

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: 05H2009 - R&D DETEKTOREN

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Projektleitung: Prof. Dr. Wim de Boer

E-Mail: wim.de.boer@kit.edu

Förderkennzeichen: 05H09VK7

Förderzeitraum: 01.07.2009 - 30.06.2012

Thema: Verbundprojekt R&D DETEKTOREN: Forschung und Entwicklung innovativer Detektorsysteme für ausgewählte Beschleunigeranlagen

Zuwendung: 308.190,00 €

Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt: wim.de.boer@kit.de

Zusätzlicher Name: Wim de Boer

Genutzte Großgeräte:	Labor	Gerät	Experiment
Diplomarbeiten:	15		
Dissertationen:	2		
Habilitationen:	0		
Publikationen:	17		
Konferenzbeiträge:	1		
Patente:	0		
Bachelorarbeiten:	1		
Masterarbeiten:	0		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 13.03.2013 15:11 für eine Veröffentlichung freigegeben.

WISSENSCHAFTLICHER SCHLUSSBERICHT
BMBF Fördervorhaben 05H09VK7

**Verbundprojekt R &D Detektoren: Forschung und Entwicklung
innovativer Detektorsysteme für ausgewählte Beschleunigeranlagen**

L. Altan, C. Barth, W. de Boer, A. Dierlamm, R. Eber, J. Ebert, T. Eichhorn, J. Erfle, S. Frech, M. Guthoff, F. Hartmann, K.-H. Hoffmann, U. Husemann, A. Kornmayer, S. Müller, T. Müller, M. Neuland, A. Nürnberg, M.F. Petry, T. Pfister, C. Rühle, M. Schmanau, M. Schneider, H.-J. Simonis, M. Strelzyk, A. Susloparova, T. Weiler

Inst. für Experimentelle Kernphysik, KIT, Karlsruhe

Übersichtsangaben

Projektleitung	Prof. Dr. W. de Boer
Zuwendungsempfänger	KIT, Karlsruhe
Förderkennzeichen	05H09VK7
Ausführende Stelle	Institut für Experimentelle Kernphysik
Thema	BMBF Verbundprojekt R &D Detektoren
Bewilligungszeitraum:	01.07.2009 bis 30.06.2012
Berichtszeitraum:	01.07.2009 bis 30.06.2012

1 Zusammenfassung

Dieses Vorhaben wurde im Teilbereich "Entwicklung von neuartigen Detektoren zum Nachweis von Teilchen und Strahlung" des Verbundforschungsprojekts: "R&D Detektoren: Forschung und Entwicklung innovativer Detektorsysteme für ausgewählte Beschleunigeranlagen" genehmigt. Der Verbund besteht aus Arbeitsgruppen an folgenden Universitäten:

1. RWTH Aachen (Prof. Schael)
2. Universität Bonn (Prof. K. Desch)
3. Universität Dortmund (Prof. B. Spaan)
4. Universität Heidelberg (Prof. H.-C. Schultz-Coulon)
5. KIT Karlsruhe (Universitätsbereich) (Prof. W. de Boer)

Bisher werden Silizium-Detektoren als präzise Spurdetektoren am LHC verwendet.. Für den zukünftigen Ausbau des LHCs zu einer höheren Luminosität (HL-LHC) sind jedoch folgende Verbesserungen notwendig:

- die Granularität eines Silizium-Trackers muss erhöht werden;
- die inneren Lagen müssen Fluenzen bis zu $10^{16} \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$ aushalten;
- die Kühlung muss zu Temperaturen unterhalb $-35 \text{ }^\circ\text{C}$ erfolgen, damit kein thermisches Run-away bei erhöhten Leckströmen nach der Strahlungsschädigung auftritt.

Die Ziele sind in der Kooperationsvereinbarung beschrieben:

- Entwicklung strahlungsharter Sensoren. Insbesondere sollten Parameter, wie Sensor-Bauart (n-in-p, n-in-n, p-in-n), Sensordicke, Sensormaterial (FZ, mCZ), Spannungsfestigkeit, Verhalten nach Annealing, Pitch und Lorentzwinkel untersucht werden.
- Wie vorher erläutert, sollte ein HL-LHC Detektor möglichst auf Temperaturen unterhalb $-35 \text{ }^\circ\text{C}$ abgekühlt werden. Dies kann sehr effizient mit einer CO_2 Zwei-Phasen Kühlung geschehen, da CO_2 die größte Enthalpie aller Kühlmittel in diesem Temperaturbereich hat. Der Nachteil ist der hohe Dampfdruck von ca. 70 bar bei Zimmertemperatur. LHCb hat gezeigt, dass ein CO_2 System erfolgreich in einem LHC Experiment eingesetzt werden kann. Beim SLHC hat CO_2 noch größere Vorteile: die hohe Enthalpie und der dementsprechend geringe Durchfluss kombiniert mit der niedrigen Viskosität erlauben sehr kleine und lange Kühlröhrchen. Dies reduziert das Material im Detektor.

Der letzte Punkt wurde nicht gefördert, aber da eine Kühlung mit CO_2 für mehrere Experimente am HL-LHC und auch für S-Belle als Grundoption geplant ist, wurden die bisherigen Investitionen aus Karlsruhe (ca. 30 kEuro) an CERN Gruppen abgegeben und dort wurde die Anlage fertig gestellt. Die Anlage steht den Mitgliedern unserer Kooperation zur Verfügung und erste Kühlungstests wurden dort durchgeführt.

Die Untersuchung der Siliziumdetektoren mit unterschiedlichen Pitches nach Bestrahlung ergab interessante Resultate. U.a. wurde bei einigen Typen nach Bestrahlung mit Neutronen Ladungsverstärkung durch hohe interne elektrische Felder beobachtet, so dass mit zunehmender Strahlungsbeschädigung das Signal zunahm statt abnahm. Bei Bestrahlung mit Protonen war der Effekt jedoch deutlich geringer. Dieser Trend konnte mit einfachen Simulationsmodellen bestätigt werden.

Um die Granularität des Detektors zu erhöhen, wurden die Streifen eines Streifendetektors in 4 gleiche Längen unterteilt und die inneren Streifen wurden via Aluminum Routinglines zwischen den äußeren Streifen zu den Vorverstärkern geführt. Bei ersten Prototypen zeigten sich Signale auf den Routinglines. Simulationen zeigten, dass diese Signale effektiv mit p-Implantaten unter den Routinglines unterdrückt werden konnten und weitere Prototypen zeigten, dass dies die richtige Richtung ist, obwohl endgültige Tests noch ausstehen.

Der Lorentzwinkel wurde nach Bestrahlung deutlich kleiner. Auch dieser Trend konnte mit einfachen Simulationsmodellen bestätigt werden. Da Diamantsensoren als Alternative für Siliziumsensoren gelten, wurde die Strahlungshärte dieser Sensoren verglichen. Es stellte sich heraus, dass die Strahlungshärte von Diamant deutlich geringer ist als von Untersuchungen mit hochenergetischen Teststrahlen erwartet. Dies ist zum Teil durch die höhere Schädigung bei kleineren Energien der schädigenden Teilchen zu erklären, wie die Simulationen zeigten. Aber auch Polarisierungseffekte spielen, wie bei Siliziumsensoren, eine wichtige Rolle.

Insgesamt wurde die hier beschriebene Forschung von acht Doktoranden (C. Barth, R. Eber, M. Guthoff, S. Heindl, K.-H. Hoffmann, A. Kornmayer, A. Nürnberg, S. Müller), einem Postdoktorand (M. Schmanau), drei leitenden Wissenschaftlern (A. Dierlamm, F. Hartmann, H.-J. Simonis) aus den Gruppen von Prof. U. Husemann, Prof. T. Müller und Prof. W. de Boer durchgeführt.

Wie aus der Liste der Publikationen hervorgeht, wurden insgesamt 18 Publikationen in referierten Zeitschriften, 15 Diplomarbeiten und 2 Doktorarbeiten fertiggestellt.

Die Unterstützung vom BMBF betrug 1,3 FTE/Jahr mit einem Investitionsvolumen von ca. 20 kEuro/Jahr.

Zusammenfassend: die Ziele des Vorhabens wurden erreicht, aber die Resultate haben auch neue Fragen aufgeworfen, wie die Polarisierungseffekte und Ladungsverstärkung in hochbestrahlten Sensoren. Diese Fragen sollten in Zukunft weiter untersucht werden.

2 Bericht

Nach den ersten Betriebsjahren des LHC Beschleunigers konnte man schon deutlich Strahlungsschädigung an den eingebauten Silizium- und Diamantsensoren erkennen. Um die Strahlungshärte für den HL-LHC abzuschätzen und zu verbessern, laufen innerhalb der großen LHC-Kollaborationen aufwendige Kampagnen. Allgemeine F&E Untersuchungen zur Strahlungshärte sind für Silizium in der RD50-Kollaboration und für Diamant in der RD42-Kollaboration gebündelt. Einen Überblick über die RD50 [1] Aktivitäten findet man in Ref. [2]. Rezente RD42 [3] Aktivitäten findet man in Ref. [4].

Bezüglich der Charakterisierung wurde das innerhalb der RD50-Kollaboration entwickelte Auslesesystem ALIBAVA gekauft und in Betrieb genommen. Hiermit kann die Ladungssammlung von Siliziumsensoren gemessen werden. Nach Bestrahlung muss der Sensor jedoch ordentlich gekühlt werden. Hierfür wurde ein Kühlsystem gekauft und in das Alibava System integriert.

Im Rahmen des CEC (Central European Consortium; F&E Projekt zur Entwicklung strahlenharter Sensormodulen für den CMS Tracker in der HL-LHC Phase) wurden sowohl Strahlungshärtetestudien

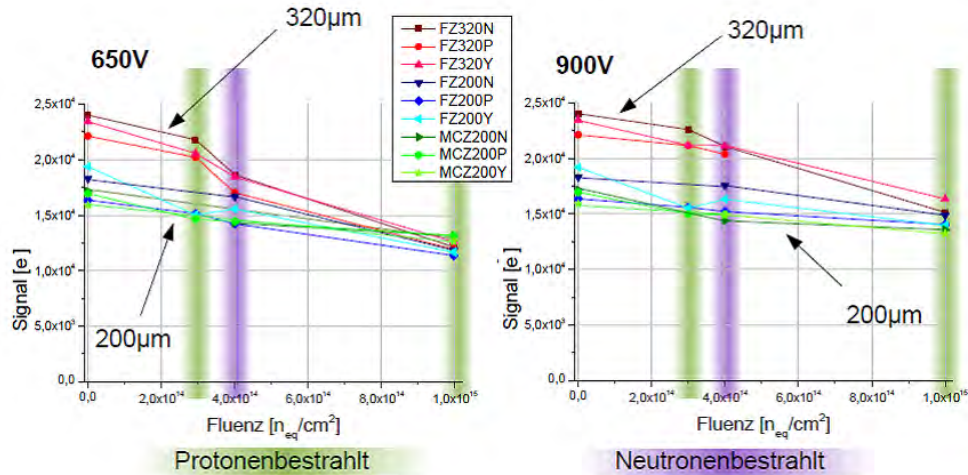


Abbildung 1: Ladungssammlung bei Beschuss mit einer Elektronenquelle (Sr90) und unter Verwendung eines Auslesesystems (ALiBaVa) mit einem integrierenden Verstärkerchip (Beetle). Links sind Messungen bei 650V Biasspannung und rechts mit 900V zu sehen.

als auch Designstudien durchgeführt [5]. Es wurden folgende Siliziummaterialien auf ihre Strahlenhärte untersucht: hochreines Silizium nach dem Zonenschmelzverfahren (320/200/120 μm dick) und sauerstoffreiches Silizium nach den Czochralski-Verfahren (200 μm dick).

Die Sensoren waren entweder n-dotiert mit p-Typ Streifen (Auslese der Löcher) oder p-dotiert mit n-Typ Streifen (Auslese der Elektronen). Sowohl Sensoren von Hamamatsu als auch von Micron wurden untersucht. Die Bestrahlungen fanden an den Bestrahlungszentren des EU-Projekts AIDA statt: Neutronenbestrahlung mit niederenergetischen Neutronen am Reaktor in Ljubljana und Protonenbestrahlung mit 24 MeV Protonen am KIT. Ergebnisse zur Ladungssammlung bei unterschiedlichen Fluenzen sind in Abb. 1 zu sehen. Man beobachtet nach einer Fluenz von 10^{15} n_{eq}/cm^2 noch eine Ladungssammlung von 15000 (12000) Elektronen für Biasspannungen von 1000 (650) V. Diese Werte sind fast unabhängig von der Sensordicke, was darauf hindeutet, dass bei den dickeren Sensoren mehr Ladung an Traps eingefangen wird oder dass diese Sensoren nicht mehr vollständig depletiert sind.

Eine ähnliche Studie mit weniger Materialien von unterschiedlichen Herstellern hat bei der Untersuchung des Langzeitverhaltens eine Erhöhung der Ladungssammlung bei p-Typ Siliziumsensoren nach den Zonenschmelzverfahren gezeigt (siehe Abb. 2). Dieser Anstieg in der Ladungssammlung wurde auch schon von einigen anderen Gruppen beschrieben und wird einer Ladungsvervielfältigung in Regionen hoher Felder nach der Bestrahlung zugeschrieben, vergleichbar mit dem Avalanche-Effekt, der schon seit langem in Avalanche-Dioden zur Signalverstärkung eingesetzt wird.

Gleichzeitig steigen mit dem Auslesesignal auch der Leckstrom und das Rauschen. Daher erhöht sich das Signal-zu-Rausch-Verhältnis nicht proportional zum Signal. Der erhöhte Leckstrom erhöht zusätzlich das Kühlen der Sensoren. Im Rahmen von RD50 wurden Streifensensoren produziert, bei denen sowohl die Geometrie der Streifen als auch Prozessgrößen variiert wurden. Damit hat man den Einfluss von Prozess- und Designgrößen auf die Ladungsvervielfältigung untersucht: je schmaler die Implantate und die Implantationstiefe, desto größer die Ladungsverstärkung. Die Ladungsverstärkung nimmt zu nach Annealing, aber hauptsächlich nach Neutronenbestrahlung,

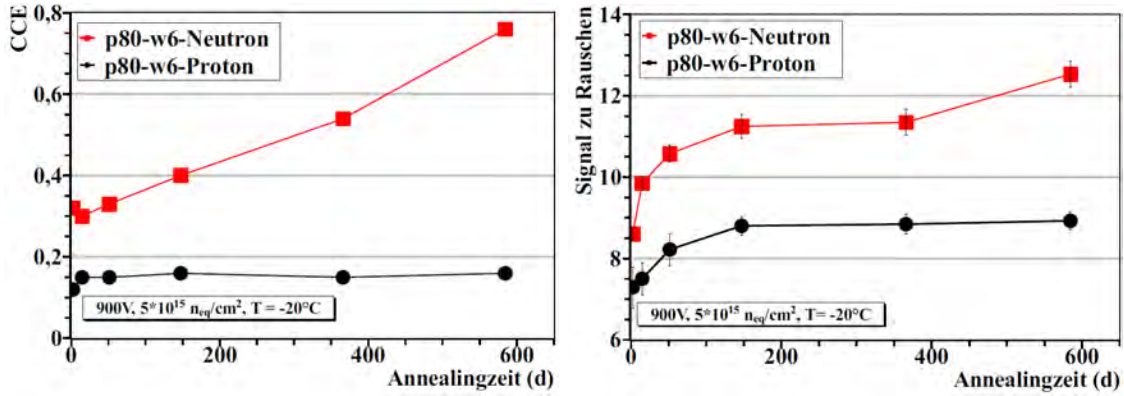


Abbildung 2: Ladungssammlung als Funktion der Annealingzeit nach Protonen- und Neutronenbestrahlung (links) und das Signal-zu-Rausch Verhältnis (rechts).

wie in Abb. 2 ersichtlich ist. Eine mögliche Erklärung wäre, dass bei Bestrahlung mit geladenen Teilchen durch die Ionisation mehr positive Ladungen in der Grenzfläche zum Oxidschicht entstehen. Eine Simulation zeigte, dass dann die elektrische Feldlinien vom Auslesestreifen Richtung Oxid gezogen werden, wodurch das Feld am Auslesestreifen abnimmt. Dadurch wird die Ladungsverstärkung dementsprechend geringer. Detailliertere Untersuchungen sind geplant.

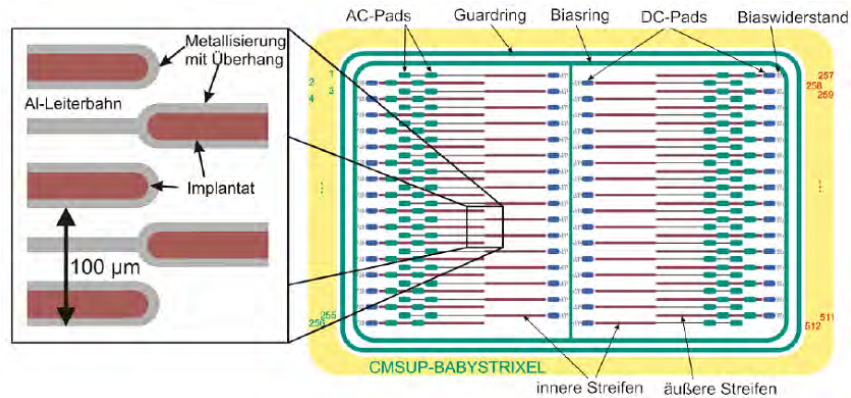


Abbildung 3: Skizze des von uns entwickelten Streifensensors mit kurzen Streifen und Auslese am Sensorrand.

2.1 Neues Design eines Streifensensors mit Auslese am Sensorrand

Aufgrund der hohen Teilchenspurdichte in der HL-LHC Phase ist es notwendig, die Granularität der Sensoren zu erhöhen. Daher ist es wichtig herauszufinden, wodurch diese Ladungsvervielfachung verursacht wird, damit man das Sensorverhalten entsprechend beeinflussen kann, um die Spurpunkte eindeutig einer Teilchenspur zuzuordnen zu können. Man kann dazu die Streifenlängen einfach kürzen und kleinere Sensoren produzieren, aber das würde die Anzahl der zu bauenden Module und damit den Aufwand erhöhen. Es ist also besser, einen großen Sensor mit mehreren Reihen kürzerer Streifen zu haben. Bei zwei Reihen kann man jede Reihe von den beiden Sensorkanten auslesen. Bei einer vierfachen Segmentierung müsste man die beiden inneren Reihen

von oben kontaktieren, was bedeutet den Hybriden mit der Ausleseelektronik auf den Sensor zu setzen. Dies ist durchaus möglich; es müssten allerdings Einflüsse wie die thermische Kopplung und induziertes Rauschen durch die hochfrequenten Takt- und Auslesesignale, sowie technische Umsetzung eines automatisierten Zusammenbaus untersucht werden. Eine Alternative ist die Al-Auslestreifen der AC-gekoppelten inneren Streifen zum Sensorrand hin zu verlängern (siehe Abb. 3). Dies hat den Vorteil, dass man die Sensoren auf konventionelle Weise mit einem Hybriden am Rande des Sensors kontaktieren kann.

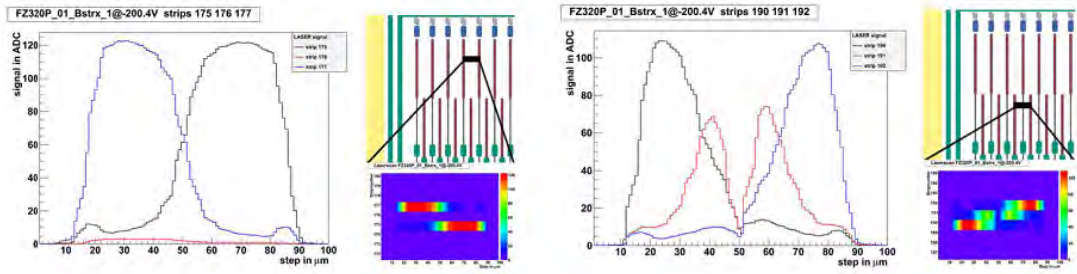


Abbildung 4: Signale eines Positionsscans mit einem IR Laser. Links im Bereich der inneren Streifen: man erkennt, dass während des Positionsscans von links nach rechts, erst der linke und dann der rechte Streifen anspricht. Rechts im Bereich der äußeren Streifen: hier zeigen nicht nur die Streifen ein Signal, sondern auch der Routingline (rot) zeigt unerwartet ein Signal.

Erste Messungen [7] haben allerdings gezeigt, dass Teilchendurchgänge bei den äußeren Streifen Signale auf den Routinglines der inneren Streifen erzeugen, was die Zuordnung zur getroffenen Region erschwert (siehe Abb. 4).

Simulationen haben ergeben, dass man diesen Effekt eliminieren könnte, wenn man bei p-Typ-Sensoren die p-Stop-Isolation so auslegt, dass sie den Bereich unter den Routinglines abdeckt. In diesem Fall bildet sich eine Depletionsschicht um die p-Stop-Isolation, wodurch die elektrischen Feldlinien die darüberliegende Routingline nicht mehr erreichen und daher dort kein Signal mehr induzieren.

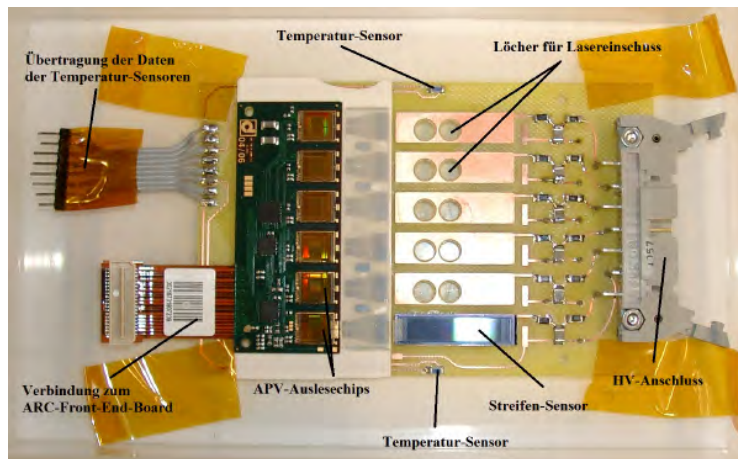


Abbildung 5: Hybrid für die Lorentzwinkelmessungen mit bis zu 6 Sensoren und 12 Glasfasern.

2.2 Lorentzwinkelmessungen an bestrahlten Sensoren

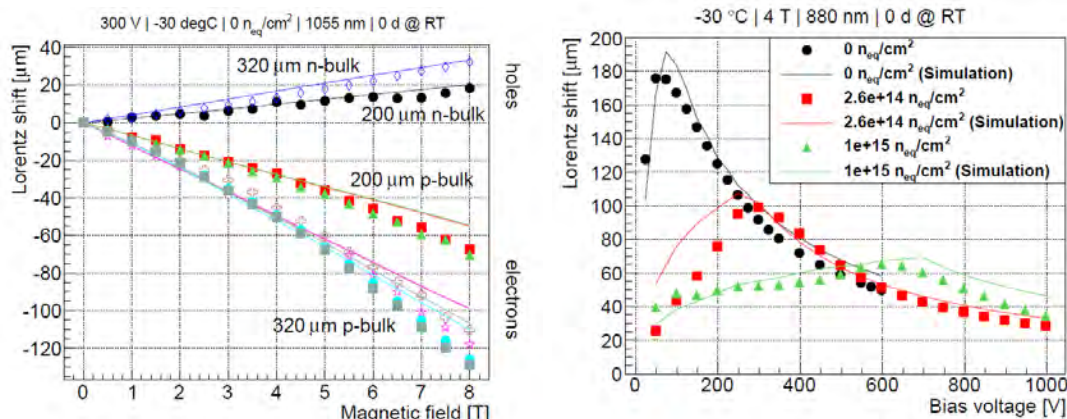


Abbildung 6: Lorentzversatz als Funktion des Magnetfeldes für unterschiedliche Sensoren (links) und als Funktion der Biasspannung nach Bestrahlung mit unterschiedlichen Fluenzen (1000V). Im letzteren Fall ist der Lorentzversatz geringer bei kleineren Biasspannungen, weil der Detektor nicht komplett depletiert ist und daher eine geringere effektive Dicke besitzt (aus Ref. [10].) Die Kurven stammen aus einer Simulation des Lorentzversatzes.

Der CMS-Spurdetektor befindet sich in einem 3,8 T starken Magnetfeld, welches durch die Lorentzkraft die Bahnen der bei den Proton-Proton Kollisionen erzeugten Teilchen zu Spiralbahnen krümmt. Dies ist nötig, um den Impuls der Teilchen zu bestimmen. Diese Teilchen erzeugen beim Durchgang durch die Detektormodule durch Ionisation Ladungsträger, welche als elektrisches Signal ortsaufgelöst nachgewiesen werden kann. Diese Ladungsträger unterliegen jedoch ebenfalls der Lorentzkraft, wodurch die nachgewiesene Ladung merklich verschoben wird. Dies führt letztendlich zu einer Verschlechterung der Ortsauflösung des Spurdetektors, sofern dieser Einfluss nicht korrigiert wird. Der Lorentzwinkel ist von mehreren Faktoren abhängig. Neben der Stärke des Magnetfeldes und der Temperatur ist dies vor allem der Grad der Schädigung. Um diesen Einfluss auf den Lorentzversatz zu untersuchen, wurden über 40 Testsensoren unterschiedlich starker Bestrahlung mit Neutronen und Protonen ausgesetzt und anschließend im Magnetfeld eines supraleitenden Magneten (JUMBO des ITEP, KIT) bei verschiedenen Temperaturen und Magnetfeldstärken bis 8T betrieben. Um den Zeitaufwand bei dieser großen Zahl an Testobjekten zu reduzieren, wurde ein neuer Aufbau entwickelt, der es erlaubt, gleichzeitig den Lorentzversatz von 6 Sensoren zu messen (siehe Abb. 5). Das Prinzip ist früher beschrieben worden: man misst einfach die beobachtete Position einer Ladungswolke als Funktion des Magnetfeldes [8]. Hierfür wurde ein Hybrid von CMS mit 6 Vorverstärkern angepasst und mit 12 unterschiedlichen Lichtfasern ausgestattet. Die Hälfte der Fasern wurde via einem Beamsplitter von einem starken, gepulsten Laser mit einer Wellenlänge von 880 nm (Eindringtiefe 23 μm bei -20 °C) gespeist, die andere Hälfte von einem infraroten Laser (1055 nm, Eindringtiefe 858 μm bei -20 °C). Die letztere Wellenlänge erlaubt eine praktisch homogene Erzeugung der Ionisation entlang der Richtung des Laserlichts, weil der 880 nm Laser lokal eine Ladungswolke erzeugt, deren Drift man durch den Detektor beobachten kann. Der neue Aufbau erlaubte es, in 13 Tagen Messzeit am JUMBO über 16.000 einzelne Messungen durchzuführen [9].

Erste Resultate werden in Abb. 6 gezeigt. Bei geringeren Dicken ist der Lorentzversatz geringer, weil der Lorentzwinkel konstant ist. Nach Bestrahlung ist der Lorentzversatz geringer bei kleineren

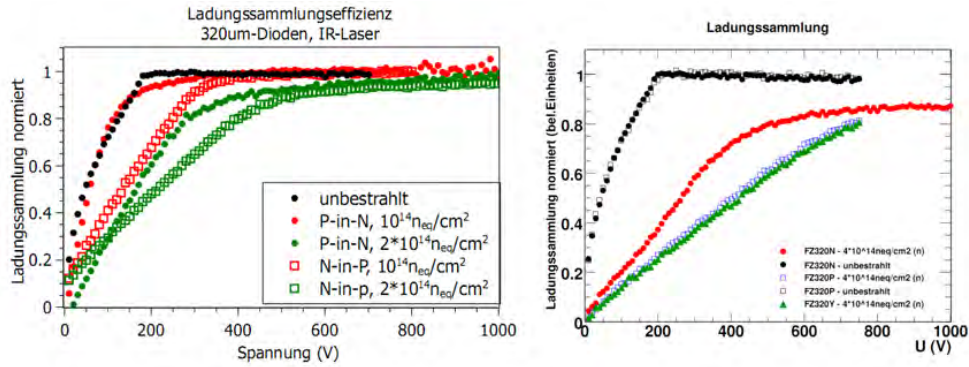


Abbildung 7: Links: Ladungssammlung 320 μm dicker Dioden aus FZ-Material bei $T=0 \text{ }^\circ\text{C}$. Nach Bestrahlung mit Protonen (10^{14} neq/cm^2) bzw. Protonen und Neutronen zusammen ($2 \cdot 10^{14} \text{ neq/cm}^2$) ist eine Reduktion der Ladungssammlung bei niedrigen Spannungen zu sehen. Rechts: Nach einer Fluenz von $4 \cdot 10^{14} \text{ neq/cm}^2$ ist ein deutlicher Einbruch der Ladungssammlung auch bei hohen Spannungen im Vergleich zum unbestrahlten Fall zu sehen.

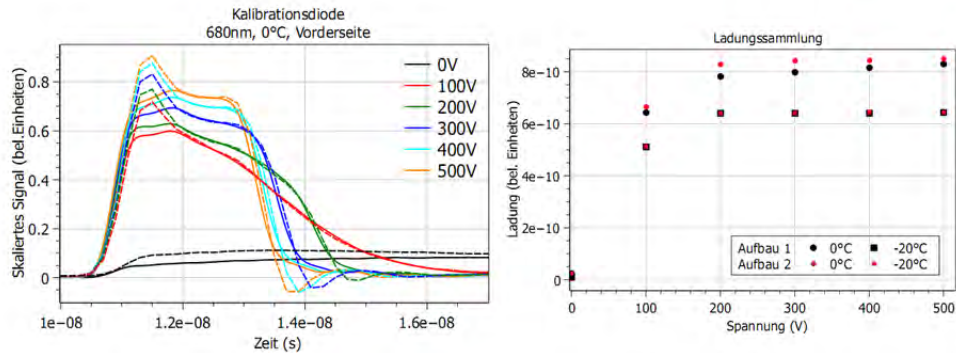


Abbildung 8: Links: Vergleich der gemessenen TCT-Kurven mit rotem Laser bei verschiedenen Spannungen, gemessen mit zwei unterschiedlichen TCT-Messtationen in unterschiedlichen Labors. Die gestrichelte Linie stellt Aufbau 1 dar, die durchgezogene Linie Aufbau 2. Die Signalformen stimmen in ihren wichtigen Teilen überein. Rechts: Vergleich des integrierten Signals (Ladungssammlung) bei verschiedenen Temperaturen. Die Aufbauten stimmen gut überein mit einer maximalen Abweichung von 8%.

Biasspannungen, weil der Detektor nicht komplett depletiert ist und daher eine geringere effektive Dicke besitzt [10]. Die Kurven stammen aus einer Simulation des Lorentzversatzes.

2.3 Messungen mit der Transient Current Technique

Die Transient Current Technique (TCT) ist eine Methode, das elektrische Feld und die Ladungssammlung in Dioden zu bestimmen. Das elektrische Feld im Sensor beeinflusst maßgeblich die Ladungssammlung und den Einfang der Ladungsträger an strahleninduzierten Defekten. Ladungssammlungsmessungen werden dabei mit einem infraroten Laser durchgeführt, der Signale wie minimal ionisierende Teilchen Ladungsträger über die gesamte Dicke des Sensors erzeugt. Während der ersten Bestrahlungsschritte konnte so die Ladungssammlungseffizienz mit Dioden verschiedener

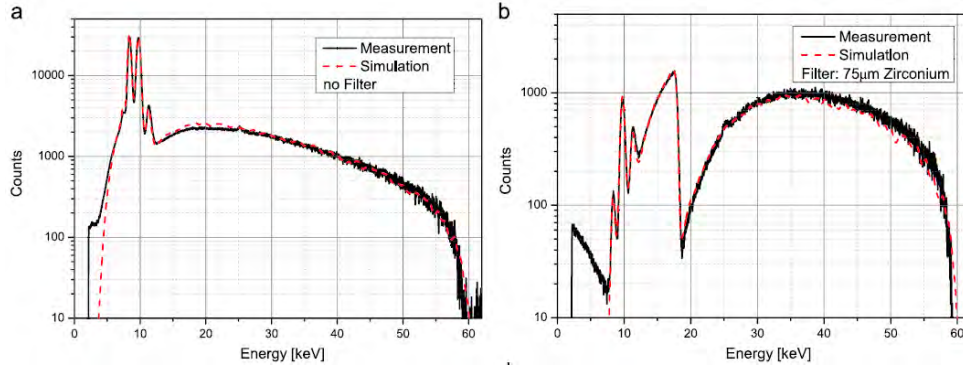


Abbildung 9: Ein Vergleich zwischen dem beobachteten und simulierten Spektrum ohne (a) und mit einem $75 \mu\text{m}$ dicken Zr Filter (b).

Materialien bestimmt werden. Dabei zeigen bestrahlte $320 \mu\text{m}$ dicke n-Typ-Dioden aufgrund ihrer niedrigeren Depletionsspannung bei niedrigen Spannungen ein höheres Signal als p-Typ-Dioden (Abb. 7). Die Ladungssammlung erreicht bei Fluenzen von 10^{14} neq/cm^2 noch 100%, während sie für höhere Fluenzen (oberhalb 10^{14} neq/cm^2) eine Sättigung bei 80% erreicht.

Zur Bestimmung des elektrischen Feldes in Dioden führt man Messungen mit einem roten Laser durch, der Ladungsträger nur bis ca. $5 \mu\text{m}$ Tiefe erzeugt. Dann kann man über den Strom auf die Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger und damit auf die elektrische Feldverteilung schließen. Dabei ist die Signalform entscheidend, die durch den Messaufbau beeinflusst wird. Um hier mit weiteren Instituten vergleichbar zu sein, wurden die Messaufbauten gegeneinander kalibriert. Die Signalformen der verglichenen Kurven stimmen grundsätzlich überein, jedoch müssen aufbauspezifische Über- und Unterschwinger ((Abb. 8), links) in den Kurven bei der Interpretation berücksichtigt werden. Das integrierte Signal, das die Ladungssammlung darstellt, weicht hier maximal 8% voneinander ab (Abb. 8, rechts). Dies ist im Rahmen der Genauigkeit der Messung ausreichend.

2.4 Bestrahlungen mit Röntgenstrahlen

Die Strahlungshärte der Elektronik wird vor allem von Oberflächenschädigung in den Oxidlagen geprägt. Diese kann man mit Röntgenstrahlung effektiv einbringen. Die Schädigung hängt nicht nur vom Fluss, sondern auch vom Spektrum der Röntgenstrahlung ab. Den Fluss kann man relativ einfach mit einer kalibrierten PIN-Diode bestimmen, aber eine Bestimmung des Spektrums verlangt, dass man einzelne Photonen mit hoher Energieauflösung nachweisen kann. Daher ist eine Simulation des Spektrums einfacher, aber die wichtige Frage ist, ob die Simulation dann auch stimmt. Hierzu wurde eine detaillierte Studie gemacht. Das Spektrum wurde für alle Standardfilter unserer Röntgenanlage mit einer Siliziumdriftdiode genau vermessen und diese Daten wurden mit einer detaillierten Simulation des GEANT4 Programms verglichen. Detaillierte Anpassungen der simulierten Geometrie ergaben eine überraschend gute Übereinstimmung wie in Abb. 9 zu sehen ist. Auch wurde in der NIM Publikation angegeben, wie man aus der Simulation die Dosis in den unterschiedlichen Materialien der Elektronik ausrechnen kann [11].

2.5 Strahlungsschäden in Diamant

Da es nicht sicher ist, ob Siliziumsensoren die barbarischen Bedingungen nahe dem Strahlrohr am HL-LHC aushalten werden, wurden auch Diamantsensoren untersucht. Frühere Ergebnisse der RD42 Kollaboration bei Bestrahlung mit 24 GeV Protonen zeigten, dass Diamantsensoren erheblich strahlungshärter als Siliziumsensoren sind. Sowohl ATLAS als auch CMS planen Pixel-detektoren aus Diamant, insbesondere weil heutzutage auch Diamantsensoren als Einzelkristalle zur Verfügung stehen. Diese scCVD (Single Crystal Chemical Vapour Deposit) Sensoren liefern deutlich mehr Signal als die polykristallinen Sensoren. Jedoch sind die pCVD (Poly Crystal Chemical Vapour Deposit) Sensoren als 4 inch Wafer zu bekommen, die scCVD Kristalle bisher nur als $5 \times 5 \text{ mm}^2$.

Für LHC werden Diamantsensoren als Beam-Condition-Monitor (BCM) eingesetzt. Da wir für CMS den BCM2 Monitor aus pCVD Diamant gebaut haben und auch signifikant zum Bau des Siliziumsdetektors beigetragen haben, waren wir in der Lage, die Strahlungshärte von Silizium- und Diamantsensoren direkt zu vergleichen. BCM2 Sensoren befinden sich auf beiden Seiten des Wechselwirkungspunkts am Eingang des CMS Detektors (14 m von Zentrum) in der Nähe des Strahlrohrs. BCM2 war vom Anfang im LHC Beam-Abort-System des LHCs integriert, d.h. wenn die Strahlverluste am Eingang des CMS Detektors zu hoch sein würden, wurde der LHC-Strahl in den Beamdump gesteuert.

Bei den Diamanten war die Strahlungsschädigung deutlich höher als erwartet von Teststrahlungsmessungen, auch wenn man die erhöhte Schädigung durch niederenergetische Teilchen berücksichtigt, wie wir als erste Gruppe berechnet haben[12]. Um die Strahlungshärte von scCVD Sensoren zu testen, wurde ein scCVD und ein pCVD Sensor am gleichen Ort im BCM2 Monitor eingebaut. Nach einigen Monaten LHC Betrieb in 2011 waren scCVD Sensoren kaum besser als die polykristalline Sensoren.

Man sieht in Abb. 10, dass das Signal des scCVD Diamanten hyperbelartig abnimmt und sich nach ca. zwei Monaten LHC Betrieb in 2011 dem pCVD Diamanten annähert. Diese starke Abnahme ist theoretisch erwartet, da der "Charge Collection Distance" (ccd) nach Bestrahlung mit dem Wert vor Bestrahlung (ccd_0) wie folgt mit der Fluenz Φ zusammenhängt:

$$1/ccd = 1/ccd_0 + k\Phi.$$

In dieser Formel steckt die Annahme, dass das Signal S mit der Anzahl der Defekte N_D abnimmt ($S \propto ccd \propto 1/N_D$) und die Anzahl der Defekte linear mit der Fluenz ansteigt ($N_D = N_0 + k\Phi$). Diese beide Annahmen führen direkt zu der hyperbelartigen Abnahme, die die Daten gut beschreibt. Man kann die Formel so interpretieren: bei scCVD ist ccd_0 groß und ccd fällt mit $1/k\Phi$. Bei pCVD ist ccd_0 schon vor Bestrahlung so gering durch die Korngrenzen, dass die Schädigung durch Bestrahlung am Anfang weniger ins Gewicht fällt, weil der Term $1/ccd_0$ dominiert über $k\Phi$. Oder einfacher gesagt: bei pCVD Sensoren sind die Schädigungseffekte am Anfang klein im Vergleich mit der schon vorhandenen Schädigung.

Wir haben die Anzahl der versetzten Atome ("displaced atoms"), die ein Maß für die Strahlungsschädigung sind, als Funktion der Fluenz und Energie der einfallenden Teilchen mit dem FLUKA Programmpaket [13] bestimmt. Dieses Programm zeigt wieder den Anstieg der Strahlungsschädigung bei Energien der einlaufenden Teilchen unterhalb 100 MeV, wie wir schon früher beobachtet hatten [12]. Der Anstieg ist mit diesem Programm jedoch stärker, vor allem vor Neutronen, wie man der Doktorarbeit von Steffen Müller entnehmen kann [14]. Diese Empfindlichkeit für niederenergetische Neutronen ist vermutlich die Ursache für die höhere Schädigung der Diamanten im Vorwärtsbereich im Vergleich mit den Diamanten im Zentralbereich. Die Arbeit von

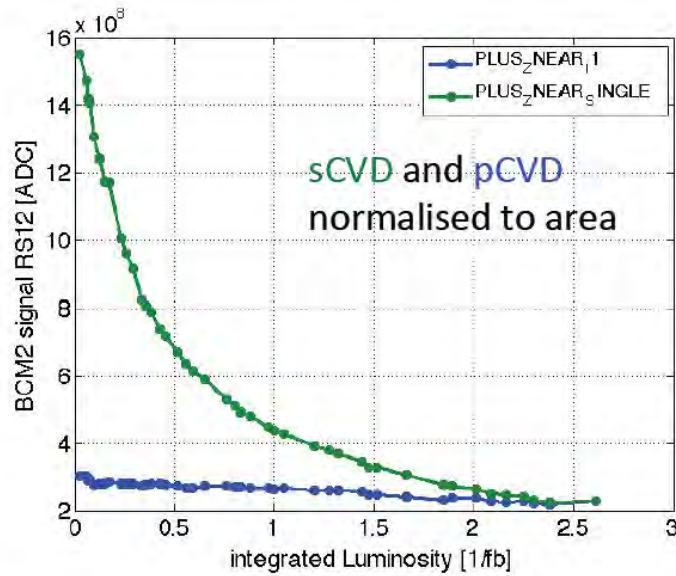


Abbildung 10: Signalabnahme von scCVD und pCVD an der gleichen Stelle im CMS BCM2 Strahlmonitor als Funktion der LHC integrierten Luminosität. Das Signal wurde auf der Fläche des Sensors normiert, da der Fluss durch den 0,25 cm² großen scCVD Sensor ein Faktor vier kleiner ist als der Fluss durch den pCVD Sensor mit einer Fläche von 1 cm². Von M. Guthoff (KIT), RD42-Kollaborationstreffen, Toronto, Sept. 2011.

Steffen Müller wurde mit dem CMS-Award für die beste technische Doktorarbeit 2011 ausgezeichnet. Sein Nachfolger, Moritz Guthoff, führt diese Untersuchungen weiter. Er hat mit TCT (Transient Current Technique) Messungen gezeigt, dass zusätzlich Polarisierungseffekte durch eingefangene Ladung eine wichtige Rolle spielen. Die eingefangene Ladung ist wiederum proportional zu der Anzahl der Defekte. Bei diesen Messungen wird der Strom der durch eine Alpha-Quelle erzeugte Ionisation auf einem Hochfrequenz-Oszilloskop beobachtet. Da der Strom proportional zum elektrischen Feld im Sensor ist, gibt die Zeitabhängigkeit des Stroms die Ortsabhängigkeit des E-Feldes. Man beobachtete, dass das Signal mit der Zeit abnahm, was als Abnahme des E-Feldes durch das Füllen der Traps gedeutet wurde. Die Polarisation konnte bestätigt werden durch Umpolung der Biasspannung: bei einer Umpolung mit einer Taktfrequenz von einigen Hertz nimmt das Signal nicht mehr ab, weil die Polarisation nach dem Umpolen das E-Feld verstärkt. Ein Teil der Polarisation könnte auch durch getrappte Ladung an den geschädigten Oberflächen des Kristalls bei den Metallkontakten entstehen. Daher werden wir die Kristalle neu metallisieren und dann nochmals untersuchen.

3 Die wichtigsten Positionen des zahlenmigen Nachweises

Die Unterstützung vom BMBF betrug 1,3 FTE/Jahr mit einem Investitionsvolumen von ca. 20 kEuro/Jahr.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Insgesamt wurde die hier beschriebene Forschung von 8 Doktoranden (C. Barth, R. Eber, M. Guthoff, S. Heindl, K.-H. Hoffmann, A. Kornmayer, A. Nürnberg, S. Müller), 1 Postdoktorand (M. Schmanau), 3 leitende Wissenschaftler (A. Dierlamm, F. Hartmann, H.-J. Simonis) aus den Gruppen von Prof. U. Husemann, Prof. T. Müller und Prof. W. de Boer durchgeführt.

Wie aus der Liste der Publikationen hervorgeht, wurden insgesamt 18 Publikationen in referierten Zeitschriften, 15 Diplomarbeiten und 2 Doktorarbeiten fertiggestellt.

Das Hauptziel des Vorhabens, die Verbesserung der Strahlungshirte von Siliziumsensoren, sind wir ein gutes Stück näher gekommen, aber die Resultate haben auch neue Fragen aufgeworfen, wie die Polarisierungseffekte und Ladungsverstärkung in hochbestrahlten Sensoren. Diese Fragen sollten in Zukunft weiter untersucht werden.

5 Voraussichtliche Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die von uns betriebene Grundlagenforschung hat auch praktische Bedeutung, denn kosmische Strahlung bringt immer wieder empfindliche Elektronik zum Erliegen. Daher ist strahlungsresistente Elektronik vor allem für die Raumfahrt imminent wichtig, denn die Strahlung ist im Weltraum sehr viel intensiver, da sie dort nicht von der Atmosphäre abgeschirmt wird.

6 Vergleich der Resultate mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Finanzplanung

Alle Arbeits-, Zeit- und Finanzplanungen waren im Einklang mit dem Vorhaben, wie aus diesem Bericht und aus dem beigelegten Finanzbericht ersichtlich ist.

7 Verwertung

Die Resultate dieser Grundlagenforschung sind alle veröffentlicht worden, wie aus der nachfolgenden Liste der Publikationen ersichtlich ist.

Literatur

- [1] RD50 Collaboration homepage: www.cern.ch/rd50
- [2] J. Metcalfe [RD50 Collaboration], "Silicon detectors for the sLHC," Nucl. Phys. Proc. Suppl. **215** (2011) 151;
S. Seidel [RD50 Collaboration], "Silicon detectors for the super LHC," Nucl. Instrum. Meth. A **628** (2011) 272;
A. Dierlamm [RD50 Collaboration], "Silicon detectors for the SLHC: An overview of recent RD50 results," Nucl. Instrum. Meth. A **624** (2010) 396;
A. Machiolo [RD50 Collaboration], "RD50 recent results: Development of radiation hard sensors for SLHC," PoSVERTEX **2009** (2009) 010;
E. Tuovinen [RD50 Collaboration], "Recent advances in the development of semiconductor

- detectors for SLHC,” Nucl. Instrum. Meth. A **623** (2010) 171;
 F. Hartmann [RD50 Collaboration], “Recent advances in the development of semiconductor detectors for very high luminosity colliders,” Nucl. Instrum. Meth. A **617** (2010) 543.
- [3] RD42 Collaboration homepage: www.cern.ch/rd42
- [4] D. Asner, (W. de Boer) *et al.* [RD42 Collaboration], “Diamond pixel modules,” Nucl. Instrum. Meth. A **636** (2011) S125;
 D. Dobos *et al.* [RD42, ATLAS Diamond Pixel Upgrade and ATLAS Beam Conditions Monitor Collaboration], “Diamond pixel modules and the ATLAS beam conditions monitor. Collaborations,” Nucl. Instrum. Meth. A **628** (2011) 246;
 M. Cristinziani [RD42 Collaboration], “Diamond Prototypes for the ATLAS SLHC Pixel Detector,” Nucl. Instrum. Meth. A **623** (2010) 174 [arXiv:0910.0347 [physics.ins-det]].
- [5] Dierlamm, A. ”Silicon sensor developments for the CMS Tracker upgrade”, JINST **7** (2011) C01110.
- [6] Petry, M.F. ”Vergleichende Messungen der Ladungssammlung von gemischtbestrahlten Siliziumstreifensensoren aus unterschiedlichem Grundmaterial”, Diplomarbeit, IEKP-KA/2011-27.
- [7] Kornmayer, A. ”Untersuchungen zur Signalkopplung an neuartigen Siliziumstreifensensorgeometrie” Diplomarbeit, IEKP-KA/2011-17.
- [8] W. de Boer, K. -H. Hoffmann, A. Sabellek, M. Schmanau, M. Schneider, V. Zhukov and T. Schneider, “Lorentz shift measurements in heavily irradiated silicon detectors in high magnetic fields,” PoSRD **09** (2010) 022 [arXiv:1005.3629 [physics.ins-det]];
 M.Schneider, Lorentzwinkelmessungen in hochbestrahlten Siliziumstreifendetektoren, Diplomarbeit KIT 2009, IEKP-KA/2009-14;
 M. Frey, Messung von Lorentzwinkeln in Siliziumstreifendetektoren vor und nach Strahlungsschädigung, Doktorarbeit KIT, 2009, IEKP-KA/2009/18.
- [9] Schmenger, M. ”Messung des Lorentzwinkels an bestrahlten Silizium-Streifendetektoren”, Bachelorarbeit, IEKP-Bachelor-KA/2011-16.
- [10] A. Nürnberg and T. Schneider, ”Lorentz angle measurements as part of the sensor R&D for the CMS Tracker upgrade”, 2013 JINST 8 C01001.
- [11] M. Guthoff, O. Brovchenko, W. de Boer, A. Dierlamm, T. Müller, A. Ritter, M. Schmanau, H.-J. Simonis, ”Geant4 simulation of a filtered X-ray source for radiation damage studies”, Nucl. Instr. Methods A **675** (2012) 118.
- [12] W. de Boer et al., Radiation hardness of diamond and silicon sensors compared, Phys.Status Solidi 204:3009,2007, arXiv:0705.0171 [physics.ins-det].
- [13] A. Ferrari, P.R. Sala, A. Fasso’, and J. Ranft, ”FLUKA: a multi-particle transport code” CERN-2005-10 (2005), INFN/TC-05/11, SLAC-R-773
 G. Battistoni, S. Muraro, P.R. Sala, F. Cerutti, A. Ferrari, S. Roesler, A. Fasso’, J. Ranft, ”The FLUKA code: Description and benchmarking”, Proceedings of the Hadronic Shower Simulation Workshop 2006, Fermilab 6–8 September 2006, M. Albrow, R. Raja eds., AIP Conference Proceeding 896, 31-49, (2007).

- [14] S. Müller, The Beam Condition Monitor 2 and the Radiation Environment of the CMS Detector at the LHC, Doktorarbeit, KIT 2011, IEKP-KA/2011-1.

8 Liste der Publikationen

8.1 Liste der Diplomarbeiten

1. Eber, R., Untersuchungen an Magnetic-Czochralski-Dioden nach gemischter Bestrahlung mit Neutronen und Protonen mittels der Transient Current Technique, IEKP-KA/2009-30
2. Ebert, J., Entwicklung und Test einer kombinierten Kühlung und Stromversorgung für das CMS-Tracker-Upgrade, IEKP-KA/2009-4
3. Erfle, J., Entwicklungen für neue Siliziumstreifensensoren und deren Qualitätskontrolle, IEKP-KA/2009-27
4. Neuland, M., Untersuchungen der Kenngrößen von hochbestrahlten Magnetic-Czochralski-Siliziumstreifensensoren im Rahmen des SLHC-Projekts, IEKP-KA/2009-12
5. Nürnberg, A., Studien zur Ortsauflösung bestrahlter Silizium-Streifensensoren mit geladenen Teilchen der kosmischen Höhenstrahlung, IEKP-KA/2009-31
6. Rühle, Ch., Entwicklung eines schnellen Auslesesystems für Diamantstrahlmonitore am CMS-Experiment, IEKP-KA/2009-11
7. Schneider, M., Lorentzwinkelmessungen in hochbestrahlten Siliziumstreifendetektoren, IEKP-KA/2009-14
8. Susloparova, A., Aufbau einer Siliziumstreifen-Höhenstrahlteststation für Detektorstudien, IEKP-KA/2009-5
9. Pfister, T., Aufbau einer vollautomatischen Messstation zur Bestimmung der Ladungssammleffizienz hochbestrahlter Silizium Streifensensoren, IEKP-KA/2010-20
10. Eichhorn, T., Simulationen bestrahlter Siliziumsensoren der Teilchenphysik, IEKP-KA/2011-14
11. Kornmayer, A., Untersuchungen zur Signalkopplung an neuartigen Siliziumstreifensensorgeometrien, IEKP-KA/2011-17
12. Petry, M.F., Vergleichende Messungen der Ladungssammlung von gemischtbestrahlten Siliziumstreifensensoren aus unterschiedlichem Grundmaterial, IEKP-KA/2011-27
13. Frech, S., Einfluss von Strahlenschäden auf Siliziumstreifensensoren aus unterschiedlichen Grundmaterialien, IEKP-KA/2012-21
14. Altan, L., Untersuchung zur Ladungsmultiplikation an hoch bestrahlten Siliziumstreifensensoren, IEKP-KA/2012-23
15. Strelzyk, M., Design studies of n-in-p silicon strip sensors for the CMS tracker, IEKP-KA/2012-22

8.2 Liste der Doktorarbeiten

1. Frey, M., Entwicklung von hoch strahlenharten Siliziumstreifensensoren für den Einsatz am Super Large Hadron Collider, IEKP-KA/2009-18
2. S. Müller, The Beam Condition Monitor 2 and the Radiation Environment of the CMS Detector at the LHC, IEKP-KA/2011-1

8.3 Liste der Publikationen in referierten Zeitschriften

1. "Evolution of silicon sensors characteristics of the current CMS tracker CMS Collaboration Nucl. Instrum. Meth., vol. A658, p. 6-10, 2011
2. "Evolution of silicon sensor characteristics of the CMS silicon strip tracker" CMS Collaboration Nucl. Instrum. and Meth., vol. A699, (2013) 178-183.
3. Castro, E., Guthoff, M., Müller, S., u. a. "The CMS Beam Conditions and Radiation Monitoring System". Physics Procedia 37, Nr. 0 (2012): 20972105.
4. Dierlamm, A. "Silicon sensor developments for the CMS Tracker upgrade". Journal of Instrumentation 7, Nr. 01 (2012): C01110C01110.
5. Dierlamm, A. "Silicon detectors for the SLHC—An overview of recent RD50 results". NIM A 624, Nr. 2 (2010) 396400.
6. Guthoff, M., O. Brovchenko, W. de Boer, A. Dierlamm, T. Müller, A. Ritter, M. Schmanau, und H.-J. Simonis. "Geant4 simulation of a filtered X-ray source for radiation damage studies". NIM A 675, Nr. 0 (2012): 118122.
7. Hartmann, F. "Silicon tracking detectors in high-energy physics". NIM A 666, Nr. 0 (2012): 2546.
8. Hartmann, F. und Sharma, A. "Multipurpose detectors for high energy physics, an introduction". NIM A 666, Nr. 0 (2012): 19.
9. Dierlamm, A. "Characterization of silicon sensor materials and designs for the CMS Tracker Upgrade" (Dec 2012), CMS CR-2012/370 to be published in Proceedings of Science
10. Spiegel, L., Barvich, T., Dierlamm, A. u. a. "Czochralski silicon as a detector material for S-LHC tracker volumes". NIM A 628, Nr. 1 (2011): 242245.
11. Hoffmann, K.-H., G. Auzinger, T. Bergauer, M. Dragicevic, J. Erfle, P. Grabiec, M. Grodner, u. a. "R&D on novel sensor routing and test structure development". NIM A 628, Nr. 1 (2011) 268271.
12. Hartmann, F. "Semiconductor sensors". NIM A 628, Nr. 1 (2011) 4049.
13. Hartmann, F., und Kaminski, J. "Advances in Tracking Detectors". Annual Review of Nuclear and Particle Science 61, Nr. 1 (2011) 197221.
14. Eber, R. "Silicon Sensor Developments for the CMS Tracker Upgrade", (2011), CMS CR-2011/219, published in World Scientific, Astroparticle, Particle, Space Physics, Radiation Interaction, Detectors and Medical Physics Applications: Volume 7,(2012), 856.

15. Härkönen, J., Dierlamm, A., Frey, M., u. a. "Test beam results of a heavily irradiated Current Injected Detector (CID)". NIM A 612, Nr. 3 (2010) 488492.
16. Luukka, P., Dierlamm, A., Frey, M., Hartmann, F. u. a. "Test beam results of heavily irradiated magnetic Czochralski silicon (MCz-Si) strip detectors". NIM A 612, Nr. 3 (2010) 497500.
17. Militaru, O., P. Blüm, W. de Boer, Dierlamm, A., Erfle, J., Hartmann, F. u. a. "Simulation of electrical parameters of new design of SLHC silicon sensors for large radii". NIM A 617, Nr. 13 (2010) 563564.
18. W. de Boer, K. -H. Hoffmann, A. Sabellek, M. Schmanau, M. Schneider, V. Zhukov and T. Schneider, "Lorentz shift measurements in heavily irradiated silicon detectors in high magnetic fields," PoSRD **09** (2010) 022 [arXiv:1005.3629 [physics.ins-det]];