Simulationen und Qualitätssicherung der Siliziumstreifendetektoren des ZEUS-Mikrovertexdetektors

Simulations and Quality Control of the Silicon Strip Detectors of the ZEUS Microvertex Detector

Diplomarbeit am II. Institut für
Experimentalphysik der Universität Hamburg

Jan Martens
Doormannsweg 16
D-20259 Hamburg

Hamburg, 21. Dezember 1999

Zusammenfassung

Während der Betriebspause für die HERA-Luminositätserhöhung im Jahr 2000 wird ein Silizium**M**ikro**V**ertex**D**etektor (MVD) in das ZEUS-Experiment eingebaut werden. Um den Betrieb der Detektoren für mindestens fünf Jahre zu gewährleisten, muß die Funktionsfähigkeit und Güte der Detektoren verifiziert werden. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Funktionalität und der Qualitätsprüfung der Siliziumdetektoren.

Einführend wird die Motivation der Arbeit erläutert, es folgen Beschreibungen der grundlegenden Prinzipien von Siliziumdetektoren und des Aufbaus der MVD-Zähler, der Teststrukturen und des Gesamtdetektors. 600 einseitige Streifenzähler mit je 512 Auslesestreifen und fünf Zwischenstreifen (Abstand $20\,\mu m$) je Auslesestreifen umgeben den Wechselwirkungspunkt in drei zylindrischen Ebenen (BMVD), 112 Zähler mit ähnlicher Geometrie, angeordnet in vier Rädern, detektieren Teilchen in Vorwärtsrichtung (FMVD).

Der zweite Teil der Arbeit (Kap. 3) dokumentiert die Arbeitsschritte und Instrumente zur Qualitätssicherung der Detektoren. Die MVD-Gruppe des ZEUS-Experiments hat fast 1000 Zähler zum Bau des MVD-Detektors erhalten. Eine Eingangsanalyse wird durchgeführt und die Ergebnisse dieser Analyse präsentiert.

Mechanische Tests am BMVD-Zähler zeigen, daß ein Anstieg des Dunkelstroms durch Proben mit Kräften über $15\,cN$ verursacht werden kann.

Ein Langzeittest für Messungen des Dunkelstroms wurde geplant und aufgebaut, die Messungen werden vorgestellt und diskutiert.

Die durchgeführten Qualitätskontrollen der Serienproduktion für die Detektormontage werden erläutert und dargestellt. Ergebnisse der Dunkelstrommessungen nach den einzelnen Produktionsschritten werden gezeigt.

Simulationen mit der Software PSpice® geben im dritten Teil der Arbeit (Kap. 4) Aufschluß über die Funktionsweise der kapazitiven Ladungsteilung und die Signalbildung im Detektor. Auf der Basis von Kapazitätsmessungen und Simulationen, deren Prinzipien erläutert werden, wird die Zwischenstreifenkapazität des BMVD-Zählers an Teststrukturen bestimmt.

Kapazitätsstreifenmessungen am BMVD-Zähler werden durchgeführt und simuliert. Die Messungen werden mit geeigneten Simulationsmodellen erklärt. Mit Abschätzungen der induzierten Signalform werden Transientenanalysen durchgeführt, welche Übereinstimmungen mit Meßdaten aus einem Teststrahlaufbau zeigen. Ladungsteilung, Rückseitenverluste und Übersprechen werden für verschiedene Zwischenstreifenkapazitätsmodelle untersucht. Es wird ein empirisches Modell entworfen, welches weniger als 5% von den Messungen abweicht.

Abstract

During the shutdown for the HERA luminosity upgrade in 2000, a new silicon **M**icro**V**ertex **D**etector (MVD) will be installed in the ZEUS experiment. To assure the running of the detectors for a minimum of five years, the function and the quality of the detectors must be verified before installation. This paper discusses the working principle and quality control of the silicon microvertex detectors.

The thesis starts with a discussion of the motivations for the work and the description of the silicon detector operation principles. The presentation of the layout of the strip detectors, the teststructures and the detector system follows. 600 single sided strip detectors surround the interaction region arranged in three **b**arrel layers (BMVD). Each detector has 512 readout strips and five intermediate strips (pitch $20\,\mu m$) between the readout strips. 112 detectors detect particles in the **f**orward region (FMVD). They are arranged in four wheels.

In the third chapter the production steps and tools for the quality control of the detectors are documented. The MVD group of the ZEUS-experiment has received almost 1000 strip detectors. An analysis of the data of the entrance quality control is performed and results are discussed.

Mechanical tests on the BMVD strip detectors show that an increase of the dark current can be caused by probing with forces higher than $15\,cN$.

A long term test for the measurement of dark currents is designed and built, measurement results are presented.

The quality control of the series production for the detector mounting is discussed and results are shown of the dark current measurements after each production step.

In the fourth chapter simulations using the software PSpice® are described. They explain the principle of the capacitive charge division and the signal flow in the strip detector. Based on capacitance measurements and simulations of teststructures, the interstrip capacitances of the BMVD detector are calculated.

Interstrip capacitance measurements on the BMVD detector are done and simulated with different models. Estimating the signal shape induced by a minimum ionising particle, transient analyses have been performed which show a good agreement with measurements of a test beam setup. Charge sharing, back plane losses and crosstalk are analysed for different models of interstrip capacitances. An empirical model reproduces the test beam results within an accuracy of 5%.

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation **6**
1.1 Aufgabenstellungen 6
1.2 Gliederung der Arbeit 6

2 MVD-Siliziumdetektoren **8**
2.1 Funktionsweise von Siliziumstreifenzählern 8
2.1.1 Halbleitereigenschaften von Silizium 8
2.1.2 Siliziumstreifendetektoren 9
2.2 Der BMVD-Zähler 9
2.3 Teststrukturen 10
2.4 Der MVD-Detektor 13
2.4.1 Der BMVD-Detektor 14
2.4.2 Der FMVD Detektor 14
2.4.3 Ausleseelektronik 16

3 Meßtechnik und Qualitätssicherung **18**
3.1 Einleitung 18
3.2 Meßtechnik 18
3.2.1 Visuelle Inspektion 18
3.2.2 Elektrischer Meßaufbau 19
3.2.3 Mechanische Tests am BMVD 20
3.2.3.1 Der Proberkopf 20
3.2.3.2 Proberkopfkalibrierung 21
3.2.3.3 Messungen 22
3.2.3.4 Ergebnisse 24
3.2.4 Langzeittest 24
3.2.5 Teststrahl 27
3.3 Qualitätskontrolle 28
3.3.1 Hamamatsu-Daten 29
3.3.1.1 Detektorkapazität bei voller Verarmung 29
3.3.1.2 Verarmungsspannung 30
3.3.1.3 Streifendefekte 30
3.3.2 Produktionskontrolle 31
3.3.2.1 Langzeittest 32

3.3.2.2 IV-Kontrollen 33
3.4 Zusammenfassung 37

4 Kapazitive Ladungsteilung **38**
4.1 Prinzip einer Kapazitätsmessung 38
4.1.1 Störungsfreies Messen 39
4.1.2 Netzwerke 40
4.2 PSpice® 40
4.3 Bestimmung der Zwischenstreifenkapazität 41
4.3.1 Messungen an der Fingerstreifenstruktur 42
4.3.2 Modell der Fingerstreifenstruktur 42
4.4 Modell des BMVD Zählers 43
4.5 Kapazitätsmessung am MVD-Zähler 47
4.6 Signalanalysen 48
4.6.1 Die Signalform 48
4.6.2 Helix-Modell 51
4.6.3 Ergebnisse der Signalsimulationen 51
4.6.3.1 Einfluß der Signalform 51
4.6.3.2 Die Ladungsteilung 52
4.6.3.3 Rückseitenverluste 52
4.6.3.4 η-Verteilung 52
4.6.3.5 Übersprechen 53
4.6.3.6 Signalfluß 55
4.7 Ausblick 57
4.8 Zusammenfassung 57

5 Zusammenfassung **58**

A Working with probeheads **60**

B Definition der Detektorklassen **61**

Abbildungsverzeichnis **64**

Tabellenverzeichnis **65**

Literaturverzeichnis **66**

Kapitel 1

Motivation

Zusammen mit der HERA-Luminositätsaufrüstung im Sommer 2000 soll ein Siliziummikrovertexdetektor (MVD) in das ZEUS-Experiment eingebaut werden. Mit dem Einbau und dem Betrieb des Detektors für mindestens fünf Jahre muß die Funktionalität des Detektors gewährleistet bleiben. Dafür muß vorher die Güte der Detektoren, der Verbindungskabel (Upilex), der Ausleseelektronik, etc. verifiziert werden. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Funktionalität der Siliziummikrovertexdetektoren.

1.1 Aufgabenstellungen

Diese Arbeit dokumentiert die bisher erfolgten Maßnahmen zur Qualitätssicherung der Detektoren, wobei der Schwerpunkt auf der Kontrolle des Dunkelstromes liegt. Ein zu hoher Dunkelstrom verursacht eine Erhöhung des Rauschens und die Gefahr der Überhitzung des Zählers und seiner Umgebung. Es werden Messungen dargestellt, die die Spezifikationen kontrollieren. Spezifiziert werden:

- Ströme und ihre Ursachen,
- die Dotierung,
- Kapazitäten und Widerstände der auf dem Detektor befindlichen Bauteile und
- die Geometrie der Bauteile und der Detektoren.

Simulationen mit der Software PSpice® sollen Aufschluß über die Funktionsweise der kapazitiven Ladungsteilung und die Signalbildung im Detektor geben.

1.2 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2 werden die Funktionsweise von Siliziumdetektoren und der Aufbau der MVD-Zähler erklärt. Es werden das Layout der Teststrukturen und den Aufbau des MVD dokumentiert. Die Arbeit gliedert sich danach in zwei Schwerpunkte. Kapitel 3 gibt einen

Einblick in die vorhandene Meßtechnik und ihre Anwendung in der Qualitätskontrolle, während Kapitel 4 die Messung von Zwischenstreifenkapazitäten und deren Vergleich mit Simulationen und Teststrahldaten dokumentiert. Am Ende dieser beiden Kapitel und zum Schluß der Arbeit (Kapitel 5) werden Zusammenfassungen gegeben.

Kapitel 2

MVD-Siliziumdetektoren

2.1 Funktionsweise von Siliziumstreifenzählern

2.1.1 Halbleitereigenschaften von Silizium

Die grundlegenden Halbleitereigenschaften von Silizium werden durch das Bändermodell dargestellt [Sze81]. Die Bandlücke zwischen dem Valenz- und dem Leitungsband beträgt bei Raumtemperatur $E_g = 1{,}12\,eV$. Das Ferminiveau von undotiertem Silizium liegt ungefähr in der Mitte von Valenz- und Leitungsband, sodaß bei $T = 0\,K$ Silizium ein Isolator ist. Mit steigender Temperatur gelangen Elektronen ins Leitungsband und hinterlassen Löcher im Valenzband, weshalb bei Raumtemperatur ($300\,K$) die Ladungsträgerdichte von intrinsischem Silizium $n_i = 1{,}45 \cdot 10^{10}\,cm^{-3}$ ist. Daraus folgt ein spezifischer Widerstand $\varrho_{intr} = 230\,k\Omega cm$.

Silizium kann mit Fremdatomen dotiert werden, welche Ladungsträger zur Verfügung stellen. Donatoren geben Elektronen ab (N_D, n-leitend, n-dotiert), Akzeptoren nehmen Elektronen auf (N_A, p-leitend, p-dotiert, Löcherleitung). An der Grenze eines n-leitenden und eines p-leitenden Gebietes (pn-Übergang) diffundieren die jeweiligen Majoritätsladungsträger ins andere Gebiet und rekombinieren. An diesem pn-Übergang bildet sich eine von freien Ladungsträgern verarmte Region aus (Raumladungszone, Sperrschicht) [Sze81].

Eine in Sperrichtung angelegte äußere Spannung vergrößert die Raumladungszone. Die Dicke w dieser Verarmungszone ist

$$w = \sqrt{\frac{2\,\epsilon_0\,\epsilon_{Si}}{e\,N_{eff}}(U_{Bi} + U_{Diff})} \tag{2.1}$$

mit der Dielekrizitätskonstanten für Silizium $\epsilon_0\,\epsilon_{Si}$, der Elementarladung e, der Diffusionsspannung U_{Diff}, der äußeren Spannung U_{Bi} und der effektiven Raumladungskonzentration

$$N_{eff} = \mid N_D - N_A \mid . \tag{2.2}$$

Die Spannung, bei der der gesamte Kristall verarmt ist, wird Verarmungsspannung

U_{fdv} (full depletion voltage) genannt. Sie ist bei vernachlässigter Diffusionsspannung

$$U_{fdv} = N_{eff} \frac{e \cdot d^2}{2\,\epsilon_0 \epsilon_{Si}}. \tag{2.3}$$

Die Ränder der Verarmungszone entsprechen zwei leitenden parallelen Platten im Abstand w. Dieser Plattenkondensator der Kapazität C mit der aktiven Fläche A ist eine Funktion der angelegten Spannung U_{Bi} bis zum Erreichen der Verarmungsspannung:

$$C(U_{Bi}) = \epsilon_0 \epsilon_{Si} \frac{A}{w} = A\sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_{Si} e N_{eff}}{2U_{Bi}}} \qquad U_{Bi} \leq U_{fdv} \tag{2.4}$$

Über der Verarmungsspannung ist die Kapazität $C = \epsilon_0 \epsilon_{Si} A/d$ konstant.

2.1.2 Siliziumstreifendetektoren

Ein Halbleiterdetektor ist eine Festkörperionisationskammer [Kle92] und besteht aus in Sperrichtung betriebenen Dioden. Ein minimal ionisierendes Teilchen (MIP) erzeugt beim Durchqueren eines Siliziumkristalls durch Ionisation ungefähr $Q_{mip} = 24.000$ Elektronen-Loch-Paare pro $d = 300\,\mu m$ (Abb. 2.1). Bei angelegter Sperrspannung werden die Paare getrennt und entgegengesetzt innerhalb von bis zu $50\,ns$ zu den Elektroden bewegt. Die Löcher bewegen sich zu den p^+-Streifen, die Elektronen zur n^+-dotierten Rückseite. Die influenzierte Ladung ΔQ entspricht dem Anteil der Strecke $\Delta z/d$, den eine Ladung e im Zähler zurücklegt [Fre72]:

$$\Delta Q = e \frac{\Delta z}{d} \tag{2.5}$$

Eine Abschätzung der Impulsform als Funktion der Zeit findet man in Kap. 4.6.1. Durch kapazitive Ladungsteilung wird in den Auslesestreifen, die mit der Ausleseelektronik verbunden sind, ein Signal induziert. Das in der Ausleseelektronik verstärkte Signal gibt Auskunft über den Durchtrittsort des Teilchens in der Koordinate senkrecht zu den Streifen.

2.2 Der BMVD-Zähler

Der BMVD-Zähler ist ein einseitiger Streifenzähler aus hochohmigem n-Silizium ($\varrho > 3\,k\Omega cm \cong N_{eff} \leq 1 \cdot 10^{12}\,cm^{-3}$). Er ist quadratisch mit einer Kantenlänge von 64,24 mm und einer Dicke $d_m = 330\,\mu m$. Die aktive Region ist $d = 300\,\mu m$ dick mit einer anschließenden n^+-Rückseitendicke von $30\,\mu m$. Auf seiner Oberseite befinden sich 3084 Streifen im Abstand von $20\,\mu m$. Der Zähler wird bedeckt von einer Schicht SiO_2. In Abbildung 2.1 ist ein Ausschnitt des Querschnitts des BMVD Zählers zu sehen.

Über 512 Aluminiumstreifen mit einem Abstand von $120\,\mu m$, die kapazitiv über dünne Schichten Si_3N_4 und SiO_2 an die p^+-Streifen gekoppelt sind, wird der Detektor ausgelesen. Alle p^+-Streifen sind über Polysiliziumwiderstände an einen Massenring (Biasring) angeschlossen, der alle Streifen umgibt. Außerhalb des Biasrings befinden sich drei Schutzringe (Guardrings) und ein Substratring, über den die Rückseite kontaktiert wird.

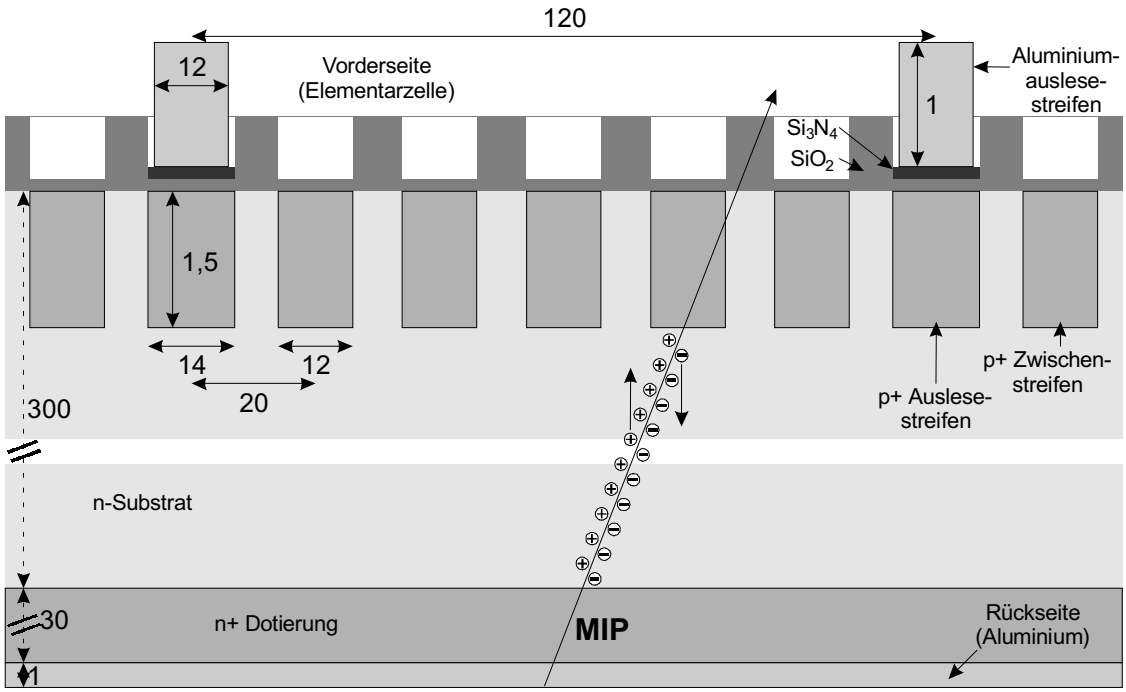

Abbildung 2.1: Ausschnitt des Querschnitts des BMVD-Zählers mit durchquerendem Teilchen. Alle Angaben in μm. Die Höhe ist 20-fach gestreckt. Volumen und Rückseitenimplantation sind nicht maßstabsgerecht.

In Abbildung 2.2 ist die Ecke eines Detektors zu sehen. Man erkennt 5 Auslesestreifen mit jeweils 5 Zwischenstreifen, die Polysiliziumwiderstände und die Masse- und Schutzringe sowie oben den Substratanschluß. In Tabelle 2.1 sind einige Spezifikationen angegeben, die durch Meßwerte verifiziert wurden.

2.3 Teststrukturen

Nicht alle Spezifikationen lassen sich direkt auf dem Zähler überprüfen. Deshalb wurden auf jedem Wafer zusätzlich mehrere Teststrukturen aufgebracht. Diese Teststrukturen ermöglichen auch das Bestimmen einiger Prozeßparameter und das Durchführen bzw. Wiederholen von Messungen nach dem Bau des MVD-Detektorsystems. Abb. 2.3 zeigt ein bearbeitetes Foto einer Teststruktur. Die folgenden Elemente befinden sich auf der Teststruktur:

- Polysiliziumwiderstände können auf der Teststruktur direkt kontaktiert und gemessen werden.
- Die Fingerstreifenstruktur besteht aus zwei ineinanderliegenden Streifensystemen mit jeweils 12 Fingern. Die Streifen ähneln in ihrem Aufbau den Auslesestreifen, d.h. es existiert sowohl die p^+-Implantierung als auch der Aluminiumstreifen und

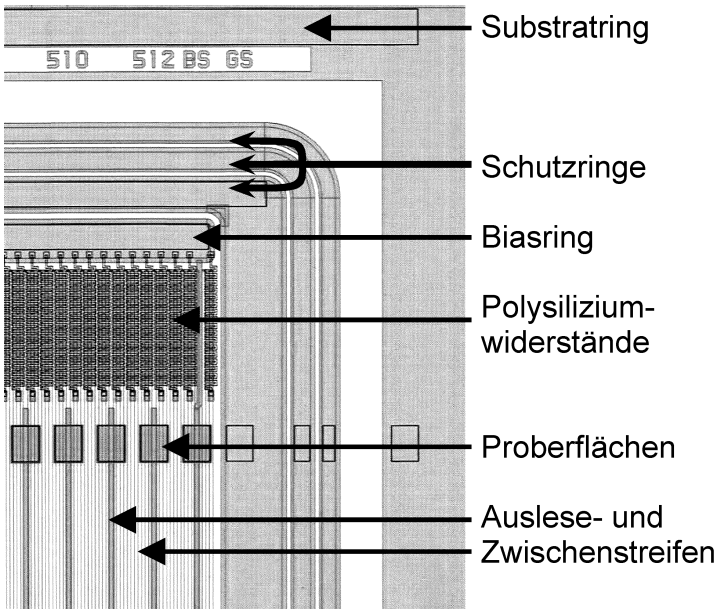

Abbildung 2.2: Ausschnitt des BMVD-Zählers

Spezifikation	**Symbol**	**Wert**	**Meßwert**
Dunkelstrom	I_{DC}	$< 2\,\mu A$	$20\,nA - 40\,\mu A$
Verarmungsspannung	U_{fdv}	$< 150\,V$	$40 - 96\,V$
Spez. Widerstand	ϱ	$3 - 6\,k\Omega cm$	$3{,}0 - 7{,}1\,k\Omega cm$
Dicke (aktives Gebiet)	h	$300 \pm 10\,\mu m$	$299{,}6 \pm 0{,}9\,\mu m$
Länge	l	$64240 \pm 20\,\mu m$	$64240 \pm 20\,\mu m$
Breite	b	$64240 \pm 20\,\mu m$	$64240 \pm 20\,\mu m$
Abweichung von der Ebene	Δh	$< 50\,\mu m$	$< 50\,\mu m$
Polysiliziumwiderstand	$R_{Poly-Si}$	$1{,}5 \pm 0{,}5\,M\Omega$	$1{,}3 - 2{,}5\,M\Omega$
Streifenwiderstand	$R_{p^{12}}$	$< 150\,k\Omega/cm$	$102\,k\Omega/cm$
Aluminiumwiderstand	R_{al}	$< 20\,\Omega/cm$	$20\,\Omega/cm$
Koppelkapazität	C_c	$> 20\,pF/cm$	$26\,pF/cm$
Max. Strom durch C_c	I_{cc} at $60\,V$	$< 100\,pA$	$< 20\,pA$
Streifenbreiten	$d_{al}/d_{p^{14}}/d_{p^{12}}$	$10/14/12\,\mu m$	$10/14/12\,\mu m$
Zwischenstreifenwid.	R_{pp}	–	$400\,M\Omega cm$
Zwischenstreifenkap.	$C_{pp^{12}}$	$\ll C_c$	$0{,}93\,pF/cm$
Rückseitenkap.	C_{bp}	$\ll C_{p^{12}p^{12}}$	$73\,fF/cm$

Tabelle 2.1: Spezifikationen und Messungen des BMVD-Zählers, gemessen bei $T = 20^oC$.

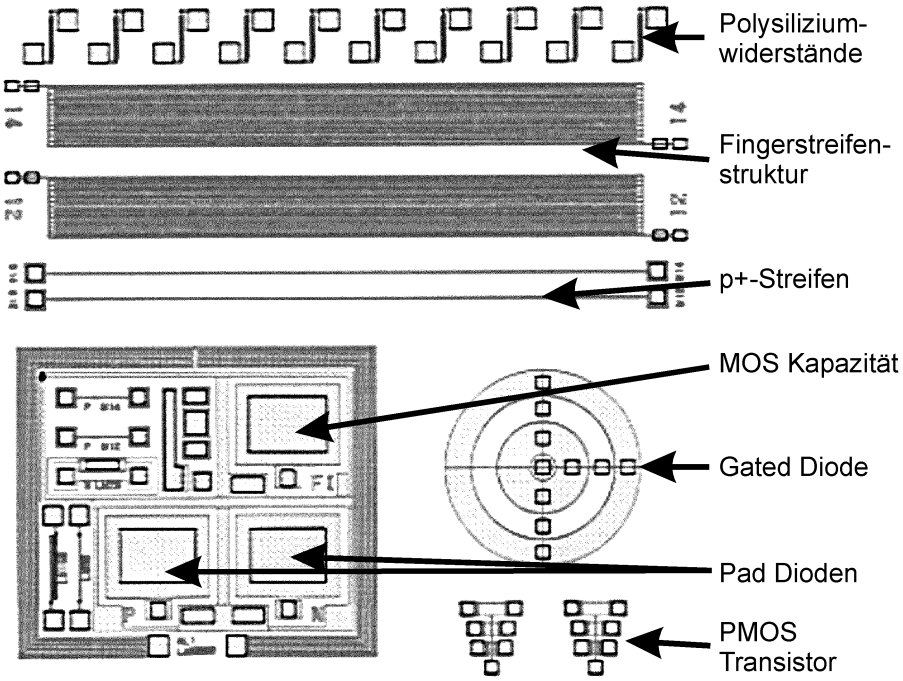

Abbildung 2.3: Teststruktur des BMVD Zählers

das dazwischen befindliche SiO_2 und Si_3N_4. Zwei verschiedene Geometrien sind auf der Teststruktur verwirklicht: Beide haben einen Streifenabstand von $20\,\mu m$, eine Aluminiumstreifenbreite von $8\,\mu m$ und eine Gesamtstreifenlänge von $5{,}35\,mm$. Variiert wird die p^+-Streifenbreite: $12\,\mu m$ und $14\,\mu m$. An dieser Struktur wird der Zwischenstreifenwiderstand R_{pp} und die Zwischenstreifenkapazität C_{pp} bestimmt. Die Messung der Zwischenstreifenkapazität wird näher in Kapitel 4.3 behandelt. C_{pp} ist ein wichtiger Parameter bei der Detektorsimulation.

- An den p^+-Streifen kann direkt der Streifenwiderstand $R_{p^{12}}$ und $R_{p^{14}}$ bestimmt werden.

- Die MOS Kapazität (**m**etal **o**xide **s**emiconductor) besteht aus einer über dem Silizium aufgebrachten Oxidschicht mit Aluminisierung. An dieser Struktur wird die Flachbandspannung vor und nach Bestrahlung und die Oxiddicke bestimmt [Dan99].

- Die Gated Diode ist eine Standardstruktur zur Bestimmung von Oberflächeneffekten am pn-Übergang. Sie wurde zur Messung des Oberflächen- und Volumengenerationsstromes vor und nach Bestrahlung benutzt [Gro67][Joh94][Dan99].

- Die Pad Diode ist eine kontaktierbare p^+-Fläche auf dem Silizium. An diesem pn-Übergang kann die Verarmungsspannung bestimmt werden. Dies wird gewöhnlich aber direkt am Detektor bestimmt. An dieser Diode können Messungen ohne Grenzflächeneffekte (also ohne Streifen) vorgenommen werden. Dies ist besonders nützlich für Vergleichsmessungen nach Bestrahlungen mit Oberflächenschädigungen.

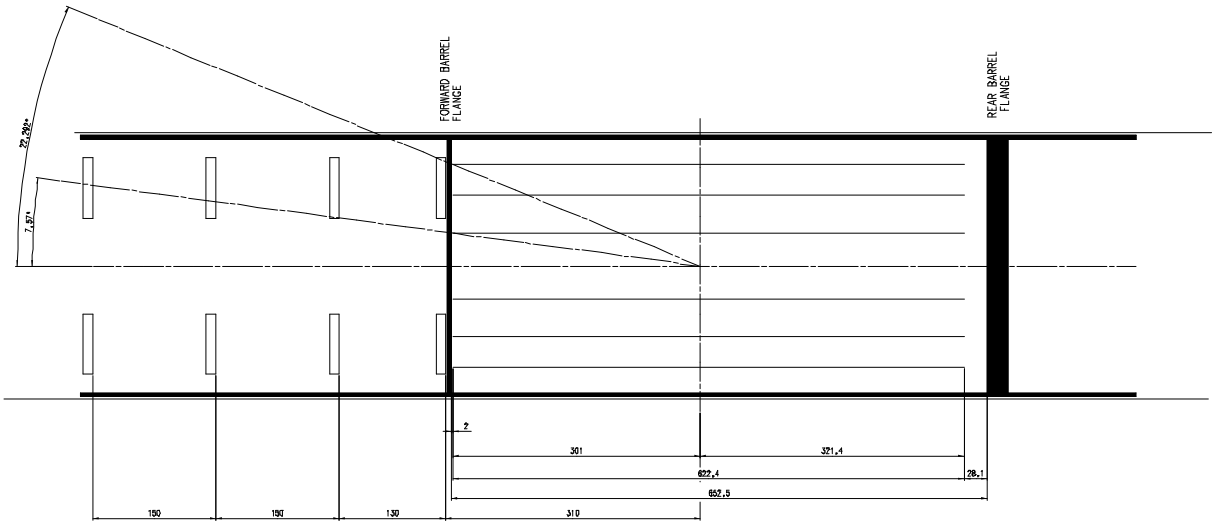

Abbildung 2.4: MVD Längsschnitt, alle Angaben in mm.

- Der PMOS Transistor ist ein Oberflächen-Feldeffekt-Transistor. Es wird die Schwellwertspannung (Thresholdvoltage) und die Ladungsträgerbeweglichkeit der Löcher unter der Oberfläche bestimmt [Gro67][Dan99].

2.4 Der MVD-Detektor

Während der Designphase des MVD Gesamtdetektors wurden folgende Spezifikationen festgelegt [Zeu97]:

- Messung von 3 Punkten pro Spur in einem Winkel von $10^o < \theta < 160^o$ um den Wechselwirkungspunkt.
- Intrinsische Auflösung von $20\,\mu m$.
- Separation zweier Spuren bei einem Abstand von $200\,\mu m$.
- Funktionstüchtig (Radiation hardness) bis zu einer Strahlendosis von $3\,kGy$ innerhalb der geplanten Lebensdauer von 5 Jahren.
- Die Maße werden außen durch das CTD (central tracking detector, Radius $162\,mm$) und innen durch das Strahlrohr begrenzt.

Aufgrund dieser Spezifikationen wurde der MVD aufgeteilt in einen zentralen Detektor (BMVD) und einen Vorwärtsdetektor (FMVD, Abb. 2.4).

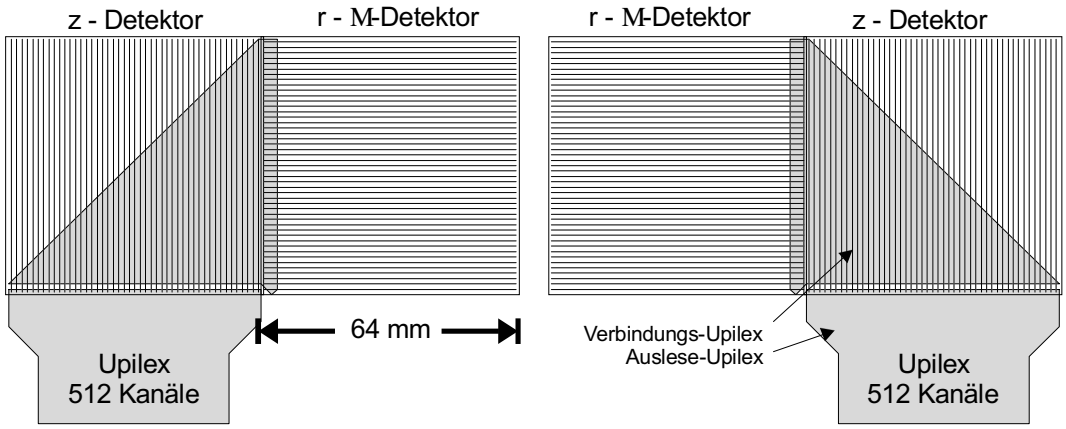

Abbildung 2.5: BMVD-Modul: Vier Zähler bilden zwei Halbmodule

2.4.1 Der BMVD-Detektor

Der BMVD-Detektor ist zylindrisch mit einer Gesamtlänge von 622 mm und einem Aussenradius von 160 mm. Drei zylindrische Ebenen umgeben das Strahlrohr in Abständen von $36 - 46\,mm$, 86 mm und 123 mm, wie zu sehen in Abb. 2.13 auf S. 17.

Aufgrund der Asymmetrie des Strahlrohres umgibt die innerste Ebene dieses nicht vollständig. Die Form des Strahlrohres und die Verschiebung des Wechselwirkungspunktes ist Folge eines Optimierungsprozesses zur Minimierung von Hintergrundereignissen in der Wechselwirkungsregion [Sch98].

Jeder Doppelbalken in Abb. 2.13 stellt eine sogenannte Leiter dar. Auf jeder Leiter (Abb. 2.8 und 2.9) befinden sich 20 BMVD-Zähler in fünf Modulen. Ein Modul besteht aus vier Zählern. Jeweils zwei Zähler werden mit senkrecht zueinanderstehenden Streifen aufeinander geklebt und bilden ein Halbmodul. Die aktiven Flächen der beiden Zähler überdecken sich um 1,26 mm. Die korrespondierenden Streifen der beiden Zähler in einem Halbmodul werden über ein Upilex-Kabel verbunden und zur Ausleseelekronik geführt (Abb. 2.5). Zwei spiegelsymmetrische Halbmodule werden übereinander gebracht und bilden ein Modul (Abb. 2.6 und 2.7). Fünf Module werden nebeneinander auf eine Leiter montiert, wobei die Ausleseelektronik über das flexible Upilexkabel auf der Rückseite der Leiter befestigt wird (Abb. 2.8 und 2.9). Somit besteht der BMVD-Detektor aus 30 Leitern in drei Ebenen mit insgesamt 600 BMVD-Zählern.

2.4.2 Der FMVD Detektor

Bestehend aus vier Reifen von FMVD-Zählern detektiert der FMVD-Detektor Teilchen, die in einem Winkelbereich zwischen $7{,}6^o < \theta < 22{,}3^o$ aus Richtung des Wechselwirkungspunkts kommen. Die Reifen befinden sich in Vorwärtsrichtung bei z = 32, 45, 60 und 75 cm vom WWP entfernt. Abb. 2.11 zeigt eine 3D-Ansicht des FMVD-Detektors.

Jeder Reifen besteht aus zwei Lagen von 14 konzentrisch angeordneten FMVD-Zählern (Abb. 2.12). Wegen der Asymmetrie des Strahlrohrs existieren zwei verschiedene Formen

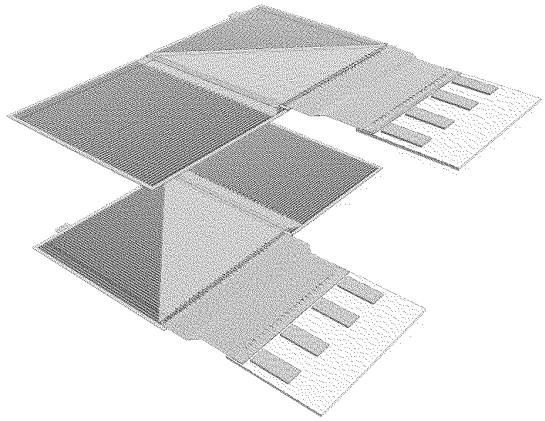

Abbildung 2.6: BMVD-Modul: Die Halbmodule werden übereinander gelegt

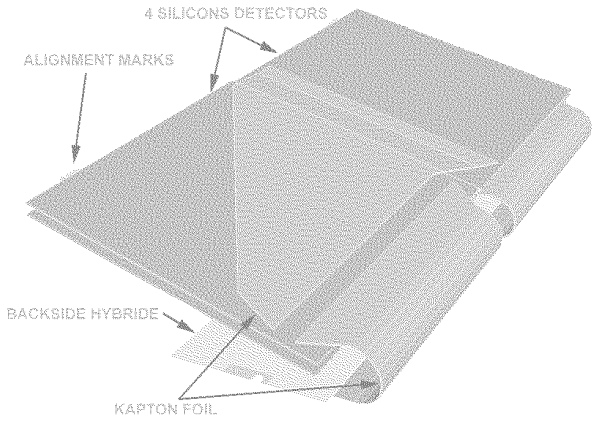

Abbildung 2.7: BMVD-Modul: Die Elektronik wird nach hinten gekippt.

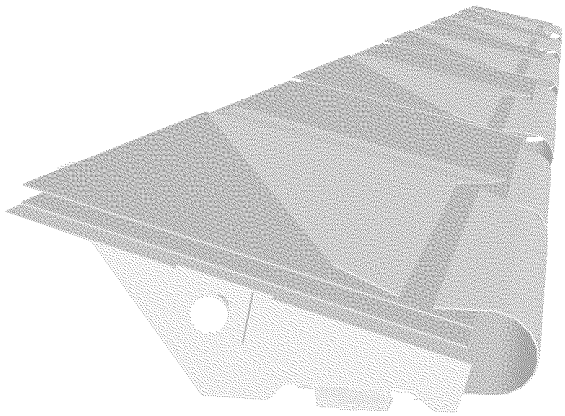

Abbildung 2.8: BMVD-Leiter aus 5 Modulen, Frontansicht

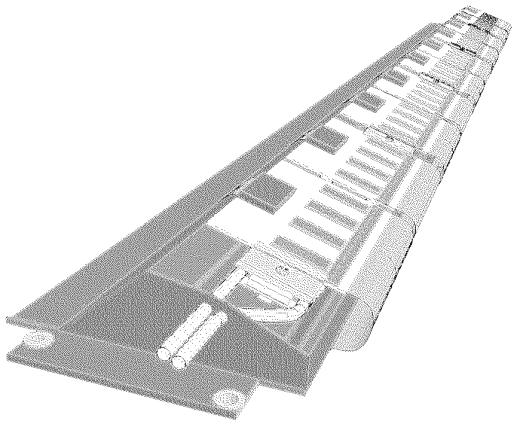

Abbildung 2.9: BMVD-Leiter aus 5 Modulen, Rückansicht

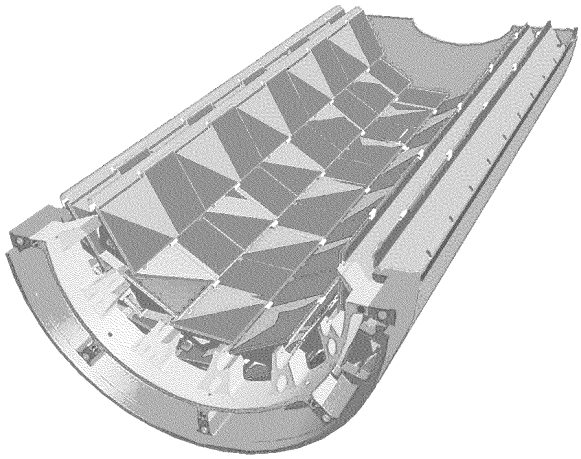

Abbildung 2.10: 3D-Ansicht des BMVD-Detektors, halb geschnitten

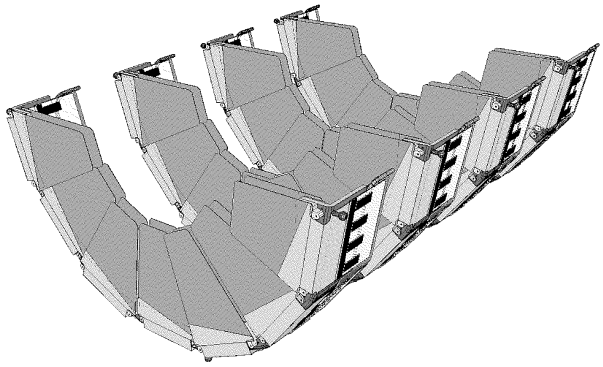

Abbildung 2.11: 3D-Ansicht des FMVD-Detektors, halb geschnitten

des FMVD-Zählers, um den Platz um das Rohr optimal zu nutzen. Die FMVD-Zähler sind im Gegensatz zu den BMVD-Zählern trapezoid und haben 480 Auslesestreifen, die direkt über ein Upilexkabel an die Ausleseelektronik angeschlossen sind.

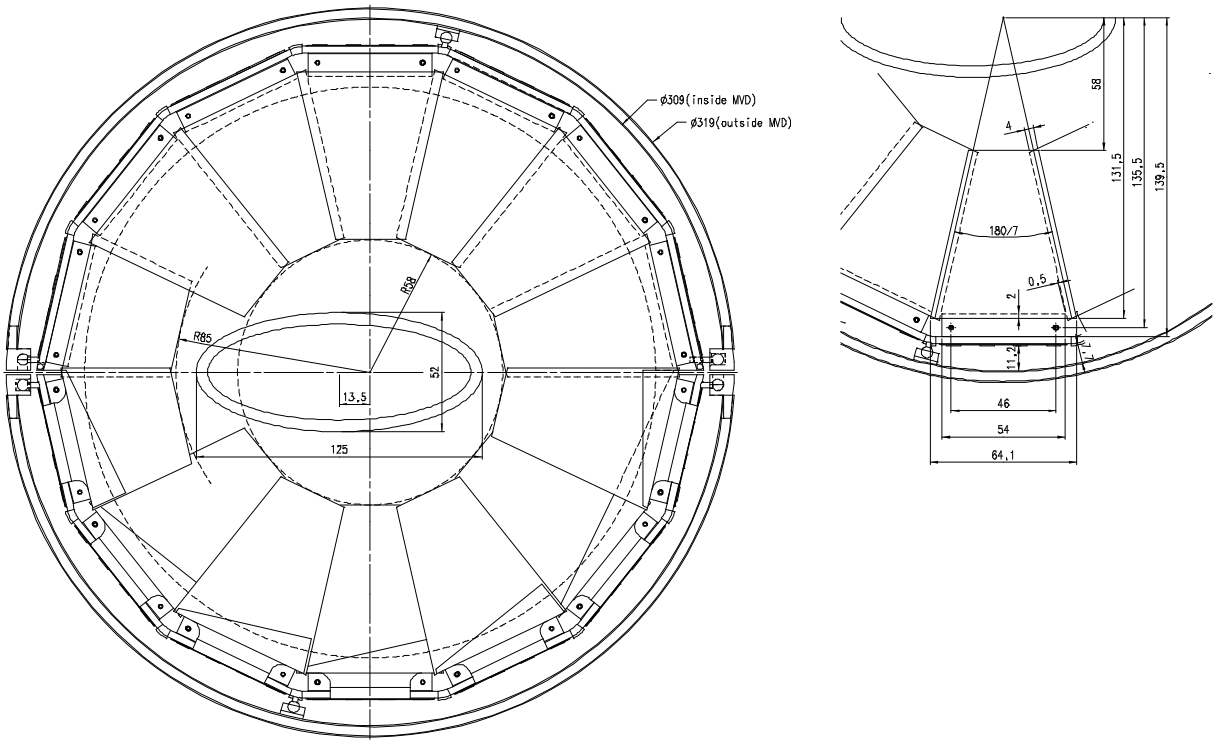

Abbildung 2.12: Querschnitt eines FMVD Reifens

2.4.3 Ausleseelektronik

BMVD-Halbmodule und FMVD-Zähler werden durch den HELIX-Chip ausgelesen [Fal98]. Dieser analoge Chip wurde ursprünglich im ASIC Labor der Universität Heidelberg entwickelt und von der Firma AMS hergestellt. Die Version Helix 2.2 wurde für das HERA-B Experiment entwickelt [Rie98b], welche auch für Prototypzwecke mit MVD Zählern verwendet wurde. In der Serienproduktion wird die Version Helix 3.0 verwendet, die speziell für das MVD-Projekt entwickelt wurde.

Helix integriert und differenziert parallel die Signale von 128 Kanälen durch ladungsempfindliche, rauscharme Vorverstärker und legt die Signale hintereinander auf einen Ausgabekanal (pipeline). Ein Simulationsmodell des Vorverstärkers und Signalformers findet sich in Kap. 4.6.2 auf S. 51f.

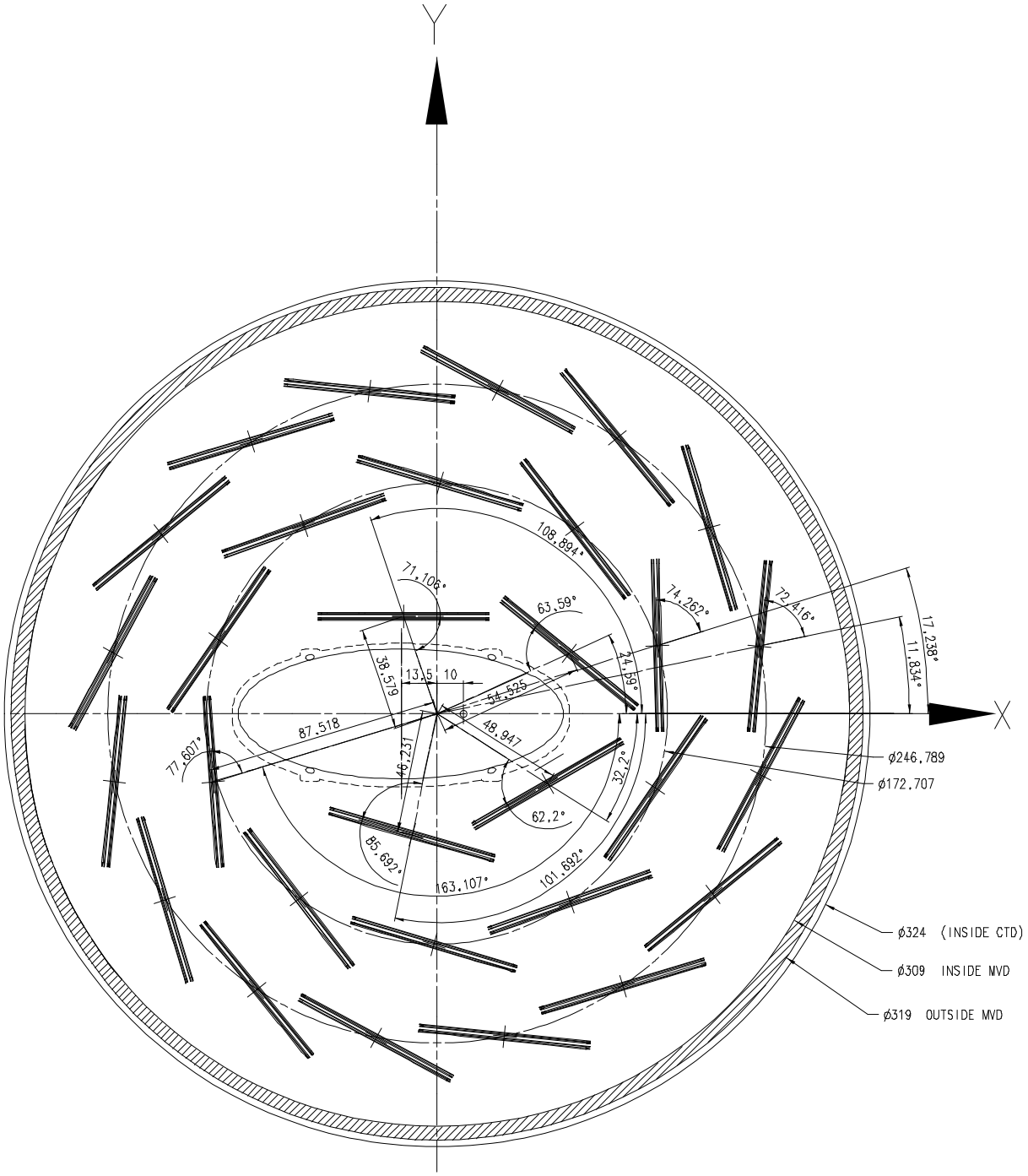

Abbildung 2.13: BMVD-Detektor Querschnitt, alle Angaben in *mm*.

Kapitel 3

Meßtechnik und Qualitätssicherung

3.1 Einleitung

Das Zusammenfügen tausender Einzelteile zu einem einzigen Gegenstand, dessen Funktionalität gewährleistet sein soll, muß in allen Ebenen vom Eingang des Einzelteils über seine Verarbeitung bis zur Weitergabe zum nächsten Produktionsschritt organisiert, kontrolliert und protokolliert werden. Es gibt grundlegende Ziele, alle anderen Arbeiten sollten diese Ziele fördern und unterstützen:

- Wahrung der elektrischen Eigenschaften des Zählers, speziell des Dunkelstroms.
- Wahrung der geplanten und erforderlichen Geometrie des Zählers und seiner Umgebung (Halbmodule und Spacer).
- Archivierung, Dokumentation und Analyse aller für den optimalen Betrieb erforderlichen Daten (elektrische Eigenschaften und Geometrie aller verwendeten Teile).

Das Kapitel ist gegliedert in zwei Teile: Erst werden verschiedene Typen der Meßtechnik und ihr sinnvoller Einsatz erläutert, danach folgt die Dokumentation der Daten der Eingangs- und Produktionskontrolle. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung.

3.2 Meßtechnik

3.2.1 Visuelle Inspektion

Das Betrachten der Zähler mit einem Mikroskop oder mit bloßem Auge kann Informationen über mechanische Schäden wie Kratzer, Staubteilchen und Herstellungsfehler, z.B. Kurzschlüsse zwischen Auslesestreifen und gebrochene Streifen liefern.

Dafür wird ein Mikroskop WILD M3 benutzt, das über 6-, 16- und 40-fache Vergrößerung verfügt. Das Auflösungsvermögen liegt bei geschätzten $10\,\mu m$. Bei Objekten, bei denen das Auflösungsvermögen nicht reicht, wechseln wir auf ein Axiotech^{vario} 25H der Firma ZEISS mit bis zu 200-facher Vergrößerung und einem Auflösungsvermögen von geschätzten $1\,\mu m$.

Optisch gemustert wurden knapp über 100 Zähler, davon 20 BMVD- und 12 FMVD-Prototypen sowie die erste Serienlieferung von 70 BMVD-Zählern.

Die meisten Unregelmäßigkeiten ($> 98\%$) entstehen durch elektrostatisch aufgefangene Teilchen (Durchmesser $5 - 100\,\mu m$): Staub, Hautpartikel und Textilfasern. Wenn diese Teilchen nicht auf Bondflächen liegen, stellen sie keine Beeinträchtigung dar. An kritischen Stellen kann versucht werden, das Teilchen durch Stickstoff abzublasen oder, wenn dies keinen Erfolg hat, mit einem Zahnstocher zu bewegen. Einige Staubteilchen werden durch das Reiben der Schutzhüllen am Zähler zerkleinert und bilden eine Staubspur auf dem Zähler.

Kratzer auf der Detektoroberfläche entstehen durch unsachgemäßen Gebrauch von spitzen Gegenständen. Bis auf Einzelfälle wurden keine vom Hersteller verursachten Kratzer, die die Funktion beeinträchtigen, gefunden. Zur näheren Erläuterung mechanischer Schäden siehe Kap. 3.2.3.

Selten fanden wir (nur bei FMVD-Prototypen) Fehler im Streifenmuster, die bei höheren Vergrößerungen sich als kleine Störungen im Herstellungsprozeß der Aluminisierung oder des Ätzens herausstellten. Die erste BMVD-Serie enthielt keine solchen Fehler.

Die von Hamamatsu-Photonics gesandten Daten wiesen in dieser ersten Serie von 70 Zählern 41 C_c-Kurzschlüsse, 2 Alukurzschlüsse und 2 Alubrüche auf (Kap. 3.3.1.3). Die zwei Alukurzschlüsse wurden eindeutig ohne vorherige Kenntnis der Orte identifiziert, weitere Alukurzschlüsse wurden nicht gefunden. Alubrüche und C_c-Kurzschlüsse konnten visuell trotz Kenntnis der betroffenen Streifen nicht erkannt werden.

Die Erkenntnisse aus diesen Scans veranlaßten uns, die visuelle Inspektion als Eingangskontrollschritt aufzugeben. Der zeitaufwendige Scan brächte keine zusätzlich verwertbaren Informationen, die Hamamatsu-Daten der einzelnen Streifen sind entweder eindeutig (Alukurzschluß) oder gar nicht (C_c-Kurzschluß und Alubruch) zu sehen.

3.2.2 Elektrischer Meßaufbau

Für den elektrischen Kontakt zu Zählern und Teststrukturen verwenden wir eine Proberstation Süß PM5 [Suss]. Sie ist aufgebaut in einer schwarzen Aluminiumbox, welche vor Licht und elektrischen Einflüssen von außen schützt. Die Proberstation besteht aus einer Stahlunterlage (Chuck), auf die das zu testende Bauteil (DUT) gelegt wird, und bis zu 10 Proberköpfen mit Wolframkarbid-Nadeln (siehe Kap. 3.2.3.1), die auf zwei Plattformen neben dem Chuck montiert sind. Ein Stereomikroskop Olympus SZ40 ermöglicht das Positionieren der Nadeln.

Abb. 3.1 zeigt den Standardversuchsaufbau für Strom-Spannungsmessungen (IV) und Kapazitäts-Spannungsmessungen (CV). Ein Kombigerät Keithley 487 dient als Spannungsversorgung des DUT für IV- und CV-Messungen. Bei IV-Messungen mißt das Gerät den Strom. Es liefert eine Maximalspannung von $500\,V$ und einen Maximalstrom von $2\,mA$ bei einer Auslesegenauigkeit von $10\,fA$ im Bereich bis $2\,nA$ und von $1\,nA$ im Bereich bis $2\,mA$. Für Standard-CV-Messungen wird eine Kapazitätsmeßbrücke Hewlett Packard 4263A benutzt, die mit vier verschiedenen Frequenzmodi ausgestattet ist ($120\,Hz$, $1\,kHz$, $10\,kHz$, $100\,kHz$). Die Auslesegenauigkeit beträgt $1\,fF$ bei $10\,kHz$. Für CV-Messungen mit einem größeren Frequenzumfang verwenden wir ein HP 4192A. Es erzeugt frei wählbare

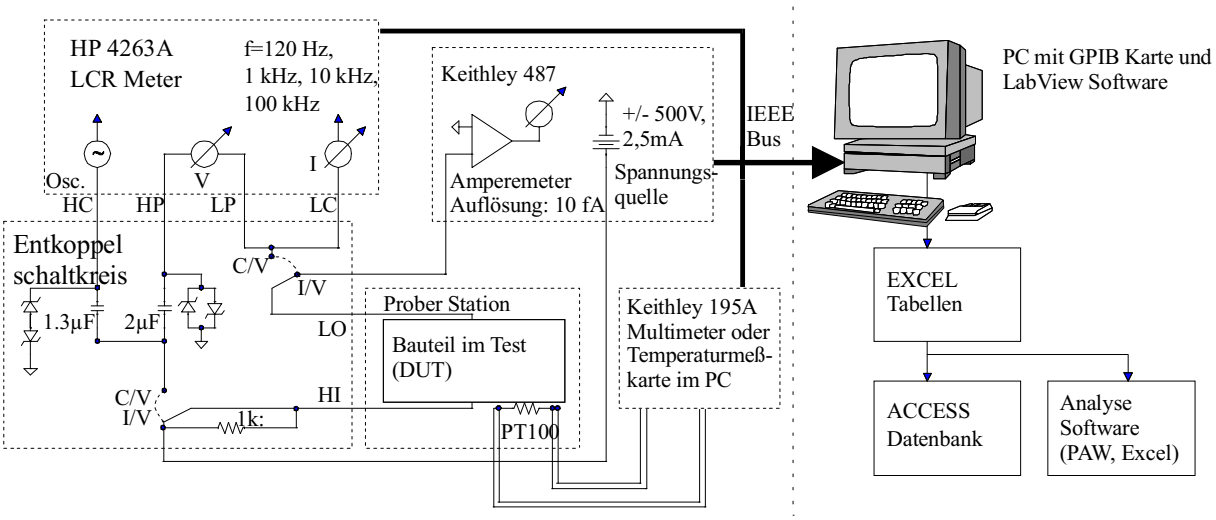

Abbildung 3.1: Elektrischer Standardaufbau für I/V und C/V Messungen

Frequenzen zwischen 5 *Hz* und 13 *MHz* bei einer maximalen Auslesegenauigkeit von 0,1 *fF* bei 700 *kHz*. Für CV-Messungen mit externer DC-Spannungsversorgung wird zum Schutz der Kapazitätsmeßbrücke ein Entkoppelschaltkreis zwischengeschlossen.

Das Meßprinzip einer Kapazitätsmeßbrücke wird in Kap. 4.1 genauer erläutert.

Die Spannungsquelle und Meßgeräte sind über einen IEEE-Bus an eine GPIB-Karte eines PCs angeschlossen. Eine kalibrierte Temperaturmeßkarte ist mit dem ISA-Bus des PCs verbunden. LabView steuert die Geräte und liest sie aus. Die Konfigurations- und Meßdaten werden in einer EXCEL-Tabelle gespeichert. Die EXCEL-Dateien werden durch ein Visual-Basic-Makro automatisch in einer ACCESS-Datenbank angelegt.

3.2.3 Mechanische Tests am BMVD

Die Beobachtung von erhöhten Dunkelströmen einiger Zähler führte zu dem Verdacht, daß mechanische Verletzungen der Oberfläche lokale Schäden an der Diode herbeiführen. Der pn-Übergang der Diode ist abrupt und die Implantationstiefe der p^+-dotierten Schicht ist $h_{p^+} \approx 1{,}5\,\mu m$ [Col99]. Deshalb wurde ein Test erdacht, dessen Ziel eine Arbeitsanweisung ist, die den mechanischen Umgang mit dem Zähler im Prober definiert.

3.2.3.1 Der Proberkopf

Ein Proberkopf ist die mechanische Verbindung zwischen der Probernadel und der Proberstation bzw. den Meßgeräten. Für das Kontaktieren werden Proberköpfe PH100 der Firma Karl Süß verwendet [Suss]. Diese Proberköpfe ermöglichen das Bewegen einer Probernadel in drei Dimensionen durch drei Schrauben. Die spezifizierte Bewegungsauflösung ist 5 μm,

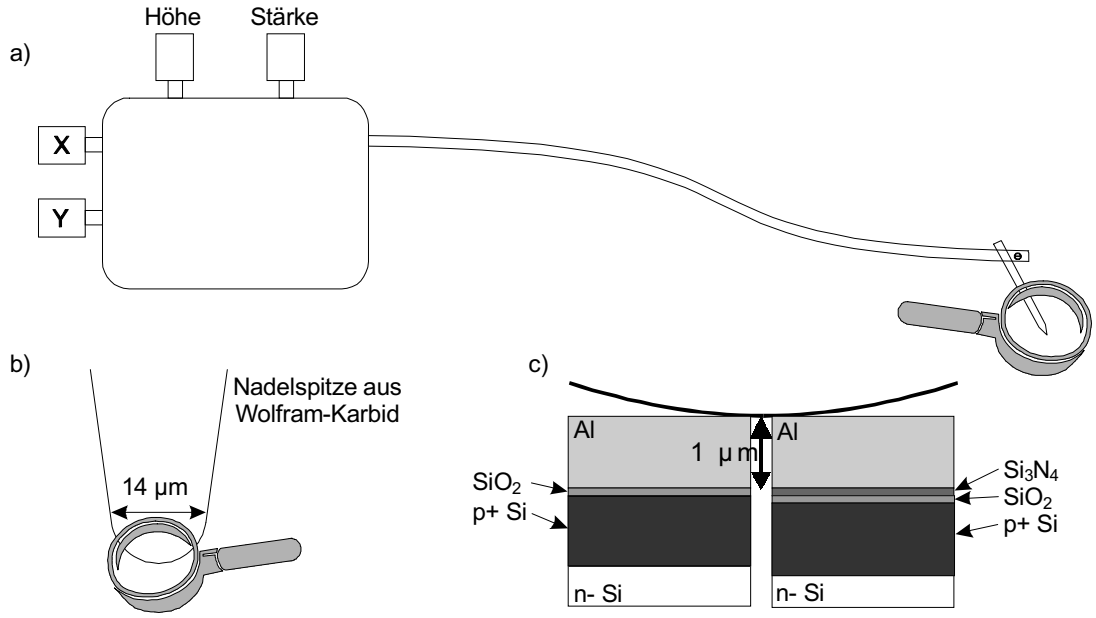

Abbildung 3.2: **Geometrie der Probernadel: a)** Proberkopf mit Nadelhalter und Nadel. 3 Schrauben bewegen die Nadel, die 4. Schraube bestimmt die Andruckkraft. **b)** Vergrößerung des Nadelkopfes mit einem Kopfradius von 7 μm. **c)** Ausschnitt des Nadelkopfes mit Querschnitten der Zähleroberflächen am Biasring und am Proberpad.

die maximale Höhenamplitude $25\,mm$. Eine vierte Schraube erlaubt eine Veränderung der Andruckkraft zwischen $5 - 20\,g$. Die Nadel kann in verschiedenen Winkeln befestigt werden. Eine Zeichnung eines Proberkopfes findet man in Abb. 3.2a. Die Probernadeln stammen ebenfalls von Süß. Sie bestehen aus einer Wolfram-Karbidlegierung, der Nadelkopfradius beträgt $r = 7\,\mu m$ (Abb. 3.2b). Da auf den Proberköpfen keine erkennbare Skalierung der verwendeten Kraft vorhanden war, mußte diese erst ermittelt werden. Wegen der besseren Verständlichkeit werden auch alle weiteren Kraftangaben in der Masseeinheit Gramm vorgenommen.

3.2.3.2 Proberkopfkalibrierung

Ein Proberkopf wurde auf einem Tisch montiert und daneben eine Waage gestellt (KERN 444-33, Ablesegenauigkeit $0,01\,g$). Die Kraft auf die Waage wurde als Funktion der Umdrehungen der Schrauben für Höhe und Andruckkraft ermittelt. Dies wurde für drei verschiedene Arbeitshöhen der Nadel bzw. Waage gemessen.

Das Aufsetzen der Nadel mit der Höhenschraube auf das Meßobjekt vergrößert die Andruckkraft innerhalb von zwei Umdrehungen auf ein konstantes Niveau. Weiteres Drehen an der Höhenschraube hat keine signifikante Wirkung auf die Kraft. Abb. 3.3a zeigt für 3 verschiedene Arbeitshöhen ($12\,mm$, $21\,mm$, $30\,mm$) bei maximaler Einstellung der Krafteinstellschraube, daß es möglich ist, mit dem Absetzen der Nadel eine konstante Andruckkraft zu erreichen. „0 Umdrehungen“ ist definiert als der Startpunkt des Zählens

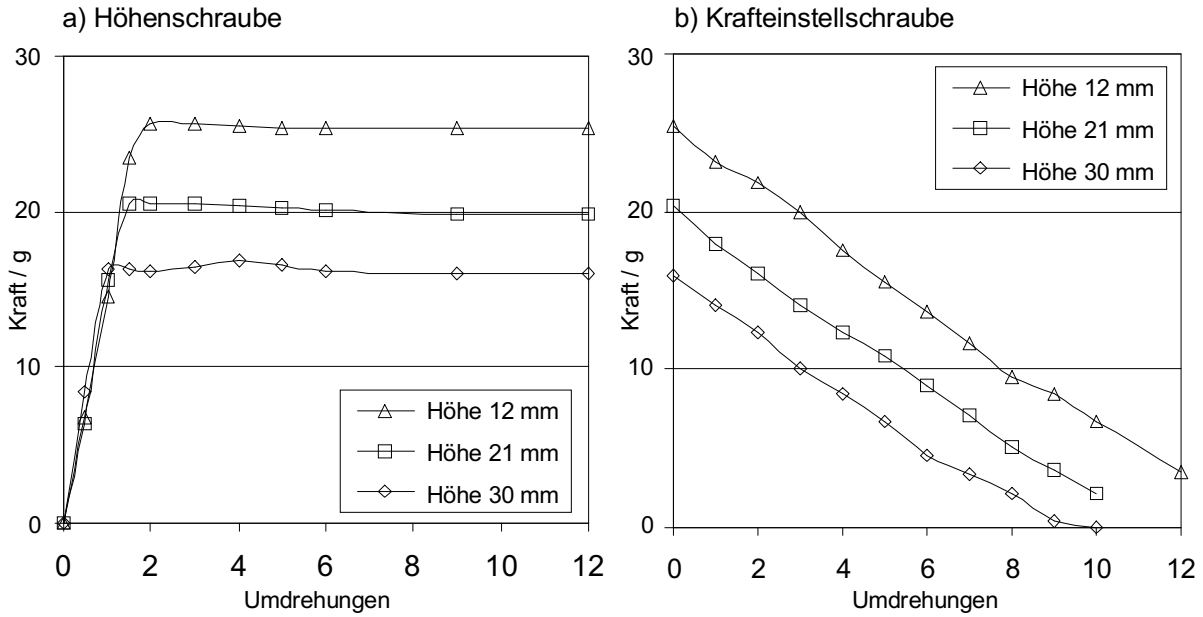

Abbildung 3.3: **Kraftdiagramme zur Kalibrierung der Proberköpfe. a)** Kraft als Funktion der Höhenschraube. **b)** Kraft als Funktion der Krafteinstellschraube. Beide Diagramme zeigen Kräfte für drei verschiedene Arbeitshöhen

im Moment des Aufsetzens der Nadel.

Aufgrund dieses Ergebnisses wurde für weitere Untersuchungen die Höhenschraube nach Aufsetzen der Nadel noch 3−6 Umdrehungen weiter gedreht. Als zweiter Schritt wurde die Abhängigkeit der Andruckkraft von der Krafteinstellschraube untersucht. Abb. 3.3b zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen Umdrehungszahl der Krafteinstellschraube und der Andruckkraft für die gleichen drei Arbeitshöhen. „0 Umdrehungen“ ist definiert als maximale Kraft, weitere Umdrehungen reduzieren die Kraft.

Als Ergebnis bleibt, daß die Andruckkraft der Nadel reproduzierbar ist und frei gewählt werden kann zwischen $0 - 25\,g$ mit einer geschätzten Genauigkeit von $0,5\,g$. Die Arbeitshöhe beeinflusst die Andruckkraft.

3.2.3.3 Messungen

Auf dem MVD-Zähler sind verschiedene Kontaktflächen (Pads) vorhanden, auf denen geprobt wird. Die Aluminiumbeschichtungen dieser Flächen haben eine Dicke

$$h = \frac{\rho_{Al} \cdot l}{R \cdot b} = 1,3 \pm 0,2\,\mu m, \tag{3.1}$$

ermittelt durch den Aluminiumstreifenwiderstand R eines Auslesestreifens der Länge l und der Breite b sowie den spezifischen Widerstand ρ_{Al} [Wea65].

Querschnitte der Oberfläche sind abgebildet in Abb. 3.2c. An diesen Stellen ist die Schutzpassivierung durch Ätzen entfernt worden. Diese Flächen, Schutzpassivierung und Aluminiumflächen, wurden mit der kalibrierten Nadel getestet:

- Schutzpassivierung

  Die Verletzung der Schutzpassivierung ist nur ein lokaler Schaden und beeinträchtigt nicht die Funktion des Detektors. Aus diesem Grunde zuerst ausgeführt, konnte festgestellt werden, daß die Schutzpassivierung durch Proben verletzt werden kann. Abb. 3.4 zeigt die Durchbruchspannung als Funktion der Andruckkraft. Die Durchbruchspannung ist definiert als Spannungswert, bei der der Strom auf Werte $I > 1\,\mu A$ ansteigt. Gemessen wurde der Dunkelstrom eines Detektors, der bei $U = 200\,V$ einen Dunkelstrom von $I_{DC} = 5\,\mu A$ hatte, in Serie mit der Schutzpassivierung.

  Mit steigender Andruckkraft fällt die Durchbruchspannung, weil mit höherer Kraft die unter der Nadel verbleibende Isolationsschicht dünner wird, sodaß bei $10\,g$ Andruckkraft es sofort zum Durchbruch kommt.

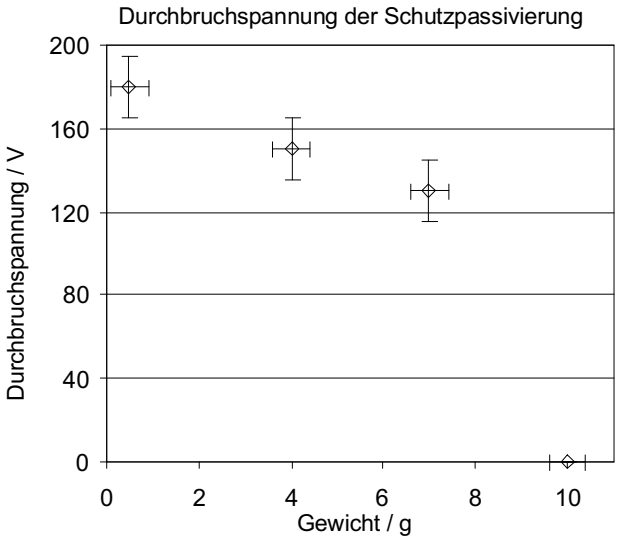

Abbildung 3.4: Durchbruchspannung der Schutzpassivierung als Funktion des Nadelgewichts

- Biasring

  Getestet wurde, bei welcher Andruckkraft eine Veränderung des Dunkelstromes bemerkt wird und damit eine Verletzung der Diode beobachtet werden kann. Da aus Kostengründen nur ein Zähler für diese Zwecke zur Verfügung stand, wurde die Andruckkraft in $5\,g$-Schritten so lange erhöht, bis Veränderungen des Stromes auftraten. Bei jeder Gewichtsstufe wurde die Nadel je 5 mal in der Mitte und am Rand des Biasrings abgesetzt. Fotos dieser Spuren sind in Abb. 3.5 zu sehen.

  Eine Andruckkraft von $5\,g$(Mitte und Rand), $10\,g$(Mitte und Rand) und $15\,g$(Mitte) ließ den Strom unverändert bei $I_{DC} = 25\,nA$, das erste Proben mit $15\,g$ am Rand verursachte einen Strom $I_{DC} = 2\,\mu A$, der nach 10 Minuten auf $I_{DC} = 28\,nA$ gefallen war. Die temporäre Schädigung erlaubte die Fortsetzung der Reihe. Es folgten sechs weitere Versuche mit $15\,g$ am Rand und Versuche mit $20\,g$ (5x Mitte, 2x Rand).

Sie ergaben keine weitere Veränderung ($I_{DC} = 26\,nA$). Das dritte Proben mit $20\,g$ am Rand schädigte den Zähler permanent ($I_{DC} = 6\,\mu A$). Der Wert sank durch Ausheilung (3 Tage bei 20^oC) auf $I_{DC} = 3,5\,\mu A$ und durch Heizen (18 Stunden bei 250^oC) auf $I_{DC} = 1,8\,\mu A$.

- Proberpad

  Flächen mit dieser Querschnittsstruktur (Abb. 3.2c rechts) haben eine weitere $100-150\,nm$ dicke Schicht Si_3N_4 zwischen Aluminium und SiO_2. Diese Flächen werden zum Proben und Bonden genutzt, das Si_3N_4 schützt die Diode und vergrößert die Koppelkapazität C_c. Proben könnte sowohl die Koppelkapazität als auch die Diode darunter schädigen.

  Tests auf den Proberpads und an der Fingerstreifenstruktur (Kap. 2.3) zeigten, daß der Isolator beim Proben bis $20\,g$ intakt bleibt, bei $25\,g$ aber zerstört werden kann. Es kam in 23% der Versuche zu Durchbrüchen über $100\,\mu A$.

3.2.3.4 Ergebnisse

Die Zähler können durch Proben beschädigt werden. Ab einer Andruckkraft von $15\,g$ auf Randflächen und $25\,g$ auf Proberflächen stellten wir erhöhte Ströme fest. Die empfohlene Andruckkraft wurde daraufhin auf $5\,g$ festgelegt.

Dieses Ergebnis wird gestützt durch die Hertzschen Formeln der Elastizitätstheorie [Her95][Bei97]. Die Eindringtiefe d_e einer Nadel mit Kugelkopf in ebenes Aluminium ist

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{1,86 \cdot F_{Druck}^2}{r \cdot \frac{2 \cdot E_W E_{Al}}{E_W + E_{Al}}^2}} \tag{3.2}$$

mit der Andruckkraft F_{Druck}, dem Kugelkopfradius r und den Elastizitätsmodulen für Wolframkarbid E_W und Aluminium E_{Al}. Abb. 3.6 zeigt die Eindringtiefe als Funktion der Andruckkraft. Ab $20 - 25\,g$ sticht die Nadel mindestens $1\,\mu m$ in das Aluminium.

Dieses Modell ist partiell unrealistisch. Erstens fordert es vollständig elastische Körper, daher dürfte man keine Proberspuren sehen. Zweitens muß die Eindringtiefe klein gegen die Gesamtdicke des Materials sein. Diese beiden Bedingungen erfüllt die Aluminiumbeschichtung nicht. Dennoch gibt das Modell die richtige Größenordnung wieder und bestätigt die Vermutung möglicher Schäden durch Proben.

Es wurde eine Miniwaage KERN 462-41 gekauft, welche in der Proberstation direkt unter die Nadeln gelegt werden kann und einfaches Kalibrieren ermöglicht. Aufgrund der Meßergebnisse wurde eine Arbeitsanweisung erstellt, die die Arbeit mit Proberköpfen und Nadeln vereinheitlicht und das Risiko von Schäden minimiert (Anhang A).

3.2.4 Langzeittest

Erfahrungen mit Siliziumdetektoren in der Vergangenheit haben gezeigt, daß ein kleiner Teil der Zähler bei dauerhaft angelegter Biasspannung innerhalb der ersten 24 Stunden einen sehr starken Anstieg des Dunkelstromes zeigen [Bar98]. Dieser Anstieg kann viele

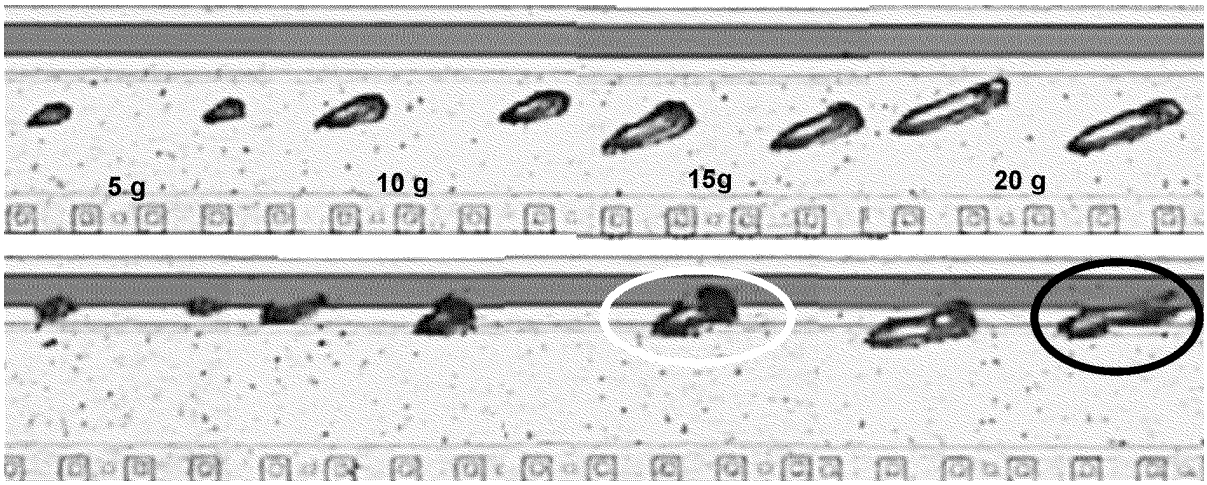

Abbildung 3.5: Probernadelspuren verschiedenen Gewichts, von links nach rechts ansteigend von 5 g bis 20 g. Obere Reihe mittig geprobt, untere Reihe am Rand geprobt. Die weiße Ellipse umrandet die Spur, welche einen temporären Schaden verursachte, die schwarze Ellipse zeigt die Spur, welche den Zähler permanent schädigte.

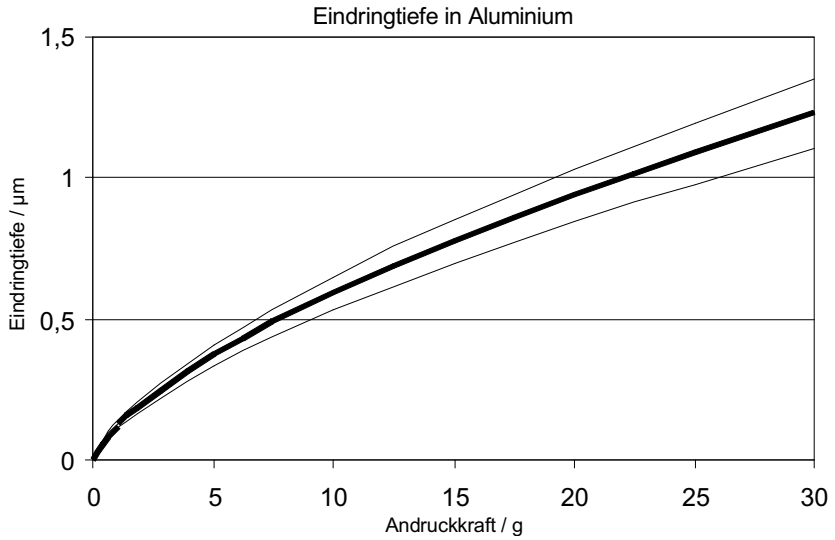

Abbildung 3.6: Theoretische Eindringtiefe einer harten Kugel (Radius $r = 7\,\mu m$) in Aluminium mit Fehlergrenzen.

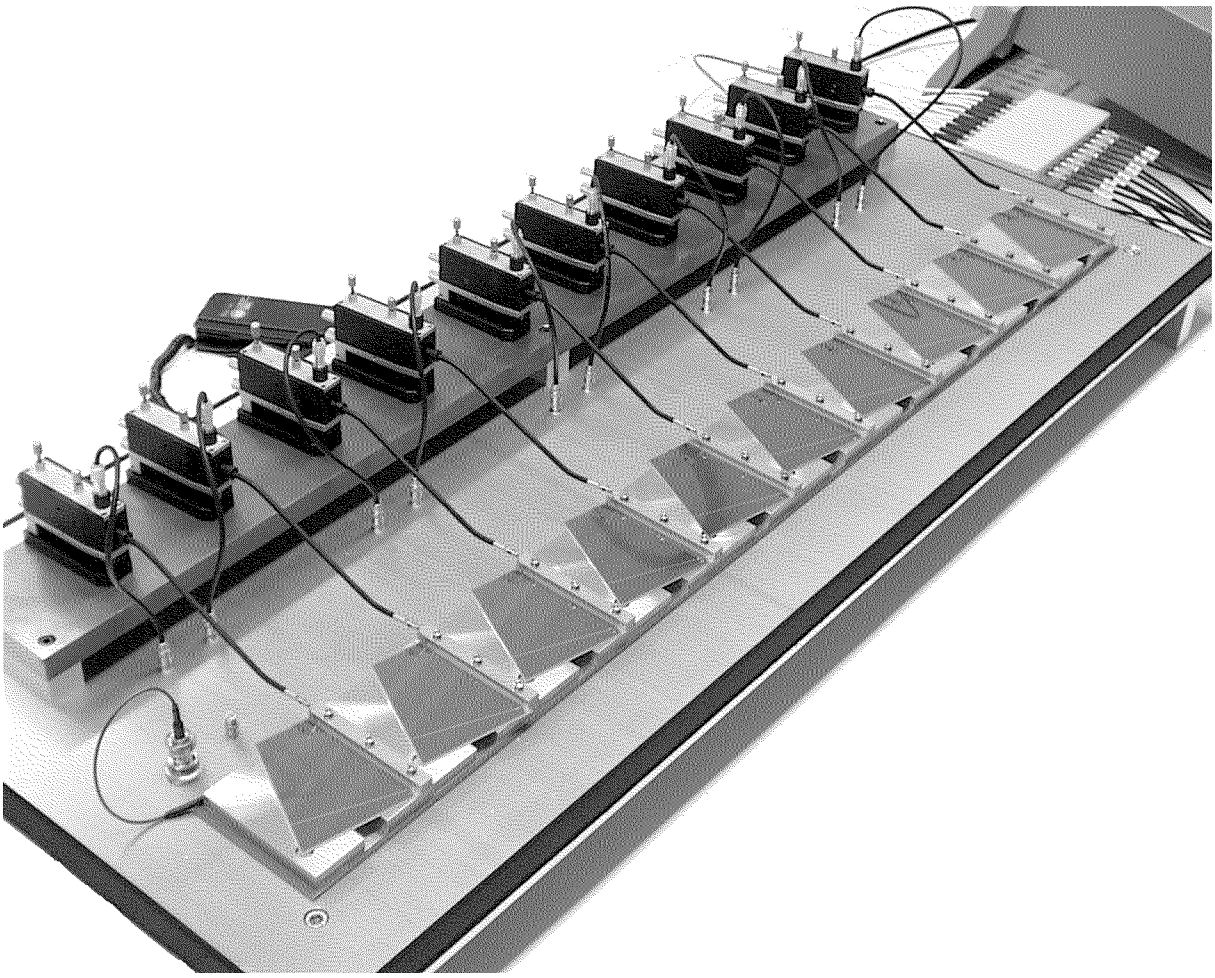

Abbildung 3.7: Aufbau des Langzeittests.

Größenordnungen betragen und beeinträchtigt die Funktion. Da die Zähler nach Montage und Einbau nicht ersetzt werden können, müssen diese vorher aussortiert werden. Zu diesem Zweck wurde ein Langzeittest geplant und montiert, der gleichzeitig die Ströme von 10 Zählern messen kann.

Abb. 3.7 zeigt ein Foto des verwendeten Aufbaus mit FMVD1-Zählern. 10 Proberköpfe sind mit Magnetfüßen auf eine Stahlschiene montiert. Im Abstand von 10 *cm* verläuft parallel eine PVC-Schiene, auf der 10 polierte Aluminiumplatten mit PVC-Schrauben verschraubt sind. Jede Platte besitzt eine Anlegeleiste für den Zähler. Der Zähler wird auf der Platte an die Anlegeleiste geschoben, sodaß der Biasring parallel zur Anlegeleiste verläuft und der Abstand zwischen Leiste und Biasring konstant ist. Die einmal mit dem Mikroskop justierten Nadeln müssen nur vertikal bewegt werden. Dadurch erübrigt sich der weitere Einsatz eines Mikroskops.

Die elektrischen Anschlüsse für die 10 Proberköpfe, die Hochspannung und die Erdung sind durch die Bodenplatte geführt. Dies ermöglicht einen wandfreien Aufbau und freien

Zugang zu Proberköpfen und Detektoren. Ein Aluminiumdeckel verschließt den Aufbau lichtdicht.

Alle Zähler sind über die Aluminiumplatten zum Substrat an die gleiche Spannungsquelle (Heinzinger HN 1200) angeschlossen. Der Strom jedes Zählers fließt über je einen in Serie geschalteten Widerstand $R = 1\,M\Omega$ zur Masse. Ein Multimeter Keithley 2001 mit eingebauter Scannerkarte für 10 Kanäle mißt den Spannungsabfall über den Serienwiderständen, welcher ein Maß für den Strom I_{DC} ist:

$$I_{DC} = \frac{U_R}{R} \qquad \text{mit} \quad U_R \ll U \tag{3.3}$$

Der Widerstand R darf nicht zu klein sein, damit der Spannungsabfall U_R meßbar bleibt, und darf nicht zu groß sein, damit die Näherung keine großen Fehler erzeugt. Die Näherung hat bei $R = 1\,M\Omega$ und $I_{DC} = 2\,\mu A$ einen Fehler von 1 %.

Der Scanner wird programmiert, in konstanten Zeitintervallen die Spannungsabfälle jedes Kanals zu messen und zu speichern. Am Ende des Tests werden Anfangs- und Endwerte notiert, falls ungewöhnliche Ereignisse auftreten auch die Werte dazwischen. Die Daten werden in einer EXCEL-Tabelle abgelegt.

3.2.5 Teststrahl

Um die Funktion und Qualität der Zähler direkt zu verifizieren und Informationen über die kapazitive Ladungsteilung und die Ortsauflösung zu erhalten, wurde ein Teststrahlaufbau genutzt. Abb. 3.8 zeigt in der z-Achse den Verlauf eines Elektronenstrahls ($2 - 6\ GeV$) durch drei Paare Referenzdetektoren und das Testobjekt. Die Referenzdetektoren haben einen Auslesestreifenabstand von $50\,\mu m$ mit einem Zwischenstreifen und ermitteln die Spur der Elektronen in x- und y-Richtung. Das Testobjekt kann gedreht werden, um verschiedene Einfallswinkel zu erfassen, und senkrecht zum Strahl bewegt werden, um alle Orte des Zählers zu erfassen.

Die Auslesegenauigkeit der Referenzdetektoren und Mehrfachstreuung begrenzen die Genauigkeit der vorhergesagten Spurkoordinaten auf $\sigma_t = 5,4\,\mu m$ für 6 GeV Elektronen.

Der Teststrahlaufbau arbeitete erfolgreich und lieferte Ergebnisse für die Beschreibung der MVD-Zähler. Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Das Signal-Rausch-Verhältnis wurde bestimmt auf $S/N \approx 22$ für einen einzelnen BMVD Prototypen, der an HELIX 2.2 angeschlossen war.
- Die Nachweiswahrscheinlichkeit war $> 99,8\%$
- Die intrinsische Ortsauflösung des Zählers wurde bestimmt auf $\sigma_i \approx 7,1\,\mu m$
- Bei einem mit $2,8$ kGy unter 100 V Bias γ-bestrahlten Zähler konnte keine Verschlechterung der Ortsauflösung festgestellt werden.
- Die Auflösung als Funktion des Einfallswinkels stimmt mit ersten Detektorsimulationen überein.

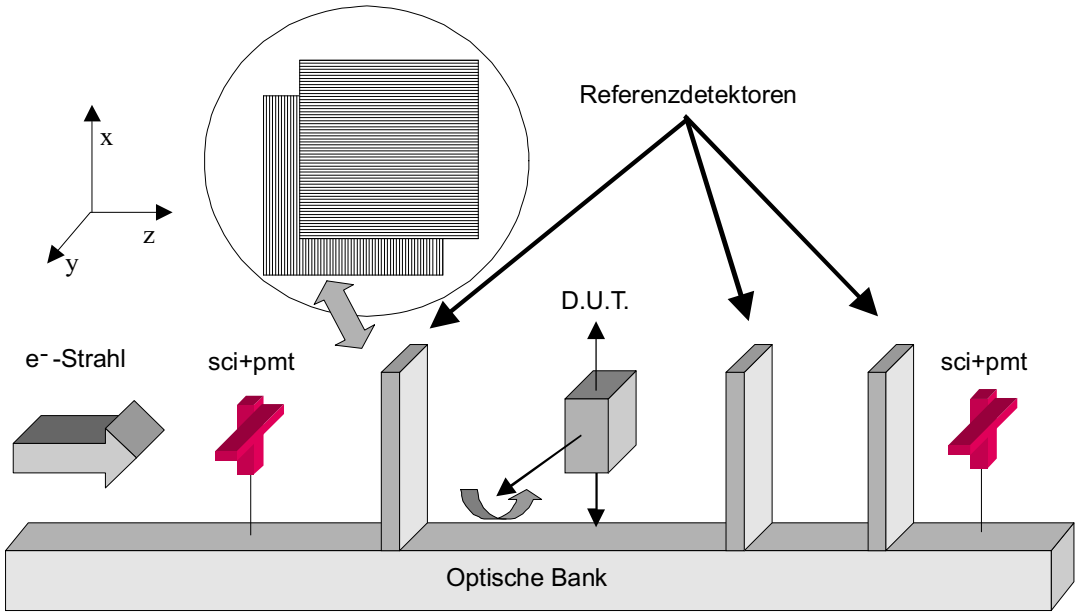

Abbildung 3.8: Teststrahlaufbau

Für weitere Teststrahlergebnisse und Detektorsimulationen wird auf Kapitel 4.6.3, S. 51ff verwiesen.

3.3 Qualitätskontrolle

Die Serienproduktion umfaßt im Rahmen dieser Diplomarbeit folgende Produktionsschritte:

- Wareneingang: Kennzeichnung und Lagerung der Zähler, Dokumentation und Analyse der Herstellerdaten
- Langzeittest: Testaufbau, Testausführung, Datennahme und Analyse
- Produktionsorganisation: welche Zähler gelangen in die Produktion, Entwurf von Formularen zum Steuern und Kontrollieren des Produktionsablaufs und der Qualitätsüberwachung
- Kleben und Bonden: Analyse der IV-Kennlinien nach den Arbeitsschritten Spacerkleben, Modulkleben, Upilexkleben und Bonden.

Dieser Abschnitt dokumentiert die während der Produktion des MVD erforderlichen Arbeitsschritte und Kontrollmaßnahmen bis zur Fertigstellung eines Halbmoduls (Abb. 2.5 auf Seite 14) sofern diese Schritte direkte Verbindung mit den elektrischen Eigenschaften der Zähler haben.

3.3.1 Hamamatsu-Daten

Hamamatsu Photonics kontrolliert bei allen Zählern den Dunkelstrom I_{DC} durch Bias- und Guardring sowie die Kapazität (CV-Kurve). Außerdem werden alle Auslesestreifen auf Kurzschlüsse zwischen Auslesestreifen (Alu-Kurzschluß), zwischen p^+-Streifen und Aluminiumstreifen (C_c-Kurzschluß) und auf unterbrochene Aluminiumstreifen (Alu-Bruch) untersucht.

Dieses Kapitel präsentiert die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung dieser Daten.

Diese Informationen sind wichtig für die Weiterverarbeitung der Zähler und müssen auf ihre Konsistenz überprüft werden. Sollten die Daten Abweichungen aufweisen, müssen eigene Kontrollschritte in die Serienproduktion eingefügt werden.

Für eine größere Stichprobe von über 200 der 750 BMVD-Zähler wurden IV- und CV-Kurven gemessen. 70 BMVD-Zähler wurden visuell inspiziert, die Inspektion bestätigte die von Hamamatsu festgestellten Streifendefekte (Kapitel 3.2.1 auf Seite 18).

3.3.1.1 Detektorkapazität bei voller Verarmung

Die Detektorkapazität bei voller Verarmung ist ein Maß für die Dicke des aktiven Gebietes des Detektors (Kap. 2.1.1, Glg. 2.1). Abb. 3.9a zeigt ein Histogramm der Detektorkapazität aller BMVD-Zähler, berechnet aus den Daten von Hamamatsu.

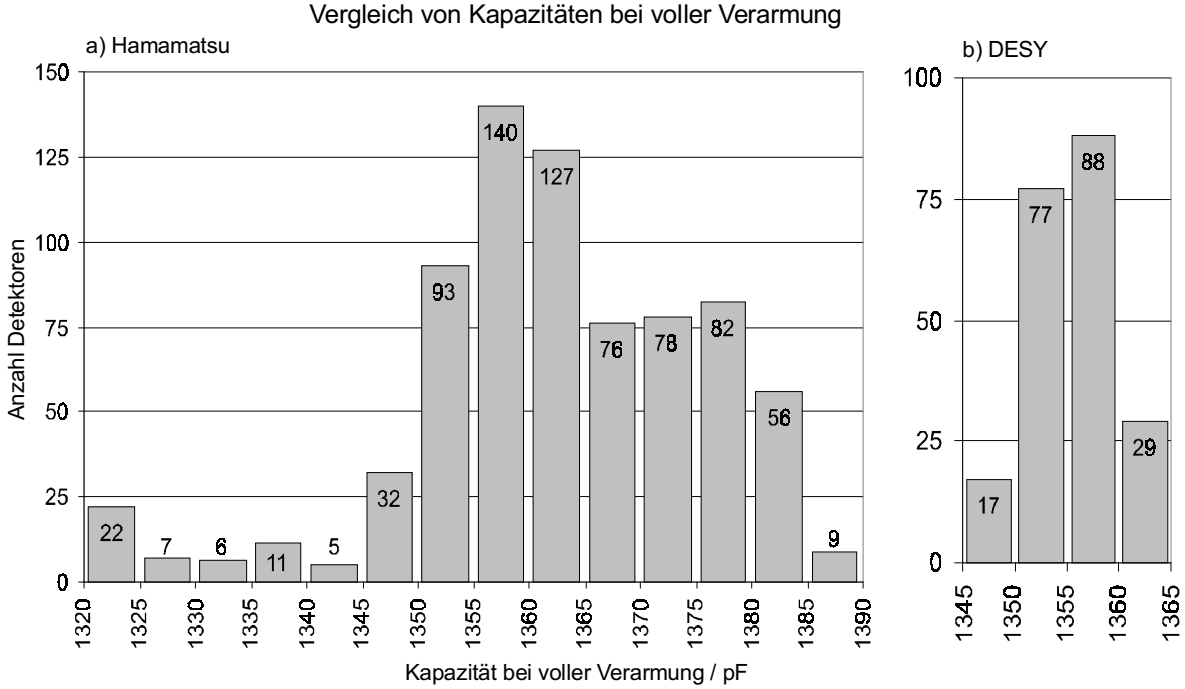

Abbildung 3.9: Kapazitätenhistogramme bei voller Verarmung: a) Histogramm von der Gesamtgruppe von 750 BMVD-Zählern aus Hamamatsu-Daten. b) Histogramm aus einer Stichprobe von 211 eigenen Messungen. Die DESY-Kontrollmessung zeigt eine geringere Streuung. Der Mittelwert ist $C_{min} = 1356{,}1 \pm 4{,}0\,pF$.

Zu erkennen ist eine nicht gaußförmige Verteilung über eine Breite von 70 pF, was einer Abweichung der Detektordicke von $d = 17\,\mu m$ entspricht. Die DESY-Stichprobe von 211 Zählern ist daneben abgebildet (Abb. 3.9b) und zeigt eine schmalere gaußähnliche Verteilung. Die Daten ergeben $C_{min} = 1356{,}1 \pm 4{,}0\,pF$. Dies entspricht einer Dicke $d = 299{,}6 \pm 0{,}9\,\mu m$.

Verschiedene Messungen der Dicke der Zähler über mechanische Verfahren haben eine abweichende Dicke zwischen 325 und $330\,\mu m$ ergeben. Die mechanisch ermittelte Dicke ist größer, da die n^+-Dotierung der Rückseite $30\,\mu m$ dick ist. Ein optisches Meßverfahren mit einem Mikroskop (Kap. 3.2.1) ergab eine Dicke $d = 320{,}8 \pm 1{,}2\,\mu m$. Alle Verfahren zeigen eine Schwankung der Dicke, die die Montage nicht behindert.

3.3.1.2 Verarmungsspannung

Jeder Zähler wird oberhalb der Verarmungsspannung betrieben. Also muß die Verarmungsspannung U_{fdv}, definiert in Glg. 2.3, für jeden Zähler bekannt sein, da ein Betreiben des Zählers unterhalb dieses Wertes das aktive Volumen verkleinert und damit Verluste in der Ladungssammlung beinhaltet. Ein geringeres Signal-Rausch-Verhältnis und eine schlechtere Ortsauflösung wären die Folge.

Zu allen Zählern liefert Hamamatsu eine CV-Messung, aus der die Verarmungsspannung bestimmt wird. Abb. 3.10a zeigt ein Histogramm der Verarmungsspannung aller BMVD-Zähler. Man erkennt verschiedene Intervalle, in denen es zu einer Häufung kommt. Dies ist das Ergebnis unterschiedlicher Dotierungskonzentrationen der Zähler. Die Spezifikation fordert $U_{fdv} < 150\,V$. Die Spezifizierung eines schmalen Intervalls hätte die Kosten in die Höhe getrieben, denn der Hersteller hätte nur bestimmte Stücke des Kristalls verwenden können, da die Dotierung im Kristall schwankt.

Abb. 3.10 zeigt den Vergleich mit der Stichprobe von 211 DESY-Kontrollmessungen. Jeder Punkt stellt einen Zähler dar. Alle Verarmungsspannungen liegen auf einer Gerade, die mittlere Differenz zwischen der Hamamatsu- und der DESY-Messung beträgt $\Delta U_{fdv} = 0{,}3 \pm 0{,}6\,V$.

Die Hamamatsu-Daten können daher für weitere Entscheidungen wie z.B. die Leiterplatzwahl verwendet werden.

3.3.1.3 Streifendefekte

Ein ordnungsgemäß funktionierender Auslesestreifen ist kapazitiv gekoppelt an den darunterliegenden p^+-Streifen, ist isoliert zu benachbarten Auslesestreifen und hat durchgehenden Kontakt bis zur Bondfläche, die die Verbindung zum Upilexkabel herstellt. Dementsprechend überprüft Hamamatsu alle Auslesestreifen auf Kurzschlüsse zwischen Aluminiumstreifen und p^+-Streifen (C_c-Kurzschluß) sowie zwischen benachbarten Auslesestreifen (Alu-Kurzschluß), und auf unterbrochene Aluminiumstreifen (Alu-Bruch).

70 BMVD-Zähler wurden visuell inspiziert. Die Inspektion bestätigte die von Hamamatsu festgestellten Streifendefekte (Kap. 3.2.1 auf S. 18).

Die Analyse der Hamamatsu-Daten über Streifendefekte ergibt 108 BMVD-Zähler mit insgesamt 187 C_c-Kurzschlüssen, 15 Zähler mit 29 Alu-Kurzschlüssen und 27 Zähler mit

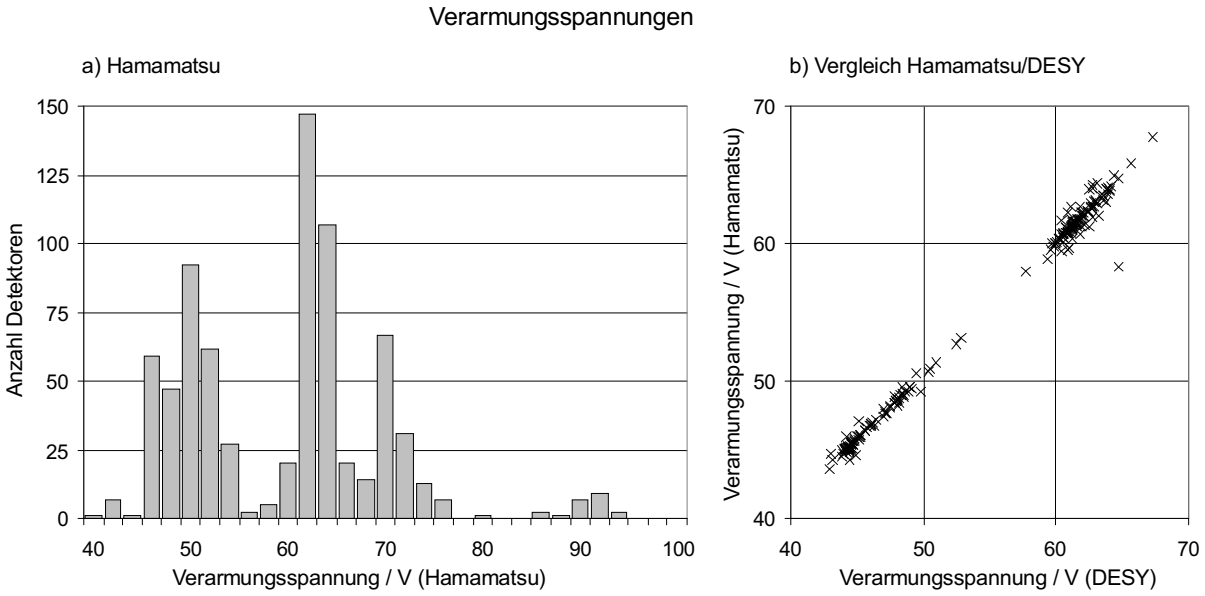

Abbildung 3.10: **Verarmungsspannungen. a)** Histogramm der Verarmungsspannung von der Gesamtgruppe von 750 BMVD-Zählern aus Hamamatsu-Daten. **b)** Vergleich der Hamamatsu-Daten mit einer Stichprobe von DESY-Daten (211 Zähler).

43 Alu-Brüchen.

Es wurde entschieden, Zähler mit Alu-Kurzschlüssen und Alu-Brüchen vorerst in der Produktion nicht einzusetzen.

Außerdem wurde überprüft, ob es eine Korrelation zwischen Streifendefekten und erhöhten Dunkelströmen gibt. Dazu wurden die Zähler als Funktion des Dunkelstroms in vier Gruppen aufgeteilt und der relative Anteil mit Defekten gezählt. Die Abb. 3.11a-c zeigen Histogramme mit prozentualen Anteilen von Zählern mit Streifendefekten. C_c-Kurzschlüsse zeigen eine eindeutige Korrelation zu erhöhten Dunkelströmen, während bei Alu-Kurzschlüssen und Alu-Brüchen keine Korrelation zu erkennen ist. Dies ist ein Hinweis darauf, daß Produktionsfehler, die Schädigungen im Koppeloxid verursachen, auch Defekte am darunterliegenden *pn*-Übergang erzeugen, während Fehler in der Aluminisierung keine signifikante Wirkung auf die Diode zeigen.

3.3.2 Produktionskontrolle

Die entscheidende Eigenschaft des Zählers, die gewährleistet sein muß, ist die Funktion als Diode. Sie muß in Sperrichtung arbeiten und der Strom darf die spezifizierte Grenze nicht überschreiten. Da nicht nach jedem Schritt ein Langzeittest (im Prinzip 10 Jahre) durchgeführt werden kann, wurde entschieden, als Erstkontrolle einen Langzeittest durchzuführen und nach jedem Arbeitsschritt eine IV-Kennlinie zu messen. Als Klassifikationskriterium einigte man sich auf den Dunkelstrom I_{DC} bei einer Biasspannung $U_{Bi} = 200\,V$. Sofern nicht ausdrücklich erwähnt, beziehen sich alle Stromwerte auf diese Biasspannung.

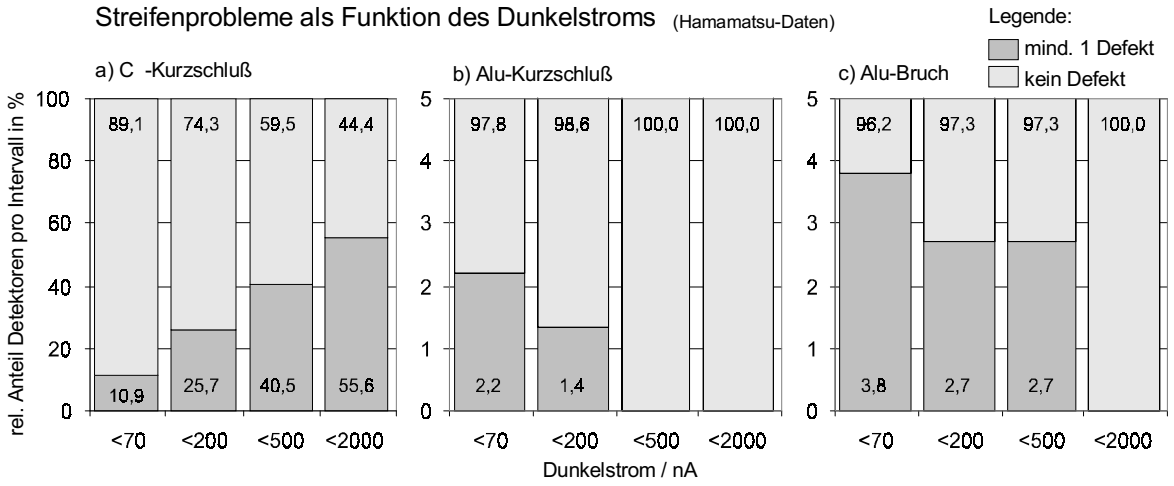

Abbildung 3.11: **Streifendefekte als Funktion des Dunkelstroms.** Dargestellt ist im jeweiligen Stromintervall die rel. Anzahl von Zählern (in %) mit und ohne **a)** C_c-Kurzschlüsse. **b)** Kurzschlüsse zwischen Auslesestreifen. **c)** gebrochenen Auslesestreifen. C_c-Kurzschlüsse zeigen eine eindeutige Korrelation zu erhöhten Dunkelströmen des Zählers, bei b) und c) ist dies nicht festzustellen. Grundlage sind die Hamamatsu-Daten aller 750 BMVD-Zähler bei einer Biasspannung $U_{Bi} = 200\,V$.

3.3.2.1 Langzeittest

Im Langzeittest (LTT) wird jeder Zähler für einen Zeitraum von 1 bis 3 Tagen mit $200\,V$ betrieben. Der Aufbau des LTT ist in Kap. 3.2.4 auf S. 24ff beschrieben. Die von Hand notierten Werte werden in einer EXCEL-Tabelle gepflegt. Gewöhnlich werden nur der erste und letzte Wert aufgenommen, bei außergewöhnlichen Ereignissen auch die Werte dazwischen.

Abb. 3.12 zeigt typische Kurven von Zählern im LTT. Es können 4 Typen unterschieden werden:

- Konstanter sehr niedriger Strom.
- Anfangs erhöhter Strom, monoton fallend auf niedriges Niveau, asymptotisch.
- Anfangs leicht erhöhter Strom, monoton steigend auf höheres Niveau, asymptotisch.
- Anfangs niedriger Strom, nach Stunden beginnender starker Anstieg weit über $2\,\mu A$ hinaus, asymptotisch unbekannt.

Aufgrund des zeitlich monotonen Verhaltens aller Zähler im LTT wurde entschieden, zur einfacheren Analyse und Klassifikation die Start- und Endwerte zu benutzen, um ein Klassifikationsschema für alle Zähler einzuführen. Dieses Schema (Anhang B) weist jedem Zähler mit Start- und Endwert im LTT eine Zahl zu, welche eine Funktion des Ortes in der XY-Ebene ist.

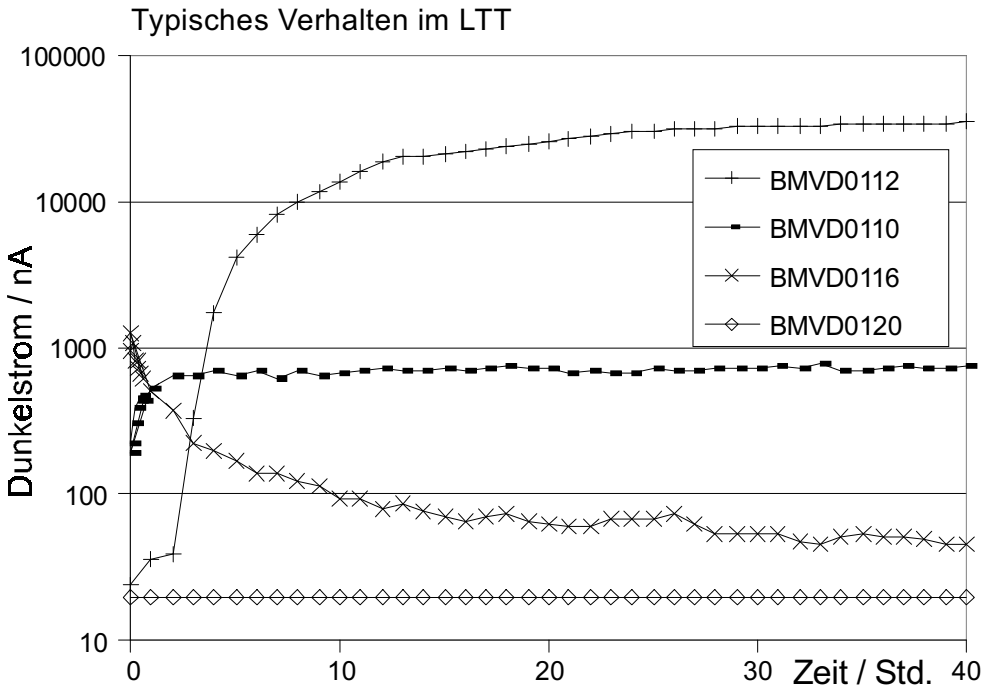

Abbildung 3.12: Langzeittest: Typisches Verhalten von Zählern.

Dieses Schema wird genauso als Qualitätskriterium eingesetzt für jeden anderen Produktionsschritt wie Modulkleben oder Bonden.

Abb. 3.13 zeigt das Ergebnis des LTTs nach fast 600 untersuchten BMVD-Zählern. Über 81% der Zähler fallen in Kat. 11 und wurden als einwandfrei eingestuft. Nur 4 Zähler lagen außerhalb der Spezifikation ($I_{DC} > 2\,\mu A$) in den Kat. 31 und 32. Fast 13% der Zähler konnten durch den LTT als nicht völlig stabil identifiziert werden.

3.3.2.2 IV-Kontrollen

Nach jedem Produktionsschritt wird eine IV-Kennlinie gemessen, um eventuelle Veränderungen zu ermitteln und damit den Prozeßschritt zu kontrollieren und optimieren. In den Abb. 3.14 - 3.17 sind die Ergebnisse der IV-Messungen nach dem Klassifikationsschema des Langzeittests in der Reihenfolge der Arbeitsschritte dargestellt.

- Spacerkleben
  Von den bis jetzt 441 nach dem Spacerkleben untersuchten Zählern sind 352 stabil geblieben (80 %). Bei 31 Zählern (7 %) stieg der Strom nicht mehr als um den Faktor zwei oder fiel. Dabei blieb er unter $2\,\mu A$. Bei 58 Zählern (13 %) stieg der Strom um mehr als Faktor 2 an, bei 15 Zählern über $2\,\mu A$. Diese 15 Zähler wurden aus der Produktion genommen und ersetzt. Während der Produktion wurde der Klebedruck für die Spacer bei dem unteren Zähler des äußeren Halbmoduls um die Hälfte verringert, daraufhin sank die Ausfallquote um den Faktor zwei. Abb. 3.14 zeigt das Stromdiagramm von 441 Zählern vor und nach dem Spacerkleben.

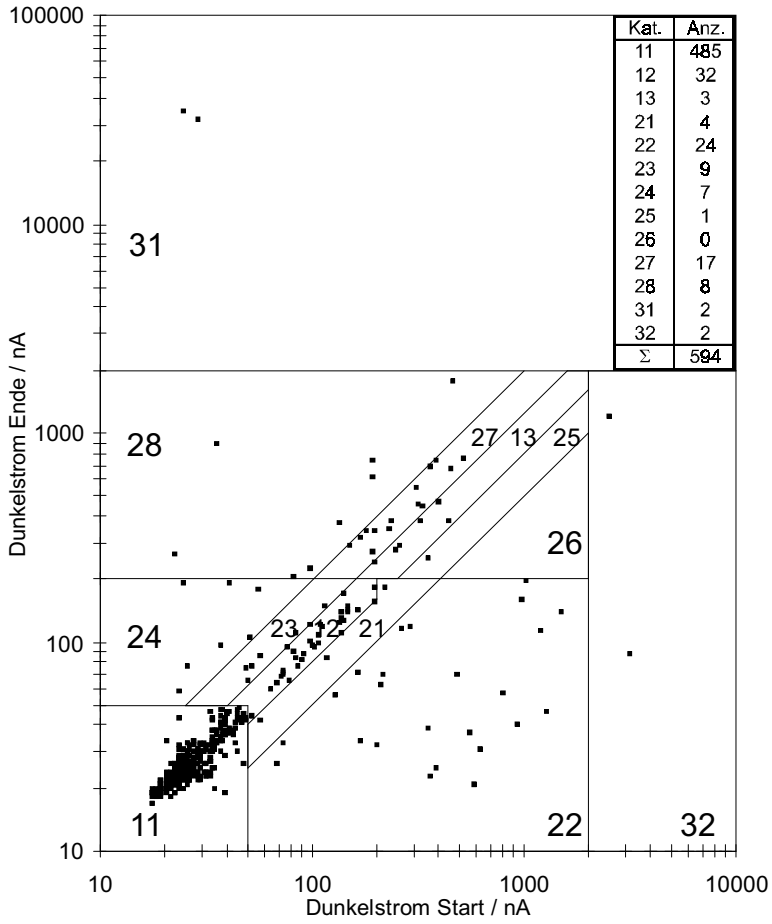

Abbildung 3.13: Ergebnis des Langzeittests von 594 BMVD-Zählern. Über 80% der Zähler fallen in Kat. 11. Nur 4 Zähler liegen außerhalb der Spezifikation ($I_{DC} > 2\,\mu A$) in den Kat. 31 und 32.

- Modulkleben
  Von den bis jetzt 445 nach dem Modulkleben untersuchten Zählern sind 336 stabil geblieben (76 %). Bei 53 Zählern (12 %) stieg der Strom nicht mehr als um den Faktor zwei oder fiel. Dabei blieb er unter $2\,\mu A$. Bei weiteren 53 Zählern (12 %) stieg der Strom um mehr als Faktor 2 an, bei 19 Zählern über $2\,\mu A$. Diese 19 Zähler wurden in 12 äußere und 6 innere Halbmodule geklebt. Sie werden vorrangig für Testzwecke in folgenden Produktionsschritten verwendet. Die Ursachen für die erhöhten Ströme wurden noch nicht ermittelt, es ist keine signifikante Änderung der Ausfallquote zu erkennen. Abb. 3.15 zeigt das Stromdiagramm von 441 Zählern vor und nach dem Modulkleben.

  Zum Start der Produktion vermaß man die Form der geklebten Halbmodule. Es wurde festgestellt, daß die Zähler nicht plan sind, sondern gebogen mit einem Höhenunterschied von ca. $50\,\mu m$. Bei Halbmodulen verstärkte sich dieser Effekt aufgrund der Geometrie bis zu $250\,\mu m$. Daraufhin wurden die Klebevorrichtungen der Form

der Zähler angepaßt und eine Formvermessung als zusätzlicher Arbeitsschritt in den Produktionsablauf eingefügt.

- Upilexkleben
  Aufgrund von Produktionsengpässen und Qualitätsmängeln bei den Upilexfolien sind bisher erst 56 Zählern vor und nach dem Upilexkleben vermessen worden. Abb. 3.16 zeigt die Ströme vor und nach dem Kleben. 33 Zähler (59 %) waren stabil, bei 13 Zählern (23 %) stieg der Strom nicht mehr als um den Faktor zwei oder fiel und bei 10 Zählern (18 %) stieg der Strom um mehr als Faktor zwei an, bei 5 Zählern über $2\,\mu A$. Der Produktionsschritt erzeugt keine weiteren erhöhten Sröme. Die Ursachen der erhöhten Ströme waren der Transport nach DESY-Zeuthen und Vorschädigungen der Zähler durch Spacer- und Modulkleben.

- Bonden
  Von 56 gebondeten Zählern sind 9 stabil geblieben, bei 39 Zählern stieg der Strom um mehr als Faktor zwei an, bei 26 Zählern über $2\,\mu A$. Eine Analyse des Produktionsschritts und der Meßdaten wurde ausgeführt. Die IV-Kennlinien zeigen durchbruchartiges Verhalten . Die Durchbruchspannung variiert mit dem Zähler, mit der Zeit und mit angelegter Biasspannung.

  Umfangreiche Tests, einzelne Zähler beim Bonden zu schädigen, blieben erfolglos. Als Grund erwogen wurden folgende Ursachen:

  – Die für die Halbmodule hergestellten Transportplatten enthalten auf der Oberfläche Metallpartikel der Größenordnung von $5 - 100\,\mu m$, die bei der Herstellung der Platten zurückbleiben. Das Ansaugen des Halbmoduls mittels Vakuum ermöglicht das Hineinpressen der Metallteilchen in die Rückseite des Zählers. Daraufhin wurden die Transportplatten mit einer $70\,\mu m$ dicken Adhäsionsfolie beklebt, um die Rückseite des Zählers zu polstern.
  – Die Höhendifferenz der Zähler eines Halbmoduls beträgt ca. $715\,\mu m$. Die Höhendifferenz der zwei Ebenen auf der Transportplatte weicht von diesem Wert ab. Die resultierende Differenz führt bei aktiviertem Vakuum zu mechanischem Streß in einem der beiden Zähler. Die Vakuumanbindung wurde daraufhin abgeändert. Nur der zu bondende Zähler wird durch das Vakuum festgehalten.

  Erste Ergebnisse zeigen keinen weiteren Schaden, weitere Beobachtungen und Analysen sind jedoch erforderlich.

Die IV-Messungen zeigen in einigen Fällen instabiles Verhalten der Zähler, wahrscheinlich verursacht durch mechanischen Streß und Beschädigungen der Oberfläche während des Spacer- und Modulklebens sowie des Bondens.

Unklar ist, in welchem Maße die Beschädigungen Einfluß auf den Dunkelstrom während des Betriebs haben. Deshalb ist es geplant, einen weiteren Langzeittestaufbau zu konstruieren, der es ermöglicht, einfach und effizient die Dunkelströme mehrerer Halbmodule gleichzeitig über einen längeren Zeitraum zu messen. Er sollte in den Produktionsprozeß eingefügt werden.

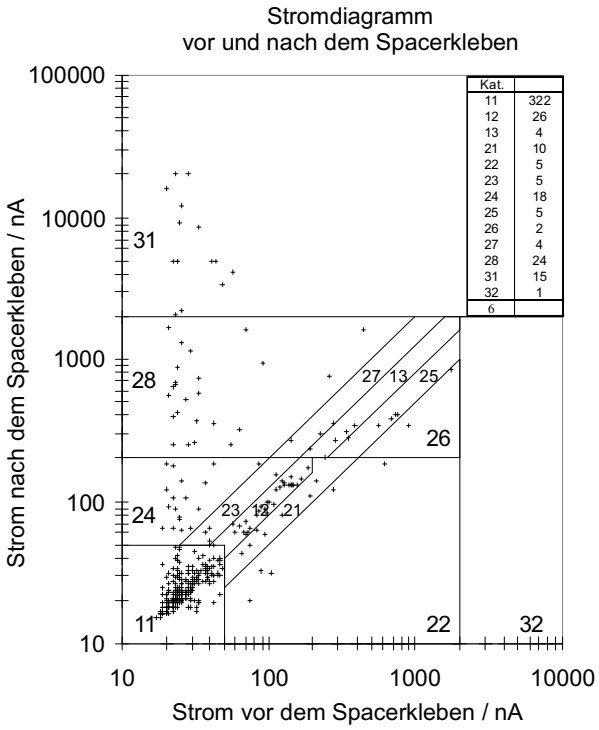

Abbildung 3.14: Qualitätskontrolle Spacerkleben

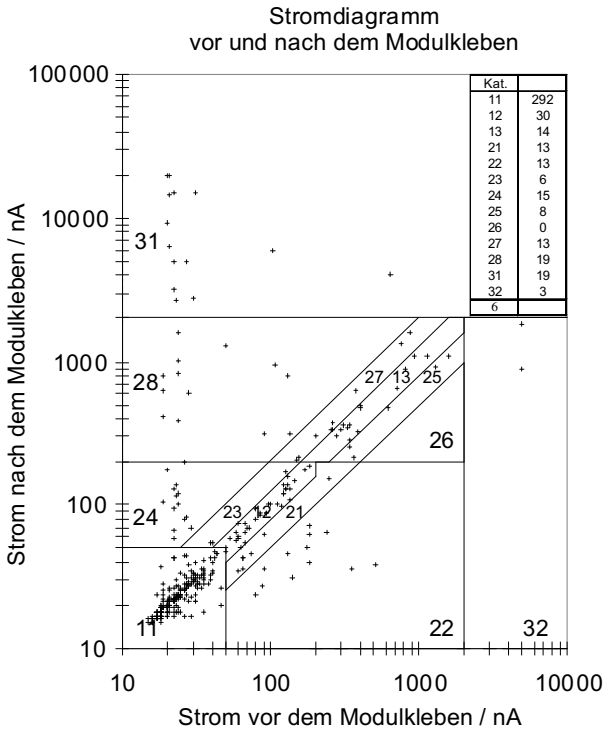

Abbildung 3.15: Qualitätskontrolle Modulkleben

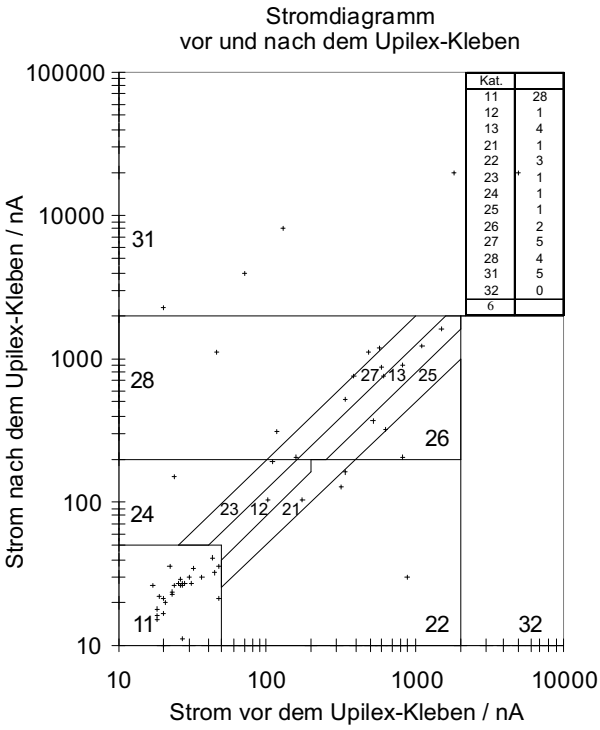

Abbildung 3.16: Qualitätskontrolle Upilexkleben

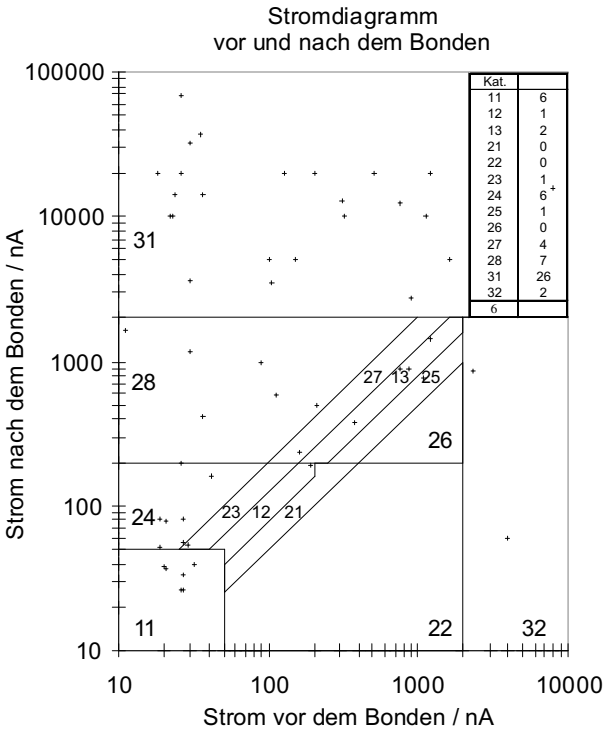

Abbildung 3.17: Qualitätskontrolle Bonden

3.4 Zusammenfassung

Die MVD-Gruppe des ZEUS-Experiments hat alle Zähler erhalten und eine Eingangsanalyse durchgeführt. Die Zähler haben Verarmungsspannungen von $U_{fdv} = 40 - 100\,V$, betrieben über der Verarmungsspannung ergibt sich eine minimale mittlere Kapazität $C_{min} = 1356{,}1 \pm 4{,}0\,pF$. Alle verfügbaren Daten werden in EXCEL-Tabellen und einer ACCESS-Datenbank gepflegt.

Eine visuelle Inspektion aller Zähler als Eingangskontrolle ist nicht notwendig, die Hamamatsu-Daten sind ausreichend.

Der BMVD-Zähler kann durch Proben mit Probernadeln beschädigt werden. Ein Proberkopf der Firma Süss wurde kalibriert. Beim Proben mit $15\,g$ auf Randflächen und $25\,g$ in der Mitte von Proberflächen besteht die Möglichkeit ansteigender Dunkelströme.

Ein Langzeittestaufbau wurde geplant und konstruiert. Gemessen wird der Dunkelstrom als Funktion der Zeit für $24 - 70$ Stunden. Bei fast 600 kontrollierten Zählern erfüllten nur vier Zähler nicht die Spezifikation von $2\,\mu A$. Ein Teil der Zähler zeigt Instabilitäten in den ersten Minuten und Stunden.

Die Serienproduktion von Halbmodulen wurde begonnen. Die dabei durchgeführten Qualitätskontrollen wurden erläutert und dargestellt. Fälle erhöhter Dunkelströme wurden nach mehreren Produktionsschritten erkannt. Überarbeitungen des Arbeitsschrittes und der benutzten Werkzeuge verringerten signifikant den Anteil beschädigter Zähler.

Weitere Nachforschungen sind notwendig um herauszufinden, in welchem Maße die Beschädigungen Einfluß auf den Dunkelstrom während des Betriebs haben. Deshalb ist der Bau und Betrieb eines weiteren Langzeittests geplant, der in den Produktionsprozeß eingefügt werden kann.

Kapitel 4

Kapazitive Ladungsteilung

Dieses Kapitel beschreibt Untersuchungen zur kapazitiven Ladungsteilung des MVD-Zählers. Verwendet wurde eine Kombination aus Kapazitätsmessungen und Simulationen von Zähler und Fingerstreifenstruktur.

Ziel der Untersuchungen war die Messung der Zwischenstreifenkapazitäten im Zähler und daraus folgend Simulationsergebnisse über Crosstalk, Rückseitenverluste, sichtbare Kapazität für den Vorverstärker, Signalfluß im Zähler und ein Vergleich mit Ergebnissen aus dem Teststrahlaufbau.

4.1 Prinzip einer Kapazitätsmessung

Eine Kapazitätsmeßbrücke mißt den komplexen Widerstand Z eines Testobjekts [Pac83]. Eine Prinzipschaltung ist skizziert in Abb. 4.1. Eine Wechselspannungsquelle mit wählbarer Frequenz $f = \frac{\omega}{2\pi}$ wird an das Testobjekt (DUT) angeschlossen. Gemessen wird parallel die Spannungsamplitude $|V_{mess}|$ und in Serie die Stromamplitude $|I_{mess}|$ sowie deren Phasendifferenz θ. Mit $|Z| = |V_{mess}|/|I_{mess}|$ und θ ergibt sich für den komplexen Widerstand Z des DUT:

$$Z = |Z|e^{i\theta} = \mathrm{Re}(Z) + i\ \mathrm{Im}(Z) \tag{4.1}$$

$$\mathrm{Re}(Z) = |Z|\cos\theta \tag{4.2}$$

$$\mathrm{Im}(Z) = |Z|\sin\theta \tag{4.3}$$

Der zweikomponentige Meßwert kann durch verschiedene Paare von Größen dargestellt werden. Anstatt der Größen $|Z|$ und θ werden zwei Anzeigemöglichkeiten benutzt, die Modelle elektrischer Ersatzschaltbilder sind:

- Serienmodus:
  Der komplexe Widerstand Z wird interpretiert als Serienschaltkreis einer Kapazität C_s und einem Widerstand R_s: $Z = R_s + \frac{1}{i\omega C_s}$. Das Paar C_s und R_s kann aus $|Z|$ und θ berechnet werden:

$$R_s = \mathrm{Re}(Z) = |Z|\cos\theta \tag{4.4}$$

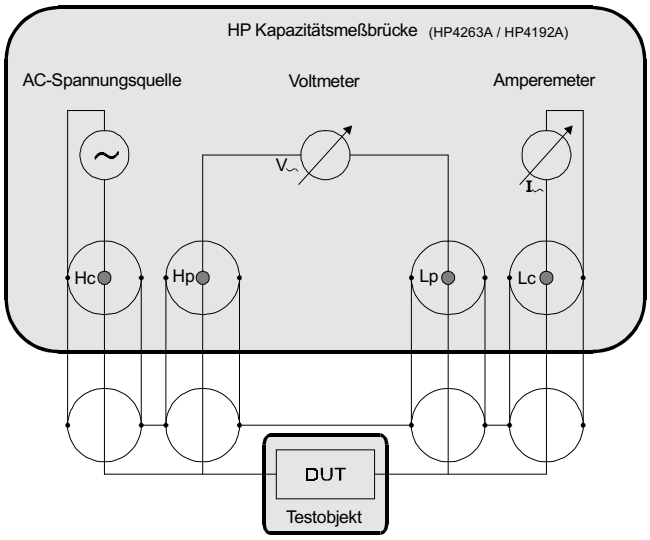

Abbildung 4.1: Prinzipschaltung einer Kapazitätsmeßbrücke

$$C_s = -\frac{1}{\omega \mathrm{Im}(Z)} = -\frac{1}{\omega |Z| \sin\theta} \tag{4.5}$$

- Parallelmodus:
  Der komplexe Widerstand Z wird interpretiert als Parallelschaltkreis einer Kapazität C_p und einem Leitwert $G_p = \frac{1}{R_p}$: $Z = \frac{1}{G_p + i\omega C_p}$. Das Paar C_p und G_p kann aus $|Z|$ und θ berechnet werden:

$$G_p = \frac{\mathrm{Re}(Z)}{\mathrm{Re}(Z)^2 + \mathrm{Im}(Z)^2} = \frac{1}{|Z|}\sin\theta \tag{4.6}$$

$$C_p = -\frac{\mathrm{Im}(Z)}{\omega \mathrm{Re}(Z)^2 + \mathrm{Im}(Z)^2} = -\frac{1}{|Z|\omega}\sin\theta \tag{4.7}$$

4.1.1 Störungsfreies Messen

Das Messen von Kapazitäten ist anfällig gegen mehrere Störungen und die Meßgenauigkeit hängt von einigen Randfaktoren ab.

Die gewählte Frequenz beeinflußt das Meßergebnis: Bei der Wahl von zu hohen Frequenzen ($f > 1\,MHz$) erhöhen Streukapazitäten der Kabel das Ergebnis bis zu mehreren Größenordnungen. Bei zu niedrigen Frequenzen sinkt die Meßgenauigkeit. Das HP4192A hat eine Ablesegenauigkeit von 0,1 fF bei 700 kHz, aber von 0,1 nF bei 10 Hz.

Streukapazitäten müssen mit einer Nullkorrektur herausgerechnet werden. Streukapazitäten sind enthalten in den Zuleitungskabeln, den Proberköpfen und zwischen den Probernadeln. Dieser Effekt ist abhängig von der Stellung der Nadeln zum Chuck und zueinander. Er kann eine Größenordnung von $5\,pF$ erreichen.

Eine korrekte Messung wird verhindert, wenn einer der beiden Kontakte des Testobjekts an Masse liegt. Zwar existiert eine Methode zur Messung von Kapazitäten auf

Masse, aber diese Beschaltung kann das Ergebnis verfälschen, wenn unbekannte Bauteile mit Masse verbunden sind [Pac83]. Der Versuch einer Qualitätskontrolle des Upilexkabels mit Hilfe der Kapazitätsmeßbrücke HP4192A scheiterte an dem an Masse angeschlossenen, halbautomatischen Proberkopf, der den Kontakt zur Leiterbahn herstellen sollte. Das HP4263A ist nicht in der Lage, diese Messung auszuführen, da in dem Gerät der Außenleiter der Zuleitung *Lc* an Masse liegt (Abb. 4.1).

4.1.2 Netzwerke

Die Kapazität C zwischen zwei elektrisch leitenden Flächen ist definiert als Quotient aus der Ladungsmenge Q und der Potentialdifferenz $\Delta\varphi$:

$$Q = C \cdot \Delta\varphi \tag{4.8}$$

Bei n leitenden Flächen mit den Potentialen φ_k und den Ladungen Q_k existieren $\binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2}$ Kapazitäten C_{kl}, sodaß für alle $k \neq l$ gilt [Kue90]:

$$Q_k = \sum_{i=1}^{n} C_{ki}(\varphi_k - \varphi_i) \qquad \forall i \neq k \tag{4.9}$$

$$\sum_{i=1}^{n} Q_i = 0 \tag{4.10}$$

In den n Gleichungen befinden sich $\frac{n(n-1)}{2} + 2n - 1$ Unbekannte. Die Geometrie des Netzwerks definiert die Kapazitäten und damit $\frac{n(n-1)}{2}$ Unbekannte. Damit bleiben $n-1$ zusätzliche Variablen, die als Randbedingungen festgelegt genau eine Lösung definieren. Die einfachste Methode, das Festlegen der n Potentiale φ_i, definiert $n-1$ Potentialdifferenzen. Durch $\binom{n}{2}$ unabhängige Kapazitätsmessungen, die jeweils der Messung einer Ladung Q_i entsprechen, entsteht ein lineares Gleichungssystem vom Grade $\binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2}$, welches aufgelöst nach den C_{lk} alle Kapazitäten eindeutig bestimmt.

Alle leitenden Flächen des Netzwerks werden zu zwei Gruppen zusammengeschaltet und mit den Anschlüßen ***H**igh* und ***L**ow* der Kapazitätsmeßbrücke verbunden. Jede Teilmessung schaltet die leitenden Flächen in einer anderen Permutation zu zwei Gruppen zusammen, jeder Meßwert ist die Summe der Kapazitäten zwischen den beiden Leitergruppen.

Alle anderen Methoden, die Randbedingungen zu definieren, erzeugen ein Gleichungssystem mit Quotienten aus Serienschaltungen von Kapazitäten und erschweren die Lösung.

4.2 PSpice®

PSpice® ist ein Entwicklungspaket zur Simulation von analogen, digitalen oder Mixed-Mode-Schaltungen. Es simuliert unter anderem sowohl DC- und AC-Analysen als auch

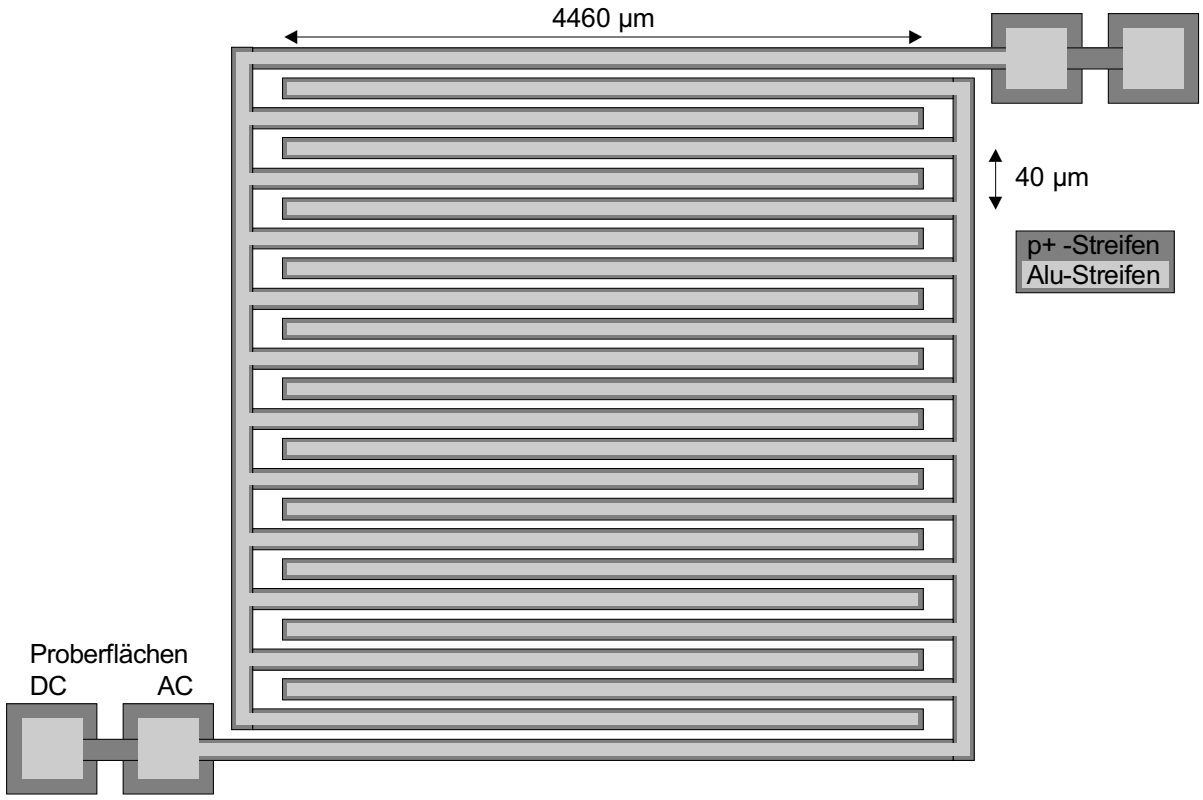

Abbildung 4.2: Fingerstreifen. 2×12 Finger liegen auf einer Länge von knapp $4,5\,mm$ ineinander. Die vier Proberflächen kontaktieren jeweils die p^+- und die Aluminiumstreifen.

Transientenanalysen mit verschiedenen stimulierenden Pulsformen. Die verwendeten Simulationstypen sind die frequenzabhängige AC-Analyse zur Simulation einer Kapazitätsmessung mit einer Kapazitätsmeßbrücke und die Transientenanalyse zur direkten Signalsimulation im Zähler und Vorverstärker.

4.3 Bestimmung der Zwischenstreifenkapazität

Zur Bestimmung der Zwischenstreifenkapazität existiert auf der Teststruktur die Fingerstreifenstruktur (Kap. 2.3). Abb. 4.2 zeigt zwei ineinandergreifende Streifengruppen mit je 12 Streifen, die an ihren Enden miteinander verbunden und an vier Proberflächen angeschlossen sind. Jeder Finger hat eine Länge von $4460\,\mu m$, was einer Streifengesamtlänge von $53{,}5\,mm$ entspricht. Zwei Variationen von p^+-Streifenbreiten ($12\,\mu m$ und $14\,\mu m$) sind vorhanden und entsprechen den Streifenbreiten auf dem Detektor. Abb. 4.3 zeigt einen 3D-Auschnitt von zwei benachbarten Streifen. Die Geometrie ist ähnlich zur Geometrie der Streifen des BMVD-Zählers (Abb. 2.1 auf S. 10), Unterschiede sind die direkte Nachbarschaft von Aluminiumstreifen und deren Breite (8 statt $10\,\mu m$).

4.3.1 Messungen an der Fingerstreifenstruktur

Mit Hilfe des Standardaufbaus für elektrische Messungen (Kap. 3.2.2) können die vier Proberflächen kontaktiert werden. Dies ist erforderlich, um das Netzwerk von Kapazitäten korrekt zu vermessen (Kap. 4.1.2). Benutzt wurde das HP4263A bei seiner höchsten Auslesegenauigkeit mit einer Frequenz f=10 kHz im seriellen Modus. Die folgenden Simulationsauswertungen zeigen, daß es sinnvoll ist, bei dieser oder kleineren Frequenzen zu messen.

Die Messungen ergeben schlüssige Werte für alle Kapazitäten (Tab. 4.1). Der Wert der Koppelkapazität C_c stimmt mit Messungen direkt am Zähler überein. Die Kapazitäten zwischen den Aluminiumstreifen und diagonal zwischen Aluminium- und p^+-Streifen sind sehr klein zwischen 15 und 30 fF/cm.

Simulationsvariable	**Symbol**	12 μm **Wert**	14 μm	**Einheit**
p^+-Widerstand	Rp	102	88	$k\Omega/cm$
Alu-Widerstand 8 μm	Ra	20	20	Ω/cm
Koppelkapazität C_c	Cc	18,3	17,8	pF/cm
Streifenkapazität p^+/p^+	Cpp	934	1211	fF/cm
Streifenkapazität Alu p^+	Cap/Cpa	28	23	fF/cm
Streifenkapazität Alu Alu	Caa	17	17	fF/cm

Tabelle 4.1: Simulationsvariablen der Fingerstreifenstruktur

Die Zwischenstreifenkapazität für 12 μm breite Streifen beträgt $C_{pp} = 0{,}93\, pF/cm$. Literaturvergleiche zeigen gute Übereinstimmungen mit diesen Werten [Cat87][Dam95]. Für 14 μm breite Streifen ergibt die Messung $C_{pp} = 1{,}21\, pF/cm$. Für die Zwischenstreifenkapazität im BMVD-Zähler zwischen 14 μm breitem p^+-Auslesestreifen und 12 μm breitem Zwischenstreifen mittelt man auf $C_{pp} = 1{,}07\, pF/cm$.

4.3.2 Modell der Fingerstreifenstruktur

Die durch Messung ermittelten Kapazitäts- und Widerstandswerte fanden Eingang in ein PSpice®-Modell der Fingerstreifenstruktur. Eine Zelle mit allen vorhandenen Bauteilen wurde entworfen (Abb. 4.4). Diese Zelle wurde vervielfacht und als Matrix von 10×24 Zellen aneinandergereiht, sodaß die Geometrie der Fingerstreifenstruktur kopiert wurde. Für beide p^+-Streifenbreiten wurden Kapazitätsmessungen mit den Werten in Tab. 4.1 simuliert und Serien- und Parallelkapazität sowie der Phasenwinkel als Funktion der Frequenz mit Hilfe der Glg. 4.4 - 4.7 errechnet.

Aus jeweils 4 Simulationsläufen können die Ergebnisse mit den Messungen verglichen werden. Abb. 4.5 zeigt das Ergebnis eines Simulationslaufes. Als Funktion der Frequenz erkennt man eine Verschiebung zwischen Parallel- und Serienmode mit einer abfallenden Flanke zu hohen Frequenzen. Mit zunehmender Frequenz wird das Signal gedämpft von den Serienwiderständen der p^+-Streifen. Gleichzeitig zeigt der Phasenwinkel ab 10 kHz Abweichungen von 90^o, was einer reinen Kapazität widerspricht. Alle anderen Beschal-

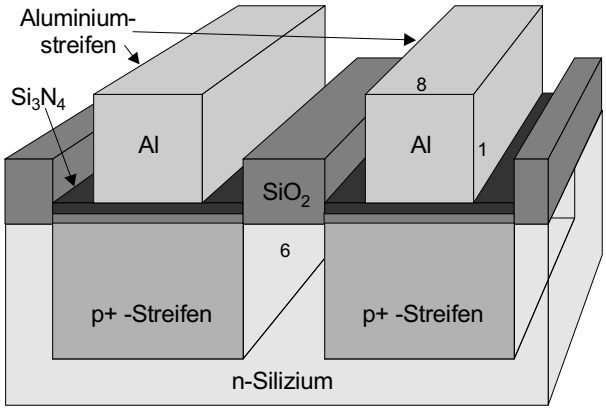

Abbildung 4.3: 3D-Auschnitt der Fingerstreifenstruktur. Alle Maßangaben in μm. Höhe 8-fach gestreckt.

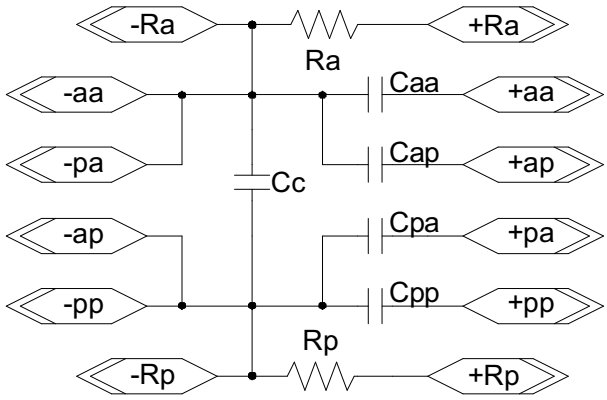

Abbildung 4.4: PSpice®-Elementarzelle der Fingerstreifenstruktur

tungen der Fingerstreifen zeigen ein ähnliches Verhalten bis auf die absoluten Beträge der Kapazitäten.

Das Modell stellt das Frequenzverhalten der Struktur richtig dar und liefert Aussagen über den Frequenzbereich, in dem Kapazitätsmessungen vorgenommen werden können. Die Simulationen entsprechen einer Konsistenzprüfung und bestätigen das Abbilden der Geometrie mit Zellen und das Prinzip von Kapazitätsmessungen im Netzwerk.

4.4 Modell des BMVD Zählers

Nach dem Prinzip der vorherigen Simulation wurde ein Schaltplan gestaltet, der alle Bauteile des BMVD-Zählers abbildet. Der Schaltplan einer Zelle in Abb. 4.6 zeigt grau umrandet die Komponenten: Oben befinden sich die Anschlüsse zu den umliegenden Zellen, darunter befinden sich die p^+-Streifenwiderstände und die Koppelkapazität C_c mit Aluminiumwiderstand. Der Hauptteil in der Mitte stellt die Zwischenstreifenkapazitäten des 1. - 6. Nachbarstreifens dar, und unten befindet sich die Rückseitenkapazität. Eine Matrix der Größe 10×10 wurde in PSpice® abgebildet.

Alle Simulationsvariablen außer den Zwischenstreifenkapazitäten nicht direkter Nachbarn sind zu finden in Tab. 4.2.

Die Zwischenstreifenkapazitäten nicht direkter Nachbarn können auf dem MVD-Zähler nicht direkt gemessen werden, da Kontakt nur zu den Aluminiumauslesestreifen oder zum Biasring möglich ist.

Deshalb werden im weiteren drei Modelle von Streifenkapazitäten nicht direkter Nachbarn verwendet:

- Das einfache Modell
  Im einfachen Modell werden nur Kapazitäten zwischen direkten Nachbarn berück-

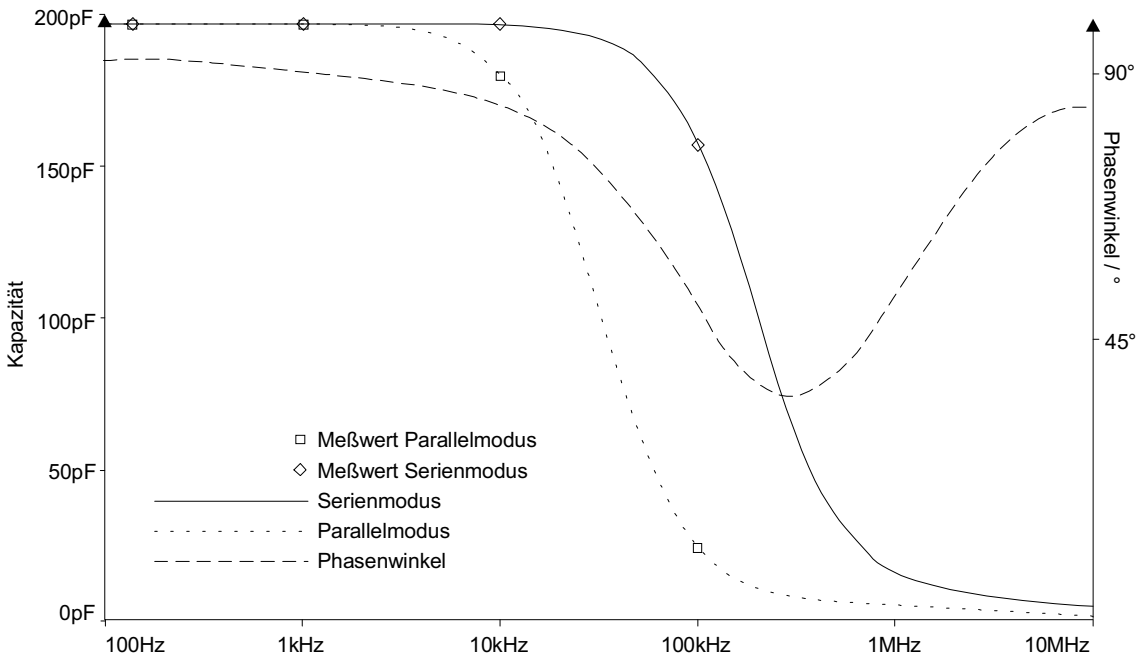

Abbildung 4.5: Simulationsergebnis Fingerstreifen: Simulation einer Kapazitätsmessung zwischen den beiden Aluminiumstreifenfingern und den beiden p^+-Streifenfingern. Die Rauten sind Meßpunkte.

Simulationsvariable	**Symbol**	**Wert**	**Einheit**
Koppelkapazität	C_c	26,2	pF/cm
Zwischenstreifenkapazität	$C_{pp^{12/14}}$	0,93 1,07	pF/cm
Rückseitenkapazität	C_{bp}	73	fF/cm
Aluminiumwiderstand	R_{al}	20	Ω/cm
p^+-Widerstand	$R_{p^{12/14}}$	102 88	$k\Omega/cm$
Bias-Widerstand	R_{bi}	1,7	$M\Omega$
Koppelisolation	R_c	10^4	$G\Omega cm$
Zwischenstreifenisolation	R_{pp}	10^4	$G\Omega cm$
Rückseitenisolation	R_{bp}	10^7	$G\Omega cm$

Tabelle 4.2: Simulationsvariablen des MVD-Zählers

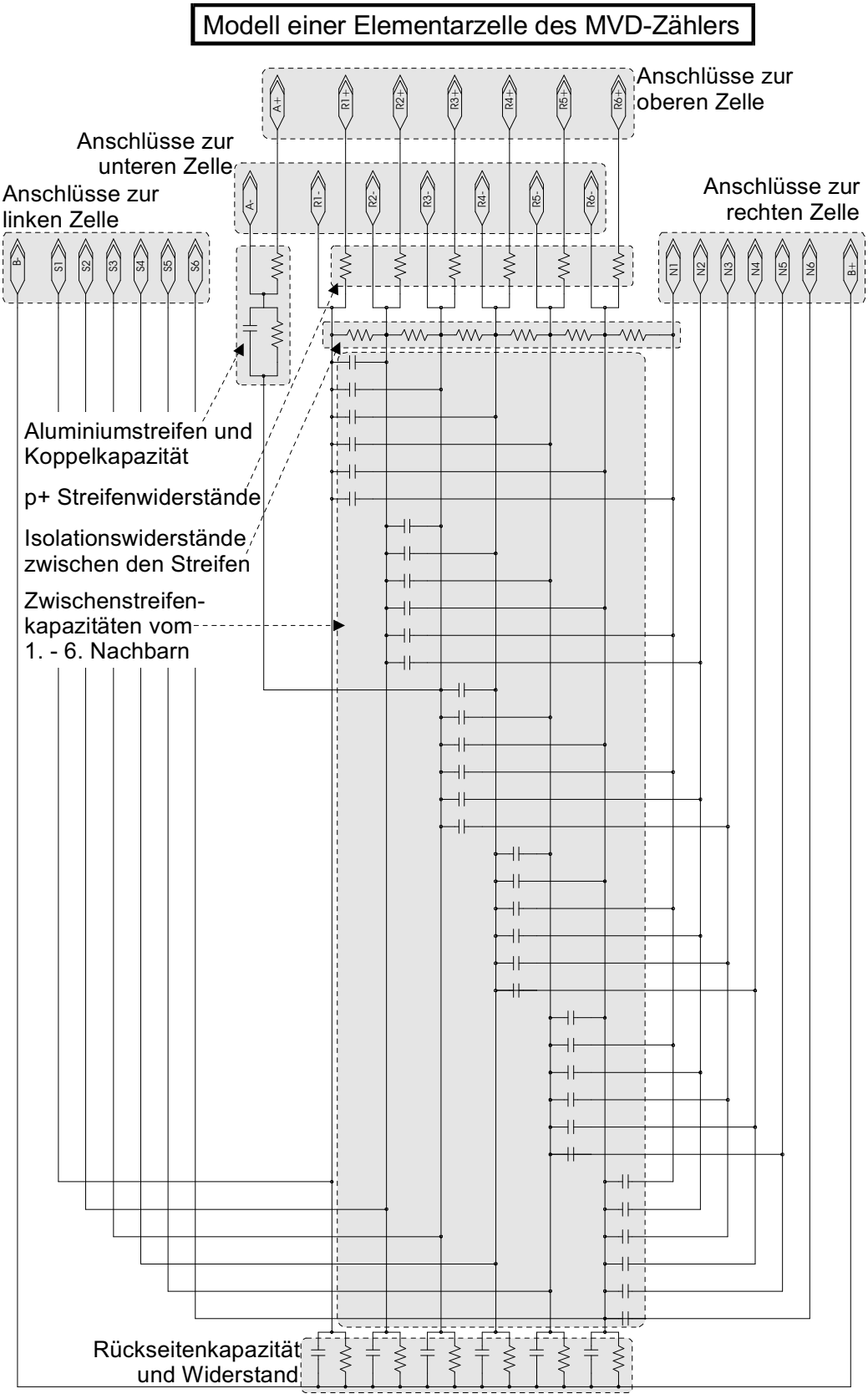

Abbildung 4.6: PSpice®-Elementarzelle des MVD-Zählers

sichtigt und Werte vom 2. - 6. Nachbarn gleich null gesetzt. Dieses Modell ist das Standardmodell der kapazitiven Ladungsteilung.

- Das Cattaneo-Modell
  Dieses Modell entstammt der Arbeit P.W. Cattaneos [Cat87]. Sie beruht auf Berechnungen mit der Methode der konformen Abbildungen. Die von ihm durchgeführten Berechnungen bis zum 7. Nachbarn sind umfangreich und werden deshalb hier nicht erwähnt. Die berechneten Werte lassen sich auf den MVD-Zähler umrechnen, da die Geometrie der Zähler verwandt ist (Dicke 280 μm, Streifenabstand 20 μm, Streifenbreite 10 μm). Als Eichwerte werden die Kapazitätsmessungen an der Fingerstreifenstruktur verwendet.

- Das empirische Modell
  Auf der Grundlage der hier gesammelten Erfahrungen wurde aus den Simulationen ein weiteres Modell mit dem Ziel entwickelt, die Ergebnisse des Teststrahls anzunähern. Ausgehend von Kapazitätsstreifenmessungen an Upilexfolien, bei denen sich bei änlicher Geometrie zeigte, daß die Kapazität zum zweiten Nachbarn nur ein zehntel des Wertes zum direkten Nachbarn beträgt, testete man verschiedene abfallende Wertefolgen für den dritten bis sechsten Nachbarn und wählte eine Kombination.

Die Werte der einzelnen Modelle sind graphisch in Abb. 4.7 dargestellt.

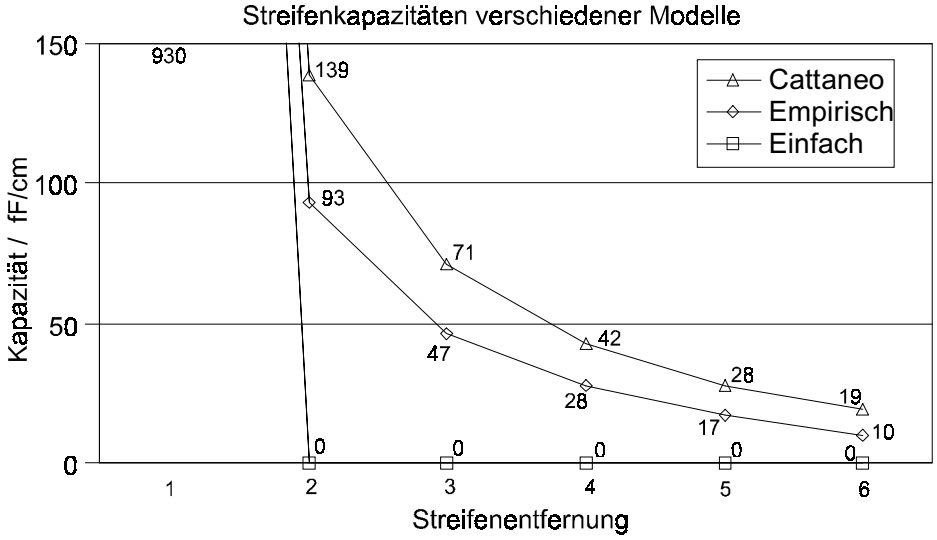

Abbildung 4.7: Modelle von Streifenkapazitäten nicht direkter Nachbarn als Funktion der Entfernung.

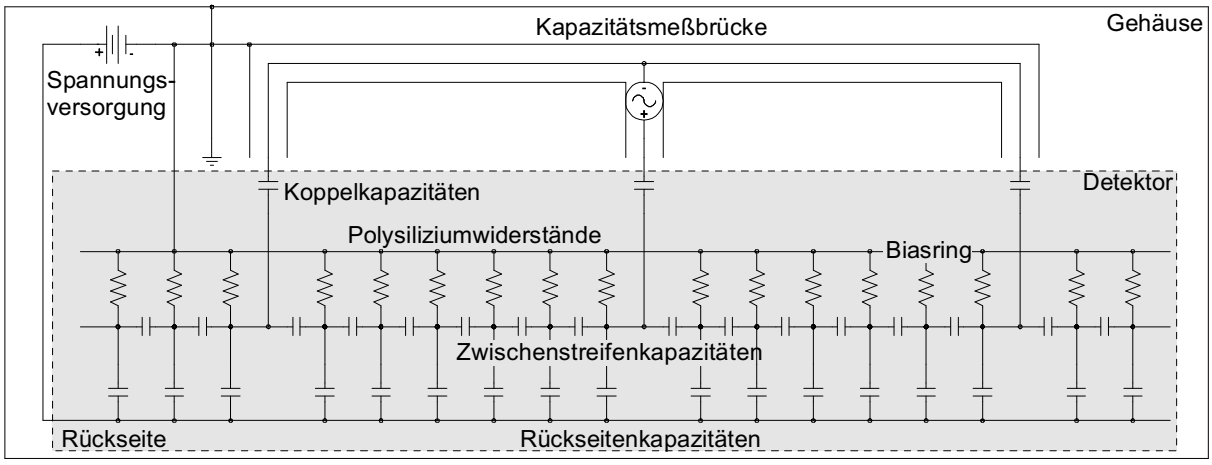

Abbildung 4.8: Prinzip der Kapazitätsstreifenmessung am Zähler: Der Detektor wird durch die Spannungsquelle über Rückseite und Biasring verarmt, die Innenleiter der Kapazitätsmeßbrücke sind mit den Aluminiumstreifen (Koppelkapazitäten) verbunden. Die Zwischenstreifenkapazitäten sind nur für direkte Nachbarstreifen gezeichnet.

4.5 Kapazitätsmessung am MVD-Zähler

Die Modelle können mit einer Messung am Zähler verglichen werden. Kontaktiert werden auf dem Zähler drei benachbarte Aluminiumstreifen und es wird die Kapazität (Parallelmodus) vom mittleren zu den beiden äußeren Streifen als Funktion der Frequenz gemessen. Diese Messung wird genauso mit den drei Modellen simuliert. Ein Prinzipschaltbild der Messung und das Ergebnis sind zu sehen in Abb. 4.8 und 4.9.

Im Bereich von 100 kHz bis 100 MHz zeigen die Simulationen Plateaus in unterschiedlicher Höhe als Folge unterschiedlicher Werte der Zwischenstreifenkapazitäten. Über 100 MHz fällt bei allen Modellen die Kapazität auf null ab, da bei sehr hohen Frequenzen der Aluminiumstreifenwiderstand das Wechselsignal dämpft (Tiefpaß). Bei Frequenzen unterhalb 100 kHz simuliert PSpice® einen Anstieg auf 17,5 pF/cm, was dem Ergebnis einer kombinierten Serien- und Parallelschaltung von drei Koppelkapazitäten C_c entspricht. Ursache ist der bei niedrigen Frequenzen eintretende Kurzschluß aller p^+-Streifen über die Polysiliziumwiderstände und den Biasring.

Die Messung zeigt zwischen 100 kHz und 1 MHz ein Plateau. Bei höheren Frequenzen verursachen Streukapazitäten der Zuleitungskabel einen starken Anstieg, während bei niedrigeren Frequenzen als 100 kHz die Kapazität scheinbar abfällt, was folgenden Grund hat: Für die Messung muß der Zähler verarmt sein. Die Biasspannung wird zwischen Rückseite und Biasring angeschlossen. Der Biasring und die Außenleiter der Spannungsquelle und der Kapazitätsmeßbrücke sind deshalb über das Gehäuse kurzgeschlossen (virtuelle Masse). Der bei niedrigen Frequenzen eintretende Kurzschluß zwischen Biasring und allen p^+-Streifen verbindet dann Innen- und Außenleiter der Kapazitätsmeßbrücke über die Koppelkapazitäten und verhindert eine sinnvolle Messung (siehe Kap. 4.1.1).

Die Modelle zeigen ein schlüssiges Verhalten, die Messung bestätigt im geeigneten

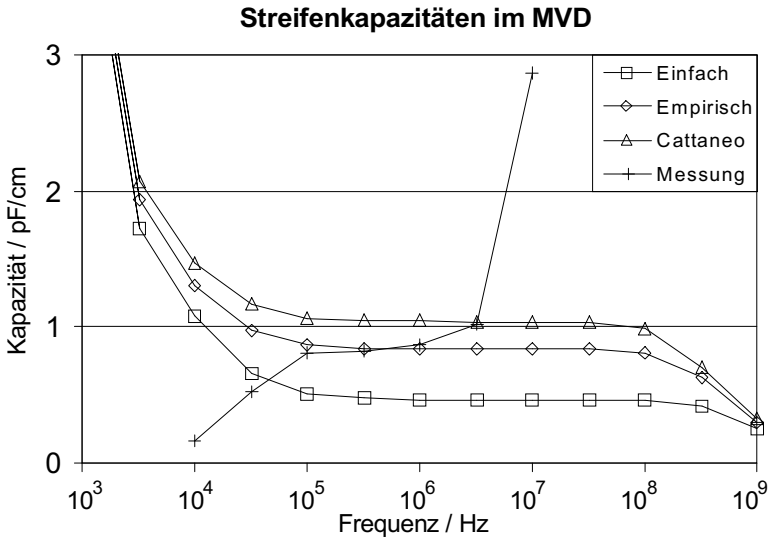

Abbildung 4.9: Streifenkapazitäten am MVD: Vergleich Simulation/Messung anhand einer Kapazitätsmessung zwischen 3 benachbarten Aluminiumstreifen.

Frequenzbereich die Simulation. Während das einfache Modell erwartungsgemäß einen zu kleinen Wert errechnet (0,47 pF/cm), liegt Cattaneos Modell (1,04 pF/cm) 27 % über der Messung (0,82 pF/cm). Das empirische Modell (0,84 pF/cm) weicht nur 2,4 % vom Meßwert bei 300 kHz ab, was innerhalb einer geschätzten Meßgenauigkeit von (0,10 pF/cm) liegt.

4.6 Signalanalysen

Für eine Transientenanalyse der Ladungsteilung im BMVD-Zähler benötigt man eine Abschätzung der Signalform, die durch ein durchfliegendes Teilchen entsteht, und ein Modell der Eingangselektronik des HELIX.

4.6.1 Die Signalform

Die hier dargelegte Abschätzung der Signalform berechnet den influenzierten Strom als Funktion der Zeit, den ein minimal ionisierendes Teilchen bei der senkrechten Bewegung durch einen Zähler erzeugt. Die entstehenden Ladungen seien gleichmäßig entlang der Teilchenspur verteilt. Die Ladungsträgerbeweglichkeiten μ_e und μ_h seien feldunabhängig. Die Streifen am pn-Übergang seien ersetzt durch eine großflächige Diode.

Ausgehend von der eindimensionalen Poissongleichung

$$-\frac{d^2\varphi}{dz^2} = \frac{dE}{dz} = \frac{\rho_c(z)}{\epsilon_0 \epsilon_{Si}} \tag{4.11}$$

mit der Ladungsträgerdichte $\rho_c(z)$ ergibt sich für einen abrupten pn-Übergang mit konstanter Dotierung auf der n-Seite der verarmten Region ($0 < z < d$)

$$\frac{dE}{dz} = \frac{e \cdot N_d}{\epsilon_0 \epsilon_{Si}}. \tag{4.12}$$

Dabei ist N_d die Dotierung auf der n-Seite, e die Elementarladung, E das elekrische Feld und z die Raumachse durch den Zähler [Sze81]. Dies führt zu einem elektrischen Feld der Form [Fre72]

$$E(z) = \frac{2 \cdot U_{fdv}}{d}\left(1 - \frac{z}{d}\right) + \frac{U_{Bi} - U_{fdv}}{d}. \tag{4.13}$$

Mit der Dicke der Verarmungsschicht d, der Verarmungsspannung U_{fdv} und der angelegten Spannung U_{Bi} ist der Feldverlauf auf der n-Seite des Zählers eindeutig definiert. Eine elektrische Ladung bewegt sich in diesem Feld $E(z)$ nach dem Ohmschen Gesetz mit der Geschwindigkeit

$$v_{e,h}(z) = \mu_{e,h} \cdot E(z), \tag{4.14}$$

ist diese Ladung am Ort z_0 zur Zeit $t = 0$ entstanden, so bewegt sie sich mit

$$v_{e,h}(t) = v_{e,h}(z_0) e^{\mp \frac{t}{\tau_{e,h}}}. \tag{4.15}$$

Dabei ist

$$\tau_{e,h} = \frac{d^2}{2U_{fdv} \cdot \mu_{e,h}} \tag{4.16}$$

die dielektrische Relaxationszeit für Elektronen (e) und Löcher (h). Die Ladungssammelzeiten ergeben sich mit $R = \frac{U_{Bi} - U_{fdv}}{2U_{fdv}}$ durch Integration von Glg. 4.15 zu:

$$t_e = \tau_e \ln\left[1 + \left(\frac{d - z_0}{d}\right) \cdot \frac{1}{R}\right] \tag{4.17}$$

$$t_h = \tau_h \ln\left[\frac{1 + R}{1 + R - \frac{z_0}{d}}\right]. \tag{4.18}$$

Abb. 4.10 zeigt die Zeit t_h als Funktion des Entstehungsorts z_0 und des Spannungsverhältnisses $\frac{U_{Bi}}{U_{fdv}}$, die Löcher für die Bewegung bis zum pn-Übergang benötigen.

Ausgehend von Ramos Theorem [Ram39][Cav63] ist der influenzierte Strom i durch eine bewegte Ladung q

$$i(t) = q\frac{v(t)}{d}. \tag{4.19}$$

Aus den Glgn. 4.13, 4.15 und 4.19 erhält man den influenzierten Strom als Funktion von Entstehungsort und Zeit

$$i_{e,h}(t, z_0) = \frac{q_{e,h}}{\tau_{e,h}} \left(\frac{d - z_0}{d} + R \right) e^{\mp \frac{t}{\tau_{e,h}}}, \text{ mit } t \leq t_{e,h}. \tag{4.20}$$

Die Integration über die gesamte Ladungswolke von $Q_{mip} = 24000\, e$ liefert den gesamten Strombeitrag für Elektronen bzw. Löcher [Fre72]

$$I_{e,h}(t) = \frac{Q_{mip}}{d \cdot \tau_{e,h}} e^{\mp \frac{t}{\tau_{e,h}}} \int_{u_{e,h}}^{o_{e,h}} \left(\frac{d - z_0}{d} + R \right) dz_0 \tag{4.21}$$

mit den zeitabhängigen Integrationsgrenzen

$$u_e = 0 \tag{4.22}$$

$$o_e = d \left[1 + R \left(1 - e^{+\frac{t}{\tau_e}} \right) \right] \tag{4.23}$$

$$u_h = d \left(1 + R \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_h}} \right) \tag{4.24}$$

$$o_h = d. \tag{4.25}$$

Abb. 4.11 zeigt Ströme $I_e + I_h$ für zwei Verhältnisse aus angelegter und Verarmungsspannung. Diese Pulsformen werden für alle weiteren Transientenanalysen verwendet.

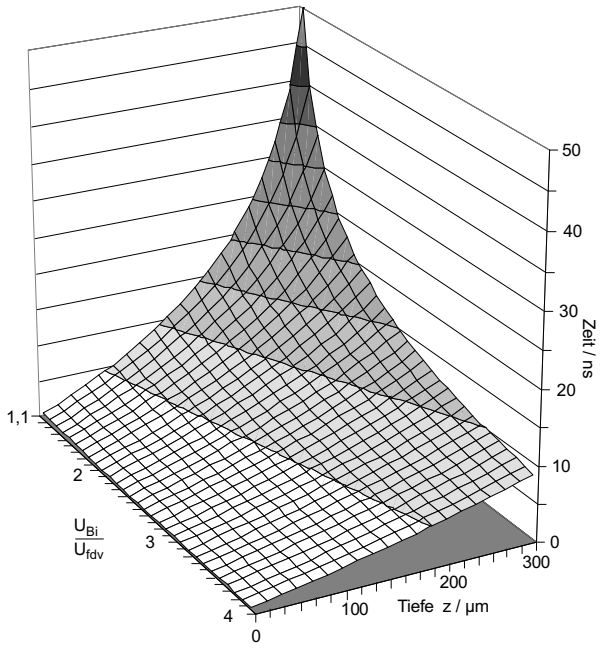

Abbildung 4.10: Driftzeit von Löchern bis zum *pn*-Übergang als Funktion des Entstehungsortes z_0 und dem Verhältnis aus angelegter und Verarmungsspannung.

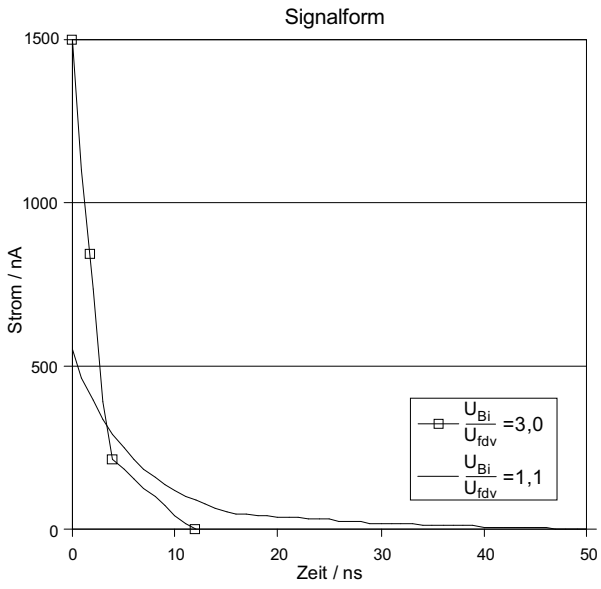

Abbildung 4.11: Eingangssignal für Transientenanalysen. Benutzt werden zwei Kurven für unterschiedliche Verhältnisse aus angelegter und Verarmungsspannung.

4.6.2 Helix-Modell

Das in den Simulationen zur Ladungsteilung und zum Signalfluß verwendete PSpice®-Modell ist ein Kleinsignalmodell eines Teils des Helix-Chips bestehend aus Vorverstärker und Signalformer. Es entstammt den Arbeiten W. Fallot-Burghardts [Fal98] und ist zu sehen in Abb. 4.12. Am Ausgang wird ein zeitabhängiges Signal erzeugt, dessen Maximum proportional zur am Auslesestreifen influenzierten Ladung ist.

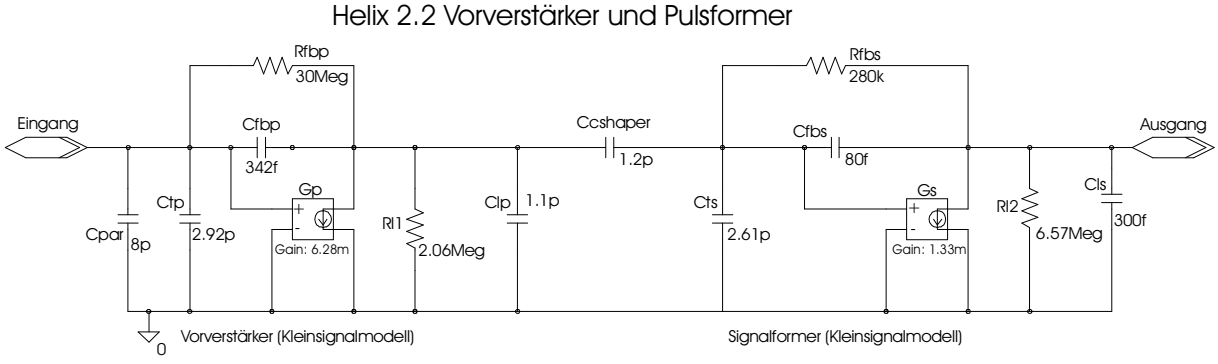

Abbildung 4.12: HELIX 2.2: Vorverstärker und Signalformer als Kleinsignalmodell

4.6.3 Ergebnisse der Signalsimulationen

Im PSpice®-Modell wird das zu influenzierende Signal zwischen die Zählerrückseite und einem Teilstück eines p^+-Streifens geschaltet. Von den zehn in der Simulation vorhandenen Auslesestreifen werden vier nebeneinanderliegende Streifen ausgelesen. Wegen der Symmetrie werden vier Simulationsläufe mit dem Ladungsimpuls auf Auslese-, ersten, zweiten und dritten Zwischenstreifen vorgenommen.

Während der Ladungssammlung kommt es zur Diffusion der Ladungsträger, sodaß einige Ladungen nicht auf dem Streifen ankommen, den die Spur des Teilchens kreuzt, sondern auf Nachbarstreifen. Deshalb wird das auf den vier Auslesestreifen influenzierte Signal korrigiert. Für die gezeigten Ergebnisse wurde angenommen, daß jeweils 15 % der Ladungen auf den Nachbarstreifen und 70 % auf dem eigentlichen Streifen eintreffen. Diese Abschätzung deckt sich mit Berechnungen zur Diffusion von Ladungsträgern in Silizium [Fei97].

4.6.3.1 Einfluß der Signalform

Für jedes Modell von Zwischenstreifenkapazitäten wurden zwei verschiedene Signalformen verwendet, die in Kap. 4.6.1 abgeschätzt wurden. Kein Modell zeigte signifikante Unterschiede bei Rückseitenverlusten oder Übersprechen, die Absolutwerte waren bei dem langsamen Signal (10 % über Verarmung) durchgehend um 5 % niedriger als beim schnellen Signal (200 % über Verarmung).

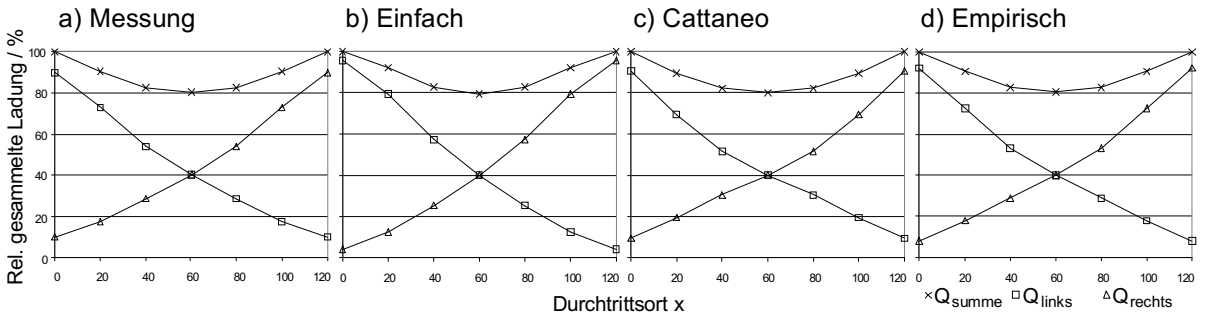

Abbildung 4.13: Die Ladungsteilung als Funktion des Durchtrittsortes x: Die relative gesammelte Ladung für den linken, rechten und die Summe beider Streifen normiert auf die Summe bei Durchtritt durch $x = 0$ (Auslesestreifen) für a) Meßergebnis aus dem Teststrahl, b) Simulation mit dem einfachen Modell, c) Simulation mit dem Cattaneo-Modell, d) Simulation mit dem empirischen Modell.

4.6.3.2 Die Ladungsteilung

Trägt man die influenzierte Ladung auf den Auslesestreifen um den Durchtrittsort gegen den Ort auf, so erhält man ein Ladungsteilungsdiagramm. Dies ist zu sehen in den Abb. 4.13a-d und zeigt das Meßergebnis aus dem Teststrahl sowie die Simulationsergebnisse für die drei Kapazitätsmodelle. Die Unterschiede sind sehr gering, alle Modelle zeigen eine funktionierende Ladungsteilung. Das einfache Modell zeigt wegen nicht vorhandener Kapazitäten zu nicht direkten Nachbarstreifen ein geringeres Übersprechen.

4.6.3.3 Rückseitenverluste

Als Rückseitenverlust $Q_B(x)$ definiert man die relative Differenz der gesammelten Ladungen für $x = 0$ und x, d.h. die gesammelte Ladung bei Durchgang durch einen Auslesestreifen und bei Durchgang an einem anderen Ort.

$$Q_B(x) = 1 - \frac{Q_{sum,x}}{Q_{sum,0}} \tag{4.26}$$

Abb. 4.14 zeigt die Ergebnisse von Messung und Simulation des Rückseitenverlusts Q_B. Die Verluste sind um so höher, je geringer die Zwischenstreifenkapazitäten gewählt sind. Während das Maximum der Verluste beim einfachen Modell 41 % zu groß ist, weichen das Cattaneo-Modell und das empirische Modell jeweils 4 % von der Messung ab.

4.6.3.4 η-Verteilung

Der Standardalgorithmus zur Berechnung des Durchtrittsortes ist, aus den beiden signalstärksten Kanälen den Ort zu interpolieren. Man definiert

$$\eta = \frac{Q_R}{Q_L + Q_R}, \tag{4.27}$$

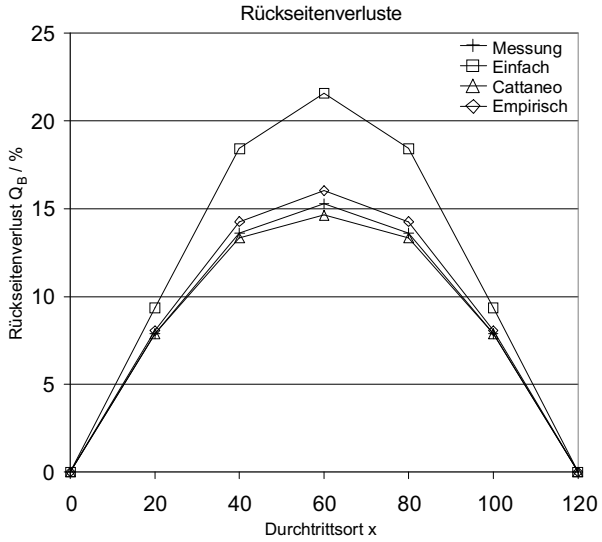

Abbildung 4.14: Rückseitenverluste Q_B in Prozent: Vergleich der Simulation der drei Modelle mit der Teststrahlmessung.

wobei Q_R und Q_L die auf dem rechten und linken Auslesestreifen influenzierte Ladung ist. Die gesammelten Ereignisse verteilen sich nicht gleichmäßig auf η, sondern die Verteilungsfunktion $n(\eta)$ der Ereignisse wird zur Korrektur der Position benutzt:

$$f(\eta) = \frac{\int_0^\eta n(\eta')d\eta'}{\int_0^1 n(\eta')d\eta'} \tag{4.28}$$

$$x = p \cdot f(\eta) \tag{4.29}$$

Dabei ist p der Auslesestreifenabstand und x der Abstand der rekonstruierten Position vom linken Auslesestreifen.

Die Abb. 4.15a-d zeigen die gemessene und die simulierten Verteilungsfunktionen $n(\eta)$. Die Form der Verteilungsfunktion wird bestimmt durch die Zwischenstreifenkapazitäten nicht direkter Nachbarn. Im einfachen Modell kommt es zur Anhäufung von Ereignissen direkt neben den Auslesestreifen; dieser Effekt ist bei den beiden anderen Modellen kleiner. Simulationen mit noch höheren Kapazitäten zu nicht direkten Nachbarn zeigten sogar eine Häufung von Signalen bei $\eta = 0{,}5$. Der Vergleich mit Teststrahldaten ist schwierig, da verschiedene Messungen verschiedene Ergebnisse brachten. Die Simulationen können keine so detaillierten Informationen enthalten wie das Teststrahlergebnis, in denen die Zwischenstreifenstruktur zu sehen ist.

4.6.3.5 Übersprechen

Übersprechen im Detektor ist die Eigenschaft, daß das Signal nicht nur auf den zwei direkt benachbarten Auslesestreifen influenziert wird, sondern auch auf weiteren Streifen ein Signal zu erkennen ist. Die endliche Größe von Koppelkapazität und Eingangskapazität des

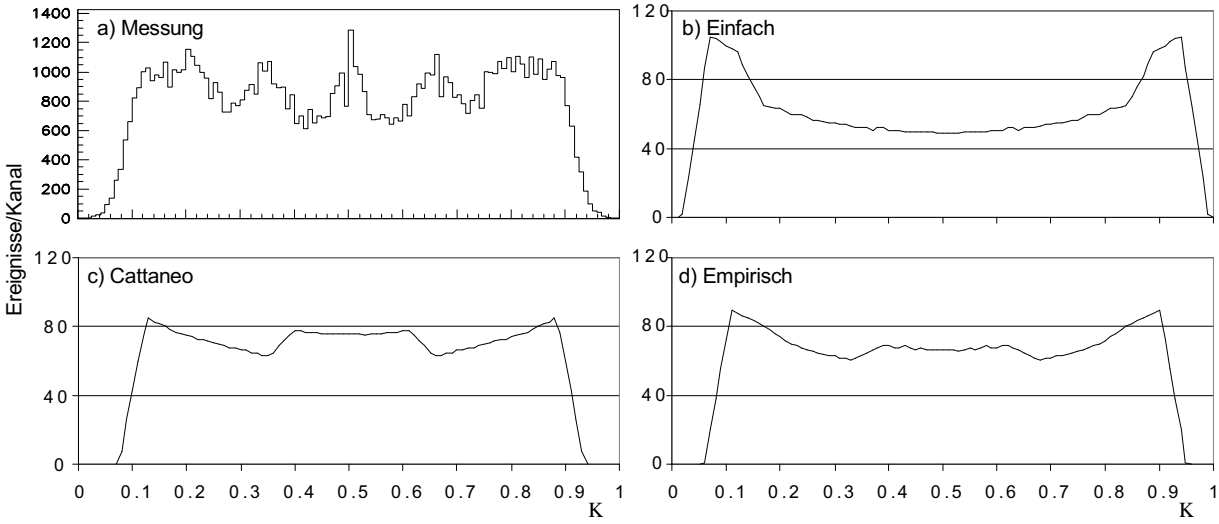

Abbildung 4.15: η-Verteilungen $n(\eta)$ (100 Kanäle): a) Meßergebnis aus dem Teststrahl (90000 Ereignisse), b) Simulation mit dem einfachen Modell, c) Simulation mit dem Cattaneo-Modell, d) Simulation mit dem empirischen Modell (jeweils 6000 Ereignisse). Die Simulationen sind gemittelt über 5 Kanäle.

Helix-Chips verhindern die vollständige Ladungssammlung. Außerdem werden durch Zwischenstreifenkapazitäten nicht direkter Nachbarn Ladungen über Auslesestreifen hinweg influenziert. Deshalb ist das Übersprechen eine sensitive Methode, die Modelle zu testen.

Übersprechen kann auf verschiedene Arten definiert werden. Üblich ist jedoch die Betrachtung der Summe des Übersprechens zu beiden Seiten als

$$Q_X = \frac{Q_1 + Q_4}{Q_2 + Q_3}, \tag{4.30}$$

mit der gesammelten Ladung Q_i auf Streifen i für ein zwischen Streifen 2 und 3 entstandenes Signal. Abb. 4.16 zeigt das Übersprechen Q_X als Funktion des Durchtrittsorts x. Während im einfachen Modell das Übersprechen kleiner ist und zur Mitte abfällt, steigt mit den Kapazitäten zwischen nicht direkten Nachbarn sowohl das gesamte Übersprechen als auch der relative Anteil in der Mitte. Das Cattaneo-Modell zeigt ein $5-14\,\%$ zu starkes Übersprechen mit stärkeren Abweichungen zwischen den Auslesestreifen. Das empirische Modell zeigt ein $14-16\,\%$ zu geringes Übersprechen mit ähnlicher Kurvenform wie die Teststrahldaten. Messungen im Teststrahl mit einem Halbmodul statt einer Einzeldiode, wie hier dargestellt, erhöhten das Übersprechen um bis zu drei weitere Prozentpunkte ($20\,\%$). Berücksichtigt man das durch das Upilexkabel verursachte Übersprechen, welches unabhängig vom Durchtrittsort ist, so gibt das empirische Modell eine gute Näherung des BMVD-Zählers wider.

Eine weitere Möglichkeit der Analyse des Übersprechens ist der relative Anteil gesammelter Ladung auf einem Auslesestreifen zur gesamten gesammelten Ladung als Funktion des Abstandes zum Durchtrittsort (Abb. 4.17). Das Ergebnis ist ähnlich zu den vorhe-

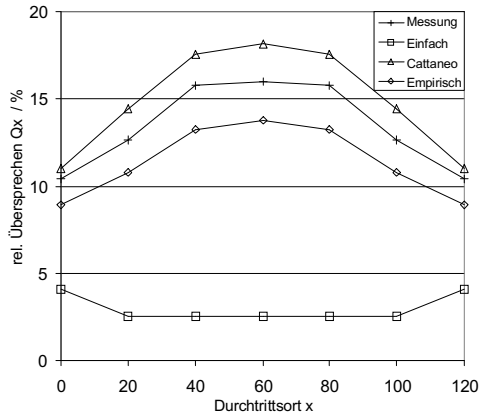

Abbildung 4.16: Beidseitiges Übersprechen als Funktion des Durchtrittsorts. Aufgetragen ist die Summe der Streifen 1+4 im Vergleich zu Streifen 2+3 in %.

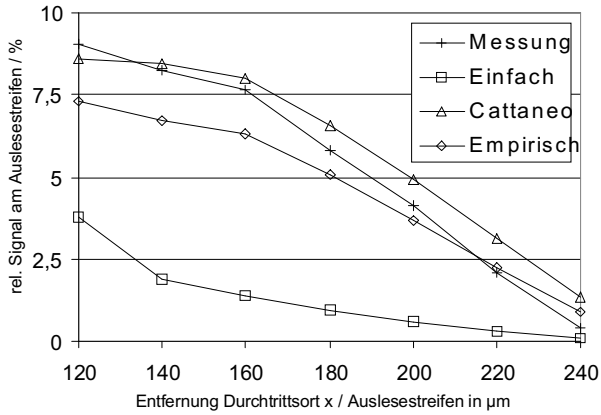

Abbildung 4.17: Einseitiges Übersprechen als Funktion des Abstandes zwischen Durchtrittsort und Auslesestreifen. Aufgetragen ist die relative gesammelte Ladung im Vergleich zur Gesamtladung in %.

rigen, sowohl betreffend die Absolutwerte als auch den Kurvenverlauf. Der starke Abfall der Kurve der Meßdaten ist vermutlich auf den hohen Fehler zurückzuführen, der bei sehr kleinen Mengen gesammelter Ladung wegen des Rauschens ansteigt.

4.6.3.6 Signalfluß

Man möchte wissen, welchen Weg die influenzierte Ladung im Zähler bis zum Auslesestreifen nimmt. Koppelt das RC-Glied aus Streifenwiderstand und Zwischenstreifenkapazität das Signal eher entlang oder senkrecht zu den Streifen?

Um diese Frage zu beantworten, wurden die Daten der Transientenanalysen einzeln analysiert. Ausgehend vom einfachen Modell, in dem es nur Zwischenstreifenkapazitäten zwischen direkten Nachbarn gibt, wird der Strom durch jede Zwischenstreifenkapazität über die Zeit von $100\,ns$ aufintegriert und ist ein Maß für die influenzierte Ladung als Funktion des Ortes. Da die Streifen in zehn gleichlange Abschnitte unterteilt sind, kann jedem Streifenabschnitt ein Teil der Zwischenstreifenkapazität zugeordnet werden. Dies ist graphisch dargestellt in Abb. 4.18 und 4.19.

Für verschiedene Eingangssignale ergeben sich ähnliche Signalverteilungen entlang des durchquerten Streifens. Dieser ist der mittlere zwischen zwei Auslesestreifen (Abb. 4.18).

Eine Analyse der Abschnittskapazitäten einer gesamten Zelle zeigt Abb. 4.19. Während auf dem durchquerten Streifen die Ladung noch stark asymmetrisch influenziert ist, glättet sich dieses Verhalten bis zu den Auslesestreifen.

Eingangssignale, die direkt auf den p^+-Auslesestreifen simuliert werden, koppeln zu 86 % (einfaches Modell) direkt durch die Koppelkapazität im entsprechenden Streifenabschnitt.

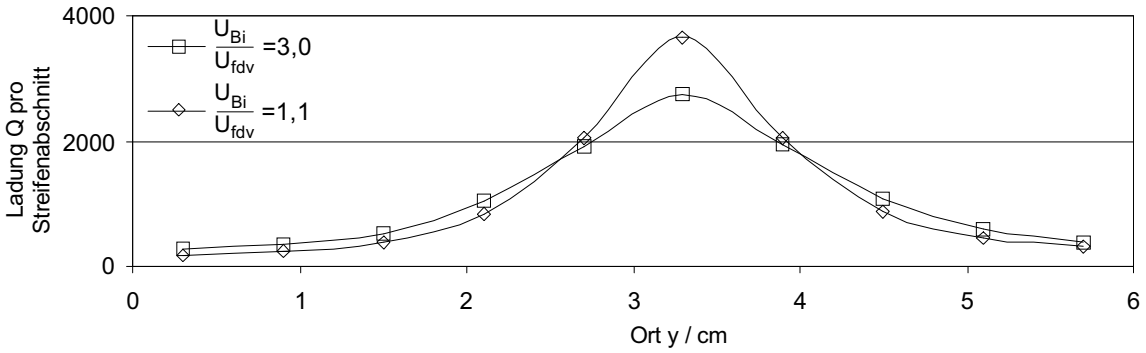

Abbildung 4.18: Integrierter Signalfluß durch die Zwischenstreifenkapazitäten vom durchquerten mittleren Zwischenstreifen als Funktion des Ortes entlang des Streifens.

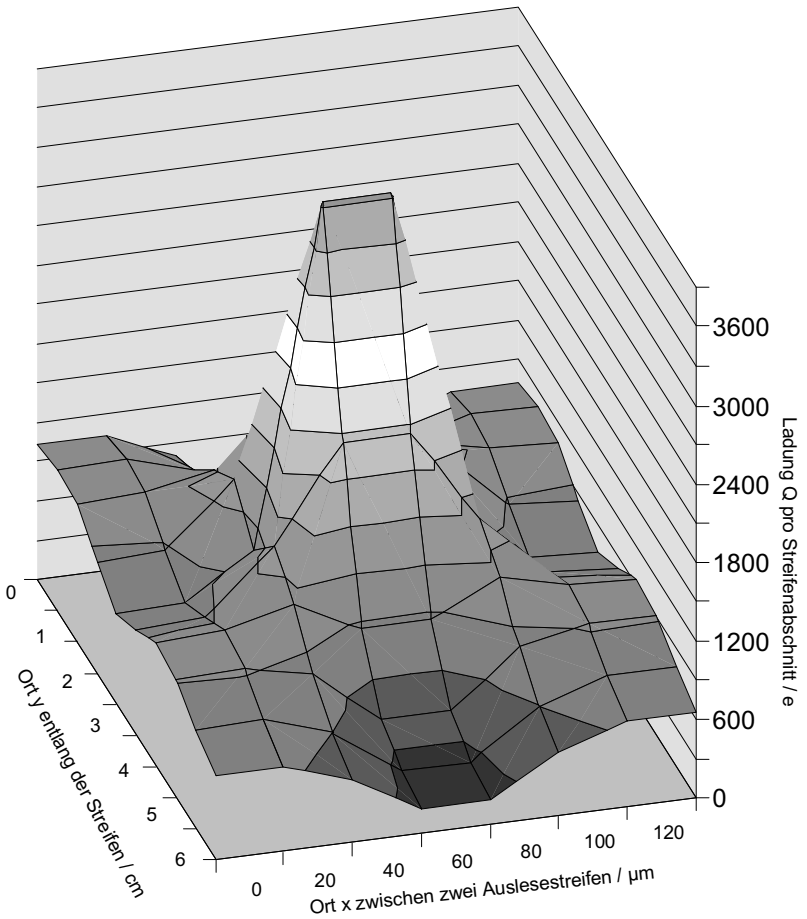

Abbildung 4.19: Integrierter Signalfluß durch die Zwischenstreifenkapazitäten und Koppelkapazitäten als Funktion des Ortes entlang des Streifens und des Ortes zwischen den Auslesestreifen. Die Schattierung dient einzig der besseren Höhendarstellung.

4.7 Ausblick

Die Informationen über die Ladungsteilung und die Wege der Signalinfluenz zeigen die Möglichkeiten auf, den BMVD-Zähler besser zu verstehen. Abänderungen des Modells erlauben Studien des FMVD-Zählers, bei dem die Streifenlänge auf einer Seite linear abnimmt und vermuten ließe, das asymmetrische Übersprecheffekte und Ladungsteilungen auftreten könnten. Möglich wären auch Simulationsstudien an Streifendefekten des Aluminiums oder der p^+-Streifen. Außerdem könnte abgeschätzt werden, ob die Bondflächen auf dem Zähler Veränderungen der Ladungsteilung erwarten lassen, da pro Bondfläche eine Koppelkapazitt von ca. $0{,}8\,pF$ zum darunterliegenden Zwischenstreifen besteht. Sowohl aufgrund der lokalen Konzentration als auch wegen der Gesamtgröße von $3\,pF$ (drei Bondflächen und zwei Proberflächen) gegenüber $5{,}7\,pF$ Zwischenstreifenkapazität besteht die Möglichkeit der Veränderung der Ladungsteilung vor allem in der Nähe des ersten Zwischenstreifens.

4.8 Zusammenfassung

Auf der Basis von Kapazitätsmessungen und Simulationen, deren Prinzipien erläutert wurden, konnte die Zwischenstreifenkapazität des BMVD-Zählers auf $C_{p^{12}p^{12}} = 0{,}93\,pF/cm$ und $C_{p^{12}p^{14}} = 1{,}07\,pF/cm$ bestimmt werden. Simulationen dieser Messungen bestätigten das Resultat und seine Frequenzabhängigkeit.

Kapazitätsmessungen zwischen drei benachbarten Aluminiumstreifen auf dem BMVD-Zähler wurden durchgeführt und simuliert. Die Messung ergab $C_{Al-Al} = 5{,}0\,pF$ und konnte mit geeigneten Simulationsmodellem reproduziert werden.

Mit Abschätzungen der Signalform, influenziert durch ein minimal ionisierendes Teilchen, und einem Helix-Modell konnten mit Hilfe von PSpice® Transientenanalysen durchgeführt werden. Die Simulationen zeigten Übereinstimmungen mit Meßdaten aus einem Teststrahlaufbau. Ladungsteilung, Rückseitenverluste, Übersprechen und η-Verteilungen wurden für verschiedene Zwischenstreifenkapazitätsmodelle untersucht.

Ein selbst entworfenes empirisches Modell simulierte folgende Ergebnisse: Die Kapazitätsmessung zwischen drei Aluminiumstreifen ergab $C_{Al-Al} = 5{,}12\,pF$, die Ladungsteilung weicht maximal 2,5 % und die Rückseitenverluste maximal 4 % von der Messung ab. Das Übersprechen liegt innerhalb der erwarteten Toleranz, welche unter anderem durch Upilex-Streukapazitäten verursacht wird. Die Abhängigkeit des Übersprechens vom Durchtrittsort weicht maximal 2 % von der Messung ab. Die η-Verteilung stimmt mit den Meßdaten überein, soweit die Meßdaten einen Vergleich zulassen.

Der Weg der Signalinfluenz im Zähler wurde untersucht und ein Ausblick auf weitere mögliche Studien und Analysen gegeben.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Die MVD-Gruppe des ZEUS-Experiments hat alle Zähler zum Bau des MVD-Detektors erhalten und eine Eingangsanalyse durchgeführt. Die Parameter, die den Zähler charakterisieren, wurden für alle Zähler ermittelt und dokumentiert.

Der BMVD-Zähler kann durch Proben mit Probernadeln beschädigt werden. Ein Proberkopf der Firma Süss wurde kalibriert. Beim Proben mit $15\,g$ auf Randflächen und $25\,g$ in der Mitte von Proberflächen besteht die Möglichkeit ansteigender Dunkelströme.

Ein Langzeittest für Mesungen des Dunkelstroms wurde geplant und konstruiert. Ein Großteil der Zähler ist vermessen worden und bis auf vier Zähler für funktionsfähig erklärt.

Die Serienproduktion von Halbmodulen wurde begonnen. Die dabei durchgeführten Qualitätskontrollen wurden erläutert und dargestellt. Fälle erhöhter Dunkelströme wurden nach mehreren Produktionsschritten erkannt. Überarbeitungen des Arbeitsschrittes und der benutzten Werkzeuge verringerten den Anteil beschädigter Zähler oder behoben die Probleme.

Es ist der Bau und Betrieb eines weiteren Langzeittests geplant, der in den Produktionsprozeß eingefügt werden kann.

Auf der Basis von Kapazitätsmessungen und Simulationen, deren Prinzipien erläutert wurden, konnte die Zwischenstreifenkapazität des BMVD-Zählers bestimmt werden. Simulationen dieser Messung bestätigten das Resultat und seine Frequenzabhängigkeit.

Kapazitätsmessungen zwischen drei benachbarten Aluminiumstreifen auf dem BMVD-Zähler wurden durchgeführt und simuliert. Die Messung konnte mit geeigneten Simulationsmodellen reproduziert werden.

Mit Abschätzungen der Signalform und einem Helix-Modell konnten Transientenanalysen durchgeführt werden. Die Simulationen zeigten Übereinstimmungen mit Meßdaten aus einem Teststrahlaufbau. Ladungsteilung, Rückseitenverluste, Übersprechen und η-

Verteilungen wurden für verschiedene Zwischenstreifenkapazitätsmodelle untersucht. Es wurde ein empirisches Modell entworfen, welches bei allen Analysen weniger als 5% von der Messung abwich. Weitere Analysen können folgen.

Anhang A

Working with probeheads

We suggest the following rules to avoid damage during the quality control of the detectors:

- Make sure the needles are not broken. In the case of doubt inspect the needles under the microscope before starting a measurement series.
- Make sure weight calibration for given height is known. In the case of doubt calibrate.
- Dont forget to move the chuck down as the height of the balance before calibrating.
- The recommended force is $5\,cN$.
- Dont probe at the edges of strips and pads, they are more vulnerable to damage.
- Verify that imprints of needles on the detector have the dimensions shown in fig. 3.5 on the top left side. If they are longer calibrate.
- In case of contact problems dont increase the force over $10\,cN$. Try to test a different position.
- In case of detector damage document the last steps and try to find the reason for damage.

Anhang B

Definition der Detektorklassen

Die Klassifikation der Detektoren ist willkürlich gewählt und hat keine physikalische Begründung. Folgend seien die Klassen definiert:

Seien A und B zwei Meßwerte des Dunkelstromes eines Detektors, A zeitlich vor B, sei $C = \frac{A-B}{B}$ die relative Änderung, dann ergeben sich die Klassen K aus folgendem Flußdiagramm in Abb. B.2. Dies ergibt dann die Zuordnung der Wertepaare in einer Ebene, graphisch dargestellt in Abb. B.1.

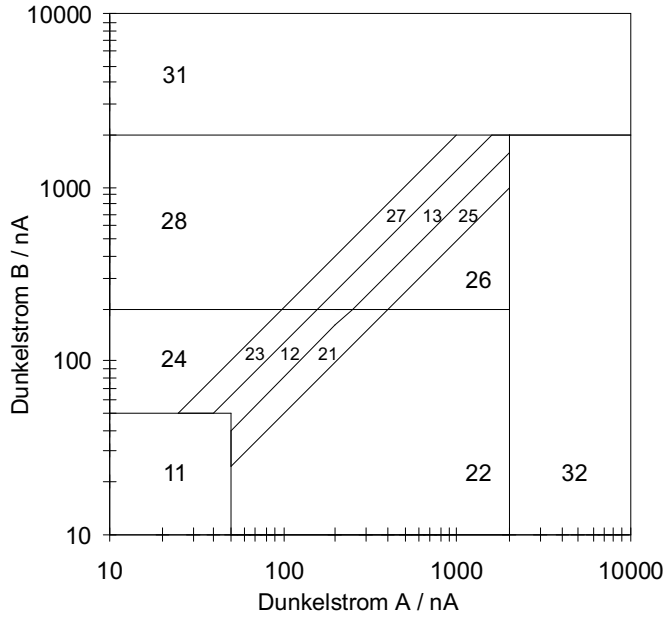

Abbildung B.1: Klassifikationsschema der BMVD-Zähler.

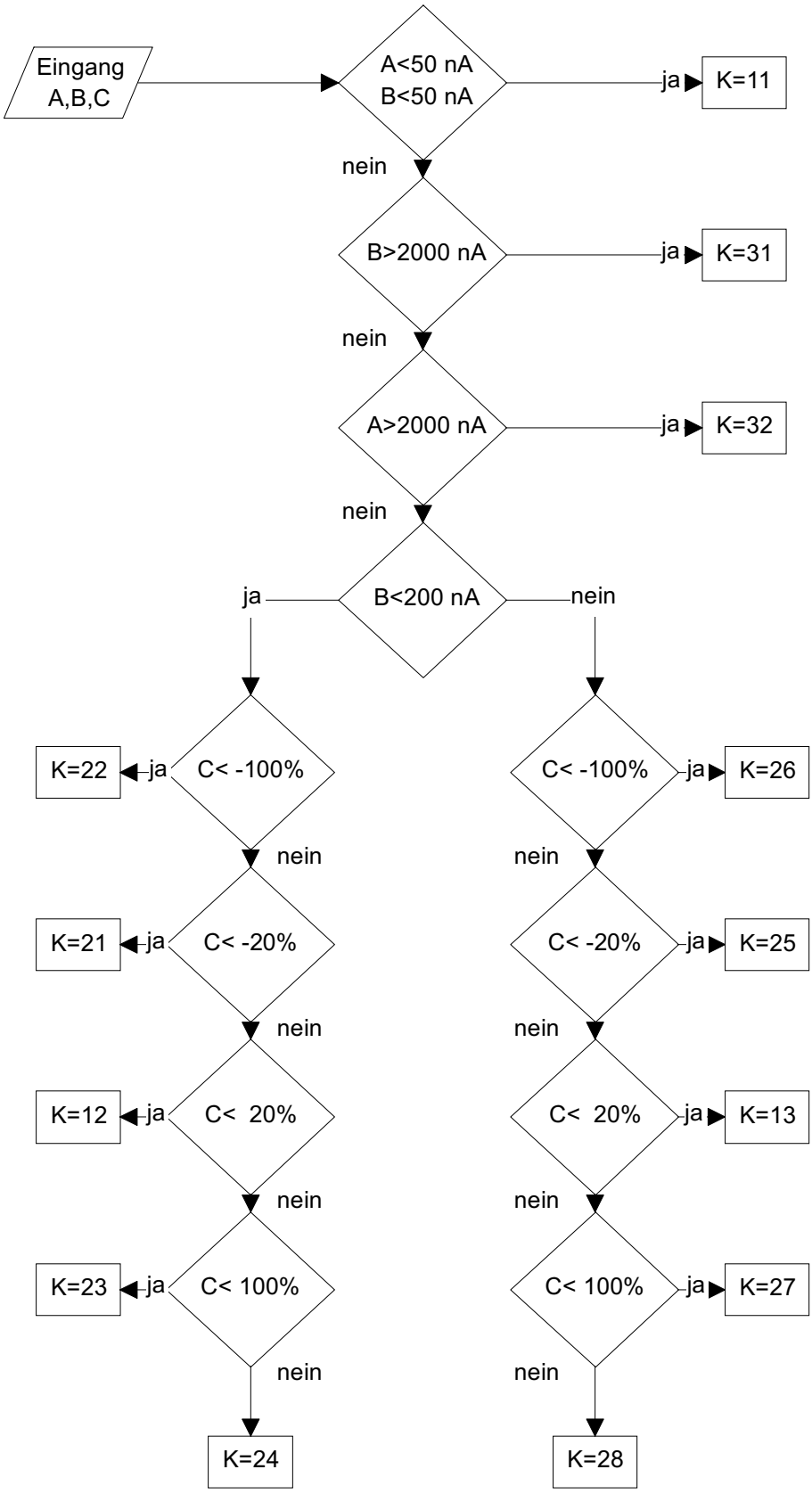

Abbildung B.2: Definition der Detektorklassen

Abbildungsverzeichnis

2.1 Ausschnitt des Querschnitts des BMVD-Zählers 10
2.2 Ausschnitt des BMVD-Zählers 11
2.3 Teststruktur des BMVD Zählers 12
2.4 MVD Längsschnitt 13
2.5 BMVD-Modul 14
2.6 BMVD-Modul, 3D-Ansicht 15
2.7 BMVD-Modul, endgültige Form 15
2.8 BMVD-Leiter, Frontansicht 15
2.9 BMVD-Leiter, Rückansicht 15
2.10 BMVD-Detektor, halb geschnitten 15
2.11 FMVD-Detektor, halb geschnitten 15
2.12 Querschnitt eines FMVD Reifens 16
2.13 BMVD-Detektor Querschnitt 17

3.1 Elektrischer Standardaufbau für I/V und C/V Messungen 20
3.2 Geometrie der Probernadel 21
3.3 Kalibrierung der Proberköpfe 22
3.4 Durchbruchspannung der Schutzpassivierung 23
3.5 Probernadelspuren 25
3.6 Theoretische Eindringtiefe in Aluminium 25
3.7 Aufbau des Langzeittests 26
3.8 Teststrahlaufbau 28
3.9 Kapazitätenhistogramm bei voller Verarmung 29
3.10 Verarmungsspannungen 31
3.11 Streifenprobleme 32
3.12 Langzeittest: Typisches Verhalten 33
3.13 Ergebnis des Langzeittests 34
3.14 Qualitätskontrolle Spacerkleben 36
3.15 Qualitätskontrolle Modulkleben 36
3.16 Qualitätskontrolle Upilexkleben 36
3.17 Qualitätskontrolle Bonden 36

4.1 Prinzipschaltung einer Kapazitätsmeßbrücke 39
4.2 Fingerstreifenstruktur 41
4.3 3D-Auschnitt der Fingerstreifenstruktur 43

4.4 PSpice®-Elementarzelle der Fingerstreifenstruktur 43
4.5 Simulationsergebnis Fingerstreifen 44
4.6 PSpice®-Elementarzelle des MVD-Zählers 45
4.7 Modelle von Streifenkapazitäten 46
4.8 Prinzip der Kapazitätsstreifenmessung am Zähler 47
4.9 Streifenkapazitäten am MVD 48
4.10 Driftzeit von Löchern 50
4.11 Eingangssignal für Transientenanalysen 50
4.12 HELIX Vorverstärker und Signalformer 51
4.13 Ladungsteilung 52
4.14 Rückseitenverluste 53
4.15 η-Verteilungen $n(\eta)$ 54
4.16 Beidseitiges Übersprechen 55
4.17 Einseitiges Übersprechen 55
4.18 Integrierter Signalfluß (2D) 56
4.19 Integrierter Signalfluß (3D) 56

B.1 Klassifikationsschema der Zähler 61
B.2 Definition der Detektorklassen 62

Tabellenverzeichnis

2.1 Spezifikationen des BMVD-Zählers 11

4.1 Simulationsvariablen der Fingerstreifenstruktur 42
4.2 Simulationsvariablen des MVD-Zählers 44

Literaturverzeichnis

[Bar98] G. Barichello et al., A B_4C-silicon target for the detection of neutrino interactions, CERN-EP-98-21 (1998), Submitted to Nuclear Instruments and Methodes in Physics Research A.

[Bei97] W. Beitz, Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau (S. C36), 19. Aufl., Springerverlag 1997, ISBN 3-540-62467-8.

[Cat87] P.W. Cattaneo, Model analysis and experimental charakterisation of a microstrip vertex detector for a e^+-e^--collider, Doktorarbeit, Universität Mailand, 1987.

[Cav63] G. Cavallieri, G. Fabri, E. Gatti, V. Svelto, Nuclear Instruments and Methods 21, 177, 1963.

[Col99] C. Coldewey, Private Kommunikation, 1999.

[Dam95] C.J.S. Damerell, Vertex detectors: The state of the art and future prospects, CLRC, RAL-P-95-008.

[Dan99] D. Dannheim, Test measurements on silicon strip detectors for the ZEUS microvertex detector, Diplomarbeit, Universität Hamburg, 1999.

[Fre72] E. Fretwurst, N. Haken, G. Lindström, J. Müller-Roos, W. Oelert, Untersuchungen an Silizium-Halbleiterdetektoren zur zeitlichen Struktur der Stromimpulse, Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft, Forschungsbericht K 72-11, 1972.

[Fei97] H. Feick, Radiation Tolerance of Silicon Particle Detectors for High-Energy-Physics Experiments, Dissertation, Universität Hamburg, 1997.

[Fal98] W. Fallot-Burghardt, A CMOS Mixed-Signal readout chip for the mircrostrip detectors of HERA-B, Dissertation, Heidelberg, 1998.

[Gro67] A.S. Grove, Physics and Technology of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, 1967.

[Her95] H. Hertz, Über die Berührung fester elastischer Körper, Ges. Werke, Bd. I, Leipzig, Barth, 1895.

[Joh94] T. Johnsen, Evaluation of test structures for position sensitive silicon detectors, Thesis submitted for the degree of Candidatus Scientiarum at the University of Bergen, Department of Physics, Oslo, June 1994.

[Koe85] U. Koetz et al., Silicon strip detectors with capacitive charge division, Nucl. Instr. and Meth. A235, 1985 (481).

[Kle92] K. Kleinknecht, Detektoren für Teilchenstrahlung, 3.Aufl., Teubner Studienbücher, ISBN 3-519-23058-5, 1992.

[Kue90] K. Küpfmüller, Eine Einführung in die theoretische Elektrotechnik, Springer, ISBN 3-540-51620-41990, 1990.

[Pac83] Hewlett Packard, HP4192A LF Impedance Analyser, Operation and service manual, Tokio, 1983.

[Ram39] S. Ramo, Currents induced by electron motion, Proc. I.R.E., 27, 584, 1939.

[Rie98a] K. Riechmann, Nucl. Instr. and Meth. A408, 1998 (221).

[Rie98b] K. Riechmann, Einsatz von Siliziumdetektoren in der Hochstrahlungsumgebung von HERA-B, Dissertation, Fakultät für Physik der Technischen Universität München, 1998.

[Sch98] U. Schneekloth, The HERA Luminosity Upgrade, ed. DESY HERA 98–05, 1998.

[Suss] http://www.suss.com/.

[Sze81] S.M. Sze, Physics of semiconductor devices, John Wiley & Sons, 1981.

[Wea65] R.C. Weast, Handbook of Chemistry and Physics, The Chemical Rubber Co., 1965.

[Zeu97] A Microvertex Detector for ZEUS, ZEUS-Note 97–006, 1997.