron irradiated silicon detectors, NIM A310 (1991) 273
- /8/ Chilingarov, A., Dolbnya, I., Kurylo, S., Trützschler, K., Radiation damage of silicon microstrip detectors by 1.5 MeV electrons and synchrotron radiation, NIM A 310 (1991) 277
- /9/ Coldewey, C., Untersuchungen von Strahlenschäden an Feldeffekt-Transistoren und an CMOS-Speicherbausteinen, Diplomarbeit, Universität Hamburg, 1991
- /10/ Edwards, M., Hall, G., Sothibandhu, S., Neutron radiation damage studies of silicon detectors, NIM A310 (1991) 283
- /11/ Gill, K., Hall, G., Roc, S., Sothibandhu, S., Wheadon, R., Giubellino, P., Ramello, L., Radiation damage by neutrons and photons to silicon detectors, NIM A322 (1992) 177
- /12/ H1 Collaboration, The H1 Detector at HERA, DESY, 1993, DESY 93-103
- /13/ Pitzl, D., Vortrag beim H1 upgrade meeting, DESY Hamburg, 7. 6. 1993
- /14/ Kemmer, J., Present and future Developments of Silicon Detectors at MBB, NIM A288 (1990) 282
- /15/ Perkins, D. W., Hochenergiephysik, Addison-Wesley, Bonn, München, 1990
- /16/ Bauer, Ch., Messung der Ortsauflösung von doppelseitig auslesbaren Silizium-Streifendetektoren mit VLSI-Elektronik, Diplomarbeit, München, 1990
- /17/ Stolz, W., Messung ionisierender Strahlung, Akademie-Verlag, Berlin, 1985
- /18/ Kleinknecht, K., Detektoren für Teilchenstrahlung, B. G. Teubner, Stuttgart, 1984
- /19/ Peisert, A., Silicon microstrip detectors, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Padova, 1991
- /20/ Schulman, T., Radiation damage in double-sided silicon strip detectors, University of Helsinki, 1991, report series HU-SEFT-1991-07
- /21/ Bürger, J., Silizium Streifendetektoren, Seminarvortrag, DESY Hamburg 1993

- /22/ Horisberger, R., Solid State Detectors, PSI Villigen, Schweiz, 1991
- /23/ Bürger, J., Harder, U., Henschel, H., Klein, M., Kostka, P., Lange, W., Lippold, H., Meißner, J., Naumann, T., Winde, M., Wulff, N., Design of a Silicon Backward Tracking Detector and Trigger for the H1 Experiment at the ep Collider HERA, DESY Hamburg, 1992, DESY 93-002
- /24/ Klein, M., persönliche Mitteilung
- /25/ Wulff, N., Doktorarbeit, unveröffentlicht
- /26/ Bürger, J., et al., H1 internal note, 1991, H1 - 03/91 - 164
- /27/ Lutz, G., Correlated noise in silicon strip detector readout, NIM A309 (1991) 545
- /28/ Lange, W., persönliche Mitteilung
- /29/ Henschel, H., Kaufmann, H. H., Klein, M., Lange, W., Meißner, J., A Silicon Pad Detector L1 Trigger for Deep Inelastic Scattering at low x and Q^2 , DESY, 1992
- /30/ SI-Center for Industrial Research, Technical Specifications for ZP-32 and ZS-769, Oslo, 1991
- /31/ Sonnenblick, R., et al., Electrostatic simulations for the design of silicon strip detectors and front-end electronics, NIM A310 (1991) 189
- /32/ Barberis, E., et al., Measurements of interstrip and coupling capacitances of silicon microstrip detectors, IEEE Nucl. Sci. Symposium, Orlando, 1992, SCIPP 92/14
- /33/ Pagel, Scheit, Silicon-Pad-Detector: Layout, Technologie, Meßergebnisse, Frankfurt/Oder, 1992
- /34/ Henschel, H., Harder, U., Silicon Strip Detector, Silicon Pad Detector, revised (3rd) Specification, DESY-IfH Zeuthen, 1992
- /35/ Meißner, J., persönliche Mitteilung
- /36/ Blobel, V., LOOK - a system for data analysis, Version 2.01/00, Universität Hamburg
- /37/ Joensson, L., persönliche Mitteilung
- /38/ Nygård, E., et al., CMOS low noise monolithic frontends for Si strip detector readout, Contribution to the Milano Conference on semiconductor detectors, Milano, 1992

Anhang 1

Tabelle 5: Vergleich der Konstruktionsangaben für BST-1 und die Einzeldetektoren von 1992 (Prototypen) und 1993 (endgültige Version):

	1992 (/2/)	1993 (/34/,/35/)
<u>BST-Gesamt:</u>		
Abstand der Ebenen vom Vertex für BST-1	- 457, - 508, - 565, - 628 mm	- 612, - 670, - 732, - 800 mm
überdeckte Winkelregion	167° - 176°	168° - 174°
innerer Radius	48.5 mm	55.0 mm
äußerer Radius	143.0 mm	143.5 mm
Strahlrohrradius	35.0 mm	47.0 mm
<u>Detektoren:</u>		
innerer Radius	50.0 mm	56.5 mm
innerer sensitiver Radius	52.4 mm	59.0 mm
äußerer Radius	125.0 mm	123.0 mm
äußerer sensitiver Radius	121.6 mm	120.4 mm
<u>r-strip-Detektor:</u>		
Anzahl der Streifen	1281	1281
Anzahl ausgelesener Streifen	641	641
Streifenbreite	8 µm	10.0 µm
Streifenabstand ('strip pitch')	45.0 µm	48.0 µm
Auslesebreite ('readout pitch')	90.0 µm	96.0 µm
<u>pad-Detektor:</u>		
Anzahl der pads	16	16
kleinste Padfläche	14.3 mm ²	30.5 mm ²
größte Padfläche	175.0 mm ²	137.5 mm ²

Anhang 2

Fehlerbetrachtung für die Meßwerte der statischen Messungen (für strip- und pad-Detektoren):

Tabelle 6: Fehlerangaben der Meßgeräte durch die Hersteller:

Gerätebezeichnung	Meßparameter	Fehlergrenze
Philips PM6303 RCL meter	Kapazität	$\pm 1\% \pm 1\text{digit}$
Keithley 487 Picoammeter	Strom	$\pm 1\% \pm 2\text{ nA}$
Philips PM2525 multimeter	Strom	$\pm 0.1\%$
Philips PM6303 RCL meter	Widerstand (Polysilizium)	$\pm 0.25\%$

Meßfehler (durch Ablesen):

Kapazität C:	$\pm 0.1\text{ pF} \approx 10\%$
Strom I: im μm -Bereich:	$\pm 0.01\text{ }\mu\text{A} \approx 1\%$
im nA-Bereich:	$\pm 0.01\text{ nA} \approx 1\%$
Widerstand R:	$\pm 0.01\text{ M}\Omega \approx 1\%$

Fehlerbetrachtung für die Meßwerte der dynamischen Messungen:

a) r-strip-Detektor:

Es werden die Amplitudenmittelwerte mit ihren Fehlern von einigen ausgewählten Streifen angegeben. Die Mittelwerte I wurden bei den Messungen mit Ladungspulsen auf die Detektorrückseite aus 600 Ereignissen, bei den Messungen mit Laserpulsen aus 1000 Ereignissen ermittelt. Der Fehler ΔI setzt sich aus dem statistischen Fehler des Mittelwertes ($\sim 1/\sqrt{(n-1)}$) sowie dem Meßfehler des ADC zusammen. Der statistische Fehler für 600 Ereignisse beträgt 4.1%, für 1000 Ereignisse 3.2%. Die Meßfehler des ADC kommen durch Quantisierungsfehler der Eingangsspannung und die integrale und differentielle Nichtlinearität des ADC zustande. Sie werden mit ± 5 ADC-Einheiten abgeschätzt.

Tabelle 7: Mittelwerte $l \pm \Delta l$ für ausgewählte Streifen des r-strip-Detektors (alle Werte in ADC-Einheiten):

<i>Streifen-Nr.</i>	<i>pulsed by 'pedestal'</i>	<i>pulsed by Signal</i>	<i>Laserpulse 'pedestal'</i>	<i>Laserpulse Signal</i>
20	293.0 ± 16.9	596.0 ± 29.4	376.0 ± 17.0	804.0 ± 30.4
25	305.0 ± 17.5	587.0 ± 29.0	432.0 ± 18.7	445.0 ± 19.1
30	75.5 ± 8.0	-	-	-
35	292.0 ± 17.0	572.0 ± 28.4	492.0 ± 20.6	500.0 ± 20.8
40	248.0 ± 15.1	564.0 ± 28.0	467.0 ± 19.8	514.0 ± 21.3

b) pad-Detektor:

Es werden die Mittelwerte l der 'pedestalpeaks' (Gauß'sche Normalverteilung) und die wahrscheinlichsten Werte der Signal'peaks' (Landauverteilung) mit ihren Fehlern Δl angegeben. Die Fehlerzusammensetzung ist die gleiche wie beim Streifendetektor (s. o.). Der statistische Fehler für 10000 Ereignisse beträgt 1%. Der ADC-Fehler beträgt ebenfalls ± 5 ADC-Einheiten.

Tabelle 8: Mittelwerte $l \pm \Delta l$ der vier pads (60, 61, 62, 63) des im Teilchenstrahl getesteten pad-Detektors bei der Verarmungsspannung $U = 60$ V (alle Werte in ADC-Einheiten):

<i>pad-Nr.</i>	<i>Pedestalpeak</i>	<i>Signalpeak</i>
60	48.5 ± 5.5	123.5 ± 6.1
61	72.8 ± 5.7	158.6 ± 6.2
62	37.8 ± 5.4	-
63	39.1 ± 5.4	-

Danksagung

Ich möchte all den Menschen danken, die mir diese Diplomarbeit ermöglichten und durch ihre Unterstützung zum Gelingen der Arbeit beitrugen, besonders meinen Eltern, die mir während des Studiums hilfreich und motivierend zur Seite standen.

Herr Prof. Dr. P. Häussler übernahm freundlicherweise die offizielle Verantwortung für diese Arbeit. Die Anregung zu diesem interessanten Thema verdanke ich Herrn Dr. M. Klein. Trotz Zeitmangels widmete er meiner Arbeit stets Aufmerksamkeit.

Die Betreuung und tatkräftige Unterstützung durch Dr. W. Lange trugen wesentlich zum Erfolg dieser Diplomarbeit bei. Ich danke ihm für seine kritischen Anmerkungen und konstruktiven Vorschläge bei der abschließenden Ausarbeitung der Arbeit sowie für die wertvollen Ratschläge und sachlichen Erörterungen während des letzten Jahres.

Ein herzlicher Dank gebührt Dr. P. Kostka, der sich viel Zeit für Gespräche und Diskussionen nahm. Ebenso wie Dr. M. Winde führte er mich in die Grundlagen der Programmierung ein und half mir, zahlreiche Anfangsschwierigkeiten zu überwinden.

Herr H. Henschel bemühte sich, mich mit der neuentwickelten Ausleseelektronik des BST vertraut zu machen.

Während seines Praktikums führte M. Paulu viele der für diese Arbeit wichtigen statischen Messungen durch.

Für die freundliche und motivierende Arbeitsatmosphäre gilt mein Dank allen Mitarbeitern des DESY-IfH Zeuthen.

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel und Literaturstellen angefertigt habe.

Zeuthen, den 03.12.1993