Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Einleitung

Im Jahre 1990 wurde am **D**eutschen-**E**lektronen-**Sy**nchroton (DESY) der erste Elektronen-Protonen-Speicherring HERA (**H**adronen-**E**lektronen-**R**ing-**A**nlage) in Betrieb genommen. In diesem Beschleuniger kollidieren 27 GeV Elektronen (bzw. Positronen) mit 820 GeV Protonen bei einer Schwerpunktenergie von 300 GeV. Durch HERA wurde ein neuer kinematischer Bereich für die Untersuchung tief-inelastischer Leptonenstreuung zugänglich gemacht. Solche Experimente spielen eine entscheidende Rolle für das Verständnis der fundamentalen Kräfte in der Natur. Im Unterschied zu früheren Experimenten erlaubt die einmalige Kinematik bei HERA die Beobachtung des hadronischen Rückstoßes und die Untersuchung der schwachen neutralen und geladenen Ströme bei hohem Impulsübertrag. An den Wechselwirkungspunkten befinden sich die Detektoren ZEUS und H1.

Diese Diplomarbeit entstand im Rahmen der H1-Kollaboration und untersucht die langfristige Entwicklung der Eigenschaften der Silizium-Detektoren im PLUG-Kalorimeter (siehe Abbildung 0.1, Nummer 13), einem hadronischen Kupfer-Silizium-Sampling-Kalorimeter im Vorwärtsbereich von H1, instrumentiert mit Oberflächensperrschichtdetektoren aus phosphordotiertem Silizium.

Obwohl für die Silizium-Detektoren des PLUG-Kalorimeter eine Lebensdauer von 10 Jahren erwartet wurde [RUF93], traten in der Strahlzeit 1994 starke Strahlenschäden auf, die die Detektoreigenschaften stark beeinflußten und teilweise für den weiteren Betrieb unbrauchbar machten.

In dieser Arbeit wird das Langzeitverhalten der Detektoreigenschaften untersucht, mit dem Ziel mögliche Ursachen der Strahlenschäden bzw. Vorschläge zur Verminderung dieser Schäden zu diskutieren.

Im nachfolgenden Kapitel werden der Aufbau, sowie die Auslese-Elektronik des PLUG-Kalorimeter beschrieben.

Das 2. Kapitel behandelt den Halbleiterdetektor. Es werden die Funktionsweise und der Aufbau der im PLUG-Kalorimeter instrumentierten Oberflächensperrschichtdetektoren und der zu Testzwecken installierten ionenimplantierten Silizium-Detektoren vorgestellt. Die elektrischen Kennlinien von Silizium-Detektoren, Strom-Spannung (IV)- und Kapazität-Spannung (CV)-Kurven und die wichtigen Kenngrößen - Dunkelstrom, Verarmungsspannung und Flachbandspannung -, sowie deren Beeinflussung durch Strahlenschädigung werden besprochen.

Die Entwicklung der charakteristischen Größen der Oberflächensperrschichtdetektoren des PLUG-Kalorimeters während der Strahlzeit 1994 ist, neben der Beschreibung der Ergebnisse der Untersuchungen, die im Rahmen der HERA-Maschinenstudien im November 1994 aufgenommen wurden, Thema des 3. Kapitels. Es werden die Veränderungen im Hinblick auf die Strahlzeit 1995 beschrieben.

Die aktuelle Entwicklung der charakteristischen Größen in der Strahlzeit 1995 enthält das Kapitel 4. Die kurzfriste Entwicklung des Dunkelstroms wird untersucht. Ein Vergleich der Oberflächensperrschichtdetektoren mit ionenimplantierten Silizium-Detektoren betrachtet die Abhängigkeit des Dunkelstromanstiegs von der Detektortechnologie.

Im 5. Kapitel werden die Ergebnisse kurz zusammengefaßt.

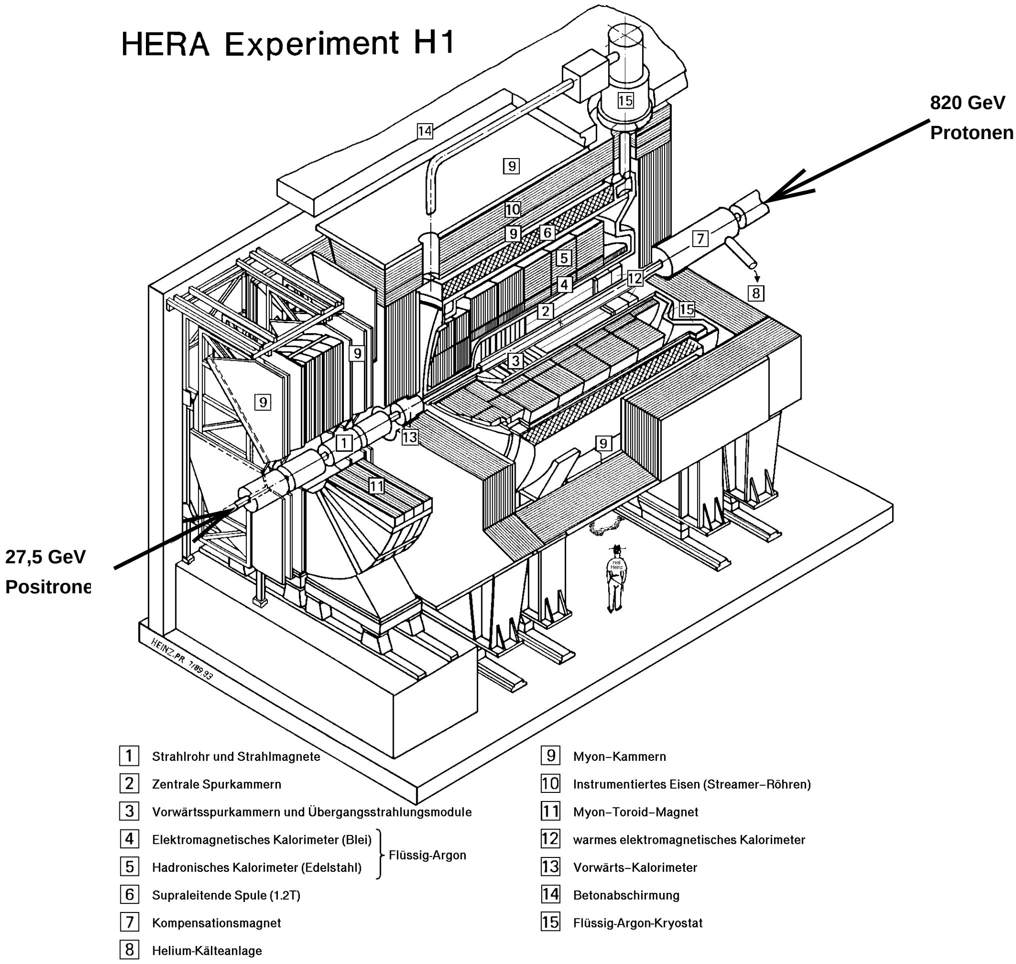

Abbildung 0.1: *Aufbau des H1-Detektors*

Kapitel 1

Das PLUG-Kalorimeter

Das PLUG-Kalorimeter ist das weltweit erste hadronische Sampling-Kalorimeter aus Kupfer (Absorber) und Silizium-Detektoren (sensitives Material). Es wurde entwickelt, um die Lücke in der Messung des Energieflusses zwischen Strahlrohr ($\theta \approx 0,6^o$) und dem vorderen Teil des Flüssig-Argon-Kalorimeters (**L**iquid-**A**rgon-**C**alorimeter LAC, $\theta \approx 3,5^o$) im Vorwärtsbereich von H1 wie ein 'Stöpsel' (engl.: plug) zu verschließen. Dieser Bereich ist aufgrund der Impulsasymmetrie von besonderem Interesse. Der Anteil des nicht gemessenen transversalen Impulses durch Hadronen, die nahe am Strahlrohr emittiert werden, wird so minimiert. Die Energiemessung wird allerdings durch große Mengen an totem Material zwischen dem Wechselwirkungspunkt und dem PLUG-Kalorimeter behindert. Eine weitere wichtige Anwendung findet das PLUG-Kalorimeter außerdem als Veto-Detektor für Ereignisse ohne Energiefluß im Vorwärtsbereich (diffraktive Ereignisse).

Das PLUG-Kalorimeter ist seit 1992 im Einsatz und wurde 1994 erstmalig vollständig instrumentiert.

1.1 Aufbau des PLUG-Kalorimeter

Da die geometrischen Randbedingungen sowohl die Länge als auch die laterale Ausdehnung des PLUG-Kalorimeters stark einschränken, war eine kompakte Form mit einer möglichst vollständigen Instrumentierung in lateraler Ausdehnung anzustreben. Dieses kompakte Design wurde mit einem Sampling-Kalorimeter mit großflächigen Silizium-Oberflächensperrschichtdetektoren erreicht. Die geringe Dicke dieser Detektoren (einige hundert μm) ist für die Gesamtlänge vernachlässigbar. Als Absorbermaterial wurde Kupfer gewählt, da so ein geeigneter Kompromiß bezüglich der Gesamtlänge (4,3 Wechselwirkungslängen) und der Anforderungen an die Strahlungs- und

Wechselwirkungslängen erreicht wurde, so daß die erforderliche Sensitivität für hadronische und elektromagnetische Schauer gegeben ist [RUF93].

Das PLUG-Kalorimeter befindet sich in einer Öffnung des Eisenjochs zwischen dem Flüssig-Argon-Kryostaten und dem Quadrupolmagneten 6QL11 (siehe Abb. 1.1).

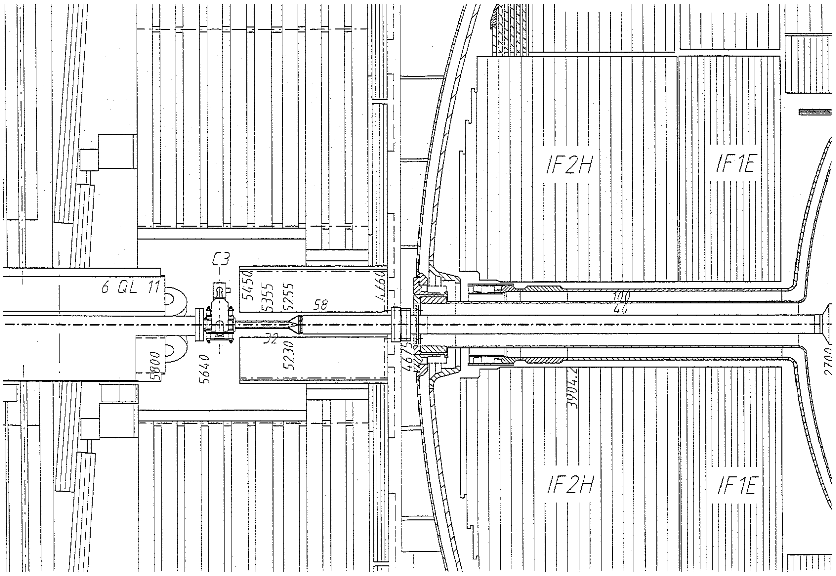

Abbildung 1.1: *Das PLUG-Kalorimeter in der Vorwärtsregion des H1-Detektors*

Es besteht aus zwei getrennten Halbzylindern, die jeweils mit einer Joch-Hälfte fest verbunden sind. Der linke Teil von Abbildung 1.2 zeigt ein Photo einer dieser Hälften. Man erkennt die $7,5$ cm dicken Kupferabsorber und die Lücken für die Detektormodule ('Slots'). Es gibt pro Halbzylinder acht Slots ($1-8$, zählweise vom Wechselwirkungspunkt aus). Bei vollständiger Instrumentierung werden die Ebene vor der ersten Absorberschicht (Slot 0), sowie die ersten sieben Lücken (Slots $1-7$), also insgesamt acht Ebenen mit 16 Modulen bestückt (Slot 8 enthält Dosimeter).

Ein Detektormodul besteht aus zwei 5 mm starken Kupferplatten zwischen denen sich auf einer G10-Platte die jeweils auf Aluminiumkeramik montierten Silizium-Detektoren befinden (siehe Abb. 1.2, rechts). Eine G10-Platte ist so mit 42 Detektoren (32 quadratischen (5×5 cm^2), vier rechteckigen (4×5 cm^2) und sechs dreieckigen ($12,5$ cm^2)) bestückt, so daß eine mosaikartige Struktur entsteht, die das Modul annähernd lückenlos bedeckt ($\approx 4\%$ inaktive Fläche). Es ergibt sich eine Gesamtzahl von 672 Detektoren bei vollständiger Instrumentierung des PLUG-Kalorimeters.

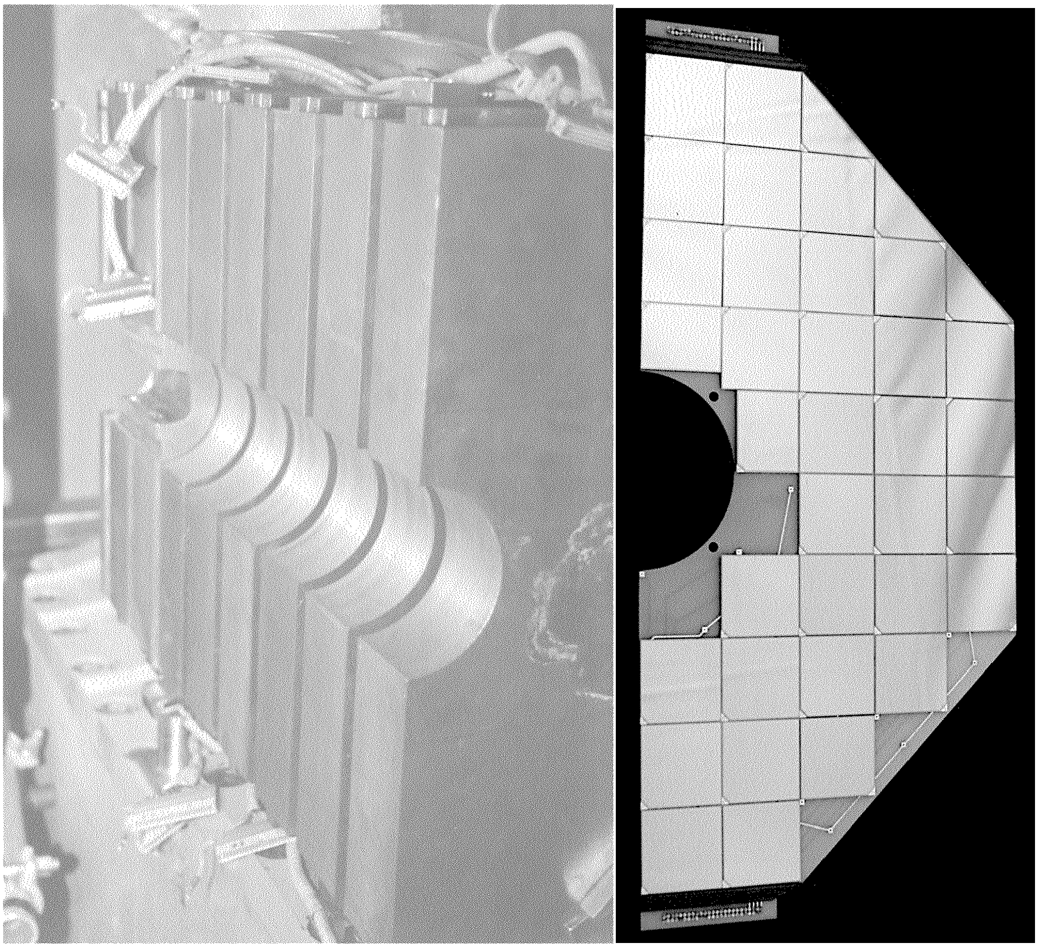

Abbildung 1.2: *links: eine Hälfte des geöffneten PLUG-Kalorimeters mit acht Absorberebenen ohne instrumentierte Module, Sicht aus Richtung des Wechselwirkungspunktes, Slot 0 vorne; rechts: geöffnetes Detektor-Modul mit 37 installierten Detektoren.*

Dieses modulare System erlaubt im Falle von Problemen den Austausch jedes einzelnen Moduls zu Test- oder Reparaturzwecken.

Tabelle 1.1 faßt die technischen Daten des PLUG-Kalorimeter zusammen [HIL94].

Gewicht	1480 kg
radiale Abmessungen (gesamt) (instrumentierter Teil)	 6 cm $\leq$ r $\leq$ 32 cm 6 cm $\leq$ r $\leq$ 25 cm
longitudinale Abmessungen	476 cm $\leq$ z $\leq$ 545 cm
Gesamtlänge	69 cm $\hat{=}$ 4.3 λ
Gesamthöhe	26 cm $\hat{=}$ 1.7 λ
Winkelbereich	12.5 mrad $\leq \theta \leq$ 60 mrad $0.75^o \leq \theta \leq 3.4^o$
Anzahl an Schichten	8
Schicht-Struktur	7.5cm Cu + 400μm Si-detector
Schauerparameter in Cu	$1\ \lambda = 15.06cm$, $1\ X_0 = 1.44cm$
laterale Detektorgröße	5 $\times$ 5 cm^2
Gesamtanzahl Detektoren	672
Anzahl elektronischer Kanäle	336
Winkelauflösung	4 mrad
Energieauflösung	$\approx$ 100% $/\sqrt{E}$

Tabelle 1.1: *Technische Daten des PLUG-Kalorimeters*

1.2 Silizium-Detektoren

Silizium-Detektoren werden seit langem in der Kernphysik erfolgreich für hochauflösende Spektroskopie eingesetzt. In der Hochernergiephysik werden sie hauptsächlich in der Form von Streifen- oder Pixeldetektoren im Bereich des Wechselwirkungspunktes als Vertexdetektoren verwendet. Im PLUG-Kalorimeter wurden erstmals großflächige Silizium-Detektoren in einem hadronischen Sampling-Kalorimeter eingesetzt.

Die Vorteile von Silizium-Detektoren sind im wesentlichen folgende:

- Betrieb bei Zimmertemperatur und normaler Atmosphäre
- Niedrige Betriebsspannung
- Hohe intrinsische Energieauflösung
- Absolute Kalibration (im Falle vollständiger Verarmung)
- Geringe Ladungssammelzeiten
- Kompakte Bauweise
- Unempfindlich gegen Magnetfelder

Die im PLUG-Kalorimeter verwendeten Silizium-Detektoren wurden in einem kombinierten Verfahren aus Oberflächensperrschicht- und Planar-Prozeß hergestellt [FRE90]. Die Detektoren bestehen aus hochohmigem, n-leitendem (phosphordotiertem) Silizium mit einer Orientierung in [111]-Richtung. Die Dicke beträgt $d \approx 400\ \mu m$. Die Frontelektrode besteht aus Gold, während für den Rückkontakt Aluminium verwendet wird. Diese Detektoren zeichnen sich durch eine große aktive Fläche und ein sehr kleines Verhältnis von inaktiver zu aktiver Fläche aus.

Der Aufbau und die Funktionsweise von Oberflächensperrschichtdetektoren sowie deren charakteristische Kenngrößen werden in Kapitel 2 beschrieben.

1.3 Auslese-Elektronik

Die Auslese-Elektronik befindet sich so nah wie möglich am PLUG-Kalorimeter an der Vorderseite des Eisenjochs, um die Kabellängen gering zu halten.

Abbildung 1.3 zeigt den schematischen Aufbau der Auslese-Elektronik. Die Signal-Auslese erfolgt über den Koppelkondensator $\overline{C_{ik}}$ auf einen ladungsempfindlichen Vorverstärker. Da die Anzahl der elektronischen Auslese-Kanäle auf 336 begrenzt ist, teilen sich zwei Oberflächensperrschichtdetektoren, die in benachbarten Ebenen an der gleichen Position (r, ϕ) instrumentiert sind, einen Vorverstärker und Auslesekanal. Die weitere Datenverarbeitungselektronik ist identisch mit der des Flüssig-Argon-Kalorimeters [BER92].

Die zur Verfügung stehende Anzahl der Kanäle zur Spannungversorgung der Detektoren (CAEN-Kanäle: 80) bedingt eine Zusammenfassung der Silizium-Detektoren zu Spannungsringen. Es werden Silizium-Detektoren innerhalb einer halben Detektorebene (Quadrant) zu vier konzentrischen Spannungsringen zusammengefaßt (siehe Abb. 1.4). Da für Detektoren nahe am Strahlrohr eine höhere Strahlenbelastung und damit ein stärkerer Stromanstieg erwartet wurde, bilden drei innere Detektoren einen Spannungsring. Nach außen nimmt die Anzahl der Detektoren in einem Spannungskanal bis zu einer Anzahl von 14 Detektoren zu, wobei Ringe aus zwei Quadranten zusammengefaßt werden.

Der Widerstand R_{vi} und die Kapazität C_i (s. Abb. 1.3) bilden einen Hochpaß für den i-ten Spannungsring, um niederfrequente Störungen zu mindern.

Weitere Informationen zum Verfahren der Kalibration der Auslese-Elektronik und der Detektoren können der Arbeit [KRÜ96] entnommen werden.

Eine wichtige Aufgabe der Auslese-Elektronik ist, neben der Signal-Ausle-

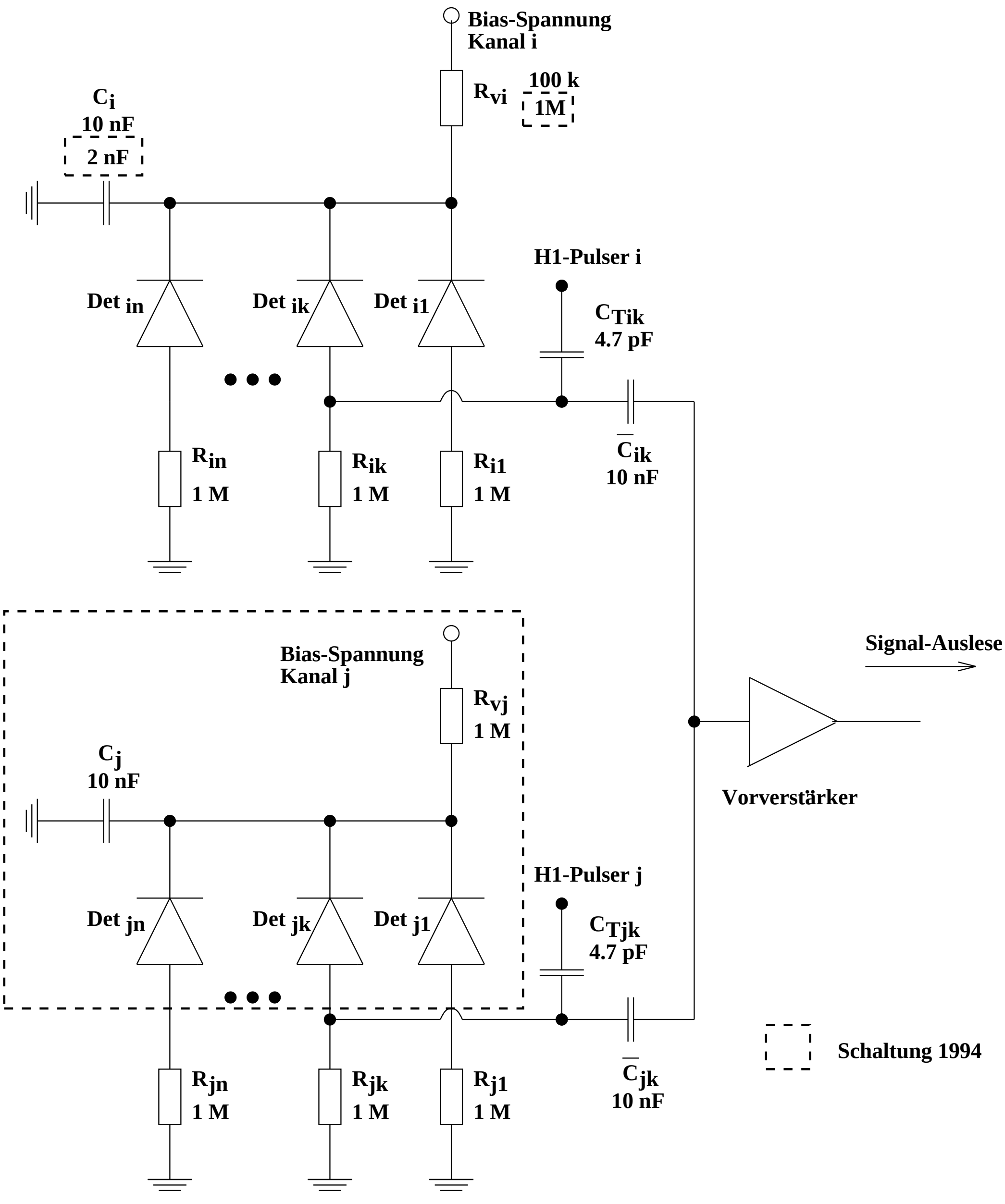

Abbildung 1.3: *Schematisches Schaltbild der Auslese-Elektronik ('frontend electronics') für den Bias-Kanal i und den Auslesekanal k, in gestrichelten Kästen der Zustand während der Strahlzeit 1994.*

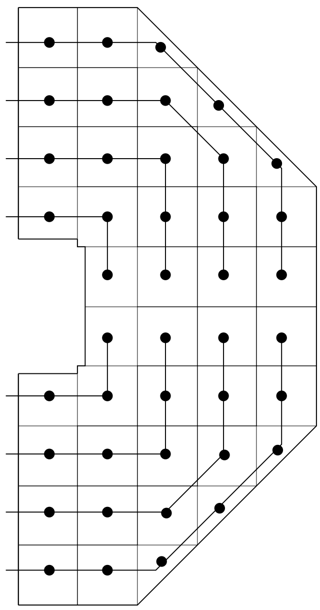

Abbildung 1.4: *Zusammenfassung der Silizium-Detektoren zu Spannungsringen auf dem Detektormodul*

se der durch ionisierende Teilchen deponierten Energie im PLUG, die Überwachung der wichtigsten Detektorparameter wie Dunkelstrom und Verarmungsspannung. Auf die Bedeutung dieser Größen wird im Kapitel 2 näher eingegangen. Die Kenntnis des Dunkelstroms ermöglicht es, den Spannungsabfall an den Widerständen R_{ik} und R_{vi} (siehe Abb. 1.3) zu berechnen und so die am Detektor anliegende Spannung zu erhalten. Diese Information ist ebenso wie die Verarmungsspannung des Detektors notwendig, um den Betrieb im Zustand vollständiger Verarmung zu gewährleisten. Die Zusammenfassung von Detektoren bezüglich der Signal-Auslese und der Spannung bewirkt, daß IV- und CV-Kennlinien nicht individuell für jeden Detektor aufgenommen werden können. Das Verfahren zur Bestimmung der Kenngrößen für jeden Detektor wird in Abschnitt 2.8 erläutert.

1.3.1 Änderungen zur Strahlzeit 1995

Aufgrund der Ergebnisse aus der Strahlzeit 1994 (siehe Kapitel 3) wurden für den Betrieb in der Strahlzeit 1995 einige Änderungen an der Auslese-Elektronik vorgenommen (Abb. 1.3 ohne Teile in gestrichelten Kästen).

Die Anzahl der instrumentierten Ebenen wurde auf vier (Slots $0-3$)

halbiert. Somit war keine Zusammenfassung der Detektoren bezüglich der Auslesekanäle mehr nötig. Die maximale Anzahl von Detektoren in einem Spannungsring wurde auf sieben reduziert.

Weiterhin wurden die Widerstände R_{vi} und die Kondensatoren C_i so ersetzt, daß sich die Zeitkonstante des Hochpasses nur in geringem Maß ändert, aber der Spannungsabfall an den R_{vi} um einen Faktor 10 vermindert wird.

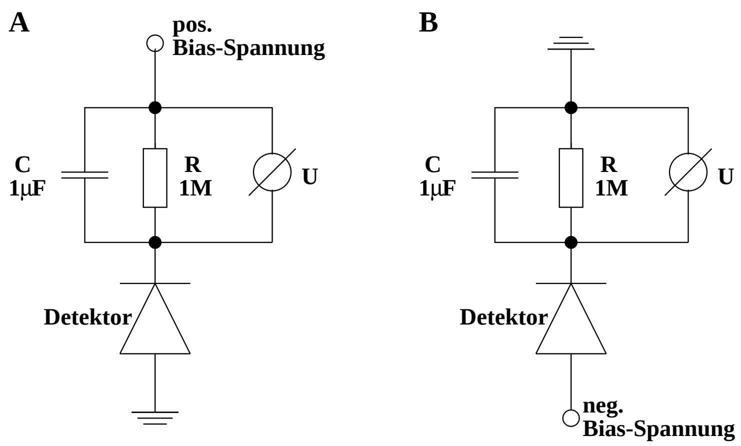

Abbildung 1.5: *Schaltbild der Elektronik für ionenimplantierte Detektoren*

Zu Vergleichszwecken wurden zwei ionenimplantierte Detektoren in einem Detektormodul in Slot 4 eingebaut. Innerhalb des Moduls befanden sie sich auf den innersten Plätzen nahe dem Strahlrohr, um mögliche Strahlenschäden besser beobachten zu können. Sie wurden jeweils von einem Spannungskanal versorgt (Abb. 1.5, A). Im Laufe der Strahlzeit wurde zu Testzwecken (siehe Kap. 4) die Spannungsversorgung für einen ionenimplantierten Detektor auf negative Spannung am Rückkontakt umgestellt (Abb. 1.5, B).

Weitere Änderungen an den Analogboxen zur Verminderung des Rauschens werden in [KRÜ96] beschrieben.

Kapitel 2

Halbleiterdetektoren

Der Aufbau und die Funktionsweise der im PLUG-Kalorimeter verwendeten Oberflächensperrschichtdetektoren und der ionenimplantierten Silizium-Detektoren ist Inhalt dieses Kapitels. Die wichtigen Strukturen des Oberflächensperrschichtdetektors, der Schottky-Kontakt und die MOS-Struktur am Rand der Oberfläche werden beschrieben. Die charakteristischen Größen, die für die Oberflächensperrschichtdetektoren innerhalb dieser Untersuchungen bedeutsam sind, werden aus den Kennlinien Sperrstrom gegen Spannung (IV) und Kapazität gegen Spannung (CV) ermittelt. Dies sind der Dunkelstrom, die Verarmungsspannung und die Flachbandspannung. Die Bedeutung dieser Größen und ihre Beeinflussung durch Strahlenschädigung werden diskutiert.

2.1 Funktionsweise des Oberflächensperrschicht-detektors

Halbleiterdetektoren sind Dioden, die in Sperrichtung betrieben werden. Die Funktion entspricht einer Festkörperionisationskammer. Der Detektor wird im Zustand vollständiger Verarmung betrieben, d.h. die Raumladungszone dehnt sich durch den gesamten Detektor aus und enthält fast keine freien Ladungsträger. Teilchen, die durch den Detektor fliegen, erzeugen durch Ionisation von Gitteratomen Elektronen-Loch-Paare, deren Zahl proportional zur abgegebenen Energie ist (in Si wird bei 300 K pro $3,6\ eV$ ein Elektron-Loch-Paar erzeugt [BER68]). Die Ladungsträger werden durch die anliegende Spannung zu den Elektroden transportiert. Die Ladungssammelzeit im Detektor beträgt weniger als 20 ns [HIL94]. Der so erzeugte Stromimpuls wird über einen ladungsempfindlichen Vorverstärker in einen Spannungsimpuls umgewandelt und dann weiter ausgewertet (siehe auch Abschnitt 1.3). Abbildung 2.1 zeigt den Aufbau eines PLUG-Kalorimeter-Oberflächensperrschichtdetektors im Querschnitt.

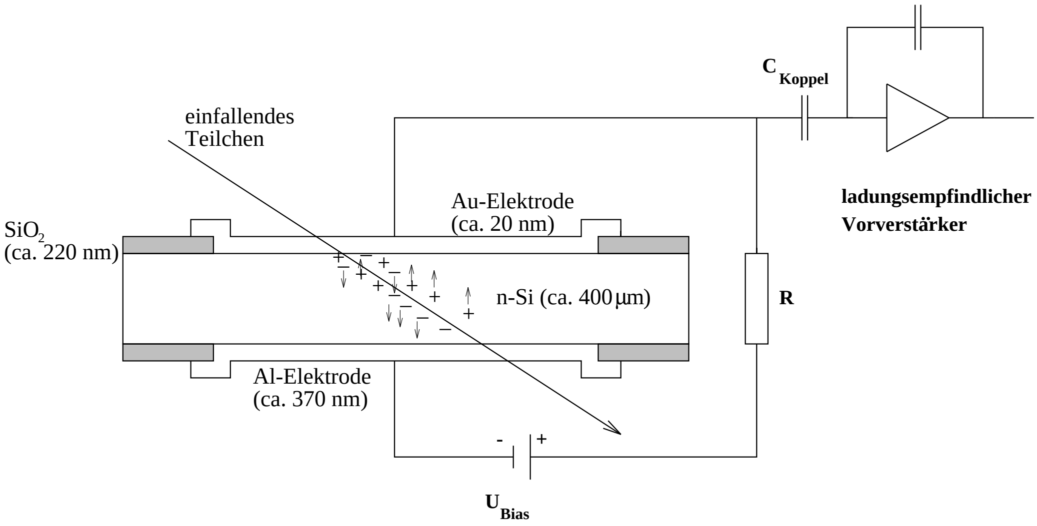

Abbildung 2.1: *Querschnitt durch einen PLUG-Detektor (nicht maßstabsgetreu)*

Bei den verwendeten Oberflächensperrschichtdetektoren bildet ein Metall-Halbleiter-Kontakt (Schottky-Kontakt) bestehend aus Gold und Silizium den Sperrkontakt. Dieser Kontakt kann wie ein abrupter p^+-n-Übergang beschrieben werden [SZE85]. Am Rand der Oberfläche des Detektors erhält man durch den Goldüberlapp eine MOS (**M**etal-**O**xide-**S**emiconductor)-Struktur. Der Aluminium-Silizium-Kontakt an der Rückseite des Detektors bildet einen ohmschen (nicht injizierenden) Kontakt.

2.1.1 Ionenimplantierte Silizium-Detektoren

Um ein besseres Verständnis der auftretenden Schäden an den eingesetzten Detektoren zu ermöglichen, wurden in der Strahlzeit 1995 als Vergleich ionenimplantierte Silizium-Detektoren, die im Halbleiterlabor des Max-Planck-Instituts für Physik hergestellt wurden [OSI95], zusätzlich eingebaut (Abb. 2.2). Die Sperrschicht wird in diesem Fall durch einen p^+-n-Übergang (durch Bor-Implantation) realisiert. Es gibt keinen Schottky-Kontakt und keine MOS-Strukturen im Oberflächenrandbereich (daher auch keine Flachbandspannung siehe Abschnitt 2.3). Ein weiterer Unterschied sind Schutzringstrukturen ('guardrings') um das Detektorfenster, die im PLUG-Kalorimeter nicht angeschlossen wurden ('floating guardring'). Guardring-Strukturen dienen bei Kontaktierung zur Verminderung von Oberflächenströmen durch am Detektorrand generierte Ladungsträger. Die ionenimplantierten Detektoren sind mit Oberflächenabmessungen von 9×9 mm^2 (Detektorfenster 5×5 mm^2) deutlich kleiner als die Oberflächensperrschichtdetektoren.

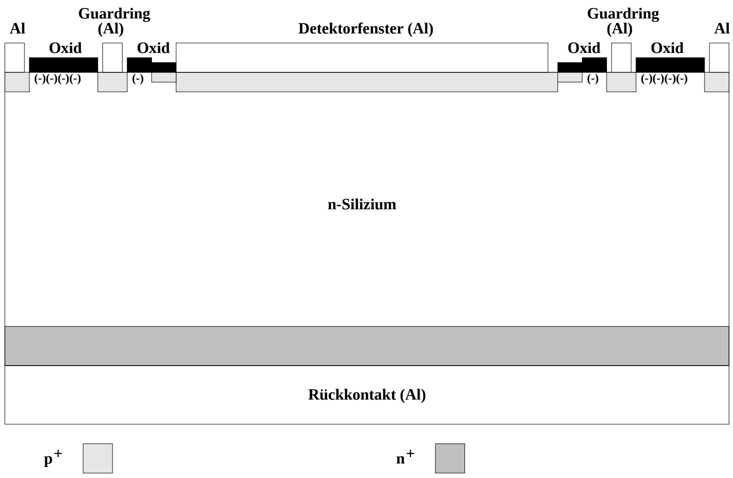

Abbildung 2.2: *Querschnitt durch einen ionenimplantierten Detektor (nicht maßstabsgetreu)*

2.2 Der Schottky-Kontakt

Die Diodenstruktur der verwendeten Oberflächensperrschichtdetektoren wird durch einen Metall-Halbleiter-Kontakt (Schottky-Kontakt) bestehend aus Gold und Silizium gebildet. An der Grenzschicht kommt es zu einer Krümmung der Energiebänder, da unterschiedliche Austrittsarbeiten für Gold und Silizium vorliegen und das Fermi-Niveau überall gleich sowie das Vakuumniveau stetig sein muß [SZE85] (siehe Abb. 2.3). Es ensteht eine Potentialbarriere. Freie Ladungsträger fließen aufgrund der Bandkrümmung von dort ab, so daß ein von freien Ladungsträgern verarmtes Gebiet entsteht. Durch die Adsorption von Sauerstoff an der Gold-Silizium-Grenzfläche werden negativ geladene Oberflächenzustände im Silizium erzeugt, die zu einer Erhöhung der Potentialbarriere Φ_{SB} führen. Die Oberflächensperrschicht verhält sich wie ein abrupter p^+-n-Übergang [SZE85].

Für das intrinsische elektrochemische Potential μ_i von Silizium gilt bei einer Temperatur von 300 K und einer effektiven Dotierung $N_{eff} = 5\times 10^{11}$ cm^{-3} [FEI96] (siehe auch Abschnitt 2.4):

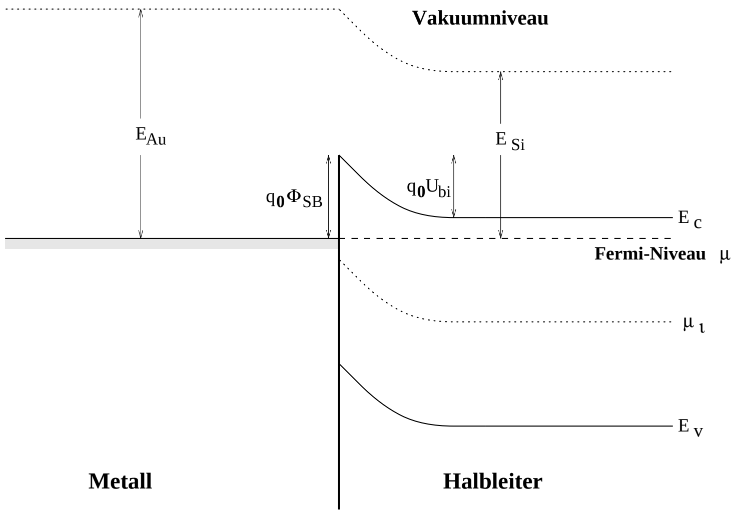

Abbildung 2.3: *Bandmodell des Metall-Halbleiter-Kontakts (Schottky-Kontakt)*

$$\mu_i = \frac{E_C + E_V}{2} - \frac{k_B T}{2} \ln \frac{N_C}{N_V} \approx \frac{E_C + E_V}{2} - 0,013eV = \underline{E_C - 0,57eV} \quad (2.1)$$

Für das elektrochemische Potential (Fermi-Niveau) μ erhält man:

$$\mu = \mu_i + k_B T \mathrm{arsinh} \frac{N_{eff}}{2n_i} \approx \mu_i + 0,092eV = E_C - q_0 U_n = \underline{E_C - 0,481eV} \quad (2.2)$$

mit der Elementarladung q_0.

Die Kontaktspannung U_{bi} (built-in voltage) ist proportional zu der Differenz der Energieabstände des Fermi-Niveaus zu dem Vakumniveau:

$$U_{bi} = \frac{E_{Au} - E_{Si}}{q_0} \quad (2.3)$$

Die Kontaktspannung beträgt für Gold und Silizium $U_{bi} \approx 0,5\ V$ [WUN86]. Am Aluminium-Rückkontakt entsteht aufgrund der geringen Differenz der Austrittsarbeiten für n-Silizium und Aluminium keine Sperrschicht.

2.3 Die Metall-Oxid-Halbleiter-Struktur

Der Überlapp der Gold-Elektrode über das Siliziumoxid auf dem Silizium im Randbereich des Oberflächensperrschichtdetektors bildet eine MOS-Struktur. Die Abbildungen 2.4-2.7 zeigen die vier verschiedenen Zustände einer MOS-Struktur im Bändermodell in Abhängigkeit von der anliegenden Spannung U_G.

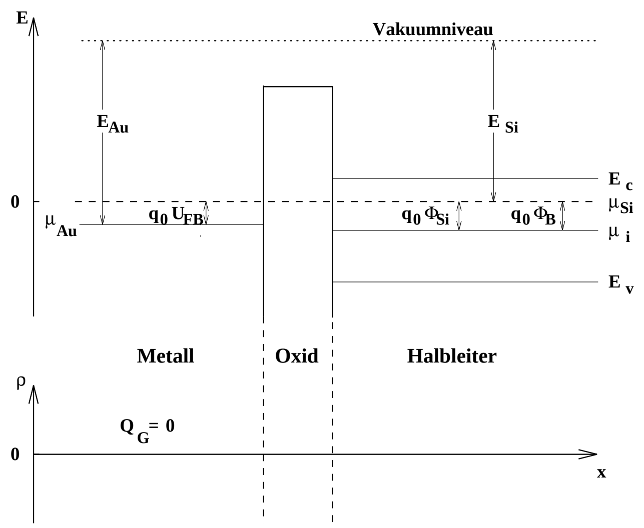

Abbildung 2.4: *Bandmodell des Metall-Oxid-Halbleiter-Kontakts; Flachbandfall,* $U_G = U_{FB}, \Psi_{Si} = 0$

Da herstellungsbedingt im Siliziumoxid positive Ladungen vorhanden sind, kommt es zu einer Akkumulation von Elektronen im Silizium und einer Verbiegung der Energiebänder nach unten. Legt man eine negative Spannung (Sperrrspannung) an das Metall, wird die Bandkrümmung reduziert. Eine charakteristische Größe ist die Flachbandspannung U_{FB}, bei der die Bänder flach sind, d.h. die Bandkrümmung gleich null ist. Für höhere Sperrspannungen $U_G < U_{FB}$ kommt es zu einer Bandkrümmung nach oben und es bildet sich eine Verarmungszone unter der MOS-Struktur. Für große Sperrspannungen $U_G << U_{FB}$ kommt es bei isolierten MOS-Strukturen zur Inversion, d.h. es bildet sich eine dünne Schicht ($d = 3 - 30\ nm$) mit hoher Konzentration von Minoritätsladungsträgern. Dieser Effekt tritt bei den Detektoren nicht auf, da der Gate-Kontakt mit dem Sperrkontakt der Diode kurzgeschlossen ist.

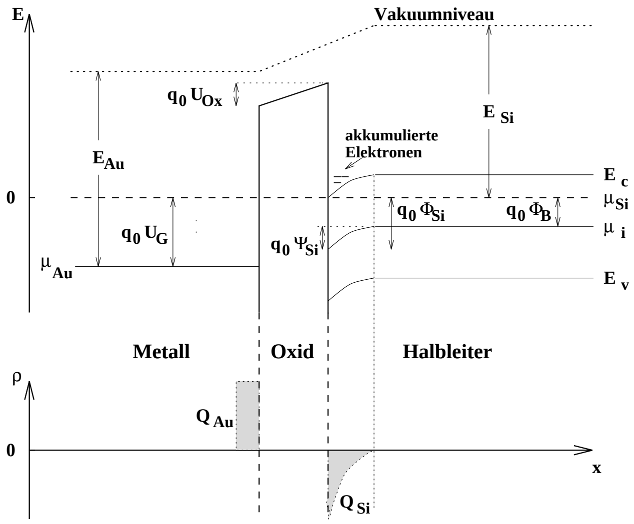

Abbildung 2.5: *Bandmodell des Metall-Oxid-Halbleiter-Kontakts; Akkumulation,* $U_G > U_{FB}$, $\Psi_{Si} > 0$

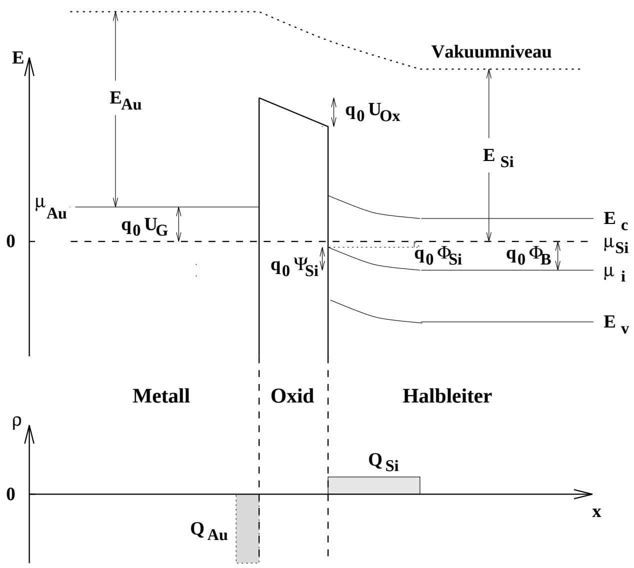

Abbildung 2.6: *Bandmodell des Metall-Oxid-Halbleiter-Kontakts; Verarmung,* $U_G < U_{FB}$, $-\Phi_B < \Psi_{Si} < 0$

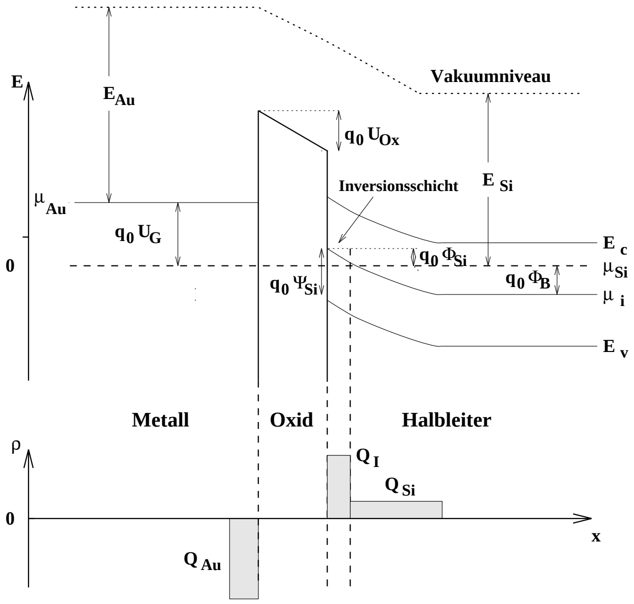

Abbildung 2.7: *Bandmodell des Metall-Oxid-Halbleiter-Kontakts; Inversion,* $U_G << U_{FB}, \Psi_{Si} < -\Phi_B < 0$

2.4 Ausbreitung des elektrischen Feldes

Ein grundlegender Parameter für die Spannungsabhängigkeit der charakteristischen Größen ist die Ausbreitung des elektrischen Feldes im Detektor. Bei Anlegen einer Sperrspannung an einen Oberflächensperrschichtdetektor werden die Energiebänder stärker nach oben gekrümmt und die Verarmungszone dehnt sich im Detektor aus.

Unter der Voraussetzung, daß das Silizium mit flachen (bei Raumtemperatur ionisierten) Donatoren und Akzeptoren der Konzentrationen N_D und N_A homogen dotiert ist, wird die Konzentration der nicht kompensierten Donatoren als effektive Dotierung N_{eff} definiert. Für die Raumladungsdichte ergibt sich mit der Elementarladung q_0:

$$\rho_{el} = q_0(N_D - N_A) = q_0 N_{eff} \tag{2.4}$$

Ausgehend von der Poisson-Gleichung

$$-\frac{d^2\Phi(x)}{dx^2} = \frac{q_0 N_{eff}}{\epsilon\epsilon_0} \tag{2.5}$$

kann der Potentialverlauf in der Verarmungszone berechnet werden. Es wird dabei angenommen, daß die Elektronen- und Löcherdichte in der Verarmungszone gegenüber der Konzentration der Dotierungsatome vernachlässigbar klein ist (depletion approximation).

Nach zweifacher Integration erhält man für die Tiefe der Verarmungszone x:

$$x(U) = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{q_0 N_{eff}}(U + U_{bi})} \tag{2.6}$$

Mit zunehmender Sperrspannung dehnt sich die Verarmungszone bis an den Rückkontakt aus. Die Spannung für vollständige Verarmung U_{dep} (depletion voltage) erhält man, wenn die Verarmungszone den gesamten Detektor durchdringt und den Rückkontakt erreicht. Für den Fall vollständiger Verarmung ($x = d$) ergibt sich aus Gl. 2.6 für die effektive Dotierung N_{eff}:

$$N_{eff} = \frac{2\epsilon\epsilon_0}{q_0 d^2} U_{dep} \tag{2.7}$$

Da die Kontaktspannung mindestens eine Größenordnung kleiner ist als die üblichen Werte für die Verarmungsspannung, wurde sie hier wie im folgendem vernachlässigt.

Die Verarmungsspannung ist ein wichtiger Parameter, da ein Betrieb bei vollständiger Verarmung Voraussetzung für eine absolute Kalibration der Silizium-Detektoren ist. Zudem kann die effektive Dotierung aus der Verarmungsspannung bestimmt werden.

2.5 Dunkelstrom

Durch einen Detektor, der in Sperrichtung gepolt ist, fließt auch ohne den Einfall ionisierender Strahlung ein Strom, der Sperrstrom oder Dunkelstrom. Der Dunkelstrom ist ein wichtiger Betriebsparameter, da er zum Detektorrauschen beiträgt und die Erwärmung des Detektors bestimmt. Daher wird der Dunkelstrom durch die Verwendung von hochreinem Silizium und den Einsatz einer geeigneten Technologie möglichst gering gehalten. Der Dunkelstrom für Oberflächensperrschichtdetektoren beträgt bei Verarmungsspannung im ungeschädigtem Zustand $I \approx 4\ nAcm^{-2}$.

Der Dunkelstrom setzt sich aus vier Bestandteilen zusammen:

- Volumengenerationsstrom I_{Vol}
- Diffusionsstrom I_{Dif}
- Oxidstrom I_{Ox}
- Barrierenstrom I_{SB}

Volumengenerationsstrom I_{Vol}

Der Volumengenerationsstrom wird durch Ladungsträger gebildet, die an den Generationszentren in der Verarmungszone thermisch erzeugt werden. Als Generationszentren wirken Störstellen im Siliziumgitter, deren Energieniveaus E_t in der Bandlücke liegen. Da die Tiefe der Verarmungszone $x(U)$ proportional zur Wurzel der Spannung $\sqrt{U}$ ist (siehe Gl. 2.6), ist auch der Volumengenerationsstrom in gleicher Weise von der angelegten Spannung U abhängig, sofern die laterale Ausdehnung der Feldzone vernachlässigt werden kann. Dies trifft für Detektoren mit einer Fläche von $A = 25\ cm^2$ zu. Mit der effektiven Emissionsrate τ_e und der intrinsischen Ladungsträgerdichte n_i gilt für den Volumengenerationsstrom [SZE85]:

$$I_{Vol}(U) = \frac{q_0 n_i A x(U)}{\tau_e} \tag{2.8}$$

Unter der Annahme, daß die Generationszentren genau in der Bandmitte liegen ($E_t = \mu_i$), gilt für die Temperaturabhängigkeit des Volumengenerationsstroms [WUN92]:

$$I_{Vol} \propto (k_B T)^2 e^{-\frac{1.21\ eV}{2 k_B T}} \tag{2.9}$$

Im Bereich der Raumtemperatur bedeutet dies eine Verdoppelung des Volumengenerationsstroms pro $8^o C$. Da die Temperaturabhängigkeit des Oxidstroms ein ähnliches Verhalten zeigt und für die betrachteten geschädigten Detektoren angenommen wird, daß die Summe aus Volumengenerationsstrom- und Oxidstromanteil groß ist gegenüber den weiteren Stromkomponenten, erfolgt eine Temperaturkorrektur für die gemessenen Stromwerte nach Gl. 2.9 auf $20^o C$.

Diffusionsstrom I_{Dif}

Der Diffusionsstrom wird durch Minoritätsladungsträger gebildet, die im nicht verarmten, feldfreien Gebiet generiert werden und in die Verarmungszone hineindiffundieren. Es tragen nur Ladungsträger zum Diffusionsstrom bei, die nicht weiter als eine mittlere Diffusionslänge L_p von der Verarmungszone entfernt generiert werden. Für den Diffusionsstrom gilt [SZE85]:

$$I_{Dif} = \frac{q_0 n_i^2}{\tau_p |N_{eff}|} L_p A \tag{2.10}$$

mit der mittleren Diffusionslänge für Löcher

$$L_p = \sqrt{\frac{k_B T \mu_p \tau_p}{q_0}} \tag{2.11}$$

Der Diffusionsstrom trägt einen vernachlässigbar kleinen Anteil zum Dunkelstrom bei [WUN86].

Der Volumengenerationsstrom und der Diffusionsstrom werden ausschließlich durch Parameter des Grundmaterials bestimmt und sind unabhängig von der Technologie, die für die Sperrschicht, bzw. den abrupten p^+-n-Übergang verwendet wurde.

Oxidstrom I_{Ox}

Die Grenzflächenzustände an der Siliziumoxid-Silizium-Grenzschicht sind Generationszentren, die zum Dunkelstrom beitragen, wenn die generierten Ladungsträger in die Verarmungszone gelangen. Da sich die Verarmungszone erst ab der Flachbandspannung U_{FB} unter das Oxid ausbreitet (Abb. 2.8), trägt auch der Oxidstrom nur für Spannungen oberhalb der Flachbandspannung zum Dunkelstrom bei.

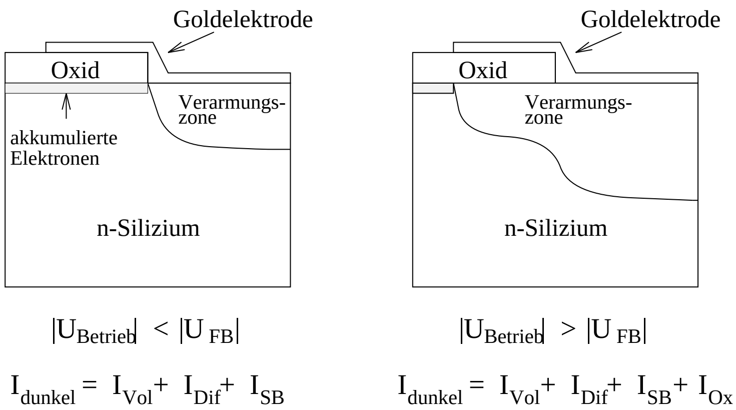

Abbildung 2.8: *Schematische Darstellung der Ausbreitung der Verarmungszone unter der MOS-Struktur; der Oxidstrom trägt erst für Spannungen oberhalb der Flachbandspannung zum Dunkelstrom bei.*

Für den Oxidstrom gilt [NAG85]:

$$I_{Ox} = q_0 G A_{Au} \tag{2.12}$$

Hierbei ist G die Generationsrate pro Fläche und A_{Au} die Fläche des Goldüberlapps. Bei gleichmäßiger Verteilung der Grenzflächenzustände über die Bandlücke des Siliziums gilt für die Generationsrate G mit der Dichte der Grenzflächenzustände D_{it}, den Wirkungsquerschnitten für den Einfang von Elektronen und Löchern σ_n,σ_p und der mittleren thermischen Geschwindigkeit v_{th} [NIC82]:

$$G = \frac{1}{2}\pi\sqrt{\sigma_n\sigma_p}v_{th}k_BTD_{it} \tag{2.13}$$

Der Oxidstrom ist nur abhängig von der Dichte der Grenzflächenzustände D_{it} und der Temperatur T. Aus dem Oxidstrom erhält man die Generations-/Rekombinationsgeschwindigkeit S_o [NAG85]:

$$S_0 = \frac{I_{Ox}}{q_0n_iA_{Au}} \tag{2.14}$$

Barrierenstrom I_{SB}

Für den Barrierenstrom I_{SB} ('surface barrier') einer Metall-Halbleiter-Grenzschicht erhält man aus einer Synthese der Thermionischen Emissionstheorie und der Diffusionstheorie mit der effektiven Richardsonkonstante A^{**} und der Fläche der Sperrschicht A_{SB} [SZE85] [RHO88]:

$$I_{SB} = A^{**}T^2e^{-\frac{q_0\Phi_{SB}}{k_BT}}(e^{\frac{q_0U}{k_BT}}-1)A_{SB} \tag{2.15}$$

In dieser Gleichung bedeutet $U < 0$, daß der Detektor in Sperrrichtung geschaltet ist. Der Barrierenstrom wird durch die Barrierenhöhe Φ_{SB} (siehe Abb. 2.3) bestimmt. Für hohe Sperrspannungen ist der Barrierenstrom nur noch schwach von der Spannung abhängig und erreicht einen Sättigungswert I_S:

$$I_S = A^{**}T^2e^{-\frac{q_0\Phi_{SB}}{k_BT}}A_{SB} \tag{2.16}$$

2.6 Sperrschichtkapazität

Die Kapazität eines p-n-Übergangs C ist definiert als die dynamische Kapazität C_{dyn}:

$$C_{dyn} = \frac{dQ}{dU} \tag{2.17}$$

Wird die an den Detektor angelegte Spannung U durch eine Überlagerung mit einer kleinen Wechselspannung dU variiert, so bewirkt dies eine entsprechende Veränderung der Verarmungstiefe dx und damit auch eine Veränderung der Raumladung dQ eines Detektors mit der aktiven Fläche A:

$$dQ = q_0|N_{eff}|Adx \tag{2.18}$$

Durch die Verwendung der Gleichungen 2.6, 2.17 und 2.18 ergibt sich unter Vernachlässigung der Kontaktspannung für die dynamische Kapazität

$$C(U) = A\sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0 q_0 |N_{eff}|}{2U}} \tag{2.19}$$

und

$$C(x) = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{x} \tag{2.20}$$

Die dynamische Kapazität $C(x)$ eines Silizium-Detektors entspricht der Kapazität eines Plattenkondensators mit dem Plattenabstand x und der Fläche A mit dem verarmten Volumen als Isolator. Für Sperrspannungen $U \geq U_{dep}$ ist der gesamte Detektor verarmt und die Kapazität hat einen konstanten Wert, die geometrische Endkapazität C_{end}:

$$C_{end} = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{d} \tag{2.21}$$

Für die verwendeten Oberflächensperrschichtdetektoren mit einer Fläche von $A \approx 25\ cm^2$ und einer Dicke von $d \approx 400\ \mu m$ ergibt sich für die geometrische Endkapazität ein Wert von $C_{end} \approx 650\ pF$.

Die MOS-Kapazität

Die Gesamtkapazität eines Oberflächensperrschichtdetektors ergibt sich bis zum Flachbandfall ($|U_B| < |U_{FB}|$) aus einer Parallelschaltung der Sperrschichtkapazität und der MOS-Kapazität.

$$C_{Ges} = C_{dyn} + C_{MOS} \tag{2.22}$$

Die MOS-Kapazität kann als Reihenschaltung der Oxidkapazität C_{Ox} und der Siliziumkapazität C_{Si} aufgefaßt werden:

$$\frac{1}{C_{MOS}} = \frac{1}{C_{Ox}} + \frac{1}{C_{Si}} \tag{2.23}$$

Für die Oxidkapazität gilt:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{Ox}\epsilon_0 A_{Au}}{d_{Ox}} \tag{2.24}$$

Die Dielektrizitätskonstante für Siliziumoxid ist abhängig vom Oxidationsprozeß und beträgt für trockenes Oxid $\epsilon_{Ox,trocken} = 3,4$ und für feuchtes Oxid $\epsilon_{Ox,feucht} = 3,8$. Im Akkumulationsfall ist die MOS-Kapazität nur durch die

Oxidkapazität C_{Ox} bestimmt, da die Siliziumkapazität C_{Si} aufgrund der hohen Elektronenkonzentration wesentlich größer ist als die Oxidkapazität. Mit steigender Sperrspannung nimmt die Siliziumkapazität ab. Im Flachbandfall beträgt die Kapazität des Siliziums [NIC82]:

$$C_{Si}(U_{FB}) = \frac{\epsilon_{Si}\epsilon_0 A_{Au}}{\lambda} \tag{2.25}$$

mit der extrinsischen Debyelänge

$$\lambda = \sqrt{\frac{\epsilon_{Si}\epsilon_0 k_B T}{q_o^2|N_{eff}|}} \tag{2.26}$$

Hierbei ist N_{eff} die effektive Dotierung des Siliziums direkt unterhalb der Oxidschicht, die sich aufgrund des Oxidationsvorgangs von dem Wert für das Grundmaterial unterscheiden kann. Für Spannungen über der Flachbandspannung ($|U_B| > |U_{FB}|$) verhält sich der MOS-Rand wie die Diode, da keine Inversion eintritt.

$$C_{Ges} = C_{dyn} + C_{MOS-Rand} \propto \frac{1}{\sqrt{U}} \tag{2.27}$$

2.7 Kennlinien des ungeschädigten Detektors

Abbildung 2.9 zeigt den typischen Verlauf der IV- und CV-Charakteristiken für einen ungeschädigten Oberflächensperrschichtdetektor in doppelt-logarithmischer Darstellung.

IV-Charakteristik

Der Dunkelstrom wird bei kleinen Spannungen durch den Barrierenstrom bestimmt. Mit zunehmender Spannung nimmt der Dunkelstrom proportional zu $\sqrt{U}$ durch das Anwachsen des Volumengenerationsstroms nach Gl. 2.8 und 2.6 zu. Im Bereich der Flachbandspannung ist ein sprunghafter Anstieg des Dunkelstroms zu erkennen, der durch den Oxidstrom verursacht wird. Oberhalb der Verarmungsspannung gibt es einen geringen Anstieg des Dunkelstroms durch die laterale Ausdehnung der Verarmungszone.

Aus der Abbildung 2.9 erhält man für die Anteile des Dunkelstroms bei der Verarmungsspannung: $I_{SB} \approx 120\ nA$, $I_{Ox} \approx 50\ nA$, $I_{Vol} \approx 100\ nA$. Der Diffusionsstrom ist vernachlässigbar klein.

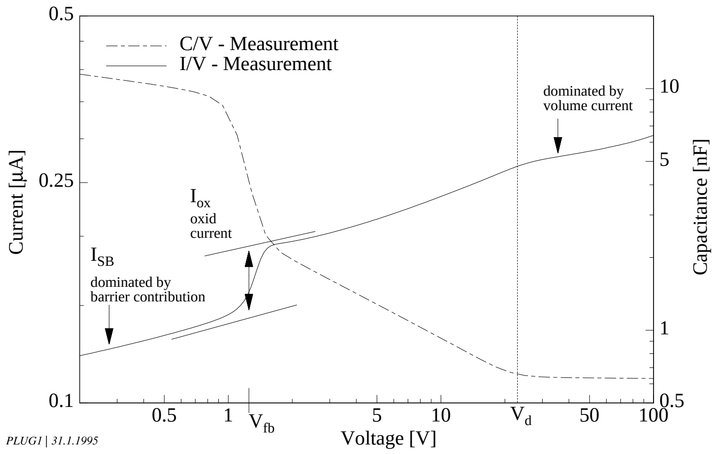

Abbildung 2.9: *IV- und CV-Charakteristik für einen ungeschädigten Oberflächensperrschichtdetektor.*

CV-Charakteristik

Die Kapazität hat aufgrund der MOS-Kapazität für kleine Spannungen einen hohen Wert. Im Bereich der Flachbandspannung nimmt die Kapazität korreliert zum Dunkelstromsprung ab. Im weiteren Verlauf nimmt die Kapazität proportional zu $\sqrt{U}$ nach Gl. 2.19 ab. Für Spannungen oberhalb der Verarmungsspannung ist die Kapazität annähernd konstant. Ein geringer Abfall bei höheren Spannungen ist wiederum durch die laterale Ausdehnung der Verarmungszone zu erklären. Die aus der Kennlinie abgelesene Endkapazität beträgt $C_{end} \approx 630\ pF$ und stimmt gut mit dem errechneten Wert aus Abschnitt 2.6 überein.

2.8 Aufnahme der Kennlinien

Im folgenden werden die Verfahren zur Aufnahme von IV-, CV- und Rausch-Spannungs-Charakteristiken im PLUG-Aufbau beschrieben. Die Messungen erfolgen in einem Meßbereich von $U = 0\ V$ bis $U = 100\ V$ mit einer Schrittweite von $\Delta U = 2\ V$. Die nominellen Spannungswerte U_{nom} werden dabei unter Berücksichtigung des bekannten Spannungsabfalls am Widerstand R_v korrigiert.

$$U = U_{nom} - IR_v \tag{2.28}$$

Die Messung startet bei der eingestellten Betriebsspannung. Die Spannung wird bis $U = 100\ V$ erhöht (Phase 1), auf $U = 0\ V$ erniedrigt (Phase 2) und schließlich wieder bis auf die Betriebsspannung erhöht (Phase 3). Durch diese Meßmethode können Hystereseeffekte festgestellt werden. Die Meßgenauigkeit der eingestellten Spannung beträgt $0,2\ V$.

Strom-Spannungs-Charakteristik

Die Strommessung erfolgt direkt an der Spannungsversorgung (CAEN). Die Auflösung der internen Messung des CAEN-Gerätes beträgt $0,2\ \mu A$.

Wie im Abschnitt 1.3 erläutert wurde, werden mehrere Detektoren von einem Spannungskanal versorgt, so daß keine individuellen Ströme gemessen werden können. Es wird daher davon ausgegangen, daß der Strom gleichmäßig auf die Detektoren verteilt werden kann. Bei einem gemessenen Strom I gilt für den Strom an einem Detektor I_k:

$$I_k = \frac{1}{n} I \tag{2.29}$$

Mit dieser Annahme kann neben dem bekannten Spannungsabfall an R_v auch der Spannungsabfall über R_k berücksichtigt werden, so daß man für die an jedem einzelnen Detektor anliegende Spannung erhält:

$$U_k = U_{nom} - \frac{1}{n} I R_k - I R_v \tag{2.30}$$

Mit diesen Gleichungen erhält man IV-Charakteristiken für jeden Detektor. Die ermittelten Ströme werden unter der Annahme, daß der gemessene Strom durch den Volumengenerationsstrom dominiert wird, nach Gl. 2.9 auf eine Temperatur von $20^o\ C$ normiert.

Abbildung 2.10 zeigt die Auswirkung der Korrektur auf die IV-Kennlinie. Da die Messung bei einer Temperatur von $T = 26,5^oC$ erfolgte, ist die korrigierte IV-Kennlinie flacher. Die Spannungskorrektur führt zu einer Stauchung der Kennlinie.

Kapazitäts-Spannungs-Charakteristik

Die Kapazität der Detektoren kann im PLUG-Kalorimeter nicht wie im Labor über eine Kapazitätsbrücke gemessen werden. Stattdessen wird die relative Änderung der Kapazität des Detektors C_{det} bei verschiedenen Spannungen ermittelt, indem eine bekannte Ladungsmenge Q_k durch einen Pulser über den Kondensator C_{Tk} (der H1-Pulser und der Kondensator C_{Tk} bilden einen 'Charge Terminator') in die Schaltung injiziert wird.

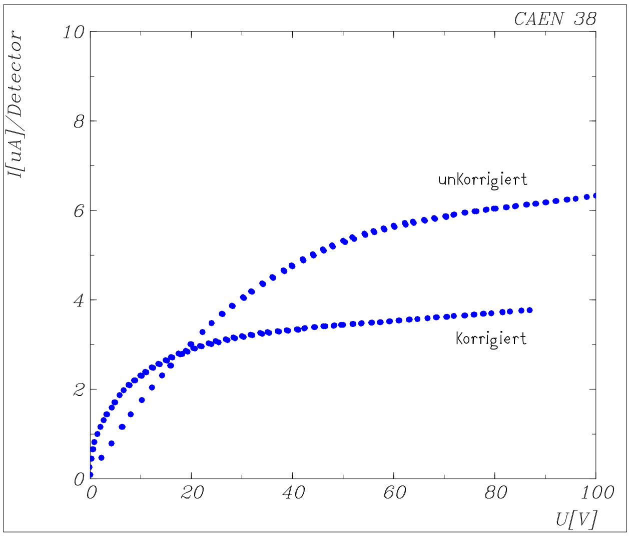

Abbildung 2.10: *Korrektur der IV-Kennlinie; die korrigierte Kennlinie ist aufgrund der Temperaturkorrektur flacher (die Messung erfolgte bei $T = 26,5^oC$) und durch die Spannungskorrektur gestaucht.*

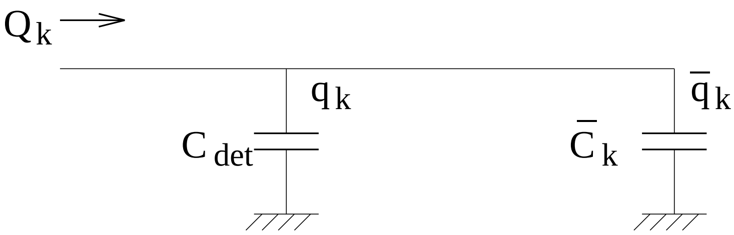

Abbildung 2.11: *Vereinfachtes Schaltbild zur Aufnahme von CV-Kennlinien*

Die Ladungsmenge verteilt sich auf die Kapazitäten C_{det} und $\overline{C_k}$ gemäß dem äquivalenten Schaltbild in Abbildung 2.11 ($C_{Tk} = 4,7\ pF$ ist vernachlässigbar klein):

$$\frac{q_k}{C_{det}} = \frac{\overline{q_k}}{\overline{C_k}} = \frac{Q_k}{C_{det} + \overline{C_k}} \tag{2.31}$$

Es wird also eine Ladung $\overline{q_k}$ auf dem Koppelkondensator induziert, und so ein Signal S_k erzeugt. Für das Signal gilt:

$$S_k^{-1} \propto (\overline{q_k})^{-1} = \frac{C_{det} + \overline{C_k}}{\overline{C_k} Q_k} \tag{2.32}$$

Das Signal wird für jeden Spannungsschritt mehrmals gemessen und gemittelt. Während der Messung der CV-Charakteristik eines Detektors, wird der benachbarte Detektor, der am gleichen Auslesekanal angeschlossen ist, auf konstanter Spannung gehalten. So wird vermieden, daß Kapazitätsänderungen dieses Detektors die Messung verfälschen.

Die Flachbandspannung wird ermittelt, indem in Phase 2 (Spannung wird von 100 V auf 0 V erniedrigt) der erste sprunghafte Anstieg des Signals als Flachbandspannung markiert wird. Bei dieser Methode wird die Flachbandspannung insbesondere für niedrige Werte leicht zu hoch ermittelt.

Rausch-Spannungs-Charakteristik

Das Rauschen wird zeitgleich mit der Kapazitat für jeden Auslesekanal gemessen und ergibt sich aus der Standardabweichung der Signalmessungen. Da ein Detektor eine eindeutige Kombination aus IV-Kennlinie und Rauschcharakteristik hat, können auf diese Weise Detektoren, die im Verlauf der Strahlzeit aufgrund der Strahlenschädigung unbrauchbar werden, identifiziert werden. Weitere Betrachtungen zu den Ursachen und Auswirkungen des Rauschens enthält [KRÜ96].

Änderungen zur Strahlzeit 1995

Bei der Ermittlung des individuellen Stroms pro Detektor fließen nun Ergebnisse aus Labormessungen der IV-Kennlinien der Detektoren ein, die vor dem Einbau gemessen wurden. Auf diese Weise wird berücksichtigt, daß vor dem Einbau bereits deutliche Unterschiede im Dunkelstrom für Detektoren in einem Spannungsring vorliegen. Bei dieser Methode wird davon ausgegangen, daß der Stromanstieg für alle Detektoren in einem Spannungsring gleichmäßig erfolgt. Diese Annahme scheint gerechtfertigt, da die Detektoren eines Spannungsringes sich alle im gleichen Slot und annähernd gleichen Abstand r vom Strahlrohr befinden und so eine vergleichbare Strahlenschädigung erwartet werden kann (siehe auch Kap. 4). Die Spannung an jedem Detektor U_k eines Spannungsringes wird jetzt iterativ ermittelt. Ausgehend von der nominellen Spannung U abzüglich des exakt bekannten Spannungsabfalls an R_v wird für jeden Detektor der Strom aus der Labormessung für diese Spannung ermittelt, die Summe dieser Ströme vom gemessenen Stromwert des entsprechenden CAEN-Kanals I subtrahiert und der Überschuß gleichmäßig auf die n Detektoren des Spannungsringes verteilt. Für I_k und U_k gelten:

$$I_k(U_k) = I_{k,lab}(U_k) + \frac{I - \sum I_{k,lab}}{n} \tag{2.33}$$

$$U_k(I_k) = U_{nom} - I_k R_k - I R_v \tag{2.34}$$

Messungen an den ionenimplantierten Detektoren

Da die ionenimplantierten Detektoren nicht an Auslese-Kanäle angeschlossen waren, konnten für sie nur IV-Kennlinien gemessen werden. Die verwendeten ionenimplantierten Detektoren weisen aufgrund ihrer geringen Größe und ihres ungeschädigten Zustandes nur sehr kleine Dunkelströme in der Größenordnung von einigen nA auf, die nicht direkt in der CAEN-Spannungsversorgung ermittelt werden können. Die Messung des Stroms erfolgte daher indirekt als Spannungsabfall über dem Widerstand R mit einem externen Meßgerät. Der Widerstand R und der Kondensator C bilden einen Tiefpaß (Zeitkonstante 1 s), so daß Störsignale unterdrückt werden.

2.9 Strahlenschädigung von Silizium-Detektoren

Die Strahlenschädigung von Oberflächensperrschichtdetektoren läßt sich nach ihrer Ursache und ihrer Wirkung in zwei Kategorien, Kristall- und Oberflächenschädigung unterscheiden. Kristalldefekte entstehen durch die Verlagerung von Gitteratomen und beeinflussen die Eigenschaften des Silizium-Grundmaterials. Schäden an der Metall-Silizium-Sperrschicht und der MOS-Struktur entstehen durch die Veränderung der Ladung von Gold-Silizium-Grenzflächenzuständen.

2.9.1 Schäden im Silizium-Grundmaterial

Kristalleffekte im Silizium-Grundmaterial entstehen, wenn es bei der Wechselwirkung von Strahlung mit einem Gitteratom zu einem hohen Energieübertrag kommt, so daß das Gitteratom von seinem Gitterplatz gestoßen wird. Der Schwellenwert für die Erzeugung eines solchen primären Zwischengitteratoms (PKA: 'primary knock-on atom') beträgt $E_D \approx 25\ eV$ [LIN80]. Das herausgeschlagene PKA gibt seine kinetische Energie durch Ionisation und Bildung weiterer Versetzungen ab, bis es als Zwischengitteratom zur

Ruhe kommt. Bei großen Energieüberträgen kann es zur Bildung einer Kaskade kommen, wenn die vom PKA herausgeschlagenen Atome selbst zur Erzeugung von Versetzungsdefekten fähig sind. Liegt die Primärenergie des PKA über einem Schwellenwert von etwa 5 keV, so kommt es an den Enden der Kaskade zu einer stark erhöhten Dichte von Defekten [LIN80]. Diese Bereiche werden als Cluster bezeichnet. Die primären Kristalldefekte sind die Leerstelle V (vacancy) und das Zwischengitteratom Si_i (interstitial), sowie dicht zusammenliegende Paare von Leerstellen und Zwischengitteratomen (Frenkelpaare).

Da Zwischengitteratome und Leerstellen bei Temperaturen von $T > 150\ K$ im Kristall eine hohe Beweglichkeit besitzen, kommt es zu Reaktionen der Primärdefekte untereinander und mit den im Silizium enthaltenen Fremdatomen. Der Prozess der Rekombination führt zu einer Reduktion der Primärdefekte um etwa 60 % (in Clustern 75-95 %) [SHI90]. Die verbleibenden Primärdefekte bilden Defektkomplexe. Wichtige Defektkomplexe sind die Doppelleerstelle (divacancy), der Sauerstoff-Leerstellen-Komplex (A-Zentrum) und der Phosphor-Leerstellen-Komplex (E-Zentrum). Die Bildung des E-Zentrums führt zu einer Reduktion der Donatorkonzentration (donor-removal) und damit einer Änderung der effektiven Dotierung N_{eff}. Die Frenkel-Paare, Zwischengitteratome und Komplexdefekte werden im Unterschied zu Clustern als Punktdefekte bezeichnet.

Die Punktdefekte bilden spezifische Energieniveaus in der Bandlücke. Diese haben in Abhängigkeit von ihrer Lage in der Bandlücke und ihrem Ladungszustand verschiedene Wirkungen. Abbildung 2.12 zeigt schematisch diese Wirkungen.

1. Generation: Defektniveaus in der Nähe der Bandmitte wirken als Generationszentren. Sie führen zu einer Erhöhung des Volumengenerationsstroms.

2. Rekombination: Dieselben Defektniveaus, die die Generation bewirken, sind für den entgegengesetzten Prozeß der Rekombination verantwortlich. Die Rekombination ist der Vorgang des gleichzeitigen Einfangs eines Elektrons und eines Loches durch ein Defektniveau.

3. Trapping: Störstellen in der Nähe des Leitungs- oder Valenzbandes ('flache Störstellen') wirken durch den Einfang ('trapping') eines Ladungsträgers und die verzögerte Re-Emission des gleichen Ladungsträgers.

4. Kompensation: Defektniveaus, die als Donatoren oder Akzeptoren wirken, können die Akzeptor- oder Donatorwirkung der Dotierung kom-

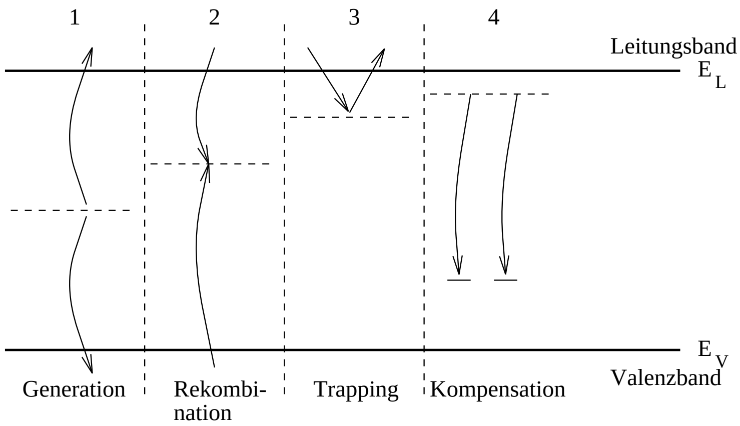

Abbildung 2.12: *Wirkungen von Defektniveaus in der Bandlücke von Silizium [BRÄ89]*

pensieren und so zu einer Veränderung der Gleichgewichtskonzentration der Majoritätsladungsträger führen ('carrier removal').

Weitere Wirkungen von Störstellen sind das defektunterstützte Tunneln und eine mögliche Beweglichkeitsverminderung durch Defekte, die zusätzliche Streuzentren darstellen.

Die Defektarten können durch spektrokopische Verfahren (TSC - Thermally Stimulated Current und DLTS - Deep Level Transient Spectroscopy) genauer untersucht werden.

Cluster ändern die Bandstruktur des Siliziums lokal. Über den Einfluß von Clustern auf die elektrischen Eigenschaften von Silizium-Detektoren ist wenig bekannt. Es wird angenommen, daß der Hüllenbereich des Clusters als Generationszentrum zum Volumengenerationsstrom beiträgt.

Da Wechselwirkungen von Teilchen mit Silizium von der Teilchenart und -energie abhängig sind (Protonen - vorwiegend Rutherford-Streuung und Ionisierung, Neutronen - elastische Streuung am Kern und für Energien oberhalb von $1,8\ MeV$ Kernreaktionen [LIN80]), wird die Schädigungsfunktion definiert [LAZ87]:

$$D(E) := \sum_{\nu} \sigma_{\nu}(E) \cdot \int_{0}^{E_R^{max}} f_{\nu}(E, E_R) P(E_R) dE_R \qquad (2.35)$$

Hierin sind E_R die Primärenergie des PKA, ν ein Index über alle Wechselwirkungen, die zu Versetzungen im Kristallgitter führen können, σ_{ν} der

Wechselwirkungsquerschnitt der ν-ten Wechselwirkung, $f(E, E_R)$ die Wahrscheinlichkeit für die Erzeugung eines PKA mit der Energie E_R bei einer Energie E des einfallenden Teilchens und $P(E_R)$ die 'partition function', die Funktion des Energieanteils, der dauerhafte Kristallschäden verursacht.

Die Schädigungseffizienz von Strahlungsquellen mit verschiedenen Teilchen und einem Energiespektrum $\phi(E)$ kann durch den Härtefaktor κ, der mit Hilfe der Schädigungsfunktion definiert wird, verglichen werden. Der Härtefaktor κ gibt die Schädigungseffizienz in Relation zu Neutronen mit einer Energie von 1 MeV an.

$$\kappa = \frac{\int D(E))\phi(E)dE}{D(E_n = 1\ MeV) \cdot \int \phi(E)dE} \tag{2.36}$$

Für die äquivalente 1 MeV-Neutronenfluenz Φ_{eq} gilt:

$$\Phi_{eq} = \kappa\Phi = \kappa \int \phi(E)dE \tag{2.37}$$

Tabelle 2.1 zeigt einige Härtefaktoren für verschiedene Strahlungsquellen [WUN92].

Strahlungsquelle	E_{mop} [MeV]	$\langle E \rangle$ [MeV]	Härtefaktor κ
Neutronen			
T(p,n)^{3}He	1,2	1,2	0,88
D(d,n)^{3}He	5,0	5,0	1,60
T(d,n)^{4}He	14,1	14,1	1,88
Be(d,n)B	5,2	5,3	1,45
Reaktor	1,0	2,1	1,06
^{252}Cf	1,0	2,1	1,06
Am-Be	3,1	4,8	1,42
Protonen			
Zyklotron	21,1	21,1	2,72
Elektronen			
Dynamitron	1,8	1,8	$1,07 \cdot 10^{-2}$
Photonen			
^{137}Cs	0,66	0,66	$< 1 \cdot 10^{-10}$
^{60}Co	1,17 ; 1,33	1,25	$2 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 2.1: *Härtefaktoren nach Gl. 2.36 für verschiedene Strahlungsquellen mit deren wahrscheinlichster Energie E_{mop} und mittleren Energie $\langle E \rangle$.*

Elektronen können aufgrund ihrer geringen Masse erst ab Energien von $E_e = 260\ keV$ Versetzungen im Kristallgitter verursachen. Bis zu Energien von $E_e = 4,6\ MeV$ erzeugen Elektronen nur Punktdefekte. Die Strahlungseffizienz für Elektronen der Energie von $1,8\ MeV$ ist um zwei Größenordnungen niedriger als für Hadronen (siehe Tabelle 2.1).

Für die Zunahme des Dunkelstroms durch den erhöhten Volumengenerationsstrom wurde aus systematischen Untersuchungen zur Strahlenschädigung durch Neutronen, Protonen und Pionen ermittelt [FEI93]:

$$\frac{\Delta I}{V_{Vol}}(\Phi_{eq}) = \alpha_\infty \cdot \Phi_{eq} \tag{2.38}$$

mit dem Detektorvolumen V_{Vol} und der Schädigungskonstanten $\alpha_\infty = 2 \cdot 10^{-17}\ Acm^{-1}$ bei hinreichend langer Ausheilung und für Fluenzen unterhalb der Konversionsfluenz, bei der die effektive Dotierung vom n-Typ zum p-Typ übergeht.

Für die Änderung der effektiven Dotierung N_{eff} gilt unter Vernachlässigung von Kurz- und Langzeitausheilung [FEI93]:

$$\Delta N_{eff}(\Phi_{eq}) = N_C(\Phi_{eq}) = N_{C,0}(1 - e^{-c_C \Phi_{eq}}) + g_c \cdot \Phi_{eq} \tag{2.39}$$

mit der 'donor removal' Konstante $c_C = 3,6 \cdot 10^{-13}\ cm^2$, $N_{C,0} = 3,16 \cdot 10^{11}\ cm^{-3}$ und der Generationsrate $g_C = 1,73 \cdot 10^{-2}\ cm^{-1}$.

2.9.2 Oberflächenschäden

Sowohl an der Metall-Silizium-Grenzfläche als auch an der MOS-Struktur entstehen durch Strahlenschädigung Defekte. Da die Ionisation in Isolatoren und an Grenzflächen kein reversibler Prozeß ist, können durch Ionisation in diesem Bereich permanente Defekte entstehen. Die Auswirkung von Ionisation wird anhand der MOS-Struktur näher betrachtet. Im Siliziumoxid und an der Si-SiO_2-Grenzschicht liegen schon im ungeschädigten Zustand vier Typen von Oxidladungen vor:

Grenzflächenladungen Q_{it} (Interface Trapped Charge)

Grenzflächenladungen werden durch Strukturdefekte an der Silizium-Siliziumoxid-Grenzschicht verursacht. Die Strukturdefekte entstehen während des Oxidationsprozesses oder durch metallische Verunreinigungen, sowie durch ionisierende Strahlung. Die Grenzflächenladungen befinden sich in einer etwa $50\ nm$ dünnen Zone an der Grenzschicht mit einer Zustandsdichte D_{it}. Sie können in Abhängigkeit vom Oberflächenpotential Ψ_{Si} ihren Besetzungszustand ändern, d.h. Ladungen aufnehmen oder abgeben.

Ortsfeste Oxidladungen Q_f (Fixed Oxide Charge)

In einer etwa 300 nm breiten Übergangszone (Si_yO_x) zwischen Silizium und Siliziumoxid gibt es aufgrund von Strukturdefekten vorwiegend positive ortsfeste Oxidladungen. Die Flächenladungsdichte Q_f ist abhängig von den Oxidationsgasen, der Oxidationstemperatur, Abkühlbedingungen und der Kristallorientierung des Siliziums.

Gefangene Oxidladungen Q_{Ot} (Oxide Trapped Charge)

Im Siliziumoxid liegen Defekte (traps) vor, die Ladungen einfangen können, welche durch ionisierende Strahlung entstehen. Da Elektronen eine deutlich höhere Beweglichkeit in Siliziumoxid haben als Löcher ($\mu_{SiO_2,e} = 20 \; \frac{cm^2}{Vs}$, $\mu_{SiO_2,h} \approx 2 \cdot 10^{-5} \; \frac{cm^2}{Vs}$), verlassen die Elektronen das Siliziumoxid sehr schnell und der Einfang von Löchern erfolgt bevorzugt. Beispiele für Löchertraps sind das Sauerstoff-Fehlstellen-Zentrum (oxygen-vacancy center) und der Multi-Sauerstoff-Fehlstellen-Komplex (oxygen-vacancy complex).

Bewegliche Ionenladungen Q_m (Mobile Ionic Charge)

Die beweglichen Ionenladungen werden durch Verunreinigungen des Oxids mit Alkali-Ionen, besonders Natrium-Ionen, gebildet, die sich bei Spannungsvariation im Oxid bewegen können. Die Zahl der beweglichen Ladungen wird von der Strahlung nicht beeinflußt.

Abbildung 2.13 zeigt die Verteilung der Ladungen im Siliziumdioxid und Interfacebereich einer MOS-Struktur.

Die Ionisation führt im Siliziumoxid zu einem Anstieg der positiven gefangenen Oxidladungen und einer Zunahme der Grenzschichtzustände.

Der Zuwachs von positiven Ladungen im Siliziumoxid führt zur stärkeren Akkumulation von Elektronen im Silizium, so daß die Flachbandspannung ansteigt. Für die Verschiebung der Flachbandspannung erhält man [SCH95]:

$$\Delta U_{FB} = -\frac{\Delta Q_{Ot} x}{\epsilon_0 \epsilon_{SiO_2} d_{Ox} A} \tag{2.40}$$

mit der relativen Schwerpunkttiefe der gefangenen Ladungen $x = \frac{x_0}{d_{Ox}}$. Da die Löcher meist in tiefen Traps an der Grenzschicht permanent gefangen werden, ist die relative Schwerpunktiefe $x \approx 1$.

Die Zunahme der Grenzflächenzustände bewirkt einen Anstieg des Oxidstroms.

Oberflächenschäden werden durch ionisierende Strahlung verursacht.

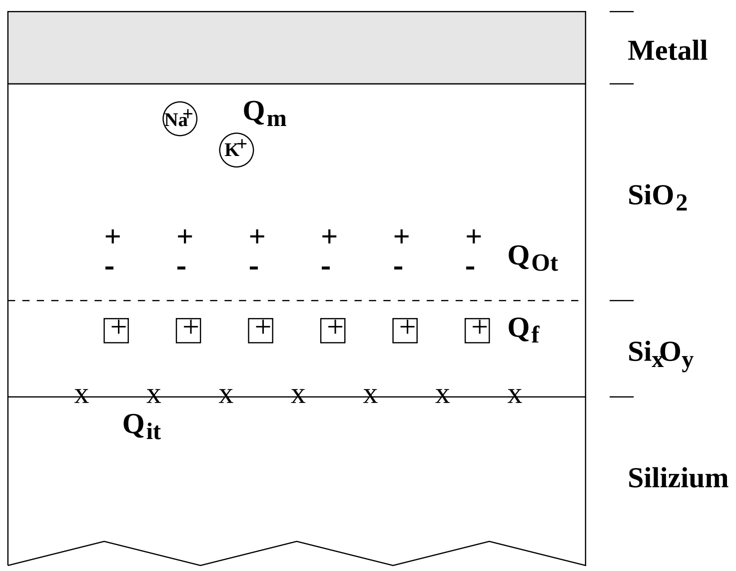

Abbildung 2.13: *Ladungen im Siliziumdioxid und im Interfacebereich SI_xO_y bei einer MOS-Struktur [SZE85]*

Für die Änderung der Flachbandspannung durch ionisierende Strahlung der Dosis D wurde bei Bestrahlungsuntersuchungen mit 20 keV Elektronen eine Sättigungsfunktion gefunden [SCH95]:

$$\Delta U_{FB}(D) = (1 - e^{-aD[kGy]})\Delta U_{FB,\infty} \tag{2.41}$$

Die Parameter a und $\Delta U_{FB,\infty}$ sind abhängig von der angelegten Spannung U. Für $U = 0\ V$ erhält man $a = 0,15\ kGy^{-1}$ und $\Delta U_{FB,\infty} = 10,3\ V$. Wird eine Sperrspannung $U \simeq 80\ V$ angelegt, erhält man $a = 1,75\ kGy^{-1}$ und $\Delta U_{FB,\infty} = 35,2\ V$.

Bestrahlungsexperimente mit $1,8\ MeV$ Elektronen ergaben für die Änderung der Flachbandspannung [SCH91]:

$$\Delta U_{FB}(D)[V] = k\Big(\frac{D}{S}\Big)^{\gamma} \tag{2.42}$$

mit $k = 1,48 \cdot 10^{-5}\ V$, $\gamma = 0,40$ und $S = 2,52 \cdot 10^{-10}\ Gy^{-1}$.

Für den Anstieg des Oxidstroms durch die Zunahme der Grenzflächenzustände wurde bei Bestrahlungsuntersuchungen mit 20 keV Elektronen ohne

Betriebsspannung ($U = 0\ V$) eine Sättigungsfunktion gefunden [SCH95]:

$$\frac{\Delta I_{Ox}(D)}{A} = (1 - e^{-0,062 \cdot D[kGy]}) \cdot \frac{\Delta I_{Ox,\infty}}{A} \tag{2.43}$$

mit $\frac{\Delta I_{Ox,\infty}}{A} = 1,84\ \mu Acm^{-2}$.

Bei Bestrahlung unter Spannung wurde:

$$\frac{\Delta I_{Ox}(D)}{A}[\mu Acm^{-2}] = 0,36[\mu Acm^{-2}kGy^{-1}] \cdot D[kGy] \tag{2.44}$$

ermittelt.

In den folgenden Kapiteln wird eine starke Abhängigkeit des Verhaltens der Detektoren bezüglich der Flachbandspannung von dem Oxidationsverfahren festgestellt. Alle oben genannten Untersuchungen zur Änderung der Flachbandspannung und des Oxidstroms durch ionisierende Strahlung wurden an Oberflächensperrschichtdetektoren durchgeführt, die nach dem alten Oxidationsverfahren hergestellt wurden. Für Oberflächensperrschichtdetektoren, die nach dem neuen Oxidationsverfahren hergestellt wurden, liegen keine Untersuchungen vor.

Kapitel 3

Die Entwicklung der Detektorparameter in der Strahlzeit 1994

Die Silizium-Detektoren des PLUG-Kalorimeters zeigten in der Strahlzeit 1994 unerwartete und zunehmende Veränderungen der Detektorparameter, so daß 7 % der insgesamt 672 Silizium-Detektoren unbrauchbar wurden. Die Silizium-Detektoren aus den Produktionsjahren 1990 bis 1993 waren teilweise seit 1992 im Einsatz und zeigten bis 1994 keine Schädigungseffekte. Die Effekte traten zusammen mit einer um den Faktor 6 höheren integrierten Luminosität im Jahre 1994 im Vergleich zu 1993 auf (Abb 3.1). Die integrierte Luminosität war 1992 um eine Größenordnung niedriger als 1993. Die Korrelation der Schädigungseffekte mit einer deutlich erhöhten Luminosität deutet auf Strahlenschädigung als Ursache der beobachteten Schädigungseffekte hin. Diese Annahme wurde von den Ergebnissen der Dunkelstromentwicklung (Abschnitt 3.1) bestätigt.

Die Messungen im Betrieb wurden ergänzt durch Messungen der Kennlinien im Labor nach dem Ausbau der Detektoren am Ende der Strahlzeit. Die Labormessungen bieten den Vorteil, daß alle Detektoren einzeln gemessen werden können und keine Korrekturen aufgrund von Zusammenfassung von Detektoren erfolgen müssen. Diese Labormessungen dienten zur abschließenden Analyse.

Die Ergebnisse, die auf einem Kurzvortrag [JAR95] und ausführlicher in einem DESY-Report [HIL95] vorgestellt wurden, werden im ersten Teil dieses Kapitels noch einmal präsentiert. Der zweite Teil dieses Kapitels beschreibt die Ergebnisse der Untersuchungen während der HERA-Maschinenstudien im November 1994, während der acht Testdetektoren im PLUG-Kalorimeter eingebaut waren.

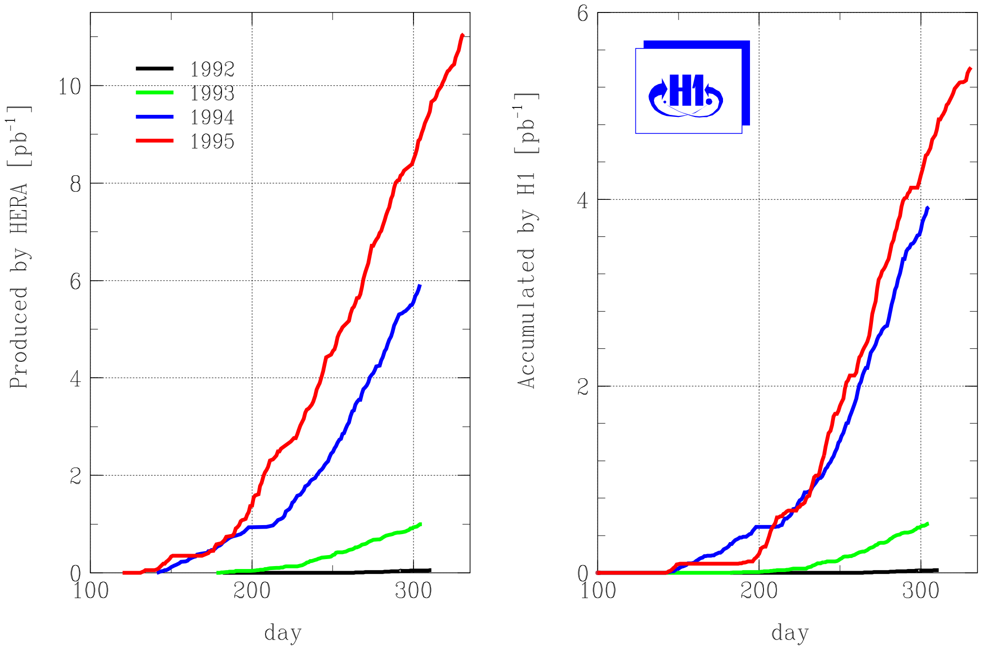

Abbildung 3.1: *Integrierte Luminosität 1992-1995, links die von HERA produzierte Luminosität, rechts die von H1 gesammelte Luminosität [H1L95]*

3.1 Entwicklung des Dunkelstroms

Wie in Abschnitt 1.3 erläutert, kann die Entwicklung der Dunkelströme im Betrieb nur für Gruppen von Detektoren (Spannungsringe) betrachtet werden. Im folgenden werden beispielhaft die CAEN-Kanäle 9 und 23 betrachtet. Beide CAEN-Kanäle fassen je drei Detektoren im innersten Ring eines Moduls zusammen. CAEN-Kanal 9 versorgt Detektoren in Slot 4, CAEN-Kanal 23 Detektoren in Slot 3. Abbildung 3.2 zeigt die Entwicklung der Dunkelströme bei Betriebsspannung über die gesamte Strahlzeit. Aufgetragen ist der Strom pro Detektor (berechnet nach Gl. 2.29) bei Betriebsspannung gegen die Tage im Jahr 1994. (Die Strahlzeit umfaßte den Zeitraum von Anfang April bis Ende Oktober.)

Kanal 9 zeigt einen stetigen, annähernd linearen Anstieg des Dunkelstroms. Mögliche Ursachen für dieses Verhalten sind die Zunahme von Volumen- und Oxidstrom durch die Bildung von Generationszentren im Siliziumbulk und im Siliziumoxid des MOS-Kontaktes als Folge von Strahlenschädi-

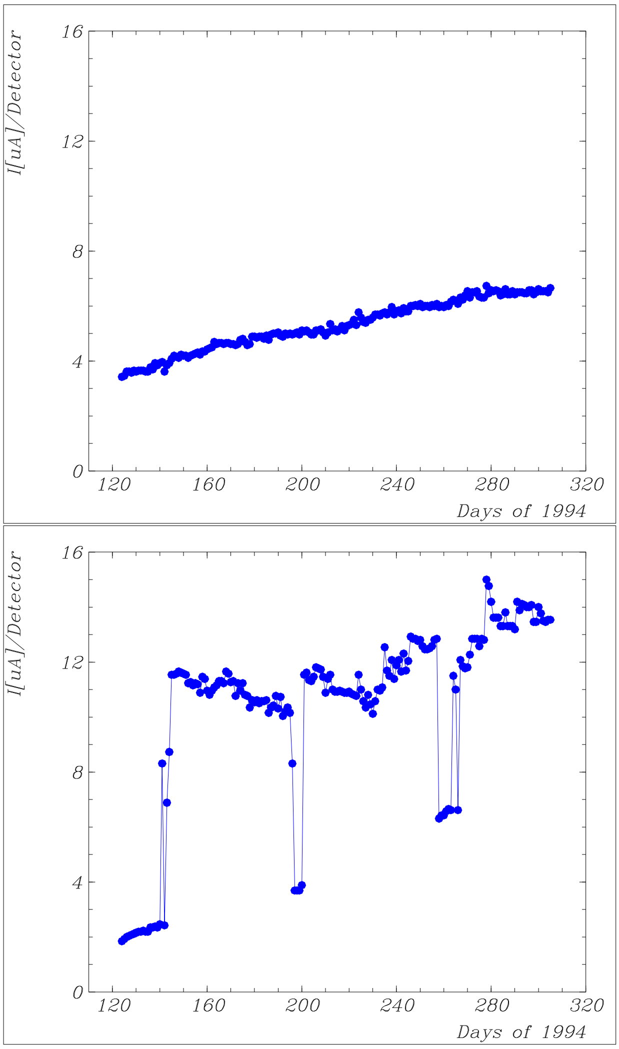

Abbildung 3.2: *Entwicklung des Dunkelstroms für zwei CAEN-Kanäle 1994, oben CAEN-Kanal* 9*, unten CAEN-Kanal* 23

gung. Dieser Anstieg ist proportional zur absorbierten Dosis [SCH91]. Da die Strahlenbelastung eine radiale Abhängigkeit aufweist (siehe Abschnitt 3.4), wird eine radiale Abhängigkeit des Stromanstiegs erwartet.

Kanal 23 zeigt einen schneller ansteigenden Verlauf. Diese Entwicklung wird durch Sprünge unterbrochen, die durch einen lokalen Durchbruch der Verarmungszone zum Rand des Detektors entstehen und zu einem drastischen Stromanstieg im betroffenen Spannungsring führen.

Ein Blick auf die IV-Charakteristiken beider Spannungsringe zeigt diesen Effekt deutlich (Abb. 3.3). Diese Kennlinien wurden am 30.08.94 (Tag 242) aufgenommen, zu einer Zeit als CAEN-Kanal 23 sich in einem Zustand erhöhten Dunkelstroms befand (vergleiche Abb. 3.2).

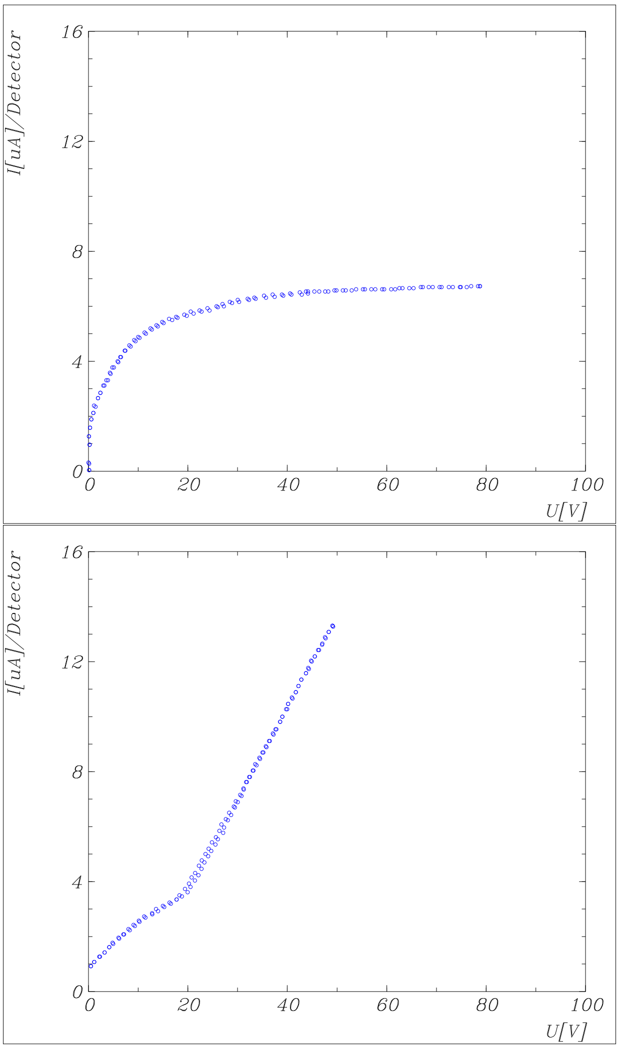

Abbildung 3.3: *IV-Charakteristiken für zwei CAEN-Kanäle (Tag 242, 1994), oben CAEN-Kanal* 9, *unten CAEN-Kanal* 23

Die IV-Kennlinie für Kanal 9 zeigt den typischen Verlauf. Kanal 23 dagegen zeigt ab einer Spannung von $\sim 20\ V$ einen linearen Verlauf. Nach dem Durchbruch eines Detektors in diesem Spannungsring wird der Strom hauptsächlich durch die Widerstände R_{v23} und $R_{23,k}$ (der k-te Detektor weißt das Durchbruchverhalten auf) bestimmt, so daß eine ohmsche Kennlinie entsteht. Die Steigung der Kennlinie von etwa $0,3\ \frac{\mu A}{V}$ ergibt einen Gesamtwiderstand von etwa 3 $M\Omega$, d.h. der Oberflächensperrschichtdetektor hat einen Widerstand von etwa 1 $M\Omega$.

Der Detektordurchbruch geht einher mit einer starken Zunahme des Rauschens des Detektors (Abschnitt 3.3), so daß dieser für die Datennahme unbrauchbar wird. Die Identifikation und Eliminierung dieser Detektoren aus der elektronischen Signal-Auslese erfolgte automatisch ('hot channel monitor'). Ein weiteres Problem, das durch solche unbrauchbaren Detektoren verursacht wird, besteht darin, daß die Annahme der gleichmäßigen Verteilung des Stroms auf die Detektoren eines Spannungsringes (Gl. 2.29) ungültig wird. Dies kann dazu führen, daß einige Detektoren nicht im Zustand der vollständigen Verarmung betrieben werden und so die Energiekalibration nicht mehr gültig ist. Die Daten aus dem PLUG-Kalorimeter müssen daher auf geeignete Art korrigiert werden. Da diese Korrekturen auf Abschätzungen beruhen, wird die gemessene Energieinformation ungenauer.

Die im Anschluß an die Strahlzeit im Labor gemessenen Werte für den Dunkelstrom bei einer Spannung von 100 V werden in Abbildung 3.4 mit dem radialen Abstand vom Strahlrohr r korreliert. Detektoren, die ein Durchbruchverhalten zeigten, wurden nicht berücksichtigt. Es zeigt sich eine klare Abhängigkeit des Dunkelstroms von dem Abstand r vom Strahlrohr. Der Dunkelstrom ist für Detektoren nah am Strahlrohr höher und nimmt mit der Entfernung ab. Dieses Verhalten ist konsistent mit den Dosismessungen für die Strahlenbelastung (siehe Abschnitt 3.4).

Der Anstieg des Dunkelstroms bei Bestrahlung durch Zunahme von Volumen- und Oxidstrom ist ein bekannter Effekt [SCH91]. Die Strahlenschädigung ist abhängig von der Zusammensetzung des Strahlungsfeldes aus Leptonen, geladenen und ungeladenen Hadronen. Da zunächst keine Veränderung der Verarmungsspannung beobachtet wurde (siehe Abschnitt 3.2.1), wurde Synchrotronstrahlung als Ursache der Strahlenschädigung vermutet. Der Anstieg des Dunkelstroms tritt bei Strahlenschädigumg durch Synchrotronstrahlung in der beobachteten Größenordnung allerdings erst bei Dosiswerten im kGy-Bereich auf, die deutlich über den durch die eingebauten Dosimeter gemessenen Strahlungsdosen liegen (siehe Abschnitt 3.4).

Daher wird angenommen, daß die Strahlenschädigung durch das Untergrundstrahlungsfeld verursacht wird. Die Intensität des Untergrundes ist abhängig von den Strahlbedingungen und der Luminosität, so daß die Strahlenschädigung auch von der Luminosität abhängig ist. Für die folgenden Strahlzeiten wurde eine weitere Steigerung der Luminosität angestrebt, so daß mit stärkeren Schädigungen gerechnet werden mußte.

Eine Zusammenstellung der Maßnahmen zum besseren Verständnis der

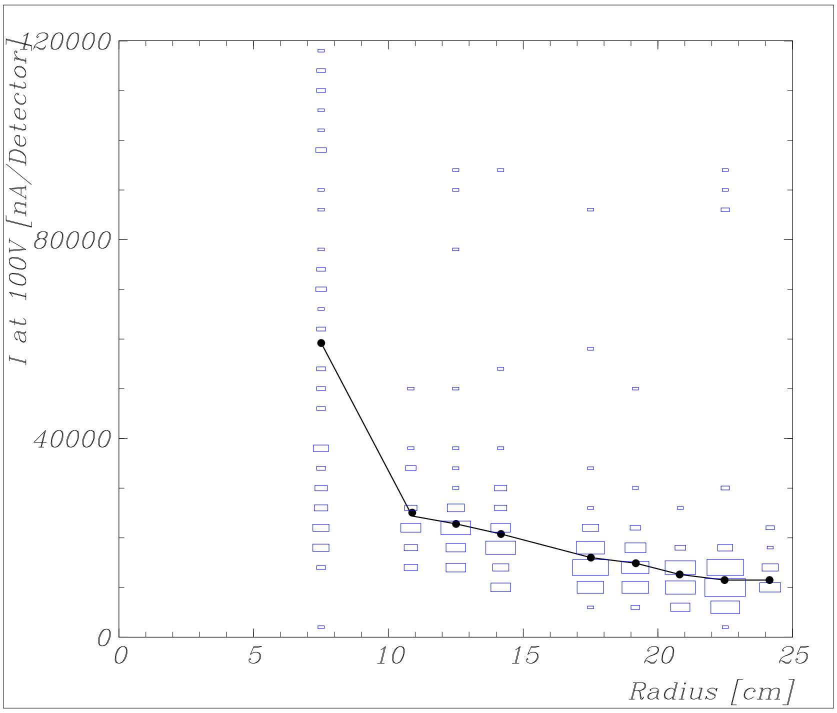

Abbildung 3.4: *Korrelationsplot der radialen Entfernung eines Detektors vom Strahlrohr mit dem Dunkelstrom bei* 100V*, ohne Berücksichtigung durchgebrochener Detektoren; aus Labordaten gemessen im Anschluß an die Strahlzeit 1994. Die verbundenen Punkte zeigen die Dunkelstrom-Mittelwerte in Abhängigkeit vom Radius*

Schäden und ihrer Ursachen sowie zu ihrer Minderung enthält Abschnitt 3.6.

3.2 Entwicklung der CV-Charakteristik

3.2.1 Verarmungsspannung

Die Abbildung 3.5 zeigt die CV-Kennlinie eines Detektors (Q93018) gemessen am Ende der Strahlzeit am 20.10.94 im PLUG-Kalorimeter (oben) und nach der Stahlzeitperiode im Labor am 14.11.94. Die Kapazität ist gegen $1/\sqrt{U}$ aufgetragen. Die Kennlinie zeigt den typischen Verlauf. Die Verarmungsspannung für diesen Detektor betrug vor dem Einbau 32 V und zeigt bei diesen Messungen innerhalb der Meßgenauigkeit ($\pm 2\ V$) einen unveränderten Wert (Linie bei $0,177\ 1/V^{\frac{1}{2}} \equiv 32\ V$).

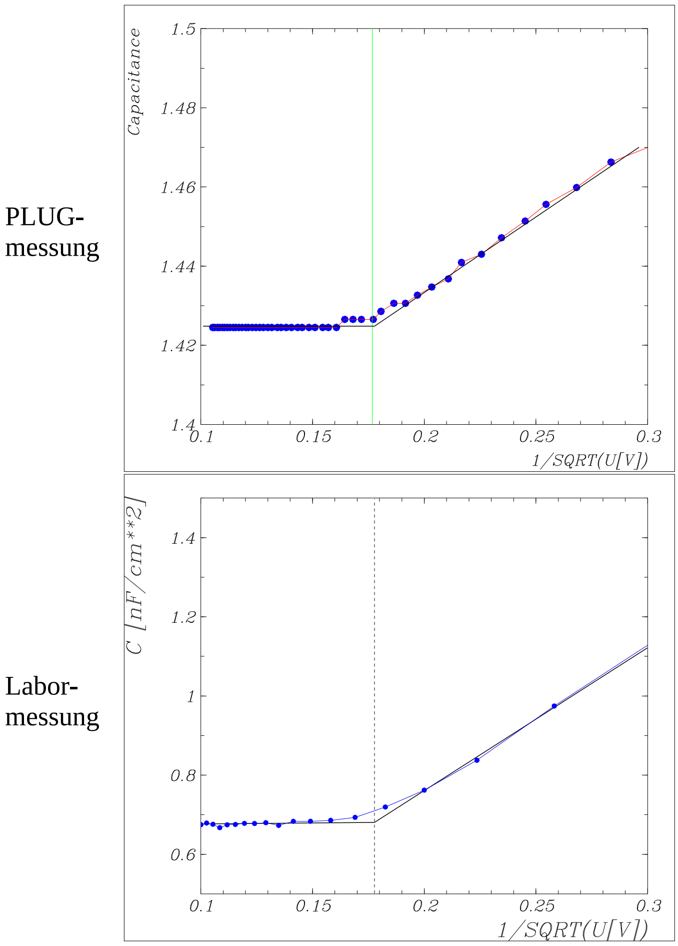

Abbildung 3.5: *CV-Charakteristiken für den Detektor Q93018, oben gemessen im PLUG-Aufbau am 20.10.94, unten gemessen im Labor nach der Strahlzeitperiode am 14.11.94. Die Kapazität ist in relativen Einheiten (PLUG) bzw. in* $nFcm^{-2}$ *(Labor) gegen* $1/\sqrt{U}$ *aufgetragen*

Eine Fehlerquelle für die Messung im PLUG-Kalorimeter besteht in der ungenauen Kenntnis der Spannung am Detektor resultierend aus Gleichung 2.30. Dieser Detektor wurde in einem Spannungsring betrieben, in dem nur drei Detektoren für die Spannungsversorgung zusammengefaßt waren und kein Durchbruchverhalten beobachtet wurde, so daß die angenommene Stromverteilung in erster Näherung gültig war, wie dieser Vergleich bestätigt.

Die Laboruntersuchungen im Anschluß an die Strahlzeitperiode ergaben für keinen Oberflächensperrschichtdetektor eine signifikante Änderung der

Verarmungsspannung. Diese Beobachtung erbrachte also keine Hinweise auf Schäden im Silizium-Grundmaterial, die zu einem Anstieg des Dunkelstroms durch eine Zunahme des Volumenstroms führen würden.

3.2.2 Flachbandspannung

Eine Untersuchung der Flachbandspannungen zeigt ein unerwartetes Bild. Abbildung 3.6 zeigt CV-Kennlinien für zwei Detektoren (Q93018, Q91211) in linearer Darstellung, die im PLUG-Kalorimeter und im Labor gemessen wurden.

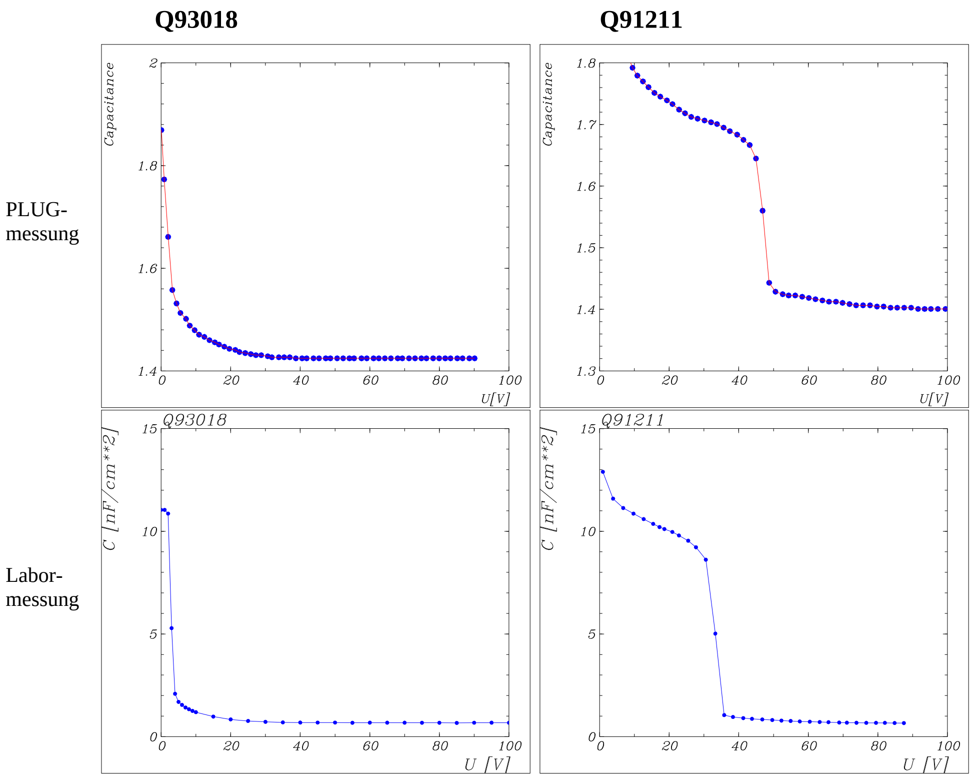

Abbildung 3.6: *CV-Charakteristiken für die Detektoren Q93018 (links) und Q91211 (rechts), oben gemessen im PLUG-Aufbau am 20.10.94, unten gemessen im Labor nach der Strahlzeitperiode am 14.11.94 (Q93018) bzw. 21.11.94 (Q91211). Die Kapazität ist in relativen Einheiten (PLUG) bzw. in* $nFcm^{-2}$ *(Labor) gegen die Spannung* U *aufgetragen.*

Für beide gezeigten Detektoren wurde, ebenso wie für alle weiteren, vor der Strahlzeit 1994 eine Flachbandspannung von $2 \pm 1\ V$ festgestellt. Während der Detektor Q93018 nach der Strahlzeit eine Flachbandspannung in Übereinstimmung mit dem Wert vor der Strahlzeit zeigt, hat die Flachbandspannung für den Detektor Q91211 einen deutlich erhöhten Wert von $45 \pm 2\ V$ für die Messung im PLUG-Kalorimeter bzw. $33 \pm 2V$ für die Labormessung. Die Diskrepanz der Ergebnisse wird durch die ungenaue Spannungskorrektur im PLUG-Kalorimeter nach Gl. 2.30 verursacht.

Der Anstieg der Flachbandspannung resultiert aus einer strahleninduzierten Zunahme der positiven Ladungen in der Oxidschicht (Abschnitt 2.9.2), die auch bei Laboruntersuchungen bei Bestrahlung mit 20 keV-Elektronen festgestellt wurde [SCH95]. Der beobachtete Effekt trat allerdings erst bei deutlich höheren Strahlungsdosen (einige kGy) auf, als durch die eingebauten Dosimeter angezeigt wurden (siehe Abschnitt 3.4), ähnlich wie der Anstieg des Dunkelstroms in Abschnitt 3.1.

Eine zeitliche Entwicklung der Flachbandspannung während der Strahlzeit 1994 konnte nicht beobachtet werden, da nur zwei CV-Charakteristiken aufgenommen wurden (Daten: 30.08.94 und 20.10.94).

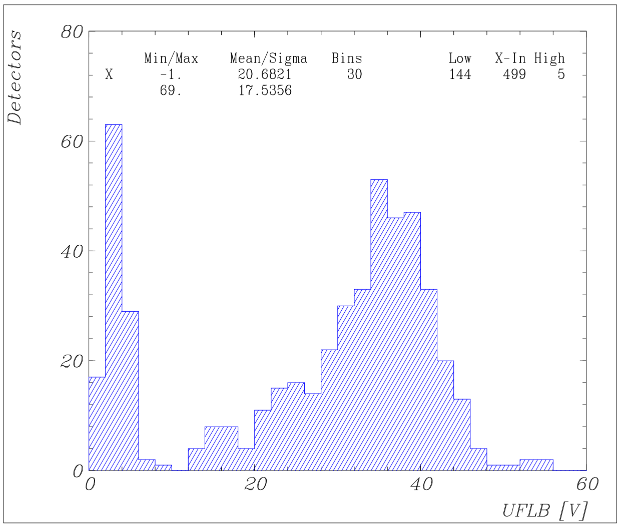

Abbildung 3.7: *Histogramm der Flachbandspannungen der PLUG-Detektoren nach der Strahlzeit 1994, aus Labordaten*

In einem Histogramm der Flachbandspannungen aller eingebauter Detektoren nach der Strahlzeit 1994 (Abb. 3.7) lassen sich zwei Gruppen von Detektoren unterscheiden. Die erste Gruppe hat eine unveränderte Flachbandspannung von $\sim 2\ V$ wie sie für den Detektor Q93018 beobachtet wurde. Die Detektoren der zweiten Gruppe zeigen eine erhöhte Flachbandspannung von $\sim 20 - 45\ V$. Detektor Q91211 ist ein Vertreter dieser Gruppe.

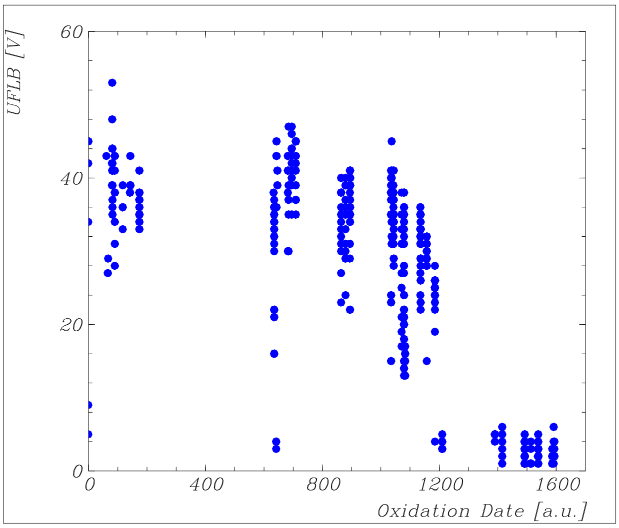

Abbildung 3.8: *Korrelationsplot der Flachbandspannung nach der Strahlzeit 1994 mit dem Oxidationsdatum in Tagen nach dem 01.01.1989, aus Labordaten*

Einen Hinweis auf die Ursache dieses unterschiedlichen Verhaltens liefert eine Korrelationsdarstellung des Oxidationsdatums eines Detektors und seiner Flachbandspannung (Abb. 3.8). Das Oxidationsdatum ist in Tagen nach dem 01.01.1989 aufgetragen. Es wird deutlich, daß Detektoren, die nach dem Juli 1992 (Tag 1300 $\equiv$ 24.07.92) oxidiert wurden, keinen Anstieg der Flachbandspannung zeigen. Detektoren mit einem früheren Oxidationsdatum weisen einen Anstieg bis $\sim 40\ V$ auf. Diese Trennung fällt mit einer geringfügigen Änderung des Oxidationsverfahrens zusammen. Das Oxidationsverfahren wurde dabei nominell nicht verändert, aber eine andere Firma mit der Oxidation beauftragt. Detektoren, die nach dem neuen Verfahren oxidiert wurden, zeigen keinen Anstieg der Flachbandspannung, während ältere Detektoren einen Sättigungswert von $\sim 35 - 40\ V$ zeigen. Das Verhalten der Flachbandspannung ist offenbar empfindlich vom Oxidationsverfahren abhängig.

Der Anstieg der Flachbandspannung beeinflußt nicht den Betrieb des PLUG-Kalorimeters, solange die Betriebsspannung größer als die Flachbandspannung ist.

3.3 Entwicklung des Rauschens

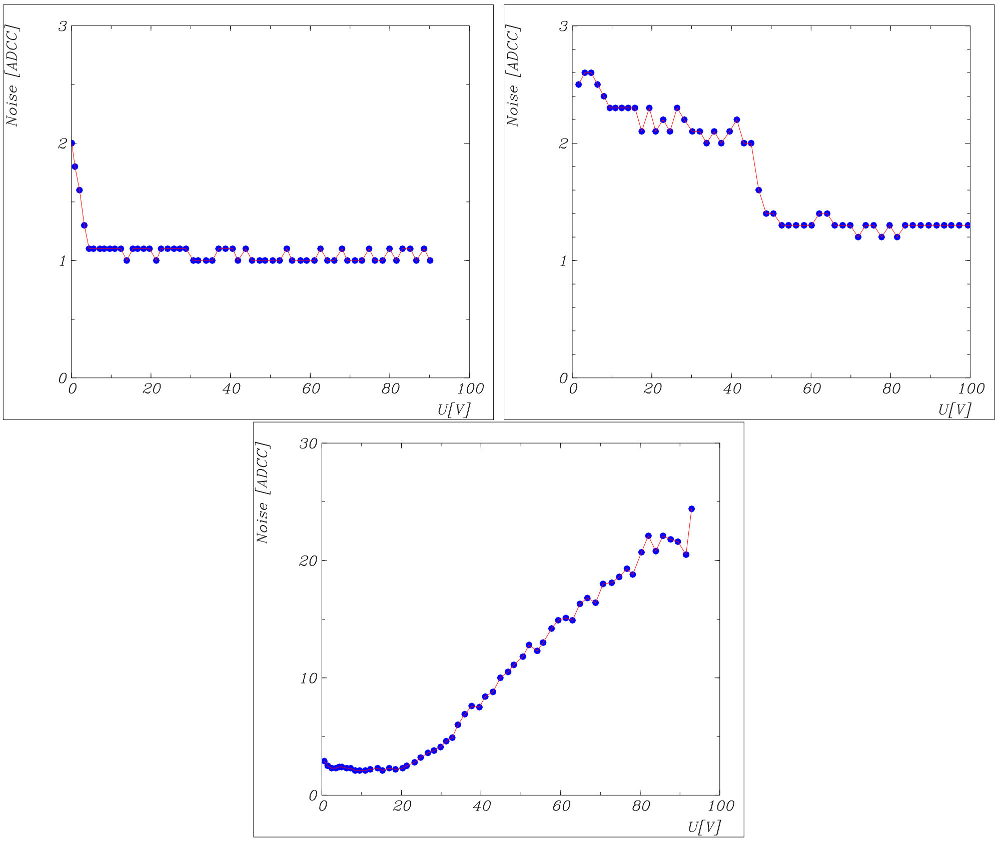

Abbildung 3.9: *Rausch-V-Charakteristiken für die Detektoren Q93018 (oben links), Q91211 (oben rechts) und Q92112 (unten) vom 20.10.94. Das Rauschen ist in ADC-Counts gegen die Spannung U aufgetragen*

Die Abbildung 3.9 zeigt des Signalrauschen in Abhängigkeit von der Spannung. Die Einheit des Signalrauschens sind ADC-Counts (**A**nalog-**D**igital-**C**onverter-Einheiten). Ein ADCC entspricht $\sim$ 8300 Ladungsträgerpaaren im Detektor bzw. einer gemessenen Energie von $\sim 30\ keV$. Betrachtet werden wie in Abschnitt 3.2.2 die Detektoren Q93018 und Q91211, sowie der Detektor Q92112.

Die Charakteristiken für Q93018 und Q91211 entsprechen den CV-Kennlinien. Dieser Effekt wird durch das charakteristische Rauschverhalten des Vorverstärkers in Abhängigkeit von der Eingangskapazität verursacht. Man erkennt deutlich den Abfall des Signalrauschens korrospondierend mit dem

Abfall der Detektorkapazität für Q91211 bei 45 V. Für den Spannungsbereich über der Flachbandspannung beträgt das Signalrauschen für beide Detektoren ~ 1 $ADCC$. Das Rauschen eines ungeschädigten Detektors selbst ist vernachlässigbar klein.

Der Detektor Q92112 zeigt oberhalb von 20 V ein ansteigendes Verhalten des Rauschens bis 30 $ADCC$. Dieses Verhalten läßt auf einen Detektordurchbruch schließen. Diese Beobachtung ist konsistent mit der IV-Kennlinie des entsprechenden Spannungsringes (Abb. 3.3, CAEN-Kanal 23). Der Detektor Q92112 ist nicht funktionsfähig und mußte aus der Datennahme ausgeschlossen werden.

3.4 Absorbierte Strahlungsdosis

Während der Strahlzeit 1994 waren im Slot 8 an verschiedenen radialen Positionen Glasdosimeter installiert. Die Aufgabe dieser Dosimeter bestand in der Messung der integrierten Strahlendosis verursacht durch ionisierende Strahlung im PLUG-Kalorimeter. Der Ansprechbereich dieser Glasdosimeter beginnt bei einer Strahlungsenergie von 30 keV. Die Messung der Dosis erfolgt mit einer Genauigkeit von ± 20 %.

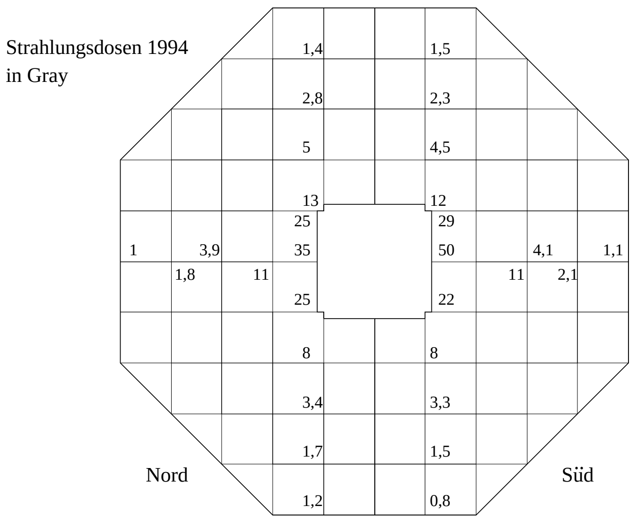

Abbildung 3.10: *Integrierte Strahlungsdosen für 1994*

Die Messungen ergaben eine Dosis von maximal 50 Gy für die innersten Detektoren bis ~ 1 Gy im Randbereich (Abb. 3.10).

Die höchste gemessene Dosis von 50 Gy führt nach den Untersuchungen mit 20 keV-Elektronen mit anliegender Sperrspannung ($U < 0\ V$) zu einer Erhöhung der Flachbandspannung um $\Delta UFB \approx 3\ V$ (Gl. 2.41). Messungen mit $1,8\ MeV$ Elektronen sagen für diese Dosis nach Gl. 2.42 eine Änderung der Flachbandspannung um $\Delta UFB \approx 0,5\ V$ voraus. Es ergibt sich eine deutliche Diskrepanz zwischen der gemessenen Dosis und der Dosis, die nach Abschätzungen auf der Grundlage dieser Laboruntersuchungen nötig ist, um die beobachteten Schäden zu verursachen ($\geq 2\ kGy$). Ein Erklärungsansatz besteht darin, daß die beobachteten Schäden durch sehr niederenergetische Strahlung unterhalb der Ansprechschwelle der Glasdosimeter verursacht werden. Diese Vermutung wird in Kapitel 4 mit den Ergebnissen aus der Strahlzeit 1995 widerlegt.

3.5 Untersuchungen während der Maschinenstudien 1994

Zwischen den Strahlzeiten während des Winter-Shutdowns werden an dem Beschleuniger-Ring HERA Maschinenstudien durchgeführt. Diese Studien dienen der Optimierung der Strahloptik und anderer Betriebsparameter.

Ein Detektormodul wurde mit acht Oberflächensperrschichtdetektoren instrumentiert (Abb. 3.11) und während der Maschinenstudien im November 1994 zu Testzwecken im PLUG-Kalorimeter eingebaut.

Diese Untersuchungen wurden durchgeführt, um die Beobachtungen während der Strahlzeit, insbesondere bezüglich der Abhängigkeit der Flachbandspannung vom Oxidationsdatum, weiter zu untersuchen. Außerdem ergaben Laboruntersuchungen an Test-Detektoren, daß die oberflächenbezogene Strahlenschädigung von der Betriebsspannung abhängt [SCH95]. Diese Abhängigkeit sollte für PLUG-Kalorimeter-Detektoren überprüft werden.

Es wurden jeweils vier Detektoren aus den Produktionsjahren 1991 und 1993 ausgewählt, so daß je eine Hälfte der Silizium-Detektoren nach dem alten bzw. nach dem neuen Oxidationverfahren hergestellt war. Um eine möglichst lückenlose Dokumentation der Detektorcharakteristiken zu erstellen, wurden sowohl vor dem Einbau als auch nach dem Ausbau im Labor IV- und CV-Kennlinien aufgenommen, sowie regelmäßig während des Betriebes On-line-Messungen der IV-, CV- und Rausch-Spannungs-Charakteristiken durchgeführt. Nach dem Ausbau wurde auch im Labor das Signalrauschen in Abhängigkeit von der Spannung untersucht. Die Anordnung der Detektoren auf dem Modul wurde so gewählt, daß auch radiale Einflüsse erkannt werden konnten. Das Modul mit den Testdetektoren wurde in Slot 0 (vom

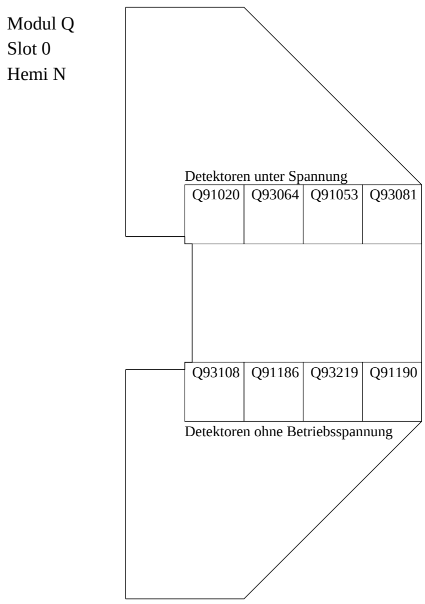

Abbildung 3.11: *Anordnung der Test-Detektoren während der HERA-Maschinenstudien*

Wechselwirkungspunkt aus vor dem PLUG-Kalorimeter) eingesetzt.

Die Spannungsversorgung und Signalauslese erfolgte für jeden Detektor separat durch einen eigenen Kanal. Der elektronische Aufbau entspricht bis auf die eben genannten Änderungen dem Aufbau während der Strahlzeit 1994 (siehe Abb. 1.3).

Vier Detektoren (je zwei aus den Jahren 1991 und 1993) wurden bei einer ständigen Spannung von 5 V über der Verarmungsspannung betrieben. Für die zweite Hälfte wurde die Spannungsversorgung nur für die Datennahme zur Messung der Kennlinien eingeschaltet. Die Messungen erfolgten zu Zeiten, in denen HERA nicht im Beschleunigerbetrieb war und keine Strahlung produzierte.

Tabelle 3.1 faßt die Daten der eingebauten Detektoren zusammen.

Ein Problem für die Auswertung der Ergebnisse dieser Studien besteht in der Tatsache, daß es sich bei den eingebauten Testdetektoren teilweise um bereits geschädigte Detektoren handelte. Insbesondere die IV-Kennlinien wiesen bei einigen Detektoren schon vor dem Einbau nicht den ideal-typischen Verlauf auf. Bei dem Detektor Q91190 veränderte sich die IV-Kennlinie nach dem Einbau schlagartig und der Detektor zeigt ein auffälliges Rauschverhalten (siehe Abb. 3.14). Die Anzahl der untersuchten Detektoren ist sehr

Detektor	Oxidations-jahr	U_{dep} [V]	$U_{Betrieb}$ [V]	CAEN-Kanal	radialer Abstand [cm]
Q91020	1991	80	85	0	10,6
Q91053	1991	25	30	2	19,0
Q91186	1991	68	0	5	14,6
Q91190	1991	34	0	7	23,7
Q93064	1993	35	40	1	14,6
Q93081	1993	35	40	3	23,7
Q93108	1993	35	0	4	10,6
Q93219	1993	41	0	6	19,0

Tabelle 3.1: *Daten der, während der HERA-Maschinenstudien instrumentierten, Oberflächensperrschichtdetektoren*

niedrig. Es wurden nur jeweils zwei Detektoren unter gleichen Bedingungen bezüglich des Oxidationsdatums und der Betriebsspannung untersucht. Eine statistisch gesicherte Aussage ist daher nicht möglich. Es wird deutlich, daß die Ergebnisse der Untersuchungen nur qualitativen Wert haben und durch weitere Versuche überprüft werden müssen.

3.5.1 Entwicklung des Dunkelstroms

Die Entwicklung des Dunkelstroms der acht Testdetektoren während der HERA-Maschinenstudien zeigt Abbildung 3.12. In der oberen Hälfte ist die Entwicklung für die Detektoren, die unter Spannung ($U_{dep} + 5\ V$) betrieben wurden, dargestellt.

Der Detektor Q91053 zeigt in Übereinstimmung mit der Signalrausch-Messung (Abb. 3.14) uneinheitliche Schwankungen und wird für die weitere Betrachtung des Dunkelstroms nicht berücksichtigt. Das Verhalten von Detektor Q91053 wird in Abschnitt 3.5.3 diskutiert. Die Schwankungen der Meßwerte für alle Silizium-Detektoren sind durch eine geringe Auflösung der Strommessung (Meßgenauigkeit $0,2\ \mu A$) sowie einer hohen Granularität der Temperaturmessung und damit der Temperaturkorrektur gegeben.

Ein deutlicher Anstieg des Dunkelstroms wird nur bei den Detektoren beobachtet, die unter Spannung betrieben wurden und eine geringe radiale Entfernung zum Strahlrohr aufweisen (Q91020 und deutlich schwächer Q93064). Detektoren, die ohne Spannung betrieben wurden, zeigen keine oder nur sehr geringe Veränderung des Dunkelstroms. Eine Korrelation mit dem Oxidationsverfahren (alt/neu) ist nicht erkennbar.

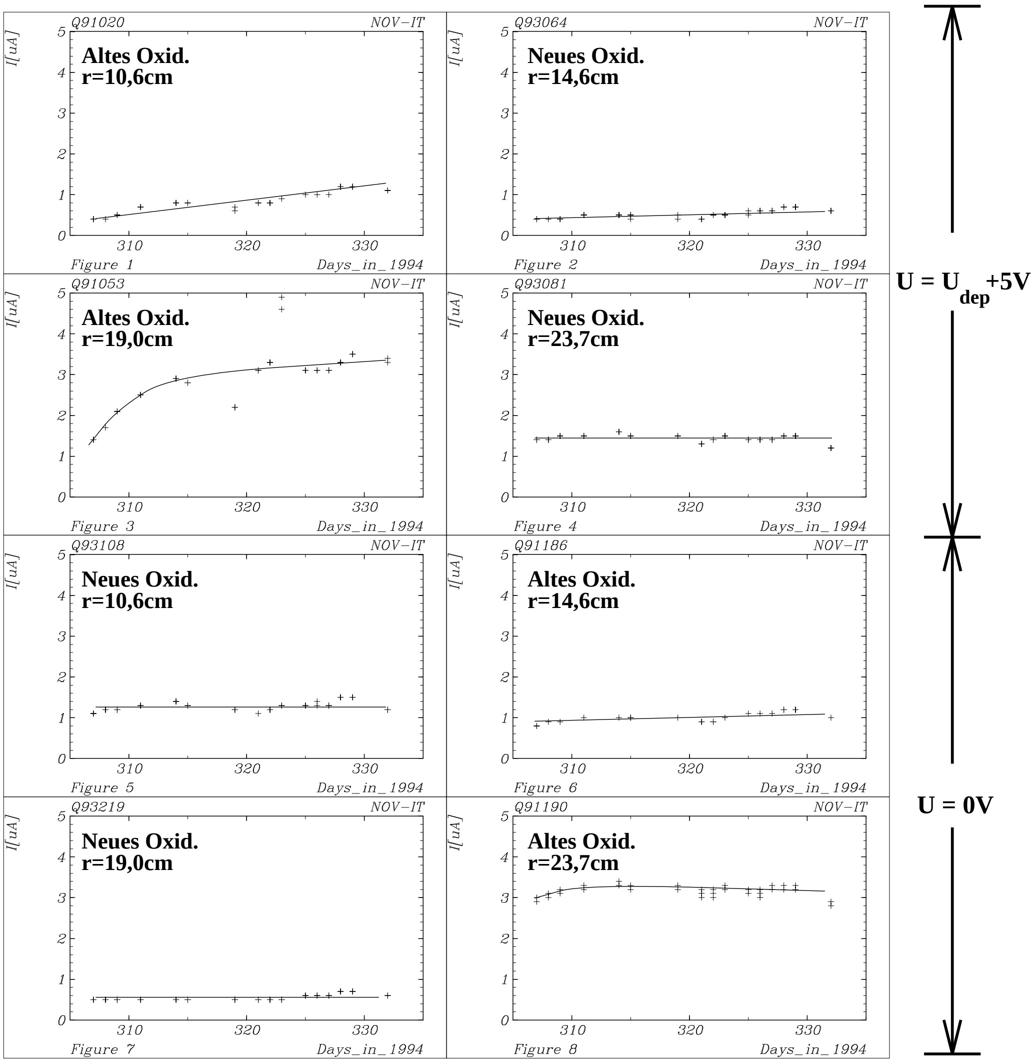

Abbildung 3.12: *Die Entwicklung der Dunkelströme der Testdektoren während der HERA-Maschinenstudien im Nov. 1994, oben vier Detektoren betrieben unter Spannung ($U_{dep} + 5\ V$), unten vier Detektoren betrieben ohne Spannung*

3.5.2 Entwicklung der CV-Charakteristiken

Entwicklung der Verarmungsspannung

Für die Testdetektoren wurde im Rahmen der Meßgenauigkeit keine Veränderung der Verarmungsspannung während der HERA-Maschinenstudien festgestellt.

Entwicklung der Flachbandspannung

Die Flachbandspannung der Testdetektoren, die 1993 nach dem neuen Verfahren oxidiert wurden, bleiben im Rahmen der Meßgenauigkeit mit Werten $< 3\ V$ konstant.

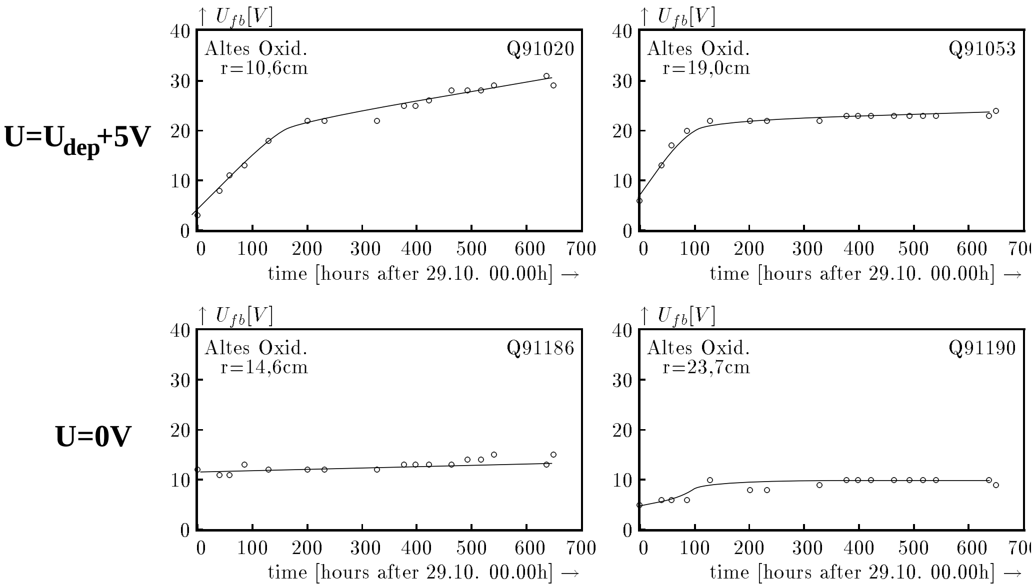

Abbildung 3.13: *Die Entwicklung der Flachbandspannung der Test-Detektoren, die nach dem alten Oxidationverfahren hergestellt wurden, während der HERA-Maschinenstudien im Nov. 1994, oben zwei Detektoren betrieben unter Spannung ($U_{dep} + 5\ V$), unten zwei Detektoren betrieben ohne Spannung*

Die Testdetektoren aus dem Jahr 1991 zeigen in Abhängigkeit von der Betriebsspannung ein unterschiedliches Verhalten (Abb. 3.13). Für die Detektoren, die unter Spannung betrieben wurden, ist ein deutlicher Anstieg der Flachbandspannung auf Werte um $20 - 30\ V$ zu erkennen. Eine Sättigung ist für Q91020 unter Berücksichtigung der Abnahme der Strahlenbelastung durch geringer werdende Intensität des Testbetriebes bei HERA nicht zu erkennen. Für den Detektor Q91053 scheint eine Sättigung vorzuliegen. Es muß aber die Gesamtentwicklung des Detektors, beschrieben in Abschnitt 3.5.3, in die Betrachtung einbezogen werden, die darauf hindeutet, daß das starke Rauschverhalten die Messung der Flachbandspannung beeinträchtigt. Eine radiale Abhängigkeit, die entsprechend der Dosismessungen (siehe Abschnitt 3.5.4) erwartet wird, ist ansatzweise erkennbar. Die Änderung der Flachbandspannung nach 600 h beträgt für Q91020 ($r = 10,6\ cm$) ca. 30 V, hingegen für Q91053 ($r = 19,0\ cm$) nur etwa 15 V.

Die Detektoren, deren Spannungsversorgung nur zu Messungen eingeschaltet war, zeigen nur einen sehr geringen Anstieg der Flachbandspannung.

Diese Beobachtungen bestätigen die Ergebnisse aus der Strahlzeit 1994 bezüglich der Abhängigkeit der Entwicklung der Flachbandspannung vom Oxidationsverfahren. Die in Laboruntersuchungen mit niederenergetischen Elektronen ermittelte Abhängigkeit der Änderung der Flachbandspannung von der anliegenden Spannung kann qualitativ bestätigt werden.

Aufgrund dieser Befunde wurde der Betrieb des PLUG-Kalorimeters im Jahr 1995 umgestellt. Die Spannungsversorgung wird nur zu Zeiten der Datennahme eingeschaltet und ist sonst außer Betrieb. Auf diese Weise liegt in der Phase der vermutlich höchsten Strahlenbelastung während der Injektion und dem Beschleunigen ('Ramping') keine Spannung an den Oberflächensperrschichtdetektoren.

3.5.3 Die Entwicklung des Rauschens

Da die eingebauten Testdetektoren teilweise schon geschädigt waren, ist auch das Rauschverhalten nicht ideal. Bereits bei der ersten Messung zeigten die Detektoren Q93108 und Q91190 starkes Rauschen. Die Rausch-Spannung-Kennlinie, die nach der Testperiode im Labor aufgenommen wurde, zeigt, daß die Detektoren Q91053, Q93108 und Q91190 im Bereich unter 80 V starkes Rauschen aufweisen (Abb. 3.14).

Die Entwicklung des Rauschverhaltens des Detektors Q91053 zeigt Abbildung 3.15. Das Rauschen zeigt ein sprungartiges Verhalten von niedrigen Rauschenwerten zu hohen Werten und zurück. Eine Korrelation mit dem Dunkelstrom ist teilweise erkennbar (17.11., 18.11.). Dagegen ist der Unterschied der Rauschcharakteristiken zwischen 21.11. und 28.11. nicht erklärbar. Dieses Verhalten dieses Detektors entspricht dem Verhalten mancher Spannungsringe während der Strahlzeit 1994 durch Detektoren, für die ein Durchbruchverhalten beobachtet wurde. Derartige Detektoren sind für den Betrieb unbrauchbar.

3.5.4 Absorbierte Strahlendosis

In Abbildung 3.16 sind die integrierten Strahlendosen, die während der HERA-Maschinenstudien mit Glasdosimetern ermittelt wurden, dargestellt.

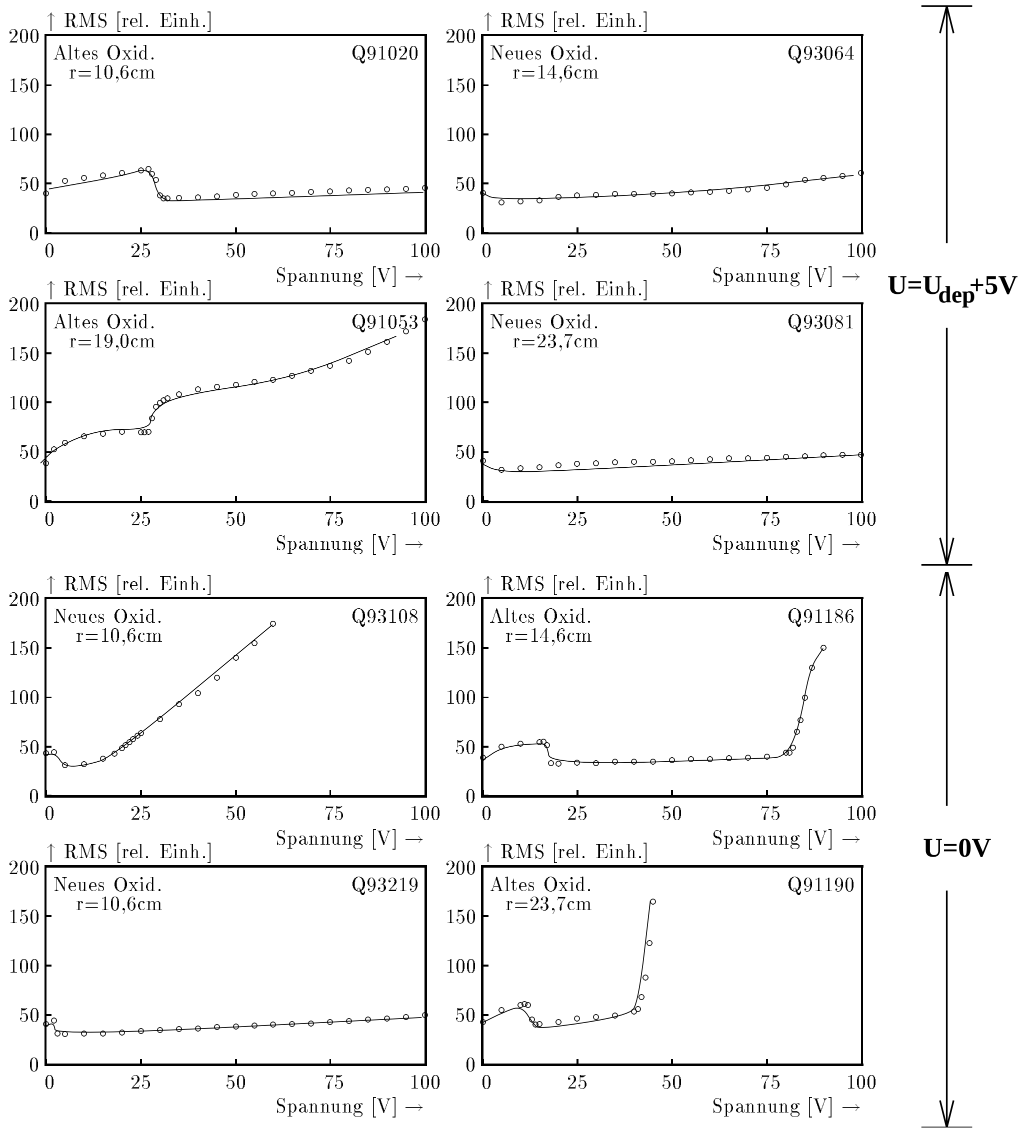

Abbildung 3.14: *Rausch-Spannung-Charakteristiken für die, während der HERA-Maschinenenstudien im November 1994 instrumentierten Oberflächensperrschichtdetektoren, gemessen im Anschluß an die Testperiode im Labor*

Es wurden 4 Slots (0, 2, 4 und 6) mit Glasdosimetern instrumentiert. Es kann anhand der dargestellten Daten keine Abhängigkeit der Dosis vom

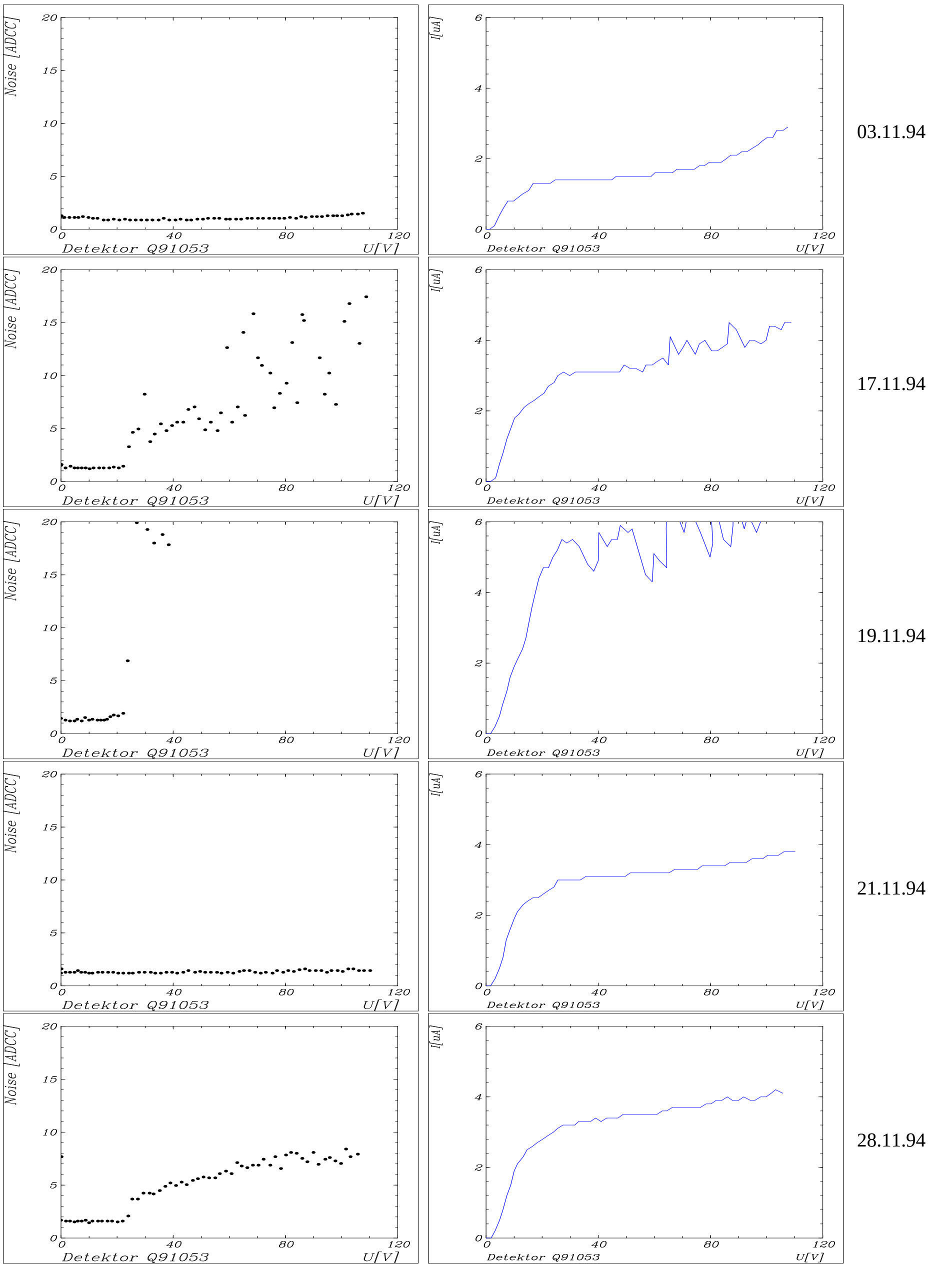

Abbildung 3.15: *Entwicklung des Rauschens für den Detektor Q91053 mit den entsprechenden IV-Kennlinien; Daten der Messungen (von oben nach unten): 03.11.94, 17.11.94, 19.11.94, 21.11.94 und 28.11.94*

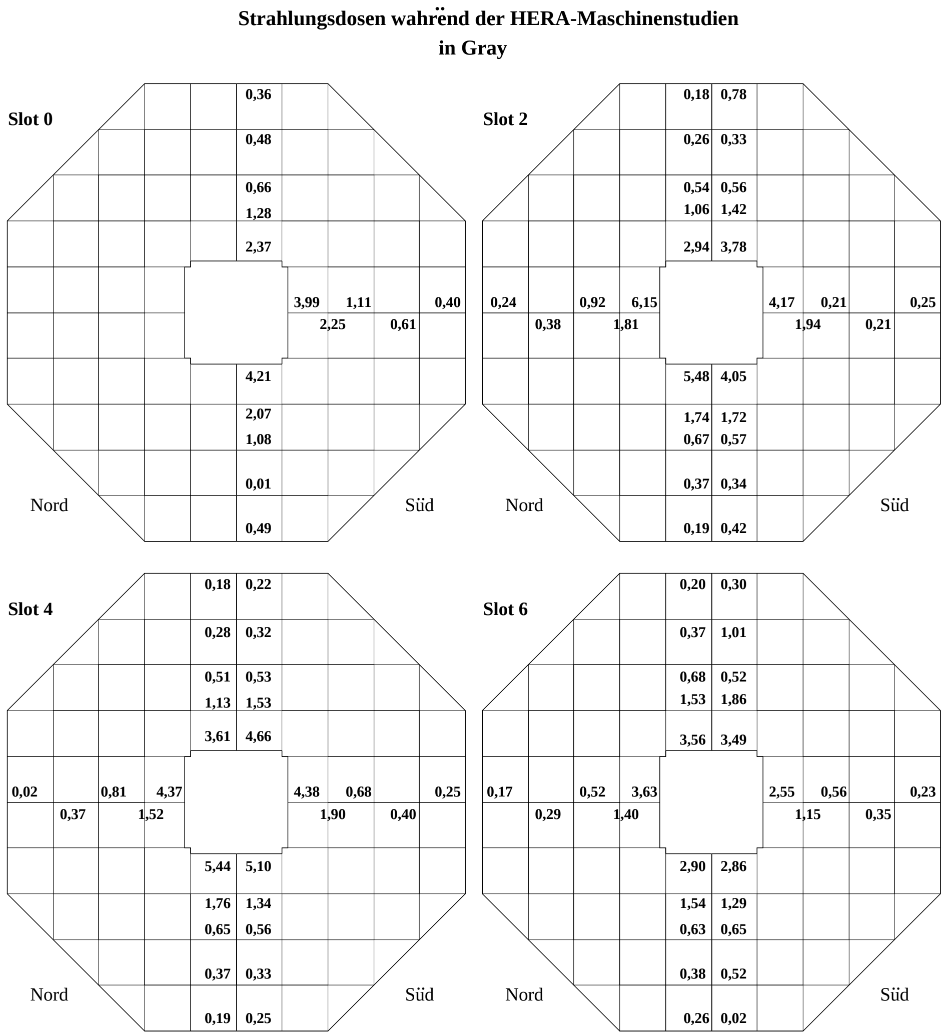

Abbildung 3.16: *Integrierte Strahlendosen während der Zeit der HERA-Maschinenstudien im November 1994 in verschiedenen Slots [RIE96]*

Slot oder der Hemisphäre festgestellt werden. Abbildung 3.17 zeigt die gemittelten Dosiswerte als Funktion der radialen Entfernung r vom Strahlrohr. Es bestätigt sich die Abhängigkeit der Strahlendosis von dem Abstand vom Strahlrohr r. Die gemessene Dosis nimmt mit dem Abstand vom Strahlrohr ab.

Die gemessene Strahlendosis ist mit bis zu etwa 6 Gy wiederum zu niedrig, um den Anstieg des Dunkelstroms durch die Zunahme des Oxidstroms und die Verschiebung der Flachbandspannung bei Detektoren mit altem Oxidati-

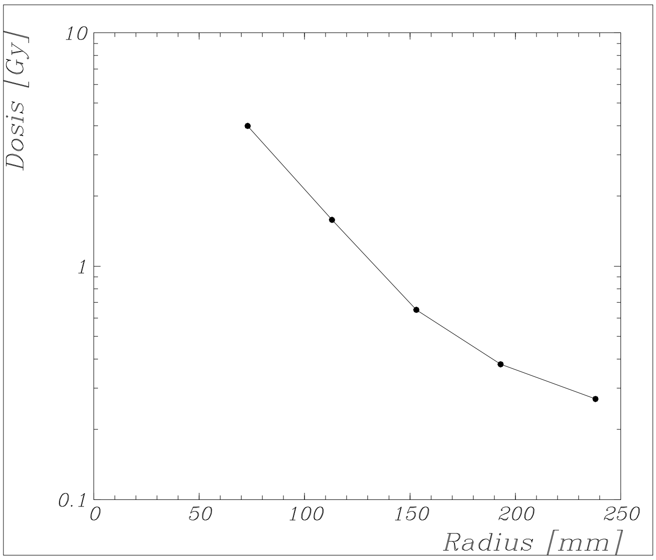

Abbildung 3.17: *Radiale Dosisverteilung im PLUG-Kalorimeter während der Zeit der HERA-Maschinenstudien im November 1994 in verschiedenen Slots [RIE96]*

onsverfahren nach den Labormessungen mit 20 KeV-Elektronen [SCH95] zu erklären.

3.6 Veränderungen für die Strahlzeit 1995

In diesem Abschnitt werden noch einmal die Probleme beim Betrieb des PLUG-Kalorimeters im Jahre 1994 zusammengefaßt und die Änderungen beschrieben, die als Konsequenz durchgeführt wurden.

- Die Messung der Kennlinien der Oberflächensperrschichtdetektoren des PLUG-Kalorimeters wurde vor allem durch die Zusammenfassung von 3-14 Detektoren zu Spannungsringen erschwert. Die Spannungskorrektur ging von einer einfachen Annahme aus (Gl. 2.29). Detektoren, die ein Durchbruchverhalten zeigen, verhinderten die Messung aller Detektoren eines Ringes, da eine Spannungskorrektur nicht möglich war. Zwei Detektoren teilten sich eine Signal-Auslese-Einheit.

- Es gab einen hohen Spannungsabfall an den Widerständen R_{vi}, so daß bei Anwachsen des Dunkelstroms manche Detektoren nicht im Zustand vollständiger Verarmung betrieben wurden.

- Es wurden während der gesamten Strahlzeit 1994 nur zweimal IV- und CV-Charakteristiken aufgenommen und daher konnte keine zeitliche Entwicklung insbesondere der Flachbandspannung beobachtet werden.

- Die Oberflächensperrschichtdetektoren des PLUG-Kalorimeters wurden während der Strahlzeit 1994 ständig unter Spannung betrieben.

- Die eingebauten Dosimeter zeigten eine Strahlendosis an, die nach Laboruntersuchungen mit 20 keV-Elektronen unter den Erwartungen aufgrund der ermittelten Strahlenschäden liegt.

Im Jahre 1995 wurde daher das PLUG-Kalorimeter nur in den ersten vier Ebenen (Slots 0-3) instrumentiert. Die maximale Anzahl der in einem Spannungsring zusammengefaßten Detektoren wurde so auf sieben reduziert. Jeder Detektor hat einen Auslese-Kanal. Die Spannungskorrektur wurde so erweitert, daß die Dunkelströme, die vor dem Einbau gemessen wurden, berücksichtigt werden konnten. Detektoren, die ein Durchbruchverhalten zeigen, werden so schnell wie möglich durch Trennung von der Elektronik eleminiert.

Die Widerstände R_{vi} und damit auch der Spannungsabfall über diesen Widerständen wurden um einen Faktor 10 auf 100 $k\Omega$ reduziert.

Es wurden im Strahljahr 1995 regelmäßig IV- und CV-Messungen durchgeführt.

Der Betrieb des PLUG-Kalorimeters wurde so gestaltet, daß die Spannungsversorgung nur während der Datennahme eingeschaltet war. An den Silizium-Detektoren lag also in der Zeit der stärksten Strahlenbelastung während der Injektion und der Beschleunigungsphase keine Spannung.

Die Glasdosimeter, die 1994 eingebaut waren, wurden durch Lithiumflourid-Dosimeter (LiF-Dosimeter) ergänzt, die eine untere Ansprechschwelle von 5 keV haben, so daß sie die vermutete niederenergetische Synchrotronstrahlung feststellen sollten.

Zwei ionenimplantierte Silizium-Detektoren wurden zu Vergleichszwecken im Slot 4 installiert. Mit Hilfe dieser Detektoren sollte eine Abhängigkeit der beobachteten Stahlenschäden von der Detektortechnologie untersucht werden.

Zwischen Strahlrohr und PLUG-Kalorimeter erfolgte der Einbau einer 2 mm starken zylindrischen Bleiabschirmung, mit der Absicht, die Silizium-Detektoren vor niederenergetischer Synchrotronstrahlung zu schützen.

Weiterhin wurden die Analogboxen umgebaut, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern (siehe [KRÜ96]).

Kapitel 4

Die Entwicklung der Detektorparameter in der Strahlzeit 1995

In diesem Kapitel werden die Untersuchungen in der Strahlzeit 1995 bezüglich der Veränderungen von Dunkelstrom, Verarmungsspannung, Flachbandspannung und Signal-Rausch-Verhältnis der Oberflächensperrschichtdetektoren des PLUG-Kalorimeters sowie die Ergebnisse der Dosimetermessungen vorgestellt. Die Entwicklung des Dunkelstroms wird sowohl für das langfristige Verhalten über die gesamte Strahlzeit als auch für das kurzfristige Verhalten innerhalb von 24 Stunden mit Ereignissen im HERA-Betrieb korreliert. Die Abhängigkeit des Anstiegs im Dunkelstrom von der Detektortechnologie wird durch einen Vergleich der Oberflächensperrschichtdetektoren mit ionenimplantierten Silizium-Detektoren untersucht. Abschließend werden die Ergebnisse unter Berücksichtigung ergänzender Laboruntersuchungen diskutiert.

4.1 Die Entwicklung des Dunkelstroms

Während der Strahlzeit 1995 wurde ein sehr starker Anstieg des Dunkelstroms beobachtet. Die Module der CAEN-Spannungsversorgung mit einem maximalen Strom von 200 μA mußten teilweise durch Module mit einem maximalen Strom von 500 μA ersetzt werden, um den Betrieb der Oberflächensperrschichtdetektoren bei vollständiger Verarmung zu gewährleisten.

Abbildung 4.1 zeigt die Entwicklung des Dunkelstroms exemplarisch für einen Quadranten des PLUG-Kalorimeters (16 CAEN-Spannungsversorgungskanäle mit insgesamt 84 Oberflächensperrschichtdetektoren). Die nicht be-

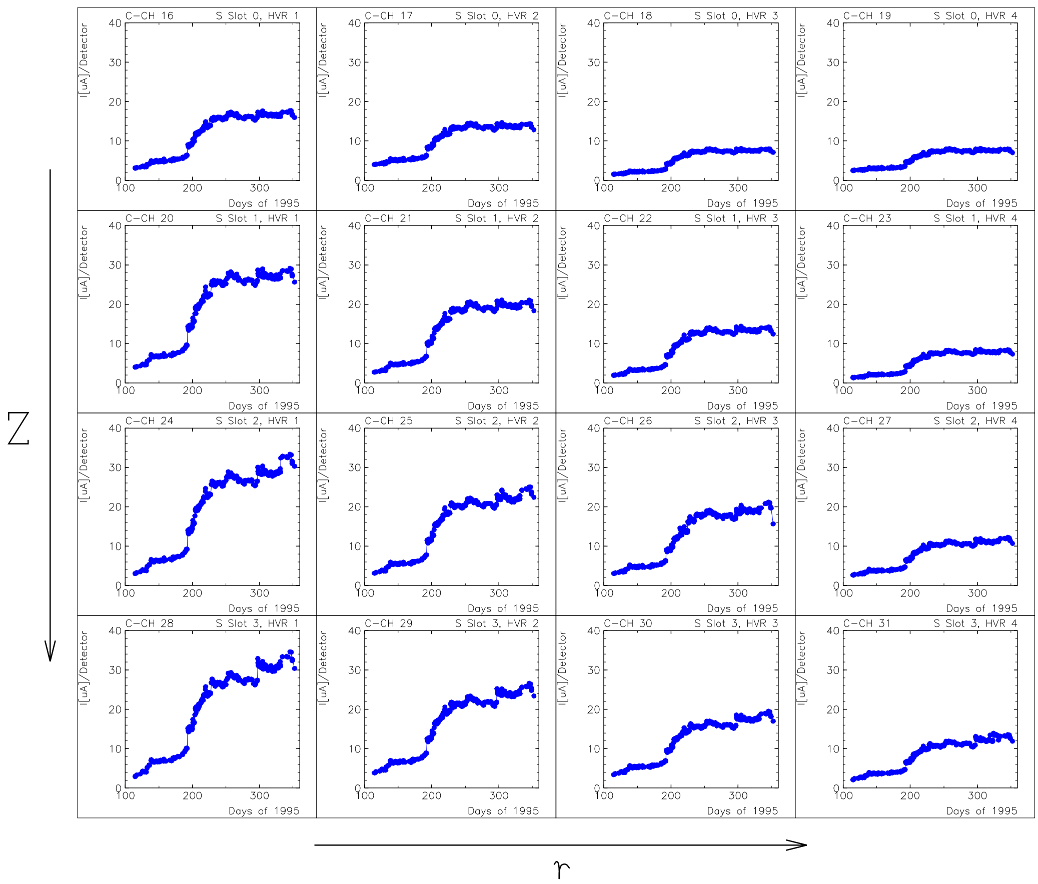

Abbildung 4.1: *Die Entwicklung des Dunkelstroms pro Detektor (normiert auf 20^o C) bei Betriebsspannung für einen Quadranten des PLUG-Kalorimeters (16 CAEN-Kanäle). Die Darstellung ist geordnet nach der radialen Entfernung von der Strahlrohrachse r horizontal und der longitudinalen Entfernung vom Wechselwirkungspunkt Z vertikal. Der radiale Abstand vom Strahlrohr wächst von links nach rechts ($r = 7,5 - 24,6$ cm), der longitudinale Abstand vom Wechselwirkungspunkt wächst von oben nach unten ($Z = 476 - 511$ cm)*

trachteten CAEN-Kanäle weisen ein analoges Verhalten auf.

Alle CAEN-Kanäle zeigen ein sehr ähnliches zeitliches Verhalten. Die Stärke des Dunkelstromanstiegs ist abhängig von der radialen Entfernung von der Strahlrohrachse r und der longitudinalen Entfernung Z vom Wechselwirkungspunkt entlang des Strahlrohrs. Die Zunahme des Dunkelstroms wird geringer mit der radialen Entfernung vom Strahlrohr (stärkste Schädigung für kleine r) und stärker mit der longitudinalen Entfernung vom Wechselwirkungspunkt (stärkste Schädigung für große Z). Die Korrelation der Schädigung mit der radialen Enfernung vom Strahlrohr entspricht den Erwartungen für die Strahlenbelastung und stimmt qualitativ mit den durch die Dosimeter gemessenen Werten überein (siehe Abschnitt 4.4). Für die Abhängigkeit bezüglich Z gibt es zwei mögliche Erklärungsansätze. Einerseits kann eine Schädigung durch Teilchen aus der Protonenrichtung verursacht werden, die durch Aufschauern im PLUG-Kalorimeter mit der Eindringtiefe an Anzahl zunehmen. Andererseits kann der Effekt durch Strahlung aus Elektronenrichtung durch den Elektronen(Positronen)-Halo erklärt werden, die im PLUG-Kalorimeter durch Wechselwirkungen in der Intensität abgeschwächt wird.

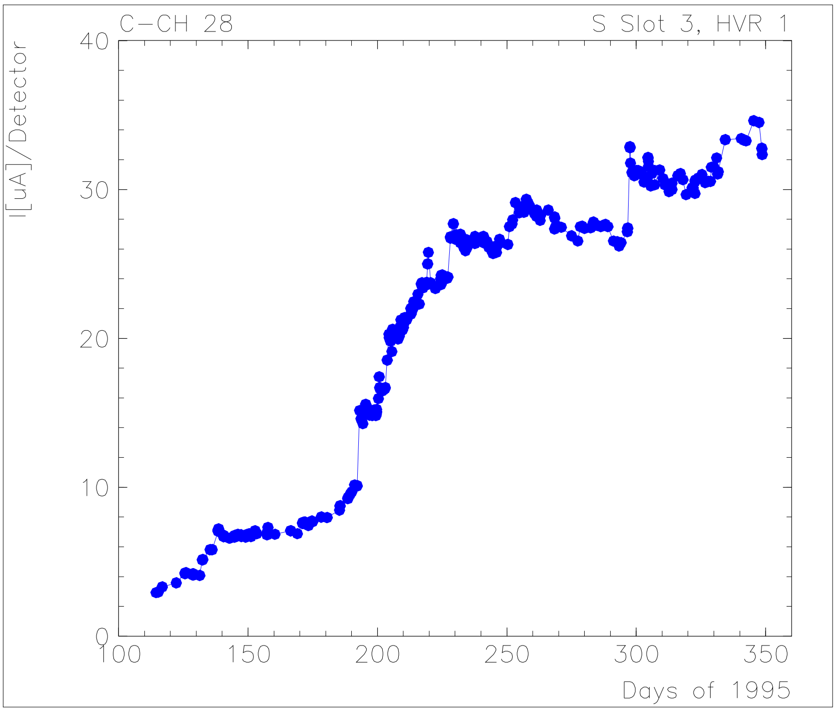

Abbildung 4.2: *Die Entwicklung des Dunkelstroms pro Detektor (normiert auf* 20^o *C) bei Betriebsspannung für den CAEN-Kanal 28 während der Strahlzeit 1995,* ($r = 7,5$ *cm*, $Z = 511$ *cm*)

Zur Diskussion der zeitlichen Entwicklung wird der Dunkelstrom des CAEN-Kanals 28 betrachtet (Abb. 4.2). Die Detektoren des CAEN-Kanals 28 haben eine geringe laterale Entfernung ($r = 7,5$ cm) vom Strahlrohr und einen große longitudinalen Abstand ($Z = 511$ cm) vom Wechselwirkungspunkt. Der Dunkelstromanstieg ist daher in diesem Kanal am stärksten. Die Entwicklung zeichnet sich durch vier Charakteristika aus:

- Der Dunkelstrom steigt in der gesamten Strahlperiode von $\sim 2\ \mu A$ pro Detektor auf $\sim 33\ \mu A$ pro Detektor an.
- Es gibt drei große, sprunghafte Anstiege des Dunkelstroms (Tage 193, 227, 298).
- Nach einem sprunghaften Anstieg gibt es einen geringfügigen Abfall des Dunkelstroms über einen kurzen Zeitraum.
- Es gibt längere Phasen auf gleichbleibenden Niveau

Die sprunghaften Anstiege des Dunkelstroms treten in Phasen auf, in denen das PLUG-Kalorimeter nicht im Betrieb ist, d.h., daß die Spannungsversorgung der Detektoren ausgeschaltet ist, und daher keine Messung des Dunkelstroms in dieser Zeit möglich ist. Es konnte eine Korrelation der auftretenden sprunghaften Anstiege mit Problemen im HERA-Betrieb festgestellt werden [HOL95]:

- Tag 193: HERA-Kickermagnet-Probleme führen zu Protonenverlust
- Tag 227: Dump-Probleme führen zu einem unkontrollierten, totalen Protonenverlust
- Tag 298: Ausfall eines Quadrupolmagneten vor H1 verursacht hohe Protonenverluste im besonderen im H1-Experiment

Alle Anstiege erfolgten zu Zeiten hoher Protonen-Untergrundraten aufgrund von Problemen mit HERA-Magneten oder ihrer Spannungsversorgung.

Eine Phase gleichbleibenden Niveaus des Dunkelstroms während der Tage $150 - 170$ fällt zusammen mit HERA-Positronen-Studien. In dieser Zeit wurden keine Protonen injiziert und somit kein Protonen-Untergrund erzeugt. Andere Phasen ohne Anstieg des Dunkelstroms gab es im Laufe des normalen HERA-Betriebs.

Die obigen Ergebnisse weisen darauf hin, daß der Anstieg des Dunkelstroms durch hadronische Strahlung verbunden mit dem Protonen-Untergrund verursacht wird und nicht durch Synchrotronstrahlung, wie zunächst vermutet wurde, oder Elektronen und Positronen aus elektromagnetische Schauern durch den Elektronen(Positronen)-Halo. Hadronische Strahlung führt zu Schäden des Silizium-Grundmaterials. Diese Schädigung des Silizium-Grundmaterials sollte auch eine Änderung der Verarmungsspannung verursachen (siehe Abschnitte 2.9.1 und 4.2.1).

4.1.1 Dunkelstromentwicklung innerhalb von 24 Stunden

Um eine genauere Untersuchung der Entwicklung des Dunkelstroms auch während der Injektionsphase zwischen den Phasen der Datennahme, in denen das PLUG-Kalorimeter in Betrieb ist, zu ermöglichen, wurde die Spannungsversorgung für vier Kanäle für den Zeitraum vom 07.09.95 bis 23.10.95 ständig im Betrieb belassen. Es wurde der Dunkelstrom in Intervallen von drei Minuten gemessen.

Abbildung 4.3 zeigt als Beispiel die Entwicklung am 07.09.95 für den CAEN-Kanal 15 (oben) sowie die Ströme von Protonen und Positronen in HERA (mitte) und die Untergrundraten gemessen im P-TOF (unten) für den gleichen Zeitraum. Das P-TOF (**P**LUG-**T**ime**O**f**F**light) ist ein Hodoskop bestehend aus Szintillatoren, die seit 1995 im PLUG-Kalorimeter in den Slots 7 und 8 instrumentiert sind. Auffällig sind zwei Sprünge des Dunkelstroms gegen 15.20 Uhr und etwas geringer gegen 18.30 Uhr. Ein Vergleich mit den HERA-Daten zeigt, daß HERA sich zu diesen Zeiten im Prozess der Protonen-Injektion befand und es zu Verlusten des Protonenstrahls kam. Zeitgleich werden im P-TOF sehr hohe Raten für den Protonen-Untergrund registriert. Für den ersten Dunkelstromsprung wird der Werteüberlauf bei einer Rate von $6,0 \cdot 10^5$ für das P-TOF erreicht. Dagegen führt ein kontrollierter Strahl-Dump nicht zu erhöhten Protonen-Untergrundraten oder einem Anstieg des Dunkelstroms (08.15 Uhr und 17.00 Uhr). Erkennbar ist weiterhin, daß der Dunkelstrom während der Strahloptimierung einen leicht zunehmenden Verlauf hat (00.30 Uhr bis 01.30 Uhr und 23.00 Uhr bis 24.00 Uhr) und die P-TOF-Raten ebenfalls erhöhte Werte zeigen. Strahlverluste durch Strahl-Strahl-Wechselwirkung verursachen diesen Effekt. Während stabiler Strahlbedingungen und Zeiten ohne Strahlbetrieb ist der Dunkelstrom konstant oder zeigt einen leicht abnehmenden Verlauf.

Diese Korrelationen sind ein Hinweis darauf, daß der Protonen-Untergrund die Hauptkomponente für die beobachteten Strahlenschäden darstellt.

4.1.2 Ionenimplantierte Detektoren

Zur Untersuchung einer möglichen Abhängigkeit der Strahlenschädigung von der Detektortechnologie wurden während der Strahlzeit 1995 zwei ionenimplantierte Silizium-Detektoren (siehe auch Abschnitt 2.1.1) im PLUG-Kalorimeter betrieben. Da die ionenimplantierten Silizium-Detektoren keine MOS-Rand-Struktur besitzen und der Sperrkontakt durch einen implantierten p^+-n-Übergang realisiert ist, treten keine Oberflächeneffekte auf.

Die ionenimplantierten Silizium-Detektoren waren in Slot 4 ($Z = 519.5\ cm$)

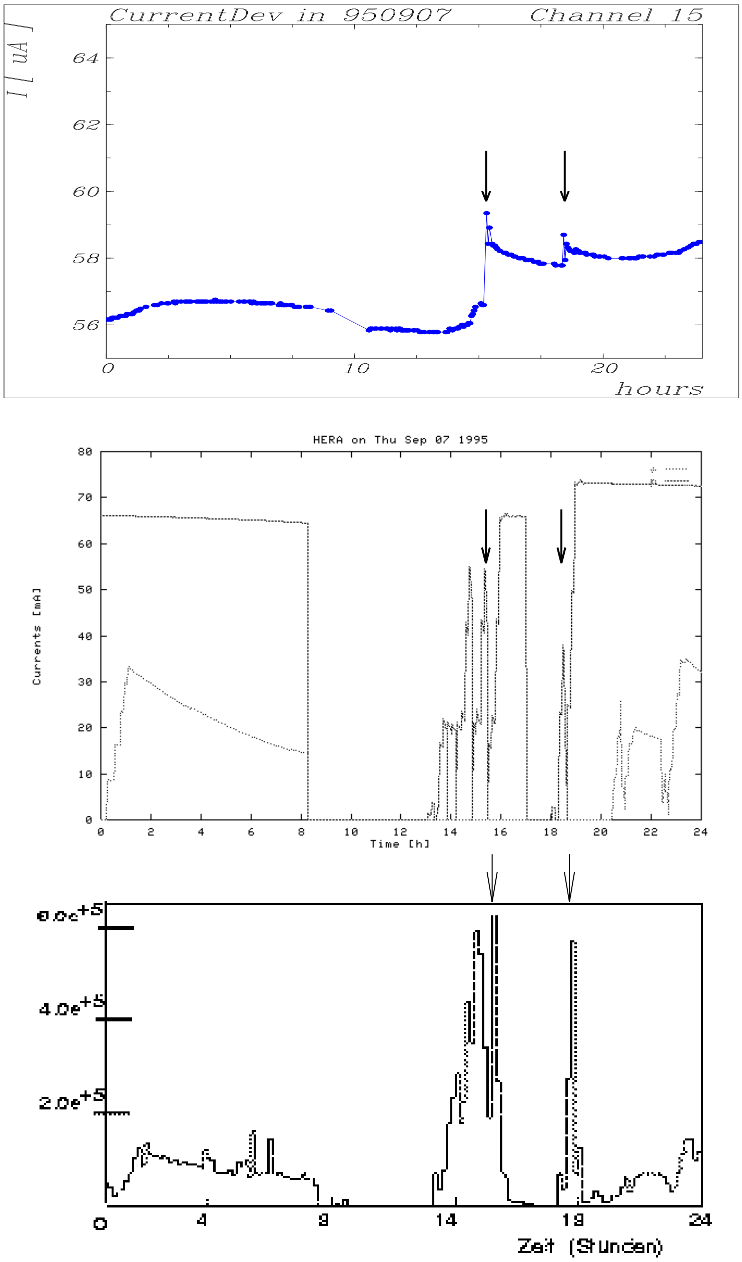

Abbildung 4.3: *Daten vom 07.09.95; oben: Entwicklung des Dunkelstroms für CAEN-Kanal 15; mitte: Ströme von Protonen (gestrichelt) und Positronen (gepunktet) in HERA; unten: Protonen-Untergrundraten gemessen im PLUG-TOF*

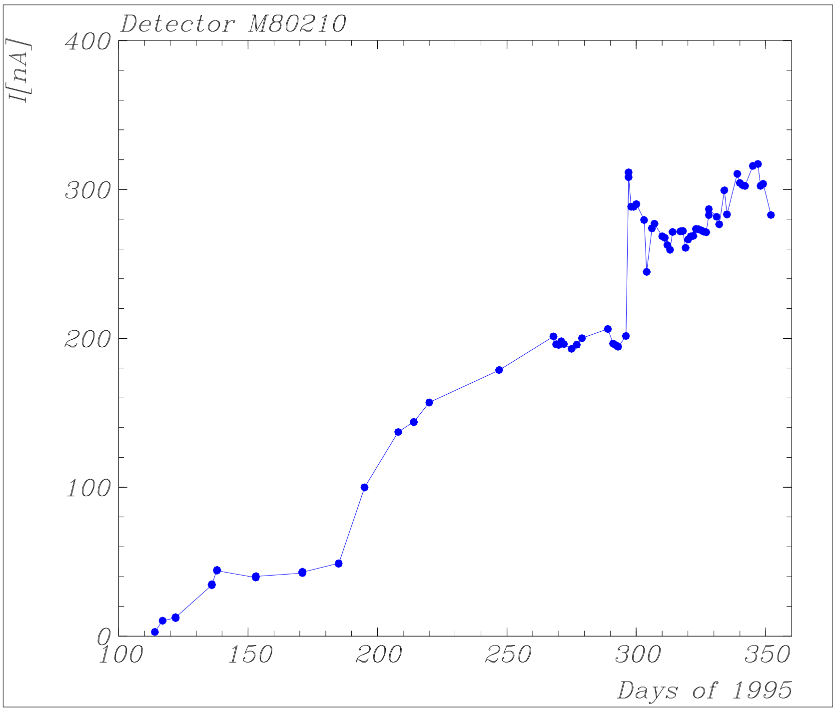

Abbildung 4.4: *Die Entwicklung des Dunkelstroms des ionenimplantierten Detektors M80210 (normiert auf* 20° *C,* $r = 7,5$ *cm,* $Z = 519,5$ *cm)*

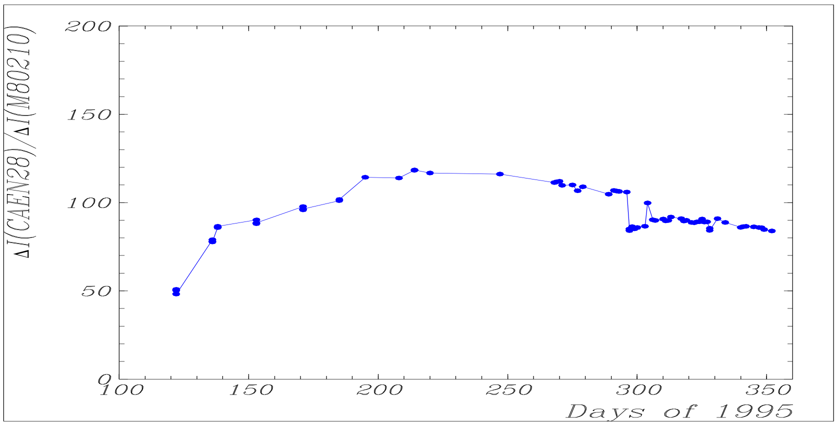

Abbildung 4.5: *Die Entwicklung des Verhältnisses der Dunkelstromzunahmen für den CAEN-Kanal 28 und den ionenimplantierten Detektor M80210*

eingebaut. Der radiale Abstand zum Strahlrohr betrug $r = 7,5\ cm$, d.h. die Detektoren befanden sich an einer Position, an der die stärkste Schädigung zu erwarten ist. Abbildung 4.4 zeigt die Entwicklung des Dunkelstroms für einen der ionenimplantierten Silizium-Detektoren (M80210). Ein Vergleich mit dem CAEN-Kanal 28 (Abb. 4.2, $r = 7,5\ cm$, $Z = 511\ cm$) zeigt einen qualitativ gleichen Verlauf. Abbildung 4.5 zeigt die Entwicklung des Verhältnisses der Zunahmen des Dunkelstroms für den CAEN-Kanal 28 und den ionenimplantierten Detektor M80210 $\frac{\Delta I(CAEN28)}{\Delta I(M80210)}$. Die Dunkelstromzunahme ist für den ionenimplantierten Detektor um einen Faktor ~ 100 geringer. Dieser Faktor entspricht in der Größenordnung sowohl dem Oberflächen- als auch dem Volumenverhältnis der untersuchten ionenimplantierten und Oberflächensperrschichtdetektoren. Der Anstieg des Dunkelstroms erfolgt unabhängig vom Produktionsverfahren. Eine Schädigung des Schottky-Kontaktes oder der MOS-Rand-Struktur der Oberflächensperrschichtdetektoren des PLUG-Kalorimeters kann daher nicht die alleinige Ursache für den Dunkelstromanstieg bilden.

Variation der Spannungsversorgung

Bei Untersuchungen an der Indiana Universität [MOR95] wurde ein Ansteigen des Dunkelstroms bei Bestrahlung von Silizium-Detektoren in Gas-Atmosphäre beobachtet. Der Anstieg wird durch die Ionisation der Gasschicht vor dem Detektor erklärt. Es wird angenommen, daß die erzeugten Sekundärelektronen die Oxidoberfläche aufladen und so den Stromanstieg verursachen. Dieser Effekt tritt nicht auf, wenn die Spannungsversorgung des Detektors so gestaltet wird, daß an der Frontelektrode negative Spannung anliegt. Die Elektronen werden durch das abstoßende elektrische Feld am Eindringen in die Oxidschicht gehindert.

Die Spannungsversorgung wurde daher für einen ionenimplantierten Detektor (M80212) am 22.09.95 (Tag 265) so modifiziert, daß er nun mit negativer Spannung an der Frontelektrode betrieben wurde (siehe Abb. 1.5, B). In Abbildung 4.6 ist die Dunkelstromentwicklung für beide ionenimplantierten Silizium-Detektoren und das Verhältnis der Dunkelströme $\frac{I(M80210)}{I(M80212)}$ seit dem 22.09.95 dargestellt. Beide ionenimplantierten Silizium-Detektoren zeigen einen annähernd parallelen Verlauf. Das Verhältnis der Dunkelströme ist konstant bei einem Wert von ~ 1. Die in [MOR95] beobachteten Effekte sind also nicht verantwortlich für die Steigerung des Dunkelstroms bei den Silizium-Detektoren des PLUG-Kalorimeters.

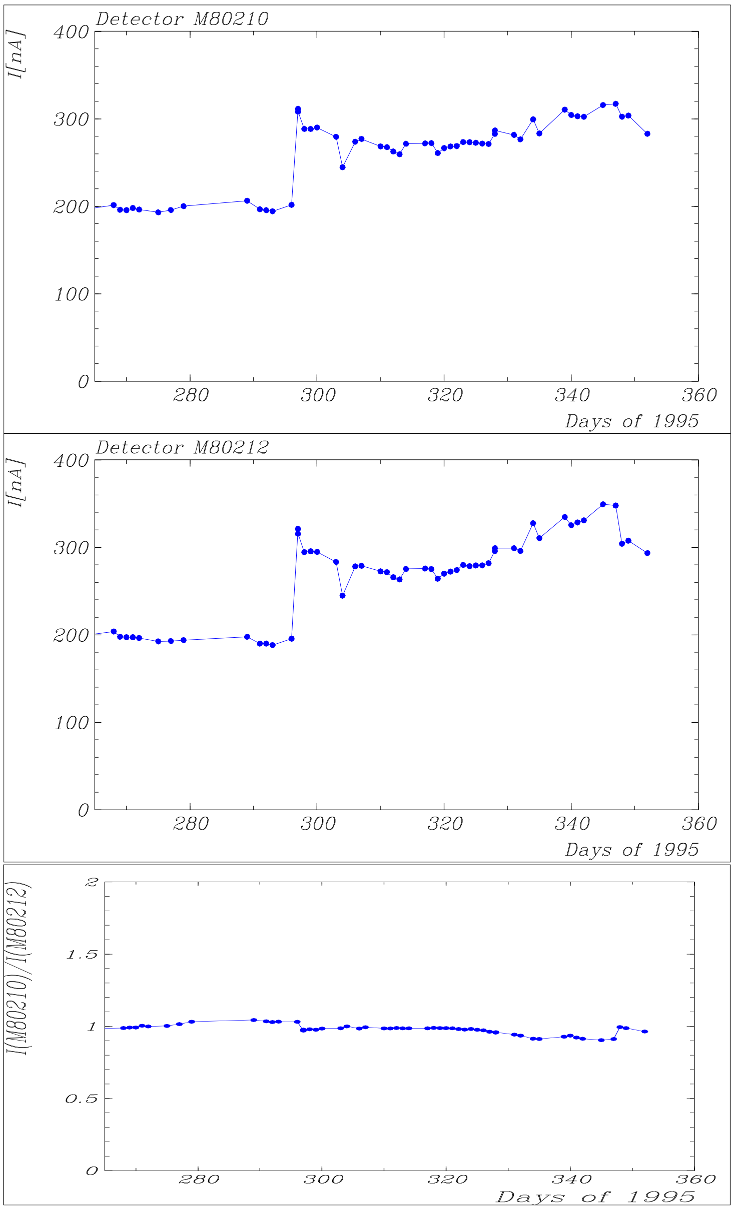

Abbildung 4.6: *Die Entwicklung des Dunkelstroms der ionenimplantierten Silizium-Detektoren bei unterschiedlicher Spannungsversorgung; oben: M80210 mit positiver Spannung an der Rückelektrode (Standardbetrieb); mitte: M80212 mit negativer Spannung an der Frontelektrode; unten: Verhältnis der Dunkelströme*

4.2 Entwicklung der CV-Charakteristiken

4.2.1 Verarmungsspannung

Für eine Untersuchung der Verarmungsspannung wird ein Detektor (R95008) betrachtet, der im CAEN-Kanal 28 betrieben wurde. Eine Veränderung der Verarmungsspannung aufgrund von Strahlenschädigung des Silizium-Grundmaterial sollte hier am deutlichsten sichtbar sein, da für diesen Detektor der radiale Strahlrohrabstand gering ($r = 7,5\ cm$) und der longitudinale Wechselwirkungspunktabstand groß ($Z = 511\ cm$) ist.

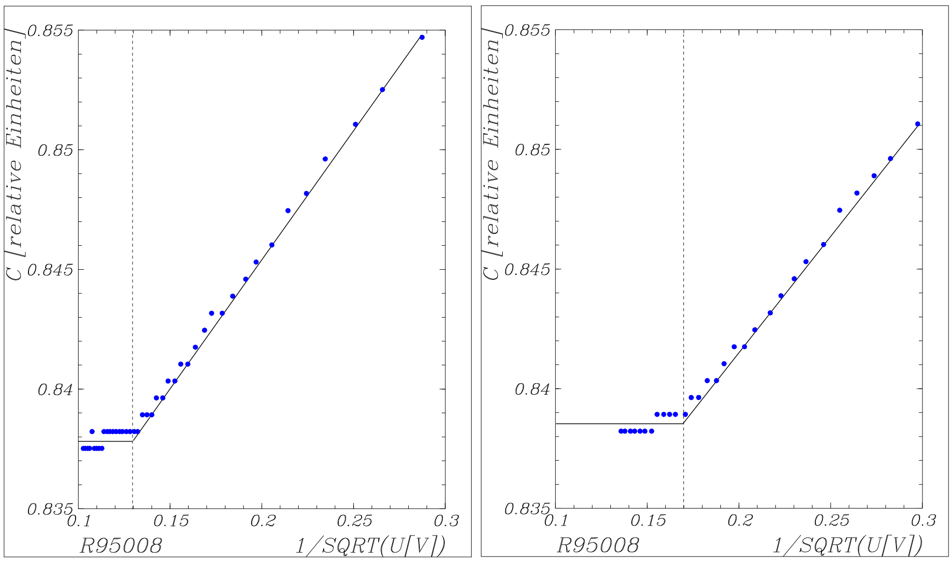

Abbildung 4.7: *CV-Charkteristiken in* $1/\sqrt{U}$*-Darstellung (Kapazität in relativen Einheiten) für den Detektor R95008, vor der Strahlzeit vom 06.04.95 (links) und nach der Strahlzeit vom 14.12.95 (rechts)*

Abbildung 4.7 zeigt CV-Charakteristiken für den Detektor in $1/\sqrt{U}$-Darstellung, die vor der Strahlzeit (06.04.95, links) und am Ende der Strahlzeit (14.12.95, rechts) aufgenommen wurden. Deutlich erkennbar ist eine Verschiebung der Verarmungsspannung von 60 V vor der Strahlzeit auf einen Wert von etwa 35 V am Ende der Strahlzeit. Dieser Abfall der Verarmungsspannung wird durch Schäden im Silizium-Grundmaterial aufgrund von hadronischer Strahlung verursacht, die die effektive Dotierung verändert (siehe Abschnitt 2.9.1). Die Reduktion der Verarmungsspannung um etwa 25 V entspricht einer Verringerung der effektiven Donatorkonzentration um

$\Delta N_{eff} \approx 2,1 \cdot 10^{11}\ cm^{-3}$ (Gl. 2.7). Diese Schädigung wird erreicht bei einer äquivalenten Fluenz von $\Phi_{eq} \approx 2 \cdot 10^{12}\ cm^{-2}$ (unter Vernachlässigung von Kurz- und Langzeitausheilung aus Gl. 2.39).

4.2.2 Flachbandspannung

Während der Strahlzeit 1995 wurden regelmäßig CV-Charakteristiken aufgenommen. Daher kann die zeitliche Entwicklung der Flachbandspannung beobachtet werden.

Abbildung 4.8 zeigt die Entwicklung der Flachbandspannung für drei typische Detektoren. Ein Detektor (R94016), der mit Hilfe des neuen Oxidationsverfahrens produziert wurde und 1995 erstmals im PLUG-Kalorimeter instrumentiert war, zeigt eine gleichbleibende Flachbandspannung auf niedrigem Niveau. Diese Beobachtung gilt für alle Silizium-Detektoren, die nach dem neuen Verfahren oxidiert wurden. Die beiden anderen Detektoren wurden nach dem alten Verfahren oxidiert und waren bereits 1993 und 1994 im PLUG-Kalorimeter instrumentiert. Ein Detektor (Q92192), hat zu Beginn der Strahlzeit eine Flachbandspannung von $U_{fb} \approx 13\ V$. Während der Strahlzeit steigt der Wert auf $U_{fb} \approx 37\ V$ an. Für den anderen Detektor (Q91216) erkennt man einen stabilen Wert bei $U_{fb} \approx 37\ V$. Da für diesen zweiten Detektor eine stärkere Strahlenbelastung als für den Detektor Q92192 vorliegt ($Z(Q91216) = Z(Q92192)$, $r(Q91216) < r(Q92192)$, siehe Abschnitte 4.1 und 4.4), ist anzunehmen, daß die Flachbandspannung einen Sättigungswert bei $U_{fb} \approx 37\ V$ schon vor der Strahlzeitperiode 1995 erreicht hat. Diese Vermutung wird durch der Verhalten von Detektor Q92192 bestätigt, dessen Flachbandspannung ebenfalls nicht über einen Wert von $U_{fb} \approx 37\ V$ ansteigt.

Das Histogramm der Flachbandspannungen (Abb 4.9) und die Korrelation der Flachbandspannung mit dem Oxidationsddatum (Abb. 4.10) bestätigen die Ergebnisse aus dem Jahr 1994.

4.3 Entwicklung des Rauschens

Das Rauschen wächst in der Strahlzeit 1995 von einem Durchschnittswert zu Beginn von $N_{mean,a} = 0,8\ ADCC$ auf einen Wert von $N_{mean,e} = 1,2\ ADCC$ am Ende der Strahlzeit. Dies entspricht einem Zuwachs von $\Delta\sigma_R \approx 80\ keV$. Die Zunahme erfolgt aufgrund der steigenden Dunkelströme und dem damit verbundenen Stromrauschen.

Z=511 cm
r=23,8 cm

Z=511 cm
r=19,0 cm

Z=476 cm
r=7,5 cm

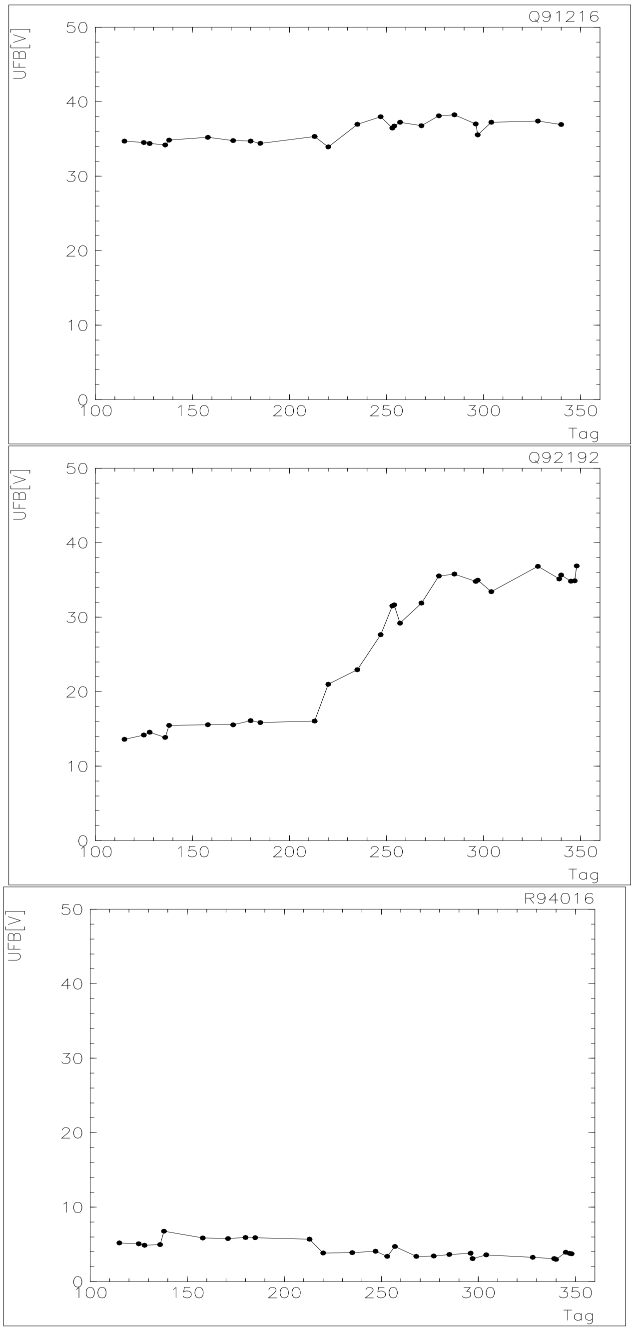

Abbildung 4.8: *Entwicklung der Flachbandspannung für die Detektoren (von oben nach unten): Q91216, Q92192 und R94016*

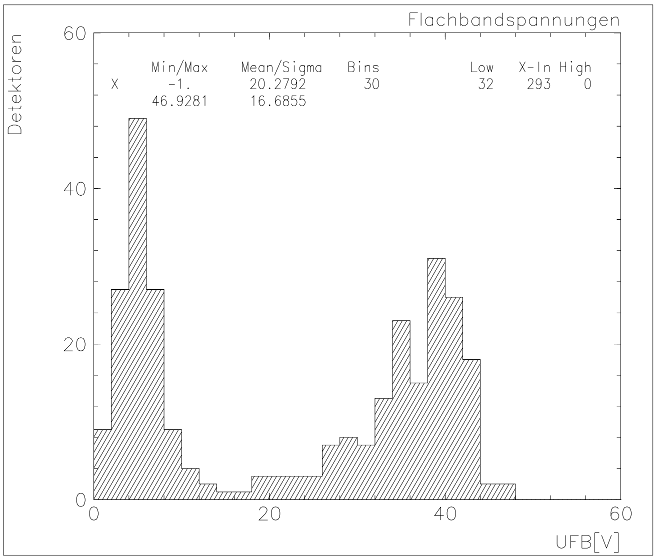

Abbildung 4.9: *Histogramm der Flachbandspannungen der PLUG-Detektoren nach der Strahlzeit 1995*

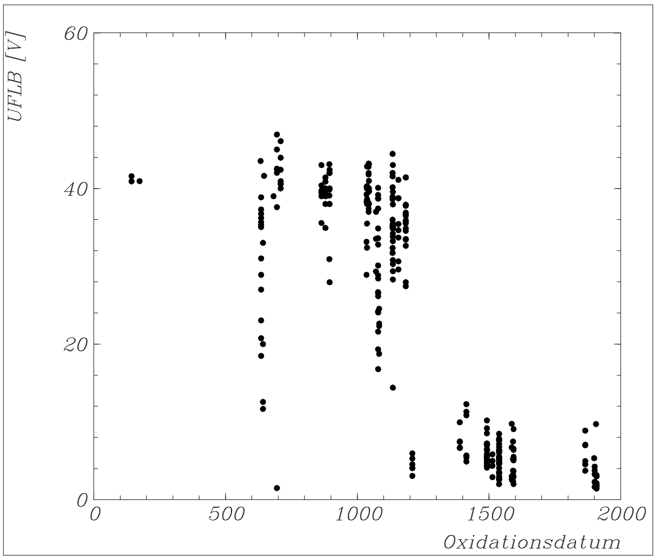

Abbildung 4.10: *Korrelationsplot des Oxidationsdatums in Tagen nach dem 01.01.1989 mit der Flachbandspannung nach der Strahlzeit 1995*

Für das Stromrauschen gilt:

$$< N_{strom}^2 >= \frac{Ie^2\tau_0}{4q_0} \tag{4.1}$$

mit der Elementarladung q_0 und der Shapingzeit τ_0 (für den in der PLUG-Ausleseelektronik verwendeten Shaper ist $\tau_0 = 2\ \mu s$). Das Stromrauschen wächst mit $\sqrt{I}$.

Eine ausführliche Betrachtung der Rauschentwicklung während der Strahlzeit 1995 wird in [KRÜ96] durchgeführt.

4.4 Absorbierte Strahlendosis

Die Dosismessungen ergeben sowohl für Glasdosimeter (untere Ansprechschwelle 30 keV) als auch für LiF-Dosimeter (untere Ansprechschwelle 5 keV) übereinstimmende Ergebnisse einer integrierten Dosis über die gesamte Strahlzeit von etwa 400 Gy für die innersten Dosimeter und etwa 10 Gy für Dosimeter im Randbereich [BUC96]. Diese übereinstimmenden Messungen zeigen, daß es keine niederenergetische Strahlung mit hoher Intensität gibt.

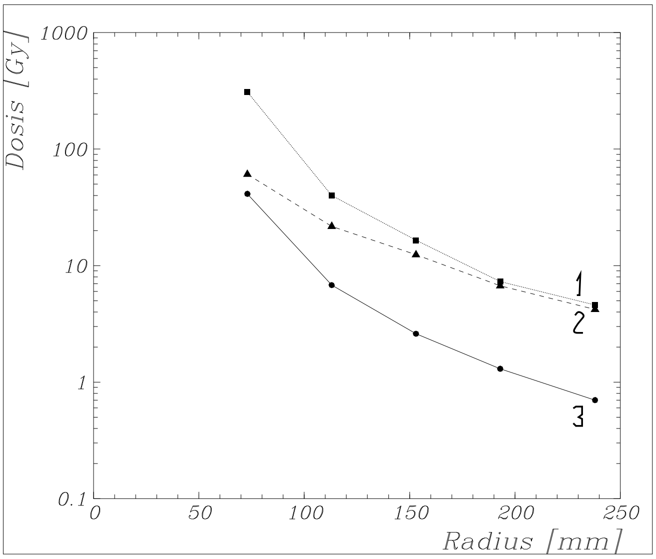

Abbildung 4.11: *Radiale Dosisverteilung im PLUG-Kalorimeter für drei Dosismessungen (26.04.-06.06.95 (1), 06.06.-07.08.95 (2), 08.08.-18.12.95 (3))*

Abbildung 4.11 zeigt die radiale Verteilung der Dosis im PLUG-Kalorimeter. Für den Unterschied in der radialen Abhängigkeit für den Zeitraum vom 06.06.-07.08.95 (2) liegt keine Erklärung vor.

4.5 Diskussion

Die Untersuchungen während der Strahlzeit 1995 zeigen einen starken, teilweise sprunghaften Anstieg des Dunkelstroms für die Oberflächensperrschichtdetektoren des PLUG-Kalorimeters, der von der Position des Detektors im PLUG-Kalorimeter abhängt. Der Anstieg des Dunkelstroms ist korreliert mit dem Protonen-Untergrund (siehe Abschnitt 4.1). Diese Korrelation zeigt sich sowohl in der langfristigen Untersuchung des Dunkelstromverhaltens (Dunkelstromsprünge bei HERA-Problemen, die zu Protonenverlust führen), als auch in der kurzfristigen Untersuchung (Dunkelstromanstieg bei Protonenverlust und hohen Protonen-Untergrundraten). Eine Untersuchung des Anteils des Oxidstroms an dem Dunkelstromanstieg ermöglicht eine Aussage zur Ursache des Anstiegs. Das PLUG-Kalorimeter war zu Zeiten des Dunkelstromanstiegs nicht in Betrieb. Eine Abschätzung der Zunahme des Oxidstroms für die maximalen gemessenen Dosiswerte ($D = 400\ Gy$) ergibt nach Gl. 2.43 einen Wert von $\Delta I_{Ox} = 0,05\ \mu A$. Auch für Dosiswerte, die für die beobachtete Änderung der Flachbandspannung der Detektoren erwartet werden ($D \approx 2\ kGy$), erhält man niedrige Werte für die Zunahme des Oxidstroms ($\Delta I_{Ox} = 0,2\ \mu A$) im Verhältnis zum gemessenen Dunkelstromanstieg von $\Delta I \approx 30\ \mu A$ für die innersten Detektoren. Die Zunahme des Dunkelstroms wird also dominiert durch einen Anstieg des Volumengenerationsstroms aufgrund der Zunahme der Generationszentren im Siliziumbulk. Der Abfall der Verarmungsspannung bestätigt die Schädigung des Silizium-Grundmaterials. Diese Beobachtungen führen zu der Folgerung, daß hadronische Strahlung für den Anstieg des Dunkelstroms verantwortlich ist.

Die Abschätzung der äquivalenten Fluenz aus der Zunahme des Volumengenerationsstroms (nach Gl. 2.38) ergibt für $\Delta I_{Vol} \approx 30\ \mu A$ einen Wert von $\Phi_{eq} \approx 1,5 \cdot 10^{12}\ cm^{-2}$. Dieser Wert stimmt mit der äquivalenten Fluenz von $\Phi_{eq} \approx 2 \cdot 10^{12}\ cm^{-2}$, die aus der Abnahme der Verarmungsspannung (Abschnitt 4.2.1) ermittelt wird, gut überein.

Laboruntersuchungen an den ionenimplantierten Silizium-Detektoren bestätigen die Ergebnisse, die für die Oberflächensperrschichtdetektoren ermittelt wurden [FEI96]. Für die ionenimplantierten Silizium-Detektoren ergibt sich eine Reduktion der effektiven Donatorkonzentration von $\Delta N_{eff} \approx 2,2 \cdot 10^{11}\ cm^{-3}$ entsprechend einer äquivalenten Fluenz von $\Phi_{eq} \approx 2 \cdot 10^{12}\ cm^{-2}$. Diese Fluenz ergibt sich ebenfalls aus Abschätzungen zum Volumenstromanstieg um etwa $0,4\ \mu A$ aus Gl. 2.38 [FEI96].

Spektroskopische Untersuchungen mit der TSC-Methode (**T**hermally **S**timulated **C**urrent) an einem der ionenimplantierten Silizium-Detektoren zeigen tiefe Störstellen im Siliziumbulk an (siehe Abb. 4.12) [FEI96]. Das Ergebnis entspricht Untersuchungen von Probedetektoren, die mit Neutronen bestrahlt wurden.

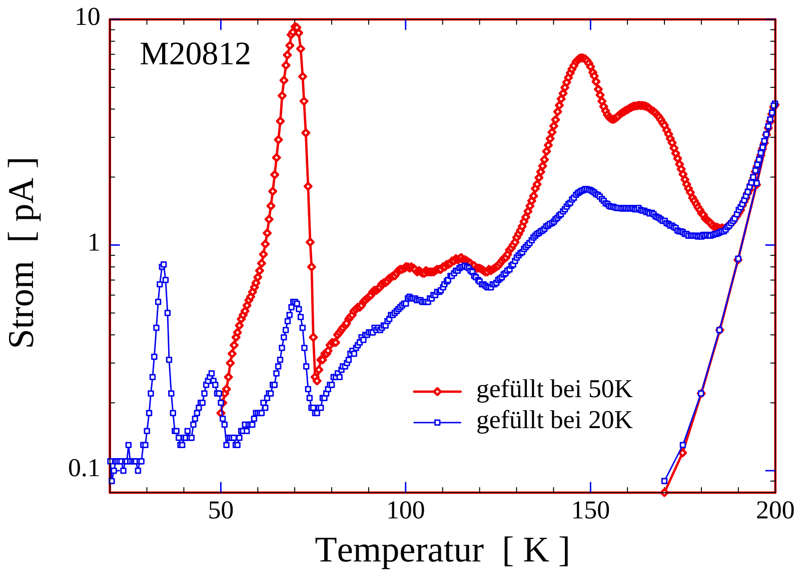

Abbildung 4.12: *TSC-Spektrum des ionenimplantierten Silizium-Detektor M20812 nach der Strahlzeit 1995 [FEI96]*

Diese Ergebnisse weisen übereinstimmend darauf hin, daß hadronische Strahlung mit einer äquivalenten Fluenz von $\Phi_{eq} \approx 1,5\text{-}2 \cdot 10^{12}\ cm^{-2}$, die Ursache für den Anstieg des Dunkelstroms und der Verschiebung der Verarmungsspannung darstellt.

Eine Abschätzung der Dosis bei einer Fluenz von $\Phi_{eq} \approx 1,5 \cdot 10^{12}\ cm^{-2}$ für minimalionisierende Hadronen (Energieverlust $E = 130 \frac{keV}{Teilchen}$ in 400 μm Si) ergibt eine Dosis von 405 Gy. Dieses Ergebnis stimmt mit den Messungen der Dosimeter überein.

In Abbildung 4.13 ist der Dunkelstromanstieg in Abhängigkeit von der Dosis für vier Radien dargestellt. Unter der Annahme von Schädigung des Silizium-Grundmaterials durch hadronische Strahlung ergeben sich bei der maximalen Dosis für den Schädigungskoffizienten α_∞ aus der Gleichung 2.38 Werte von $\alpha_\infty \approx 1,9 \cdot 10^{-17}\ \frac{A}{cm}$ für einen Radius von $r = 85\ mm$ bis $\alpha_\infty \approx 2,0 \cdot 10^{-16}$ für einen Radius von $r = 230\ mm$. Diese Diskrepanz kann nicht auf ein zeitabhängiges Verhalten durch Ausheilung von Strah-

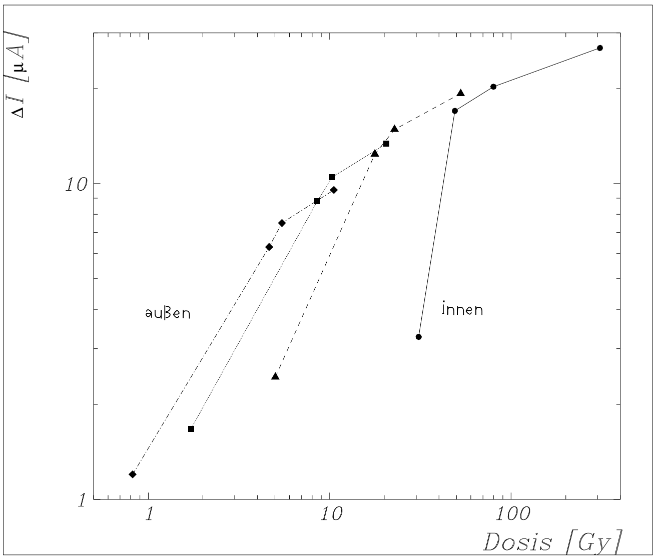

Abbildung 4.13: *Dosisabhängigkeit des Dunkelstroms für vier Radien von* $r = 85$ *mm bis* $r = 230$ *mm*

lenschäden zurückgeführt werden, da selbst für Schädigung ohne Ausheilung nur Werte von $\alpha_\infty = 8 \cdot 10^{-17}$ erreicht werden. Diese hohen Werte für α_∞ bei großen Radien sind bislang nicht verstanden.

Die Zunahme der Schädigung mit der Entfernung Z vom Wechselwirkungspunkt wird vermutlich durch das Aufschauern der Hadronen im Kupfer verursacht.

Die einheitlichen Ergebnisse für verschiedene Dosimetertypen zeigen, daß es keine niederenergetische Strahlung hoher Intensität gibt. Monte-Carlo-Simulationen zeigen, daß Synchrotronstrahlung nicht zur Detektorschädigung beiträgt [BUC96].

Auch in der Strahlzeit 1995 wird für einige Detektoren ein Anstieg der Flachbandspannung beobachtet. Es bestätigt sich die Abhängigkeit der Flachbandspannung von dem Oxidationsverfahren, die bereits während der Strahlzeit 1994 beobachtet wurde.

Die erwartete Änderung der Flachbandspannung aufgrund der maximalen gemessenen Dosis von 400 Gy kann nach Laboruntersuchungen mit 20 keV-Elektronen und $1,8$ MeV-Elektronen bestimmt werden. Im oberen Teil wurde gezeigt, daß die Strahlenschädigung primär in Phasen auftritt, in denen das PLUG-Kalorimeter nicht im Betrieb ist. Aus den Untersuchungen mit 20 keV-Elektronen ohne anliegende Sperrspannung (Gl. 2.41) erhält man eine Verschiebung der Flachbandspannung um $\Delta U_{FB} = 0,8\ V$. Nimmt man an, daß die Strahlendosis doch zu einem großen Teil während des Betriebs (bei anliegenden Sperrspannungen) im PLUG-Kalorimeter deponiert wird, so ergibt sich für die maximale Dosis eine Flachbandspannungänderung von $\Delta U_{FB} = 17,7\ V$. Dieser Wert liegt in der Größenordnung der beobachteten Verschiebungen. Zu beachten ist allerdings, daß die beobachtete Flachbandspannungänderung auch bei Detektoren auftritt, die weiter außen im PLUG-Kalorimeter instrumentiert waren und einer deutlich geringeren Dosis von 10-50 Gy ausgesetzt waren.

Die Untersuchungen mit $1,8\ MeV$-Elektronen (Gl. 2.42) ergeben eine erwartete Flachbandspannungänderung von $\Delta U_{FB} = 1,1\ V$.

Die beobachteten Dosen sind deutlich zu klein, um die beobachtete Verschiebung der Flachbandspannung zu erklären. Der Schädigungsmechanismus im Oxid durch das vorliegende Strahlungsfeld ist nicht ausreichend verstanden. Die Erhöhung der Flachbandspannung stellt allerdings für den Betrieb des PLUG-Kalorimeters kein Problem dar, da der Sättigungswert für die Flachbandspannung unter den Betriebsspannungen für die Oberflächensperrschichtdetektoren liegt.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Einige Oberflächensperrschichtdetektoren des PLUG-Kalorimeters zeigten in der Strahlzeit 1994 eine unerwartete und deutliche Veränderung der Detektorparameter. Um ein besseres Verständnis dieser Veränderungen zu gewinnen, wurden während der HERA-Maschinenstudien im November 1994 Testdetektoren im PLUG-Kalorimeter instrumentiert. In der Strahlzeit 1995 wurde die Überwachung der Detektorparameter intensiviert. Die beobachteten Parameter sind der Dunkelstrom, die Flachbandspannung und die Verarmungsspannung.

Der Dunkelstrom zeigte im Jahr 1995 einen starken und teilweise sprunghaften Anstieg. Dieser Anstieg trat korreliert mit unkontrollierten Protonenstrahlverlusten und hoher Untergrundstrahlung während der Injektion von Protonen und Positronen auf. Der Dunkelstromanstieg wird durch Schäden des Silizium-Grundmaterials und der damit verbundenen Zunahme des Volumengenerationsstroms durch die erhöhte Zahl von Generationszentren verursacht. Oberflächeneffekte tragen zu dem Dunkelstromanstieg nur in sehr geringem Maße bei.

Der Zuwachs des Rauschens um $\Delta\sigma_R \approx 80\ keV$ aufgrund des Stromanstiegs ist für den Betrieb des PLUG-Kalorimeters unkritisch.

Da die effektive Dotierung der Oberflächensperrschichtdetektoren durch die Schäden im Silizium-Grundmaterial vermindert wird, ändert sich analog die Verarmungsspannung.

Die Flachbandspannung zeigt in Abhängigkeit von dem Oxidationsprozeß ein unterschiedliches Verhalten. Detektoren, die nach einem älteren Verfahren oxidiert wurden, zeigen eine Erhöhung der Flachbandspannung bis zu einem

Sättigungswert von 35-40 V. Detektoren, die nach einem neuen Verfahren oxidiert wurden, zeigen keine signifikante Änderung der Flachbandspannung. Für dieses unterschiedliche Verhalten ist bisher kein Erklärungsansatz vorhanden. Zudem ist die durch Dosimeter gemessene Dosis zu klein, um die Steigerung der Flachbandspannung im beobachteten Maße zu erklären. Niederenergetische Synchrotronstrahlung kann durch vergleichende Untersuchungen mit verschiedenen Dosimetern sowie Monte-Carlo-Simulationen als Ursache für die erhöhte Flachbandspannungverschiebung ausgeschlossen werden.

Die Erhöhung der Flachbandspannung allerdings stellt für den Betrieb des PLUG-Kalorimeters kein Problem dar.

Insgesamt ist festzuhalten, daß die Veränderungen der Detektorparameter für den Betrieb des PLUG-Kalorimeters unkritisch sind. Die Zunahme des Dunkelstroms ist gut verstanden und mit dem HERA-Betrieb, der außerhalb der Kontrolle der PLUG-Kalorimeter-Betreiber liegt, verbunden. Für den zukünftigen Betrieb des PLUG-Kalorimeters sollte ein möglichst störungsfreier HERA-Betrieb ohne unkontrollierte Protonenverluste sowie niedrige Protonen-Untergrundraten insbesondere während der Injektionsphasen angestrebt werden. Die Entwicklung der Flachbandspannung in Abhängigkeit von der Dosis und dem Oxidationsverfahren ist noch nicht ausreichend verstanden und bedarf weiterer Untersuchungen.

Literaturverzeichnis

[BER68] G. Bertolini, A. Coche (Ed.): „Semiconductor Detectors“, North-Holland Publishing Company, Amsterdam 1968

[BER92] R. Bernier, D. Breton, R. L. Chase, C. Pascaud: „H1 Calorimeter Electronics“
Interner Bericht H1-07/92-237, 1992

[BRÄ89] D. Bräunig: „Wirkung hochenergetischer Strahlung auf Halbleiterbauelemente“
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hongkong, 1989

[BUC96] M. Buck: „Monte-Carlo-Simulation zum Einfluß der Synchrotonstrahlung auf die Silizium-Detektoren des PLUG-Kalorimeters“, Diplomarbeit 1. Inst. für Exp. Physik, Hamburg 1996

[FEI93] H. Feick: „Temperaturabhängigkeit der Langzeitausheilung neutronengeschädigter Silizium-Detektoren“
Diplomarbeit 1. Inst. für Exp. Physik, Hamburg 1993

[FEI96] H. Feick: „Kennlinien von Si-Teilchen-Detektoren und deren Veränderung durch Strahlenbelastung“,
Seminarvortrag in 'Nukleare Meßtechnik', Hamburg Januar 1996

[FRE90] E. Fretwurst, H. Herdan, G. Lindström, U. Pein, M. Rollwagen, H. Schatz, P. Thomsen, R. Wunstorf: „Silicon Detector Developments for Calometry: Technology and Radiation Damage“
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A288, 1990

[H1L95] WorldWibeWeb-Page: „H1 Luminosity Information“
http://dice2.desy.de/ f11lev/luminosity/list.html, Hamburg 1995

[HIL94] W. Hildesheim, V. Riech, M. Seidel: „The Plug Calorimeter Users Guide“
Internal Report H1-08/94-372, Hamburg 1994

[HIL95] W. Hildesheim, M. Seidel: „An Investigation into the Radiation Damage of the Silicon Detectors of the H1-PLUG Calorimeter within the HERA environment“,
Internal Report DESY 95-139, Hamburg 1995

[HOL95] B. Holzer: Persönliche Mitteilung,
DESY, Hamburg 1995

[JAR95] H. Jarck, E. Fretwurst, W. Hildesheim, G. Lindström, H. Krüger, M. Krüger, V. Riech, M. Seidel: „Untersuchung der Strahlungshärte der Si-Detektoren des H1-PLUG-Kalorimeters im Betrieb“
Kurzvortrag auf der Frühjahrstagung der DPG, Karlsruhe 1995

[KRÜ96] M. Krüger: „Kalibration des PLUG-Kalorimeters und Verbesserung des Signal-Rauschverhältnis“
Diplomarbeit 1. Inst. für Exp. Physik, Hamburg 1996

[LAZ87] M. S. Lazo, D. M. Woodall, P. J. Daniel: „Silicon and silicon dioxide neutron damage functions“ in Proc. Fast Burt React. Workshop, 1986, Sandia National Labatories, 1987. [Tech. Rep.]SAND, SAND87-0098 Vol.1

[LIN80] V. A. J. van Lint, T. M. Flanagan, R. E. Leadon, J. A. Naber, V. C. Rogers: „Mechanism of Radiation Effects in Electronic Materials“
John Wiley & Sons, 1980

[MOR95] K. B. Morley et. al.: „Charging Effects in Passivated Silicon Detectors“,
Indiana University IN 47405 1995

[NAG85] J. Nagel: „Untersuchungen an oxydpassivierten Oberflächensperrschichtdetektoren mit Mosaik-Konfiguration“
Diplomarbeit 1. Inst. für Exp. Physik, Hamburg 1985

[NIC82] E. H. Nicollian, J. R. Brews: „MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Tecxhnology“
John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore 1982

[OSI95] C. Osius: „Untersuchung von ionenimplantierten und Oberflächensperrschicht-Silizium-Detektoren mit einer 2 MeV Scanning-Protonenmikrostrahlsonde“
Diplomarbeit 1. Inst. für Exp. Physik, Hamburg 1995

[RHO88] E. H. Rhoderick, R. H. Williams: „Metal-Semiconductor Contacts“
Monographs in Electrical and Electronic Engineering, Clarendon Press, Oxford, 2^{nd} edition, 1988

[RIE96] V. Riech: Persönliche Mitteilung
Hamburg 1996

[RUF93] M. Ruffer: „Implementierung des siliziuminstrumentierten PLUG-Kalorimeters in den H1-Detektor“,
Interner Bericht DESY FH1K-93-01, Hamburg 1993

[SCH91] T. Schulz: „Untersuchungen zur Strahlenschädigung von Silizium-Oberflächensperrschicht-Detektoren durch 1,8 MeV Elektronen“,
Diplomarbeit 1. Inst. für Exp. Physik, Hamburg 1991

[SCH95] P. Schlichthärle: „Untersuchung von Oberflächeneffekten in Silizium-Detektoren nach Schädigung mit 20 keV Elektronen“,
Diplomarbeit 1. Inst. für Exp. Physik, Hamburg 1995

[SHI90] Y. Shi, D. X. Shen, F. M. Wu, K. J. Cheng: „A numerical study of cluster center formation in neutro-irradiated silicon“
J. Appl. Phys. Vol. 67 (2), 1990

[SZE85] S. M. Sze: „Semiconductor Devices Physics and Technology“,
John Wiley & Sons, 1985

[WUN86] R. Wunstorf: „Untersuchungen zur Diodencharakteristik von Silizium-Oberflächensperrschichtdetektoren“
Staatsexamensarbeit, 1. Inst. für Exp. Physik, Hamburg 1986

[WUN92] R. Wunstorf: „Systematische Untersuchungen zur Strahlenresistenz von Silizium-Detektoren für die Verwendung in Hochenergiephysik-Experimenten“
Dissertation, 1. Inst. für Exp. Physik, Hamburg 1992

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bedanken bei

- Prof. Dr. Dr. h.c. Lindström für die interessante Aufgabenstellung;
- Dr. Fretwurst, Dr. Seidel, Dr. Riech, Dr. Hildesheim und Dipl. Phys. Enrico Panaro für richtungsweisende Diskussionen und ständige Hilfsbereitschaft;
- Dipl. Ing. Uwe Pein für die technische Unterstützung;
- meinen Bürogenossen Mattias Buck und Michael Krüger für anregende Gespräche und eine schöne gemeinsame Zeit;
- allen anderen Mitgliedern der Gruppe Nukleare Meßtechnikfür das angenehme Arbeitsklima;
- Frauke, die mich bei der Anfertigung dieser Arbeit anteilnehmend begleitet hat;
- und meinen Eltern, die mir dies Alles überhaupt ermöglicht haben.

Versicherung

Ich versichere, daß ich diese Arbeit sebstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hinweise angefertigt habe.

Hamburg, den 23. Mai 1996

Heiko Jarck