Lehrstuhl Experimentelle Physik V
Otto-Hahn-Straße 4
44227 Dortmund

Diplomarbeit am Lehrstuhl Experimentelle Physik V der Universität Dortmund

Untersuchungen zum Verhalten eines DEPFET-Detektorsystems

Jörn Vocht

2. Mai 2000

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsverbundes „Halbleiter-Mikrosensorik" der Universitäten Bochum, Bonn, Dortmund, Siegen und Wuppertal vom Ministerium für Schule, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (MSWF) und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Projekt „Strahlensensorik mit DEPFET-Pixelmatrizen" gefördert.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

Seit der Einführung von Halbleiterdetektoren in der Elementarteilchenphysik hat sich das Einsatzgebiet dieser Detektoren stark vergrößert. Zunehmend werden sie in anderen Forschungsgebieten, wie der Medizin, der Festkörperphysik und der Materialforschung, eingesetzt. Auch in der industriellen Fertigung werden verstärkt Halbleiterdetektoren z.B. für die Materialprüfung genutzt.

Im Bereich der Medizin werden Halbleiterdetektoren für diagnostische Zwecke verwendet. So beruhen z.B. die subtraktive Angiographie und die Computertomographie auf Halbleiterdetektorsystemen. Eine weitere Anwendung finden sie in der Autoradiographie.

Hierbei werden organische Proben mit radioaktiven Isotopen versetzt, um den Aufbau der Proben und die internen Ablauf von Stoffwechselvorgängen erforschen zu können. Dazu ist es notwendig, die emittierten Teilchen mit guter Energie- und Ortsauflösung nachzuweisen. Halbleiterdetektoren eignen sich hierfür sehr gut, da sie aufgrund einer geringen Energie (einige eV) pro Elektron-Loch-Paar eine gute Energieauflösung aufweisen. Durch ihren großen Wirkungsquerschnittes und damit verbundener hoher Stopwirkung für ionisierende Teilchen ist auch die Ortsauflösung gut. Wird als Halbleitermaterial Silizium verwendet, so ist es weiter möglich, ein Teil der Ausleseelektronik in den Detektor zu integrieren.

Gegenstand dieser Arbeit ist ein Detektorsystem, bei dem ein Halbleiterdetektor mit integrierter erster Verstärkerstufe Verwendung findet. Dieser sogenannte DEPFET besteht aus einem Sperrschicht-Feldeffekttransistor, der in einen Siliziumdetektor integriert ist [8, 9]. Durch die Methode der Seitwärtsdepletion [5] kann das Silizium vollständig verarmt werden, wobei sich ein Potentialminimum für Elektronen im Silizium ausbildet. Dieses kann zur Speicherung der Elektronen direkt im Halbleiter genutzt werden. Plaziert man direkt über die gespeicherten Elektronen einen Transistor, so wird der Transistorstrom durch die gespeicherte Ladung, die wie ein zusätzliches Gate auf den Transistor wirkt, gesteuert [11].

Mit solchen Detektoren wurde eine Energieauflösung von ENC (Equivalent Noise Charge)= $12e^-$ bei Raumtemperatur gemessen [15]. Die gute Energieauflösung bei Raumtemperatur macht diese Detektoren für die Biomedizin insbesondere für die Autoradiographie von organischen Proben interessant, da hier die Umgebungsbedingungen auf den Erhalt der organischen Proben optimiert werden müssen.

Das bevorzugte Isotop bei der Autoradiographie in der Biomedizin ist Tritium, da Wasserstoff in allen organischen Materialien in hohen Prozentsätzen vorkommt. Dieses radioaktive Isotope des Wasserstoffs emittiert β^--Teilchen mit einer Endpunktsenergie von $18,6\,\mathrm{keV}$ und einer mittleren Energie von $5,7\,\mathrm{keV}$ [16, Anhang A]. Wegen der geringen Energie der β^- muß der Detektor ein geringes Rauschen aufweisen, damit ein sicherer Nachweis noch möglich ist. Eine geringe Totschicht des Detektors ist ebenfalls notwendig, da die β^--Teilchen in Materie nur eine geringe Reichweite besitzen.

Im Forschungsverbund Mikrosensorik des Landes NRW (Universitäten Bochum, Bonn, Dortmund, Siegen und Wuppertal) wurde ein DEPFET-Bioscope [14] konzipiert und gebaut. Das geringe Rauschen des DEPFETs läßt eine erfolgreiche Verwendung dieses Detektors zum Nachweis von Tritium erwarten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein DEPFET-Bioscope an der Universität Dortmund aufgebaut und Untersuchungen zum Verhalten einer sogenannten DEPFET-Matrix und zu den Möglichkeiten der Radiographie gemacht. Bei der Radiographie wird das Objekt auf dem Detektor mit einer radioaktiven Quelle bestrahlt. Dadurch entstehen Schattenbilder, da die freie Fläche des Detektors von den ionisierenden Teilchen getroffen werden kann.

Im nachfolgenden zweiten Kapitel dieser Arbeit werden kurz die grundlegenden Konzepte, die im DEPFET-Detektor vereint werden, dargestellt.

Danach folgt im dritten Kapitel eine Einführung in die Eigenschaften des DEPFET-Detektors und der praktischen Realisierung, um diesen Detektor als bildgebendes System betreiben zu können.

Der Aufbau des DEPFET-Bioscopes und die Inbetriebnahme des System an der Universität Dortmund wird in Kapitel 4 beschrieben.

Die vorgenommenen Messungen und Analysen werden in Kapitel 5 darstellt. Es gliedert sich in zwei Teile. Zunächst werden Messungen und Analysen über die Ladungsverteilung in der Matrix gezeigt. Im zweiten Teil liegt der Schwerpunkt auf der Radiographie von Objekten.

In Kapitel 6 folgt eine kurze Beschreibung der Software, die zur Ansteuerung des System und zur Analyse der Daten entwickelt worden ist.

Als Abschluß dieser Arbeit wird eine Zusammenfassung und ein Ausblick in Kapitel 7 gegeben.

2 Grundlagen

2.1 Die Halbleiterdiode als Strahlendetektor

Eine Grenzfläche zwischen Halbleitermaterial mit entgegengesetzter Dotierung (pn-Grenzschicht) wird Halbleiterdiode genannt, da sie die Eigenschaft hat, je nach Polarität der angelegten Spannung den Strom zu leiten oder zu sperren. Beim Zusammenfügen der beiden entgegengesetzt dotierten Gebiete fließt zunächst ein Diffusionsstrom, der vom großen Konzentrationsgefälle der freien Ladungsträger in den dotierten Gebieten herrührt. Die beweglichen Ladungsträger diffundieren über die Grenzschicht und rekombinieren dort. Im Bereich der Grenzschicht bildet sich eine von Ladungsträgern verarmte Zone aus. In der p-Schicht bleiben die ortsfesten Akzeptoratome, die eine negative Raumladung bilden, und in der n-Schicht die ortsfesten Donatoratome, die eine positive Raumladung bilden, zurück. Somit wird ein elektrisches Feld aufgebaut, das der Diffusion der Ladungsträger entgegenwirkt. Es bildet sich ein Gleichgewichtszustand aus.

Im Gleichgewicht ist der resultierende Strom durch die Grenzfläche null, obwohl infolge des elektrischen Feldes dort ein Potentialsprung vorhanden ist. Das Potential, welches die Diffusion hemmt, wird eingeprägte Spannung[1] V_{bi} genannt und hängt von der Dotierung und der Temperatur ab [19]:

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right] \tag{2.1}$$

$N_{A,D}$	:	Akzeptoren- bzw. Donatorenkonzentration
n_i	:	intrinsische Ladungsträgerdichte
$q = e_0$	:	Elementarladung

Der Übergangsbereich, in dem sich keine freien Ladungsträger mehr befinden, wird Verarmungs-, Depletions- oder auch Raumladungszone genannt. Durch Anlegen einer zusätzlichen, zu V_{bi} gleichgerichteten Spannung V_r[2] kann man die Weite W der Verarmungszone gemäß Gleichung 2.2 vergrößern.

[1] built-in potential

[2] auch Sperrspannung genannt

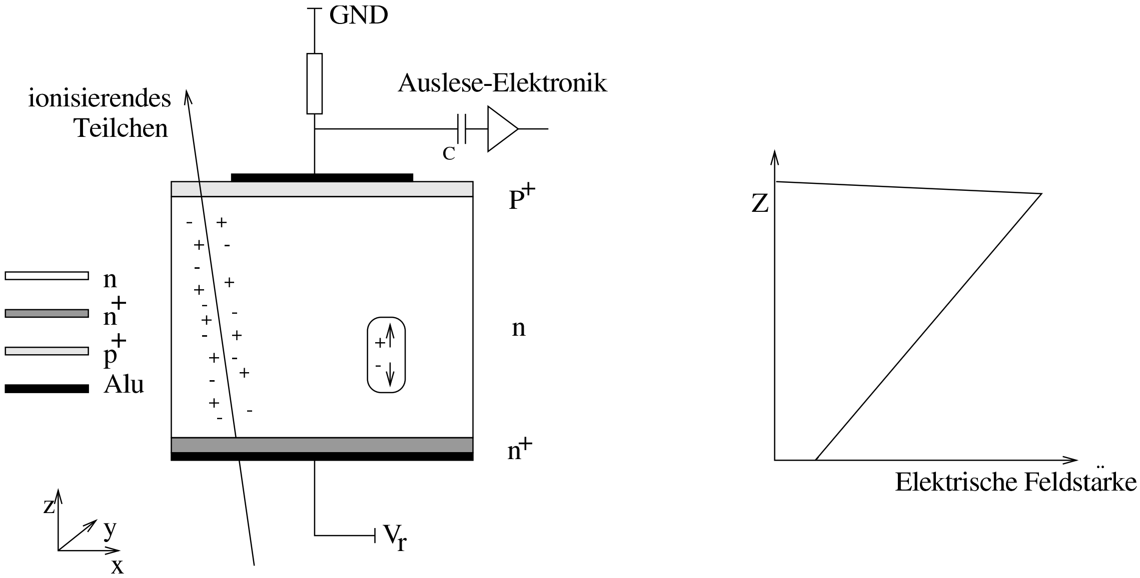


Abbildung 2.1: Prinzipielle Funktionsweise einer Halbleiterdiode als Strahlendetektor [13]

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r}{q}\left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}\right)(V_{bi} + V_r)} \tag{2.2}$$

V_r : Sperrspannung
q : Elementarladung
ϵ_r : Dielektrizitätskonstante

Durch die Wahl des Dotierungsverhältnisses zwischen Akzeptor und Donator kann man erreichen, daß sich die Verarmungszone unterschiedlich weit in die jeweiligen Gebiete ausdehnt, da die Verarmungsschicht stärker im schwächer dotiertem Material wächst. Durch eine hohe Sperrspannung und eine geeignete Dotierung kann die Verarmungszone über den kompletten Halbleiter ausgedehnt werden.

Als Detektor wird eine Halbleiterdiode nach folgendem Schema konstruiert:
Bei einer schwach n-dotierten Siliziumscheibe ($\approx 10^{12}\,\mathrm{cm}^{-3}$) wird eine Seite sehr hoch p-dotiert, wobei die Dicke der implantierten Schicht maximal 1 µm dick ist. Diese p^+-Dotierung liegt bei $\approx 10^{19}\,\mathrm{cm}^{-3}$, damit das Vordringen der Verarmungszone bis zum Aluminiumkontakt, an dem die Sperrspannung anliegt, verhindert wird. Dieses hätte eine Ladungsträgerinjektion und damit einen Durchbruch der Diode zur Folge. Aus demselben Grund wird auch der Aluminiumkontakt auf der n-Seite stets von einer hochdotierten n^+-Schicht abgeschirmt.

Für große Sperrspannungen ($|V_r| \gg |V_{bi}|$) und einen einseitig scharfen p^+n-

Übergang ($N_A \gg N_D$) vereinfacht sich die Gleichung 2.2 zu [19]

$$W \approx \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_r V_r}{q N_D}}. \tag{2.3}$$

Die Funktionsweise eines Halbleiterdetektors ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Beim Durchgang erzeugt ionisierende Strahlung in einem vollständig verarmten Detektor Ladungsträgerpaare. Diese werden durch das elektrische Feld an der Rekombination gehindert, driften zu den jeweiligen Elektroden und erzeugen dort ein Signal, welches durch die Ausleseelektronik nachgewiesen werden kann.

2.2 Das Prinzip der Seitwärtsdepletion

Das Prinzip der Seitwärtsdepletion, das erstmalig von Gatti und Rehak 1984 vorgestellt worden ist [5], ermöglicht eine vollständige Verarmung des Detektormaterials mit relativ niedrigen Spannungen und der Möglichkeit, ein Potentialminimum für Elektronen innerhalb des Halbleitermaterials zu erzeugen. Durch entsprechende Dotierung ist es nun möglich, das Potential für Elektronen innerhalb des Siliziums so zu gestalten, daß sich die erzeugten Elektronen in einem kleinen Volumenbereich des Halbleiters sammeln. Im folgenden wird nun das Prinzip der Seitwärtsdepletion anhand von n-Material beschrieben.

Abbildung 2.2 zeigt das Vorgehen bei der Seitwärtsdepletion [11]. Rechts in der Abbildung ist das Potential und die Feldstärke innerhalb des Materials graphisch dargestellt. Es werden Aluminiumkontakte, die durch Gebiete hoher Dotierung p^+ geschützt sind, auf der Ober- und Unterseite der Siliziumscheibe angebracht. Die gemeinsame n-Schicht wird über einen seitlich angebrachten n^+-dotierten Kontakt nach außen geführt. Dadurch ist es möglich, das Silizium von beiden Seiten zu verarmen. Werden die Spannungen an der Ober- und Unterseite zunächst gleich und negativ gewählt, so wird ausgehend von den Seiten das Material verarmt. Bei vollständiger Verarmung stellt sich ein Potentialminimum in der Mitte der Siliziumscheibe ein. Unter diesen Voraussetzungen erhält man als Lösung der eindimensionalen Poisson-Gleichung

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \phi(z) = -\frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} \tag{2.4}$$

einen parabelförmigen Potentialverlauf (Abbildung 2.2). Die im Material erzeugten Elektronen werden im Potentialminimum gesammelt. Mit $V_u = V_d = V(< 0)$, $V_{Substrat} = 0\,V$ und im Vergleich zum Substrat kleinen Substratkontakten gilt dann

$$V(x) = V + \frac{q N_D}{2\epsilon_0 \epsilon_r} \cdot x \cdot (d - x) \quad , \tag{2.5}$$

was mit

$$x_{min} = \frac{d}{2} \tag{2.6}$$

zu

$$V_{min} = V\left(x_{min}\right) = V + \frac{qN_D d^2}{8\epsilon_0 \epsilon_r} \tag{2.7}$$

umgeformt werden kann. Dabei ist V_u das Potential an der Scheibenoberseite, V_d das Potential an der Scheibenunterseite, N_D die Dotierungskonzentration, die homogen angenommen wird, d die Scheibendicke und $x_{min}\left(y\right)$ die Lage des Potentialminimums für Elektronen.

Wenn der Einfluß des Substratkontaktes auf das verarmte Gebiet vernachlässigbar ist, so hängt der Wert des Potentialminimums allein vom Potential an den p^+-Elektroden ab. Der zweite Summand in Gleichung 2.7 entspricht betragsmäßig der Depletionsspannung für die halbe Scheibendicke. V_{min} nimmt somit negative Werte an, wenn

$$V < -\frac{qN_D d^2}{8\epsilon_0 \epsilon_r} \tag{2.8}$$

gilt. In diesem Fall liegt eine Überdepletion vor.

Werden nun an der Ober- und Unterseite unterschiedliche Spannungen gegenüber dem Substrat angelegt, wird die Lage des Potentialminimums in Richtung der Seite mit dem positiveren Potential verschoben. Das Potential kann durch

$$V\left(x\right) = \frac{qN_D}{2\epsilon_0 \epsilon_r} \cdot x \cdot \left(d - x\right) + \frac{x}{d}\left(V_d - V_u\right) + V_u \tag{2.9}$$

beschrieben werden.
Das Potentialminimum für Elektronen liegt dann bei

$$x_{min} = \frac{d}{2} + \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{qN_D d}\left(V_d - V_u\right) \quad . \tag{2.10}$$

Bei dieser Konstellation hat das Potentialminimum den Wert

$$V_{min} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{2qN_D d^2}\left(V_d - V_u\right)^2 + \frac{qN_D d^2}{8\epsilon_r \epsilon_0} + \frac{V_d + V_u}{2} \quad . \tag{2.11}$$

Diese Möglichkeit, ein Potentialminimum für Elektronen an einer gewählten Stelle schaffen zu können, kann man auf vielfältige Weise nutzen. In der Halbleiterdriftkammer werden z.B. die p$^+$-Kontakte unterteilt und auf verschiedene Potentiale gesetzt. Dadurch bekommt die Potentialmulde eine Neigung und die Elektronen driften in die gewünschte Richtung.

Wenn man das Potentialminimum beidseitig begrenzt, bekommt man eine Potentialmulde, in der Elektronen gespeichert werden können. Diese Verschiebung macht man sich beim DEPFET [11] zunutze, indem man das Potentialminimum für Elektronen direkt unter den p-Kanal des Transistors plaziert. Die Elektronen in dieser Potentialmulde steuern den Strom im Transistorkanal. Deshalb wird diese Potentialmulde, in Analogie zum externen Gate, internes Gate genannt.

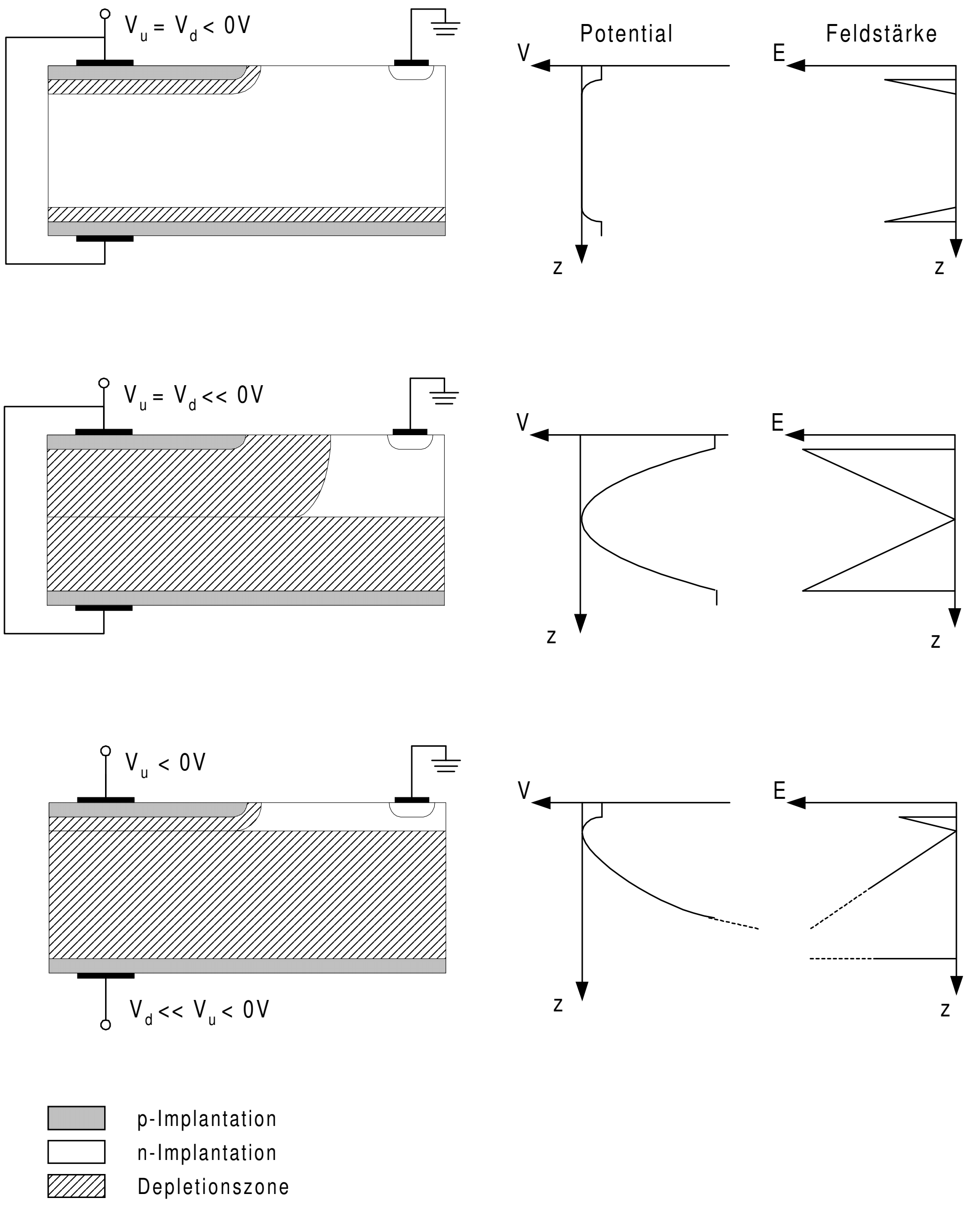


Abbildung 2.2: Darstellung des Prinzips der Seitwärtsdepletion [11]

2.3 Das Prinzip eines JFETs

Die Signale eines Detektors sind im allgemeinen zu schwach, um direkt durch die Ausleseelektronik verarbeitet werden zu können. Aus diesem Grund werden die Detektorsignale vorverstärkt. Die Qualität der Elektronik hat maßgeblich Einfluß auf das Rauschen und die Auslesequalität. Vorverstärker sind in der Regel auf Feldeffekttransistoren wie Metall-Oxid-Schicht-Feldeffekttransistoren (MOSFETs) oder Sperrschicht-Feldeffekttransistoren (JFETs) aufgebaut. Für den Einsatz als Vorverstärker eines Detektorsystems bieten JFETs die Vorteile, daß sie strahlenhärter und rauschärmer sind. Das Prinzip eines JFETs wird im folgenden anhand eines p-Kanal-JFETs in Silizium erläutert.

Ein Feldeffekttransistor ist im wesentlichen ein kapazitiv geregelter Widerstand. Ein einfacher Widerstand (Abbildung 2.3) in Silizium kann durch p-Dotierung einer Schicht an der Siliziumoberfläche erreicht werden. Das umgebende Material ist entgegengesetzt dotiert, damit der Widerstandswert nicht verfälscht wird.

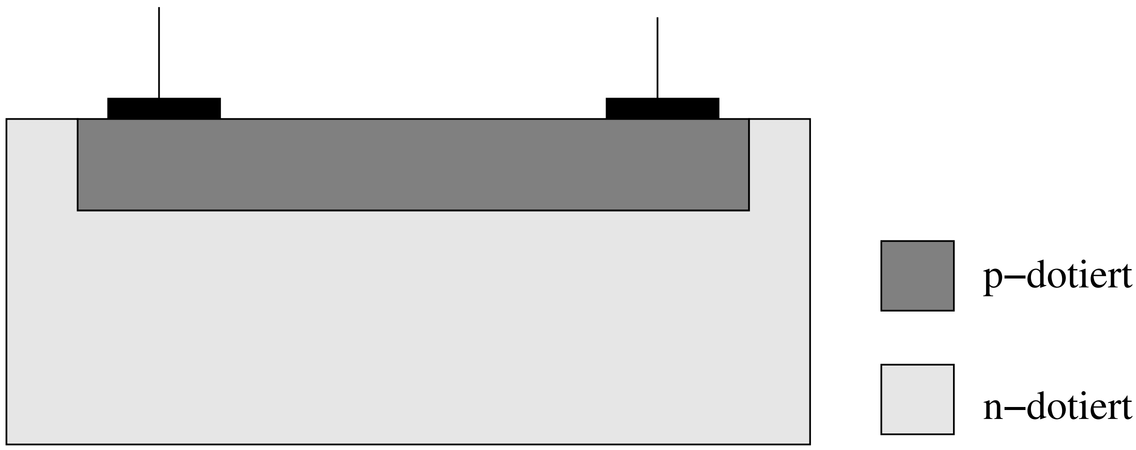


Abbildung 2.3: Durch Dotierung realisierter Widerstand in Silizium. Damit der Widerstandswert nicht verfälscht wird, ist das umgebende Gebiet entgegengesetzt dotiert.

Diese p-dotierte Schicht stellt den Kanal des Transistors dar. An den beiden Enden des Kanals wird eine p^+-Dotierung vorgenommen, und diese Implantation wird mit sperrschichtfreien Kontakten versehen. Der Kontakt, an dem der Strom[3] seinen Ursprung hat, wird als Source[4] bezeichnet. Der andere Kontakt wird als Drain[5] bezeichnet. Ein JFET ist ein unipolares Bauteil, das heißt, es trägt nur eine Ladungsträgerart zum Stromfluß bei. In einem p-Kanal wird der Ladungstransport

[3]technische Stromrichtung
[4]engl. für Quelle
[5]engl. für Senke, Abfluß

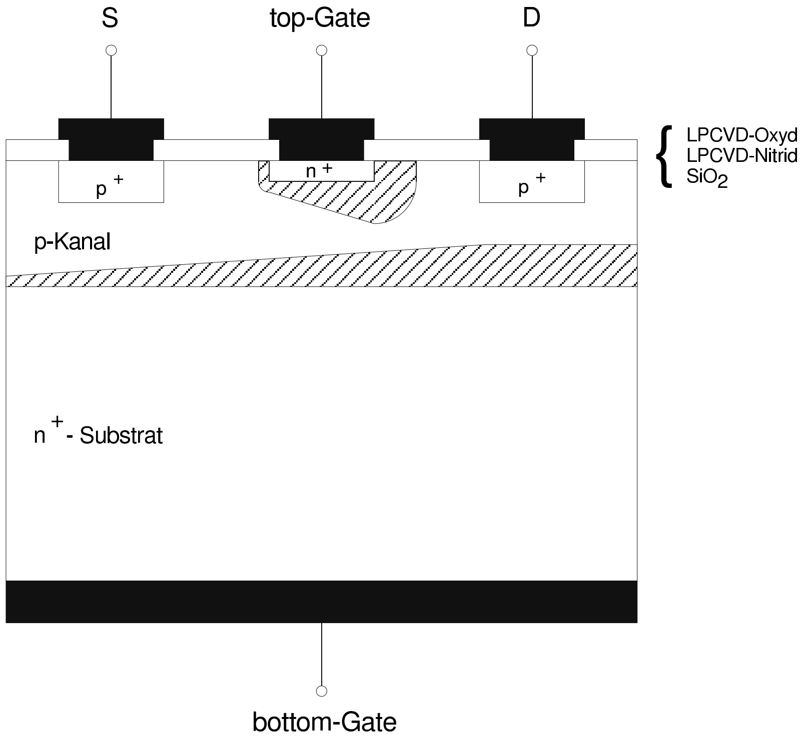


Abbildung 2.4: Abbildung eines p-Kanal-JFETs

durch Löcher bewerkstelligt. Das Potential der Source wird auf 0 V gesetzt, und alle anderen Potentiale werden auf die Source bezogen. Die Drain besitzt ein negatives Potential, das im Intervall [0 V, −7 V] liegt.

Zur Steuerung des Widerstands des Kanals und somit zur Steuerung des Transistorstroms bei konstanter Spannung zwischen Source und Drain, wird ein dritter Kontakt zwischen den beiden p^+-Kontakten implantiert (Abbildung 2.4). Dieser Kontakt besitzt entgegengesetzte Dotierung (n^+) und wird Gate[6] genannt. Die Anordnung Gate–Kanal stellt eine np-Diode dar. Damit der p-Kanal des Transistors isoliert bleibt, muß diese np-Diode in Sperrichtung betrieben werden. Dieses erfordert eine nichtnegative Spannung am Gate-Kontakt.

Da die np-Diode immer in Sperrichtung betrieben werden muß, ist ein JFET immer vom sogenannten Verarmungstyp[7]. Der Sperrstrom der np-Diode ist in den meisten Fällen vernachlässigbar, da er um einige Größenordnungen kleiner als der Strom durch den Transistor ist.

[6] engl. für Tor

[7] Grob werden die Feldeffekttransistoren in zwei Typen aufgeteilt. Die mit vorhandenem Kanal werden als selbstleitend bezeichnet. Sie heißen auch Feldeffekttransistoren vom Verarmungstyp, da das Anlegen einer Spannung am Gate-Kontakt eine Verarmung des Kanals zur Folge hat. Ein Transistor bei dem der Kanal erst durch Anlegen der Gate-Spannung geschaffen werden muß, ist vom Anreicherungstyp und selbstsperrend.

Die Steuerung des Stroms im Transistorkanal erfolgt nur durch die Kapazität zwischen Gate- und Kanalimplantation. Durch eine Spannungsänderung am Gate kann die gespeicherte Ladungsmenge auf der Kapazität verändert und somit der Stromfluß im p-Kanal gesteuert werden. Diese Steuerung erfolgt extrem leistungsarm, da der Sperrstrom bei Spannungen von 5 V im pA-Bereich liegt (Leistungen im pW-Bereich).

Mikroskopisch ist der Stromfluß durch den Kanal vom Verarmungsgrad des Kanals abhängig. Wenn das externe Gate auf Source-Potential gelegt wird, hängt der Stromfluß im wesentlichen von der Spannung zwischen Source und Drain ab. Nach dem Anlegen einer kleinen Spannung ($V_{DS} < 0\,\mathrm{V}$) zwischen Source und Drain fließt ein Löcherstrom von der Source zur Drain, der einer Ohmschen Strom-Spannungs-Charakteristik ($I_D \propto V_{DS}$) genügt, weshalb dieser Bereich der Ausgangskennlinie (Abbildung 2.5) „linearer Bereich“ heißt.

Der Wert des Stroms I_D hängt bei festem V_{DS} wesentlich von der geometrischen Ausdehnung des Kanals und der Kanaldotierung ab. Die Verarmungszone um den n^+-Kontakt dehnt sich mit zunehmendem Potentialunterschied zwischen Source und Drain drainseitig in den Kanal aus. Dadurch wird der Kanalquerschnitt verkleinert, was eine Erhöhung des Kanalwiderstandes bedeutet. Die Ausgangskennlinie weicht von der linearen Form ab.

Wenn das Kanalpotential am drainseitigen Ende so negativ wird, daß die Verarmungszone das Substrat fast erreicht, wird der Kanalstrom nahezu unabhängig von der angelegten Drainspannung[8], und man erreicht den Sättigungsbereich der Ausgangskennlinie (Abbildung 2.5). Die angelegte Spannung zwischen Source und Drain wird Sättigungsspannung genannt. Bei wesentlich höheren Spannungen kommt es zu einem Durchbruch der Kanal-Gate-Diode, und der Strom steigt sehr steil an (nicht in Abbildung 2.5 dargestellt).

Der Einfluß der Spannung am Gate auf den Strom zeigt sich in den Kurven für unterschiedliche Spannungen. Eine positive Spannung bewirkt eine größere Ausdehnung der Verarmungszone in den Kanal hinein, einen geringeren Kanalquerschnitt und damit eine geringere Sättigungsspannung. Ab einer bestimmten Spannung $V_{pinch\,off}$ ist der p-Kanal komplett abgeschnürt, und es fließt kein Strom mehr. Dadurch kann ein JFET auch als Schalter benutzt werden. Im DEPFET-Bioscope wird das externe Gate[9] genau in dieser Art verwendet.

[8] gradual channel approximation

[9] Die Bezeichnung „externes Gate“ wird hier zur Unterscheidung zum „internem Gate“ (siehe Kapitel 3) benutzt.

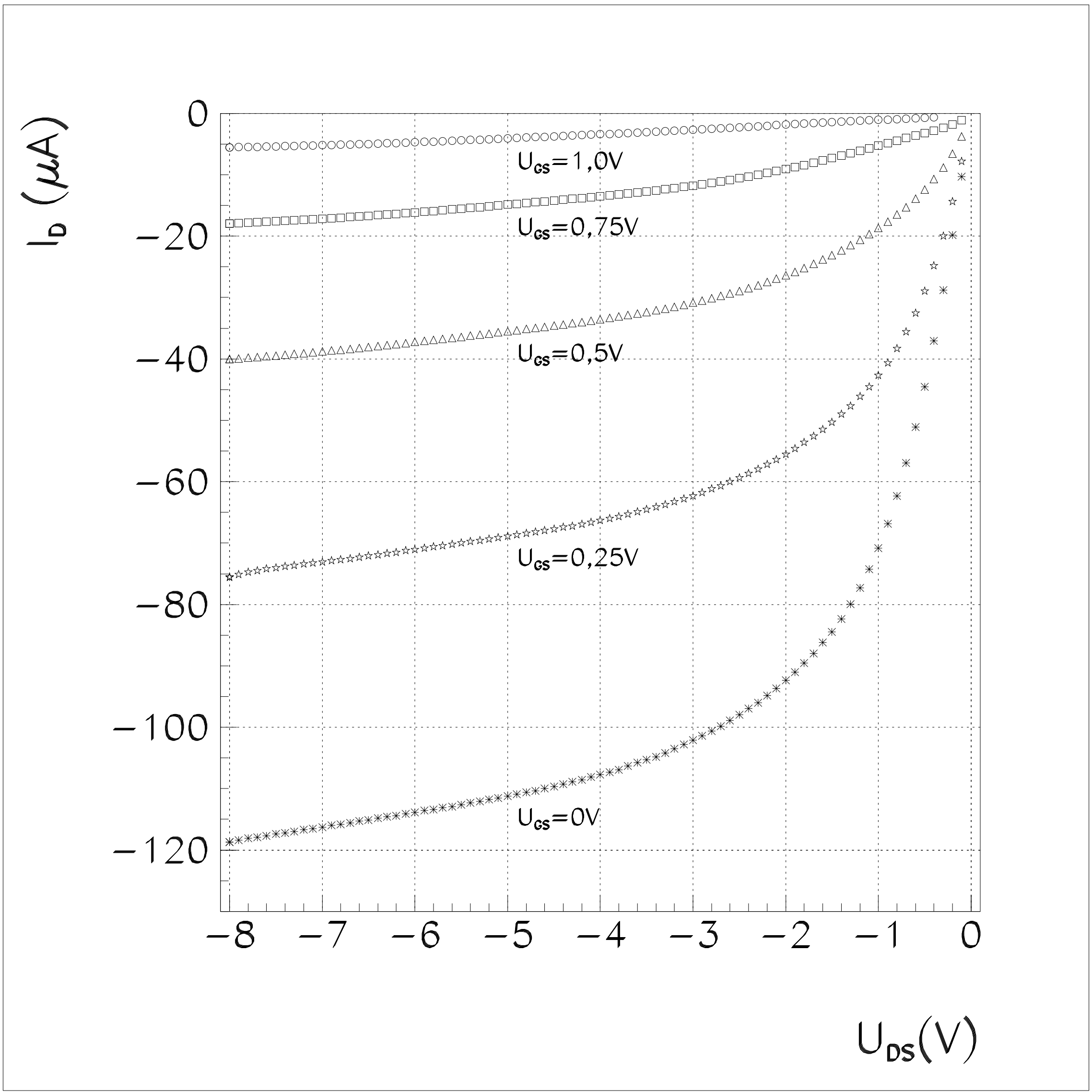


Abbildung 2.5: Ausgangskennlinie eines JFETs bei verschiedenen Spannungen am Gate [3]

3 Aufbau und Eigenschaften eines DEPFETs

Bei einem DEPFET [11, 13] handelt es sich um einen Halbleiterdetektor auf Siliziumbasis, bei dem die erste Verstärkerstufe in Form eines Feldeffekttransistors ins Silizium integriert worden ist. Allgemein werden die Detektoren, die auf der Integration eines Feldeffekttransistors in vollständig verarmtes Siliziumsubstrat basieren, DEPFETs genannt. Dieses steht für „Depleted Field Effect Transistor“. Bei einer erforderlichen Unterscheidung von Sperrschicht-Feldeffekttransistoren und Metall-Oxid-Schicht-Feldeffekttransistoren verwendet man die Namen DEPJFET und DEPMOSFET.

Die Integration bringt deutliche Vorteile in Bezug auf die Rauscheigenschaften des Bauelements, da die Zuleitungen zur ersten Verstärkerstufe entfallen. Im folgenden soll der prinzipielle Aufbau eines DEPFETs anhand eines DEPJFETs beschrieben werden. Dadurch kann sowohl das Prinzip eines DEPFETs erklärt werden, als auch eine Beschreibung des Aufbaus der DEPJFETs erfolgen. Diese ist unabdingbar, da das „DEPFET-Bioscope“ mittels DEPJFETs realisiert worden ist. JFETs weisen im Vergleich zu MOSFETs eine größere Strahlenhärte auf und eignen sich deshalb besser für eine Integration in Detektorsysteme. Im nachfolgenden wird durchgehend der Begriff DEPFET verwendet.

3.1 Grundstruktur des DEPFETs

Wird eine Siliziumstruktur wie in Abbildung 2.2 mit einem p-Kanal-JFET kombiniert, so erhält man einen DEPFET. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Rechts neben der graphischen Darstellung des DEPFETs ist das Potential unter dem externen Gate skizziert. Zusätzlich zu der einfachen Struktur der Seitwärtsdepletion und des JFETs ist unter dem externen Gate des JFETs noch eine weitere tiefliegende n^+-Implantation eingebracht. Hierdurch wird die Substratdotierung direkt unter dem JFET von $10^{12}\,\mathrm{cm}^{-3}$ auf $10^{16}\,\mathrm{cm}^{-3}$ erhöht. Diese zusätzliche n^+-Implantation erfolgt aus folgenden Gründen:

- Das Potentialminimum kann näher an den p^+-Kanal geschoben werden, wodurch sich die Steuerwirkung des internen Gates verstärkt.
- In der Potentialminimumsebene der einfachen Seitwärtsdepletion kann zusätzlich ein tieferes lokales Minimum für freie Elektronen geschaffen werden. Somit wird die Sammelwirkung des internen Gates erhöht.
- Die Potentialbarriere zwischen Kanal und Substrat wird vergrößert, um die thermische Emission von Löchern aus dem Kanalgebiet in das Substrat zu verhindern.

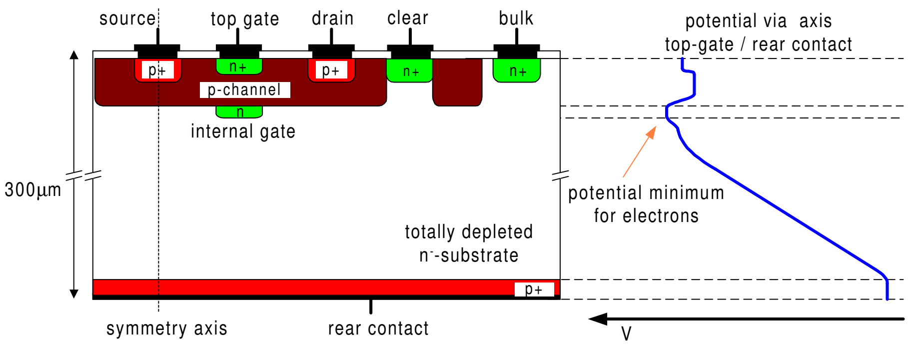


Abbildung 3.1: Prinzipieller Aufbau eines DEPFETs

Die Ladungsträger, die beim Durchgang ionisierender Teilchen erzeugt worden sind, werden, wie in Unterkapitel 2.1 erläutert, getrennt. Die Löcher fließen über den Rückkontakt ab, während die Elektronen ins interne Gate driften und dort gesammelt werden. Das Potential des internen Gates wird proportional zur Anzahl der gesammelten Signalladungen negativer. Es vergrößert damit den Kanalquerschnitt und verursacht so einen nachweisbaren Anstieg des Transistorstroms. Dieser Aufbau hat deutliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Detektoren:

- Die Signalladung steuert direkt den Strom im Transistor, das heißt, die erste Verstärkung des Ladungssignals findet im Detektor statt. Dadurch wird der Rauschbeitrag der Zuleitung zum sonst üblichen externen Vorverstärker eliminiert.
- Die steuernde Kapazität (internes Gate) ist klein, womit ein geringes thermisches Rauschen einhergeht.

- Das vorhandene externe Gate ermöglicht das Aus- und Einschalten des DEPFET-Detektors. Erst dadurch ist eine effiziente Anordnung einzelner DEPFET-Detektoren in Pixel zu einer Matrix möglich.

- Da die Auslese die Ladungsmenge im internen Gate nicht ändert, kann ein Pixel mehrfach ausgelesen werden.

3.2 Der Clearmechanismus

Durch die Einführung des internen Gates ist es möglich, Ladung direkt im Detektor zu speichern. Die gespeicherte Signalladung wird durch die Auslese nicht verändert. Dieses ermöglicht zwar eine wiederholte Auslese des Pixels, erfordert aber auch eine Löschstruktur, um die Signalladung aus dem internen Gate entfernen zu können. Neben den Signalladungen werden auch im Detektormaterial thermisch generierte Ladungsträger im internen Gate gesammelt. Auch diese müssen in regelmäßigen Abständen entfernt werden, um ein vollständiges Auffüllen des internen Gates zu verhindern.

Im DEPFET-Bioscope werden DEPFETs mit einer Löschstruktur, die als „Pulsed Clear“ bezeichnet wird, verwendet. Beim „Pulsed Clear“ (siehe Abbildung 3.1) wird an eine außerhalb der JFET-Implantation liegende n^+-Implantation in gewissen Zeitabständen ein hoher positiver Spannungspuls angelegt. Dadurch wird die Potentialbarriere zwischen dem internen Gate und dem Löschkontakt so weit abgeflacht, daß die Elektronen über diesen Kontakt abfließen können. Die Zeit, in der der Detektor insensitiv ist, kann auf einige Mikrosekunden beschränkt werden.

Neben den DEPFET-Pixeln mit „Pulsed Clear“-Struktur wurden im Halbleiterlabor des Max-Planck-Instituts für Physik in München auch DEPFETs mit „Continuous Clear“ gefertigt. Bei dieser Löschstruktur wird dauerhaft eine Spannung an den Löschkontakt angelegt und ein gewisser Teil der Ladungsträger im internen Gate abgeführt. Dadurch hat dieser DEPFET-Typ keinen insensitiven Zeitraum aufgrund des Löschvorgangs. Ausführlich wird dieser Typ in [13] beschrieben.

3.3 Die DEPFET-Matrix

Um ein bildgebendes System zu erhalten, werden DEPFET-Detektoren in Zeilen und Spalten angeordnet. Beim DEPFET-Bioscopesystem wird eine sogenannte DEPFET-Matrix mit 64x64 Pixel verwendet. Die Pixel können hexagonale, rechteckige oder quadratische Form besitzen. Im folgenden wird das Aufbauprinzip anhand einer Matrix mit Pixel der Größe 50 µm x 60 µm beschrieben, da eine Matrix dieses Typs in dieser Arbeit verwendet wurde. Das grundlegende Prinzip der Anordnung und

Ansteuerung gilt für jede Pixelform, wobei bei anderen Formen nur auf die geänderte räumliche Anordnung der Pixel Rücksicht genommen werden muß.

Ein einzelner DEPFET wird im Zusammenhang mit dem DEPFET-Bioscope als Pixel bezeichnet und stellt die kleinste sensitive Einheit der Matrix da. Wie in Unterkapitel 3.1 erläutert, wird bei einem DEPFET nicht direkt die Signalladung gemessen, sondern der Strom durch den integrierten Feldeffekttransistor. Um nun an die im internen Gate der Pixel gespeicherte Information zu gelangen, benötigt man einen Mechanismus, der es ermöglicht, den Transistorstrom eines einzelnen Pixels zu messen.

In Abbildung 3.2 ist ein Matrixausschnitt mit vier Pixel dargestellt. Der Aufbau eines Pixels ist deutlich zu erkennen. Der JFET ist beim DEPFET ringförmig ausgeführt. Die Source befindet sich als punktförmige Implantation im Zentrum der ringförmigen Struktur. Das externe Gate ist als ringförmige n^+-Implantation um die Source verwirklicht. Die p^+-Implanation, die sich über das ganze Pixel erstreckt, dient als gemeinsame Drain aller Pixel einer Spalte. Somit sind keine zusätzlichen Aluminiumbahnen erforderlich, um die Drain-Kontakte der Transistoren einer Spalte miteinander zu verbinden.

Die breiten Aluminiumbahnen verbinden die Source-Kontakte aller Pixel einer Zeile miteinander, während die schmaleren Bahnen direkt unter den Breiten die Kontakte aller externen Gates einer Zeile verbinden. Deutlich erkennbar ist die Verschiebung der Spalten einer Matrix um eine halbe Pixelhöhe gegeneinander, was zu einer gleichmäßigen Verteilung der Clear-Kontakte und JFETs über die Matrixfläche führt (siehe dazu auch Abbildung 3.3).

Über den breiten Aluminiumbahnen sind nochmals schmalere Bahnen aufgebracht, die alle Clear-Kontakte einer Zeile miteinander verbinden. Da die Clear-Kontakte direkt am Übergang zweier Pixel positioniert sind, wirkt ein Löschimpuls an einem Clear-Kontakt immer auf zwei Pixel.

Neben den einzelnen Pixel und deren Anordnung in Spalten, die gegeneinander um eine halbe Pixelhöhe verschoben sind, ist eine zusätzliche p^+-Implanation zwischen den Spalten zu erkennen. An diesen sogenannten Kamm kann von außen ein Potential angelegt werden, um die Ladungsausbreitung in Nachbarspalten zu beeinflussen. Auf die Wirkungsweise des Kamms wird näher in Unterkapitel 3.4 eingegangen.

Ein bedeutender Vorteil einer DEPFET-Matrix ist die selektive Auslese eines beliebigen Pixels. Eine schematische Darstellung dieses Ausleseprinzips gibt Abbildung 3.5 . Das Verbinden der Gate- und Clear-Kontakte einer Zeile und die gemeinsame Drain einer Spalte ermöglichen die Auswahl eines Pixel durch einfache Zeilen- und Spaltenwahl. Es ist nun möglich, durch Anlegen der Spannung $V_{Gate\,ON}$ an eine Zeile und $V_{Gate\,OFF}$ an alle übrigen Zeilen eine Zeile an- und alle anderen auszuschalten. Danach kann durch Auswahl des Verstärkerkanals die Spalte der Matrix ausgewählt werden. Der Strom durch die gemeinsame Drain aller Transistoren einer Spalte ist gleich der Summe aller Ströme durch die Transistoren dieser Spalte. Da durch Auswahl der Zeile nur ein Transistor pro Spalte angeschaltet ist, entspricht der Strom in der Drain dem Strom durch den einen Transitor, das heißt, jeder Verstärkerkanal mißt genau den Strom durch ein Pixel.

Diese Selektion eines einzelnen Pixels ist für alle Pixel einer DEPFET-Matrix möglich. Dadurch kann die Auslese auf Teilbereiche der Matrix eingeschränkt werden, was die Auslesegeschwindigkeit erhöht. Die Möglichkeit der selektiven Auslese der DEPFET-Matrix unterscheidet diese z.B. von einer CCD[1]. Bei dieser werden die Signalladungen bei der Auslese durch Spannungsimpulse von Pixel zu Pixel weitergeschoben, bis die komplette CCD ausgelesen ist. Dadurch ist die Auslesegeschwindigkeit ein limitierender Faktor für die Größe einer CCD. Des weiteren wird die Signalladungsmenge beim Durchschieben durch die CCD verfälscht. Bei einer DEPFET-Matrix wird nicht die Signalladung nach außen gegeben, sondern nur der Strom durch den Feldeffekttransistor gemessen. Die Signalladung verbleibt im internen Gate.

Das Prinzip dieser Einzelselektion eines Pixels erlaubt eine effiziente Nutzung auch großer DEPFET-Matrizen. Durch Auslese der kompletten Matrix kann z.B. ein interessanter Bereich ermittelt und die weitere Auslese auf diesen beschränkt werden. Damit ist eine schnelle und effiziente Auslese möglich, da keine unnötigen Daten verarbeitet werden müssen.

[1] Charge Coupled Device

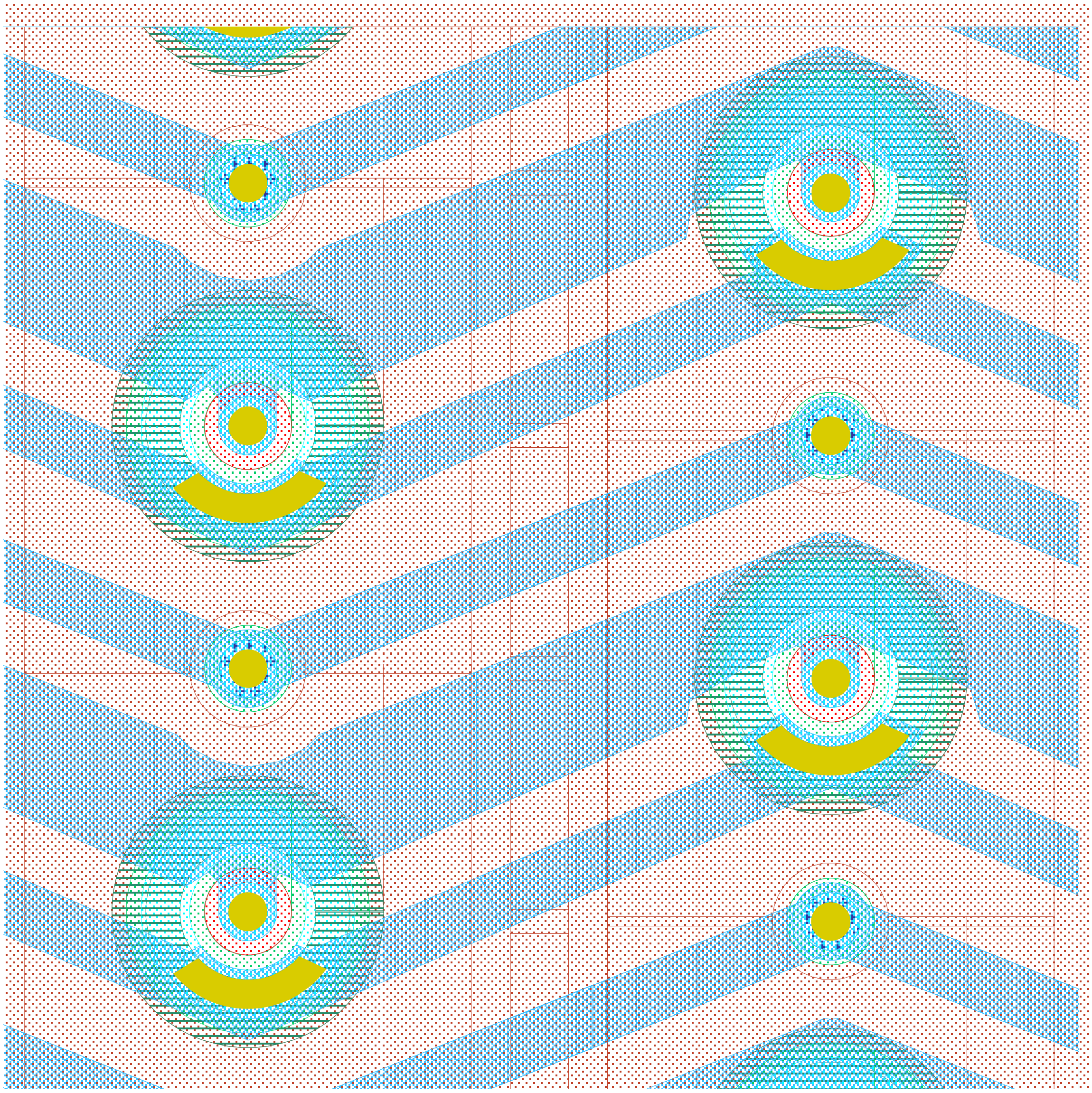


Abbildung 3.2: Ausschnitt aus dem Cadencelayout der DEPFET-Matrix D8. Dieser umfaßt 2x2 Pixel. Deutlich sieht man die Verschiebung der Spalten um eine Pixelhöhe gegeneinander.

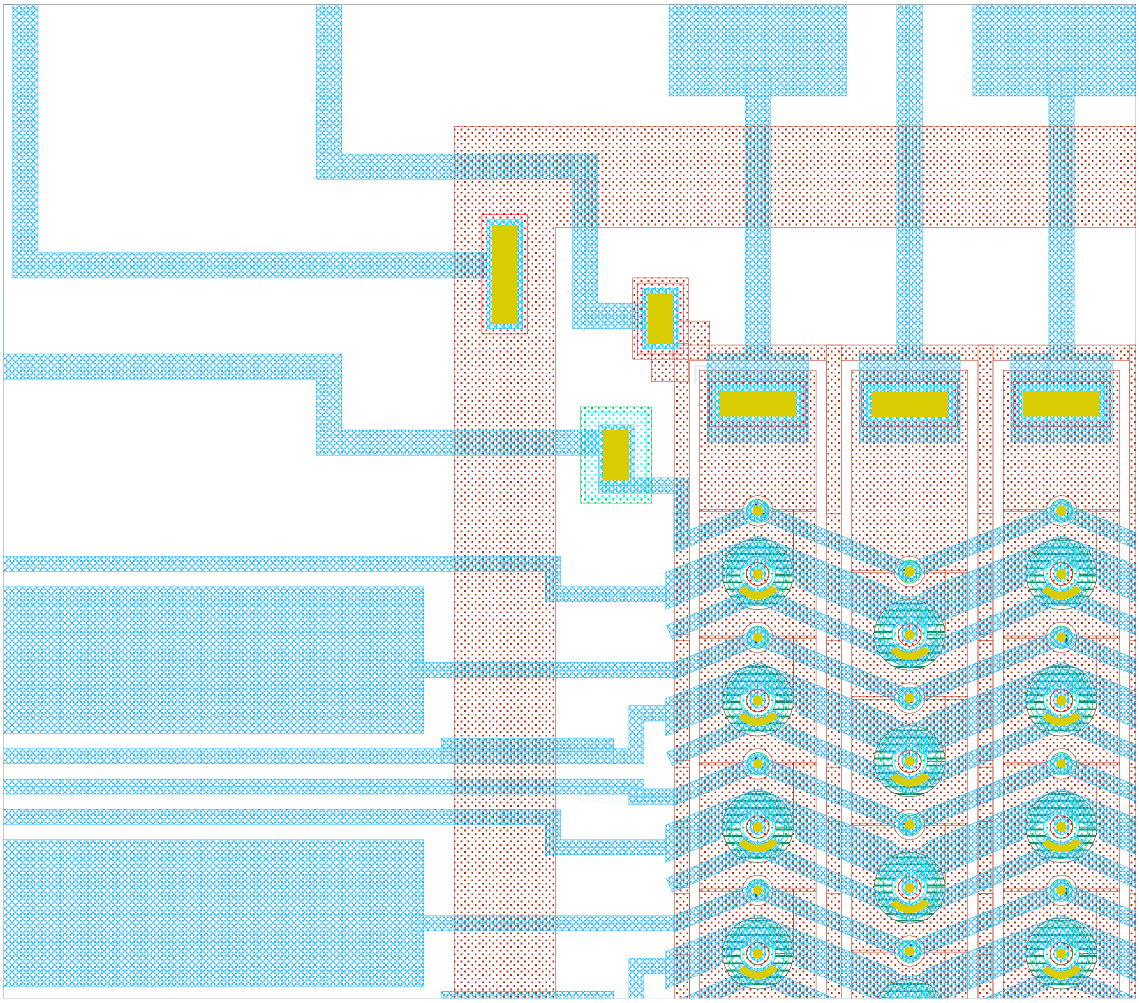


Abbildung 3.3: Ausschnitt aus dem Cadencelayout der DEPFET-Matrix D8. Linke, obere Ecke. Deutlich sind die Zuleitungen zu den Source- und Clear-Kontakten der einzelnen Zeilen zu erkennen. Die Zuleitungen zu den Gate-Kontakten sind hier nicht zu sehen, da diese von der anderen Seite an die Matrix geführt werden.

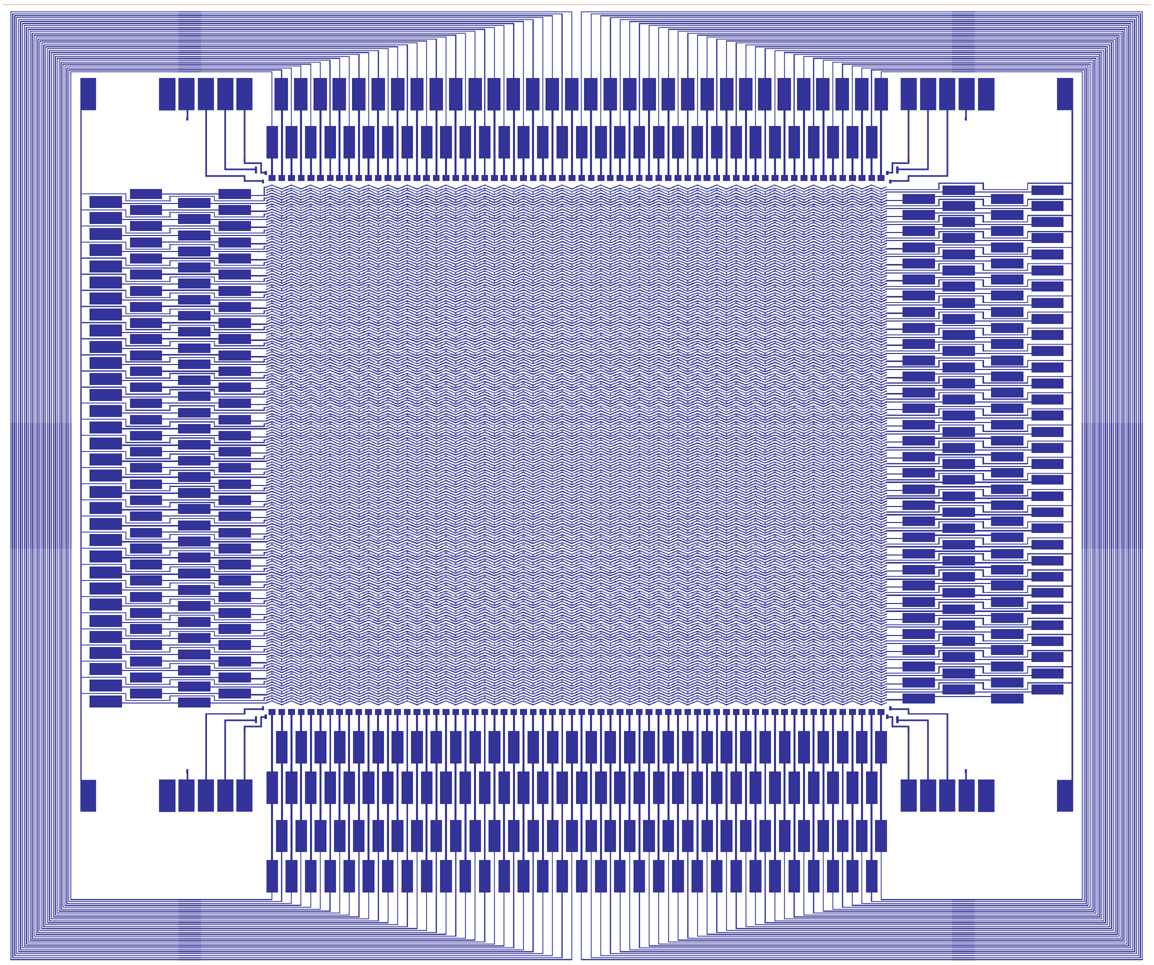


Abbildung 3.4: Cadencelayout der DEPFET-Matrix D8. Auf der rechten Seite sind die Kontaktflächen für die Ausgänge des Gate-Switchers, und auf der linken Seite befinden sich die Kontaktflächen für die Ausgänge des Clear-Switchers. Die unteren Kontaktflächen stellen die Verbindung der Drains zu den Eingängen des CARLOSdar.

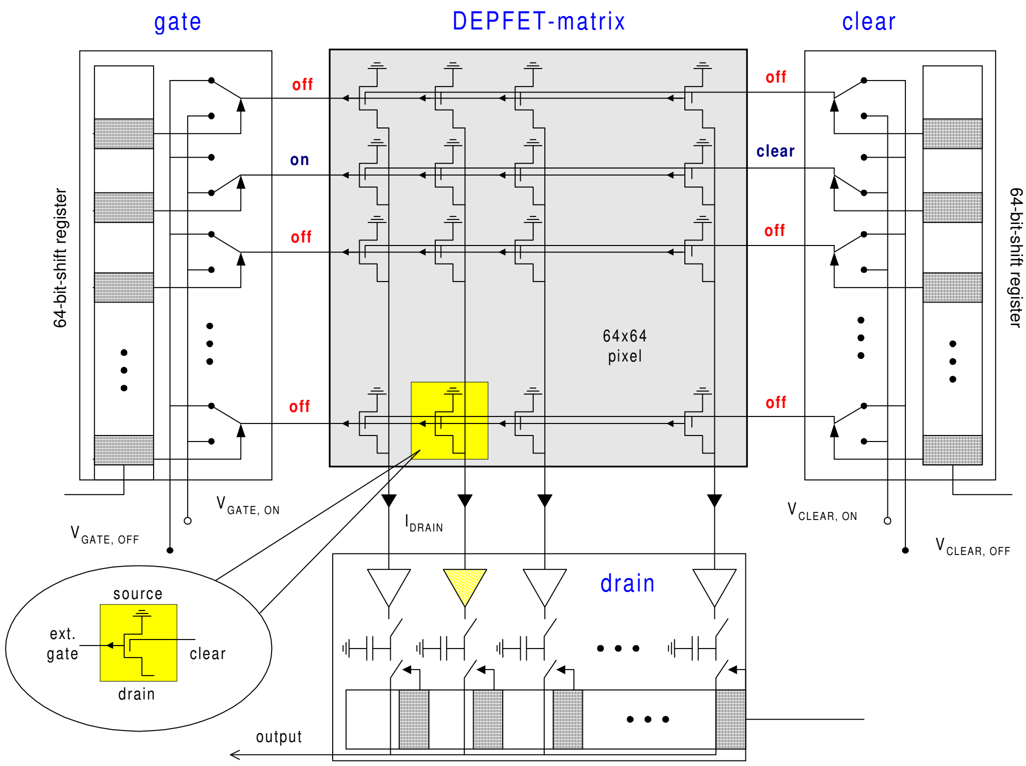


Abbildung 3.5: Ausleseprinzip einer DEPFET-Matrix. Ein einzelnes Pixel wird durch Einschalten genau einer Zeile und Auswahl eines Verstärkerkanals ausgewählt.

3.4 Die Wirkungsweise des Kamms

Wie in Unterkapitel 3.3 gezeigt, besitzt die verwendete Matrix D8 eine zusätzliche p^+-Implantation zwischen den einzelnen Spalten. Diese wird als Kamm bezeichnet und erlaubt es, ein zusätzliches Potential zwischen den Spalten einer Matrix aufzubauen.

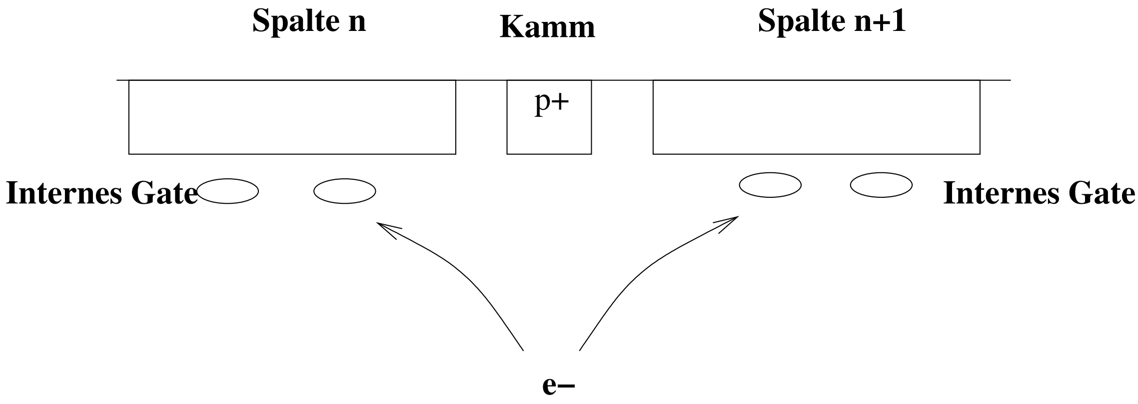


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung der Geometrie zweier benachbarter Spalten

Für den Fall eines negativeren Potentials am Kamm als an der Drain ($V_{Kamm} \approx -6\,\mathrm{V}$ zu $V_{Drain} \approx -4,3\,\mathrm{V}$) erwartet man eine stärkere Fokussierung der Elektronen in das getroffene Pixel. Dies läßt sich verstehen, wenn man die Ausbreitung der Ladungswolke ab dem Generationspunkt der Elektronen betrachtet. Die Form der Ladungswolke im vollständig verarmten Silizium wäre gaussförmig, da es sich um eine Diffusion handelt, bei der keine Richtung bevorzugt ist. Durch die Seitwärtsdepletion und die Verstärkung der Dotierung unter dem Kanal des Transistors wirkt eine Kraft auf die Elektronen, die die Elektronen in Richtung des internen Gates bewegt. Dadurch wird die gaussförmige Ladungswolke deformiert. Das zusätzliche negative Potential tief im Silizium, welches durch ein Kammpotential von $-6\,\mathrm{V}$ erzeugt wird, bremst die Elektronen in ihrer Bewegung aus dem Pixel heraus und führt somit zu einer geringeren Ausbreitung der Ladungswolke. Damit wird die fokussierende Wirkung des negativen Kammpotentials verständlich.

Für den anderen Fall eines positiveren Potentials am Kamm als an der Drain ($V_{Kamm} \approx -2,5\,\mathrm{V}$ zu $V_{Drain} \approx -4,3\,\mathrm{V}$) erwartet man dementsprechend eine defokussierende Wirkung.

Des weiteren bildet sich durch ein solches Kammpotential ein zusätzliches Potentialminimum unter dem Kamm aus. In diesem können sich Elektronen sammeln, wo sie keinen Einfluß auf den Transistorstrom ausüben. Diese Elektronen können also nicht nachgewiesen werden und gehen somit für das Auslesesystem des Bioscopes verloren.

4 Aufbau und Inbetriebnahme des DEPFET-Bioscopes

4.1 Aufbau des DEPFET-Bioscopes

Das DEPFET-Bioscope besteht aus einer Vielzahl von Komponenten. Die Anordnung dieser Komponenten wird in diesem Abschnitt erklärt und ihre Aufgabe kurz beschrieben. Eine genauere Funktionsbeschreibung folgt direkt nach dieser Übersicht.

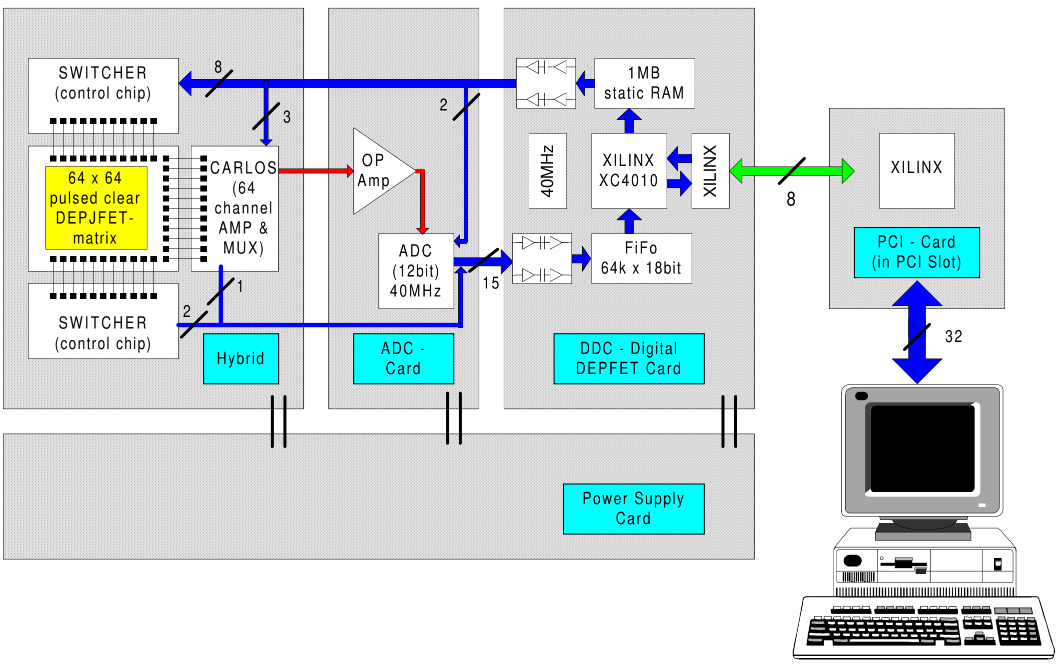


Abbildung 4.1: Komponenten des DEPFET-Bioscopesystems

Der sensitive Teil des Systems besteht aus einer DEPFET-Matrix mit 1024 Pixel.

Der Aufbau einer DEPFET-Matrix, die Anordnung der Pixel und die Verbindung der Kontakte der Transistoren wurden bereits in Unterkapitel 3.3 beschrieben.

Das DEPFET-Bioscope besteht aus 5 Trägerkarten, die in Abbildung 4.1 durch graue Rechtecke symbolisiert werden. Die Aufgaben der einzelnen Trägerkarten wird im folgenden kurz erläutert:

Hybrid: Auf der als Hybrid bezeichneten Keramikplatte befinden sich die Matrix, die Steuerchips (Switcher) für das externe Gate und die Clear-Kontakte der DEPFET-Pixel und der Verstärkerchip (CARLOS) für die Drainströme.

ADC-Card: Auf der ADC-Card befinden sich die Operationsverstärkerschaltung und der Analog-Digital-Converter (ADC), der die Digitalisierung der Daten vornimmt.

DDC: Die Digital-DEPFET-Card enthält den Zwischenspeicher für die digitalen Daten vom ADC und den RAM-Speicher für die Steuersequenz des Bioscopes. Des weiteren wird die Kommunikation mit der PCI-Card des Steuerrechners von einem FPGA (Field Programmable Gate Array) übernommen.

PCI-Card: Die PCI-Card im Rechner stellt die Schnittstelle zum Bioscope dar. In der einen Richtung werden die Steuersequenzen in das RAM, in der anderen Richtung die digitalisierten Meßdaten zum Steuerrechner übertragen.

Power-Supply-Card: Die Power-Supply-Card übernimmt die Spannungsversorgung des gesamten Bioscopes. Sie erzeugt sehr rauscharme Spannungen. Insbesondere die Spannungen, die an den Kontakten der Matrix anliegen, müssen äußerst rauscharm sein, da diese sich direkt auf die Ströme durch die Transistoren auswirken.

4.1.1 Die DEPFET-Matrix

An der Universität Dortmund wurde eine Matrix mit der Bezeichnung

```
D8 : m64_v6_w_kamm__50_double_6um_rand
```

verwendet. Diese wird kurz als D8 bezeichnet und besitzt Pixel der Größe 50 µm x 60 µm und somit eine sensitive Gesamtfläche von

$$A = 3,2\,\mathrm{mm} \cdot 3,84\,\mathrm{mm} = 12,288\,\mathrm{mm}^2. \tag{4.1}$$

4.1.2 Hybrid

Als Träger für die Auslese- und Kontrollchips wird ein Hybrid benutzt. Dieses Hybrid besteht aus zwei Keramikplatten, auf denen die Leiterbahnen aus Palladiumoxid und Gold aufgebracht und eingebrannt werden. Sie werden mit einem Laser geschnitten, gegeneinander geklebt und mit Durchkontaktierungen versehen. Die Herstellung erfolgte im Hybridlabor der Universität Siegen[1].

Auf das Hybrid werden die Matrix, die beiden Switcher und der CARLOS aufgeklebt, und mittels Wirebonding werden die einzelnen Anschlüsse dieser Bauteile miteinander verbunden. So entsteht eine kompakte, rauscharme Steuer- und Ausleseeinheit.

4.1.3 CARLOS

Der Strom der 64 Drain-Spalten wird durch einen rauscharmen Strom-Strom-Verstärker gemessen und verstärkt. Dieser trägt den Namen CARLOS[2] [14] und besitzt 64 Eingänge, die serialisiert auf den Ausgang ausgegeben werden.

Abbildung 4.2 zeigt das Schema des CARLOS. Die Eingänge befinden sich auf der linken Seite (IN0 - IN63), der Ausgang ist rechts unten dargestellt. Da die Eingänge des CARLOS direkt mit den Drain-Kontakten der DEPFETs einer Spalte verbunden sind, ist es wichtig, daß die Spannung am Eingang konstant gehalten wird. Die Konstanz der Spannung muß unabhängig von der Größe des Stromflusses in den CARLOS gewährleistet sein. Eine Änderung der Spannung hätte ein verändertes Potential zwischen Source und Drain zur Folge. Dieses würde aber eine Variation des Stromflusses durch den Transistorkanal bedeuten, die nicht auf eine Ladungsänderung im internen Gate zurückzuführen ist. Da keine Möglichkeit besteht, festzustellen, ob die Stromänderung durch eine Ladungsänderung im internem Gate oder durch die Änderung des Potentials verursacht worden ist, kann der Nachweis ionisierender Teilchen nicht mehr eindeutig erfolgen.

Der CARLOS hat die Eigenschaft, daß seine Eingänge unabhängig vom Strom auf einem konstanten Potential gehalten werden, solange ein Stromfluß in den CARLOS hinein vorhanden ist. Dies wird durch die geregelte Kaskode (reg. cascode) am Eingang des CARLOS sichergestellt. Die geregelte Kaskode arbeitet nur unter der Voraussetzung eines vorhandenen Stromflusses in den CARLOS hinein. Um die Spannung auch für den stromlosen oder Gegenstromfall in einem definierten Bereich zu halten, ist eine Klemmschaltung am Eingang des CARLOS ausgeführt. Diese stellt die Spannung im Fall einer nicht arbeitenden, geregelten Kaskode auf den Wert $V_{\text{Diode}} \pm V_{bi}$ ein, wobei V_{bi} die eingeprägte Spannung der Dioden der Klemmschaltung ist.

[1] Gesamthochschule Siegen, Fachbereich 7, Lehrstuhl Prof. Dr. Albert H. Walenta, Hybridlabor, Leitung Dieter Gebauer

[2] Current Amplifying Readout Chip For Low Noise Sensors

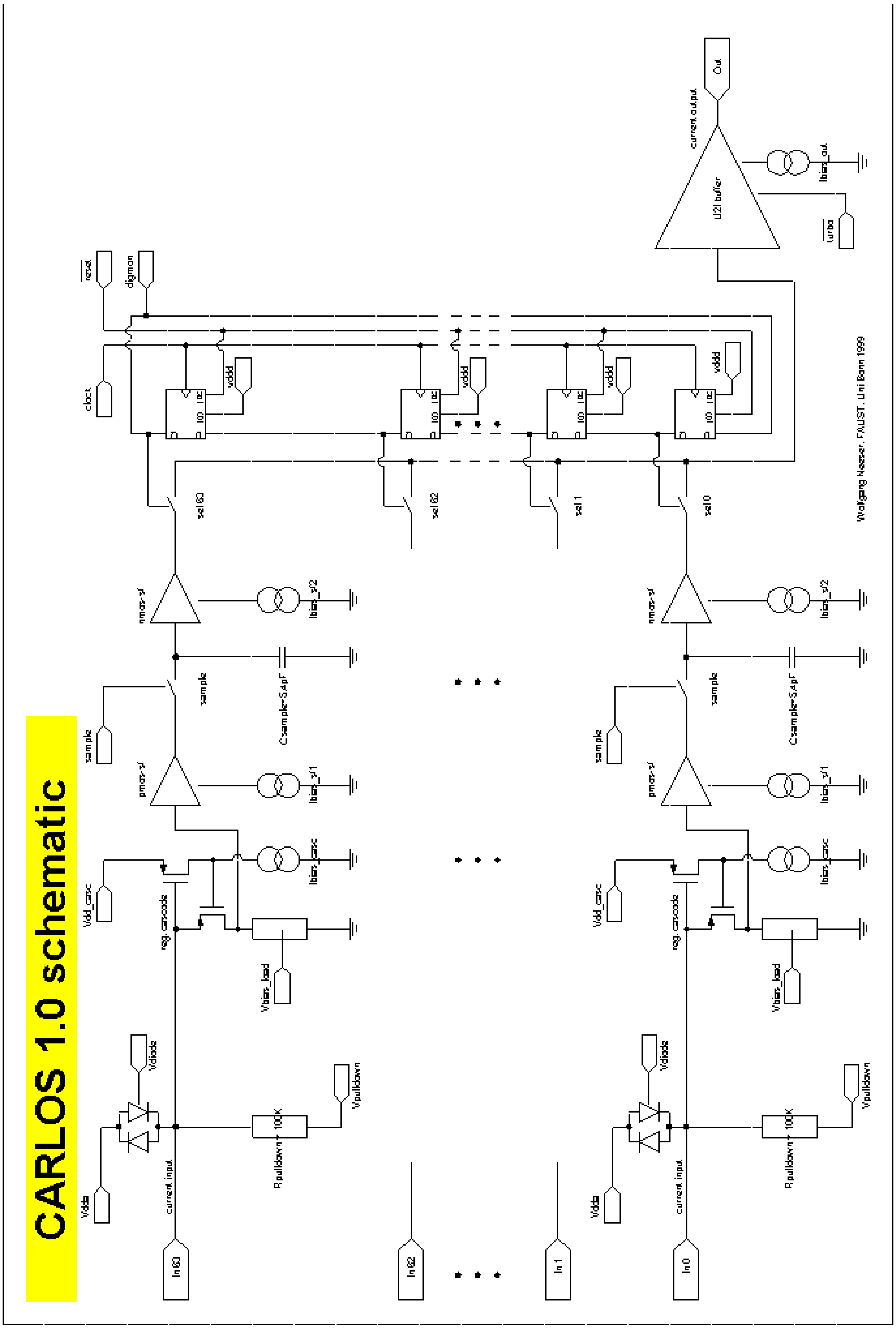


Abbildung 4.2: Schema des CARLOS V1.0, Wolfgang Neeser, Universität Bonn, 1999

Der Eingang des CARLOS ist über einen Widerstand (100 kΩ) mit dem Pulldown-Eingang verbunden. Dieser dient als Stromabzug, um den Transistorstrom, der bei leerem internen Gate durch den Transistor fließt, abzuziehen. Somit muß nur der Strom, der zusätzlich durch Signalladungen im internen Gate verursacht wird, verstärkt werden. Dies erlaubt einen kleinen Arbeitsbereich des Verstärkers und damit eine größere Verstärkung. Der Arbeitsbereich des CARLOS umfaßt 20 µA. Dieser kann in engen Grenzen erweitert werden, was zu Lasten der Verstärkung und Linearität geht.

Nach der Verstärkung des Stroms wird durch eine Sample-and-Hold-Schaltung der Ladungswert auf einer Kapazität gespeichert. Ein Schalter vor der Kapazität ermöglicht die Trennung vom Eingang, so daß die Ladungsmenge auf dieser unabhängig vom Eingangssignal wird. Alle 64 Spalten werden unabhängig von der Auslesegeschwindigkeit gleichzeitig gemessen. Nach der Speicherung der Ladungen wird mittels eines Schieberegisters durch alle 64 Kanäle durchgeschaltet und der verstärkte Strom über den U2I-Puffer am Ausgang des CARLOS ausgegeben. Diese Serialisierung der Transistorstromwerte kann mit bis zu 40 MHz erfolgen.

4.1.4 Switcher

Zum Ansteuern des Gates der Transistoren und der Clear-Kontakte werden sogenannte Switcher verwendet. Jeder der 64 Ausgänge des Switchers kann unabhängig zwischen vier Spannungen im Bereich von 0 V bis 25 V schalten. Die geschalteten Spannungen werden von außen angelegt und sind innerhalb des zulässigen Bereiches frei wählbar. Sie gelten für alle Ausgänge eines Switchers.

Der Switcher besteht im wesentlichen aus zwei Teilen (Abbildung 4.3). Der eine Teil (Low Voltage Part) enthält zwei Schieberegister, die jeweils 64 Bit groß sind. In diesen Schieberegistern kann eine beliebige Sequenz geladen und an jeden Ausgang eine der vier Spannungen gelegt werden. Beim Bioscope wird ein Schieberegister pro Switcher benutzt, da nur zwischen zwei Spannungen geschaltet werden muß.

Im anderen Teil (High Voltage Part) werden die Spannungen gemäß der Registerinhalte auf die Ausgänge des Switchers geschaltet. Wegen des Spannungsmaximums von 25 V mußte eine spezielle 25V-CMOS-Technik zur Fertigung des Switchers benutzt werden, um die Spannungsfestigkeit der Isolationsschichten zu gewährleisten.

Bei dem hier verwendeten Switcher V1.0 ist es leider nicht möglich, die Richtung der Schieberegisteroperation umzukehren. Die Probleme, die diese Einschränkung bereitet, werden deutlich, wenn man die Anordnung der Bauteile auf dem Hybrid betrachtet. Die beiden Switcher sind rechts und links von der Matrix aufgeklebt. Dabei muß ein Switcher um 180 Grad gedreht werden, damit die Bondpads auf der matrixzugewandten Seite liegen. Dieses bedeutet aber, daß der eine Switcher seine Ausgänge von 0 bis 63 und der andere von 63 bis 0 durchschalten muß, um einen gleichgerichteten Durchlauf der beiden Schaltvorgänge durch die Matrix zu

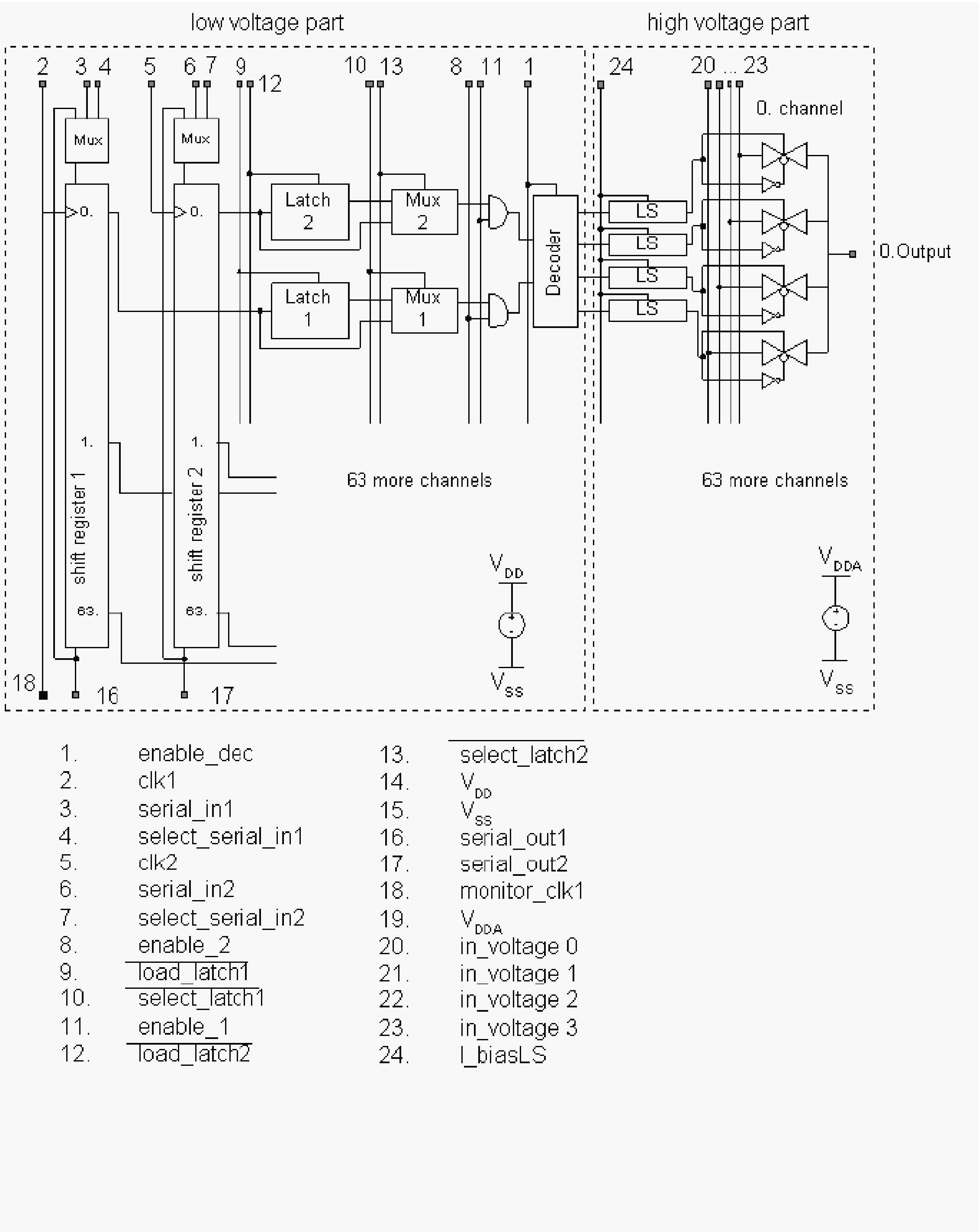


Abbildung 4.3: Schema des Switchers V1.0, Wolfgang Neeser, Universität Bonn, 1999

erreichen. Da eine Umkehr der Schieberichtung nicht möglich ist, muß immer das ganze Schieberegister eines Switchers neu geladen werden, was 128 Zeittakte dauert. Dieses verlängert die Auslesezeit für die gesamte Matrix beachtlich. Im neuen Design des Switchers (V2.0) wurde dieser Nachteil behoben. Hier ist die Schieberichtung des Switchers frei wählbar.

4.1.5 ADC-Card

Die ADC-Card besteht aus einer Platine, die den Analog-Digital-Converter (ADC) und einen Sockel, in dem das Hybrid befestigt ist, trägt.

Die am Ausgang des CARLOS anliegende Spannung wird über einen Spannungsteiler auf den dynamischen Bereich des ADCs eingestellt und durch einen vorgeschalteten Operationsverstärker in den Arbeitsbereich von $1,9\,\mathrm{V}$ bis $2,9\,\mathrm{V}$ angehoben. Dieses ist notwendig, da die Spannung nach dem Spannungsteiler im Bereich von $0\,\mathrm{V}$ bis $1\,\mathrm{V}$ liegt.

4.1.6 DDC

Auf der DDC (Digital-DEPFET-Card) befinden sich alle Bauteile, die für die digitale Weiterverarbeitung der Werte vom ADC und die Steuerung des gesamten Bioscopes notwendig sind. In einem 64k x 18bit FIFO werden die digitalisierten Daten zwischengespeichert, bevor sie über die PCI-Karte im Steuerrechner an die Analysesoftware weitergegeben, analysiert und gespeichert werden. Die Steuerung des Bioscopes und die Verwaltung des FIFO wird durch ein FPGA[3] bewerkstelligt. Die Kontrolle des Datentransfers wird durch ein weiteres FPGA[4] übernommen.

4.1.7 PCI-Card und Software

Die Daten werden auf der PC-Seite durch eine PCI-Card[5] empfangen, durch die Software analysiert und in Dateien im ASCII-Format gespeichert.

Die Analyse der Online-Software beschränkt sich auf die Unterscheidung der digitalisierten Daten in Treffer eines ionisierenden Teilchens und Rauschen. Die spätere Offline-Analyse ermöglicht eine weitaus bessere Bildqualität als die Online-Analyse. Um die Offline-Analyse zu ermöglichen, werden Informationen über das Pedestal, die Position und der ADC-Wert des getroffenen Pixels und die Werte der Nachbarpixel protokolliert. Mit diesen Werten kann dann eine Interpolation des Trefferortes durchgeführt werden, um die Auflösung zu erhöhen.

[3] Xilinx XC4010E
[4] Xilinx XC3142A
[5] Karte BB20 von Silicon Solutions, Rosenstraße 7-9, 50678 Köln

Die Software für die Auslese und Analyse der Daten des Bioscopes umfaßt zwei Programme. Das eine Programm wurde an der Universität Bonn entwickelt. Es beinhaltet die Steuerung des Bioscopes, die Online-Analyse der Daten und die Möglichkeit die gespeicherten Daten nach der Messung weiterzuverarbeiten. Das andere wurde im Rahmen dieser Arbeit zum Zweck der weiteren Datenanalyse entwickelt.

4.1.8 Spannungsversorgung

Das DEPFET-Bioscope ist ein komplexes System, zu dessen Betrieb bis zu 19 Spannungen notwendig sind. Bei den verschiedenen Betriebsspannungen des DEPFET-Bioscopes muß auf die Genauigkeit des Spannungswertes und die Rauscharmut der Spannungsquelle Wert gelegt werden. Besonders für die Spannungen, die direkt an der Matrix und am Hybrid anliegen, ist eine hohe Stabilität wichtig, damit das Rauschen minimal gehalten wird. In diesem Teil des Systems fällt ein Rauschbeitrag besonders ins Gewicht, da er durch die nachfolgenden Stufen verstärkt wird. Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurde eine spezielle Power-Supply-Card an der Universität Bochum[6] entwickelt. Diese Karte liefert die erforderlichen Spannungen extrem rauscharm.

4.2 Inbetriebnahme des DEPFET-Bioscopes

4.2.1 Tests der einzelnen Komponenten des Bioscopes

Die Inbetriebnahme des Bioscopes erfolgte komponentenweise ausgehend vom Steuerrechner. Nach der erfolgreichen Installation und Konfiguration der Software und der PCI-Card, wurden die DDC und ADC-Card in Betrieb genommen.

4.2.1.1 Test der korrekten Digitalisierung und des Datentransfers

Zur Überprüfung der Datennahme mittels ADC-Card und DDC wurde am Eingang des ADCs ein Sinussignal angelegt. Es zeigte sich, daß die Datenübertragung zwischen ADC-Card, DDC und Steuerrechner korrekt durchgeführt werden kann. Besonderes Augenmerk wurde auf die Datenübertragung vom FIFO der DDC zum Steuerrechner gelegt. Diese Messungen zeigten Probleme mit dem FIFO bei langsamer Datennahme mit niedriger Arbeitsfrequenz der DDC und Schwierigkeiten bei der unterbrechungsfreien Auslese des FIFOs auf.

Es zeigt sich, daß die ausgelesenen Daten des FIFOs bei langsamer Schreibrate (Zeitdauer des Schreibzugriffs von 500 ns) nicht korrekt sind. Die Fehler führen zu

[6] Universität Bochum, Experimentelle Physik I, Kern- und Teilchenphysik, Prof. Dr. H. Koch, Dr. H. Matthäy

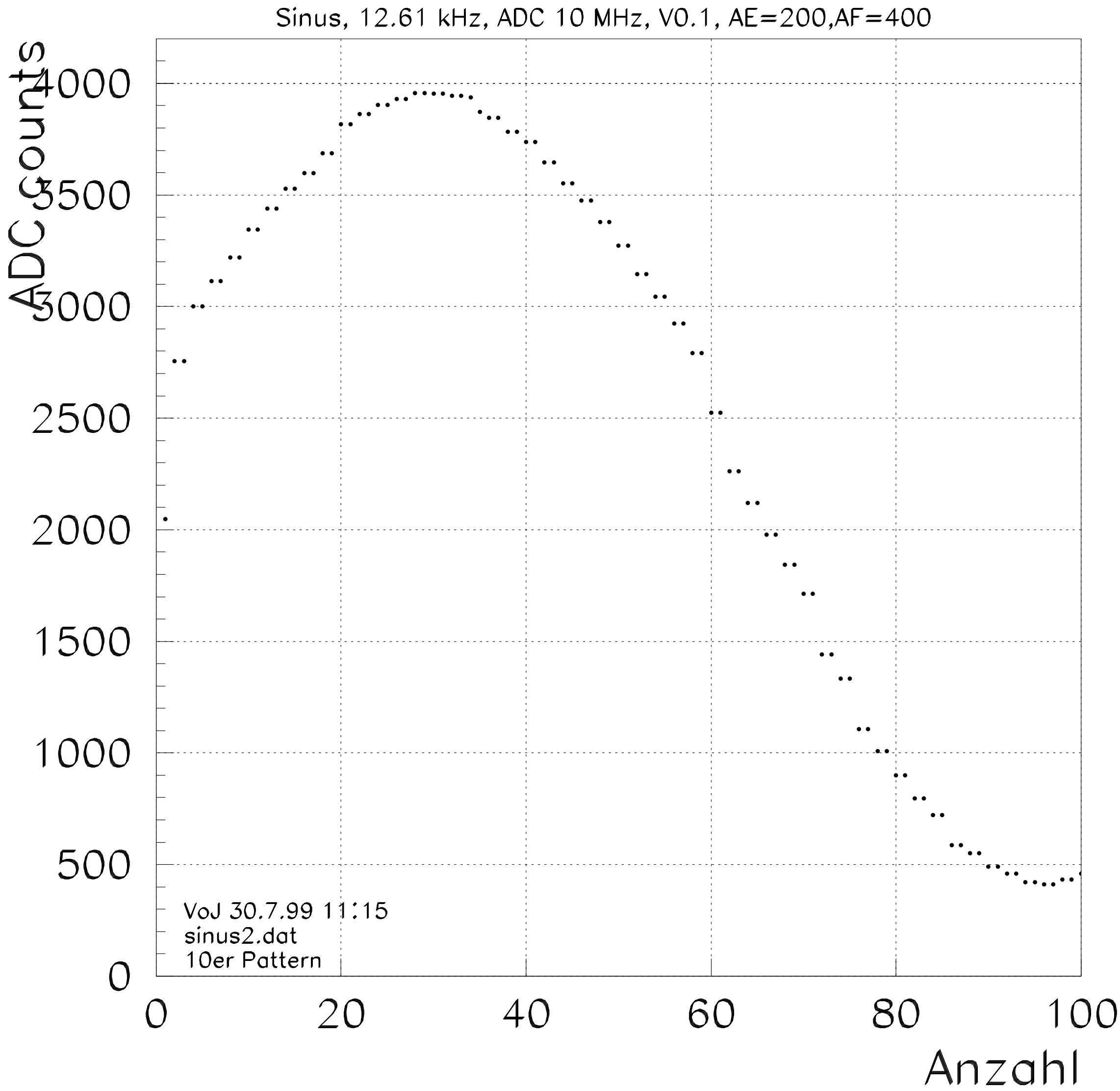


Abbildung 4.4: Darstellung der FIFO-Daten bei langsamer Datennahme (Schreibfenster 500 ns und Sinus-Funktion als Eingangssignal)

einer Verdoppelung aller Werte, wie in Abbildung 4.4 am Beispiel einer Sinusfunktion zu sehen ist.

Eine genauere Untersuchung ergibt, daß die Fehler in einem direkten Zusammenhang mit der Zeitdauer des Schreibzugriffs stehen. Die Fehler treten bei gleich langen Schreibzugriffen auf den FIFO bei allen vier möglichen Arbeitsfrequenzen (5 MHz, 10 MHz, 20 MHz und 40 MHz) der DDC auf. Für sich allein stellen die fehlerhaften Daten bei langsamer Datennahme kein Problem dar, da das Bioscope mit maximaler Datennahmegeschwindigkeit betrieben werden soll.

Das Auftreten eines weiteren Problems führt entgegen der ursprünglichen Konzeption zu einem eingeschränkten Betriebsmodus des Bioscopes.

Eine kontinuierliche Datennahme mit hoher Arbeitsfrequenz ist nicht möglich, da die Datentransferrate vom FIFO zum Steuerrechner nicht groß genug ist, um die anfallende Datenmenge von ca. 8 MB/s zu verarbeiten. Wie in Abbildung 4.5 zu erkennen, entstehen Sprünge in der Sinusfunktion. Der Grund dafür ist ein voller FIFO, der seinen Eingang für neue Daten sperrt. Somit gehen alle Daten zwischen dem Vollsignal des FIFOs und dem nächsten Lesezugriff verloren.

Das Zusammentreffen der beiden Punkte erlaubt zur Zeit nur eine Betriebsart des Bioscopes, bei der nicht die volle Leistungsfähigkeit erreicht wird. Eine kontinuierliche Auslese bei Arbeitsfrequenzen ab 20 MHz ist nicht möglich, da der Datentransfer zum Rechner nicht ausreichend schnell ist. Eine Reduzierung der Geschwindigkeit der Datennahme ist aufgrund der nicht korrekten Funktionsweise des FIFOs bei geringen Geschwindigkeiten auch nicht möglich.

Als vorläufige Betriebsart, die nicht komplett der Konzeptionierung entspricht, wird die nichtkontinuierliche Datennahme benutzt. Hierbei werden immer nur die Daten eines Matrixbildes[7] im FIFO gespeichert und dann ausgelesen. Dieses garantiert korrekte Daten, hat aber den Nachteil, daß diese Datennahme sehr langsam ist. Des weiteren muß die zeitliche Steuerung zwischen zwei Matrixbildern von der Software übernommen werden. Das Fehlen jeglicher Echtzeitfähigkeit des Betriebssystems auf dem Steuerrechner hat ein erhöhtes Rauschen und eine Verringerung der Anzahl korrekter Matrixbilder pro Sekunde zur Folge.

Das erhöhte Rauschen wird durch verschiedene Zeitdifferenzen zwischen zwei Löschimpulsen an der Matrix verursacht. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Bioscope mit einem „globalen Clear“ betrieben, das heißt, es werden alle Zeilen gleichzeitig zu Beginn der Matrixauslese gelöscht.

Die Steuerung der Auslese eines Matrixbildes erfolgt durch Abarbeiten der Steuersequenz im RAM. Dieser Teil der Auslese wird komplett von den Bausteinen auf der DDC gesteuert, die durch einen Taktgeber synchronisiert sind. Während dieser Zeit hat die Steuersoftware keinen Einfluß auf die Auslese. Die fehlende Echtzeitfähigkeit des Steuersystems wirkt sich erst dadurch aus, daß zwischen der Auslese

[7]Als Matrixbild wird in dieser Arbeit eine einmalige Auslese der kompletten Matrix bezeichnet.

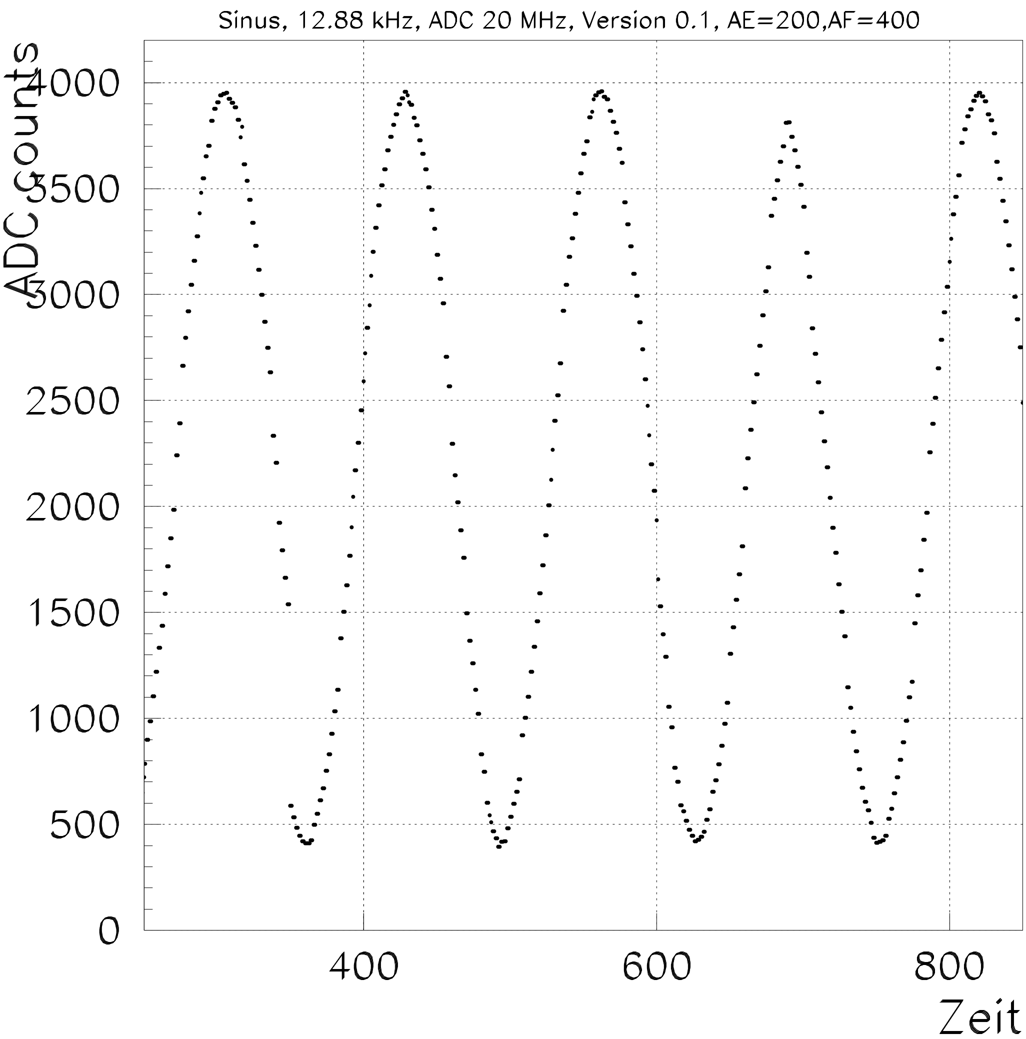


Abbildung 4.5: Darstellung der Daten bei schneller Datennahme und Sinusfunktion als Eingangssignal

der einzelnen Matrixbilder unterschiedlich viel Zeit vergeht. Diese Differenz verursacht einen unterschiedlichen Füllgrad der internen Gates durch thermisch generierte Elektronen.

Ist die Zeitspanne zwischen zwei Löschimpulsen sehr groß und damit das interne Gate stark mit thermisch generierten Elektronen angefüllt, so kann es nicht durch einen Löschimpuls vollständig geleert werden. Es verbleibt eine Restladung im internen Gate, die zu einer Erhöhung der Transistorströme aller Pixel der Matrix führt. Somit erscheinen auch alle nicht getroffenen Pixel als getroffen. Während der Online-Analyse wird die Anzahl der Treffer pro Matrix bestimmt und das Matrixbild verworfen, wenn eine maximal erlaubte Trefferanzahl überschritten wird. Diese Obergrenze ergibt sich aus der errechneten theoretischen Trefferanzahl, die durch die Aktivität der Quelle, den Abstand zwischen Quelle und Matrix, die Matrixfläche und die Auslesezeit pro Matrix gegeben ist. Das Verwerfen dieser Matrixbilder garantiert eine korrekte Datennahme, setzt aber die effektive Matrixbildrate herab.

Nachdem die DDC und die ADC-Card getestet worden sind und unter Berücksichtigung der Taktfrequenzen und der nichtkontinuierlichen Datennahme einwandfrei funktionierten, wurden die Komponeten des Hybrids einzeln getestet.

4.2.1.2 Funktionstest des Switchers

Der Switcher zeigte die erwarteten Signale an den Ausgängen. Abbildung 4.6 zeigt ein Oszilloskopbild des Switchertests. Hier wurden der Monitorausgang für den Takt des Schieberegisters (Kanal 1), das Eingangssignal am Schieberegister (Kanal 2), das Ausgangssignal am Schieberegister nach 64 Takten (Kanal 3) und das Signal am Ausgang 28 des Switchers auf das Oszilloskop geschaltet. Die Taktlänge betrug 500 ns. Die Unterbrechungen des Signals auf Kanal 1 sind Artefakte der Darstellung und waren auf dem Oszilloskop nicht vorhanden.

Man sieht, daß nach 28 Takten die Spannung am Ausgang 28 von 5 V auf 10 V geschaltet wird. Das Oszilloskop gibt für die Zeitdifferenz zwischen dem Signaleingang und dem Schaltvorgang am Ausgang 28 einen Wert von 28, 163 µs an. 28 Takte entsprechen 28 µs (500 ns Signal + 500 ns Pause), so daß eine korrekte Funktion des Switcher-Ausgangs 28 angenommen werden kann. Die leichte Differenz kommt durch die Ungenauigkeit der Einstellung der Beginn- und Endmarken auf dem Oszilloskopschirm zustande.

Es muß bei der Inbetriebnahme des Bioscopes streng darauf geachtet werden, daß die Betriebspannung $V_{dda} = 25V$ für die beiden Switcher vor allen anderen Spannungen anliegt. Besonders Spannungen V_{on} und V_{off} größer als V_{dda} führen mit hoher Wahrscheinlichkeit zur Zerstörung des Hochspannungsteils.

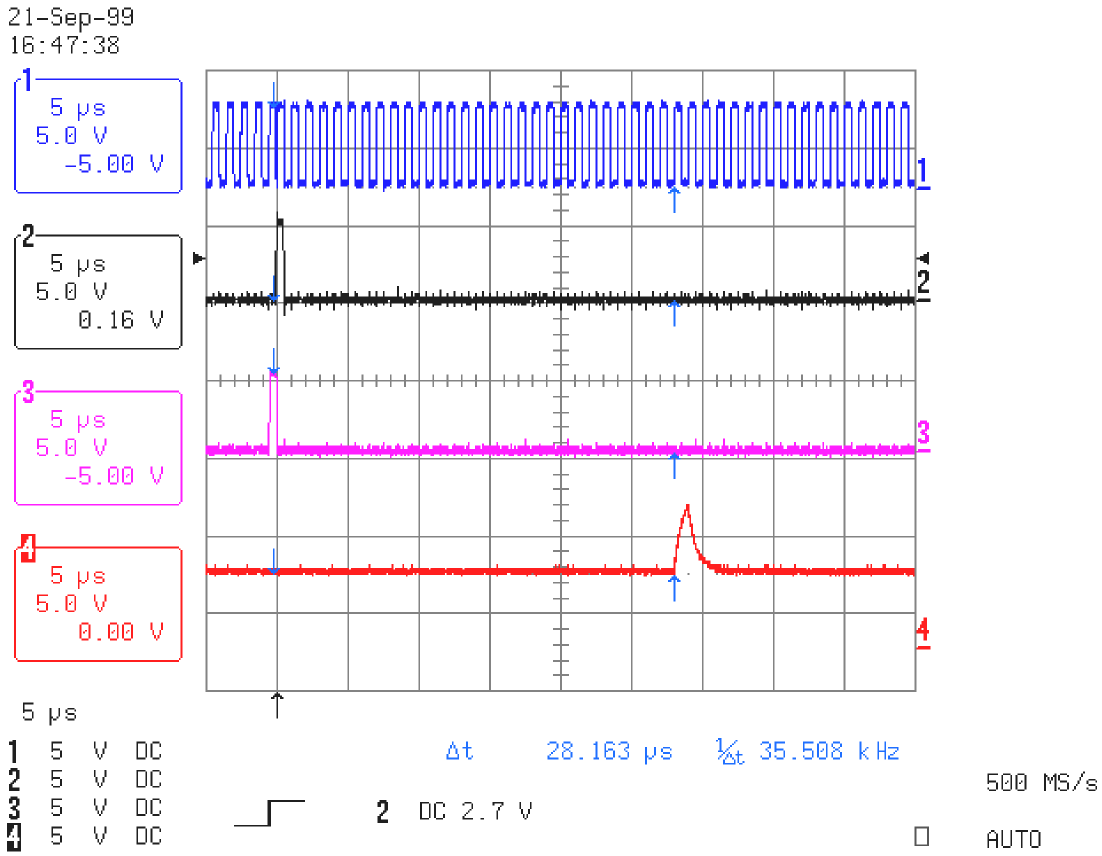


Abbildung 4.6: Oszilloskopbild der Testmessung am Switcher

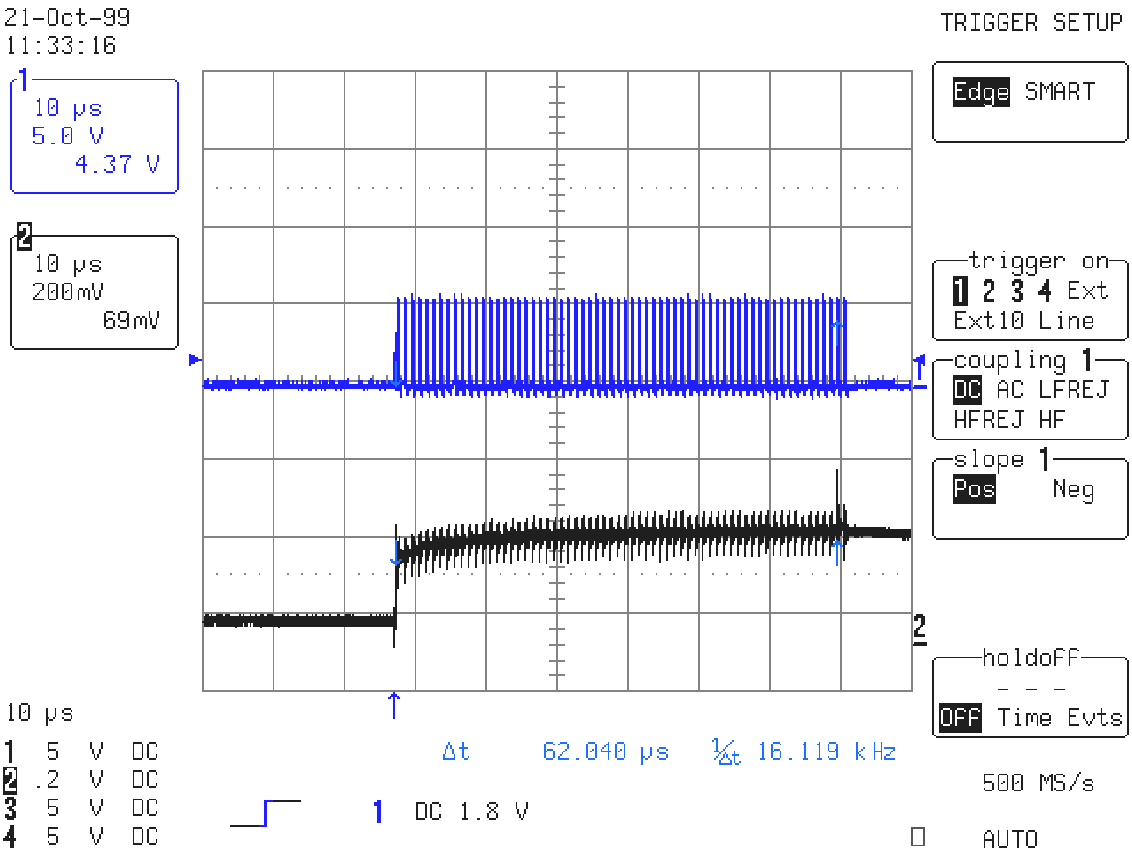


Abbildung 4.7: Oszilloskopbild der Testmessung am CARLOS

4.2.1.3 Funktionstest des CARLOS

Auch der CARLOS wurde zunächst einzeln getestet. Neben den Kennlinien für die Eingangsspannung gegen Eingangsstrom und Eingangsstrom gegen Ausgangsstrom wurde der Digitalteil getestet. In Abbildung 4.7 ist ein Oszilloskopbild dieses Tests zu sehen. Auf Kanal 2 (oben) ist der Takt und auf Kanal 1 (unten) der Ausgang des CARLOS geschaltet. Da beim Start der Messung kein Kanal auf den Ausgang geschaltet ist, muß der CARLOS von seinem kleinen Offsetwert auf den Stromwert des Kanals 0 schalten. Danach sieht man deutlich die Schaltimpulse, die durch das Weiterschalten zum nächsten Kanal entstehen.

Bei den Tests zeigte sich eine hohe Belastungsfähigkeit. Der CARLOS wurde auch bei hohen Eingangsströmen von bis zu 70 µA (nach dem Stromabzug von 57 µA) nicht beschädigt, sondern ging lediglich am Ausgang in die Sättigung.

4.2.1.4 Aufbau der Spannungsversorgung

Bei dem in Dortmund aufgebauten Bioscope wurde die Spannungsversorgung des Systems nicht über die an der Universität Bochum entwickelte Power-Supply-Card vorgenommen. Stattdessen wurden die einzelnen Spannungen durch Netzgeräte über Koaxialkabel dem System zugeführt. Die Schwankung der Spannung wird mit 6 mV angegeben. Testmessungen der Spannungen am Oszilloskop stützen diese Angaben. Der Vorteil der größeren Flexibilität bei der Spannungsversorgung durch die Netzgeräte überwiegt die etwas schlechteren Rauscheigenschaften gegenüber der Power-Supply-Card.

5 Messungen am Bioscope

5.1 Ablauf der Datenauslese

Der Aufbau der DEPFET-Matrix gibt nur wenige Einschränkungen für den Ablauf der Auslese vor.

1. Ein Löschen des internen Gates kann nur zeilenweise erfolgen, wobei jedoch auch mehrere Zeilen gleichzeitig gelöscht werden können.

2. Ein Einschalten der Transistoren kann nur zeilenweise erfolgen. Auch hier ist die Auswahl der gleichzeitig eingeschalteten Zeilen beliebig.

3. Ein Auslesekanal liefert den Gesamtstrom, der durch alle eingeschalteten Transistoren der zugehörigen Spalte fließt.

Die folgenden Messungen mit dem DEPFET-Bioscope wurden alle mit der Steuersequenz, die in Abbildung 5.1 schematisch dargestellt ist, vorgenommen. Der Ablauf gliedert sich in drei Teile.

Zunächst werden die internen Gates aller Pixel geleert. Hierfür werden alle Transistoren ausgeschaltet, und auf die Löschkontakte aller Zeilen wird die Löschspannung geschaltet. Nach dem Löschen wird die Matrix in den Anfangszustand für die Auslese gebracht. In diesem sind alle Zeilen außer der ersten ausgeschaltet. Damit der Einschaltvorgang der ersten Zeile keinen Einfluß auf die Messung hat, werden zu Beginn einmal alle Kanäle des CARLOS gemessen und verworfen.

Der nächste Teil besteht aus der Auslesesequenz für die einzelnen Zeilen und wird 64mal wiederholt. Innerhalb der Schleife wird zunächst der Strom aller CARLOS-Eingänge gleichzeitig gemessen und durch eine Sample-and-Hold-Schaltung gespeichert. Diese Schaltung besteht aus einem Schalter und einer Kapazität, die durch Schließen des Schalters aufgeladen wird. Dadurch kann der gemessene Wert am Eingang gespeichert werden. Durch Öffnen des Schalters wird der Eingang von der Kapazität getrennt, und eine Änderung an diesem hat keinen Einfluß auf den Ladezustand der Kapazität. Sofort nach dem Ende der Speicherung der Eingangsströme wird die gemessene Zeile aus und die nächste Zeile angeschaltet. Danach erfolgt die sequenzielle Auslese der CARLOS-Kanäle, das Digitalisieren und das Speichern der

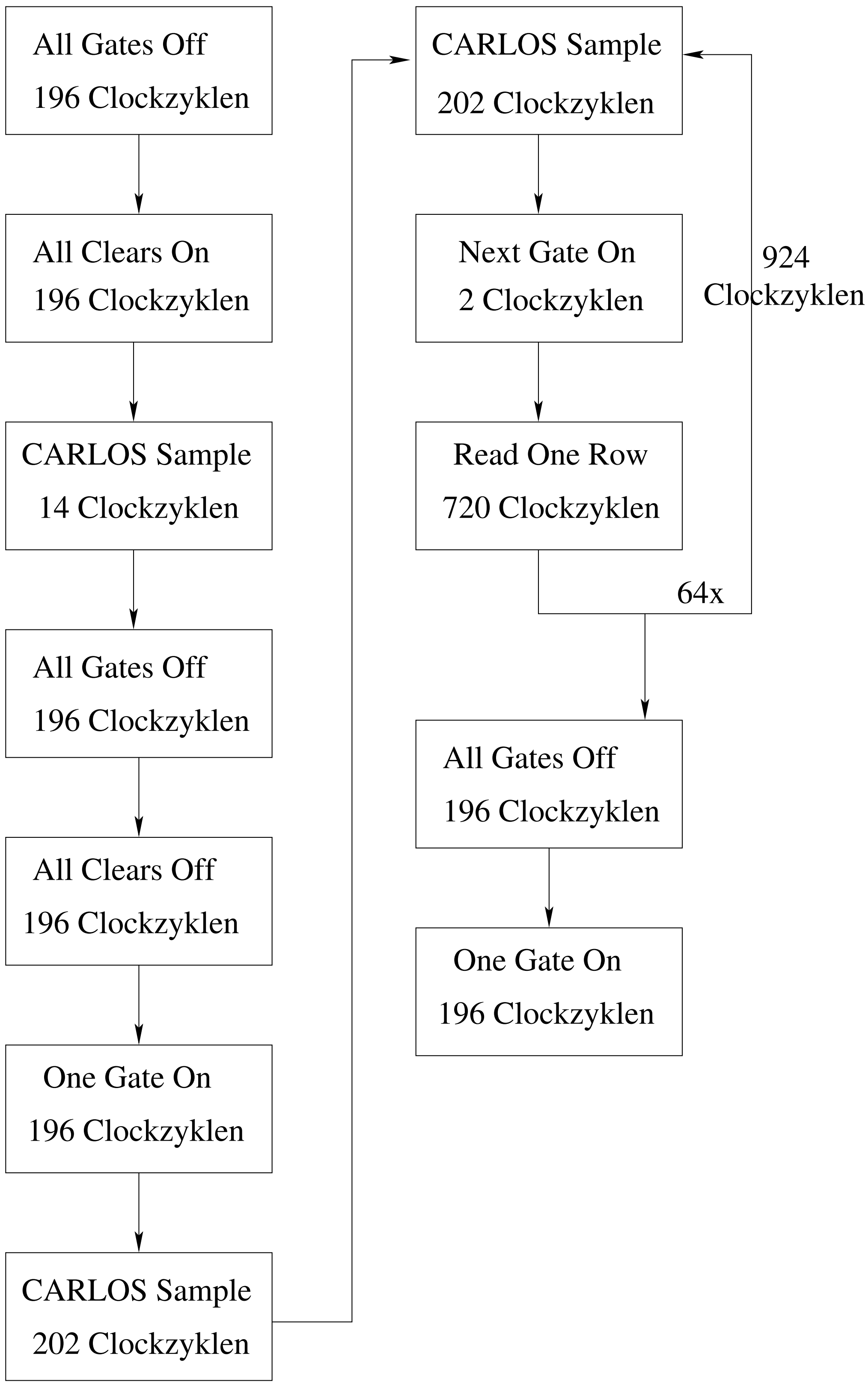


Abbildung 5.1: Ablaufdiagramm der Datennahme

Daten im FIFO. Das Weiterschalten der Zeile wird noch vor der Auslese der CARLOS-Kanäle durchgeführt, damit zwischen dem Schaltvorgang und der nächsten Messung eine möglichst große Zeitspanne liegt. Dadurch wird der Einfluß des Schaltvorgangs auf die Transistorströme klein gehalten.

Im letzten Teil wird dann die Matrix wieder in einen definierten Zustand gebracht. Es werden die Transistoren aller Zeilen bis auf die der ersten ausgeschaltet.

5.2 Untersuchung der Linearität des Teilsystems CARLOS-ADC

Der Strom durch eine Matrixspalte wird vom CARLOS gemessen, verstärkt und danach durch den ADC digitalisiert. Dies erfolgt nur im Idealfall streng linear. Beim Bioscope ist eine Abweichung der Kennlinie Strom gegen ADC-Wert von der Linearität zu beobachten. Um eine Korrekturfunktion für die gemessenen ADC-Werte ermitteln zu können, wurde eine Eichmessung vorgenommen. Hierbei wird (Abbildung 5.2) ein Strom über den Pulldown-Eingang in den CARLOS eingespeist und der dazugehörige ADC-Wert gemessen. Damit ein Strom durch den Pulldown-Eingang in den CARLOS hineinfließt, muß eine Pulldown-Spannung, die positiver als die Drain-Spannung ($\approx 5{,}7\,\mathrm{V}$) ist, angelegt werden. Die Pulldown-Spannung wurde im Intervall $[5{,}7\,\mathrm{V},\ 7{,}2\,\mathrm{V}]$ variiert und der Strom in den CARLOS gemessen. Der zugehörige ADC-Wert wurde 16mal gemessen. Während der Messung wird die Matrix wie bei

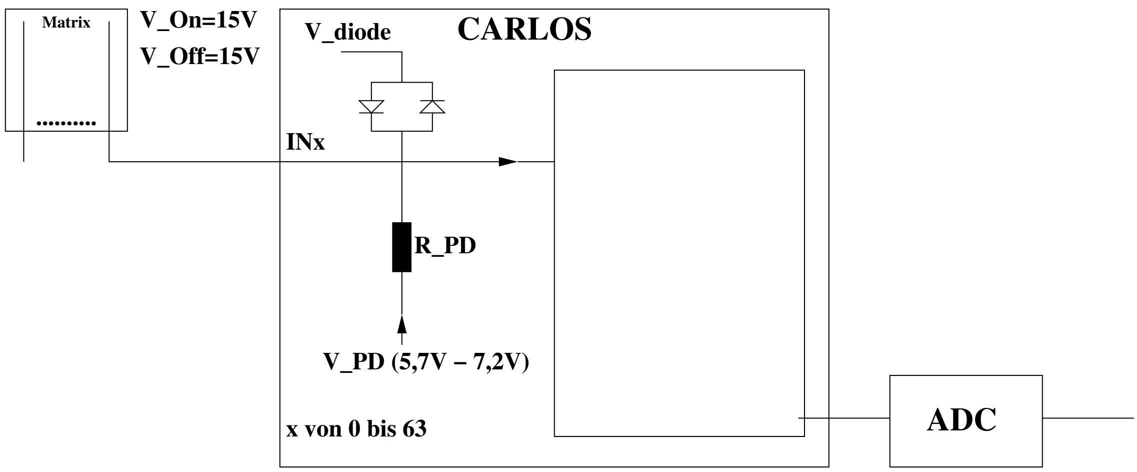


Abbildung 5.2: Meßaufbau der Eichmessung des Teilsystems CARLOS-ADC

einer normalen Datennahme (siehe Abbildung 5.1) betrieben. Der einzige und entscheidende Unterschied besteht darin, daß $V_{GateON} = 15\,\mathrm{V}$ gesetzt wird. Dadurch sind *alle* Transistoren der Matrix zu jedem Zeitpunkt der Messung *ausgeschaltet*.

Somit ist der Stromfluß durch jede Spalte der Matrix gleich 0. Der Eingangsstrom in den CARLOS ist eindeutig durch den Strom über den Pulldown-Eingang gegeben.

Diese Vorgehensweise ist einerseits erwünscht, um die Eichmessung an einem Versuchsaufbau durchzuführen, der dem späteren Aufbau für die Datennahme möglichst nahe kommt. Andererseits ist sie notwendig, um eine Polung der Gate-Kanal-Dioden in Sperrichtung während der gesamten Messung zu gewährleisten.

Zu einer Polung der Gate-Kanal-Dioden in Durchlaßrichtung kann es kommen, wenn die Matrix während der Messung nicht im normalen Betriebsmodus ist. Wie in 4.1.3 erläutert, sorgt die geregelte Kaskode für eine konstante Spannung am Eingang des CARLOS, wenn ein Stromfluß in den CARLOS hinein vorhanden ist. Dieser Stromfluß wird bei der Eichmessung über den Pulldown-Eingang zugeführt, so daß der Eingang des CARLOS auf einem Potential von $5,7\,\mathrm{V}$ liegt. Wenn nun die Spannungen V_{Source} und V_{GateON} nicht in definierter Weise vorgegeben werden, kann es zu einer Konstellation kommen, in der die Drain positiver ist als Source und Gate. Dies würde die Gate-Kanal-Diode öffnen, und der Stromfluß über das Gate würde den DEPJFET-Pixel beschädigen.

Die Meßdaten sind in Abbildung 5.3 dargestellt. Dort ist auch die an die Daten angepaßte Funktion aufgetragen. Im folgenden soll nun gezeigt werden, wie eine Funktion an die Daten angepaßt wird. Am Ende dieses Abschnitts wird dann die Korrekturfunktion, mit deren Hilfe die gemessenen ADC-Werte korrigiert werden, angegeben.

5.2.1 Statistische Behandlung der Meßwerte

Für jeden Stromwert wurde der ADC-Wert 16mal gemessen. Der Mittelwert und die Standardabweichung ergeben sich dann zu

$$\bar{x} = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} x_i \tag{5.1}$$

und

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} (x_i - \bar{x})^2} \quad . \tag{5.2}$$

Alle Stromwerte wurden mit einem Picoamperemeter gemessen. Als Fehler in diesem Meßbereich wurde ein Wert von $0,1\,\mu\mathrm{A}$ abgeschätzt. Für die Funktionsanpassung wurden die Meßwerte im Intervall $[50\,\mu\mathrm{A}, 950\,\mu\mathrm{A}]$ benutzt.

Zur Funktionsanpassung wurde das Paket Minuit der Analysesoftware ROOT[1] benutzt. Die Berechnung beruht auf der Minimierung der Abstandsquadrate. Zur Überprüfung der Signifikanz der Anpassung wurden folgende Kriterien benutzt:

[1]CERN, http://www.cern.ch und http://root.cern.ch

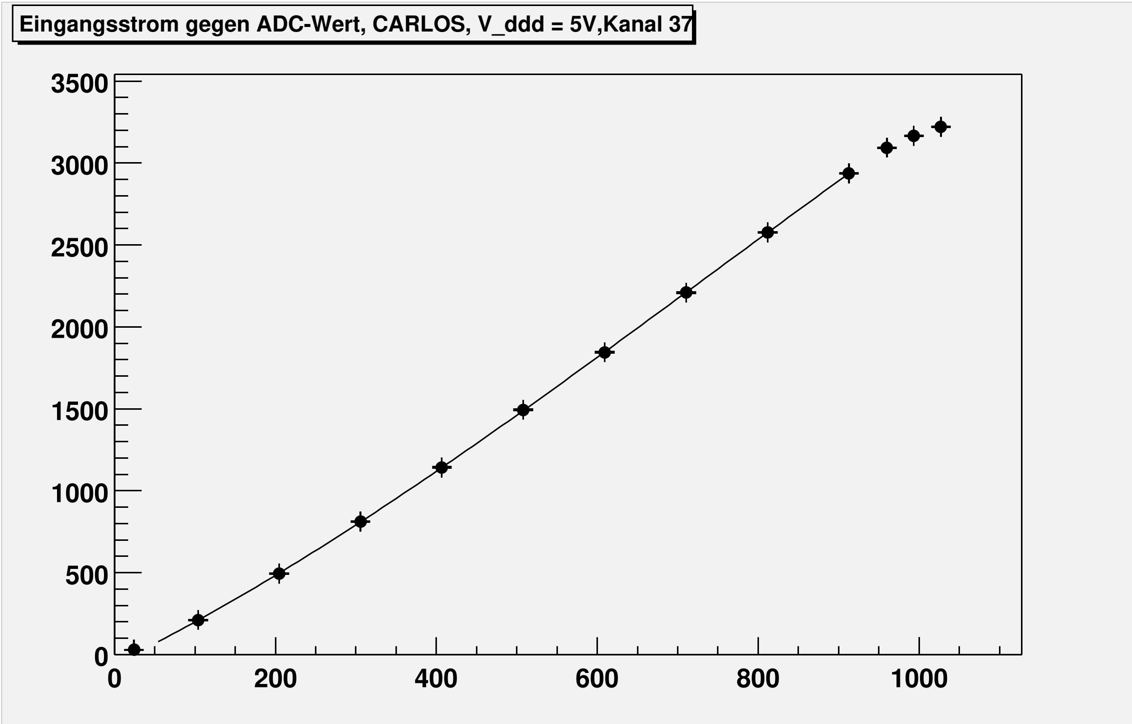


Abbildung 5.3: Meßwerte der Eichmessung des Teilsystems CARLOS-ADC

1. Konvergenz der Anpassung
2. Positiv-definite Fehlermatrix
3. Beidseitiger χ^2-Signifikanztest

Der χ^2-Signifikanztest erlaubt eine Aussage darüber, ob eine vorgegebene Hypothese — hier eine Anpassung in Form eines Polynoms k-ten Grades — für ein gegebenes Signifikanzniveau α zurückgewiesen werden muß. Dies ist dann der Fall, wenn das χ^2 der Anpassung größer ist als die Quantile $\chi^2_{1-\alpha}$ der χ^2-Verteilung.

Zur Untersuchung der Anpassungen von f an die Meßwerte $\{x_i\}$ mit den Fehlern $\{\sigma_i\}$ wird das jeweilige

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{x_i - f_i}{\sigma_i} \right)^2 \tag{5.3}$$

berechnet, wobei N die Anzahl der Meßwerte bezeichnet. Die Anzahl der Freiheitsgerade n ergibt sich aus N und der Anzahl $(k+1)$ der Parameter des anzupassenden Polynoms k-ten Grades zu

$$n = N - (k+1). \tag{5.4}$$

Die Definition der Quantile $\chi^2_{1-\alpha}$ findet sich in Gleichung 5.5 . Einige Werte in Abhängigkeit vom Freiheitsgrad n und Parameterzahl k sind in Tabelle 5.1 [4] aufgeführt, wobei μ den Erwartungswert und σ die Standardabweichung der χ^2-Verteilung angeben.

$$1 - \alpha = \int_{-\infty}^{\chi^2_{1-\alpha}} f\left(\chi^2; f\right) d\chi^2 \tag{5.5}$$

k	n	μ	σ	10%	5%	1%	0,5%	0,1%
2	6	6	$\sqrt{12}$	10,645	12,592	16,812	18,548	22,458
3	5	5	$\sqrt{10}$	9,236	11,070	15,086	16,750	20,515

Tabelle 5.1: Quantile $\chi^2_{1-\alpha}$ der χ^2-Verteilung

5.2.2 Korrekturfunktion

Die Werte der Anpassung für ein Polynom zweiten und dritten Grades sind in Tabelle 5.2 gegeben. Im folgenden soll nun die Herleitung der Korrekturfunktion kurz skizziert werden.

Das Polynom dritten Grades besitzt ein χ^2 von 4,92. Der Erwartungswert der χ^2-Verteilung für fünf Freiheitsgrade beträgt 5. Diese Übereinstimmung ist sehr gut und rechtfertigt die Verwendung des Polynoms dritten Grades. Die Verwendung der Parabel als Korrekturfunktion würde zwar eine analytische Vorgehensweise ermöglichen, die Anpassung ist aber zu schlecht, um diese Funktion als Korrektur zu verwenden. Bei der Korrektur der Meßwerte wird im folgenden das Polynom dritten Grades

$$p_3 x^3 + p_2 x^2 + p_1 x + p_0 = y_m \tag{5.6}$$

zugrunde gelegt, wobei y_m den gemessenen ADC-Wert bezeichnet. Wenn man den

	2. Grad	3. Grad
χ^2	$99,9$	$4,9$
p_0	$-105,18 \pm 3,39$	$-55,82 \pm 6,11$
p_1	$2,886 \pm 0,017$	$2,391 \pm 0,054$
p_2	$(4,976 \pm 0,167) \cdot 10^{-4}$	$(1,664 \pm 0,121) \cdot 10^{-4}$
p_3	0	$(-7,605 \pm 0,780) \cdot 10^{-7}$

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Anpassung an die Meßwerte

korrigierten ADC-Wert mit y_k bezeichnet und die lineare Beziehung

$$mx + b = y_k \tag{5.7}$$

mit den Anfangswerten

$$y_k\,(0) = 0 \text{ und } y_k\,|_{x(y_m=2000)} = 2000 \tag{5.8}$$

vorgibt, so ergibt sich für die Korrekturfunktion

$$\frac{p_3}{m}y_k^3 + \frac{p_2}{m}y_k^2 + \frac{p_1}{m}y_k + p_0 = y_m \tag{5.9}$$

mit $m = \frac{2000}{651,902}$.

Der Wertebereich der korrigierten ADC-Werte ist ganzzahlig und beschränkt (Intervall [0,4096]). Dies ermöglicht die Verwendung einer Wertetabelle zur Korrektur der ADC-Werte. Damit läßt sich die numerische Berechnung der Nullstellen des Polynoms umgehen. Eine Tabelle dieser Größe kann leicht vom Analyseprogramm erzeugt und gehandhabt werden.

5.3 Auswirkung der Kamm- und Rückkontaktspannung

Wie in Unterkapitel 3.3 beschrieben, besitzt die Matrix D8, die im Bioscope verwendet wird, einen Kamm. Diese zusätzliche p^+-Implantation zwischen zwei Zeilen einer DEPFET-Matrix erlaubt es, ein Potential zwischen den Spalten aufzubauen. Je nach Polung der Spannung erwartet man eine Verbesserung oder Verschlechterung der Ladungssammlung. Um den Einfluß dieses Kamms besser zu verstehen, wurden Messungen an dieser Matrix mit verschiedenen Parametern (Tabelle 5.3) durchgeführt.

Bei der Datennahme werden neben der Position des getroffenen Pixels, sowie dessen Pedestalwert und ADC-Wert, auch die Werte für die acht Pixel mit um eins kleineren und größeren Spalten- und Zeilenindizes in die Ereignisdatei geschrieben. Diese Pixelgruppe wird im folgenden als Cluster bezeichnet. Die Form eines Clusters (Abbildung 5.4) ist wegen der Verschiebung der Spalten gegeneinander vom Spaltenindex abhängig. Besitzt das getroffene Pixel einen geraden Spaltenindex, so ist die mittlere Spalte nach oben verschoben. Bei ungeradem Spaltenindex sind die beiden äußeren Spalten nach oben verschoben. Aus einem Cluster wird durch Vernachlässigung der beiden Pixel rechts und links oben für ungerade und der Pixel links und rechts unten für gerade Spaltenindizes ein reduzierter Cluster. Für alle Analysen wird ein reduzierter Cluster benutzt.

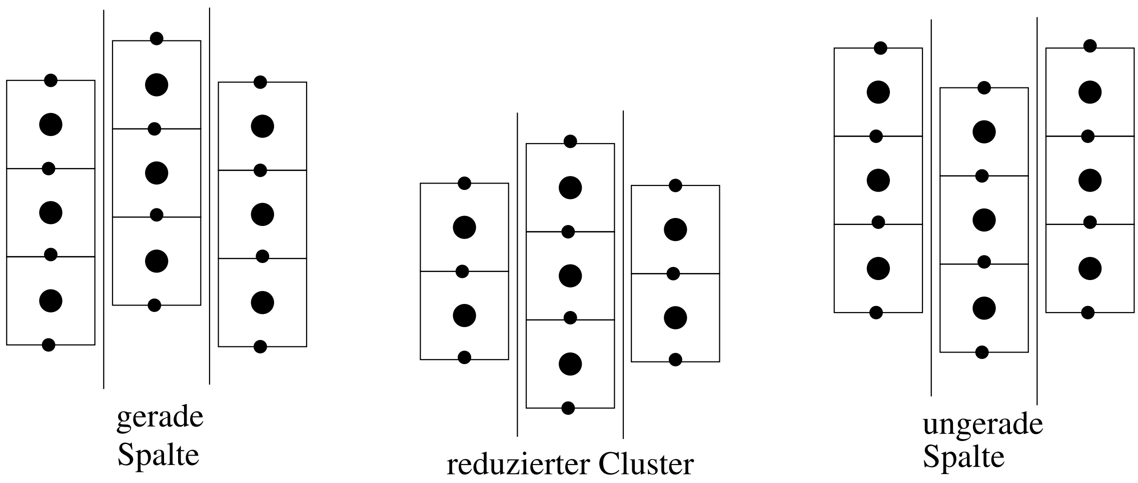


Abbildung 5.4: Cluster für gerade und ungerade Spaltenindizes des getroffenen Pixels und reduzierter Cluster

V_{ON}	$12,20\,\mathrm{V}$
V_{OFF}	$15\,\mathrm{V}$
V_{Source}	$10\,\mathrm{V}$
$V_{\mathrm{ddd\_Carlos}}$	$5\,\mathrm{V}$
Schwelle	27
Quelle	^{55}Fe, $32,2\,\mathrm{MBq}$

Name	V_{Kamm}	Quellenabstand	V_{RK}
KammA	$5,7\,\mathrm{V}$	6 mm	$-80\,\mathrm{V}$
KammB	$4\,\mathrm{V}$	6 mm	$-80\,\mathrm{V}$
KammC	$7,5\,\mathrm{V}$	6 mm	$-80\,\mathrm{V}$
KammD	$5,7\,\mathrm{V}$	6 mm	$-90\,\mathrm{V}$
KammE	$5,7\,\mathrm{V}$	6 mm	$-85\,\mathrm{V}$
KammI	$5,7\,\mathrm{V}$	36 mm	$-85\,\mathrm{V}$

Tabelle 5.3: Eingestellte Parameter der Messungen zur Auswirkung des Kamms

5.3.1 Messungen mit variierter Kammspannung

Zunächst soll der Schwerpunkt auf den Vergleich der Messungen *KammA*, *KammB* und *KammC* gelegt werden. Bei diesen drei Messungen wurde als einziger Parameter die Kammspannung variiert. Die Abbildung 3.6 zeigt eine schematische Darstellung der Geometrie zweier benachbarter Spalten der Matrix. Durch Variation des Potentials zwischen den Spalten einer Matrix kann die Ladungsaufspaltung auf die Pixel beeinflußt werden. Dies soll im folgenden näher untersucht werden.

Zur Messung wurden drei verschiedene Werte (7,5 V, 5,7 V und 4 V) für die Kammspannung ausgewählt. Alle Spannungen, die von außen an das Bioscopesystem angelegt werden, beziehen sich auf ein gemeinsames Nullpotential. Die gemeinsame Source aller Transistoren liegt auf $V_{\mathrm{Source}} = 10\,\mathrm{V}$.

5.3.1.1 Abhängigkeit der Trefferanzahl von der Kammspannung

Die Dauer der Messung und der Abstand der Quelle waren bei allen drei Messungen gleich. Somit wurde die Matrix innerhalb des statistischen Fehlers von der gleichen Anzahl von γ-Quanten getroffen. Der Unterschied in der Anzahl registrierter Treffer bei den drei Messungen ist aber signifikant.

Messung	Trefferanzahl
KammA	131 137
KammB	164 181
KammC	56 739

Besonders fällt die sehr geringe Anzahl der registrierten Treffer bei Messung *KammC* auf. Dieses läßt sich mit der Auswirkung des Kamms auf die Ladungsaufteilung innerhalb eines Clusters erklären. Anhand von Abbildung 3.6 wird der Zusammenhang der Kammspannung mit der unterschiedlichen Trefferanzahl der einzelnen Messungen erklärt, wobei sich alle Potentiale auf die Source beziehen. Bei allen Messungen liegt die Drain auf einem Potential von $-4,3\,\mathrm{V}$.

Bei Messung *KammC* liegt am Kamm ein Potential von $-2,5\,\mathrm{V}$ an. Die Trefferanzahl für diese Messung ist deutlich niedriger als für die beiden anderen Messungen. Wie in Unterkapitel 3.4 erläutert, bildet sich bei diesem Kammpotential zwischen den Drain-Implantationen zweier Spalten ein zusätzliches Potentialminimum aus, in dem sich Elektronen sammeln können und somit nicht vom DEPFET nachgewiesen werden.

Des weiteren wird die Ladungswolke nicht mehr so stark fokussiert und breitet sich stärker aus, was zu einer Aufteilung der Ladung auf mehrere Pixel führt. Ist die Ladungsmenge im getroffenen Pixel zu klein, so wird dieser Treffer von dem Ausleseprogramm nicht berücksichtigt, da der vorgegebene Schwellenwert nicht überschritten wird. Auf die Festlegung von Schwellen für Treffer und Rauschen wird in Unterkapitel 5.3.2.2 eingegangen.

Bei der Betrachtung der Trefferanzahl der Messung *KammB* stellt man eine Erhöhung im Vergleich zu Messung *KammA* fest. Dies läßt sich ebenfalls auf die Wirkung des Kammpotentials zurückführen. In diesem Fall liegt am Kamm ein stark negatives Potential von $-6\,\mathrm{V}$ an. Dadurch bildet sich ein lokales Potentialmaximum für Elektronen aus, welches tiefer in das Silizium hineinreicht als die Potentiale der beiden benachbarten Drain-Implantationen. Somit wird die Ladungsausbreitung behindert, da die Elektronen von diesem Potentialmaximum abgestoßen und in die Pixel zurückgedrängt werden. Nur Elektronen, die schon tief im Silizium in das Nachbarpixel übergewechselt sind, driften ins interne Gate des Nachbarpixels und werden dort nachgewiesen. Dies verstärkt die Ladungssammlung und erhöht die Anzahl der registrierten Treffer.

Auffällig ist die starke Asymmetrie in der Veränderung der Trefferanzahl durch die Kammspannung. Bei Messung *KammB* ist die Trefferanzahl um ca. 30.000 gegenüber *KammA* erhöht. Im Gegensatz dazu ist diese bei Messung *KammC* um ca. 75.000 niedriger, obwohl der Potentialunterschied am Kamm bei beiden Messungen gleich ist.

Die Begründung für diese Asymmetrie ist folgende:
Bei beiden Messungen (*KammB* und *KammC*) wird die Trefferanzahl durch die Auswirkung des Kammpotentials auf die Ladungsausbreitung beeinflußt. Bei *KammB* führt das zu einer Erhöhung, bei *KammC* zu einer Absenkung der Trefferanzahl. Bei einem Potential von $-2,5\,\mathrm{V}$ (*KammC*) am Kamm ist ein zweiter Effekt überlagert, der zusätzlich die Trefferanzahl herabsetzt. Bei dieser Spannung bildet sich wie oben beschrieben ein zusätzliches Potentialminimum, in dem sich Elektronen sammeln und für den Nachweis verlorengehen.

5.3.1.2 Auswirkung der Kammspannung auf die Ladungsverteilung in einem Cluster

In den beiden Histogrammen in Abbildung 5.5 und 5.6 ist die Häufigkeitsverteilung der signalladungstragenden Pixel eines Clusters dargestellt. Auf der x-Achse ist die Anzahl der Pixel über der Rauschschwelle (=7), auf der y-Achse der Prozentsatz der Cluster mit dieser Pixelanzahl aufgetragen. Es wurden alle Pixel mit einem ADC-Wert größer 7 als signalladungstragend betrachtet. Die Höhe des Schwellenwertes wird in Unterkapitel 5.3.2.2 durch Berechnungen zum Rauschen des Systems begründet.

Deutlich ist zu erkennen, daß bei der überwiegenden Mehrzahl von über 70% bzw. über 90% der Cluster in Messung *KammA* die Ladung nur auf maximal 2 bzw. 3 Pixel aufgeteilt wird. In Messung *KammC* ist der Prozentsatz etwas kleiner, aber er beträgt immer noch 60% bzw. 80% für die Aufteilung auf maximal 2 bzw. 3 Pixel.

Beim Vergleich der beiden Histogramme sieht man eine deutliche Verschiebung der Häufigkeitsverteilung gerade bei höheren Pixelanzahlen.

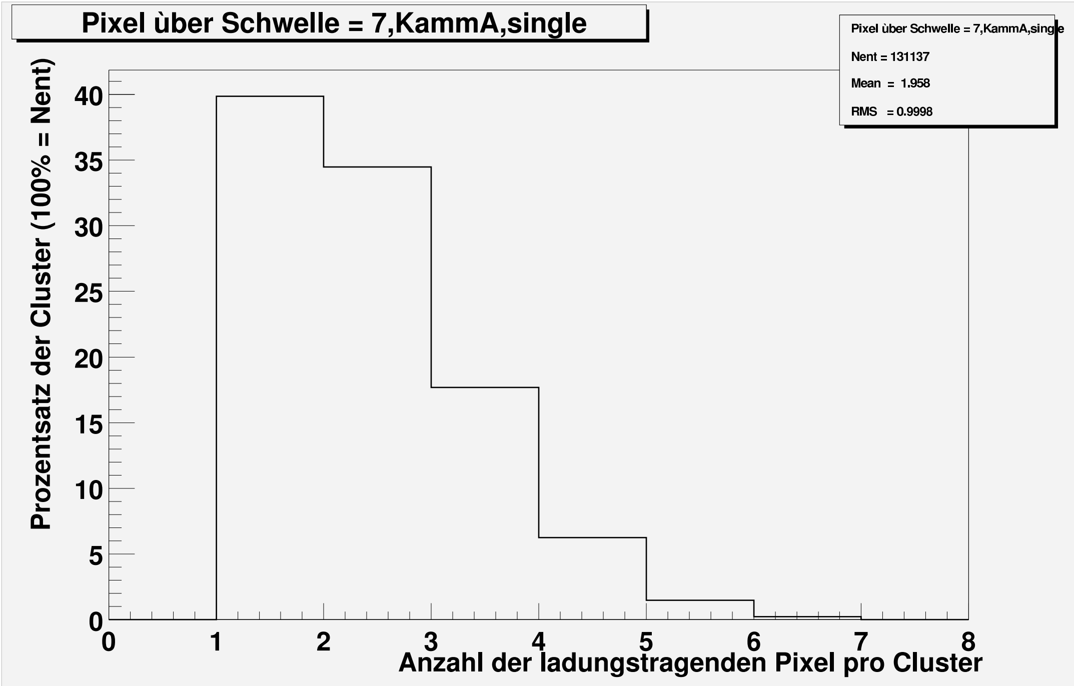


Abbildung 5.5: Häufigkeitsverteilung der signalladungstragenden Pixel eines reduzierten Clusters für Messung *KammA*

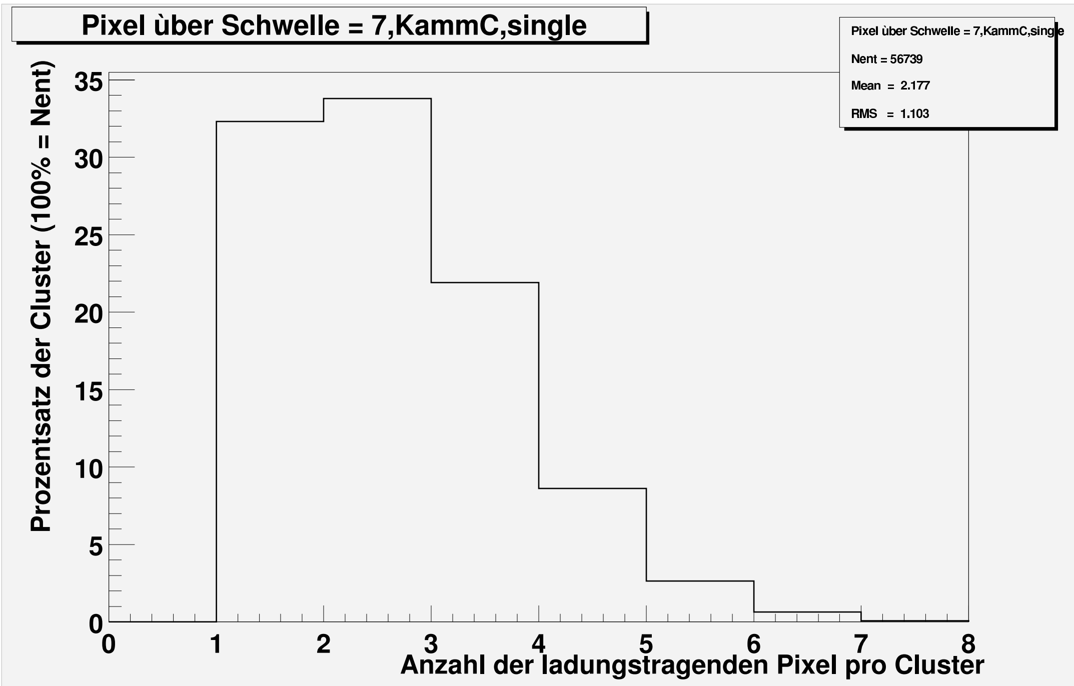


Abbildung 5.6: Häufigkeitsverteilung der signalladungstragenden Pixel eines reduzierten Clusters für Messung *KammC*

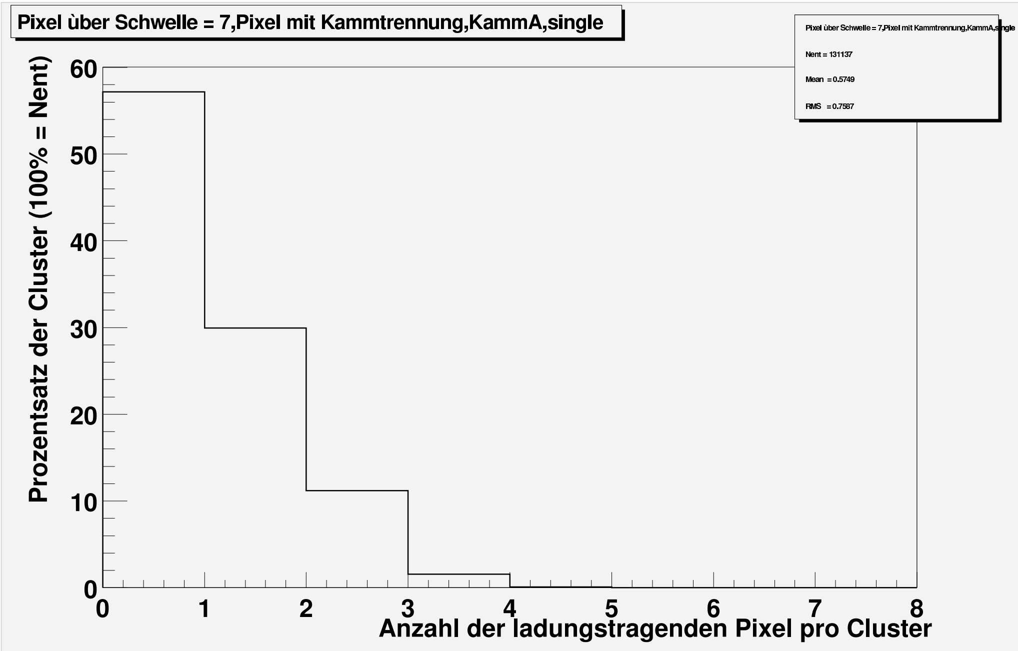


Abbildung 5.7: Häufigkeitsverteilung für Messung *KammA* der signalladungstragenden Pixel eines reduzierten Clusters, die durch den Kamm vom getroffenen Pixel getrennt sind

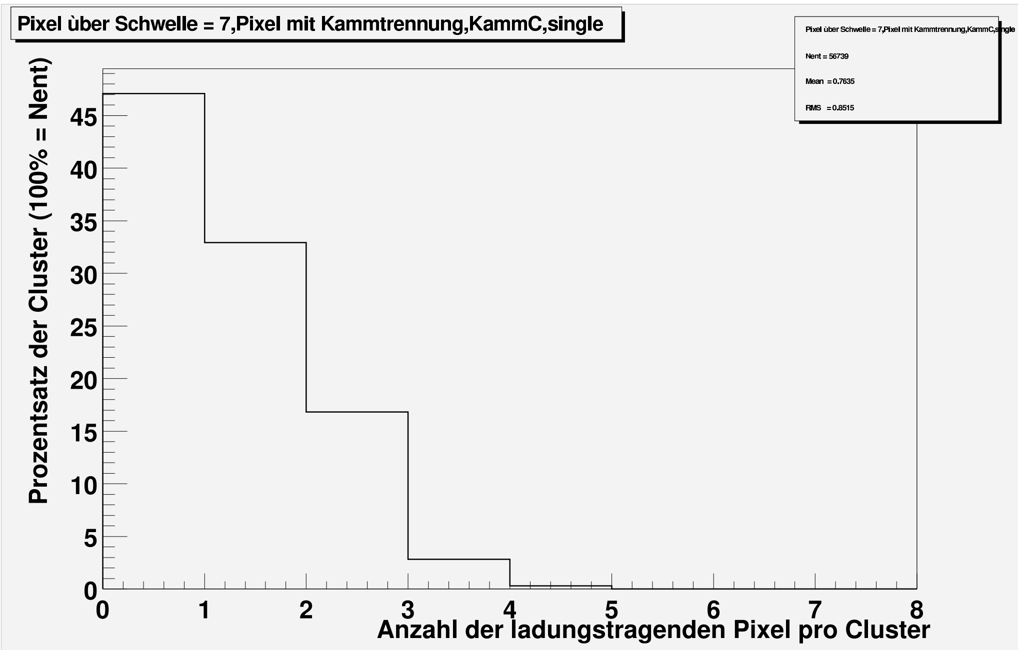


Abbildung 5.8: Häufigkeitsverteilung für Messung *KammC* der signalladungstragenden Pixel eines reduzierten Clusters, die durch den Kamm vom getroffenen Pixel getrennt sind

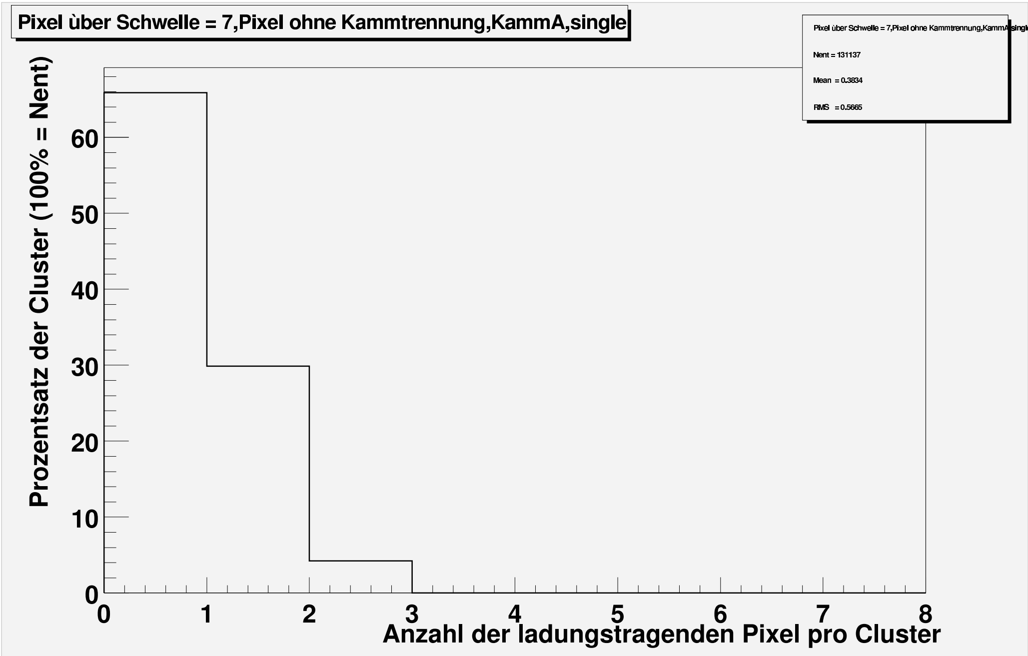


Abbildung 5.9: Häufigkeitsverteilung für Messung *KammA* der signalladungstragenden Pixel eines reduzierten Clusters ohne Trennung durch den Kamm

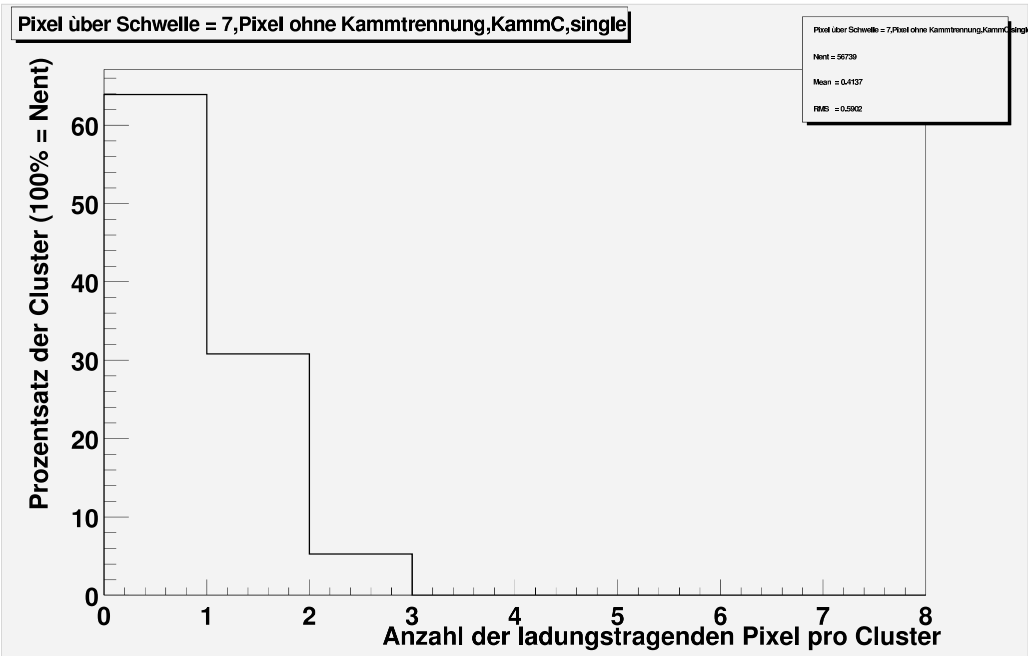


Abbildung 5.10: Häufigkeitsverteilung für Messung *KammC* der signalladungstragenden Pixel eines reduzierten Clusters ohne Trennung durch den Kamm

Um die Erklärung der Histogrammform durch den Einfluß des Kamms auf die Ladungsverteilung weiter zu stützen, wurden für jede Messung zwei weitere Histogramme der gleichen Art aber mit eingeschränkten Datenmengen gefüllt. In den Histogrammen in Abbildung 5.7 und 5.8 wurden nur die Pixel berücksichtigt, die vom getroffenen Pixel durch den Kamm getrennt sind. In Abbildung 5.9 und 5.10 wurden dagegen nur Pixel berücksichtigt, die in der gleichen Spalte wie das getroffene Pixel liegen. Beim Vergleich der Histogramme für die Pixel ohne Trennung durch den Kamm sieht man keine signifikanten Unterschiede. Die Form der beiden Histogramme ist gleich. Der Vergleich der Histogramme für die Pixel mit Trennung durch den Kamm dagegen zeigt deutlich die gleichen Unterschiede wie die Histogramme für alle Pixel. Hierdurch wird die Erklärung der Histogrammform durch den Einfluß des Kamms gestützt, da nur die Ladungsverteilung über Spaltengrenzen vom angelegten Potential am Kamm abhängt.

5.3.2 Ladungsmenge pro Cluster

Als radioaktive Quelle für die Messungen wurde ^{55}Fe mit einer Aktivität von $32,2\,\mathrm{MBq}$ verwendet. ^{55}Fe emittiert γ-Quanten mit einer Energie von $5,89\,\mathrm{keV}$ und $6,49\,\mathrm{keV}$. Somit erwartet man für die Ladungsmenge in einem Cluster einen konstanten Wert. In der Realität ist die Ladungsmenge gaußverteilt, da das Rauschen der Pixel eingeht. In den Histogrammen für die Ladungsverteilung ist auf der x-Achse die Summe der ADC-Werte eines Clusters und auf der y-Achse die Anzahl der Cluster mit dieser Summe dargestellt. Die Geometrie eines Clusters wird in Abbildung 5.4 gezeigt. Für die Analyse wird ein reduzierter Cluster verwendet.

5.3.2.1 Minimierung des Rauschbeitrags der Pixel

Wie in Unterkapitel 5.3.1.2 gezeigt, teilt sich die Ladung innerhalb eines reduzierten Clusters in der überwiegenden Mehrheit auf maximal drei Pixel auf. Die Messung *KammE* (siehe Abbildung 5.11) stellt hier keine Ausnahme dar.

Neben dem Histogramm mit der Ladungsverteilung für einen reduzierten Cluster in Abbildung 5.12(b) ist in Abbildung 5.12(a) diese Verteilung für die Summe aus drei Pixel mit den größten ADC-Werten innerhalb eines reduzierten Clusters aufgetragen.

Bei der Aufsummation aller Pixel eines reduzierten Clusters wird in der überwiegenden Mehrzahl aller Fälle die Summe 3 oder 4 Rauschpixel mit einschließen. Diese Rauschpixel enthalten keine Signalladung, tragen aber zum Rauschen bei. Die dadurch verursachte Verbreiterung ist in den Histogrammen und an den Werten der angepaßten Gaußverteilung (siehe Tabelle 5.4) zu erkennen. Um diesen Rauschbeitrag zu eliminieren, wird bei den folgenden Histogrammen mit Ladungsverteilungen immer nur über drei Pixel summiert.

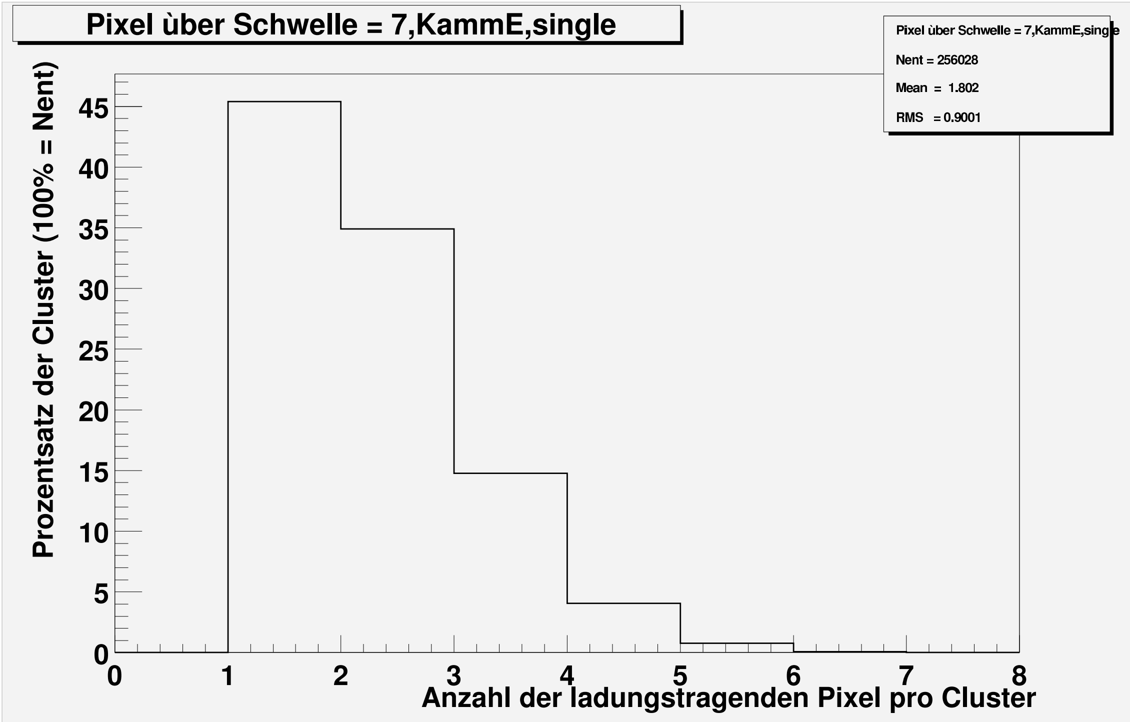
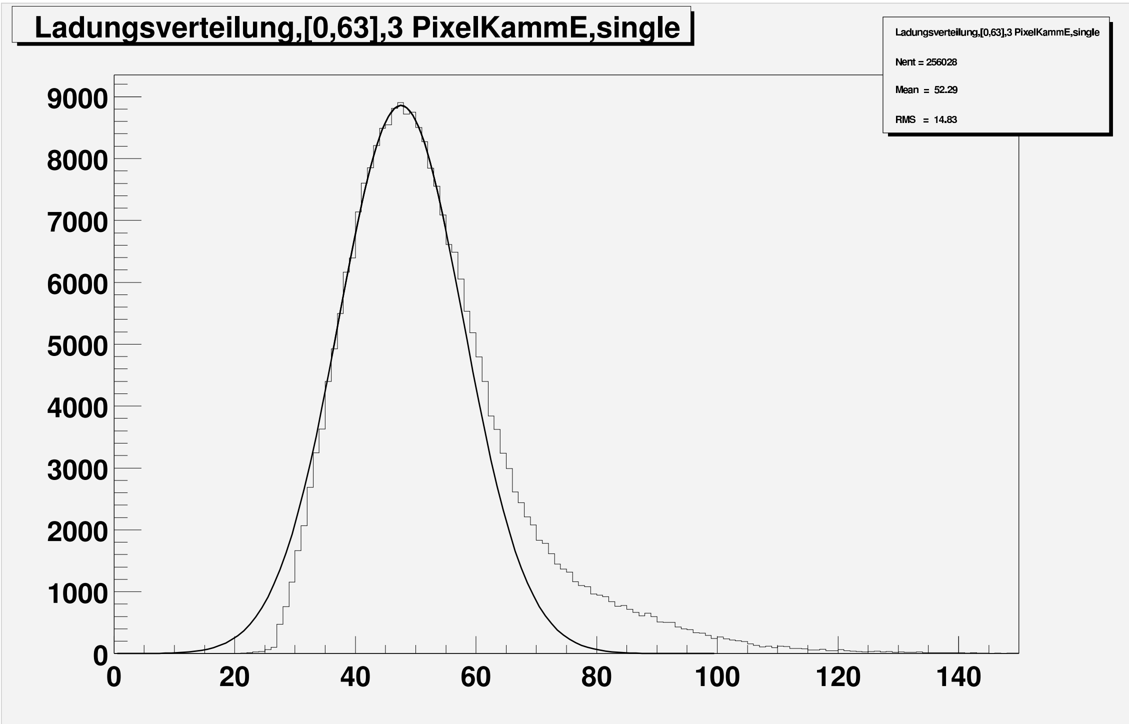


Abbildung 5.11: Häufigkeitsverteilung der signalladungstragenden Pixel eines reduzierten Clusters für Messung *KammE*

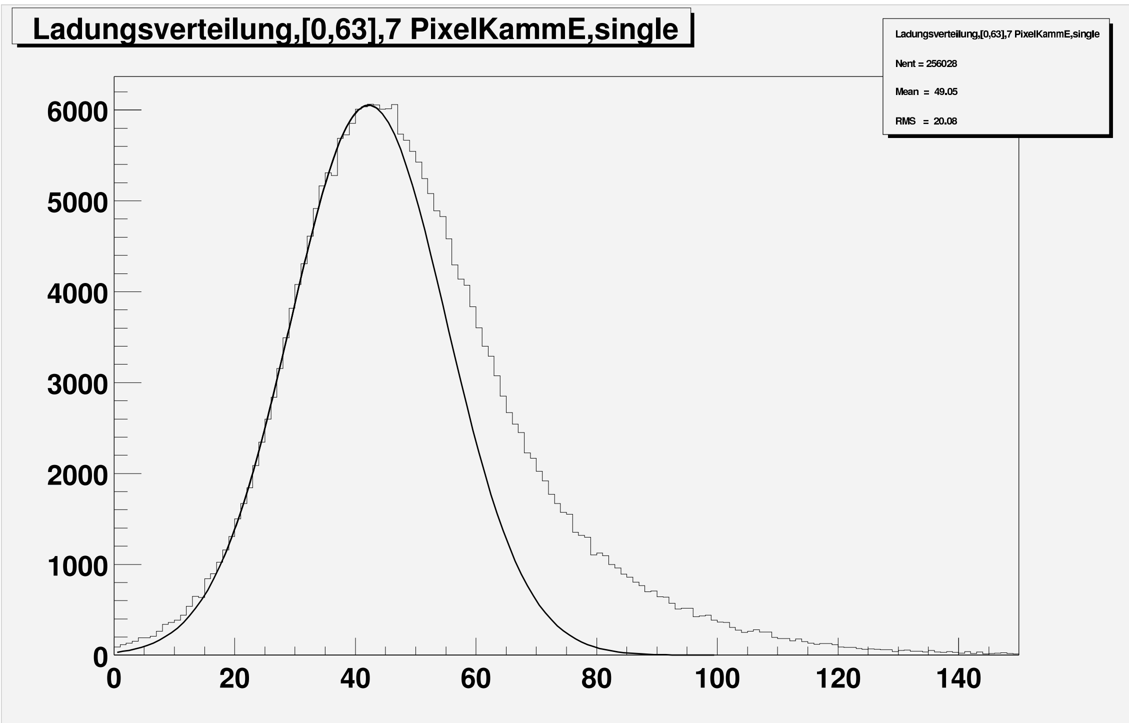
$$f(x) = p_0 \cdot \exp\left[-0,5 \cdot \left(\frac{x - p_1}{p_2}\right)^2\right] \tag{5.10}$$

	p_0	p_1	p_2	χ^2	Intervall	χ_T^2
E,3P	$8858,84 \pm 32,02$	$47,56 \pm 0,57$	$10,35 \pm 0,10$	16,82	[36, 55]	17
E,7P	$6053,73 \pm 30,03$	$42,21 \pm 0,21$	$12,93 \pm 0,14$	23,917	[18, 44]	24
A,3P	$4719,16 \pm 27,13$	$43,98 \pm 0,10$	$9,91 \pm 0,24$	13,58	[37, 51]	12
I, 3P	$1400,90 \pm 12,61$	$48,15 \pm 0,13$	$9,29 \pm 0,19$	19,98	[36, 55]	17

Tabelle 5.4: Tabelle der Anpassungsergebnisse für die Messungen *KammA*, *KammE* und *KammI*. Die Kennzeichnug xP bedeutet, daß über die x Pixel mit den größten ADC-Werten summiert wurde.



(a) Ladungsverteilung für 3 Pixel pro reduziertem Cluster



(b) Ladungsverteilung für 7 Pixel pro reduziertem Cluster

Abbildung 5.12: Ladungsverteilungen für Messung *KammE*

5.3.2.2 Das Rauschen des Systems

Mit Hilfe des Histogramms in Abbildung 5.12(b) und einer angepaßten Gaußverteilung (siehe Parameter für E,7P in Tabelle 5.4) ist es möglich, das Rauschen eines DEPFET-Pixels in diesem System zu berechnen. Das σ der angepaßten Gaußfunktion entspricht dem Rauschen der Summe aus drei gemessenen Pixeln.

In Silizium beträgt die Energie zur Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares $3,64\,\mathrm{eV}$ [1]. Die von ^{55}Fe emittierten γ-Quanten erzeugen also im Mittel 1639 Elektron-Loch-Paare. Diese Gesamtanzahl wird auf das Maximum der angepaßten Gaußfunktion bezogen, und es ergibt sich die rechnerische Anzahl der Elektronen pro ADC-Wert unter der Annahme, daß das Rauschen um Null symmetrisch ist, zu

$$n_{e^-} = \frac{1639}{42,21} = 38,8 \pm 0,2 \quad . \tag{5.11}$$

Mit

$$\sigma_{E,7P} = 12,93 \pm 0,14 \tag{5.12}$$

für die Anpassung ergibt sich das Rauschen für die Summe aus 7 Pixeln zu

$$ENC_{7P} = \sigma_{E,7P} \cdot n_{e^-} = (501,7 \pm 6,0)\, e^- \quad . \tag{5.13}$$

Da sich die einzelnen Rauschbeiträge der Pixel quadratisch addieren, läßt sich ENC_{7P} (Equivalent Noise Charge) umrechnen in

$$ENC_{1P} = \frac{ENC_{7P}}{\sqrt{7}} = (189,6 \pm 2,3)\, e^- \quad . \tag{5.14}$$

Bei der hier verwendeten Auslese mit Pedestalabzug geht das Rauschen doppelt ein, da vom gemessenen Pixelwert das gemessenen Pedestal abgezogen wird. Daraus ergibt sich der Wert für das Systemrauschen bei dieser Auslese eines DEPFET-Pixels zu

$$ENC = \frac{ENC_{1P}}{\sqrt{2}} = (134,1 \pm 1,6)\, e^- \quad . \tag{5.15}$$

Das Zurückrechnen von ENC_{1P} in einen ADC-Wert ergibt einen Wert von 4,9. Bei den Analysen und den radiographischen Aufnahmen wurde die Rauschschwelle auf einen ADC-Wert von 7 und die Trefferschwelle auf einen ADC-Wert von 27 gesetzt.

5.3.2.3 Der Einfluß von Doppeltreffern

Auffällig in Abbildung 5.12(a) ist der Ausläufer bei hohen ADC-Werten. Er liegt in der Nähe des doppelten ADC-Werts für einen Treffer. Es läßt sich daher vermuten, daß es sich hierbei um Doppeltreffer in einem Cluster handelt. Um diese Vermutung näher zu untersuchen, soll zunächst die Trefferanzahl während des für die Auslese einer Zeile benötigten Zeitraums berechnet werden. Die Aktivität pro Fläche q_A ergibt sich aus der Quellenaktivität q_Q, die auf eine Kugelfläche mit dem Radius r bezogen wird, zu

$$q_A\left(r\right) = \frac{q_Q}{\frac{4}{3}\pi r^2} \quad . \tag{5.16}$$

Die Trefferanzahl pro Zeile läßt sich jetzt berechnen, wenn man die Fläche und die Auslesezeit einer Zeile einbezieht. Die Trefferanzahl n_Z ergibt sich dann zu

$$n_Z = \frac{q_A\left(r\right) \cdot A_{Matrix}}{64} \cdot t_{Auslese} \tag{5.17}$$

mit $A_{\mathrm{Matrix}} = 3,2\,\mathrm{mm}$ x $3,84\,\mathrm{mm} = 12,288\,\mathrm{mm}^2$ und $t_{\mathrm{Auslese}} = 924 * 25\,\mathrm{ns} = 23,1\,\mu\mathrm{s}$ (siehe Abbildung 5.1).

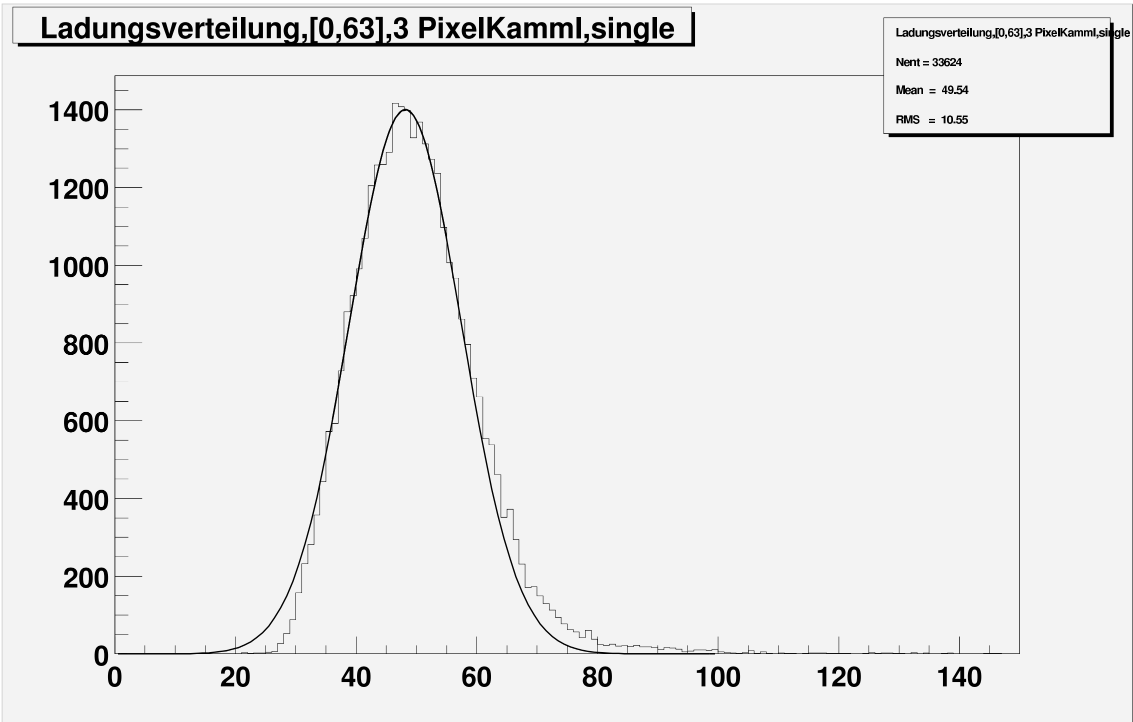


Abbildung 5.13: Ladungsverteilung für Messung *KammI*, Summe über 3 Pixel pro reduziertem Cluster

Bei einer Quellenaktivität von 32,2 MBq und einem Quellenabstand von 6 mm ergibt sich eine rechnerische Trefferanzahl von 0,947 pro Auslesezeitraum für eine Zeile. Damit ist die Wahrscheinlichkeit für einen Doppeltreffer in einem Pixel der ersten Zeilen praktisch null. Bei dem hier verwendeten Ausleseablauf (Abbildung 5.1) wird aber nur einmal pro Matrixauslese das interne Gate aller Pixel geleert.

Dadurch ergeben sich unterschiedlich lange Zeitspannen t^z_{sensitiv}, in denen eine Zeile für einfallende Teilchen sensitiv ist. Der Zusammenhang zwischen t^z_{sensitiv} und t_{Auslese} ergibt sich zu

$$t^z_{\text{sensitiv}} = t_{\text{Auslese}} \cdot (z + 1) \tag{5.18}$$

mit $z \in [0, 63]$ als Zeilenindex.

Eine Berechnung der Trefferanzahl für Zeile 63 ergibt schon einen Wert von über 60. Die Wahrscheinlichkeit für einen Doppeltreffer steigt somit rapide an. Die Auswirkung von Doppeltreffern auf die Verteilung der Ladung kann deutlich an den Ausläufern bei hohen ADC-Werten in Abbildung 5.12(a) erkannt werden.

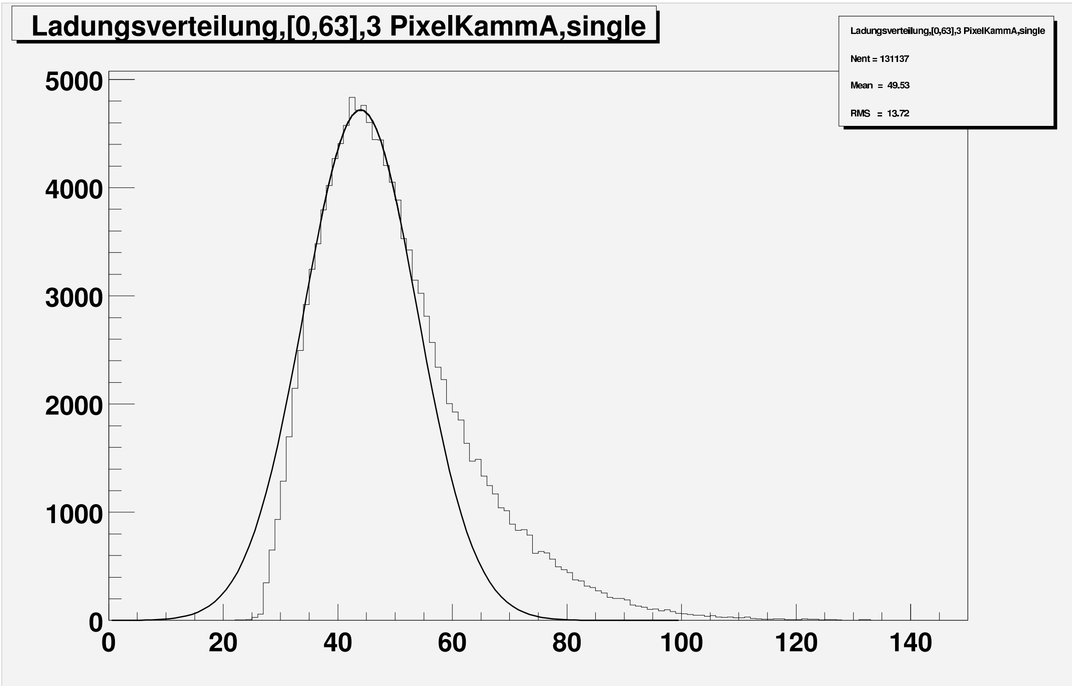
Um diese Hypothese zu überprüfen, wurde die Trefferanzahl pro Auslesezeitraum einer Zeile verringert. Dazu wurde der Quellenabstand auf 36 mm vergrößert. Dieses bedeutet eine Versechsfachung des Abstandes, wodurch die Trefferanzahl gemäß Gleichung 5.16 um den Faktor $\frac{1}{36}$ verkleinert wird. Die Wahrscheinlichkeit für Doppeltreffer in der letzten Zeile verringert sich somit stark. In Abbildung 5.13 ist die Verteilung für die Messung *KammI* wiedergegeben. Der Unterschied zwischen den Messungen *KammI* und *KammE* liegt einzig und allein im Abstand der Quelle zur Matrix, d.h. in der Wahrscheinlichkeit für Doppeltreffer. Es ist deutlich zu erkennen, daß der Ausläufer für hohe ADC-Werte bei dieser Messung kaum vorhanden ist.

Cluster, die von mehr als einem γ-Quant getroffen worden sind, können nicht für eine Interpolation herangezogen werden, da sie keine sichere Berechnung der Trefferorte zulassen. Deshalb muß das Bioscope so betrieben werden, daß die Wahrscheinlichkeit für Doppeltreffer sehr gering ist. Eine geringe Wahrscheinlichkeit für Doppeltreffer, also eine kleine Trefferanzahl in Zeile 63, bedeutet aber eine um den Faktor $\frac{1}{64}$ kleinere in Zeile 0. Dieser große Unterschied in der Trefferanzahl pro Zeile führt zu einer starken Inhomogenität in der Helligkeitsverteilung der radiographischen Bilder (siehe Unterkapitel 5.4). Bei kurzen Meßzeiten ist die Anzahl der Treffer in den oberen Zeilen so klein, daß signifikante Aussagen wegen des statistischen Fehlers nicht getroffen werden können.

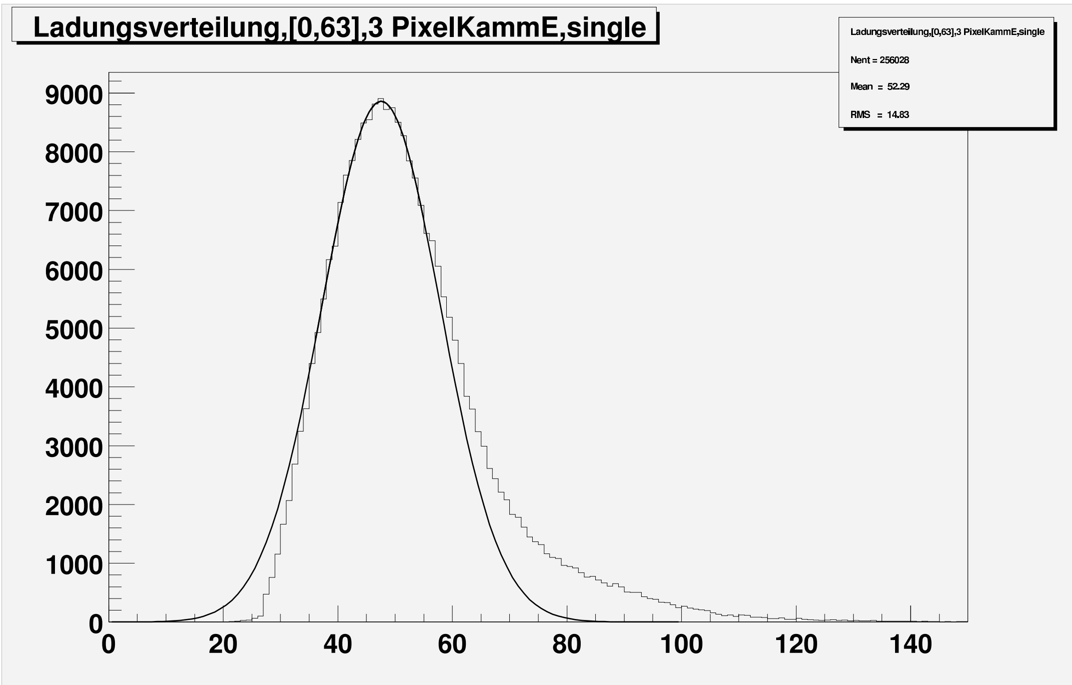
5.3.2.4 Einfluß verschiedener Rückkontaktspannungen auf die Ladungssammlung

Um den Einfluß der Rückkontaktspannung auf die Ladungssammlung zu untersuchen, wurden drei Messungen (*KammA*, *KammD* und *KammE*) mit jeweils verschiedenen Werten für V_{RK} durchgeführt (Tabelle 5.3).

Messung	Trefferanzahl	V_{RK}
KammA	131 137	−80 V
KammD	272 594	−90 V
KammE	256 028	−85 V



(a) Ladungsverteilung für Messung *KammA*



(b) Ladungsverteilung für Messung *KammE*

Abbildung 5.14: Ladungsverteilungen für 3 Pixel pro reduziertem Cluster für Messung *KammA* und *KammE*

Zunächst fällt auf, daß sich die Anzahl der registrierten Treffer von *KammA* zu *KammE* nahezu verdoppelt hat. Der sprunghafte Anstieg der Trefferanzahl von *KammA* zu den Messungen *KammD* und *KammE* deutet darauf hin, daß die Matrix bei der Messung *KammA* nicht vollständig depletiert war. $V_{RK} = -80\,\mathrm{V}$ entspricht einer Rückkontaktspannung von $-90\,\mathrm{V}$.

Dieses Ergebnis zeigt, daß bei dieser Rückkontaktspannung die Matrix noch nicht vollständig depletiert ist und somit die Ladungssammlung nur unvollständig erfolgt. Es gehen Ladungen verloren, was sich durch die verringerte Trefferanzahl deutlich bemerkbar macht. Der Unterschied bei der Trefferanzahl zwischen *KammD* und *KammE* ist nur gering. Dies läßt sich auf eine leicht verbesserte Ladungssammlung bei der Messung *KammD* zurückführen. Dadurch werden Treffer, die bei *KammE* gerade unterhalb der Schwelle liegen, noch registriert.

Die Histogramme für die Messungen *KammA* und *KammE* sind in Abbildung 5.14 dargestellt. Deutlich ist die Verschiebung der Verteilung zu höheren ADC-Werten zu sehen, was mit einer besseren Ladungssammlung für höhere Feldstärken (größeres V_{RK}) erklärt werden kann. Dieses spiegelt sich auch in den Ergebnissen für die Anpassung einer Gaußverteilung an die Histogramme wider (Tabelle 5.4).

Bei beiden sieht man den Ausläufer zu hohen ADC-Werten. Eine Erklärung dafür wurde in Abbildung 5.3.2.3 gegeben.

5.4 Das Bioscope als bildgebendes System

Neben den Messungen zum Verhalten der Matrix bei verschiedenen Kamm- und Rückkontaktspannungen, die in Unterkapitel 5.3 ausgeführt und erklärt worden sind, wurden mit dem Bioscope radiographische Aufnahmen gemacht. Hierbei wurde direkt auf die Rückseite der DEPFET-Matrix ein kleines Objekt gelegt und eine radioaktive Quelle (^{55}Fe) darüber positioniert. Dadurch erhält man ein Schattenbild des Objektes, da die γ-Quanten den nicht abgedeckten Teil der Matrix ungehindert treffen können. Im Verlauf dieser Aufnahmen sind Methoden entwickelt worden, um die Auflösung zu erhöhen und die Bildqualität zu verbessern.

5.4.1 Messungen des Pedestals der Matrix

Die Transistorströme eines DEPFET-Pixels in einer Matrix sind nicht gleich. Man erwartet eine Variation der Ströme durch produktionsbedingte Unterschiede. Deswegen wird zunächst ein Matrixbild ohne Objekt oder Strahler aufgenommen. Dadurch werden die Transistorströme der einzelnen Pixel mit leerem internen Gate gemessen. Eine solche Aufnahme wird Pedestalbild der Matrix genannt, und die Transistorströme werden analog dazu als Pedestalströme bezeichnet.

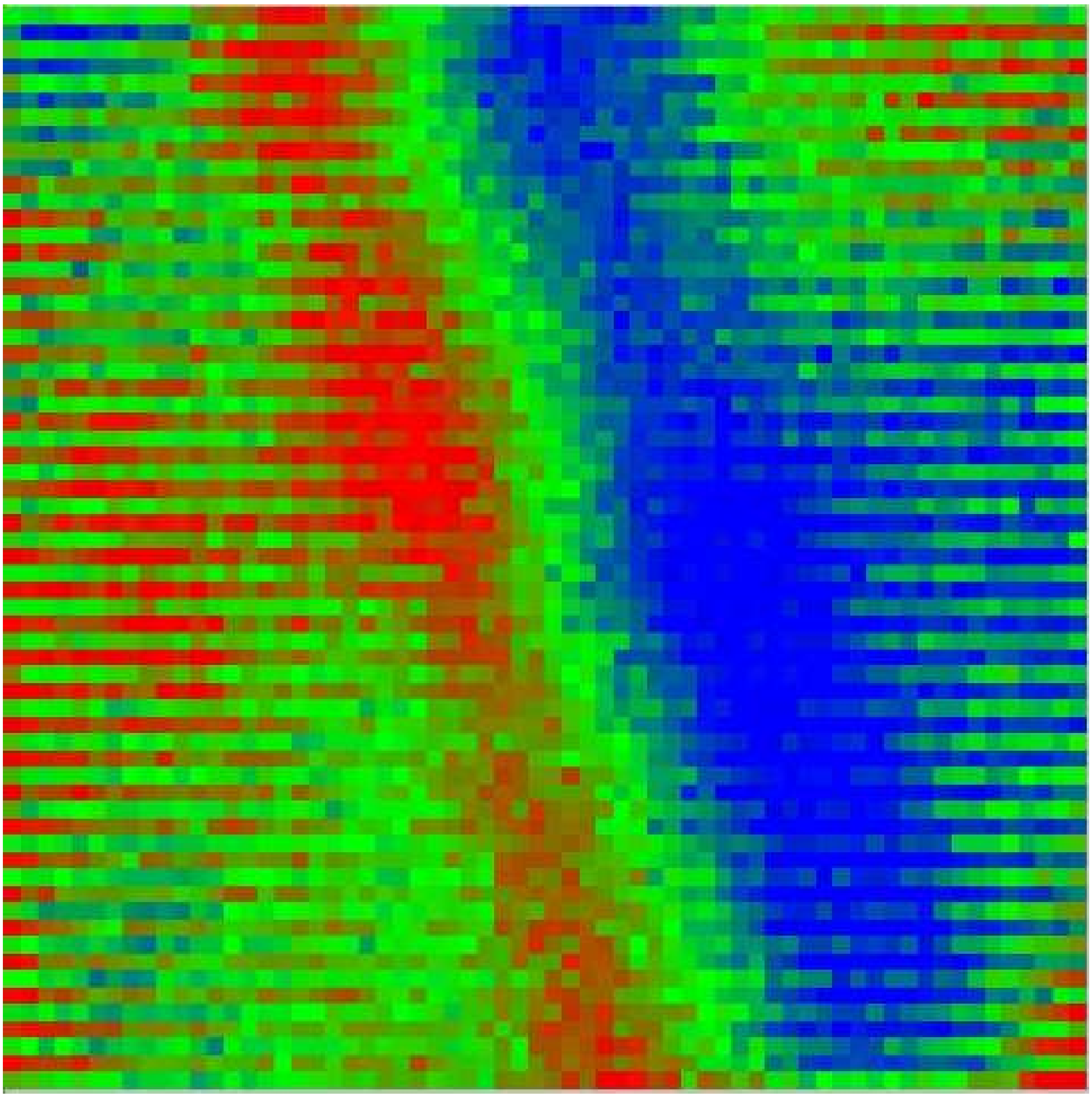


Abbildung 5.15: Pedestalbild der Matrix D8 mit $V_{GateON} = 12,23\,\mathrm{V}$, $V_{GateOFF} = 15\,\mathrm{V}$, $V_{RK} = 100\,\mathrm{V}$ und $V_{ddd\,Carlos} = 6\,\mathrm{V}$ aufgenommen. Reinblaue Pixel liegen unterhalb, reinrote oberhalb des Arbeitsbereichs des Carlos. Das Streifenmuster mit wechselnden Matrixzeilen wird Odd-Even-Effekt (siehe Unterkapitel 5.4.1.1) genannt.

Ein typischen Pedestalbild zeigt Abbildung 5.15. Die verschiedenfarbigen Bereiche zeigen die unterschiedliche Stärke der Pedestalströme der Matrix D8. Diese Pedestalbilder zeigen ein charakteristisches Bild für jede Matrix, wie Vergleiche mit Pedestalbildern des Bioscope an der Universität Bonn ergeben [14]. Sie sind auf produktionsbedingte Unterschiede der einzelnen Transistoren der Matrix zurückzuführen. Dieses charakteristische Bild hat keine erkennbare Systematik, und es ist noch nicht verstanden, welche Produktionsunterschiede für sie verantwortlich sind.

Die radiographischen Aufnahmen der Objekte werden mittels der Auslese mit Pedestalabzug, wie sie in Unterkapitel 5.1 beschrieben worden ist, gemacht. Deshalb hat jeweils nur die Differenz zwischen dem aktuellen Pixelwert und dem Pedestalwert des Pixels einen Einfluß auf die Analyse eines Pixels. Die Unterschiede und der Pedestalwert der einzelnen Pixel sind nur insofern interessant, als daß der CARLOS einen maximalen Arbeitsbereich von 20 µA besitzt.

Durch die im Vergleich zum Entwurf des CARLOS stärkere Variation der Transistorströme, befinden sich einige Pixel außerhalb des Arbeitsbereiches. Auf der rechten Seite des Pedestalbildes sieht man in der Mitte des blauen Bereiches eine Anzahl von reinblauen Punkten. Diese repräsentieren Pixel, deren Stromwert sich unterhalb des Arbeitsbereichs des CARLOS befinden. Pixel oberhalb des Arbeitsbereichs sind links daneben durch reinrote Punkte dargestellt. Durch Variation der Parameter V_{Pulldown}, $V_{\mathrm{Gate\ ON}}$ und $V_{\mathrm{ddd,CARLOS}}$ kann die Anzahl und relative Lage der Pixel außerhalb des Arbeitsbereichs in engen Grenzen beeinflußt werden. Somit ist es möglich, bei den Aufnahmen die interessanten Bereiche der Matrix zu optimieren, so daß möglichst wenig Pixel außerhalb des Arbeitsbereichs liegen.

5.4.1.1 Odd-Even-Effekt

In Abbildung 5.15 ist deutlich ein Streifenmuster mit wechselnden Zeilen zu erkennen. Dieser systematische Effekt wird Odd-Even-Effekt genannt und kommt durch den endlichen Widerstand der Sourcezuleitungen [20] zustande.

Wie in Unterkapitel 3.3 beschrieben, sind die Sourcekontakte aller Transistoren einer Zeile durch eine Aluminiumbahn miteinander verbunden. Der endliche Widerstand der Aluminiumbahn ($R_\Omega = 30\,\mathrm{m}\Omega/\mathrm{square}$ [10]) führt zu einem Spannungsabfall an den Source-Kontakten entlang einer Zeile. Dadurch gibt es eine systematische Variation des Potentials zwischen Source und Gate, die zu einer Variation des Transistorstroms führt. Die Abnahme des Transistorstroms entlang einer Zeile ist in Abbildung 5.15 am Farbverlauf von rot nach blau zu erkennen, obwohl die charakteristische Variation der Transistorströme diesen Effekt überlagert. Besonders bei den Zeilen in der Mitte des Bildes zeigt sich deutlich ein Abfall der Stromwerte der Pixel.

Der Abfall des Stroms entlang einer Zeile wechselt mit dem Zeilenindex. Dieses kommt dadurch zustande, daß die Zeilen mit geradem Zeilenindex von links, die mit ungeradem Index von rechts kontaktiert worden sind.[2] Somit erfolgt der Spannungsabfall an den Source-Kontakten in den geraden Zeilen von links nach rechts, in den ungeraden von rechts nach links. Dieser Effekt wurde zuerst an einer 16x16-DEPFET-Matrix gemessen [20, 3.5.2]. Die Variation der Ströme über eine Zeile sind bei einer 64x64-Pixel-Matrix weitaus größer ($(51 \pm 6)\,\mu$A [20, Tabelle 3.3]) und überschreitet den zulässigen Eingangsbereich des CARLOS. Deshalb muß der Eingangsbereich des CARLOS auf Kosten der Linearität und der Verstärkung vergrößert oder ein Teil der Matrix bei der Auslese vernachlässigt werden.

5.4.1.2 Pedestalabzug und dynamische Pedestalkorrektur

Bei der Aufnahme von Schattenbildern wird von jedem Matrixbild ein Pedestalbild abgezogen. Das Differenzbild wird anhand einer vorgegebenen Schwelle für die Pixelwerte analysiert. Die Position, die Pedestals und die Differenzwerte aller getroffenen Pixel und der Pixel mit um eins verschiedenen Spalten- und Zeilenindizes werden in einer ASCII-Datei protokolliert, um eine spätere Analyse zu ermöglichen.

In Abbildung 5.16 ist ein Matrixbild ohne Bestrahlung mit Pedestalabzug zu sehen. Das charakteristische Bild der Matrix ist nach dem Pedestalabzug nicht mehr zu erkennen. Bei der Aufnahme der Radiographiebilder wird ein dynamisches Pedestal benutzt, damit der Einfluß einer leichten Temperaturdrift während der Messung kompensiert werden kann. Jeweils bei einem Matrixbild ohne Treffer wird das gemittelte Pedestal korrigiert.

5.4.2 Radiographische Aufnahmen

Als Objekt für die radiographischen Aufnahmen wurde zunächst eine Eisenmutter der Größe M1 ausgewählt. Diese bietet sich an, da die Mutter mit einem Außendurchmesser von 3 mm vollständig auf die Matrix D8 ($A = 3{,}2\,\text{mm x } 3{,}83\,\text{mm}$) paßt.

Für die Abnahme der Intensität der Photonenstrahlung durch das Objekt läßt sich die Beziehung [21]

$$N = N_0 \exp\left[-\lambda \rho x\right] \tag{5.19}$$

herleiten, wobei λ den Massenabsorptionskoeffizienten, ρ die Dichte, x die Eindringtiefe und N_0 die Anzahl der Photonen bei $x = 0$ angibt.

Für die Eisenmutter der Größe M1, deren Dicke 900 µm beträgt, ergibt sich mit dem Massenabsorptionskoeffizienten für Eisen von

$$\lambda\,(\text{Fe}, 6\,\text{keV}) = \frac{1}{0{,}019}\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \quad [21] \tag{5.20}$$

[2] Die Numerierung erfolgt wie generell in dieser Arbeit von 0 bis 63, wobei 0 als gerade Zahl angesehen wird.

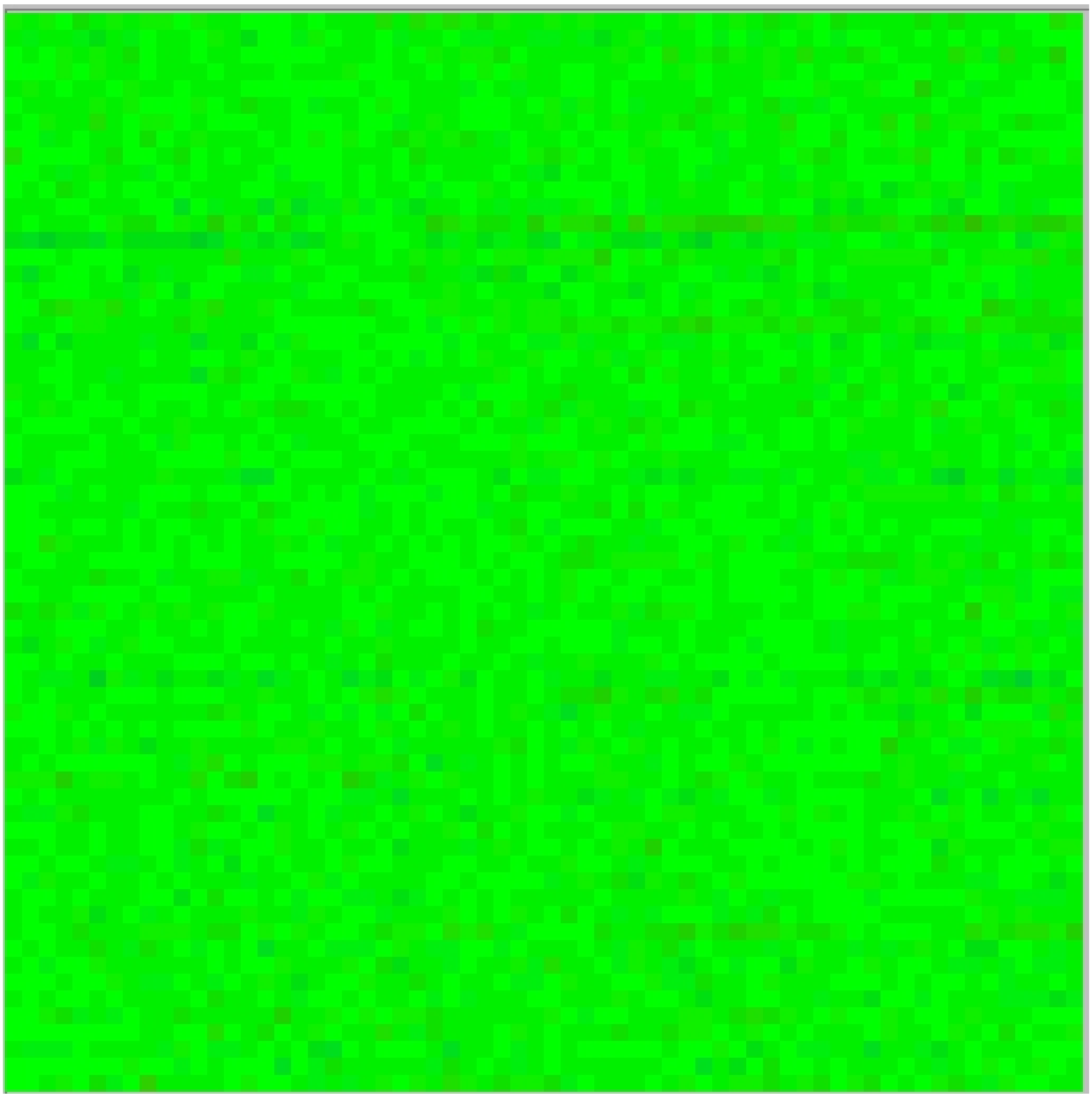


Abbildung 5.16: Bild der Matrix nach der Pedestalkorrektur

und der Dichte $\rho = 7{,}86\,\mathrm{g/cm^3}$ [6] eine Abnahme der Ausgangsintensität auf

$$\exp\left[-\frac{1}{0{,}019} \cdot 7{,}86 \cdot 0{,}09\right] \approx 6{,}8 \cdot 10^{-15}\% \tag{5.21}$$

der Eingangsintensität. Bei der Aktivität der Eisenquelle von 32, 2 MBq ist die Wahrscheinlichkeit für einen Treffer im abgedeckten Matrixteil praktisch null.

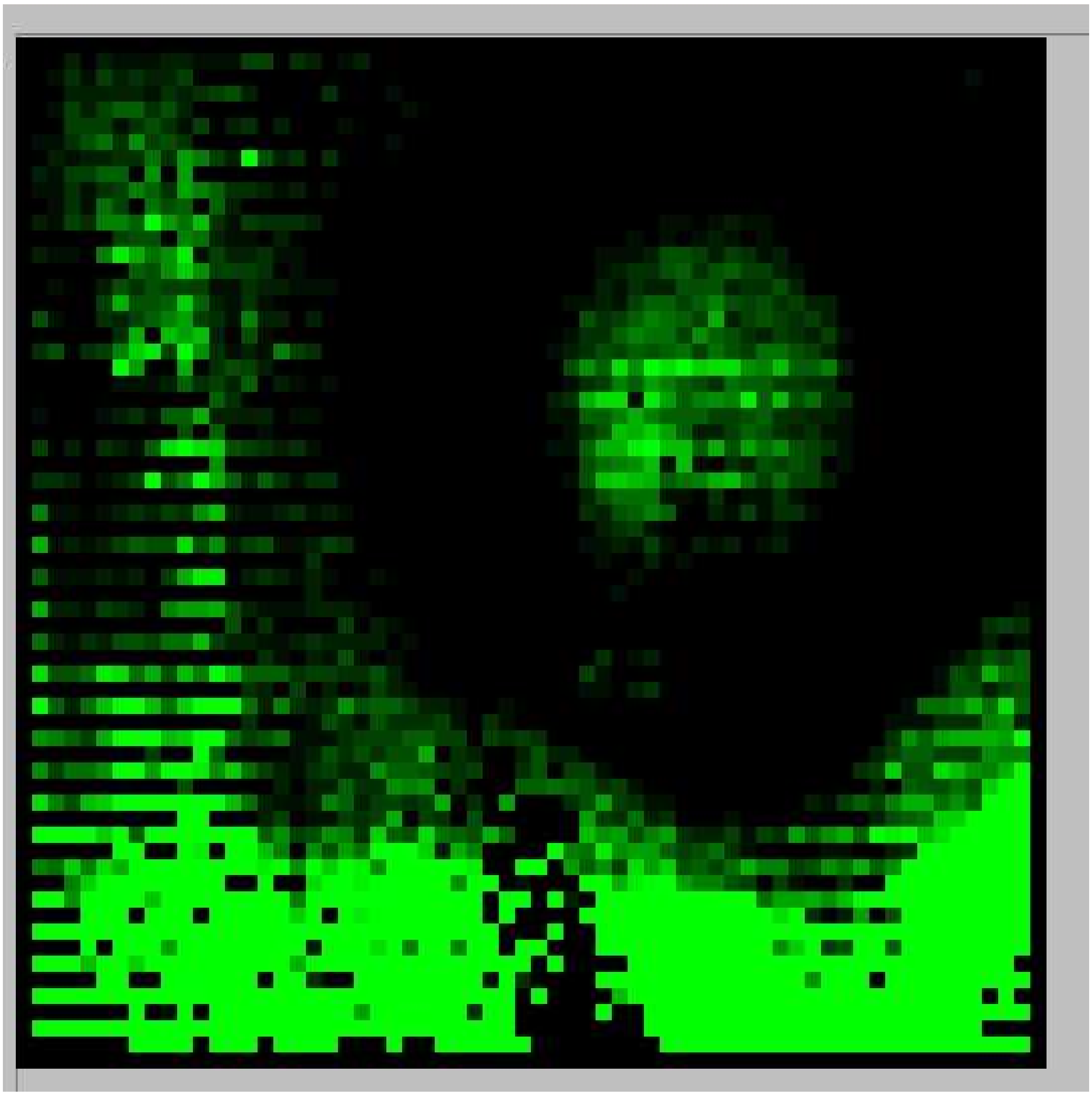


Abbildung 5.17: Erstes Bild einer M1-Mutter auf dem Bioscope, Matrix D8

In Abbildung 5.17 ist die erste Aufnahme einer M1-Mutter mit dem Bioscope zu sehen. Deutlich sieht man das Gewindeloch der Mutter als hellen Kreis rechts oben im Bild. Rechts unten kann man die Kante der Mutter erkennen. Die Mutter wurde zum Schutz des Detektors vor Kurzschlüssen mit einer Folie unterklebt. Der Streifen geringerer Helligkeit zwischen der schwarzen, abgedeckten Matrixfläche und der grünen, freien Matrixfläche zeigt den Rand der Folie, der über die Mutter hinausreicht. Die Form der Folie entspricht dem Verlauf der Trennlinie zwischen hellen und dunkleren Bereichen der Matrix. In diesem Bild erkennt man auch, daß die Treffer, wie in Unterabschnitt 5.3.2.3 erklärt, nicht gleichmäßig über die Matrix verteilt sind.

Als weiteres Objekt wurde eine Wendel aus Wolfram auf die Matrixrückseite gelegt. Der Massenabsorptionskoeffizient berechnet sich mit

$$\sigma\,(W, 6\text{keV}) = 7646\,\frac{\text{b}}{\text{Atom}} = 7646 \cdot 10^{-24}\,\frac{\text{cm}^2}{\text{Atom}} \quad [17] \tag{5.22}$$

zu

$$\lambda = \sigma \cdot \frac{L}{A} = 25,04\,\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \quad , \tag{5.23}$$

wobei L die Loschmidt-Zahl ($L = 6,022 \cdot 10^{23}$Atom/mol) und A die Molmasse ($A = 183,85\,\text{g/mol}$ [6]) sind. Mit der Dichte $\rho = 19,3\,\text{g/cm}^3$ [6] und der gemessenen Dicke $d = (150 \pm 15)\,\mu\text{m}$ errechnet sich der Abfall der Eingangsintensität zu $(0,071 \pm 0,052)\%$. Bei der Quellenaktiviät von 32,2 MBq sind Treffer im abgedeckten Matrixteil wahrscheinlich. Daher wurde bei der Aufnahme eine Schwelle für die Trefferanzahl pro Matrixpixel gesetzt. Alle Pixel unterhalb dieser Schwelle wurden als abgedeckt betrachtet.

5.4.3 Rekonstruktion des Trefferorts

Ziel der Rekonstruktion ist eine Verbesserung der Auflösung unter die Pixelgröße der DEPFET-Matrix. Zur Rekonstruktion des Trefferortes muß eine Methode gefunden werden, die die Ergebnisse aus Unterkapitel 5.3.1.2 berücksichtigt. Dort wurde gezeigt, daß sich bei der überwiegenden Anzahl der Cluster die Ladung nur auf maximal drei Pixel aufteilt. Auch der Anteil der Cluster mit nur einem ladungstragenden Pixel ist mit ca. 35% hoch. Die verwendete Methode muß auf die geringe Anzahl signalladungstragender Pixel Rücksicht nehmen und auch stabil gegenüber Clustern mit nur einem getroffenem Pixel sein. Als signalladungstragend wird ein Pixel bezeichnet, wenn der ADC-Wert die Schwelle von 7 überschreitet.

Als Methode der Ortsrekonstruktion wird hier die Schwerpunktbildung mittels gewichteter Vektoraddition benutzt. Für jedes Pixel wird der Mittelpunkt als Ort der Ladungssammlung angenommen. Der Mittelpunkt des mittleren Pixels im reduzierten Cluster wird als Koordinatenursprung definiert. Der Abstand der Pixelmittelpunkte in vertikaler Richtung einer Spalte beträgt 50 µm, während der Abstand zweier Mittelpunkte in horizontaler Richtung 60 µm groß ist. Jedem Pixel wird nun ein zweidimensionaler Vektor zugeordnet, der die Position des Pixels relativ zum Mittelpunkt des reduzierten Clusters angibt.

Wird die Summe der ADC-Werte q_i aller ladungstragenden Pixel mit

$$Q = \sum_i q_i \tag{5.24}$$

bezeichnet und der Ortsvektor der Pixelmitte mit $\vec{r}_i$, so ergibt sich der Trefferort $\vec{r}_T$ zu

$$\vec{r}_T = \sum_i \frac{q_i}{Q} \cdot \vec{r}_i \quad . \tag{5.25}$$

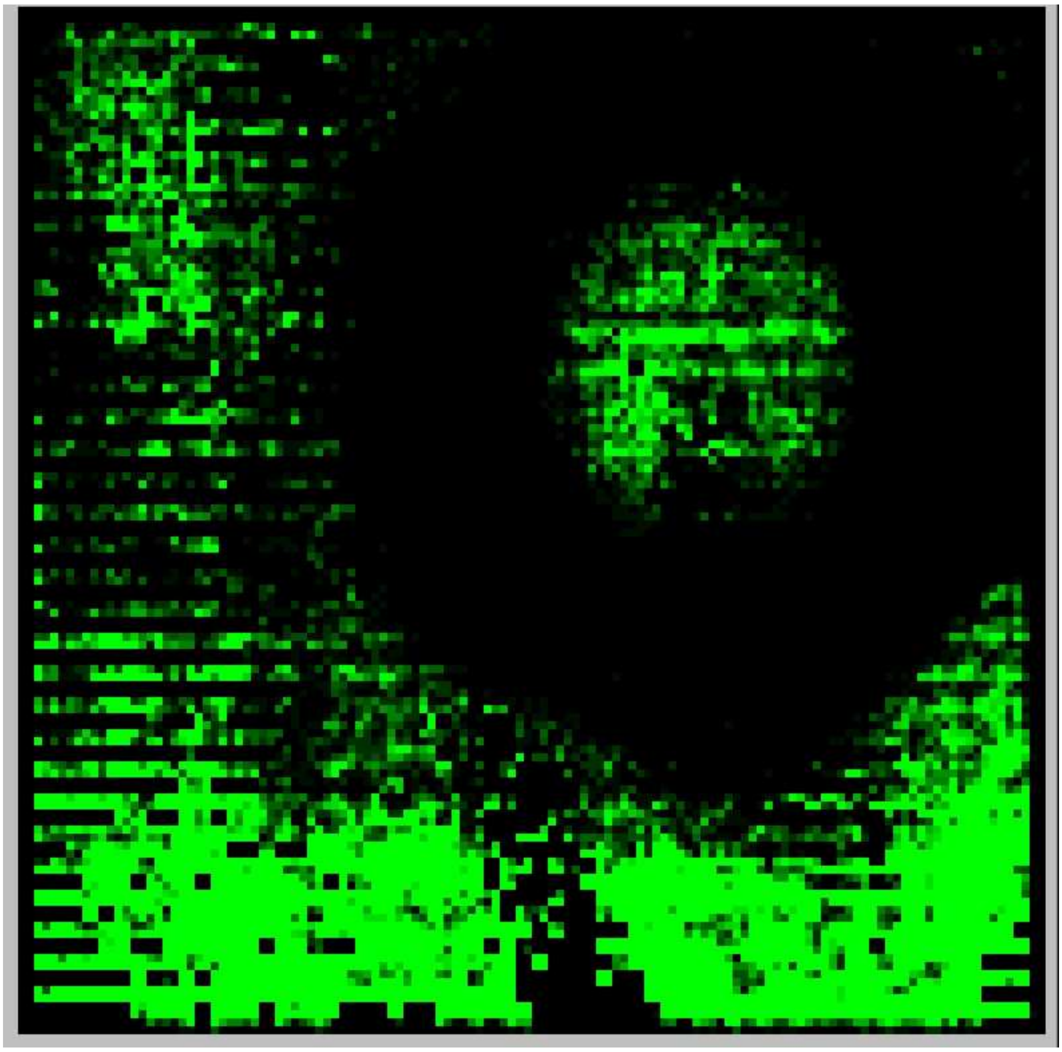


Abbildung 5.18: Darstellung des Mutterbildes aus Abbildung 5.17 mit Verdoppelung der Auflösung durch Ortsrekonstruktion mittels Schwerpunktbildung

Für die Darstellung der Aufnahme mit rekonstruierten Trefferorten wird das getroffene Pixel schachbrettartig in virtuelle Pixel unterteilt. Für die Aufnahme in

Abbildung 5.18 liegt eine Aufteilung in 2x2 virtuelle Pixel zugrunde. Anhand des Ortsvektors des Trefferortes wird das getroffene virtuelle Pixel bestimmt.

In Abbildung 5.19 ist ein Matrixausschnitt mit der Wendel aus Wolfram zu sehen. Die Auflösung ist durch Ortsrekonstruktion vergrößert. Deutlich sieht man die Unterschiede in der Helligkeit, die durch die Zeitunterschiede in der Sensitivität der Zeilen verursacht wird.

Auf der linken Seite sieht man einen scharfen schwarzen Balken. Dieser Bereich wurde vom Wolframdraht abgedeckt. Er ist 5 Pixel breit, was 125 µm entspricht. Am unteren Ende sieht man keine scharfe Trennung zwischen abgedeckter und freier Matrixfläche, da dort die Drähte in einem Bogen verlaufen.

Der helle Streifen daneben ist der Zwischenraum zwischen zwei Drähten, dessen Breite mit 75 ± 15 µm gemessen wurde. In der Aufnahme ist dieser Bereich 3 Pixel breit, was 75 µm entspricht.

Die Schärfe der Bereiche nimmt nach links hin ab, da dort die Wendel nicht direkt auf der Matrixrückseite aufliegt, so daß es an den Rändern zur Unterstrahlung kommt. Des weiteren ist die Wendel in diesem Bereich leicht deformiert, was zu einer Verschiebung der Balken führt.

In der rechten unteren Ecke sind drei quadratische Flächen zu sehen. Das sind Matrixpixel, die außerhalb des Arbeitsbereichs des CARLOS liegen und deshalb keine Treffer registrieren können.

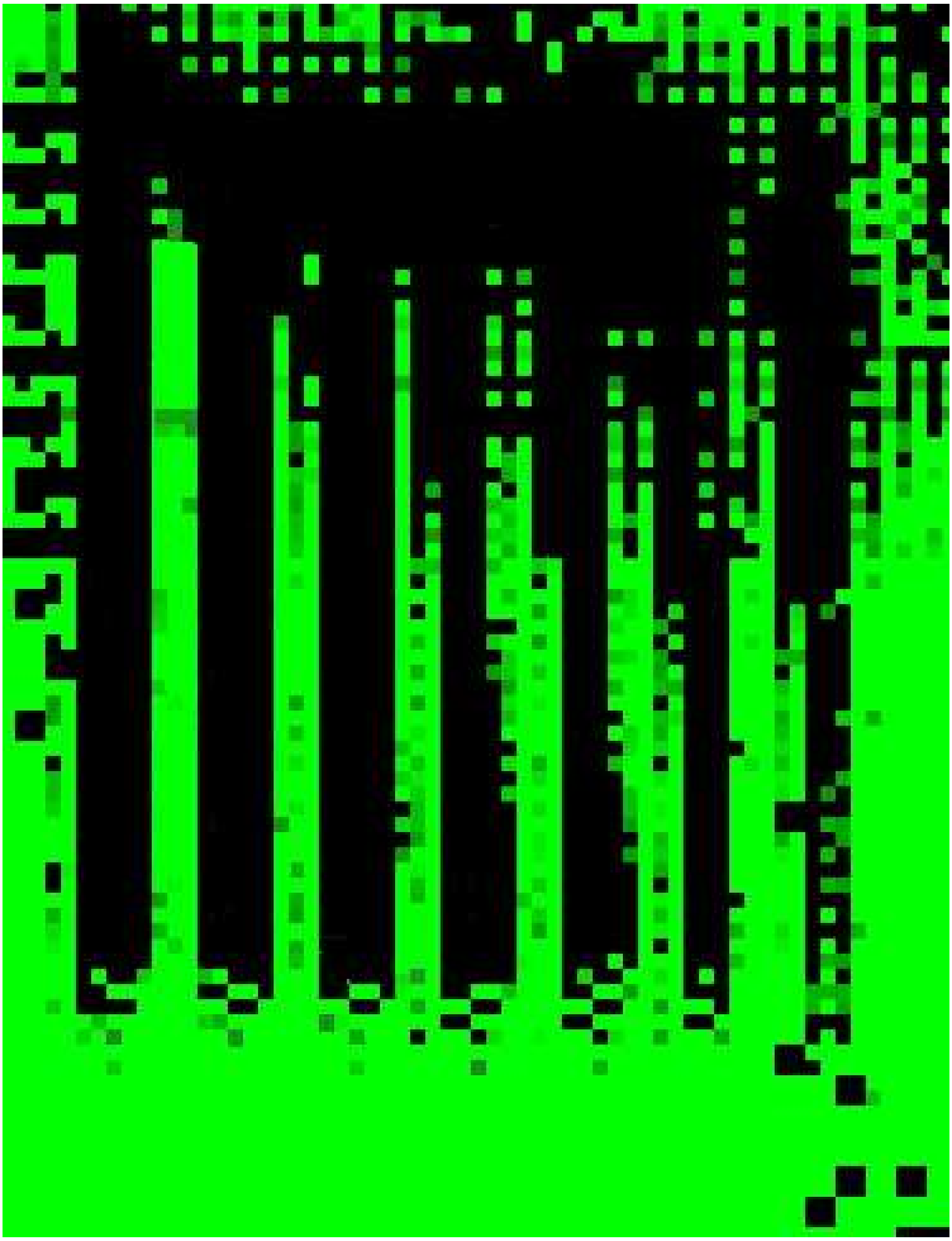


Abbildung 5.19: Darstellung der Wendel aus Wolfram mit Verdoppelung der Auflösung durch Ortsrekonstruktion mittels Schwerpunktbildung

6 Programmentwicklung für das DEPFET-Bioscope

6.1 Einführung einer Steuersprache für das Bioscope

Die Steuerung des Bioscopes erfolgt durch 16 Steuerleitungen. Jede dieser Steuerleitungen wird durch ein Bit im RAM der DDC repräsentiert. Daraus ergibt sich eine Abfolge von 16-Bit-Werten, die die Steuersequenz für das System darstellen. Die Programmierung der Steuersequenz wurde direkt im Programmkode des Steuerprogramms vorgenommen. Die folgenden Nachteile legen eine Änderung dieser Vorgehensweise nahe:

1. Eine Änderung der Steuersequenz erfordert eine Änderung im Programmkode und eine erneute Kompilation.

2. Der Anwender muß C++-Kenntnisse besitzen und den Programmkode und die Bitzuordnungen zu den Steuerleitungen kennen. Dieses ist aber für den eigentlichen Betrieb des Systems nicht notwendig.

3. Die Steuersequenz ist nicht mit den genommenen Daten verknüpft. Somit muß durch eine zusätzliche Protokollierung die Steuersequenz den Meßdaten zugeordnet werden, um eine Reproduzierbarkeit der Messungen gewährleisten zu können.

Um diese Probleme zu beseitigen, wurde eine einfache Steuersprache entworfen und eine Implementierung in der Sprache C++ vorgenommen, die in der Lage ist, diese Steuersprache zu interpretieren und die entsprechende Abfolge von 16-Bit-Werten zu generieren. Im folgenden soll nun kurz der Aufbau dieser Steuersprache, soweit für die Anwendung erforderlich, beschrieben werden. Zur Implementierung sei auf den Programmkode verwiesen.

6.1.1 Primitive Befehle

Es existieren 17 primitive Befehle. Diese stellen die Basis der Steuersprache dar und werden in der folgenden Auflistung kurz erklärt.

noop — Dieser Befehl bewirkt nichts. Er wird zum Setzen von Pausen zwischen den einzelnen Steuerimpulsen benutzt.

adcencode — Der ADC digitalisiert den anliegenden Wert.

adclatch1 — Der digitalisierte Wert wird an den Bitausgängen des ADCs angelegt. Eine Änderung des Eingangs hat keine Auswirkungen. Während dieser Zeit kann der Wert in den FIFO übernommen werden.

carlosclk — Der nächste Kanal wird auf den Ausgang des CARLOS geschaltet.

carlosreset — Der Digitalteil des CARLOS wird in den Anfangszustand gesetzt. Kanal 0 ist auf den Ausgang geschaltet.

carlossample — Die Schalter der Sample-and-Hold-Schaltung aller Kanäle wird geschlossen.

clearclk — Der Inhalt des Schieberegisters wird um eine Speicherstelle weitergeschoben.

clearenable — Der Clearswitcher wird eingeschaltet.

clearlatch — Die Spannungen werden entsprechend des Schieberegisterinhalts auf die Ausgänge geschaltet.

clearserial — Der Zustand dieses Bits wird beim nächsten `clearclk` in die Speicherstelle für Kanal 0 des Schieberegisters übernommen.

frame — Dieser Befehl ist einem Bit zugeordnet, wird aber beim Bioscope nicht benutzt.

gateclk — Dieser Befehl für den Gateswitcher entspricht dem Befehl `clearclk`.

gateenable — Dieser Befehl für den Gateswitcher entspricht dem Befehl `clearenable`.

gatelatch — Dieser Befehl für den Gateswitcher entspricht dem Befehl `clearlatch`.

gateserial — Dieser Befehl für den Gateswitcher entspricht dem Befehl `clearserial`.

fifowrite — Dieser Befehl erklärt den Wert am Eingang des FIFOs für gültig. Der FIFO übernimmt den Wert in seinen Speicher.

loop Dieser Befehl setzt das sogenannte Loop-Bit. Dieses markiert das Ende der Steuersequenz mit der Aufforderung, die Sequenz vom Beginn an nochmal zu durchlaufen.

Diese Befehle repräsentieren jeweils ein Bit oder eine Steuerleitung des Systems. Der Vorteil besteht in den aussagekräftigen Namen und der Unabhängigkeit vom konkreten Bitmuster der Steuerleitungen. Durch diesen einfachen Schritt wird eine Abstraktion der Steuerung des Systems erreicht. Die oben aufgeführten Probleme lassen sich mit diesem gezeigten Befehlssatz beheben:

- Die Steuersequenz ist nicht mehr im Programmkode festgelegt, sondern kann vom Anwender nachgeladen werden.
- Da der Anwender lediglich die Steuersprache beherrschen muß, um eine Steuersequenz für das Bioscope erstellen zu können, sind keine weiteren Kenntnisse des internen Aufbaus der Software und der Elektronik notwendig.
- Die Steuersequenz in der Steuersprache wird als Textdatei gespeichert. Diese kann zusammen mit den gemessenen Daten abgespeichert werden, so daß eine eindeutige Zuordnung zwischen gemessenen Daten und Steuersequenz besteht.

6.1.2 Befehlszeilen

Um komplexe Steuerungsstrukturen für das Bioscope programmieren zu können, werden die Befehle zu einer Befehlszeile zusammengefaßt. Die Befehle einer Befehlszeile ergeben nach der Interpretation durch das Programm eine Abfolge von 16-Bit-Werten, wie sie auch im RAM auf der DDC gespeichert werden. Das Format der Befehlszeile wird beschrieben durch

```
<Zahl> <Befehl>,<Befehl>,...      .
```

Hier steht `<Zahl>` für eine natürliche Zahl und `<Befehl>` für einen der oben definierten primitiven Befehle oder einen benutzerdefinierten Befehl (vergleiche Unterkapitel 6.1.3). Alle Steuerleitungen, die von Befehlen einer Zeile angesprochen werden, sind gleichzeitig aktiv. Die einzelnen Befehle der Aufzählung werden durch ein Komma getrennt. Sie wird von links nach rechts abgearbeitet, und ihre Länge ist nicht begrenzt. Die Zahl vor der Aufzählung muß durch mindestens ein Whitespace von dieser getrennt sein und gibt die Anzahl der Wiederholungen der Befehlszeile an. Dieses ermöglicht die Realisierung einfacher Schleifen.

6.1.3 Benutzerdefinierte Befehle

Eine weitere Abstraktionsebene wird durch die Verwendung von benutzerdefinierten Befehlen erreicht. Hiermit können wiederkehrende Steuersequenzen einmal programmiert und mit einem frei wählbaren Namen versehen werden. Ein benutzerdefinierter Befehl besteht aus beliebig vielen Befehlszeilen und wird mittels zweier Gleichheitszeichen, gefolgt vom Befehlsnamen, deklariert und durch die nachfolgenden Befehlszeilen definiert. Nachfolgend wird ein kurzes Beispiel für einen benutzerdefinierten Befehl gegeben.

```
==BeispielBefehl
10 carlossample
5 carlosclk
...
```

Die Definition des benutzerdefinierten Befehls endet durch die Deklaration eines weiteren solchen Befehls oder durch das Dateiende. Sie können wie primitive Befehle benutzt werden, wobei auf Rekursionen ein besonderes Augenmerk gelegt werden sollte.

6.1.4 Aufbau der Steuerdatei

Die Steuerdatei stellt eine Sammlung von benutzerdefinierten und primitiven Befehlen dar, die nach der Interpretation durch das Programm als Abfolge von 16-Bit-Werten in das RAM der DDC geschrieben werden. Eine Steuerdatei enthält mindestens den benutzerdefinierten Befehl *main*. Dieser wird, in Anlehnung an die Sprache C++, als Beginn der Steuersequenz betrachtet. Danach schließt sich eine beliebige Anzahl von Befehlszeilen und/oder Deklarationen und Definitionen von benutzerdefinierten Befehlen an.

Beipiel:

```
==main
1 carlosreset
1 BeispielBefehl,gateclk

==BeispielBefehl
1 fifowrite
```

Die Reihenfolge der Befehlsdeklarationen ist beliebig.

6.2 Filterung der Daten

Während der Datennahme werden für alle Pixel, die einen ADC-Wert oberhalb der Trefferschwelle besitzen, die Position, der Pedestal- und der ADC-Wert zusammen mit den Daten für alle Pixel mit um eins verschiedenen Spalten- und Zeilenindizes gespeichert. Die Möglichkeit, daß zwei benachbarte Pixel gleichzeitig als getroffen registriert werden können, kann zu einer zweifachen Auswertung ein und derselben Information führen. Um dieses zu verhindern, werden die Originaldaten mittels einer Funktion gefiltert, die dafür sorgt, daß jede Information nur einmal ausgewertet wird.

Dazu werden alle registrierten Treffer eines Matrixbildes nach der Größe ihres ADC-Wertes sortiert. Danach wird in einer Schleife beginnend mit dem Pixel des größten ADC-Werts überprüft, ob ein Pixel des reduzierten Clusters schon für die Analyse benutzt worden ist. Wurde ein Pixel schon verwendet, so wird dieser Datensatz verworfen.

Wird der Datensatz nicht verworfen, so werden alle Pixel im reduzierten Cluster dieses Datensatzes als verwendet markiert. Wenn alle Datensätze für ein Matrixbild verarbeitet worden sind, wird diese Prozedur für das nächste Matrixbild wiederholt. Für jedes neue Matrixbild werden alle Pixel als nicht verwendet markiert, da die Datensätze verschiedener Matrixbilder unabhängig voneinander sind.

Die Analysen, die radiographischen Aufnahmen und die Ortsrekonstruktion wurden alle mit gefilterten Daten vorgenommen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Forschungsverbund „Mikrosensorik“ des Landes NRW wurde ein Detektorsystem für den Einsatz in der Autoradiographie entwickelt [14]. Dieses sogenannte DEPFET-Bioscope basiert auf einen neuartigen Detektortyp, der wegen seiner integrierten Vorverstärkung sehr gute Rauscheigenschaften zeigt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein DEPFET-Bioscope am Lehrstuhl Experimentelle Physik V aufgebaut. Neben dem Bioscope in Dortmund existieren noch zwei System an der Universität Bonn und eins am Halbleiterlabor des Max-Planck-Instituts München.

Mit diesem System wurden Messungen zum Verhalten einer DEPFET-Matrix mit einer zusätzlichen p^+-Implantation durchgeführt und radiographischen Aufnahmen gemacht. Die Messungen zeigen, daß durch diese zusätzliche p^+-Implantation die Ladungsaufteilung innerhalb der Matrix beeinflußt werden kann. Dieser Einfluß wirkt sich aber nur auf die Ausbreitung der Ladungswolke über die Spaltengrenzen der Matrix aus. Durch diese unterschiedlich starke Deformation der Ladungswolke in Abhängigkeit von der Ausbreitungsrichtung innerhalb der Matrix, ist eine exakte Ortsrekonstruktion nur schwer durchzuführen. Deshalb eignet sich eine DEPFET-Matrix mit zusätzlicher p^+-Implantation nur begrenzt für ein bildgebendes System, da gerade hier eine gleichmäßige, räumliche Ausdehnung der Ladungswolke vorteilhaft ist.

Die radiograhischen Aufnahmen zeigen, daß das Bioscope seine Aufgabe als bildgebendes System sehr gut erfüllt, obwohl die Verwendung einer Matrix mit zusätzlicher p^+-Implantation die Bildrekonstruktion nachteilig beeinflußt.

Das gemessene Rauschen eines Matrixpixel mit der hier verwendeten Auslese von ENC$= 134,1 \pm 1,6e^-$ kann durch Verbesserungen in der Matrixproduktion und der Ausleseelektronik noch verringert werden.

Das Konzept DEPFET verspricht noch bessere Detektorsysteme, die sicher nicht nur im Bereich der Autoradiographie Anwendung finden werden. Kurz- und mittelfristig sind sicher noch einige Ziele zu stecken.

Auf der einen Seite muß das Bioscope noch besser verstanden und die Auslese weiter optimiert werden, um durch eine kontinuierliche Datennahme eine Zeitauflösung im Millisekundenbereich zu erhalten. Dazu ist eine weitere Verbesserung der Programme und der Elektronik notwendig. Insbesondere die Steuerung des Bioscopes muß vollständig von der Elektronik übernommen werden, damit die Datennahme innerhalb fest definierten Zeiten stattfindet.

Auf der anderen Seite schränkt die Größe der DEPFET-Matrizen von ca. 3 mm x 3 mm die Verwendungsmöglichkeiten ein. Die Produktion größerer Matrizen ist ein neues Ziel, das in einigen Jahren erreichbar ist. Dazu sind Untersuchungen über bessere Produktionsparamater notwendig, wobei die guten Ergebnisse des Bioscopes und der verwendeten Matrizen hier sicher einen Ansporn geben.

Die Entwicklung von Detektorsystemen mit DEPFET-Detektoren steht noch am Anfang. Aber die guten Resultate lassen zukünftige Anwendungen im Bereich der Astrophysik, der Medizin, der Festkörperphysik und der Materialprüfung sehr wahrscheinlich erscheinen. Gerade die guten Rauscheigenschaften bei Raumtemperatur machen einen Einsatz in der Medizin sinnvoll, den hier kann die Meßumgebung nicht auf den Detektor optimiert werden, sondern muß Rücksicht auf den Patienten nehmen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Menschen danken, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben:

- Prof. Dr. P. Buchholz für die interessante Aufgabe im Rahmen des Projekts DEPFET-Bioscope im Forschungsverbund Mikrosensorik des Landes NRW
- Prof. Dr. C. Gößling für seine Bereitschaft diese Arbeit als zweiter Gutachter zu bewerten
- Dr. Peter Klein für die langen und komplexen Diskussionen über das Innenleben von Silizium und für seine unermüdliche Geduld beim Erklären und dem Korrekturlesen dieser Arbeit
- Matthias Grewe für seine Unterstützung bei der Lösung der kleinen und großen mechanischen Probleme
- Den Mitgliedern der Arbeitsgruppe PREFEcT des Lehrstuhls Experimentelle Physik V der Universität Dortmund, insbesondere Marcel Trimpl, dankte ich für die freundschaftliche Zusammenarbeit.
- den Mitglieder der Gruppe FAUST an der Universität Bonn. Besonders Wolfgang Neeser gilt mein Dank für seine Hilfe und Einführung in das Bioscope.
- Hans-Peter Kreipe, Joy Tödtmann und Michael Vogt für das Korrekturlesen dieser Arbeit
- meinen Eltern, die es mir durch ihre dauerhafte Unterstützung ermöglichten, dieses Studium zu absolvieren.
- Fiona Seaman für die vielen roten Kommentare nach dem Korrekturlesen.

Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Literaturverzeichnis

[1] R.C. Alig, S. Bloom, and C.W. Struck. Scattering by ionization and photon emission in semiconductors. *Phy. Rev. B*, 22(12):5565, 1980.

[2] R. J. Barlow. *Statistics — A Guide to the Use of Statistical Methods in the Physical Sciences*. The Manchester Physics Series. John Wiley & Sons, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD, England, 1st edition, 1989.

[3] M. Boecker. *Entwicklung und Aufbau eines DEPFET-Detektorsystems und erste Resultate*. Diplomarbeit, Lehrstuhl Experimentelle Physik V, Universität Dortmund, Otto-Hahn-Straße 4, 44227 Dortmund, 1998.

[4] Prof. Dr. S. Brandt. *Datenanalyse*. BI-Wissenschaftsverlag Mannheim, 3. Auflage, 1992.

[5] E. Gatti and E. Rehak. Semiconductor drift chamber - an application of a novel charge transport scheme. In *Nuclear instruments & methods in physics research - Section A*, volume 225, page 608. Elsevier Science, 1984.

[6] Dwight E. Gray, editor. *American Institute of Physics Handbook*. American Institute of Physics, 3rd edition, 1972.

[7] N. Hörnel. *Test, Inbetriebnahme und Weiterentwicklung von Silizium-Pixel-Detektoren*. Diplomarbeit, Diplomarbeit an der Ludwig-Maximilians-Universität München, 1996.

[8] J. Kemmer and G. Lutz. New detector concepts. In *Nuclear instruments & methods in physics research - Section A*, volume 253, page 365. Elsevier Science, 1987.

[9] J. Kemmer, G. Lutz, et al. Experimental confirmation of a new semiconductor detector principle. In *Nuclear instruments & methods in physics research - Section A*, volume 288, page 92. Elsevier Science, 1990.

[10] P. Klein. Persönliche Mitteilungen.

[11] P. Klein. *Entwicklung, Bau und Test eines Halbleiter-Bildzellendetektors für den Einsatz in der Teilchenphysik.* Dissertation, Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München, Max-Planck-Institut für Physik, Föhringer Ring 6, 80805 München, September 1996.

[12] P. Lechner. *Test und Weiterentwicklung eines Silizium-Pixeldetektors für den Nachweis ionisierender Strahlung.* Diplomarbeit, Physikalische Fakultät der TU München, 1990.

[13] W. Neeser. *Test und Inbetriebnahme von DEPJFET-Detektoren.* Diplomarbeit, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Nussallee 12, 53155 Bonn, Juli 1996.

[14] W. Neeser. *Entwicklung eines Bioscope-Systems aus DEPFET-Matrizen.* Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Universität Bonn, Nussalle, Bonn, April 2000.

[15] W. Neeser et al. DEPFET - a pixel device with integrated amplification. submittiert an Nuclear Instr. and Meth. A, 1999.

[16] M. Overdick. *Digital autoradiography using silicon strip detectors.* Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Nussalle 12, 53115 Bonn, May 1998.

[17] H. Schopper, editor. *Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik - Neue Serie - Gruppe I: Kern- und Teilchenphysik, Band 11.* Landolt-Börnstein, 1990.

[18] K. F. Schuster. *Entwicklung eines neuartigen Siliziumdetektors mit interner Verstärkung.* Diplomarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München, 1988.

[19] S. M. Sze. *Physics of semiconductor devices.* John Wiley & Sons, New York, 1981.

[20] M. Trimpl. *Inbetriebnahme eines Autoradiographiesystems mit einer DEPFET-Matrix und erste Messungen.* Diplomarbeit, Lehrstuhl Experimentelle Physik V, Universität Dortmund, Otto-Hahn-Straße 4, 44227 Dortmund, Dezember 1999.

[21] Prof. Dr. D. Wegener. *Vorlesung: Einführung in die Kern- und Elementarteilchenphysik.* Lehrstuhl Experimentelle Physik V, Universität Dortmund, Germany, Okt 1998.

[22] Prof. Dr.-Ing. Horst Wupper. *Elektronische Schaltungen — 1. Grundlagen, Analyse, Aufbau.* Springer Verlag, Berlin, 1996.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, daß ich diese Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Dortmund, den 17. August 2000

Jörn Vocht