

ATLAS Pixel Module —
der Aufbau und deren Tests im Labor und im
Pionenstrahl

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften
des Fachbereiches Physik
der Universität Dortmund

vorgelegt von

Dipl.-Phys. Martin Maß
Universität Dortmund
Fachbereich Physik
Lehrstuhl für Experimentelle Physik IV

Dortmund, den 6. Januar 2005



Übersicht

Der ATLAS-Pixeldetektor stellt den innersten der ATLAS-Subdetektoren dar und soll im ATLAS-Detektor für eine Laufzeit von 10 Jahren vom Vertex abgehende Teilchenspuren detektieren. Der Pixeldetektor besteht aus ca. 1700 hybriden Modulen, die für ihren Einsatz ein Höchstmaß an Zuverlässigkeit bieten müssen, da Wartungs- und Reperaturarbeiten nur einmal jährlich möglich sind.

In Dortmund werden bis Ende 2005 vorraussichtlich ca. 250 dieser Module gefertigt und getestet werden. Zu diesem Zweck wurde an der Universität Dortmund eine Produktions- und Testlinie zur Herstellung und vollständigen Charakterisierung aufgebaut.

Am H8-Teststrahl des SPS am CERN wurden bestrahlte und unbestrahlte Module mit einem 180 GeV Pionenstrahl getestet, um Aussagen über deren Eigenschaften nach der Strahlenbelastung von 10 Betriebsjahren im Inneren des ATLAS-Detektors treffen zu können.

Inhaltsverzeichnis

1	Der LHC und das ATLAS-Experiment mit seinen Subdetektoren	7
1.1	Der LHC	7
1.2	Das Physikpotential des ATLAS-Detektors	8
1.3	Der ATLAS-Detektor	10
1.3.1	Das Myonspektrometer	11
1.3.2	Das Kalorimetersystem	12
1.3.3	Der Innendetektor	14
1.3.4	Das Triggersystem des ATLAS-Detektors	16
2	Silizium als Detektormaterial	18
2.1	Energieverlust in Materie	18
2.2	Leitfähigkeit von Halbleitern	21
2.3	Dotierung von Halbleitern	21
2.4	Ortsauflösende Siliziumdetektoren	24
2.5	Ortsauflösungsvermögen eines strukturierten Siliziumdetektors	25
2.6	Strahlenschäden in Silizium	27
2.6.1	Dotierungsveränderung	28
2.6.2	Erhöhung des Leckstroms	28
2.6.3	Einfluß auf die Ladungssammlung	29
3	Der Pixeldetektor	30
3.1	Das Designkonzept des Pixeldetektors	30
3.2	Anforderungen an den Pixeldetektor	31
3.3	Der Sensor	32
3.3.1	Dotierungskonzepte	33
3.3.2	Pixelisolationen	35
3.4	Die Front-End Elektronik	36
3.4.1	Der Analogteil der Pixelzelle	37
3.4.2	Digitaler Readoutteil	38
3.5	Das FlexMCC	40

4	Modulfertigung und Modultestschritte	42
4.1	Die Sensortileproduktion	42
4.2	Modulbau	43
4.2.1	FlexMCC bestücken	43
4.2.2	FlexMCC wirebonden	45
4.2.3	Baremodule - FlexMCC - Integration	47
4.2.4	Modul wirebonden	48
4.2.5	Potting der Wirebonds	49
4.3	Modultestsetup	50
4.3.1	Modulmeßstand	50
4.3.2	Quellenmessungen	53
4.3.3	Burn-in-Meßstand	53
4.4	Baremodulemeßstand	55
4.4.1	Laminar-Flowbox	56
4.4.2	3D-Verfahrtisch	57
4.5	Modultestschritte	58
4.5.1	BARE Test	58
4.5.2	FlexMCC Test	60
4.5.3	ASSY Test	61
4.5.4	BURN Test	63
4.5.5	FLEX Test	63
4.6	Produktionslinie und Qualifizierungsverfahren	65
4.6.1	Produktionsorganisation	66
4.6.2	Qualifizierungsverfahren als Modul-Produktionsstätte	68
4.6.3	Production Data Base	71
5	Analyse von Modultestdaten	73
5.1	ModuleAnalysis	73
5.2	Detailergebnisse eines Moduls	73
5.2.1	Quellenmessung	74
5.2.2	Schwellenmessung	75
5.2.3	Rauschmessung	75
5.3	Betrachtung der zehn Qualifizierungsmodule	78
5.3.1	Sensoreigenschaften	79
5.3.2	Ströme der FE-Chips	81
5.3.3	Bumpverbindungen	82
5.3.4	Analoge FE-Eigenschaften	84
5.4	Bewertung und Vergleich mit der Designerwartung	85

6	Cross-Kalibration	87
6.1	Sensoreigenschaften	87
6.2	Stromaufnahme	88
6.3	Elektronische Eigenschaften	89
6.4	Bad Pixel	91
6.5	Bewertung	92
7	Testbeam-Setup und -Resultate	93
7.1	Beamteleskop	93
7.2	Zeitauflösung	94
7.3	H8-Software	96
7.4	Ladungssammlungsverlust am Biasdot	97
7.4.1	Projektionsdarstellung auf Pixelrelativkoordinaten	97
7.4.2	Selektion der guten Tracks	98
7.4.3	Clusterbildung	98
7.4.4	Darstellung der Ergebnisse	99
7.4.5	Auswirkung der Biasdotladungssammlung auf die mittlere Effizienz des gesamten Detektormoduls	100
7.4.6	Abhängigkeit der Ladungssammlung von der Biasvoltage	102
7.5	Ladungssammlungssimulation	104
7.6	Schwellenvariationen	106
7.6.1	Effizienz vs. Schwelle	106
7.6.2	Ortsaufgelöste Schwellenvariation	108
7.7	Ladungsverteilungen	110
7.7.1	Vergleich von Vavilovverteilung und Landauverteilung	110
7.7.2	Differenzierung nach Pixelsorten	111
7.7.3	Unterschiedliche Ladungsdepositionen	114
7.8	Diskussion der Ergebnisse	118

Einleitung

Die Teilchenphysik ist bestrebt, tiefere Einblicke in die Bausteine der Materie und deren Wechselwirkungen zu gewinnen. Zu diesem Zweck werden Elementarteilchen mittels Beschleunigern beschleunigt und zur Kollision gebracht. Energie, Richtung und Impulse der Kollisionsfragmente geben Aufschluß über Massen und Wechselwirkungen der beteiligten Teilchen und liefern so Detailinformationen über die subatomare Welt.

Gegenwärtig wird am CERN¹ in Genf der weltgrößte Protonenbeschleuniger LHC² gebaut. Dieser entsteht im Tunnel des ehemaligen LEP³ mit einem Umfang von 27 km in einer Tiefe von 45 - 175 m. Im LHC können Protonenstrahlen mit Energien von jeweils 7 TeV bei einer Designluminosität von $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ oder Pb-Ionen mit einer Energie von jeweils 5,4 TeV pro Nukleon zur Kollision gebracht werden. Dies geschieht bei einer Taktrate von 40 MHz.

Vier Experimente, die gegenwärtig im Aufbau begriffen sind, werden am LHC ab 2007 mit der Datennahme beginnen: ATLAS⁴, CMS⁵, LHCb⁶ und ALICE⁷.

CMS und ATLAS sind Vielzweckexperimente, die beide auf den Gebieten der Higgssuche, Supersymmetrie, b-Physik und Präzisionsmessungen von Teilchenmassen großes Entdeckungspotential besitzen. LHCb ist ein auf die b-Physik spezialisiertes Experiment, das im Gegensatz zu CMS und ATLAS nicht den annähernd kompletten Raumwinkelbereich abdeckt, sondern ausschließlich eine Vorwärtsrichtung.

Bei ALICE liegt die Spezialisierung bei den o.g. Pb-Kollisionen. Hierbei sollen durch Kollisionen von stark wechselwirkenden Teilchen in extremen Energiedichten Quark-Gluon-Plasmen erzeugen werden.

Thematisch behandelt die vorliegende Arbeit das ATLAS-Experiment. Der inner-

¹Conseil Européen pour la **R**echerche **N**ucléaire (europäisches Forschungszentrum für Teilchenphysik)

²**L**arge **H**adron **C**ollider

³**L**arge **E**lectron **P**ositron **C**ollider

⁴**A** **T**orodial **L**HC **A**pparatus

⁵**C**ompact **M**yon **S**olenoid

⁶**L**arge **H**adron **C**ollider **b**eauty experiment

⁷**A** **L**arge **I**on **C**ollider **E**xperiment

ste der ATLAS-Subdetektorkomponenten ist der Pixeldetektor. Der Pixeldetektor soll in einer Entfernung von wenigen Zentimetern vom Vertex, hochaufgelöst im Mikrometerbereich, Teilchenbahnen über annähernd den gesamten Raumwinkel messen.

Derartige Anforderungen stellen aufgrund der hohen Taktrate und der Miniaturisierung der Pixelzellen eine Herausforderung an die Ausleseelektronik sowie an das Sensordesign bezüglich der Strahlentoleranz dar.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Implementation der Produktionslinie für ATLAS-Pixelmodule an der Universität Dortmund. Dazu gehört neben der Produktionsorganisation, die Entwicklung und der Aufbau eines Teststandes für die vollständige Charakterisierung der Module bis zu deren Serienproduktion.

Diese Modultests orientieren sich an physikalisch relevanten Fragestellungen bezüglich der vorliegenden Detektorkomponenten. Die physikalische Interpretation der Testergebnisse ermöglichte Fehler zu diagnostizieren und eine Rangfolge für die Qualität der Module festzulegen. Ferner wurde durch die Tests die Zuverlässigkeit der Module über den ATLAS-Betriebszeitraum sichergestellt.

Weiterhin erfolgte, nach Beteiligung an der Datennahme bei Teststrahlungsmessungen am CERN mit den ATLAS-Pixelmodulen, die Analyse der Teststrahltdaten bzgl. der Ladungssammlung in kritischen Bereichen eines Pixels zur Qualifizierung eines Sensorherstellers zur Produktion. Dies geschah im Rahmen der Aktivitäten der Testbeamgruppe der ATLAS-Pixelkollaboration.

Durch den Dortmunder Anteil an der Modulproduktion und -charakterisierung wurde ermöglicht, die Herstellung der von den deutschen Gruppen zu fertigenden Module ab dem Ende der Entwicklung bis zum Einbau in den ATLAS-Detektor zu gewährleisten.

Das Kapitel 1 beschreibt den Beschleuniger LHC, den ATLAS-Detektor mit allen Subdetektoren und dem Triggersystem. Kapitel 2 erläutert die Eigenschaften von Silizium als Detektormaterial und Kapitel 3 geht auf den Pixeldetektor mit dem Sensor und dessen Readoutsystem ein. Kapitel 4 dokumentiert die Modulfertigung und die Testschritte der gefertigten Module. Diese Testdaten werden in Kapitel 5 analysiert. Die Daten einer „cross calibration“, d.h. der Vergleich der Meßdaten eines Modul an verschiedenen Meßorten, beschreibt das 6. Kapitel. Kapitel 7 erläutert das Testbeamsetup der Kollaboration am CERN und analysiert die dort gewonnen Daten. Eine abschließende Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse erfolgt am Ende der Arbeit.

Kapitel 1

Der LHC und das ATLAS-Experiment mit seinen Subdetektoren

1.1 Der LHC

Der LHC wird gegenwärtig im ehemaligen LEP-Tunnel am CERN gebaut. Hierbei handelt es sich um einen 27 km Umfang messenden p-p Speicherring. Dieser Ring liegt zwischen 45 und 175 Metern unter der Erdoberfläche. An vier Stellen im LHC-Ring, an denen die eingangs erwähnten Experimente durchgeführt werden, sollen Protonen bzw. schwere Ionen zur Kollision gebracht werden. Abb. 1.1 zeigt den LHC-Speicherring mit den vier Experimenten und den Schachtanlagen, die die unterirdischen Experimenthallen mit der Erdoberfläche verbinden.

Mit dem SPS¹ werden Protonen auf 450 GeV vorbeschleunigt und dann gegenläufig in die beiden evakuierten Strahlrohre des LHC injiziert. Der gesamte Strahlengang des LHC ist zur Bahnkrümmung mit 3696 supraleitenden Dipolmagneten und zur Strahlkorrektur 2240 ebenfalls supraleitenden Quadrupolmagneten ausgestattet, die Magnetfelder im Falle der Dipole von bis zu 8,4 T erzeugen. Der LHC beschleunigt die vom SPS injizierten Protonen auf eine maximale Schwerpunktenergie von 2,7 TeV bei einer Luminosität von $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. [GIA00] Die wichtigsten Daten des LHC stellt Tabelle 1.1 zusammen.

¹Super Proton Synchrotron

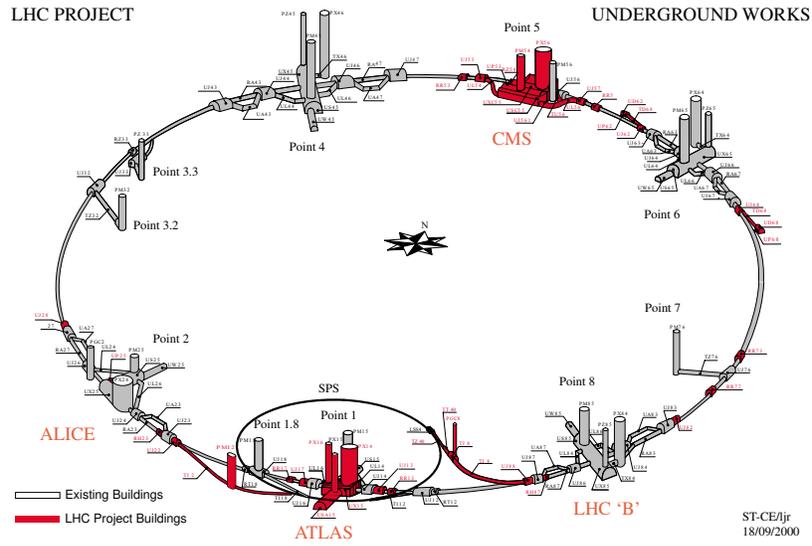


Abbildung 1.1: Der LHC-Speicherring mit den vier Experimenten ALICE, ATLAS, CMS und LHCb [CER04]

Kollisionsenergie	14 TeV
Injektionsenergie	450 GeV
Ringumfang	26,658 km
Kollisionsrate	40 MHz
zeitlicher Bunchabstand	25 ns
Protonen pro Bunch	10^{11}
Energie im Strahl	350 MW

Tabelle 1.1: Betriebsparameter des LHC nach [LHC]

1.2 Das Physikpotential des ATLAS-Detektors

Wie eingangs erwähnt, kann der ATLAS-Detektor zu verschiedenen teilchenphysikalischen Fragestellungen Beiträge leisten.

- Der bisherige Kenntnisstand zum Standardmodell konnte durch Messungen mit LEP und am Tevatron² mit einer Präzision von 10^{-3} bis 10^{-4} bestätigt

²<http://www-bdnew.fnal.gov/tevatron/>

werden [GIA00]. Jedoch ist die Generierung der Teilchenmassen unklar. Teilchenmassen können nach theoretischen Vorhersagen durch den Higgsmechanismus erzeugt werden, dies setzt allerdings die Existenz des Higgsteilchens voraus. Für dieses konnten die LEP-Experimente ein unteres Limit von 114,4 GeV angeben. Die theoretischen Vorhersagen für die Higgsmasse liegen jedoch unterhalb von 1 TeV, so daß die beiden Vielzweckexperimente am LHC im Energiebereich bis 1 TeV ein großes Entdeckungspotential für das Higgsteilchen besitzen.

- Teilchen, die von supersymmetrischen Theorien (SUSY) vorhergesagt werden, befinden sich in einem Massenbereich, der vom LHC abgedeckt wird. Sofern SUSY-Teilchen existieren, werden sie innerhalb der ATLAS-Laufzeit entdeckt und ihre Massen mit hoher Präzision bestimmt. ATLAS ist somit in der Lage SUSY-Theorien zu bestätigen oder zu widerlegen.
- Das Standardmodell bei größer werdender Higgsmasse keine präzisen Vorhersagen mehr machen. Die sogenannte **Grand Unifying Theory** (GUT) läßt schließen, daß die Kopplungskonstanten der elektromagnetischen, der schwachen und der starken Wechselwirkung bei ca. 10^{16} GeV asymptotisch zu einer Kopplungskonstante konvergieren. Sollte sich diese Theorie bestätigen, so wäre das Standardmodell eine „Niederenergieapproximation“ dieser neuen Theorie. ATLAS kann aufgrund der „neuen“ Energiebereiche zur Klärung dieses Problems beitragen [GIA00].
- Weiterhin ist die Frage von Interesse, ob Quarks und Leptonen eine Substruktur besitzen. Da das Auflösungsvermögen eines Teilchendetektors umgekehrt proportional zur Schwerpunktennergie der Teilchenkollision ist, können mit den ab 2007 am LHC erreichbaren Energien potentielle Substrukturen der gegenwärtig bekannten elementaren Teilchen entdeckt werden [GIA00].
- Die hohe Wechselwirkungsrate des LHC bedingt eine hohe Produktionsrate von b-Mesonen, W- und Z-Bosonen sowie top-Quarks. So wird eine Präzisionsmessung der Massen und Zerfallskanäle bereits bekannter Teilchen möglich [GIA00].

Die Probleme einer p-p Maschine gegenüber einer e^+e^- Maschine liegen in den nicht monoenergetischen Kollisionen, da bei hochenergetischen p-p Kollisionen nur einzelne Konstituenten der Protonen miteinander wechselwirken, die jeweils einen beliebigen Impulsbruchteil tragen. Diese Problematik ergibt einen starken Untergrund von rund tausend Spuren pro Event [GIA02], welche jeweils ca. 20-25 p-p Kollisionen haben. Dies stellt eine große Herausforderung an die Offline-

Eventrekonstruktion dar [GIA00], bietet aber den Vorteil, daß gleichzeitig verschiedene Kollisionsenergie der Konstituenten gemessen werden.

1.3 Der ATLAS-Detektor

Beim ATLAS-Detektor handelt es sich um einen Vielzweckdetektor, mit dessen Entdeckungspotential zahlreiche aktuelle Fragestellungen der Teilchenphysik untersucht werden können. Der Detektor mit seinen diversen Subdetektoren, die im folgenden im Detail erläutert werden, soll 2007 fertig gestellt werden und mit der ersten Datennahme beginnen. Der Detektor hat eine Länge von 46 m, einen Durchmesser von 22 m und eine Masse von 7000 Tonnen (vgl. Abb. 1.2) [TDR98]. Der ATLAS-Detektor besteht aus vier Subdetektorgruppen, die in einer Zwiebel-schalenstruktur symmetrisch in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung um den Vertex herumgebaut werden, wie der folgenden Abb. 1.2 zu entnehmen ist.

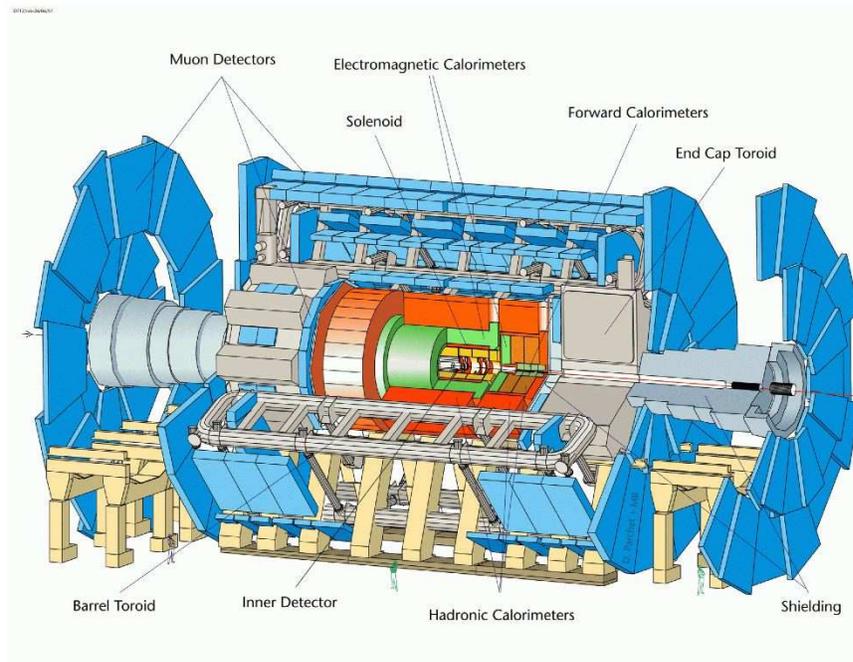


Abbildung 1.2: Der ATLAS-Detektor mit farbig unterschiedenen Subdetektoren. Die Myondetektoren sind hier blau, das hadronische Kalorimeter rot, das elektromagnetische Kalorimeter grün und der Innendetektor gelb dargestellt [TDR98].

Die blau dargestellten Komponenten sind Myonspektrometer, die im Außenbereich des Detektors montiert sind. Diese sollen Myonen erkennen, die aufgrund

ihres hohen Durchdringungsvermögens auch die äußeren Bereiche des Detektors erreichen. Weiter nach innen liegt das rot dargestellte hadronische Kalorimeter, welches wiederum das grün dargestellte elektromagnetische Kalorimeter umschließt. Mit diesem werden die Energieanteile elektromagnetischer und hadronischer Wechselwirkungsprodukte vermessen. Im vertexnahen Bereich des Detektors befindet sich der Innendetektor, dessen innerste Unterkomponente der Pixeldetektor ist. Der Innendetektor ist ein hochauflösender Spurdetektor. Dieser ist in Abb. 1.2 gelb dargestellt.

In den nachfolgenden Unterabschnitten werden diese einzelnen ATLAS-Subdetektoren von außen nach innen näher erläutert. Auf den Pixeldetektor als Hauptthema dieser Arbeit konzentriert sich Kapitel 3 ausführlich.

1.3.1 Das Myonspektrometer

Das Myonspektrometer (siehe Abb. 1.3) liegt innerhalb eines von den Toroidmagneten erzeugten Magnetfeldes von bis zu 4 T. Dieses Spektrometer soll die Spuren von Myonen rekonstruieren und über die Krümmung der Trajektorien den Impuls der Myonen bestimmen. Signale des Myonspektrometers auch in die Triggerentscheidung ein.

Für die Spurrekonstruktion besteht das Spektrometer im inneren Bereich der Endkappen (nah am Strahlrohr) aus **Cathode Strip Chambers** (CSC) mit einer Ortsauflösung von $50 \mu\text{m}$. Die übrigen Bereiche des Spektrometers bestehen aus **Monitored Drift Tubes** (MDTs), deren Ortsauflösung bei $60 \mu\text{m}$ liegt.

Für eine schnelle Triggerentscheidung sind die MDTs nicht schnell genug. Hierzu werden zusätzlich **Resistive Plate Chambers** (RPCs) in radialer Richtung und **Thin Gap Chambers** (TGCs) im Vorwärtsbereich verwendet, die ähnlich wie die CSCs hohe Trefferraten verarbeiten können [TDR98].

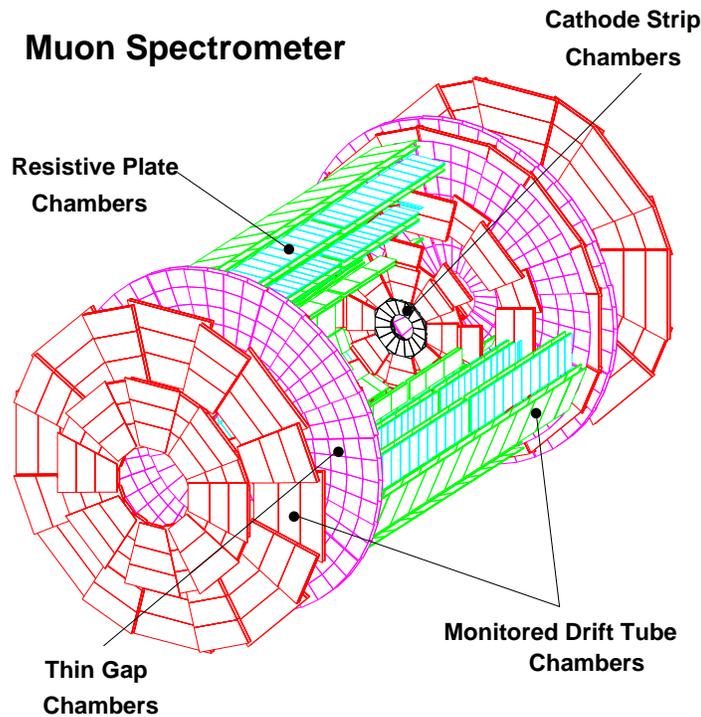


Abbildung 1.3: Das Myonspektrometer und seine Komponenten (CSC, RPC, MDT und TGC) [CER04].

1.3.2 Das Kalorimetersystem

Das Kalorimetersystem des ATLAS-Detektors besteht aus dem hadronischen Kalorimeter und dem elektromagnetischen Kalorimeter (EM). Das EM-Kalorimeter ist ein Blei-Flüssig-Argon Kalorimeter, d.h. Blei wird als Absorbermaterial, Argon als Detektormaterial verwendet. Es ist unterteilt in einen „barrel part“ und zwei radförmige „end caps“. Das EM-Kalorimeter wurde unter den folgenden Gesichtspunkten entworfen [CAL97]:

- Abdeckung des Rapiditätsbereich bis zu $\eta=5$
- Linearität besser als 0,5 % im Energiebereich bis zu 300 GeV
- gute Energieauflösung
- Elektronenrekonstruktion über den kompletten Energiebereich
- Photon-Jet- und Elektron-Jet-Trennung

Das hadronische Kalorimeter verwendet zwei unterschiedliche Techniken für verschiedene Rapiditätsbereiche. Für den Barrel- und Extended-Barrelbereich kommen Eisen-Szintillator-Tiles³ (TileCal) zum Einsatz, während der Endkappenbereich ebenfalls von einem Flüssig-Argon -Kalorimeter abgedeckt wird. Das TileCal verwendet Eisen als Absorbermaterial und Kunststoffszintillatoren als aktives Detektormaterial. Die wichtigsten Designparameter des hadronischen Kalorimeters sind [CAL97]:

- Abdeckung des Rapiditätsbereich bis zu $\eta=5$
- Linearität besser als 2 % für den Energiebereich bis zu 4 TeV
- gute Energieauflösung
- Jet-Identifizierung und Jet-Messungen
- Jet-Massen Rekonstruktion
- „missing momentum“ Messung

Beide Kalorimetersystemkomponenten haben aufgrund der verwendeten Absorbermaterialien eine Gesamtmasse von ca. 4000 Tonnen. Somit stellen sie den größten Massenbeitrag zum ATLAS-Detektor dar. Eine Übersicht über die Anordnung der Kalorimeter zeigt Abb. 1.4 [CAL97]. In gelb sind die EM-Kalorimeter in Flüssig-Argon-Technik und in rot die hadronischen Flüssig-Argon-Kalorimeter dargestellt. Das hadronische Eisen-Szintillator-Kalorimeter ist im Barrel-Bereich weiß mit roter Umrandung eingezeichnet.

³engl. Kachel

ATLAS Calorimetry (Geant)

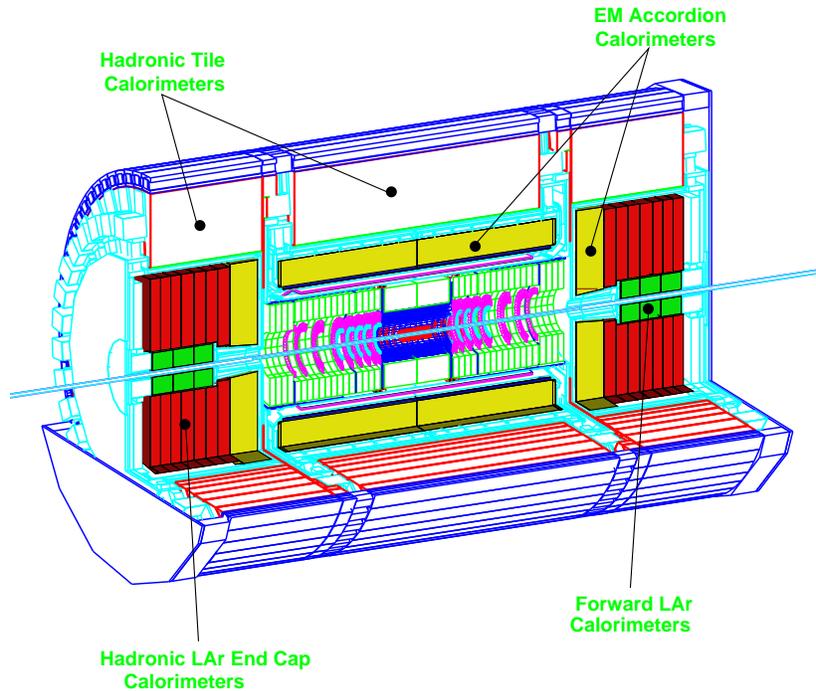


Abbildung 1.4: Übersicht über die Kalorimetersysteme [CER04]

1.3.3 Der Innendetektor

Der Innendetektor ist der wichtigste spurbestimmende Subdetektor des ATLAS-Detektors. Er ist in einer zylindrischen Geometrie am Vertexpunkt um die Strahlröhre vorgesehen. Der Innendetektor besteht aus drei Unterkomponenten, dem **T**ransition **R**adiation **T**racker⁴ (TRT), dem **S**emiconductor **T**racker (SCT) und dem Pixeldetektor (vgl. Abb. 1.5). Der TRT und der SCT werden in diesem Abschnitt näher erläutert. Kapitel 3 wird sich eingehend mit dem Pixeldetektor beschäftigen, so daß an dieser Stelle lediglich darauf verwiesen wird.

⁴Übergangstrahlungsdetektor

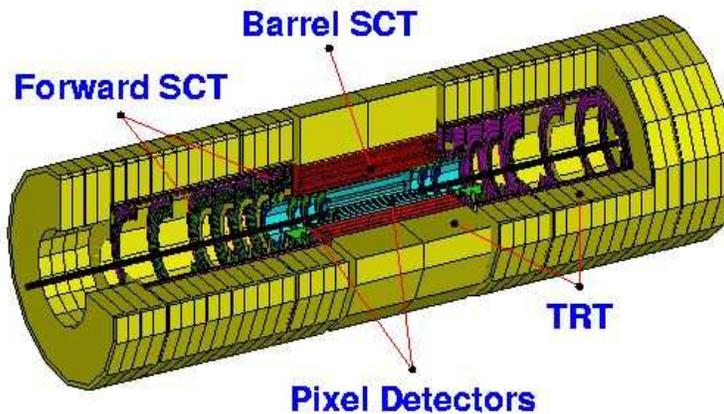


Abbildung 1.5: Schematische Darstellung des Innendetektors, von außen nach innen der TRT, SCT und der Pixeldetektor koaxial um das Strahlrohr [CER04]

Der Transition Radiation Tracker (TRT)

Der TRT besteht aus 50000 xenongefüllten Straw Tubes⁵ im Barrel-Bereich und 320000 ebenfalls xenongefüllten Straw Tubes im End-Cap-Bereich in scheibenförmiger Anordnung. Jedes Straw Tube beinhaltet einen Gold-Wolfram-Draht als Elektrode, um erzeugte Ladungen zu sammeln und nachzuweisen. Für den Ladungsnachweis wird der Übergangsstrahlungseffekt verwendet: Bewegte Ladungen in einem inhomogenen Dielektrikum, das hier durch eine PE-Folie realisiert wird, geben weiche Röntgenstrahlung ab, die dann wiederum über eine Ladungsdeposition im Xenongasgemisch nachgewiesen werden kann. Der geringe Tubedurchmesser von 4 mm bedingt auch im vertexnahen Einsatz eine hinreichend kleine Trefferrate pro Kanal, so daß der Ausleseteil eines TRT-Kanals nicht ratenlimitiert ist.

Der Semiconductor Tracker (SCT)

Der SCT ist im Gegensatz zum TRT ein siliziumbasierter Detektor. Dieser Streifen-detektor besteht aus 4 koaxialen, doppelseitigen Barrellagen (das bedeutet, er trägt vier Raumpunkte pro Teilchendurchgang zur Spurrekonstruktion bei) im mittleren Bereich und 9 Disks auf jeder Seite im Vorwärtsbereich. Die Präzision einer Spur liegt bei $16 \mu\text{m}$ in radialer- und $580 \mu\text{m}$ in z-Richtung. SCT und TRT werden bei einer Temperatur von unter -5°C betrieben. Um die Wärmemenge

⁵engl.: Strohalm

von mehreren kW abzuführen, wird jeweils eine Verdampfungskühlung verwendet [WIT99].

1.3.4 Das Triggersystem des ATLAS-Detektors

Der ATLAS-Detektor benötigt aufgrund seiner hohen Taktrate von 40 MHz mit jeweils ca. 20-25 p-p Kollisionen pro bunch crossing ein hocheffizientes und schnelles Triggersystem, das die gesamte Wechselwirkungsrate von ca. 1 GHz auf verwertbare 200 Hz reduziert, die dann auf Speichermedien gesichert werden. Abb. 1.6 stellt die 3-stufige Eventselektion schematisch dar.

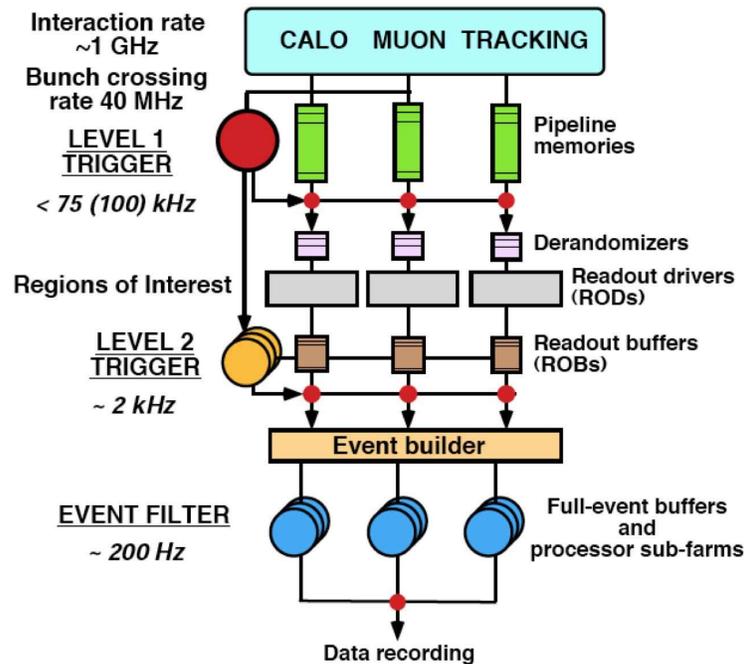


Abbildung 1.6: Schematische Darstellung des dreistufigen Triggersystems des ATLAS-Detektors [ELS03].

Der Level-1 (LVL1) Trigger ist ein Hardwaretrigger und verwendet Daten des Kalorimetersystems und des Myonenspektrometers. In einer Vorselektion der Daten werden nicht einzelne, interessante Ereignisse herausgefiltert, sondern **Regions of Interest (RoI)** um ein potentiell interessantes Ereignis definiert. Diese Vorselektion reduziert die Ereignisrate auf ca. 75 kHz und geschieht innerhalb von $2.5 \mu\text{s}$. Die Gesamtdaten des entsprechenden Ereignisses werden in Pipeline memories zwischengespeichert. Der Level-2 (LVL2) Trigger basiert auf Softwarealgorithmen

und benutzt dafür Prozessorfarmen. Selektionsalgorithmen verwerfen uninteressante Ereignisse, aufbauend auf den Daten, die die erste Triggerstufe innerhalb der RoI vorselektiert hat. Rechnercluster reduzieren innerhalb von höchstens 10 ms die Ereignisrate auf ca. 2kHz. Die dritte Stufe des Triggersystems ist der Event Filter (EF). Der EF rekonstruiert mit Offlinealgorithmen die Ereignisse aus dem gesamten Datenbereich des Detektors, im Gegensatz zum LVL2 inklusive aller Kalibrationsdaten. Diese Rekonstruktion benötigt einige Sekunden und reduziert die Ereignisrate auf ca. 200 Hz [ELS03].

Kapitel 2

Silizium als Detektormaterial

Dieses Kapitel beschreibt die Funktionsweise von Silizium als Detektormaterial in hohen Strahlungsfeldern und geht dann weiter auf das Design des Siliziums und des Pixeldetektors ein.

Das Prinzip, das es ermöglicht, Silizium zum Nachweis von Teilchenstrahlung zu nutzen, ist die Erzeugung von Ladungsträgerpaaren beim Durchgang eines Teilchens durch Siliziumschichten. Halbleiterdetektoren aus Silizium eignen sich besonders gut für eine solche Aufgabe, da die Mikroelektronik ausgereifte Verfahren zur preiswerten Erzeugung von hochreinen Substraten mit Strukturen im Submikrometerbereich entwickelt hat.

2.1 Energieverlust in Materie

Geladene Teilchen, die Materie passieren, können auf unterschiedliche Arten mit der Materie in Wechselwirkung treten und Energie abgeben. Die häufigsten Möglichkeiten sind inelastische Kollisionen mit atomaren Elektronen und elastische Streuung an Kernen. Weitere Effekte sind der Cerenkov-Effekt, Kernreaktionen und Bremsstrahlung, die aber bei der Wechselwirkung der passierenden Teilchen eine untergeordnete Rolle spielen. Der mittlere Energieverlust pro Streckeneinheit Absorbermaterial wird durch die Bethe-Bloch-Formel beschrieben [LEO87].

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_0 r_e^2 m_0 c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (2.1)$$

- z – Teilchenladung in Elementarladungen
- Z, A – Atommasse und Ordnungszahl des Absorbermaterials
- m_0 – Elektronenmasse

- r_e – Klassischer Elektronenradius
- N_0 – Avogadrokonstante
- I – Ionisationspotential des Absorbers
 $I \approx 16 Z^{0.9} \text{ eV}$
- δ – Korrekturterm für Dichteeffekt

Die folgende Abbildung 2.1 zeigt exemplarisch den Energieverlust von Pionen in Silizium als Funktion der Pionenenergie. Die durchgezogene Linie zeigt den Energieverlust mit Schalen- und Dichtekorrektur, die gestrichelte Linie zeigt den Energieverlust ohne diese Korrekturterme. Das Minimum beider Kurven liegt bei ca. dem dreifachen der Teilchenmasse. Teilchen dieser Energie werden als MIP¹ bezeichnet. Die Ladungsdepositionen eines MIPs sind somit die Mindestladungsdepositionen eines relativistischen Teilchens.

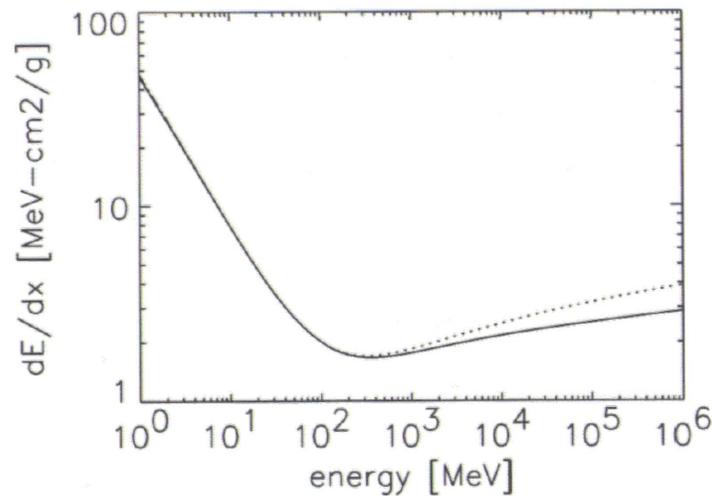


Abbildung 2.1: Darstellung der Bethe-Bloch-Formel mit (durchgezogen) und ohne (gestrichelt) Schalen- und Dichtekorrektur für Pionen [LUT99]

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Energiedeposition von MIPs in dicken Siliziumabsorbern ist gaußverteilt, da das Teilchen hinreichend viele Kollisionspartner entlang seiner Wegstrecke hat. Für dünne Absorber führt die geringe Wahrscheinlichkeit von einzelnen hochenergetischen Kollisionen zu einer asymmetrischen Verschiebung der ursprünglichen Gaußverteilung [LEO87]. Die folgende Abbildung 2.2 zeigt die Energieverlustverteilung für ein MIP in $250\mu\text{m}$ Silizium, wie es auch im

¹Minimum ionizing particle

Pixeldetektor des ATLAS-Experiments Einsatz findet. Kapitel 7 wird das Ladungsverlustverhalten noch eingehend diskutiert.

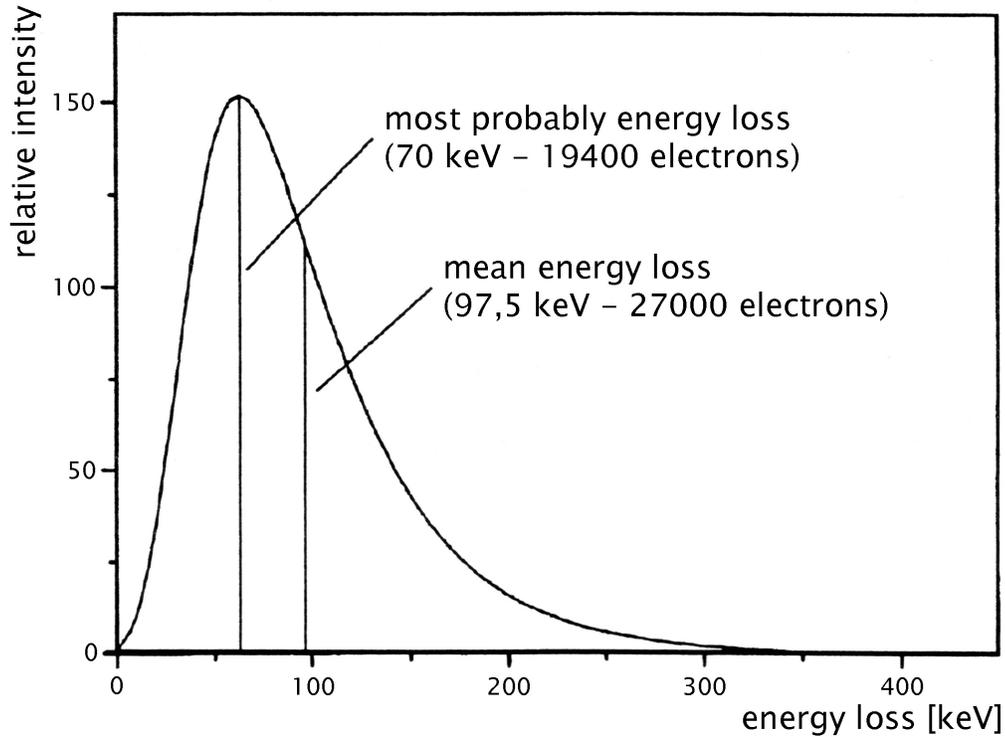


Abbildung 2.2: Energieverlustverteilungsfunktion für 250 μm Silizium [DOB04]

Gammaquanten hingegen wechselwirken über andere physikalische Mechanismen mit dem Absorbermaterial. Dies sind der Photoeffekt, der Comptoneffekt und die Paarbildung. Beim Photoeffekt löst das Photon ein gebundenes Elektron aus seiner Position und überträgt die Photonenenergie, wobei das Photon wiederum einen Teil der Energie davonträgt und ggf. aus dem Kristall entkommt.

Die Schwelle zur Paarbildung liegt bei der doppelten Elektronenmasse. Photonen mit einer Energie größer als die doppelte Elektronenmasse können bei Kollision mit einem Kern ein Elektron/Positronpaar erzeugen. Die Annihilation des Positrons mit Elektronen des Siliziums kann dann nachgewiesen werden.

Beim Comptoneffekt wechselwirken Gammaquanten mit freien Elektronen. Völlig freie Elektronen gibt es innerhalb eines Kristalls nicht, aber Valenzelektronen mit einer Bindungsenergie im eV-Bereich kann man bei hinreichend hohen Photonenenergien als näherungsweise frei annehmen. Durch den Comptoneffekt wird nur ein Teil der Energie des Photons im Silizium deponiert, da das neu entstandene Photon mit endlicher Wahrscheinlichkeit aus dem Silizium entkommt. Durch

Photoeffekt und Paarbildung wird jeweils die gesamte Energie des Photons auf ein Elektron (/Positron) übertragen. Diese wird dann wiederum durch elastische Stöße im Kristall übertragen.

Die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit von Photonen mit Materie ist eine Funktion der Schichtdicke des Absorbers. Die Abhängigkeit der Intensität von der Dicke (x) des Absorbers läßt sich durch eine Exponentialfunktion beschreiben mit μ als Absorptionskoeffizient.

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (2.2)$$

Im Photonenenergiebereich von ca. 100 keV bis in den TeV Bereich hat der Pixelsensor eine Wechselwirkungswahrscheinlichkeit von ca. 0,02 [PDG02]. Dies bedeutet eine hohe Anforderung an die Intensität von Kalibrierungsquellen für das Modultesten, das in Kapitel 4.2 näher beschrieben wird. Im ATLAS-Detektor wird der Sensor ebenfalls nur eine „Effizienz“ von 0,02 für den Photonennachweis haben, so daß dieser annähernd transparent für diese Teilchensorte ist. Der Pixeldetektor ist daher ein reiner „Charged Particle Detector“.

2.2 Leitfähigkeit von Halbleitern

Für die elektrischen Eigenschaften eines Materials sind diejenigen Elektronen verantwortlich, die sich energetisch im Valenz- oder im Leitungsband befinden. Um zur Leitfähigkeit eines Stoffes beitragen zu können, müssen diese Elektronen ins Leitungsband übergehen, das energetisch über dem Valenzband liegt oder mit diesem eine Überlappung hat. Die energetische Lücke zwischen beiden Bändern definiert die Leitungseigenschaften des Stoffes. Sofern die Bandlücke größer ist als einige eV, handelt es sich um einen Isolator. Kommt es zu einer Überlappung der Bänder, so handelt es sich um ein Metall. Liegt die Bandlücke im Bereich der thermischen Anregung (bis zu 2 eV), gehört der Stoff zur Gruppe der Halbleiter. Im Gegensatz zu Metallen, bei denen nur Elektronen zur Leitung beitragen, verhalten sich die Elektronenfehlstellen (Löcher) im Valenzband wie positive Ladungsträger und tragen ebenfalls zur Leitung bei.

2.3 Dotierung von Halbleitern

Damit Elektronen das Valenzband des Halbleitermaterials überwinden können, werden Atome mit mehr (Donator oder n-Dotierung) oder weniger (Akzeptor oder p-Dotierung) Valenzelektronen in den Kristall eingebracht. Die Donatoratome besitzen ein für die Bindung nicht nötiges Elektron, das deshalb leicht in das Leitungsband abgegeben werden kann. Akzeptoratome können hingegen ein

Elektron für die Vervollständigung der Bindung aus dem Valenzband aufnehmen und generieren dadurch Löcher im Silizium. Dies führt zu freibeweglichen negativen Ladungsträgern im Leitungsband und zu freien positiven Ladungsträgern im Valenzband.

Das Bändermodell eines Halbleiters mit zusätzlich eingebrachten Atomen als Dotierungsstellen veranschaulicht die folgende Abbildung 2.3. Die zusätzlichen Niveaus liegen zwischen Valenz- und Leitungsband.

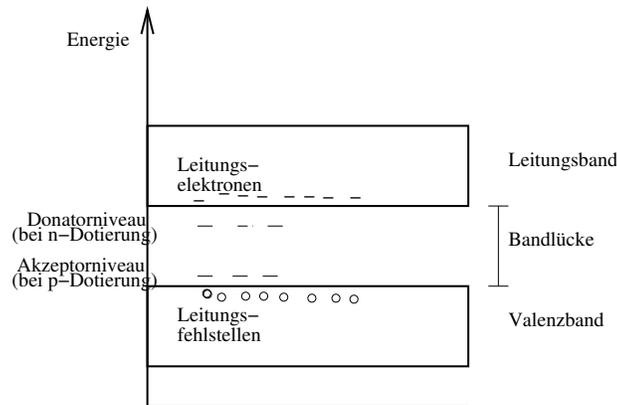


Abbildung 2.3: Bandniveauschema eines Halbleiters mit positiven Ladungsträgern im Valenzband und negativen Ladungsträgern im Leitungsband, im Zwischenraum von Valenz- und Leitungsband (verbotene Zone) liegen die Niveaus der Dotierungsstellen

Die Besetzungswahrscheinlichkeit des Leitungsbandes und damit die Leitfähigkeit des Halbleiters ist eine Funktion der Temperatur und der Bandlücke, so daß ein dotierter Halbleiter schon bei Raumtemperatur eine erhebliche Leitfähigkeit entwickeln kann.

Symmetrischer pn-Übergang

Haben ein p- und ein n-dotierte Siliziumbereich eine gemeinsame Grenzfläche, so nennt man dies einen pn-Übergang.

Die beweglichen Ladungsträger können in den jeweils anders dotierten Bereich eindringen und dort mit einem Ladungsträger anderen Vorzeichens rekombinieren. Diese Ladungsbewegung nennt man Diffusionsstrom. Die ortsfesten Ladungsträger erzeugen ihrerseits ein elektrisches Feld, das attraktiv auf die freien Ladungsträger wirkt und dem Diffusionsstrom entgegengesetzt ist. Diese Ladungsbewegung ist der Feldstrom. Beide Ströme kompensieren sich, so daß eine an Ladungsträgern

verarmte Zone an der Grenzfläche zwischen den unterschiedlich dotierten Siliziumzonen entsteht. Die folgende Abbildung 2.4 zeigt schematisch die ortsfesten Ionen im Kristall und die an beweglichen Ladungsträgern verarmte Zone im Bereich der Verbindung der beiden Dotierungszonen sowie die daraus resultierende Ladungsdichte und das zugehörige elektrische Feld.

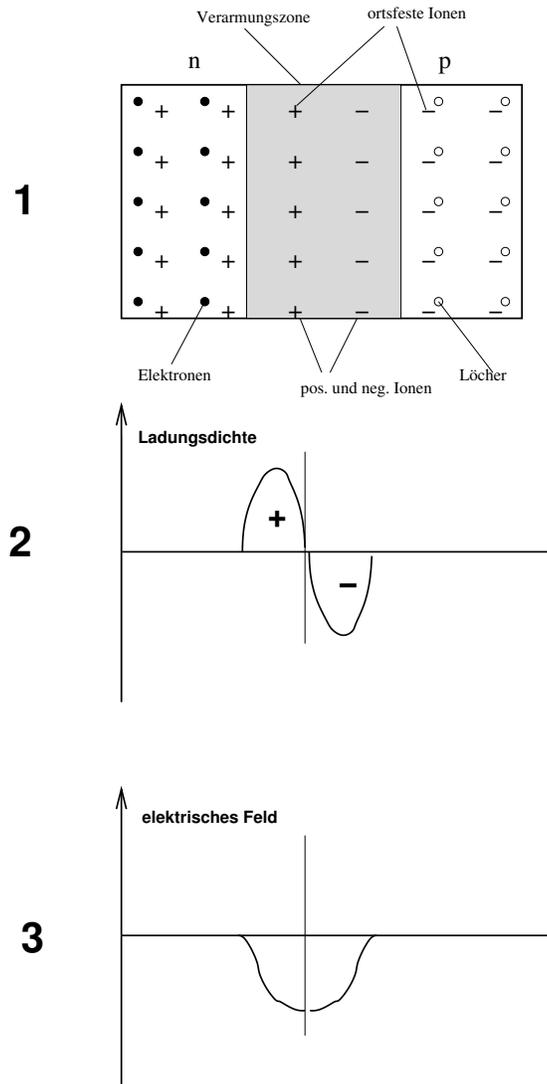


Abbildung 2.4: (1) Ladungsträgerverarmte Zone innerhalb eines pn-Übergangs mit (2) Verteilung der Ladungsdichte und (3) dem entsprechenden elektrischen Feld

Durch Anlegen einer äußeren Spannung mit der positiven Elektrode an der n-Seite und der negativen Elektrode an der p-Seite kann die Verarmungszone bis unmittel-

telbar an die Elektroden vergrößert werden.

Teilchen, die das an Ladungsträgern verarmte Volumen passieren, generieren durch o.g. Stöße Ladungsträgerpaare, die im elektrischen Feld der angelegten äußeren Spannung zu den Elektroden driften, ohne daß die Ladungen rekombinieren. So wird ein elektronisches Signal generiert, das einen Teilchendurchgang durch die Siliziumschicht anzeigt. Im Falle von ungeschädigtem Silizium ist die gesammelte Ladung proportional zur deponierten Energie. Bei strahlengeschädigtem Silizium können Ladungsträger von Störstellen aufgenommen werden. Diesen Vorgang erläutert Abschnitt 2.6 detaillierter.

Asymmetrischer pn-Übergang

Sofern die Konzentrationen der beiden Dotierungen deutlich unterschiedlich sind, bezeichnet man diesen pn-Übergang als asymmetrisch. In diesem Fall wächst Verarmungszone von der Grenzschicht in den niederdotierten Bereich hinein.

Die Depletionsspannung, ab der das Silizium vollständig verarmt ist (engl. depletion voltage U_{depl}) berechnet sich durch

$$U_{depl} = \frac{eN_{eff}}{2\varepsilon_0\varepsilon_{Si}} \cdot d^2, \quad (2.3)$$

wobei N_{eff} die effektive Ladungsträgerkonzentration ist, d die Sensordicke und ε_0 und ε_{Si} dielektrische Konstanten.

2.4 Ortsauflösende Siliziumdetektoren

Um neben der Energieinformation auch noch eine Ortsinformation durch einen Siliziumteilchendetektor zu erhalten, muß die Siliziumoberfläche segmentiert werden. Dies kann unter anderem in einem Streifendesign oder in einem Pixeldesign erfolgen. Pixel liefern eine zweidimensionale Ortsinformation für ein Teilchen, das innerhalb ihres sensitiven Volumens detektiert wurde. Streifen-zähler können zunächst nur eine Koordinate liefern. Eine Anordnung von zwei Streifen-zählern, deren Streifen sich kreuzen, liefern ebenfalls eine zweidimensionale Ortsinformation. Deren Eindeutigkeit wird durch die Flußrate limitiert. Wie solche Ghost-hits entstehen können veranschaulicht Abb. 2.5: Wenn zwei Teilchendurchgänge schneller aufeinander folgen als der Detektor diese zeitlich auflösen kann, sind Zeilen und Spaltenkoordinate nicht eindeutig zuzuordnen.

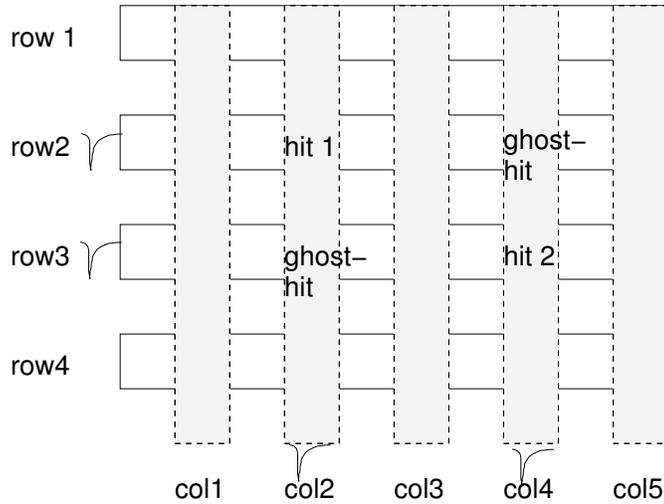


Abbildung 2.5: Ghosthits zweier orthogonaler Streifenzähler: Für zwei hits gibt es zwei mögliche Koordinatenpaare

Die Auslese von Streifenzählern erfolgt jeweils einzeln an den Enden der Streifen. Pixel hingegen müssen einzeln ausgelesen werden, was nicht an den Seiten einer Struktur möglich ist, neigen aber nicht zu Fehlzuordnungen bei hohen Teilchenraten wie die Streifenzähler. Das Design eines Siliziumpixeldetektors wird im folgenden Kapitel 3.1 anhand des Designs des ATLAS-Pixeldetektors beschrieben.

2.5 Ortsauflösungsvermögen eines strukturierten Siliziumdetektors

Das Auflösungsvermögen eines strukturierten Halbleiters hängt bei Annahme einer digitalen Auslese, die nur die Ortsinformation einzelner Kanäle verwendet, nur von den Dimensionen der Struktur ab. Bei einer wahrscheinlich anzunehmenden Gleichverteilung der Treffer innerhalb der Streifen oder Pixel ist die Ortsauflösung gleich der Standardabweichung einer Kastenverteilung mit der Struktur als Kastenbreite:

$$\sigma_n = \frac{b}{\sqrt{12}} \quad \text{mit } b \text{ als Pixelbreite} \quad (2.4)$$

Sofern nur ein Pixel oder Streifen den Treffer detektiert, ist die Ortsauflösung durch die o.g. Beziehung vorgegeben. Sofern die erzeugte Ladung auf mehrere

Pixel oder Streifen verteilt ist, können, mit einer größeren Präzision, ladungsgewichtete Koordinaten berechnet werden. Die Module (und somit auch die Sensoren) des Pixeldetektors sind unter einem Winkel von 20° gegenüber der idealen Mantelfläche der Barrelgeometrie des Detektors geneigt [OLC03]. Der Winkel mit dem die erzeugten Ladungsträger gegenüber den E-Feldlinien durch den Sensor driften, wird durch den Lorentzwinkel verändert. Driftende Ladungsträger werden aufgrund des Magnetfeldes rechtwinklig zur ihre Bewegungsrichtung abgelenkt. Nach [LAR02] beträgt dieser Winkel -14° für unbestrahlte Sensoren und -4° für bestrahlte Sensoren. Der Lorentzwinkel verringert effektiv den Winkel der Ladungsträgerdriftstrecke gegenüber der Flächennormalen. Abb. 2.6 zeigt, wie die Ladungsträger, die in unterschiedlichen Tiefen erzeugt wurden, bei 0° Eingangswinkel unterschiedliche Pixel treffen, und somit die Ortspräzision des Sensors verringern würden, wenn der geneigte Einbau der Module dies nicht kompensieren würde.

Ein weiterer Effekt der geneigten Modulmontage ist, daß ein großer Anteil der Trajektorien die sensitiven Volumina zweier Pixel durchquert. Dies erlaubt eine ladungsgewichtete Spurrekonstruktion, die die Ortsauflösung verbessert.

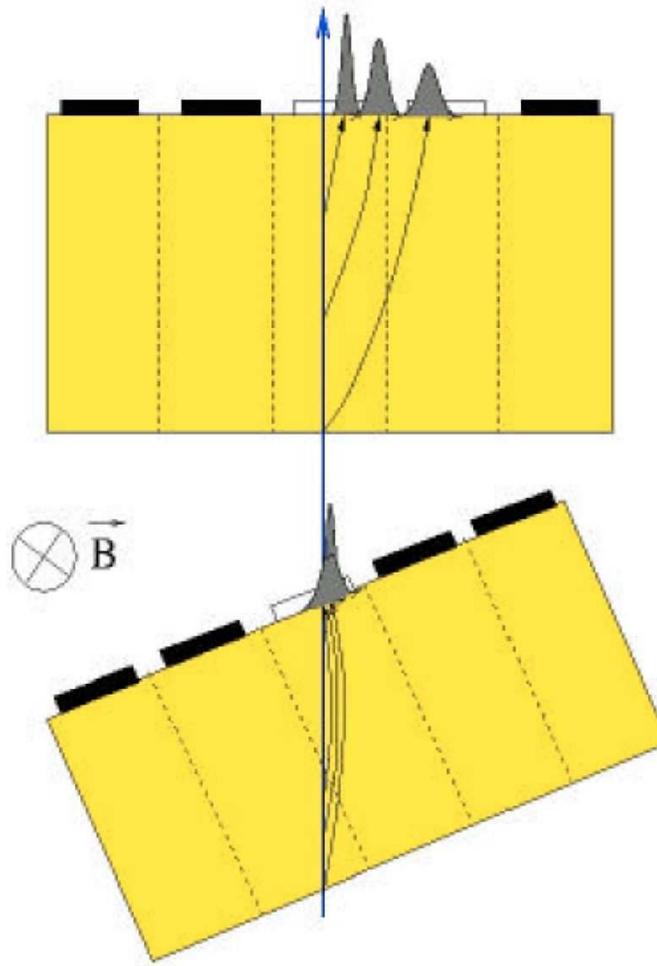


Abbildung 2.6: Einfluß des Lorentzwinkels auf die Ortsauflösung bei ebener und geneigter Montage von Modulen [KRA02].

2.6 Strahlenschäden in Silizium

Im Silizium wechselwirken Teilchen durch zwei prinzipiell unterschiedliche Prozesse. Zum einen ist dies der Energieverlust durch Ionisation. Hierbei handelt es sich um den oben beschriebenen Effekt der Ladungsträgerpaargenerierung. Zum anderen ist dies der nichtionisierende Energieverlust, der sogenannte NIEL². Kollisionen der Strahlteilchen mit Gitteratomen (PKAs³) können diese Atome, sofern

²Non Ionizing Energy Loss

³Primary Knock on Atom

der Energieübertrag größer ist als die Bindungsenergie des Atoms, aus seinem Gitterplatz lösen. PKAs mit hohem Energieübertrag können wiederum andere Gitteratome aus deren Gitterplätzen lösen und ganze Defektcluster bilden. Ein aus dem Kristallgitter gelöstes PKA hinterläßt einen freien Gitterplatz oder kann einen Zwischengitterplatz einnehmen. Nach hinreichend langer Zeit heben solche Schäden sich wieder gegenseitig auf. Natürliche Kristalldefekte oder Verunreinigungen können allerdings die Ausheilung von Gitterplatzverschiebungen verhindern und so zu dauerhaften Strahlenschäden führen [WUN92]. Die Strahlenschädigung hängt von der Teilchenenergie und der Teilchensorte ab und wird deswegen üblicherweise in äquivalenten Einheiten von der Schädigung, die 1 MeV energetisches Neutron hervorruft ($\text{MeV n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$), angegeben. Die wichtigsten Auswirkungen der Strahlenschädigung werden in den folgenden Unterabschnitten erläutert.

2.6.1 Dotierungsveränderung

Dauerhafte Kristalldefekte bilden durch die Verunreinigung z.B. mit Kohlenstoff- oder Sauerstoffatomen neue Donator- und Akzeptorstellen, während zeitgleich mit zunehmender Strahlenschädigung die zur Dotierung des Siliziums eingebrachten Fremdatome ihre elektrische Wirkung als Donator- oder Akzeptorniveau verlieren. Da die effektive Konzentration die Differenz von Donatoren und Akzeptoren darstellt, ergibt sich folgender Zusammenhang [WUN92]:

$$N_{eff}(\phi) = N_{D,0}e^{-c_D\phi} - N_{A,0}e^{-c_A\phi} + b_D\phi - b_A\phi \quad (2.5)$$

N_{eff}	–	effektive Dotierungskonzentration	
$N_{D,0}$	–	Donatorkonzentration vor Bestrahlung	
$N_{A,0}$	–	Akzeptorkonzentration vor Bestrahlung	
c_D, c_A, b_D, b_A	–	experimentelle Konstanten	
ϕ	–	Fluenz	(2.6)

Für n-dotiertes Silizium zeigt sich experimentell, daß sich die Akzeptorkonzentration nur geringfügig ändert, die Donatorkonzentration aber stark zunimmt. Bei großen Fluenzen kann n-dotiertes Silizium effektiv zu p-dotiertem Silizium werden. Die Auswirkungen dieses Vorgangs auf das Design des Sensors werden in Kapitel 3.1 diskutiert.

2.6.2 Erhöhung des Leckstroms

Bei bestrahltem Silizium ist ein Anwachsen des Sperrstromes eines in Sperrrichtung betriebenen Sensors zu beobachten, der sich proportional zur Fluenz und

zum depletierten Volumen verhält. Diesen Zusammenhang stellt die folgende Beziehung dar,

$$\Delta I = \alpha \phi V \quad (2.7)$$

wobei α die Proportionalitätskonstante zwischen Leckstromänderung und Fluenz ist. Die Erhöhung des Leckstroms ist durch die zusätzlichen Donator- und Akzeptorniveaus begründet, die jeweils Löcher in das Valenzband oder Elektronen in das Leitungsband emittieren können. Für den Betrieb eines bestrahlten Sensors bedeutet dieser erhöhte Leckstrom ein erhöhtes elektronisches Rauschen der Auslesekanäle.

2.6.3 Einfluß auf die Ladungssammlung

Störstellen im Kristall haben die Eigenschaft, Ladungsträger, die von einem passierenden Teilchen im Silizium erzeugt werden, mit einer endlichen Wahrscheinlichkeit aufzunehmen und nach einer Verweildauer (Trappingzeitkonstante) wieder als frei bewegliche Ladungsträger zu entlassen. Diese Zeitkonstanten sind groß gegenüber den Ladungssammlungszeiten der Ausleseelektronik von Siliziumdetektoren, so daß diese Ladungsträger der Datennahme nicht zugänglich sind und das gemessene Signal um diesen Anteil verringert wird. Detaillierte Untersuchungen zu Trappingzeitkonstanten bei hohen Fluenzen sind [KRA04] zu entnehmen. Diese mit fortschreitender Schädigung des Siliziums abnehmende, gemessene Ladungsmenge muß durch wiederholte Kalibrierungen und Variationen der Eingangsschwelle berücksichtigt werden.

Kapitel 3

Der Pixeldetektor

3.1 Das Designkonzept des Pixeldetektors

Der Pixeldetektor bildet innerhalb des TRT und des SCT die innerste der drei Innendetektorkomponenten. Er besteht aus drei zylindrischen Pixellagen im Barrelbereich und je drei Disks in den Vorwärtsbereichen. Abb. 3.1 zeigt die drei Lagen und die sechs Disks inklusive der Supportstrukturen und Kühlleitungen. Bei einer Designluminosität von $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ über einen Betriebszeitraum von 10 Jahren erfährt der Pixeldetektor eine Strahlenbelastung von 500 kG oder $1 \cdot 10^{15} \text{ MeV} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$.

Beim ATLAS-Pixeldetektor handelt es sich um einen hybriden Pixeldetektor, wobei als Detektormaterial Silizium (vgl. Kap. 2) verwendet wird. Jede Pixelzelle des Siliziumsensors ist mit einer eigenen Auslesezone eines Elektronikchips (Front End (FE) Chip) verbunden. Die Kontaktierung geschieht mittels Metallkugeln (Bumpbonds). Durch einen photolithographischen Prozess werden je nach Hersteller Blei-Zinn- bzw. Indiumschichten auf die entsprechenden Stellen des Sensors in einem Maskenschritt aufgebracht. In einem folgenden Erwärmungsschritt bei Temperaturen von 240° C bzw. 90° C bilden sich aus den o.g. Metallschichten aufgrund der Oberflächenspannung Kugelgeometrien. Der FE-Chip wird dann mit einem Anpreßdruck von 37 N pro Chip im Falle der Blei/Zinn-Bumps und 7,4 N pro Chip im Falle der Indiumbumps auf dem Sensor positioniert. So ist jeder Kanal des Sensors mit einem Auslesekanal des FE-Chips verbunden. Abb. 3.10 zeigt schematisch die Anordnung von Sensor, Bumpbonds und FE-Chips.

Eine detailliertere Beschreibung des Verfahrens liefert [DOB04].

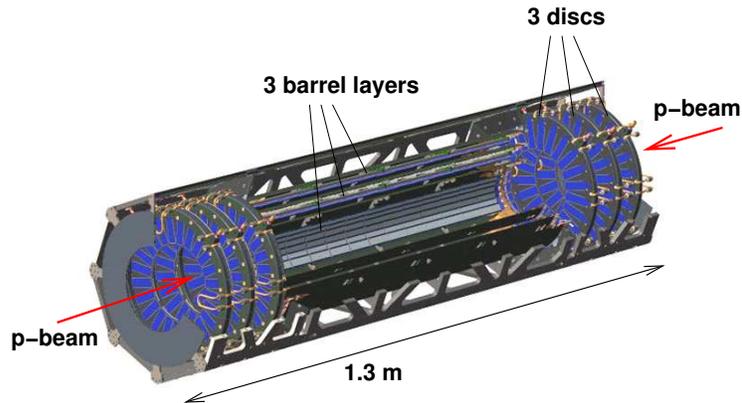


Abbildung 3.1: Der dreilagige Pixeldetektor mit jeweils drei Disks im Vorwärtsbereich

3.2 Anforderungen an den Pixeldetektor

An den innersten Subdetektor des ATLAS-Detektors werden wichtige Anforderungen für die Spurrekonstruktion des gesamten Detektors gestellt. [TDR98] liefert eine Aufstellung der physikalischen Anforderungen des Pixelsystems:

- exzellente Spurerkennung in hohen Strahlungsfeldern
- exzellente Auflösung der Anfangsparameter und hohe dreidimensionale Vertexfindung
- exzellente b-Mesonen-Identifizierung und Rekonstruktion

Neben den o.g. physikalischen Eigenschaften muß das komplette Pixelsystem folgende Designbedingungen erfüllen:

- drei Raumpunkte pro Teilchenspur über annähernd den gesamten Raumwinkelbereich
- kleinstmögliche Pixelgröße (gegenwärtig sind dies $50 \mu\text{m} \cdot 400 \mu\text{m}$, im ursprünglichen Design waren für die innerste der drei Lagen, der sogenannten B-Lage $50 \mu\text{m} \cdot 300 \mu\text{m}$ Pixel vorgesehen)

- minimaler Radius der B-Lage, sowie es das Vakuumstrahlrohr zuläßt
- minimaler Materialaufwand innerhalb des Detektors

3.3 Der Sensor

Die Sensoren werden aus 250 μm dicken, beidseitig prozessierten Siliziumscheiben (Wafer) gefertigt. Die später zu Modulen (siehe Kapitel 4.2) weiter zu verarbeitenden Tiles sind die drei $60,8 \cdot 16,4 \text{ mm}^2$ großen Strukturen, die in der Mitte des Fotos in Abb. 3.2 zu sehen sind.

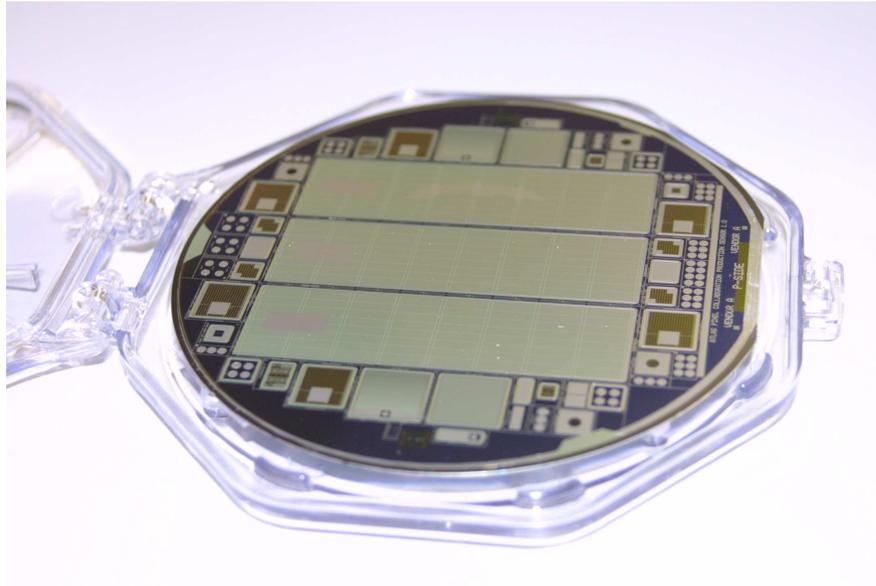


Abbildung 3.2: Foto eines Sensorwafers: In der Mitte sind die drei Sensortiles zu sehen, die zu Modulen weiterverarbeitet werden. Der Wafer befindet sich hier in einer speziellen Transportbox.

Jedes Tile besteht aus 41984 jeweils $400 \cdot 50 \mu\text{m}^2$ großen (normal pixel) und 5284 jeweils $600 \cdot 50 \mu\text{m}^2$ großen (long pixel) Pixeln. Die Longpixel decken die Spalte seitlich der FE-Chips ab. Das Auslesen der 8 Pixel breiten Spalte in der Mitte des Tiles zwischen den beiden Reihen der jeweils acht Chips wird durch eine gruppierte Auslese der betreffenden Pixel realisiert. Diese heißen „ganged“ Pixel und sind durch eine Metallisierung mit einem anderen Sensorpixel verbunden und teilen mit diesem eine Zelle des FE-Chips. Abschnitt 3.4 erläutert dies näher, Abb. 3.7 zeigt eine Darstellung der gruppierten Auslese.

Abb. 3.3 zeigt das Layout zweier „normal“ Pixel des Sensors. Beide Pixel sind mit der Rückseite zueinander dargestellt. Dort sind beide an das Biasgrid angeschlossen. Hierbei handelt es sich um eine Metallisierung, mit der alle Pixel eines Tiles zu Testzwecken gleichzeitig auf gleiches Potential zu setzen sind. Durch einen Spannungsabfall von 2 - 3 Volt Punch-Through-Voltage wird der mit der n^+ Implantation verbundene Biasdot mit der Biasgridmetallisierung verbunden und dann auf Erdpotential gesetzt und die p-Seite des Sensors unter Hochspannung. Sofern auch nur ein Pixel des Tiles Durchbrucherscheinungen zeigt, äußert sich dies in Form eines deutlich ansteigenden Leckstromes schon bei geringen Spannungen. Ein Tile mit auch nur einem durchbrechendem Pixel ist für den Detektorbetrieb nicht geeignet.

Im Falle eines defekten Bumpbonds wird der entsprechende Pixel durch das Biasgrid bis auf einige Volt Differenz, bedingt durch die Punch-Through-Voltage, weiterhin auf Erdpotential gehalten. Dies verhindert durch hohe Potentialdifferenzen und Feldstärkespitzen zwischen den Pixeln hervorgerufene Spannungsdurchbrüche.

Die Auswirkungen des Biasnetzwerkes auf die Sensorperformance dieses Designs werden in Kapitel 7 diskutiert.

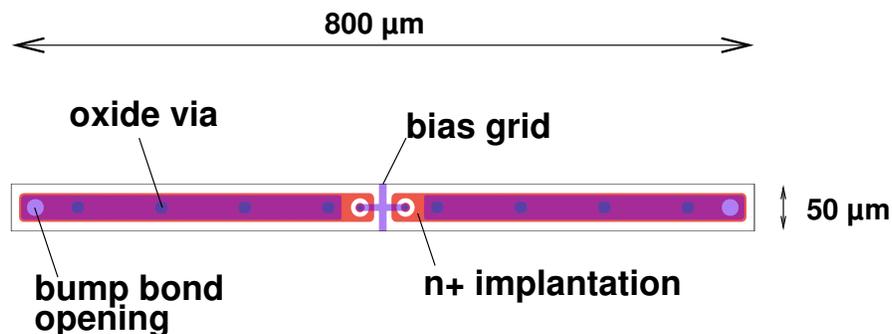


Abbildung 3.3: Layout der Pixeloberfläche dargestellt anhand zweier benachbarter „normal“ Pixel

3.3.1 Dotierungskonzepte

Prinzipiell stehen zwei Konzepte der Dotierung zur Verfügung, p^+ Implantationen in n-Substrat oder n^+ Implantationen in n-Substrat. Die p^+ Implantationen in n-Substrat haben den Vorteil, daß die Pixel schon voneinander isoliert sind, wobei n^+ -in-n-Substratpixel noch einer weiteren Isolation bedürfen, was einen weiteren Maskenschritt erforderlich macht.

Das p^+ -in-n-Pixeldesign erfordert nur eine einseitige Prozessierung, da der geer-

deten n-Rückseitenkontakt lediglich mit einer homogenen Aluminisierung versehen werden muß. Das n⁺-in-n Pixeldesign hat dementsprechend einen p-Rückseitenkontakt, der noch eine Schutzstruktur zum Potentialabbau zu den Rändern des Siliziums hin benötigt. Dennoch hat der ATLAS-Pixeldetektor ein n⁺-in-n-Design. Der Grund für diese Entscheidung soll nachfolgend erläutert werden:

Die Verarmungszone, d.h. das sensitive Volumen wächst vom pn-Übergang der Diode aus mit wachsender Biasspannung. Bestrahlung mit Hadronen verändert die effektive Dotierkonzentration des Siliziums durch zwei Effekte: Im n-dotierten Silizium werden die eingebrachten Donatoren durch Störstellen und Gittereffekte deaktiviert. Ferner äußern sich Strahlenschäden im Kristall in einer Anhäufung von Akzeptorstellen. Sobald die Konzentration der Akzeptoren die der Donatoren übersteigt, kommt es zur Änderung des Vorzeichens der effektiven Dotierkonzentration, der sogenannten Typinversion. Die Zunahme der Akzeptorstellen ist ein annähernd linear fluenzabhängiges Phänomen [WUN92]. Abb. 3.4 zeigt das Fluenzverhalten der effektiven Dotierkonzentration.

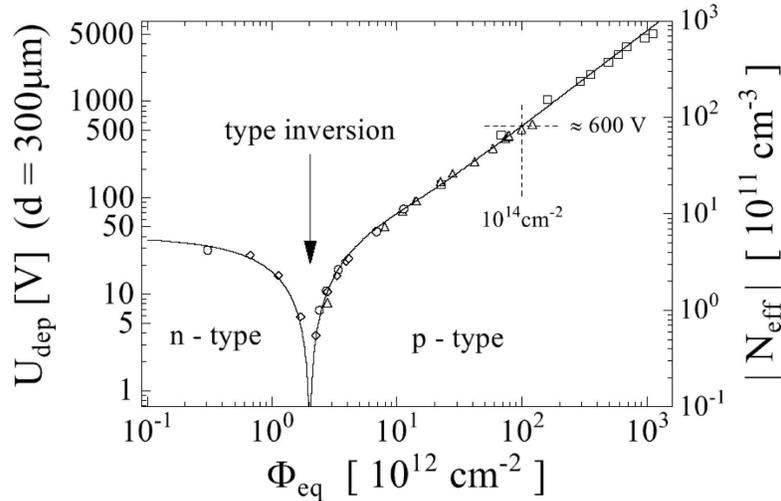


Abbildung 3.4: Effektive Dotierung in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdosis, in diesem Fall für einen 300 μm dicken Sensor [WUN92]

Nach der Typinversion, wenn sich die effektive Dotierungsart des Siliziums geändert hat, wächst die Verarmungszone von der pixelisierten Seite aus. So kann der Detektor nach Strahlungsschäden, die sich in einem Spannungsdurchbruch bereits vor Erreichen der Depletionsspannung zeigen, auch unterdepletiert betrieben werden. Dies veranschaulicht Abb. 3.5. Bei angelegter Biasspannung wächst die Depletionszone bei p⁺-Pixeln von der Rückseite, bei n⁺-Pixeln von der pixelisierten Seite her. Im unbestrahlten (= vor der Typinversion) Fall ist das ATLAS-Pixeldesign

nur vollständig depletiert betreibbar, p^+ Pixel jedoch auch unterdepletiert betreibbar. Nach Bestrahlung kann hingegen nicht immer das ganze Volumen depletiert werden, so daß im Falle von n^+ -Pixeln keine Ortsinformation mehr vorliegt.

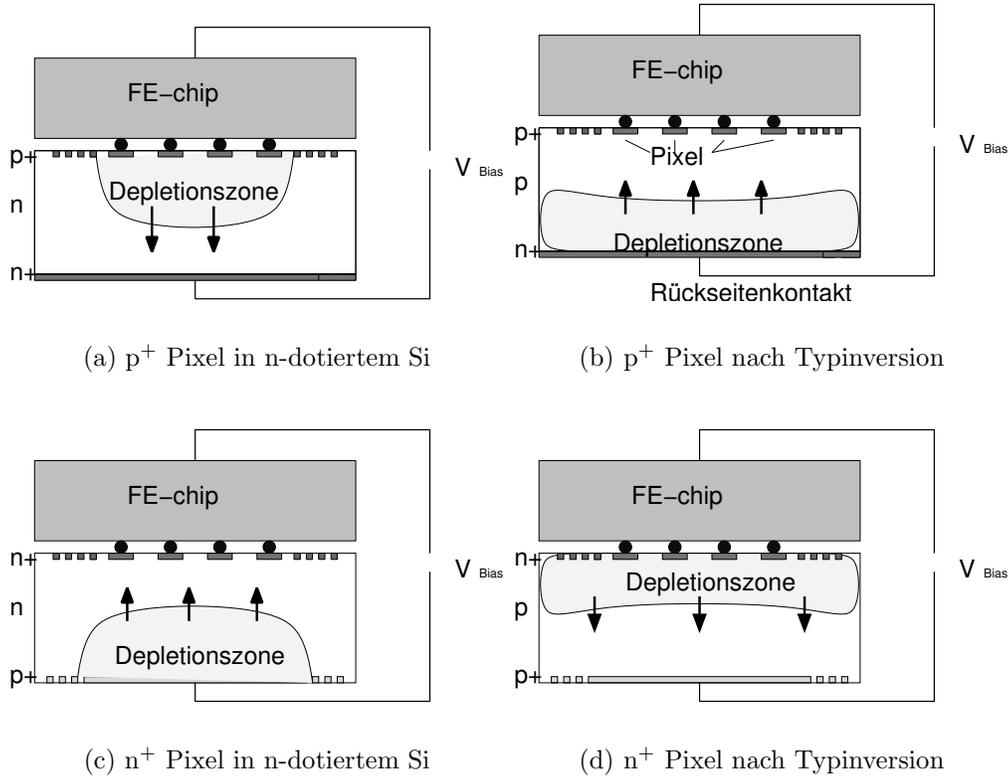


Abbildung 3.5: Ausbreitung der Depletionszone in das Silizium bei angelegter Biasspannung jeweils für p^+ -Pixel (a,b) und n^+ -Pixel (c,d)

3.3.2 Pixelisolationen

Wie bereits in Abschnitt 3.3.1 eingangs erwähnt, hat das n^+ in n-Design die Vorteile der vollständigen Operabilität, auch im teildepletiertem typinvertierten Zustand, benötigt aber eine besondere Isolation der n^+ -Pixel im n-Bulk, und eine Struktur, die das hohe Potential der Biasspannung gegenüber den Tilerändern abbaut (die sogenannte Guardringstruktur) [HUE01].

Um die Pixel elektrisch voneinander zu trennen, muß oberflächennah eine p-Dotierung zwischen den n^+ -Pixelimplantationen eingebracht werden. Dies kann durch einen Maskenschritt realisiert werden, der nach der Pixelimplantation erfolgt (p-stop Design) oder durch eine schwache oberflächennahe p-Dotierung, die vor der

Pixelimplantation erfolgt (p-spray Design). Letzteres Verfahren ist technisch einfacher, da für die Prozessierung ein Maskenschritt weniger nötig ist. Beide Designs sind in der Lage, Pixel voneinander zu isolieren, haben aber ebenfalls den Nachteil gemeinsam, daß an den Grenzen der dann p-dotierten Bereiche beim Anlegen einer Hochspannung Feldstärkemaxima auftreten, die zu frühen Durchbrüchen führen können.

Beim Design des ATLAS-Pixelsensors wurde aus o.g. Gründen das sogenannte moderierte p-spray Design verwendet. Hierbei handelt es sich um eine nicht segmentierte p-Implantation, die nach einer segmentierten Nitridschicht vorgenommen wird. Die Segmentierung des Nitrides ist derart gewählt, daß die nachfolgende p-Implantation in zwei unterschiedlichen Dotierungskonzentrationen eingebracht wird, welche ihrerseits hohe Felstärkegradienten verhindern. Abb. 3.6 zeigt eine schematische Darstellung des sogenannten moderierten p-spray-Designs. Deutlich sichtbar ist, daß die Nitridschicht u. a. exakt die Bereiche der geringeren p-Dotierung abdeckt.

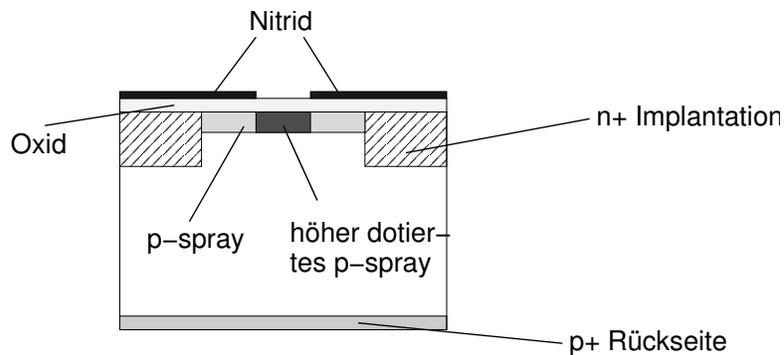


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung der moderierten p-spray Implantation zur Zwischenpixelisolation durch die Öffnung der obenliegenden Nitridschicht.

3.4 Die Front-End Elektronik

Der Front-End Chip Typ I3 ist nach den Prototypen FE-A, FE-B, FE-C, FE-D, FE-I1 und FE-I2.1 die endgültige Version, die im ATLAS-Pixeldetektor zum Einsatz kommt. Der FE-I3 ist ein einseitig prozessierter Chip, der von einem Zulieferer auf einem 8 Zoll Wafer hergestellt wird. Der Chip muß die Signale jedes einzelnen Pixels verstärken, digitalisieren und nach dem Eintreffen des ersten LVL1 Triggers die Daten herausführen. Jeder Pixel eines Chips muß einzeln maskierbar und die analogen Eigenschaften müssen pixelweise einstellbar sein.

Ein FE-Chip hat Abmessungen von $7,4 \cdot 11,0 \text{ mm}^2$ und eine Dicke von $150\text{-}200 \mu\text{m}$ und beinhaltet 2880 Pixelzellen, die in 16 Spalten und 180 Reihen gruppiert sind [ATL03]. Die Auslesezellen an den Seiten der Chips sind jeweils mit einem „long pixel“ des Sensors verbunden. Die oberen sieben Reihen des FE-Chips (Reihe 153-159) beinhalten die Auslesezellen der ganged Pixel. Die Zellen der Reihen 159, 157, 155 und 153 sind jeweils mittels einer Metallisierung mit einem weiteren Sensorpixel verbunden, die den Bereich zwischen zwei FE-Chips abdecken (die sogenannten ganged pixel). Analog zum Sensordesign hat der FE-Chip einen Abstand der Auslesezellen von 50 bzw. $400 \mu\text{m}$.

Abb. 3.7 zeigt eine schematische Darstellung der Zwischenpixelregion mit den langen Pixeln seitlich zweier FE's und die gruppiert ausgelesenen ganged Pixel sowie die sogenannten interganged Pixel, die zwischen den ganged Pixeln liegen.

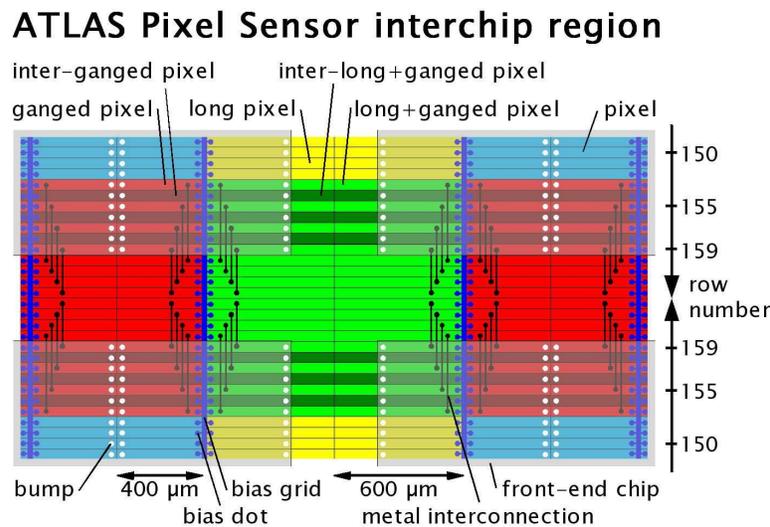


Abbildung 3.7: Zwischenpixelregion mit long, ganged und interganged Pixel [DOB04]

Der FE-Chip wurde nach der „deep submicron“-Technologie (DSM) entworfen. Dies bedeutet Strukturgrößen von ca. $0,25 \mu\text{m}$, die durch spezifische Layoutregeln strahlenhart gegenüber der Strahlenbelastung im ATLAS-Experiment sind.

3.4.1 Der Analogteil der Pixelzelle

Der Analogteil einer Readoutzelle ist in der Lage, die Ladungssignale, die entweder über den Bumpbond oder für Kalibrationszwecke über einen internen Pulsgenerator injiziert werden, zu digitalisieren. Die Ladung gelangt auf den Kondensator

C_{fb} . Dort wird die Ladung mittels eines Konstantstroms I_{fb} entladen. Damit ist die Zeit, in der die Ladung die Eingangsschwelle des Diskriminators überschreitet ein Maß für die Ladung, das sogenannte ToT¹. Eine Variation von I_{fb} verändert die Zeitdauer der Entladung und stellt eine Kalibrierungsmöglichkeit für diesen Analog-Digital-Wandler dar. Sofern ein Pixel nicht maskiert ist, geht die Ladungsinformation weiter an die Readoutkette.

Die Diskriminatorschwelle ist in einem effektiven 6-bit Raster einstellbar. Mit jedem Treffer gibt der Readoutteil des FE-Chips ein Logiksignal in den sogenannten Hitbus. Beim Hitbus handelt es sich um ein logisches OR aller Pixel zweier Spalten eines Chips. Abb. 3.8 zeigt das Blockschaltbild des Analogteils einer Auslesezeile.

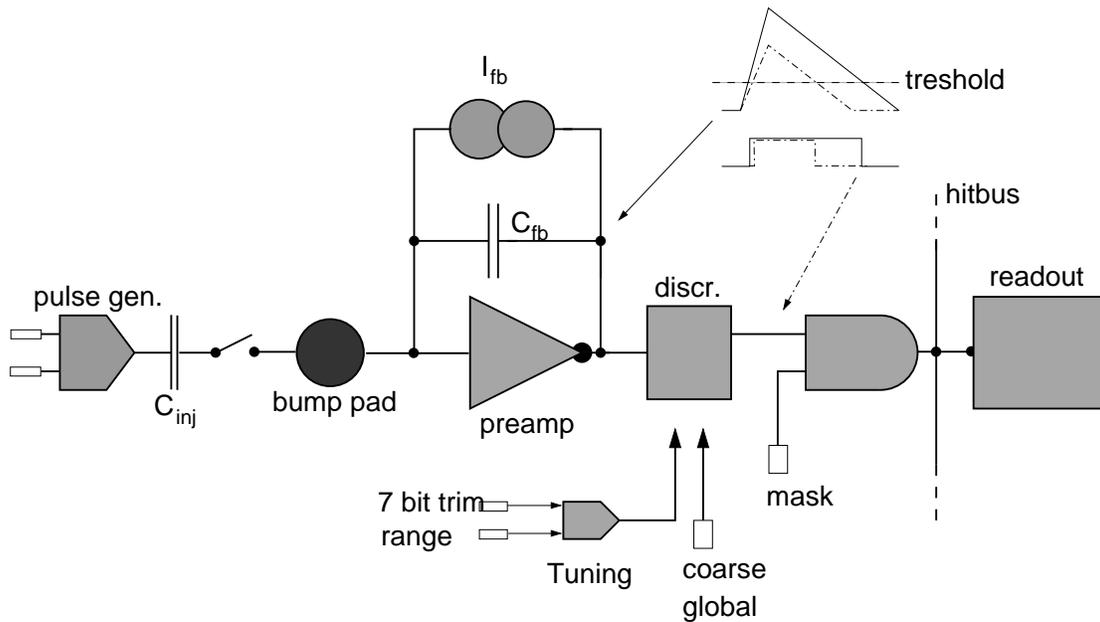


Abbildung 3.8: Blockschaltbild des analogen Teils der Auslesezeile

3.4.2 Digitaler Readoutteil

Der digitale Readout des FE-Chips muß alle Treffer des Pixeldetektors zwischenspeichern, bis mit den Daten der äußeren ATLAS-Detektorkomponenten ein LVL1 Trigger generiert wird, der veranlaßt, daß das entsprechende Ereignis aus dem Modul ausgelesen wird. Jeweils zwei benachbarte Pixelreihen von zusammen 320 Pixeln sind zu einem sogenannten „column pair“ zusammengefaßt. Das Auslesen und Zurücksetzen der Pixelspeicher geschieht sequentiell mit einem Schiebereg-

¹Time over Threshold

gister innerhalb eines Columnpairs. Dieses Schieberegister ist ratenlimitiert: Bei einer Trefferrate von 64 Hits pro 25 ns käme das Schieberegister zum Stillstand, da die weitere Ausleseketten nicht mehr Treffer zwischenspeichern kann; durch eine Nullunterdrückung reduziert sich die Trefferrate pro Columnpair auf 0,15 Treffer pro 25 ns im Betrieb des ATLAS-Detektors [ATL03].

Pro Treffer müssen die Pixelkoordinaten, das ToT und die Eventnummer vom Schieberegister weitergereicht werden. Der einzelne Pixel hat zwei unterschiedliche busy-Signale. Eins, das den Pixel daran hindert, einen zweiten Treffer zu speichern, bevor das gegenwärtige Event weitergeleitet ist und ein weiteres, das den Pixelspeicher daran hindert, seinen Inhalt an das Schieberegister weiterzugeben, solange weiter aufwärts in der Ausleseketten noch unausgelesene Pixel im Columnpair sind.

Die Trefferdaten verlassen dann den Pixelbereich des Chips und erreichen anschließend den BOC² Bereich. Abb. 3.9 zeigt ein Foto des Chips mit den entsprechend markierten Zonen. Der obere Bereich beinhaltet die 180 · 9 Pixelmatrix mit dem unterhalb befindlichen BOC und den angrenzenden Wirebondpads.

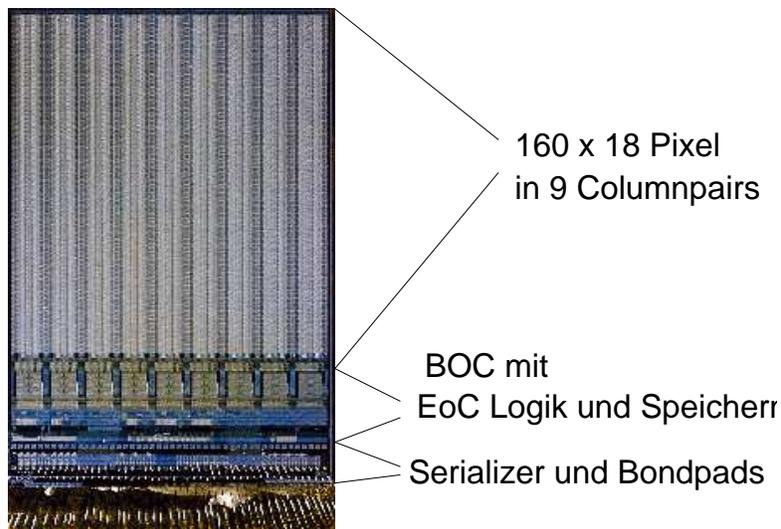


Abbildung 3.9: 7,4 · 11,0 mm² großer FE-chip (Prototyp), oberer Teil mit Pixelmatrix, die mit dem Sensor kontaktiert ist, darunter BOC und die Bondpads

Die Trefferdaten werden vom sogenannten ToT-Prozessor binär kodiert und dann in 64 EoC³-Puffern zwischengespeichert, bis von der in Abschnitt 1.6 dargestellten Triggerlogik ein LVL1 Trigger für ein relevantes Ereignis ausgegeben wird.

²Bottom of Column

³End of Column

Die Daten der Pixel, deren Treffer zu einem LVL1 getriggerten Ereignis gehören, werden über einen Serializer nachfolgend an die DO⁴ Leitung zum MCC⁵ geleitet.

3.5 Das FlexMCC

Der MCC ist über je eine Dateneingangs- und Ausgangsleitung und drei gemeinsame Kanäle für das Rücksetzen, den LVL1-Trigger und die 40 MHz Clock mit jedem FE-Chip verbunden. Die äußere Anbindung des MCC geschieht mittels einer Dateneingangsleitung (DTI⁶) und zwei parallelen Ausgangsleitungen (DTO⁷ und DTO2⁸). Das Controlling und Monitoring der 16 FE-Chips geschieht neben der Datenführung ebenfalls durch den MCC.

Die Kontaktierung der FE's und des MCC geschieht auf einer Flexplatine, an der der MCC und die FE's mit Wirebonds kontaktiert sind. Abb. 3.9 zeigt im unteren Bereich die 47 Bondpads, von denen lediglich 38 benutzt werden. Der MCC wird von drei Seiten mit insgesamt 68 Bonds kontaktiert. Auf Details des Wirebondverfahrens geht Abschnitt 4.2.4 näher ein.

Beim Flex handelt es sich um eine flexible Kaptonleiterbahnenfolie. Sie hat ungefähr die Abmessungen eines Sensortiles, 100 μm Dicke und wird auf die Rückseite des Sensors geklebt, der wiederum an der gegenüberliegenden pixelisierten Seite mit $2 \cdot 8$ FE-Chips besetzt ist. Bei Kapton handelt es sich um einen Kunststoff, der sich durch eine besondere Strahlenhärte, Temperatur- und Hochspannungsfestigkeit auszeichnet. Das Flex beinhaltet die Bondflächen für die MCC- und FE-Wirebonds, alle Datenleitungen von und zu den FE-Chips, die Spannungsversorgungsleitungen der Chips und einen NTC⁹- Widerstand für das Temperaturmonitoring des Moduls.

Abb. 3.10 zeigt ein ATLAS-Pixel Modul schematisch im Querschnitt und als Foto in der Aufsicht, in dem das Flex mit dem Pigtail, dem MCC, mehreren Kapazitäten und Widerständen gut zu sehen ist.

⁴**Data Out**

⁵**Module Control Chip**

⁶**Data In**

⁷**Data Out**

⁸**Data Out 2**

⁹**negative temperature coefficient**

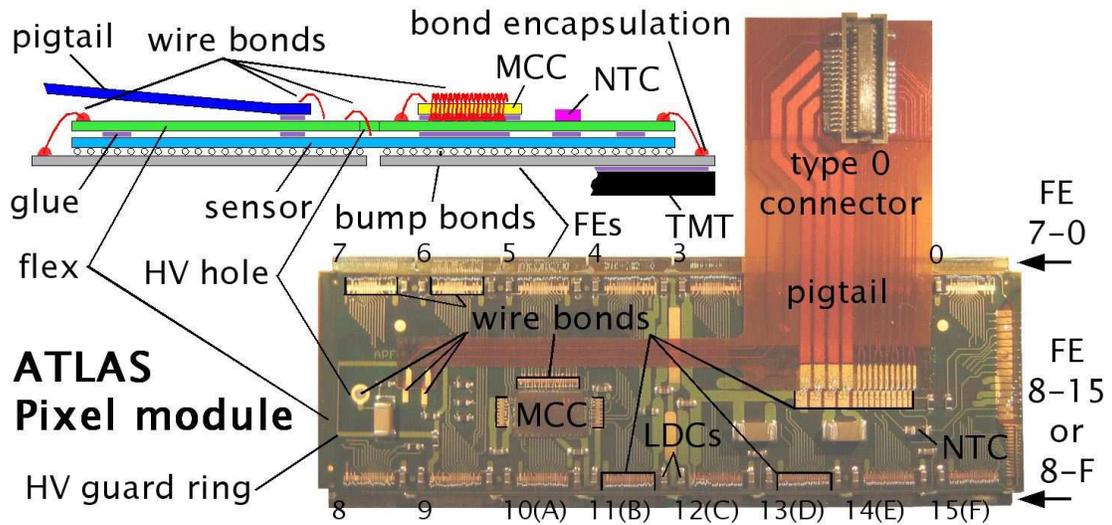


Abbildung 3.10: Querschnitt eines ATLAS-Pixelmoduls und Aufsicht auf das Flex [DOB04]

Eine detailliertere Beschreibung der Modulproduktion erfolgt in Abschnitt 4.2 und eine Beschreibung der Modultestschritte wird in Kapitel 5 geliefert.

Kapitel 4

Modulfertigung und Modultestschritte

In diesem Kapitel werden die Herstellungsschritte eines Moduls erläutert. Weiterhin werden die durchgeführten Testverfahren sowie die Organisation der Produktion und die Qualitätssicherung dargestellt.

4.1 Die Sensortileproduktion

Aus hochreinem Quarzsand stellen industrielle Firmen in einem aufwendigen Prozeß monokristalline Siliziumkristalle in zylindrischer Form her, die sogenannten Ingots¹.

Diese werden mit mechanischen Sägen in 250 μm dicke Siliziumscheiben geschnitten, die sogenannten Wafer², und zur weiteren Prozessierung an die im Kapitel 7 mehrfach erwähnten Hersteller A und B weitergeliefert. Hier erhalten die Wafer in mehreren Maskenschritten die Oberflächenstrukturierung, die sie erst zu pixelisierten Halbleiterdetektoren machen. Durch das n^+ -in-n-Design des ATLAS-Pixelsensors, das in Abschnitt 3.3.1 diskutiert wurde, ist eine doppelseitige Prozessierung des Sensorwafers nötig, welche im industriellen Rahmen eine außergewöhnliche Herausforderung darstellt.

Die prozessierten Wafer gelangen dann zu Akzeptanztests in vier der an ATLAS-Pixel beteiligten Sensorlabore (Dortmund (D), New Mexico (USA), Prag (CZ) und Udine (I)). Eine detaillierte Darstellung der Qualitätssicherung und der Meßprozeduren liefert [KLA05].

Von den o.g. Sensorlaboren der Kollaboration werden die Wafer jeweils zu einem von zwei unterschiedlichen Bumpvendorn geschickt. Diese beschichten die Silizi-

¹engl. Barren oder Gußblock

²engl. Scheibe

umsubstrate mit einer Metallisierungslage und schneiden bis zu drei gute Tiles aus dem runden Wafer. Anschließend folgt der sogenannte Bumpprozess. Hierbei werden die in Kapitel 3.1 bereits beschriebenen Bumpbonds mit einem Maskenschritt aufgebracht, so daß danach ein Sensor mit jeweils 16 FE-Chips kontaktiert werden kann. Eine umfangreiche Beschreibung des gesamten Flipchip Prozesses zur Herstellung von Baremodules und der produktionsbegleitenden Tests findet sich in [WEB04].

4.2 Modulbau

Dieser Abschnitt beschreibt die Bestückung des Flexes mit dem MCC und dem Pigtail, einer weiteren Captonplatine, die über einen ELKO-Stecker die Verbindung mit der Readoutkette im ATLAS-Experiment sowie die Kontaktierung der beiden ausgesetzten Komponenten durch Wirebonds realisiert.

Anschließend erfolgt eine Darstellung der mechanischen und elektrischen Verbindung des FlexMCC mit dem Baremodul.

4.2.1 FlexMCC bestücken

In diesem, in Dortmund durchgeführten Produktionsschritt werden das Pigtail und der MCC auf das Flex geklebt. Das Flex wird von der Firma Dyconex hergestellt und von der Firma Surface Mount Depot mit Widerständen und Kapazitäten bestückt. Diese Platine wird auf Hochspannungsfestigkeit und Kurzschlüsse vom Kollaborationspartner University of Oklahoma (USA) getestet und auf ein PCB-Montageboard laminiert. Dieses Montageboard besitzt einige Paßbohrungen und elektrische Kontakte, die im weiteren von Belang sein werden. Abb. 4.1 zeigt ein Flex auf dem o.g. Board. Zur Laminierung wird das Flex über die goldbeschichtete Fläche gespannt und an den Enden mit einem Kleber mit dem PCB-Montageboard verbunden.

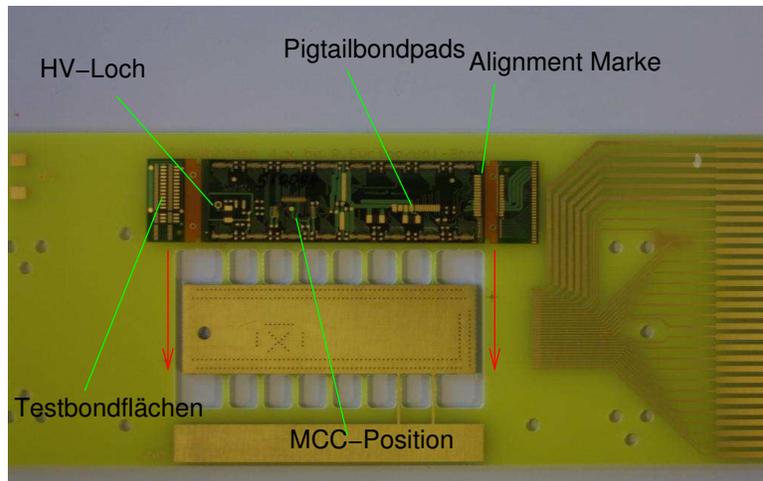
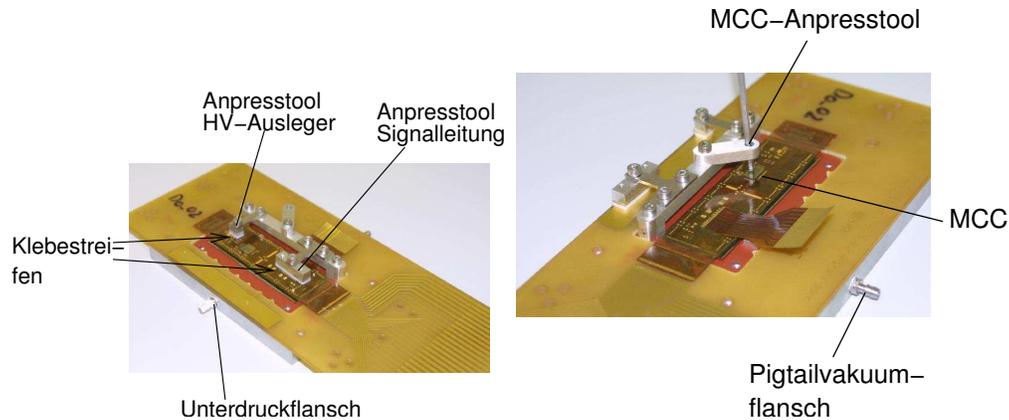


Abbildung 4.1: Abbildung des Flexmontageboards mit Flex, das mit Laminierungen an den Enden über die goldbeschichtete Fläche gespannt wird

Die hierzu verwendeten Kleber müssen neben der nötigen mechanischen Festigkeit die Strahlenhärte, Hochspannungsfestigkeit und Temperaturresistenz besitzen, die der Einsatz im Pixeldetektor erfordert. Für die Fixierung des MCC findet ein flüssiger Zweikomponentenkleber SE 4445 der Firma Dow Corning Einsatz und für das Pigtail ein einkomponentiger Epoxyfolienkleber AF 42 der Firma 3M. Zunächst wird das Flex einer visuellen Eingangsinspektion unterzogen, wo Kontaminationen und Kratzer erkannt und dokumentiert werden. Ggf. wird ein Flex daraufhin von der Produktion ausgeschlossen. Danach wird das Pigtail auf dem Flex unter dem Mikroskop in Position gebracht, so daß sich die Wirebondpads auf Flex und Pigtail gegenüberstehen. Während das Flex mit seinem Montageboard von einem Aluminium-Vakuumwerkzeug mit Unterdruck planar fixiert wird, kann gleichzeitig mit einem zweiten Vakuumkanal das Pigtail in der korrekt ausgerichteten Position fixiert werden und je ein vorbereitetes $18 \cdot 4 \text{ mm}^2$ und ein $4 \cdot 4 \text{ mm}^2$ großes Stück AF 42 Klebefolie unter beide Bondpadbereiche positioniert werden. Teflonbeschichtete Stempel üben dann den nötigen Anpreßdruck auf den Kleber für die Aushärtung bei 174° C aus.

Auf eine ähnliche Art wird nach der Aushärtung des AF 42 Klebers der MCC montiert. Nach der Beschichtung der MCC-Position mit 5 Klebertropfen des SE 4445 wird der Chip unter dem Mikroskop positioniert, und erhält mit teflonbeschichteten Stiften einen Anpreßdruck von 10 - 30 g. Um eine Adhäsion des Flexes auf dem Montageboard zu verhindern, wird eine Teflonfolie als Trennmittel verwendet. Die Abb. 4.2 zeigt links ein montiertes Pigtail mit den Druckstempeln auf dem HV-Bondbereich und dem LV- und Signalfondbereich. Rechts ist die Fi-

xierung des MCC mit einem Metallstift dargestellt. Die Präzisionsanforderungen für diese manuellen Prozesse liegen bei ca. $50 \mu\text{m}$.



(a) Pigtailmontagetool mit Anpreßstempeln für das Pigtail

(b) Pigtailmontagetool mit MCC

Abbildung 4.2: Links: montiertes Pigtail mit Anpreßtool auf dem HV-Ausleger und dem LV- und Signalpads, die Klebestreifen sind zwischen dem Pigtail und dem Flex eingeklemmt; rechts: fixierter MCC mit einem Stahlstift in einer Al-Führung

4.2.2 FlexMCC wirebonden

Nach der Montage des Pigtails und des MCC wird das FlexMCC in Fünfer Losen zu der auf das Wirebonden spezialisierten Firma GMA³ geliefert, die das Wirebonden nach Vorgaben mit vollautomatischen Bondmaschinen erledigt. Hierfür wird einheitlich $25 \mu\text{m}$ Aluminiumdraht verwendet, der durch Ultraschallvibrationen mit den Bondpads verschweißt wird.

Wichtig hierbei ist eine saubere und gut fixierte Bondfläche. Aus diesem Grund werden insbesondere die Bondpads mit Kleber unterlegt, damit die Ultraschalleistung keine mechanischen Schwingungen in den Bauteilen erzeugt.

Um mit $25 \mu\text{m}$ Draht die nötigen Leitungsquerschnitte zu gewährleisten, werden die Pigtailleitungen zur Energieversorgung des Moduls 14-fach gebondet, die Signalleitungen und die HV-Bonds 3-fach.

Hierbei werden die Bonds in drei unterschiedlichen Längen gesetzt, da Wirebonds durch wechselnde Ströme innerhalb eines mehrere Tesla starken Magnetfeldes aufgrund der Lorentzkraft zu Schwingungen neigen. Mit drei unterschiedlichen

³Gesellschaft zur Mikroelektronikassemblierung/Duisburg

Längen haben die Bondgruppen unterschiedliche Resonanzfrequenzen und somit ein geringeres Risiko, daß alle Bonds einer Gruppe wegen magnetisch bedingter Schwingungen brechen.

Der MCC wird aus Redundanzgründen doppelt als Bondpaar gebondet, da ein defekter MCC-Bond ein Modul unbrauchbar macht, ein defekter FE-Bond hingegen lediglich einen Chip eines Moduls. Auf definierten Testflächen auf dem Montageboard werden Testbonds gesetzt. Um die Festigkeit und die Qualität der Wirebonds einer Produktion zu testen, werden einige dieser Testbonds und drei elektrisch unnötige Bonds der 68 MCC-Bonds einem destruktiven Pulltest unterzogen. Mit einem Metallhaken, der an einer mechanischen Schleppuhr befestigt ist, werden die Bonds abgerissen. Das Zugkraftlimit der Kollaboration liegt bei fünf Gramm. Abb. 4.3 stellt die Verteilung der Bondfestigkeiten der ersten zehn in Dortmund gefertigten Module dar. Die Abbildung zeigt eine breite Verteilung: Dies bedeutet Qualitätsschwankungen innerhalb der Bondserie. Das Flex wird im Bereich unter dem MCC mit einigen Punkten eines elastischen Klebers, der manuell dosiert wird, mit dem Baremodul verbunden. Dies erzeugt einen nicht völlig planaren, elastischen Bonduntergrund, der zu Variationen in den Bond-eigenschaften führt. Dies stellt allerdings lediglich Inhomogenitäten, aber keine Qualitätseinbuße dar, da alle Bondkräfte über dem Limit liegen.

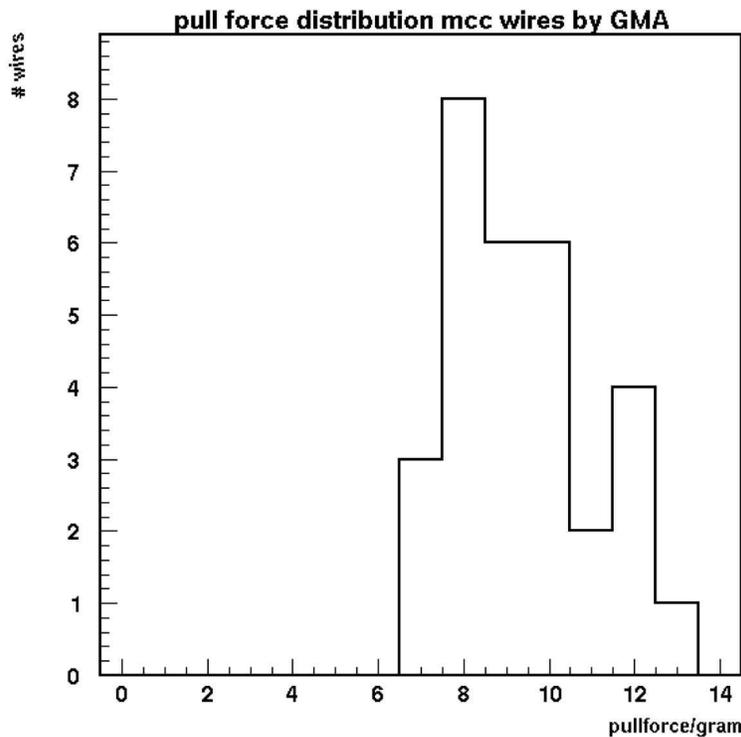


Abbildung 4.3: Verteilung der MCC-Pulltests der ersten zehn in Dortmund gefertigten Module

4.2.3 Baremodule - FlexMCC - Integration

Nach dem Wirebonden des MCCs und des Pigtailes wird das FlexMCC einer Eingangskontrolle unterzogen. Dies beinhaltet eine visuelle Inspektion des FlexMCC auf Kontaminationen, Bonddeformationen und Alignment der Bonds. Diese Ergebnisse werden protokolliert. Danach erfolgt ein elektronischer Testschritt, bei dem einige Funktionalitäten des MCC überprüft werden. Eine detaillierte Erklärung des Tests erfolgt in Abschnitt 4.5.2.

Ein getestetes Baremodul und ein getestetes FlexMCC werden im folgenden Produktionsschritt zu einem Modul zusammengesetzt. Mittels eines Vakuumchucks, der auch beim Baremodultest Verwendung findet, wird das Baremodul fixiert. Das Montageboard mit dem FlexMCC wird dann, nachdem ein Teil des Boards an der Rückseite des Flexes entfernt wurde, auf einen Aluminiumrahmen gespannt, der über Madenschrauben abgesenkt werden kann, bis die nun freiliegende Flexrückseite die Sensoroberfläche des Baremoduls berührt. Nun erfolgt die Justierung der Baremoduls bei abgeschaltetem Vakuum in x- und y-Richtung bis vier Alignment-

marken des Sensors durch die entsprechenden Alignmentöffnungen im Flex zu sehen sind. Diese haben einen Durchmesser von $300\ \mu\text{m}$. Ein erneutes Anlegen des Unterdrucks fixiert das nun ausgerichtete Baremodul auf dem Chuck. Flex und Baremodul können nun mit einer Präzision von wenigen Mikrometern getrennt und wieder zusammengesetzt werden. Dies ist in diesem Stadium nötig, um die Kleber auf der Rückseite des Flexes aufzutragen. Unter den Wirebondpads, die sich an den Längskanten des Flexes erstrecken, wird je ein 3 mm breiter Streifen ARclad 8026-Kleber der Firma Adhesives Research Inc. aufgebracht, der beim Wirebondprozess die Bondpads fixieren soll. Hierbei handelt es sich um eine doppelseitige Adhäsionsfolie mit einer Dicke von $20\ \mu\text{m}$. Zur weiteren mechanischen Verbindung der Sensorrückseite und des Flexes wird ein einkomponentiger Silikonkleber 3140 RTV der Firma DOW CORNING verwendet. Dieser wird unter dem Pigtail, unter den Pigtail-HV-Pads aufgetragen und an den Enden des Flexes, um die mechanische Lasten aufzunehmen und unter dem MCC und dem Temperaturwiderstand um eine gute Wärmeleitung zu gewährleisten. Die bereits vorher gefundene einjustierte Position von Flex und Baremodul zueinander wird nun wiederhergestellt und die Klebeflächen werden analog zur Pigtail- bzw. MCC-Montage beschwert (Abschn. 4.2.1).

4.2.4 Modul wirebonden

In einem zweiten Wirebondschritt bei der Firma GMA werden die FE-Chips mit dem FlexMCC elektrisch verbunden. Jeweils 30 Bonds werden pro Chip verwendet, wobei aus Redundanzgründen und wegen der nötigen Leitungsquerschnitte die LV-Bonds doppelt ausgelegt sind. Elf der 16 FE-Chips besitzen jeweils einen Bond, der elektrisch ungenutzt bleibt. Diese 11 Bonds werden ebenfalls einem destruktiven Pulltest unterzogen, um die Qualität der Produktion zu überprüfen. Abb. 4.4 zeigt die Verteilung der FE-Chip Wirebonds der ersten zehn in Dortmund gefertigten Module.

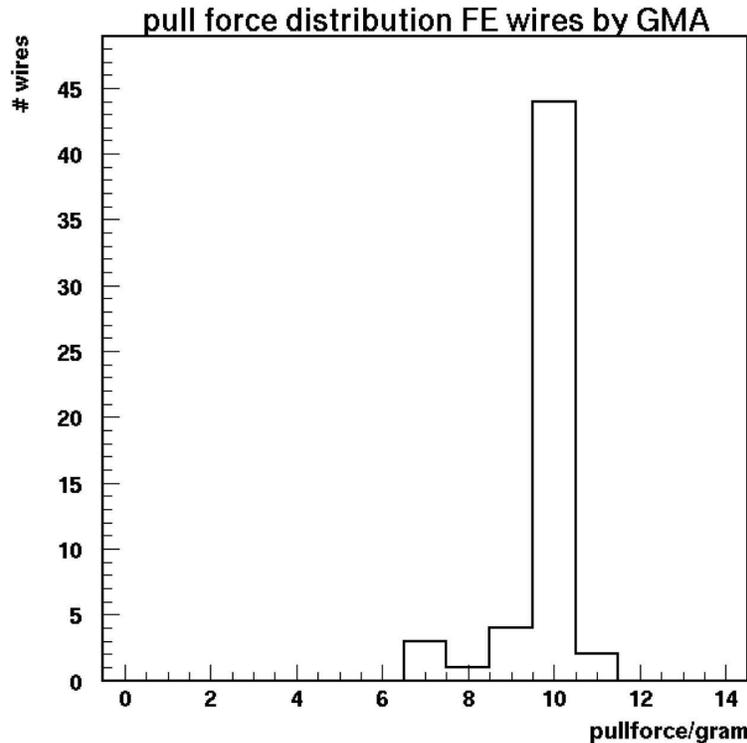


Abbildung 4.4: Verteilung der FE-Chip Pulltests der ersten zehn, in Dortmund gefertigten Module

Diese schmale Verteilung belegt die gute Reproduzierbarkeit der Serie. Im Gegensatz zum MCC sind die FE-Bondpads mit einem Klebestreifen unterlegt, der eine einheitliche Schichtdicke und Adhäsion bietet. Klebestreifen in der Größenordnung des MCC sind manuell nicht verarbeitbar und der für den MCC verwendete SE 4445 hat eine bessere Wärmeleitfähigkeit um die Abwärme des MCC zur Modulunterseite zu leiten.

4.2.5 Potting der Wirebonds

Die Stabilität von Wirebonds mit wechselnden Strömen in magnetischen Feldern wird gesteigert durch eine mechanische Dämpfung. Diese Dämpfung wird realisiert durch einen elastischen, flüssig verarbeitbaren Kleber 9001-E-V3.7 der Firma DYMAX. Dieser wird jeweils auf die Füße der Wirebonds gegossen, so daß er die Füße aller Wirebonds einer Reihe umschließt. Dies geschieht für alle Pigtail-, MCC- und FE-Bonds. Der hier verwendete Klebstoff zeichnet sich neben der nötigen Strahlenhärte, Spannungsfestigkeit und dauerhaften Flexibilität durch eine

gute Reversibilität aus: Im Falle von elektrischen Defekten kann die Versiegelung rückstandsfrei entfernt werden, so daß die Bonds erneuert werden können.

4.3 Modultestsetup

Das Modultestsetup basiert auf einer von der Pixelkollaboration entwickelten Datennahmesoftware namens TurboDAQ. Hierbei handelt es sich um ein Softwaretool zur Datennahme bei Testschritten von ATLAS-Pixelmodulen. Es wurde um relevante Details zur Anpassung an die Hardware des Dortmunder Setups erweitert. In diesem Abschnitt liegt der Schwerpunkt auf der Meßhardware. Eine detaillierte Beschreibung der in Dortmund entwickelten Software liefert [DOB04].

4.3.1 Modulmeßstand

Der Modulmeßstand ist ein PC-basiertes Auslese- und Testsystem, daß das Modul mit Niederspannung (low voltage (LV)) und Hochspannung (high voltage (HV)) versorgt und ein Testen und Kalibrieren der Module größtenteils automatisiert erlaubt. Abb. 4.5 stellt in schematischer Weise die Komponenten des Testsystems und deren Vernetzung dar.

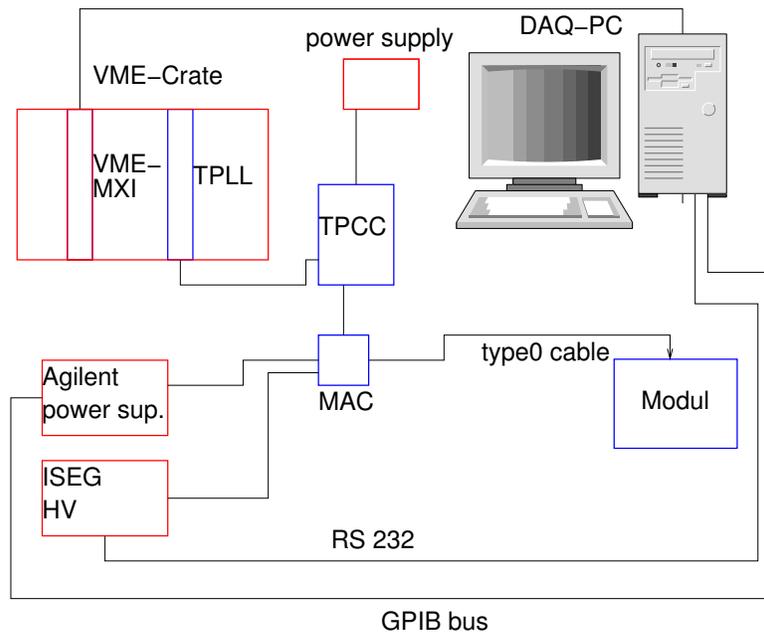


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung des Modultestsetups, kollaborationsentwickelte Elektronik in blau, kommerzielle Geräte in rot

Die Kommunikation des Moduls mit dem DAQ-PC geschieht über die Module Adapter Card (MAC), die Turbo Pixel Control Card (TPCC), die Turbo Pixel Low Level Card (TPLL) und das VME⁴ System. Das VME ist ein kommerzielles modulares Elektroniksystem, dessen Einsatz in der Hochenergiephysik Standard ist. Die Kommunikation mit dem DAQ-PC wird durch einen MXI-2 Bus und eine PCI-MXI Karte im PC realisiert. Dies ist ein komplettes System des Herstellers NI⁵.

Ein Einschub in diesem modularen VME-System ist die TPLL. Sie generiert die 40 MHz Clock für das Meßsystem und kodiert und dekodiert die seriellen Signale des MCC. Die TPCC, die über ein externes Netzgerät mit +5V und -5V versorgt wird, ist in der Lage, die Daten von bis zu vier Modulen im Multiplexverfahren zu verarbeiten und zu Kalibrierungszwecken definierte Ladungsmengen an die Module zu pulsen.

Die MAC bietet die Zusammenführung der Signalleitungen der LV- und der HV-Versorgung. Die „remote sense lines“ des Moduls enden ebenfalls auf der MAC. Die Kontaktierung des Moduls von der MAC geschieht über ein sogenanntes „type0 cable“. Hierbei handelt es sich um ein ca. 1 m langes, 17 adriges Aluminiumkabel. Die einzelnen Litzen sind 100 und 300 μm dicke Bonddrähte, die mit einem Dickdrahtbonder auf ein $12 \cdot 12 \text{ mm}^2$ großes Board gebondet werden. Zu Laborzwecken werden Kupferlitzenkabel verwendet, die in der elektronischen Werkstatt der Universität Dortmund angefertigt werden. Diese Kabel sind mechanisch weitaus belastbarer als die Aluminiumkabel, die im ATLAS-Detektor Einsatz finden werden, besitzen aber dennoch identische elektronische Eigenschaften.

Das LV- und das HV-Gerät des Moduls sind über den RS232-Port bzw. den GPIB-Bus mit dem DAQ-PC verbunden. Damit werden jeweils Strom und Spannung überwacht und für Messungen werden beide Geräte darüber gesteuert.

Mit diesem Setup kann ein Modul mit Niederspannung versorgt, konfiguriert und ausgelesen werden. Aufgrund der Abwärme der FE-Chips ist für einen stabilen Betrieb eine Kühlung nötig. Diese benötigt eine Vorlauftemperatur von ca. 5°C um am NTC auf dem Flex eine Temperatur von 10°C einzustellen. Diese Temperatur ist für standardisierte Tests (siehe Abschnitt 4.5.3) wichtig. Die Kühlung wird durch ein Flüssigkeitskühlaggregat erreicht, dessen Kühlmittel in Mäandern durch eine polierte Kupferplatte geleitet wird, auf dem das zu testende Modul mit thermischem Kontakt liegt. Um Feuchtigkeitsniederschlag zu verhindern, befindet sich die beschriebene Kühlplatte innerhalb eines thermisch isolierten Volumens, das einen Kühlfinger beinhaltet, dessen Oberflächentemperatur deutlich unter der der Kühlplatte liegt, so daß sich Feuchtigkeit bevorzugt dort niederschlägt.

Durch mehrere MAC-Karten und eine Ausweitung der Kühlkapazitäten können

⁴Versa Module Eurocard

⁵National Instruments www.ni.com

mit einem Setup dieser Art bis zu vier Module nacheinander in einer automatisierten Messung getestet werden.

Für den Quellentest und die Abschlußcharakterisierung sind Modultemperaturen von -10°C erforderlich, da diese Charakterisierung die Modultuningparameter für die Module im ATLAS-Experiment liefern soll und dort die Umgebungstemperatur ebenfalls bei -10°C liegen wird.

Das vorhandene Kühlaggregat kann bauartbedingt eine dafür nötige Vorlauftemperatur von -15°C nicht liefern. Hierzu wurden eine Peltierzusatzkühlung mit Regeleinheit entworfen und in der elektronischen Werkstatt der Universität Dortmund gebaut. Die kalte Seite der Zusatzkühlung erreicht die geforderten -15°C , indem deren warme Seite durch die bereits erwähnte wassergekühlte Kupferplatte auf konstanten 5°C gehalten wird. Der Feuchtigkeitsschutz bei Temperaturen deutlich unter dem Gefrierpunkt ist in diesem Fall durch eine konstante Stickstoffspülung gewährleistet. Abb. 4.6 zeigt eine Photographie des Modulmeßstandes mit den o.g. Elektronikkomponenten.

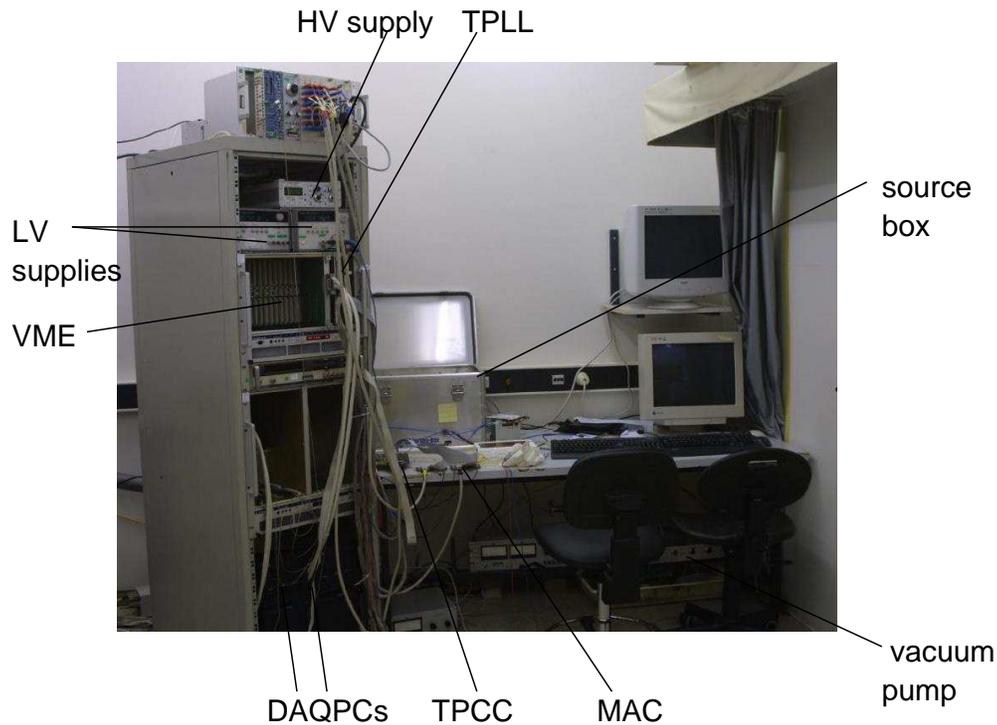


Abbildung 4.6: Modulmeßstand mit DAQPCs, VME, LV und HV-Geräten

4.3.2 Quellenmessungen

Zur Überprüfung der Bumpbondverbindungen zwischen Sensor und FE-Chip werden mit jedem produzierten Modul Quellenmessungen durchgeführt. Gammaquanten, die im FE-Chip ein Signal hinterlassen, müssen im Sensor Ladungsträgerpaare generiert haben, die wiederum über den Bumpbond in die entsprechende FE-Zelle gelangt sein müssen. Zu diesem Zweck wurden vier 41.6 MBeq ^{241}Am Quellen zu einer Gesamtlänge von 60 mm aneinander gereiht. Dies entspricht der Länge des Sensors und ermöglicht eine möglichst homogene „Ausleuchtung“ des Moduls. ^{241}Am hat u.a. eine 59,5 keV Gammalinie. Die Produktion eines Ladungsträgerpaares benötigt 3,69 eV.

Somit werden im Falle einer Gammaabsorption 16.1 ke^- erzeugt. Dies liegt in der Größenordnung der theoretischen Ladungsdeposition von 26.4 ke^- [KRA04] und stellt daher eine experimentnahe Kalibrierungsüberprüfung dar. Aus Strahlenschutzgründen muß diese Messung innerhalb eines abgeschirmten Volumens stattfinden. Zur Abschirmung wird hier eine 2 mm dicke Bleiwandung verwendet. Zur Durchführung der Quellenmessung muß die Quelle mehrfach vom Testmodul heruntergenommen werden. Dazu wurde ein Quellenhalter entwickelt, der die Quelle mit 1 cm dicken Kupferwandungen umschließt. Zu Meßzwecken kann der Boden des Quellenhalters schnell entfernt werden. So ist der Operator zu keiner Zeit der Strahlung ausgesetzt.

4.3.3 Burn-in-Meßstand

Das Burn-in ist ein in der industriellen Elektronikfertigung durchaus gängiges Verfahren, um die Zuverlässigkeit von elektronischen Erzeugnissen zu überprüfen, Schwachstellen in der Produktion aufzudecken und die „Infant Mortality“ der elektronischen Erzeugnisse herauszufinden. An ATLAS-Pixelmodule sind in diesem Sinne besonderes hohe Zuverlässigkeitsanforderungen zu stellen: Zum einen aufgrund der Laufzeit von ca. 10 Jahren und zum anderen, weil der Austausch eines oder mehrerer Module nach Inbetriebnahme rund 3 Wochen Arbeitszeit am Detektor erfordert, zuzüglich der Abklingdauer kurzlebiger Aktivierungen. Wartungsarbeiten dieser Art sind nur einmal pro Jahr möglich.

Aus diesem Grund werden alle Pixelmodule, die Einsatz im Detektor finden, einem Burn-in unterzogen. Hierbei handelt es sich um ein Verfahren, bei dem das Modul thermischem Streß ausgesetzt und dabei über einen langen Zeitraum betrieben wird. In einer Klimakammer werden parallel bis zu 16 Module innerhalb von ca. 48 Stunden von -30°C bis $+30^\circ\text{C}$ zehnmals erwärmt und wieder abgekühlt. Zur Steuerung des Vorgangs, zur DAQ und zum Monitoring der Module wird prinzipiell das in Abb. 4.5 dargestellte Meßsystem verwendet. Bei diesem ist die Anzahl

der Module, die maximal gleichzeitig angeschlossen werden können, allerdings limitiert auf vier Module. Um die Multiplizität des Burn-in Systems zu erhöhen, wird zusätzlich zur in Abb. 4.5 dargestellten DAQ noch das SuRF⁶-Board verwendet. Dies ist ein kollaborationsentwickeltes Board, das es ermöglicht, bis zu vier Module im Burn-in zu monitoren und mit Spannung zu versorgen und eins davon jeweils auszulesen. Bis zu vier SuRF-Boards können an eine TPCC angeschlossen werden. Die Module werden analog zum Modultest mittels type0-Kabeln mit den Board verbunden. Die LV und die HV wird in das Board gespeist. Die LV wird aktiv geregelt, die HV wird nur durchgeleitet und geschaltet. Ferner wird der zugehörige Strom gemessen.

Zusätzlich ist das SuRF-Board noch mit Schutzfunktionen ausgestattet, damit im Falle von Übertemperatur, Überspannung oder Überstrom das Modul keinen Schaden nimmt. Das SuRF-Board wird mit dem DAQ-PC über den USB-Port des PC's verbunden. Während des Prozesses werden die Module unter Spannung gehalten und Performancetests durchgeführt. Abb. 4.7 zeigt schematisch den Aufbau des Burn-in Setups.

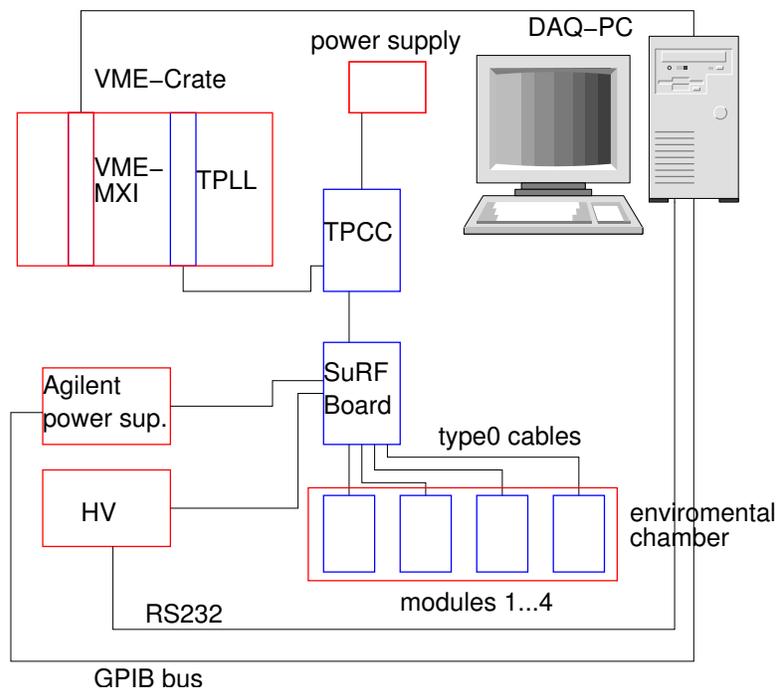


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung des Burn-in Setups, kollaborations-
designte Elektronik in blau, kommerzielle Geräte in rot

⁶Supply & Readout Fanout

Gesteuert wird der Burn-in Prozess über ein Skript namens AmBush. Dieses regelt das Datenmultiplexen des SuRF-Boards und Zugriffe auf die TurboDAQ Software, die wiederum das HV- und das LV-Gerät steuern kann.

Nach jeder Temperaturänderung werden jeweils alle Module im Burn-in einem digitalen Test aller Pixel unterzogen mit verschiedenen Auslesetaktungen und je einem Schwellenscan. Jeder Pixel wird jeweils mit und ohne Biasspannung getestet. Diese Daten werden von der TurboDAQ Software aufgezeichnet. Abb. 4.8 zeigt den verwendeten Weiss-Klimaschrank mit den LV-Geräten für die Module und das SuRF-Board. Das SuRF-Board ist vertikal an der Klimaschrankseite montiert.

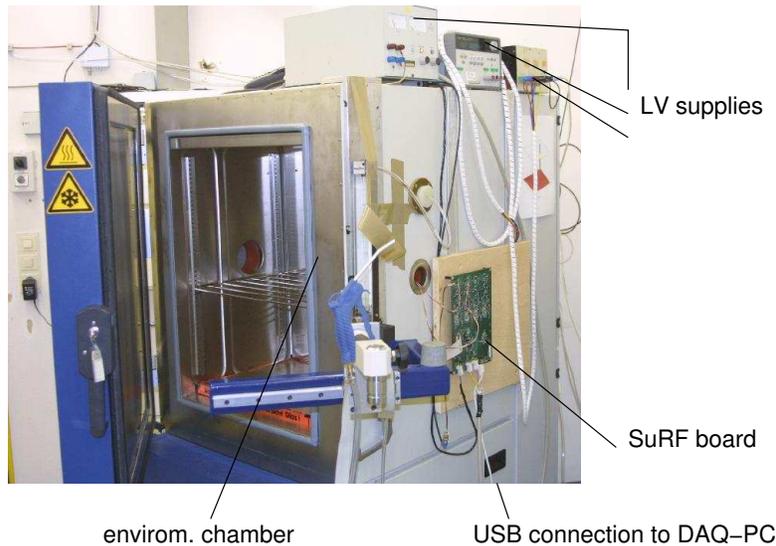


Abbildung 4.8: Klimakammer und Surfboard für den Burn-in Prozeß

4.4 Baremodulemeßstand

Baremodule werden nach dem Flip-Chip-Prozess einem Eingangstest unterzogen. Ziel dieses Tests ist es zu überprüfen, ob ein Chip während der Herstellung Schaden genommen hat und ob die Bumpverbindungen vollständig sind. Vereinzelt, offene Bumpverbindungen können toleriert werden, flächenhafte Bumpfehler können nicht akzeptiert werden. Defekte Chips können bei den Herstellern der Baremodule reworked, d.h. ausgewechselt, werden, ohne daß der Sensor oder andere Chips Schaden nehmen. Aus diesem Grund müssen Baremodule in staubreduzierter Umgebung behandelt und gelagert werden, da bei Handhabung aufgebraachte Staubpartikel, die größer als die Bumpbonds sind, die Verbindung des Chips zum

Sensor verhindert werden kann. Einzelne Bereiche des Sensors könnten dann aufgrund eines Staubpartikels nicht kontaktiert werden. Die zu diesem Zweck nötige Laminar-Flowbox beschreibt der nächste Abschnitt.

4.4.1 Laminar-Flowbox

Um eine staubreduzierte Arbeitsumgebung zu schaffen, wurde in Dortmund mit eigenen Werkstattmitteln eine Laminarflowbox gebaut. Diese umgibt einen Labortisch zu drei Seiten mit kunststoffbeschichteten Holzplatten, die Frontseite ist mit einer rollbaren Frontblende abdeckbar. Die obere Abdeckung beinhaltet ein Luftgebläse mit Feinstfilter, der einen hochreinen laminaren Luftstrom auf die Arbeitsfläche bewirkt. Eine Laminarflowbox kann die Staubbelastung pro Luftvolumen von über 1 000 000 Partikel/m³ Raumluft auf 10 000 Partikel/m³ verringern. Abb. 4.9 zeigt eine Photographie der Laminarflowbox im Dortmunder Modullabor. Innerhalb der Box befindet sich ein 3D-Verfahrtisch mit Mikrometerpräzision.

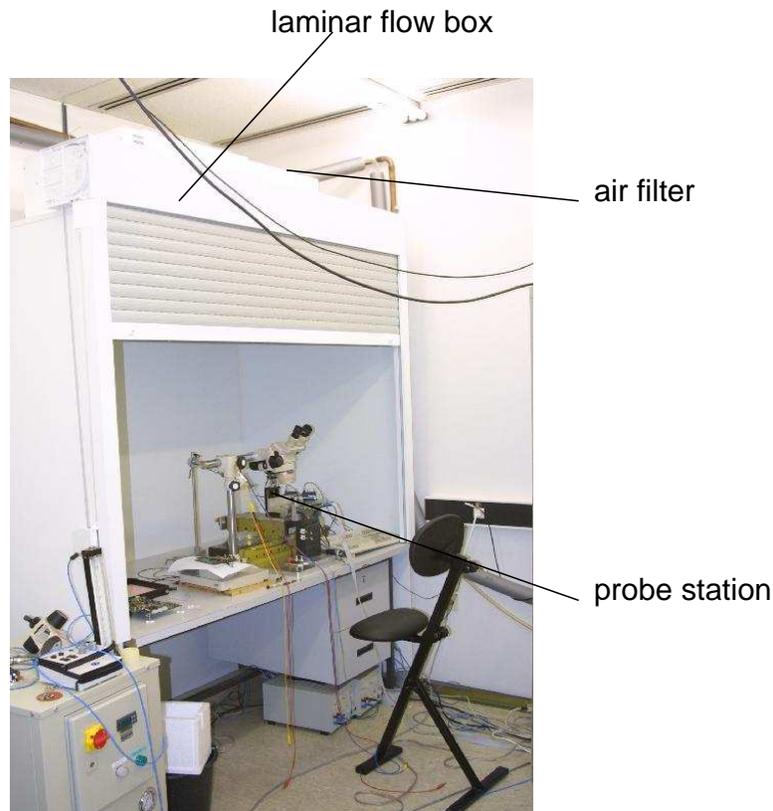


Abbildung 4.9: Laminar-Flowbox im Dortmunder Modullabor

4.4.2 3D-Verfahrtisch

Zur Kontaktierung aller 32 Bondpads eines FE-Chips wird eine von der Kollaboration designte Nadelkarte, deren Nadelspitzen in einer Reihe montiert sind und einen Abstand von $150\ \mu\text{m}$ wie die Bondpads des FE-Chips haben, verwendet. Hiermit kann ein Chip ohne Wirebonds zu Testzwecken kontaktiert werden. Unmittelbar vor dem 3D-Verfahrtisch wird die Nadelkarte mit einer mechanischen Fixierung positioniert. Das Baremodul wird auf dem 3D-Verfahrtisch mit einem Vakuumchuck fixiert.

Die Positionierung des Baremodules unterhalb der Nadelkarte geschieht über drei Schrittmotoren, die entweder manuell oder mittels einer in Dortmund entwickelten Software gesteuert werden und eine Bewegung des Tisches in den drei Raumrichtungen ermöglicht. Eine Winkeljustage, damit die Nadelreihe beim Kontaktieren des Baremodules zeitgleich mit allen Nadeln aufsetzt, ist mit einer manuellen Mikrometerschraube gewährleistet.

Ein einmaliges manuelles Anfahren des ersten Chips und des letzten Chips einer Reihe ist nötig, um die Koordinaten einer FE-Reihe einzugeben. Aufgrund der Präzision des Flip-Chip Verfahrens sind die Koordinaten der sechs mittleren Chips einer FE-Reihe rechnerisch bestimmbar. Ebenso ist die Winkeljustage nur einmal pro FE-Reihe nötig.

Die beiden äußeren Nadeln der Nadelkarte sind jeweils mit einer weiteren Kontaktnadel gekreuzt montiert, so daß sich beide Nadeln beim Aufsetzen nicht mehr berühren und somit einen elektrischen Kontakt öffnen, der mittels einer Vetschaltung die Schrittmotoren, die in der Modulebene arbeiten, blockiert. So kann ein Kratzen der Nadeln auf den Modulen verhindert werden.

Die Baremodulesoftware kann zusätzlich zu den mechanischen Veränderungen des 3D-Tisches mit Makros auf die Modultestsoftware TurboDAQ zugreifen und so elektronische Tests durchführen. Dies beschreibt Abschnitt 4.5.1.

Um das Setup frei von Vibrationen zu halten, die Kratzer seitens der Nadeln auf den FE-Wirebondpads hervorrufen können, steht der Labortisch auf Gummivibrationsdämpfern. Um mechanische Einflüsse des Operators möglichst gering zu halten, ist der Labortisch mit 50 kg Blei beschwert. Die optische Kontrolle der FE-Chip Kontaktierung erfolgt mit einem Stereomikroskop, das es erlaubt, Abstände in der Tiefe abzuschätzen. Abb. 4.10 zeigt eine Photographie des Verfahrtisches.

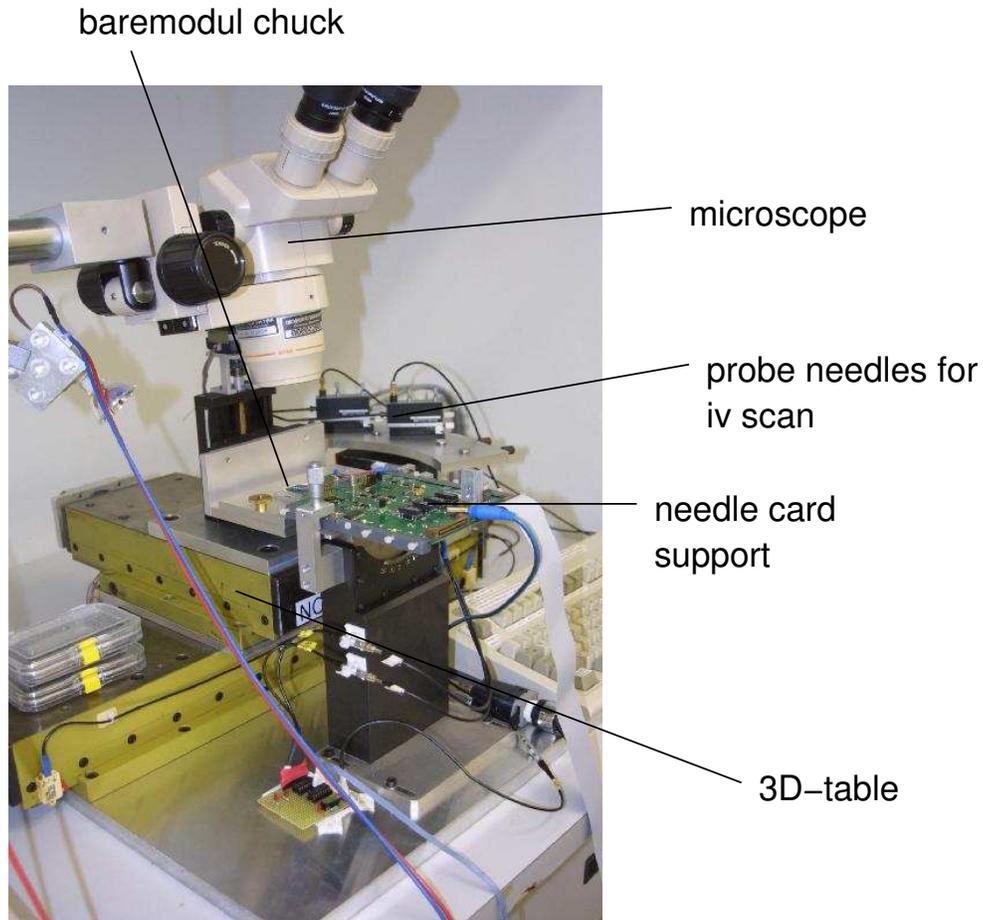


Abbildung 4.10: 3D-Verfahrtisch mit Vakuumchuck für die Baremodulfixierung

4.5 Modultestschritte

Mit den in Abschnitt 4.3 beschriebenen Meßständen können die in Abschnitt 4.2 bereits erwähnten Testschritte durchgeführt werden. Dies sind der BARE Test, der FlexMCC Test, der ASSY Test, der BURN Test und der FLEX Test, die nun nachfolgend näher erläutert werden.

4.5.1 BARE Test

Beim Baremodultest müssen die Funktionsfähigkeit jedes Chips und die Bumpverbindungen aller Pixel sowie die Funktionalität des Sensors überprüft werden. Als Sensortest wird eine IV-Kurve gemessen, wobei der Sensor in Sperrichtung

betrieben wird. Mit einer Kontaktnadel wird manuell die Sensor-p-Seite des Baremoduls negativ kontaktiert, der Erdkontakt geschieht über die Bumps auf der n-Seite des Sensors. Der Leckstrom darf für eine Akzeptanz des Baremoduls nicht mehr als $10 \mu\text{A}$ bei 150 V betragen und unterhalb von 400 V keine Durchbrüche zeigen. Weitere Details zu diesem Test liefert [WEB04]. Defekte eines einzelnen Chips äußern sich vordergründig durch eine erhöhte Stromaufnahme: Der Strom der Digitalspannung VDD sollte ca. 10 mA und der Strom der Analogspannung sollte ca. 6 mA betragen. Nach Konfigurierung des betreffenden Chips muß die Stromaufnahme ca. sechsfach erhöht sein.

Der nächste Testschritt ist der Global Register Test. Hierbei wird über die Dateneingangsleitung DI (Data In) eine Testbitfolge gesendet, die mit dem Output der Datenausgangsleitung DO (Data Out) identisch sein muß. Um diesen Test zu bestehen, muß die Differenz der Bitfolgen Null sein.

Der nun folgende Pixel Register Test sendet eine Testbitfolge in jeden FE-Pixel; ein einzelner Pixelausfall bedingt den Ausfall des ganzen Columnpairs. Der Digital Injection Test gibt 100 Pulse in jeden Pixel. Bei intakter Ausleseketten auf dem Chip müssen dementsprechend 100 Hits vom Diskriminator erkannt werden; weniger Hits sind ein Zeichen für einen defekten Pixel.

Als letzter Test des Baremodultests wird ein Schwellenscan durchgeführt. Hierbei wird die Ansprechschwelle jedes Pixeldiskriminators gemessen. Der FE generiert jeweils 100 Ladungspulse die in 200 Schritten von $0 e^-$ bis $9000 e^-$ gesteigert werden. Bei Überschreiten der Schwelle sollten idealerweise 100 Hits am Diskriminator gemessen werden. Die reale Antwortfunktion des Diskriminators hat naturgemäß eine endliche Steigung. Ihre Verteilung wird mit einer integralen Gaußfunktion gefittet.

$$f_{int} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty x e^{-t^2} dt \quad (4.1)$$

Per Definition ist der Schwelle der Wendepunkt der Funktion, bei dem die Hälfte der injizierten Hits die Eingangsschwelle überwindet. Das Rauschen eines Pixels wird durch die Steigung der Fitkurve, die zwischen dem Überschreiten von 30 % und 70 % der injizierten Hits anliegt, bestimmt. Abb. 4.11 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen der ideal erwarteten Diskriminatorantwort und der an die reale Diskriminatorantwort angefitteten, integralen Gaußfunktion.

Beim BARE Test werden ein Schwellenscan mit und einer ohne angelegte Biasspannung durchgeführt. Ohne Biasspannung fließen injizierte Ladungen in den Sensor, sofern die Bumpverbindung besteht. Eine orts aufgelöste Noiseverteilung zeigt somit die Stellen der defekten Bumps durch ein hohes Noise.

Das Akzeptanzkriterium für ein Baremodul liegt bei maximal 50 Bumpdefekten pro Chip oder höchstens 150 Bumpdefekten pro Modul. Außerhalb dieser Tole-

ranz liegende Baremodule müssen vom Bumpvendor überarbeitet werden, indem ein oder mehrere fragliche Chips ausgetauscht werden.

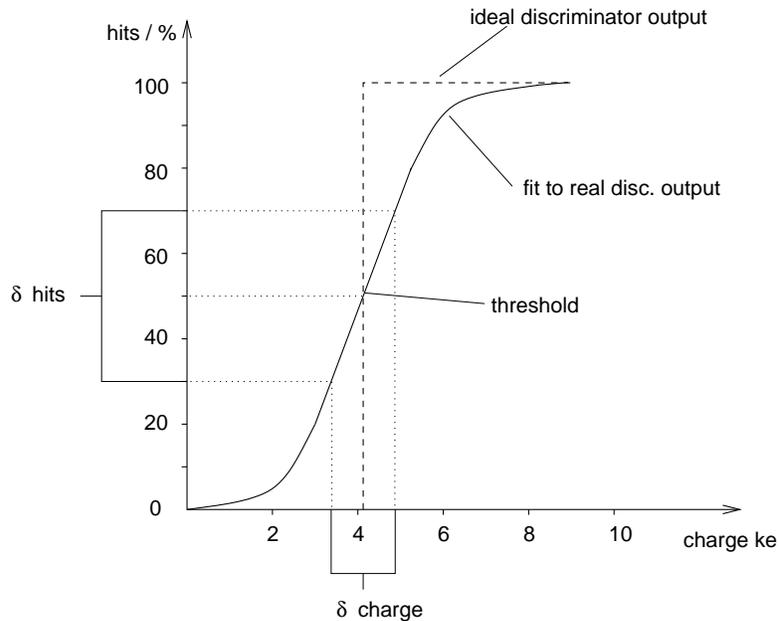


Abbildung 4.11: Ideale Antwortfunktion und Fit an die reale Antwortfunktion des Pixeldiskriminators beim Schwellesscan

4.5.2 FlexMCC Test

Der FlexMCC Test wird nach dem Wirebonden des MCCs und des Pigtails mit dem Flex durchgeführt. Der Preis dieser Komponenten beträgt nur einen Bruchteil dessen des Baremoduls, so daß das FlexMCC vor der Baremodulmontage einem Test unterzogen werden muß, da ein defektes FlexMCC von einem Baremodul nicht ohne Schädigung zu trennen ist. Die Kontaktierung geschieht hierbei über das Pigtail und dessen Mikrostecker. Dieser wird mit einem type0 Kabel mit der MAC (Abb. 4.5) verbunden, damit der DAQ-PC die Receiver- und Emitterfunktionalitäten und das Eventbuilding des MCC testen kann. Das Auslesen des MCC kann auf zwei Datenleitungen (DTO und DTO2) mit zwei unterschiedlichen Datenraten von 40 MHz und 80 MHz geschehen. Im ATLAS-Experiment werden beide Datenleitungen mit der 80 MHz Rate nur in der inneren der drei Pixellagen benötigt. Desweiteren wird die Digitalspannung VDD in 0,05 V Schritten von 1,8 V bis 2,5 V variiert, um die Anfälligkeit des verwendeten MCC auf Spannungsschwankungen zu überprüfen. Um den Test zu bestehen, sind volle Funktionalität beider Datenleitungen innerhalb des gescannten Spannungsbereiches nötig.

Der Spannungsverlust auf den LV-Leitungen wird mit einem zusätzlichen Widerstand gemessen. Dazu wird seitlich am PCB-Montageboard ein 4 Ohm Lastwiderstand kontaktiert, der die beiden Pole von VDDA verbindet, so daß ein Strom von rund 1 A fließt. Wenn die Zuleitungen einen relevanten zusätzlichen Übergangswiderstand haben, ist der Stromfluß geringer. VDD wird durch die Funktionalität des MCC überprüft. Spannungsverluste bei VDD werden mit den Arbeitsbereichen des MCC ermittelt.

4.5.3 ASSY Test

Der ASSY Test erfolgt nach dem Wirebonden und vor dem Burn-in Prozeß. Gemeinsam mit dem BURN Test sollen in einer Vor-Burn-in und Nach-Burn-in Analyse die Performanceänderung durch das Burn-in und Schädigungen des Baremoduls durch die Modulintegration erkannt werden. Alle Schritte des ASSY Tests werden bei 5°C Kühltemperatur durchgeführt.

Für die Sensoruntersuchung wird eine IV-Kennlinie aufgenommen, diesmal über den Pigtailstecker. Veränderungen des Leckstromes und der Durchbruchspannung zum Baremodultest sind hierdurch nicht zu erwarten. Schädigungen der FE-Chips äußern sich in erhöhten Strömen der Spannungen VDD und VDDA. Diese werden chipweise gemessen. Die Funktionsfähigkeit des MCC's wird analog zum FLEX Test überprüft. Zusätzlich wird zu diesem Zeitpunkt noch die Phase der Returnclock optimiert. Schadhafte Wirebonds oder ein MCC, der im Assemblyprozeß Schaden genommen hat, können hier noch erkannt und ausgetauscht werden.

Anschließend überprüft ein Digitalscan durch 10000 Ladungspulse pro Pixel das Readout eines FE-Chips. Als nächstes erfolgt nun ein Schwellenscan. Dieser kann durch eine interne und durch eine externe Pulsung durchgeführt werden. Die interne Pulsung, die jeweils im FE-Chip generiert wird, soll in einem Autotuningverfahren und zu späteren Kalibrierungen im ATLAS-Experiment verwendet werden. Die Genauigkeit dieses Verfahrens hängt von den Kapazitäten des FE-Chips ab und kann zwischen verschiedenen Chips schwanken. Die Kapazitäten der einzelnen Chips sind vom Chiptest auf Waferniveau bekannt. Durch die externe Injektion mit der TPCC kann das interne Injektionsverfahren bezüglich der Unterschiede zwischen den Chips und Pixeln kalibriert werden.

Bei einem Schwellenscan werden wie beim Flexitest 200 unterschiedliche Ladungen in jeweils 100 Ladungspulsen in jede FE-Zelle injiziert, um, wie in Abb. 4.11 dargestellt, bei Erreichen des Wendepunktes der S-Fitfunktion den Schwelle zu bestimmen und mit einem Algorithmus alle Schwellen auf den Sollwert von 4000 e⁻ zu kalibrieren. Das resultierende Datenfile wird abgespeichert.

Nach diesen Tests sind alle Funktionalitätsüberprüfungen, die FlexMCC und Baremodul jeweils vor dem Integrationsprozeß besaßen, wiederholt.

Als nächstes erfolgt eine ToT-Kalibrierung, ein Verfahren, das es erlaubt, die ToT

Information der Ladungsdeposition eines Teilchens in Ladungseinheiten von e^- auszudrücken. Dazu werden 20 verschiedene, ansteigende Ladungsmengen bis zu $25 ke^-$ in jeden Pixel injiziert, wodurch das ToT kalibriert wird. Der Feedback Current I_{fb} , der nach Abb. 3.8 den Ladungssammlungskondensator eines Pixels nach einem Teilchendurchgang entlädt, wird im IFDAC Scan nun derart eingestellt, daß jeder Ladungssammlungskondensator bei einer Ladung von $20 ke^-$ nach 30 Bunchcrossings (je 25 ns) wieder entladen ist. Da die maximale Entladezeit $120 \cdot 25 ns$ beträgt, können so auch die deponierten Ladungen mehrerer MIPs detektiert werden. Wegen des Einflusses des Feedback Stroms auf den Schwelle, muß der Schwellenscan nach dem IFDAC Scan wiederholt werden.

Die Umrechnung eines ToT-Wertes in Einheiten von e^- geschieht über die numerische Beziehung:

$$ToT = a + \frac{b}{c + Q} \quad (4.2)$$

- a, b, c – numerisch zu bestimmende Konstanten
- Q – injizierte Ladung
- ToT – Time over Threshold

Analog zum BARE Test liefert ein Schwellenscan auch die orts aufgelöste Verteilung des Noise. Eine Differenz der Noiseverteilungen mit und ohne angelegte Biasspannung liefert außerdem die Verteilung der offenen Bumpstellen (vgl. Abschnitt 4.5.1).

Der anschließende Crosstalkscan wird durchgeführt, um Bump anomalies wie Deformationen oder Fehlplazierungen oder zu hohe kapazitive Kopplungen zwischen zwei Pixeln zu entdecken. Hierbei wird ein Schwellenscan mit einer erhöhten Ladung von $300 ke^-$ durchgeführt, bei dem allerdings nur die Nachbarpixel des gegenwärtig gepulsten Pixels ausgelesen werden. Wegen der kapazitiven Kopplung der Pixel untereinander werden ca. 1-2 % der Ladung in Nachbarpixeln detektiert. Um die Eingangsschwellen der Nachbarn zu überwinden, ist die o.g. hohe Ladung nötig. Wenn der Ladungstransfer überdurchschnittlich groß ist, liegt u.U. ein Bumpdefekt vor.

Zusätzlich wird die Spannungsstabilität des Analogteils des FE-Chips mit mehreren Schwellenscans bei unterschiedlichen Versorgungsspannungen und Clockfrequenzen ermittelt.

Die letzte Untersuchung des ASSY Tests bildet die Quellenmessung. Mit dem Digitalscan kann der Digitalteil jeder Pixelzelle geprüft werden, mit der Noisebeobachtung beim Schwellenscan werden die Bumpverbindungen getestet, aber erst

mit dem sogenannten Sourcescan wird der komplette Analogteil überprüft. Hierbei wird das Modul in einem Selftriggermodus betrieben, der den Hitbus, das logische OR aller Pixel, als Trigger verwendet. Sehr rauschbehaftete Pixel, sogenannte „noisy Pixel“, verhindern allerdings eine sinnvolle Auslese der γ -Quanten, da der Trigger mit dem Rauschen der „noisy Pixel“ überlastet ist. Diese müssen vorher maskiert, d.h. per Software deaktiviert werden. Zum Auffinden der „noisy Pixel“ wird ein „Sourcescan ohne Source“ durchgeführt, mit einem Trefferlimit von 1000 Hits pro FE-Chip. Pixel, die hierbei mehr als zehn Treffer verbuchen, werden als „noisy“ maskiert. Dieses Verfahren muß u. U. mehrfach durchgeführt werden, bis alle „noisy“ Pixel gefunden sind. Alternativ kann der Noise-Occupancyscan durchgeführt werden, bei dem alle Pixel detektiert werden, die mehr als 10 % aller Trigger im Hitbus verursachen. Mit der Quelle aus Abschnitt 4.3.2 dauert ein Sourcescan mit mindestens 500000 Einträgen ca. 50 Minuten. In Abb. 5.1 ist die Hitmap eines Sourcescans zu sehen: Die Pixel mit den geringen Einträgen werden von den Kapazitäten und Widerständen des Flexes abgeschirmt.

4.5.4 BURN Test

Der BURN Test wird nach dem Burn-in durchgeführt. Während des Burn-ins werden, wie in Abschnitt 4.3.3 bereits erwähnt, nach jeder Temperaturänderung ein Schwellenscan mit und ohne Biasspannung und ein Digitalscan bei verschiedenen Auslesetakten durchgeführt. Die Daten dieser Scans sind nicht weiter wertvoll für die Modulproduktion. Wichtig ist allerdings, daß das Modul während des Burn-ins unter Betriebsbedingungen operiert. Die Tests, die anschließend im BURN Test durchgeführt werden, entsprechen denen des ASSY Tests. Von Interesse sind hier die Differenzen der Ergebnisse des ASSY- und BURN-Tests, da diese Schwächen offenbaren, die durch den Burn-in Prozeß hervorgerufen wurden.

4.5.5 FLEX Test

Der FLEX Test ist die abschließende Charakterisierung des Moduls und soll die optimalen Betriebsparameter des betreffenden Moduls für den Einsatz im ATLAS-Experiment liefern. Daher werden alle Tests des FLEX Tests bei -10° C durchgeführt. Das Meßprogramm umfaßt alle Tests des ASSY Tests und zusätzlich einige weitere Tests, die im folgenden näher beschrieben werden. Durch unterschiedliche Anstiegszeiten des Ladungssammlungskondensators für verschiedene Ladungsdepositionen kann es zu Fehlzuordnungen von Hits zu verschiedenen Bunch-Crossings führen, da die unterschiedlichen Anstiegszeiten eine Verzögerung des Diskriminatoransprechens verursachen, die in der Größenordnung von 25 ns liegt. Dieser Effekt wird als Timewalk bezeichnet. Ladungsdepositionen, die so gering sind, daß sie einem Event aufgrund des Timewalks nicht zugeordnet wer-

den können, werden so nicht ausgelesen. Dies führt zu einer effektiven Schwelle, die über dem nominellen liegt. Mit der TurboDAQ kann dieser Effekt gemessen und über den ToT-Prozessor im FE-Chip korrigiert werden. Bei Injektion von verschiedenen hohen Ladungen werden die Antwortzeiten des Vorverstärkers gemessen. Dieser Effekt wird durch eine Verzögerungseinrichtung des ToT-Prozessors behoben.

Meßbar ist dieser Effekt als „intime threshold“. In diesem Schwellenscan wird nur ein Trigger für jeweils ein Event akzeptiert und analog zum Schwellenscan eine steigende Ladungsmenge in jede FE-Zelle injiziert. Das Ergebnis ist eine Verteilung mit einem S-Fit, dessen Wendepunkt (=Schwelle des Pixels) ca. $1,5 \text{ ke}^-$ höher liegt als beim Schwellenscan, bei dem mehrere Triggersignale zugelassen werden.

Als nächstes wird der Arbeitsbereich der digitalen Spannung VDD, der analogen Spannung VDDA und der Clock XCK getestet. Dafür werden einige der Vor-Tests wiederholt und dabei die o.g. Größen variiert. VDD wird von 1,6 bis 2,6 Volt in 0,03 Voltschritten verändert. Bei jeder neuen Spannung wird ein Digitalscan mit jeweils nur 100 Pulsen pro Pixel durchgeführt. Dies erfolgt bei zwei verschiedenen Einstellungen des Triggerdelays und allen Kombinationen der Auslesetaktung (jeweils 40 und 80 MHz auf einer und auf beiden Datenausgangsleitungen).

Für die Überprüfung des VDDA Arbeitsbereiches werden bei 1,5 und 1,8 Volt je ein Schwellenscan und ein Intime-Schwellenscan durchgeführt. Wenn mehr als 10 % der S-Fits ein χ^2 von mehr als 50 haben, kann das betreffende Modul nicht akzeptiert werden.

Die XCK (x-Clock) ist die 40 MHz Taktung mit der die Auslese des gesamten ATLAS-Detektors geschieht. Sie wird zu Labortestzwecken von der TPLL generiert. Zur Überprüfung des Arbeitsbereiches der XCK kann diese auf 45 MHz oder auf 50 MHz gesetzt werden. Sofern das Modul mit der 50 MHz Auslesetaktung nicht funktionsfähig ist, geschieht ein zweiter Versuch mit 45 MHz. Scheitert auch dieser, wird das Modul nicht für den Detektoreinbau akzeptiert.

Jeder Chip eines Moduls besitzt eine Funktion, die Schwellen aller Pixel des Chips global zu variieren. Der GDAC⁷ bietet die Möglichkeit mit einem 5-bit Raster die Eingangsschwellen aller Pixel eines Chips zu verändern. Hierfür muß jedes Bit getestet werden mit einem Schwellenscan bei jedem GDAC-Wert. Der tiefste und höchste erreichte durchschnittliche Schwelle wird gespeichert. Bitfehler im GDAC sind nicht zulässig.

⁷global digital analog converter

4.6 Produktionslinie und Qualifizierungsverfahren

Die komplette Produktions- und Testreihenfolge ist für den Modulproduktionsstandort Dortmund noch einmal in Abb. 4.12 dargestellt. Blaue Pfeile bedeuten hierbei Lieferungen zwischen zwei Stationen, rote jeweils Zurückweisungen wegen nicht passierter Tests. Die Produktions- und Testreihenfolge speziell für Dortmund ist jeweils grau unterlegt. Die Benennung der Testschritte orientiert sich an den bereits erläuterten Testverfahren.

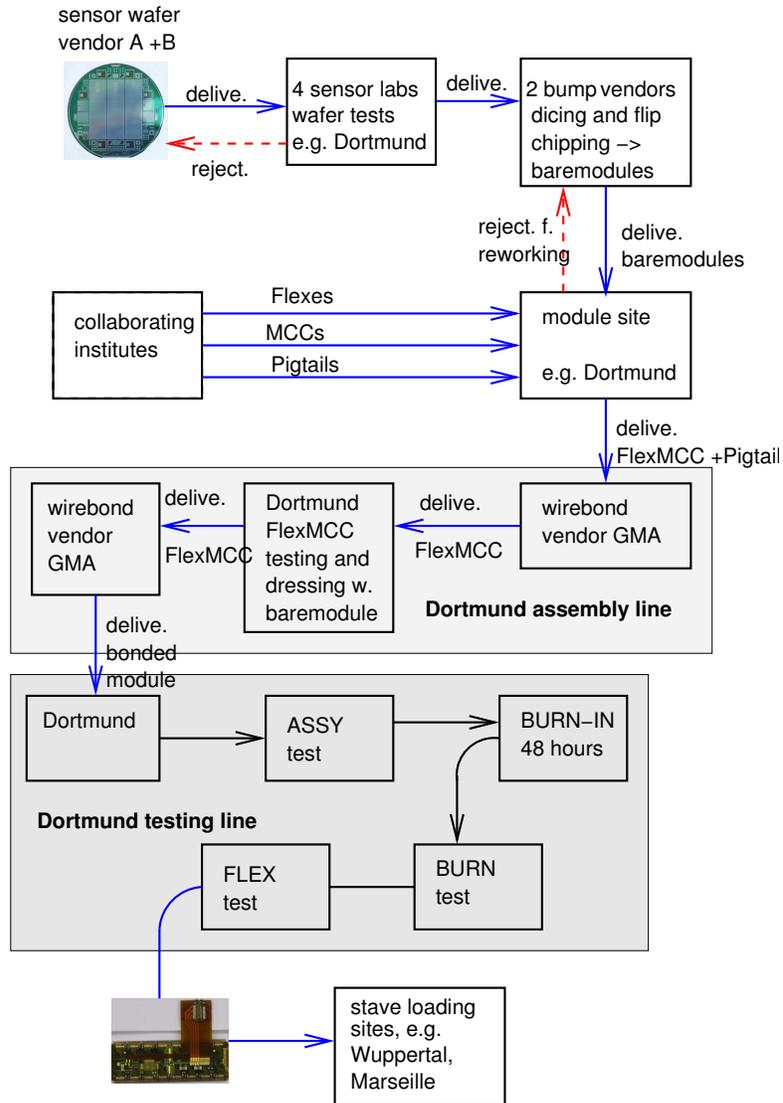


Abbildung 4.12: Flußdiagramm mit den Produktions- und Testschrittfolgen für den Produktionsstandort Dortmund

4.6.1 Produktionsorganisation

Die Dortmunder Gruppe innerhalb ATLAS-Pixel wird 250 bis 300 Produktionsmodule bauen, testen und charakterisieren, voraussichtlich innerhalb von 1 bis 1,5 Jahren ab Herbst 2004. Dies bedeutet eine Produktionsrate von 5 Modulen pro Woche. Als Teil dieser Arbeit wurde in Dortmund eine Produktions- und Testlinie implementiert in Zusammenarbeit mit den Kollaborationspartnern, dem Physika-

lischen Institut der Universität Bonn und dem Fachbereich Physik der Universität Siegen.

Dennoch ist diese Produktionsreihenfolge innerhalb der ATLAS-Pixelkollaboration einzigartig. Durch die enge Zusammenarbeit mit der kommerziellen Wirebondfirma GMA konnte die Anschaffung eines Wirebondautomaten und die damit zusammenhängende, mehrmonatige Einarbeitung in die Bedienung eines solchen Gerätes vermieden werden, was Kosten und Zeit sparte.

Kalkulation des Integrationsaufwandes

Die Tests von Baremodulen benötigen inklusive Handling des Baremoduls weniger als 2 Stunden pro Stück, so daß die für eine Produktionswoche benötigten Baremodule innerhalb eines „Personentages“ getestet werden können. Das Bestücken von 10 Flexen mit MCCs und Pigtails ist ebenfalls von einer Person innerhalb eines Werktages zu erledigen. Die Anzahl der Werkzeuge und die Heizkapazitäten zur Kleberaushärtung sind auf Losgrößen von 10 Flexen bzw. Modulen ausgelegt. Das Wirebenden durch die Firma GMA geschieht in ca. 14 tägigen Intervallen, der Transport durch persönliche Lieferungen, mit einer Fertigungszeit von weniger als zwei Wochen, so daß die in Dortmund gefertigten Flexe in gleicher Produktionsrate von der GMA gebondet werden. Der zeitliche Testaufwand eines FlexMCC und die visuelle Inspektion der Wirebonds ist gegenüber dem Baremodultest klein.

So stehen mit 1,5 Personentagen pro Woche die Komponenten für die Wochenproduktionsrate von 5 Modulen zur Verfügung.

Die Integration von FlexMCC und Baremodul geschieht in 5er Losen, da inklusive Vorbereitungszeiten 10 Module nicht an einem Tag verrarbeiten sind. In ebenfalls 14 tägigen Lieferungen werden zehn Module zur GMA gebracht, die diese innerhalb dieser Zeit verarbeitet.

Um den Wochenoutput an Modulen zu produzieren, werden etwa 2,5 Personentage benötigt. Der personal- und zeitintensivste Teil dieser Produktionslinie sind hierbei die Testschritte nach dem Wirebenden.

Kalkulation des Meßaufwandes

Der ASSY Test benötigt etwa einen Werktag eines Operators, kann aber in der Modularität vier durchgeführt werden und benötigt so 22 Stunden. der BURN Test benötigt rund einen Werktag für vier Module so daß nach diesem Werktag der rund 35 Stunden dauernde FLEX Test gestartet werden kann. Alle Messungen machen in der Summe vier Werktage des Operators aus und belegen den Meßstand während dieser Zeit auch nachts. Dies ergibt bei voller Parallelität vier Module

an vier Tagen. Somit können bis zu fünf Module von einem Operator innerhalb einer Woche getestet werden.

Parallel dazu kann der Burn-in durchgeführt werden. Mit voller Modularität können bis zu 16 Module innerhalb von 48 Stunden im Burn-in behandelt werden. In Dortmund sind allerdings aus Klimaschrankkapazitätsgründen nur drei SuRF-Boards vorgesehen, was den Burn-in auf zwölf Module gleichzeitig beschränkt. Der Burn-in Prozeß dauert insgesamt rund 48 Stunden und verläuft automatisiert und selbständig zwei Tage und Nächte.

Für den Burn-in und den Baremodultest ist ein weiteres Modulsetup, bestehend aus DAQ-PC, VME Crate, TPLL, TPCC, HV- und LV-Geräten usw., vorhanden. Dieses kann parallel zum anderen Setup verwendet werden.

Der Baremodultest für die Wochenproduktion von fünf Baremodulen benötigt ca. einen Arbeitstag, das Burn-in benötigt zwei Tage. Die Auslastung des ersten Setups liegt somit bei 5 Arbeitstagen pro Woche und der des zweiten Setups bei durchschnittlich 3 Arbeitstagen, so daß zwei Meßstandtage als Puffer für die Meßkapazitäten vorhanden sind.

Der personelle Bedarf für die Meßprozeduren innerhalb einer Woche nach der Modulintegration liegt somit bei 8 Personentagen.

Dies ergibt einen gesamtten Personalbedarf von 2,1 Vollzeitpersonenäquivalenten für Modulbau, -testen und -charakterisieren. Eine vollzeitäquivalente Person ist desweiteren nötig für organisatorische Belange der Modulproduktionslinie, Auswertung der Testdaten, Verbuchen von Sendungen und Updaten der Production Data Base (PDB). Details zur PDB werden in Abschnitt 4.6.3 erläutert.

4.6.2 Qualifizierungsverfahren als Modul-Produktionsstätte

Jede „Module Production Site“ muß einen zweistufigen Qualifizierungsprozeß durchlaufen. Die erste Stufe beinhaltet die Produktion von zehn Produktionsmodulen, d.h. Module der FE-Chip Generation I3 oder I2.1 und deren komplettes Test- und Charakterisierungsprogramm. Danach muß die jeweilige Production Site der Kollaboration über den Produktionsprozeß berichten und die Charakterisierungsergebnisse tabellarisch zusammenfassen. Die zweite Stufe des Qualifizierungsprozesses beinhaltet die Produktion und das Testen weiterer 50 Module. Sofern diese insgesamt 60 Module zufriedenstellend hergestellt wurden, gilt eine Assembly Site als qualifiziert für den weiteren Produktionsprozeß.

Die Qualifizierungskriterien für die 10 bzw. 50 Module beinhalten jeweils Veränderungen des Moduls während des Produktionsprozesses wie Sensoreigenschaften, eine Verschiebung der Durchbruchspannung, sichtbare mechanische Schäden und Anzahl defekter Pixel. Nicht von der Production Site verantwortete Schädigungen

eines Moduls, wie beispielsweise Transportschäden oder defekte Flexplatinen, werden der jeweiligen betrachteten Assembly Site nicht zu Lasten gelegt. Die Analyse der Testdaten der 10 „initial qualification modules“ der Dortmunder Produktionslinie werden in Kapitel 5 dargestellt.

Akzeptanzbedingungen für Produktionsmodule

Die in Tabelle 4.1 aufgelisteten Selektionskriterien geben Kriterien für einen einzelnen Pixel vor, nach denen entschieden wird, ob ein Pixel als funktionstauglich anzusehen ist oder nicht.

Kriterium	Grenzwerte
Digitale Injektion	100 %
Noisedifferenz mit/ohne HV	$\geq 100 e^-$
Noise (also OR-Bedingung mit o.g.)	$\leq 300 e^-$
Treffer des Quellentests	> 1
Maximum ToT-Vert. beim Quellentest	≥ 5
Maskiert beim Quellentest	nein
Noise	$\leq 5\sigma$
Abweichung von mittl. Schwelle	5σ des Mittelw.
χ^2 des S-Kurvenfits	0 bis 50
Leckstrom	5σ des Mittelw. der Leckstromvert.
χ^2 der ToT-Kalibrierung	0 bis 5
Diff. Schwelle-Intimeschwelle	$\leq 3000 e^-$
Quellentest-Ratenverh. zw. Nachbarpix.	≤ 10

Tabelle 4.1: Selektionskriterien und deren Grenzwerte für die Funktionstauglichkeit eines Pixels

Wenn die Meßdaten eines Pixels die in Tabelle 4.1 aufgelisteten Kriterien erfüllen, wird er als „good pixel“ bezeichnet, andernfalls als „bad pixel“. Die Anzahl an bad Pixeln geht als Parameter in die Selektionskriterien des ganzen Moduls ein. Tabelle 4.2 stellt die geforderten Parameter des Moduls mit den entsprechenden Grenzwerten dar.

Die Pixelkriterien stellen sicher, daß ein Pixel funktionsfähig ist und mit seinen Eckdaten innerhalb einer 5σ -Umgebung in der Verteilung der übrigen Pixel liegt. Somit sind einige der Pixelkriterien modulabhängig, da sie sich auf die Verteilung der Meßwerte der restlichen Pixel bezieht.

In den Selektionskriterien der Module werden die Anzahl der defekten Pixel berücksichtigt und zwei Sensoreigenschaften definiert, die im ungünstigen Fall das elek-

Kriterium	Grenzwerte
Anzahl bad Pixel	≤ 460
Durchbruchspannung des Sensors	$\geq 150 \text{ V}$
Leckstrom bei 150 V Biasspannung	$\leq 20 \mu\text{A}$
Schwellendispersion	$\leq 200 \text{ e}^-$
mittlerer Noise	$\leq 300 \text{ e}^-$
mittlere intime-Schwelle	$\leq 6000 \text{ e}^-$
intime-Schwellenstreuung	$\leq 300 \text{ e}^-$
Durchschnittlicher Crosstalk	$\leq 3\%$
Mittlere ToT-Wert eines MIP	20 bis 60
ToT-Wertstreuung	0,05 bis 3
VDD-Bereich	2,00 bis 2,30 V
XCK-Bereich	40 MHz und (45 oder 50) MHz
VDDA-Bereich	1,55 bis 1,75 V
GDAC-Bitfehler	0
min. mittl. GDAC-Schwelle	noch nicht definiert
max. mittl. GDAC-Schwelle	noch nicht definiert

Tabelle 4.2: Selektionskriterien und deren Grenzwerte für Produktionsmodule

tronische Rauschen erhöhen und u.U. eine völlige Depletierung des Sensors verhindern.

Noise und Schwellengrenzwerte limitieren die Streuung der Pixel untereinander. Die Spannungs- und XCK-Bereiche, die hier gefordert werden, sollen eine Funktionalität des Moduls bei Schwankungen der Niederspannungsversorgung und der Auslesetaktrate gewährleisten.

4.6.3 Production Data Base

Gegenwärtig, zu Beginn der Produktionsphase (Ende 2004), besteht der Pixeldetektor aus näherungsweise 70000 Einzelkomponenten, die zu großen Teilen einzeln getestet und nur mit definierten Komponenten verbaut werden dürfen.

Die unterschiedlichen Test- und Assemblysites müssen dazu uneingeschränkten Zugriff zu den Test- und Aufenthaltsdaten aller Komponenten haben. Dazu zählen insbesondere Testdaten von FE-Chips, Baremoduls und integrierten Modulen. Zu diesem Zweck wurde die Production Data Base (PDB) von der ATLAS-Pixel Kollaboration eingerichtet. Hierbei handelt es sich um einen Datenserver, der die Aufenthaltsdaten und Testergebnisse der Komponenten enthält, die mittels eines Webinterface und diverser Suchfunktionen zugänglich sind. Die Eingabe der Daten kann manuell über das Webinterface erfolgen oder per Upload über ein Java-basiertes Skript.

Physikalisch werden die Daten allerdings aus Kapazitätsgründen an den jeweiligen Testsites auf lokalen Servern gespeichert. Für ein Modul liegt das Testdatenvolumen bei mehr als einem Gigabyte pro Modul.

Ab dem Flip-Chip Prozeß existieren zusätzlich zur elektronischen Meßdatenerfassung, sogenannte Traveller. Dies sind Laufzettel, die vom Hersteller mit jeder Versendung des Moduls mitgeschickt werden. Auf diesen Travellern werden einzelne Test- und Dokumentationsschritte protokolliert und vor allem die manuellen Arbeitsschritte im Labor erfaßt. Hierzu werden sowohl für die elektronischen Tests, Baremodul-, ASSY-, BURN- und FLEX Test, als auch für alle manuellen Tests, wie visuelle Inspektion nach allen Assemblyschritten und Pulltests nach dem Bonden, Ergebnis, Datum und Namenskürzel des Operators notiert. Auch die Assemblyschritte werden mit Datum, Operatorkürzel und ggf. Kommentaren dokumentiert.

Zur Dokumentation des Produktionsstands führt jedes Institut ein Logbuch, das der Kollaboration auf einer internen Website zugänglich ist. Hiermit werden die Zeitprofile der Test- und Assmblyschritte aller Module einer Site dokumentiert. Die Zusammenfassung der Logbuchsheets aller Sites erlaubt eine zeitliche Planung und Prognosen des Modulbauprojekts. Abb 4.13 zeigt eine solche Dortmunder Logbuchseite.

Flex Module S/N	Bare Module S/N	Bump flavor	FE Wafer	Re-worked FEs	Bare Module Delivery	Bare module Test (BARE)	Assembly	Initial Elec. Test (ASSY)	Potting	Burn in	Initial Elec. Test (BURN)	Full Elec. Test (FLEX)	Bow(µm)	Failure codes	Repair (Y, N, NY=not yet)
1 510807	10160202	I2M	073	N	27.01.04	02.02.04	16.05.04	26.05.04	28.05.04	29.05.04	06.06.04	24.06.04	32.0	0000	N
2 510921	10162202	I2M	073	N	27.04.04	03.01.04	30.03.04	26.05.04	28.05.04	29.05.04	06.06.04	24.06.04	25.0	0000	N
1 510412	10180602	I2M	086	N	19.04.04	26.04.04	07.07.04	23.07.04	26.07.04	28.08.04	07.09.04				
2 510528	10181601	I2M	084	N	04.05.04	06.05.04	07.07.04	23.07.04	27.07.04	28.08.04	07.09.04		27.0		
3 510423	10260601	I2M	119	N	07.07.04	07.07.04	05.08.04	23.08.04	23.08.04	28.08.04	07.09.04		36.5		
4 510658	10232203	I2M	110	N	09.07.04	09.07.04	05.08.04	23.08.04	23.08.04	28.08.04	07.09.04				
5 510806	10221002	I2M	110	N	26.06.04	30.06.04	05.08.04	23.08.04	23.08.04	05.09.04	07.09.04		26.9		
6 510964	10214601	I2M	110	N	25.06.04	12.07.04	05.08.04	23.08.04	23.08.04	05.09.04	07.09.04		14.8		
7 510976	10231903	I2M	114	N	25.06.04	06.07.04	05.08.04	23.08.04	23.08.04	05.09.04	07.09.04		19.8		

Abbildung 4.13: Logbuchseite der ersten zehn Produktionsmodule der Dortmund Assmby Site, die Nummerierung beginnt zweimal bei „1“, da die ersten beiden FE-I2.1 Module sind, und hierbei gesondert durchnummeriert werden.

Kapitel 5

Analyse von Modultestdaten

Die Testdaten der zehn Qualifizierungsmodule, deren Produktion und Charakterisierung in die „initial qualification“ für den Produktionsstandort Dortmund eingingen, werden in diesem Kapitel vorgestellt. Hierbei handelt es sich um die Anwendung der Testverfahren, die in Kapitel 4.2 erläutert wurden.

5.1 ModuleAnalysis

Zur Analyse der Modultestdaten wurde ein von der Pixelkollaboration entworfenes Softwarepaket names ModuleAnalysis¹ verwendet. ModuleAnalysis ist ein in C++ geschriebenes Softwarepaket, das das Datenformat der TurboDAQ (vgl. Abschn. 4.3) verwendet und somit dessen Daten verarbeiten kann.

Der Datenausgabeteil der Software wird mit dem Analysepaket ROOT² realisiert. ModuleAnalysis schafft die Voraussetzungen für eine effiziente und standardisierte, produktionsbegleitende Analyse der Modultestdaten, da die in Tabelle 4.1 und 4.2 angeführten Selektionskriterien direkt in ModuleAnalysis eingehen und somit eine direkte Ausgabe des Ranking-Wertes eines betreffenden Modules ermöglicht.

5.2 Detailergebnisse eines Moduls

Exemplarisch werden nachfolgend die Meßergebnisse von Modul 510423 detailliert dargestellt.

¹siehe <http://hep1.physik.uni-bonn.de/MainFolder/documents/article/Research/DetectorsAndMicroelectronics/ATLASPixelDetector/ModuleAnalysisFrame>

²siehe <http://root.cern.ch>

5.2.1 Quellenmessung

Abb. 5.1 zeigt die ortsaufgelöste Verteilung des Quellenscans (hitmap). Die Bestrahlung erfolgte von oben, durch das Flex mit seinen Kapazitäten und Widerständen.

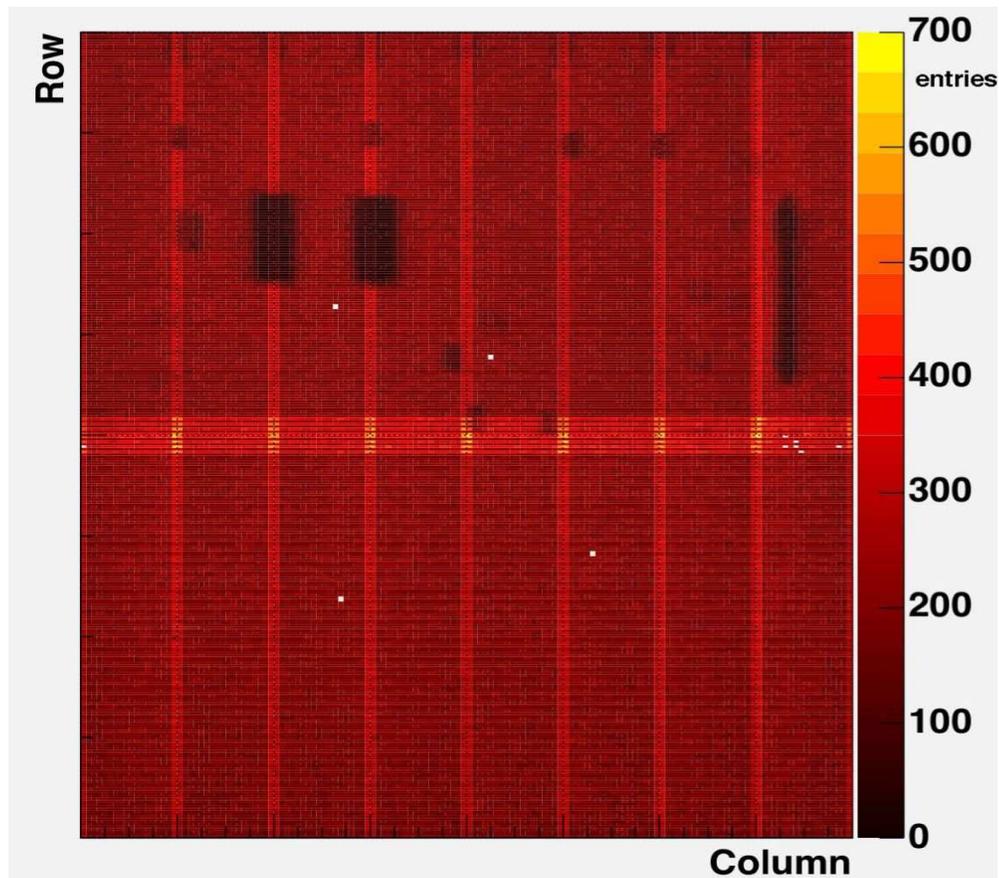


Abbildung 5.1: Ortsaufgelöste Verteilung des Quellenscans mit einer ^{241}Am Quelle des Moduls 510423. Erkennbar sind hier die 2 Reihen von je 8 Chips, die den Sensor kontaktieren. Jeder Chip hat 18 Spalten und 160 Reihen. Die weißen Stellen in der Abbildung sind defekte Pixel.

Deutlich sichtbar sind Schatten im Bereich der Kapazitäten auf dem Flex. Unterhalb der Kapazitäten finden sich ca. 50 Einträge pro Pixel, andere Standardpixel zeigen etwa 150 Treffer. Diese Reduktion von 0.66 läßt sich durch die Absorptionseigenschaften der Bauteile erklären. Diese sind ca. 2,0 mm hoch und bestehen überwiegend aus Silizium und oberflächlichen metallischen Kontakten. Nach [PDG02] liegt die Abschwächung von 59.5 keV Gammaquanten für diese

Schichtdicke in der Größenordnung von 0,8 und ist somit mit dem Meßergebnis verträglich.

Als vertikale Strukturen mit erhöhten Einträgen stellen sich die long Pixel dar, die aufgrund ihrer 1,5-fach größeren Oberfläche auch um diesen Faktor mehr Treffer zählen. Die längsachsenparallelen Strukturen zeigen die Treffer der ganged Pixel. Mit einer Auslesezeile sind jeweils zwei Pixel verbunden, dies erhöht die Treffer-rate dieser Auslesezeilen erwartungsgemäß um den Faktor zwei.

5.2.2 Schwellenmessung

Eine ortsaufgelöste und eine histogrammierte Darstellung der Schwelle zeigt Abb. 5.2. Hier sind die Unterschiede der Pixelsorten nicht sichtbar, da diese beim Tuning berücksichtigt werden. Die Breite der Verteilung beträgt hier $61 e^-$ und ist durch das erfolgte Tuning um ca. das zwanzigfache reduziert, was eine sehr homogene Verteilung der Schwelle über die gesamte Moduloberfläche bewirkt.

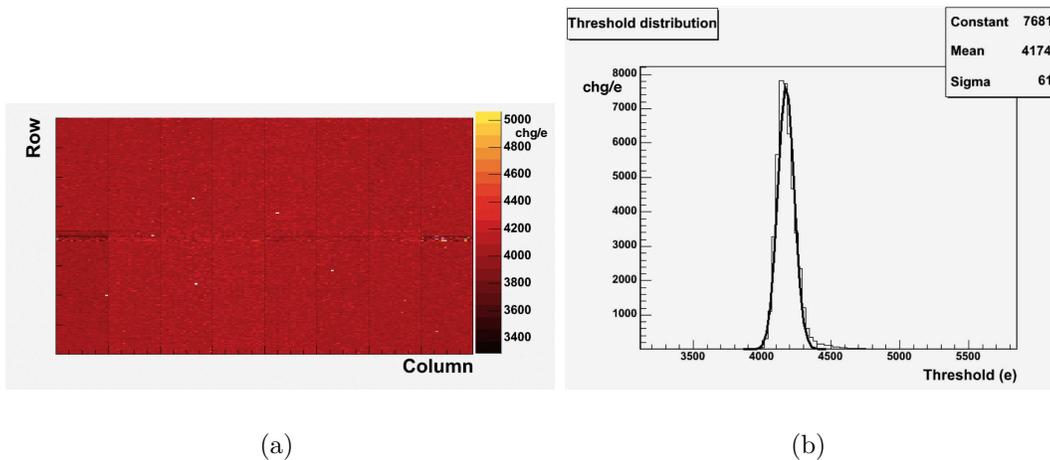


Abbildung 5.2: Ortsaufgelöste (a) und histogrammierte (b) Verteilung der Schwelle nach dem Tuning für Modul 510423

5.2.3 Rauschmessung

Anders verhält sich das Rauschen (Noise). Gemessen wird dies, wie bereits in Abschnitt 4.5.1 erläutert, mittels der Steigung der Antwortfunktion des Eingangsdiskriminators und setzt sich aus elektronischen, leckstrombedingten und kapazitiven Rauschanteilen zusammen. Die ganged und die long Pixel unterscheiden sich von

den Standardpixeln durch erwartungsgemäß höhere Noisewerte. Abb. 5.3 zeigt die Verteilung des Noise auf der Modulfläche.

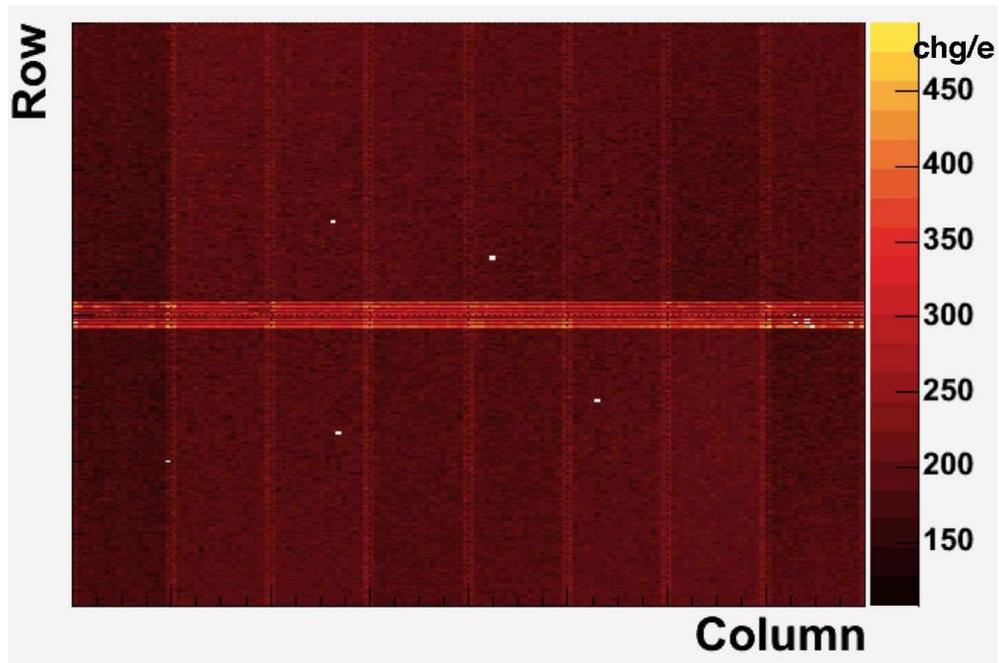


Abbildung 5.3: Ortsaufgelöste Verteilung des Rauschens nach dem Tuning des Moduls 510423

In einer histogrammierten Darstellung sind die Noisewerte für Standardpixel sowie ganged, long und zwischenganged Pixel in Abb. 5.4 zu sehen.

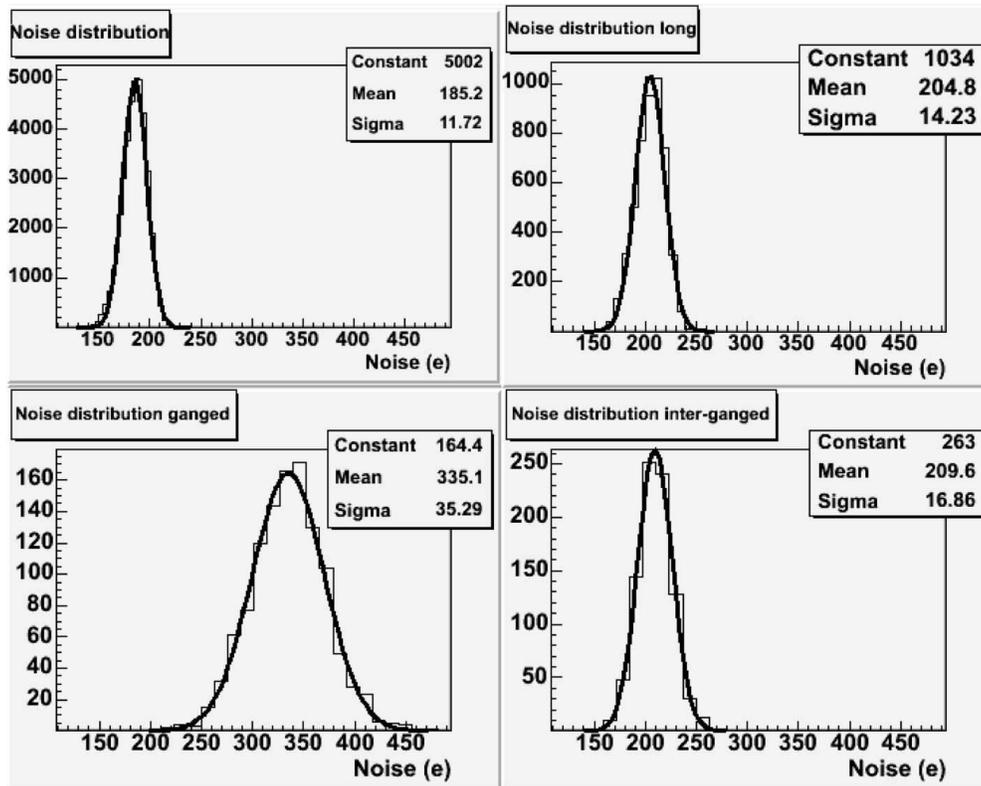


Abbildung 5.4: Verteilung der Noiseinträge für normale, long, ganged und inter-ganged Pixel des Moduls 510423

Die Noisewerte für das hier exemplarisch dargestellte Modul 510423 sind $185 \pm 12 e^-$ für Standardpixel, $205 \pm 14 e^-$ für long Pixel, $335 \pm 35 e^-$ für ganged und $210 \pm 17 e^-$ für interganged Pixel. Die entsprechenden Kapazitäten sind Tabelle 7.5 zu entnehmen und sind in Abb. 5.5 in einem Diagramm zusammen mit den Noisewerten der entsprechenden Pixelsorten dargestellt. Nach [LUT94] gehen die kapazitiven Einflüsse linear in den gesamten Noisewert ein. Der formale Zusammenhang für das gesamte Rauschen am Vorverstärker lautet nach [LUT94]:

$$Q_{amp_noise} = Q_{amp_noise_0} + U_{amp_noise} \cdot C_{det} \quad (5.1)$$

Mit den Meßwerten kann eine Gerade auf 0 F extrapoliert werden. Daraus ergibt sich ein Rauschanteil von $Q_{amp_noise} = 145 \pm 20 e^-$, der nicht auf die Sensorkapazität zurückzuführen ist.

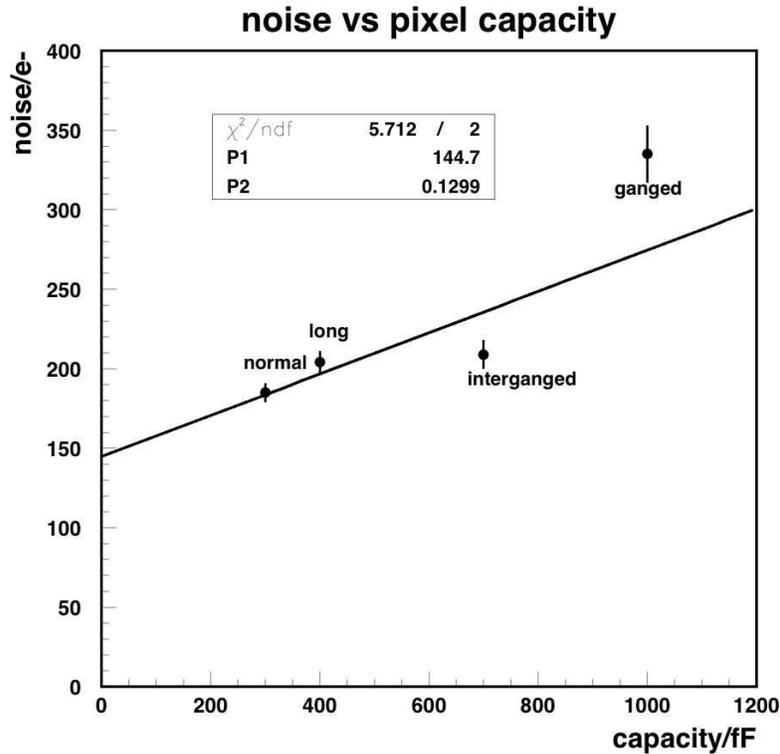


Abbildung 5.5: Noise verschiedener Pixelsorten gegenüber deren Kapazität für Modul 510423

5.3 Betrachtung der zehn Qualifizierungsmodule

Von Interesse sind in dieser Analyse die Verteilung der Eigenschaften wie Schwelle, Schwellendispersion und Noise der zehn Module untereinander sowie Veränderungen der jeweiligen Eigenschaften während der Produktionsphase.

Mechanischer Streß im weitesten Sinne äußert sich, wie bereits erläutert, in Veränderungen des Leckstroms und der Durchbruchspannung beim Sensor, sowie erhöhten Strömen bei den FE-Chips. Eine erhöhte Anzahl von Bumpdefekten gibt Hinweise auf mechanische Einflüsse auf das Baremodul. Diese Effekte werden nun jeweils mit den Daten vor dem Flipchip-Prozeß, vor der Modulintegration und vor und nach dem Burn-in verglichen und die stattgefundenen Veränderungen aufgezeigt.

5.3.1 Sensoreigenschaften

Zur Bestimmung der Durchbruchspannung einer Siliziumstruktur wird eine Strom-Spannungskennlinie bis zu einer Maximalspannung von 600 V im Falle der ATLAS-Pixelmodule aufgenommen. Abb. 5.6 zeigt für eines der Qualifizierungsmodule eine temperaturkorrigierte IV-Kurve. Silizium hat als Halbleiter eine temperaturabhängige Ladungsträgerkonzentration. Für die IV-Kurve wird dies durch einen Korrekturterm der Form

$$I_{20^\circ C} = I(T) \left(\frac{T_N}{T + T_0} \right)^2 \cdot e^{\left(\frac{1}{T - T_0} - \frac{1}{T_N} \right) \cdot \frac{E_l}{k}} \quad (5.2)$$

$$T_N \quad - \quad 293,15 \text{ K}$$

$$T_0 \quad - \quad 273,15 \text{ K}$$

$$E_l \quad - \quad 0,605 \text{ eV, Diff. zweier eff. Besetzungszustände}$$

$$k \quad - \quad \text{Boltzmannkonstante}$$

auf Raumtemperatur normiert [KLA03]. Der geringfügig bis ca. 400 V steigende Teil der Kurve zeigt ein annähernd konstantes Verhalten bis die Feldstärke hoch genug ist, um durch Avalanche-Effekt Ladungsträger zu lösen, die zum sprunghaften Ansteigen des Stroms beitragen. Der Abknickpunkt der IV-Kurve wird als Durchbruchspannung bezeichnet. Störstellen oder Kristalldefekte können ebenfalls Auslöser dieses Verhaltens sein, so daß die Verschiebung des Durchbruchpunktes ein Maß für mechanische Schäden im Kristall ist

Nicht immer ist die Form der IV-Kurve so typisch wie in diesem Fall und die Bestimmung der Durchbruchspannung völlig eindeutig. Feuchtigkeitsbedingte ohmsche Anteile im Leckstrom vermindern die Deutlichkeit des Durchbruchpunktes. Für diese Fälle werden Grenzwerte für den Leckstrom verwendet, ab dem das IV-Verhalten als Durchbruch bezeichnet wird.

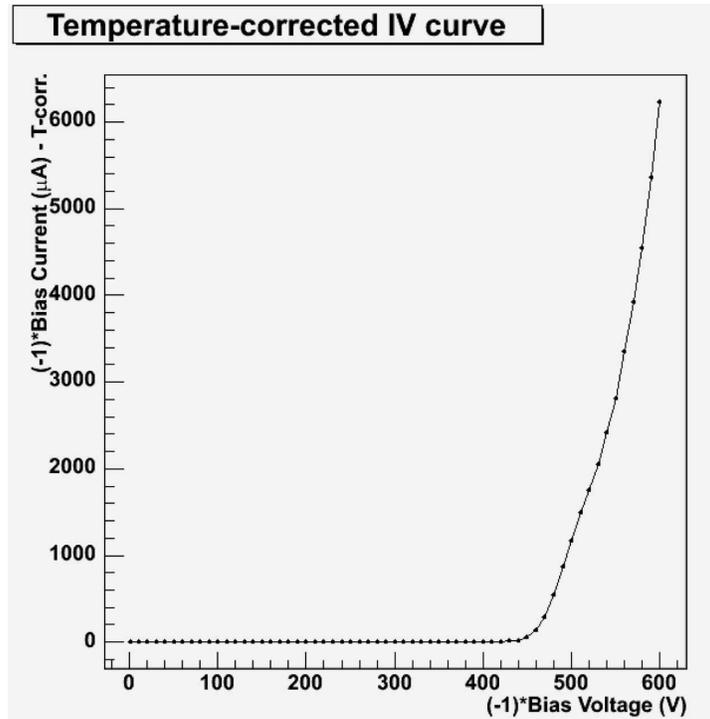


Abbildung 5.6: IV-Kurve von Modul 510521 (temperaturkorrigiert)

Die folgende Abbildung 5.7 zeigt die Verteilung der Durchbruchspannungen für die zehn Qualifizierungsmodule, gemessen jeweils beim BARE-, ASSY-, BURN- und FLEX-Test. Der Eintrag 600 V bedeutet hierbei, Durchbruchspannung 600 V oder darüber, d.h. der Durchbruch konnte im Meßbereich von 0 bis 600 V nicht beobachtet werden. Ein Eintrag bei 0 V bedeutet, daß der Durchbruch im physikalischen Sinne nicht im Meßbereich liegt, der Strom aber schon zu Anfang der Meßkurve den Definitionsparameter für einen Durchbruch, dies bedeutet, daß ein Leckstrom von $20 \mu\text{A}$ überschritten wurde, erreicht hat.

Die Module 510921 und 510574 zeigen eine Verschlechterung des Durchbruchverhaltens mit fortschreitenden Produktionsschritten und Testhandling.

Ein analoges Verhalten zeigt auch die Verteilung der Leckströme für diese Module bei 150 V Biasspannung. Diese sind ebenfalls in Abbildung 5.7 dargestellt.

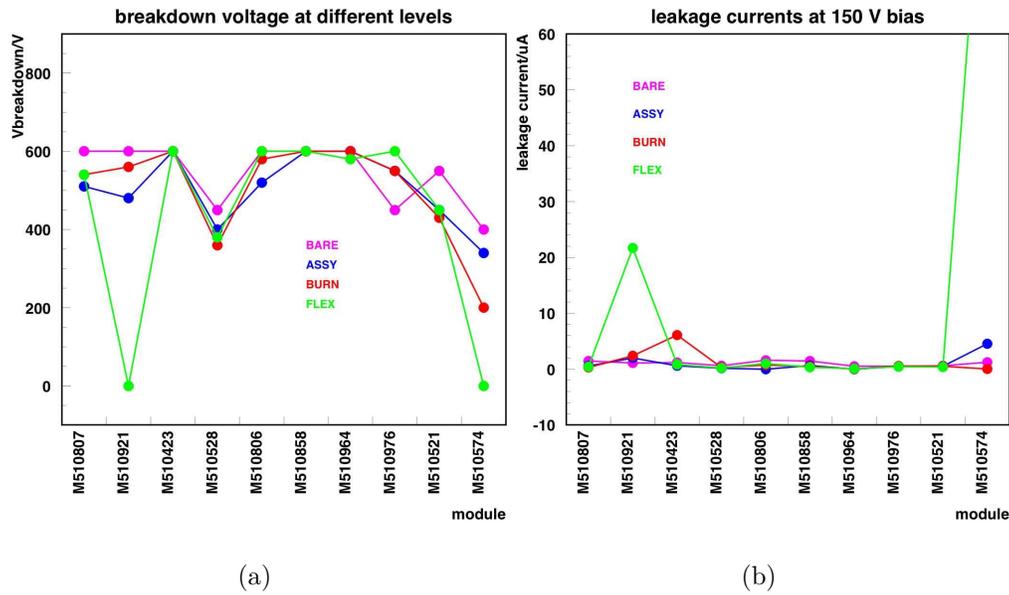


Abbildung 5.7: Durchbruchspannung (a) und Leckstromverteilung (b) der zehn Qualifizierungsmodule

Die Leckströme der fraglichen Module beim FLEX-Test sind gegenüber den übrigen Strömen erhöht. Frühe Durchbrüche können innerhalb des Siliziumsensors durch Feldstärkespitzen hervorgerufen werden, die entweder durch Avalancheeffekt einen Leitungskanal oder lokal Ladungsträger, die zur Leitung beitragen, erzeugt haben. Störstellen im Kristall, die diese Effekte hervorrufen, können sich innerhalb des Kristalls schon bei Raumtemperatur verlagern und so lokale Feldstärkespitzen erzeugen.

Die vollständige Konservierung eines Sensorzustands erfordert eine kalte Lagerung des Siliziums, was im Falle von ATLAS-Pixelmodulen nicht geschieht. Dies erklärt die unterschiedlich gemessenen Sensorparameter.

Feuchtigkeitsniederschläge an den Rändern des Sensors, bedingt durch die Kühlung des Moduls für den FLEX-Test, stellen einen ohmschen Widerstand in Parallelschaltung mit der Sensordiode dar. Diese könnte den gemessenen Strom erhöhen.

5.3.2 Ströme der FE-Chips

FE-Chips benötigen eine analoge und eine digitale Spannung mit entsprechenden Strömen zur Energieversorgung. In allen vier Tests werden die jeweiligen Ströme erfaßt, während die Spannungen von einer aktiven Regelung konstant gehalten werden. Chips, die mechanische Schädigung erfahren haben, zeigen in der Regel

eine erhöhte Stromaufnahme. Die Verteilung der Stromaufnahmen zeigt Abb. 5.8.

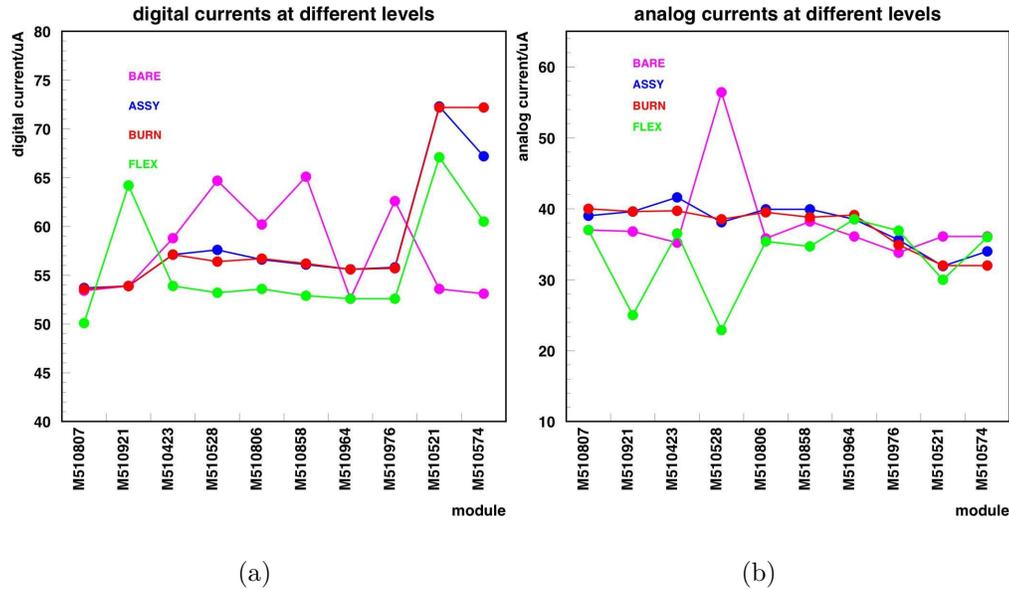


Abbildung 5.8: Digitale (a) und analoge (b) Ströme der FE-Chips

Die Ströme weichen bis auf Modul 510921 und 510574 nicht signifikant voneinander ab. Die digitalen Ströme von diesen beiden Modulen zeigen Abweichungen, die bemerkenswert sind, allerdings keine Anomalien in den elektronischen Eigenschaften, so daß die Abweichung offensichtlich nicht auf Schädigungen während der Modulfertigung zurückzuführen ist.

5.3.3 Bumpverbindungen

Die Bumpverbindung zwischen Sensor und FE-Chips wird u.a. durch eine Quellenmessung überprüft. Diese wird zum ASSY-, BURN- und FLEX-Test durchgeführt. FE-Chips werden nach der Prozessierung und nach dem Chiptesten gedünnt, d.h. an der unprozessierten Seite der Chips wird durch ein Schleifverfahren Silizium abgetragen, bis der Chip die geforderte Dicke von unter $200 \mu\text{m}$ erreicht. Weiter gedünnte Chips verlieren die Planarität, so daß Bumpbonds in Randbereichen des Chips keinen Kontakt zum Sensor erhalten. Eine ähnliche Wirkung erzeugen auch schräg auf den Sensor aufgesetzte Chips.

Die folgende Abbildung 5.9 (a) zeigt die Anzahl defekter Pixel beim Quellenscan. Hierbei zeigen sich neben den Bumpdefekten auch digital und analog fehlerhafte FE-Zellen. Diese werden beim Digitalscan und beim Schwellenscan erkannt.

Auffällig ist hierbei, daß die Ergebnisse der drei Tests in Details voneinander abweichen, aber durch den Burn-in Prozeß keine weiteren Bumpverbindungen geöffnet wurden, da die Kurve für den ASSY- und den BURN-Test deckungsgleich übereinanderliegen.

Die Anzahl an „bad“ Pixeln, d.h. solchen Pixeln, die die Selektionskriterien aus Tabelle 4.1 nicht erfüllen, zeigt Abb. 5.9 (b).

Eine Berechnung der Anzahl aller bad Pixel wird nur mit den Daten des FLEX-Tests durchgeführt, da dies der letzte der Modultestschritte ist, bevor das Modul auf einen Stave geladen wird.

Die Anzahl an bad Pixeln geht in einen Ranking-Parameter ein. Dies ist eine Qualitätsaussage, die definiert, an welcher Stelle im Detektor ein Modul montiert wird, so daß die Module mit den besten Eigenschaften an die sensibelsten Stellen im Detektor kommen. Die Anzahl von bad Pixeln summiert die Pixel, die sowohl analog als auch digital defekt sind und solche Pixel, die die Selektionskriterien aus Tabelle 4.1 nicht erfüllen. Ferner werden sogenannte „ranking penalties“ hinzugezählt. Hierbei handelt es sich um einen Wert von bad Pixeläquivalenten, die zu den o.g. addiert werden als Aussage zu Defiziten des gesamten Moduls. Eine Beschreibung des Rankings liefert [WAL05].

M 510964 überschreitet die Anzahl von bad Pixeln von 460 und ist vorerst kein Produktionsmodul. Im Falle von Problemen der Produktionsausbeute in der Modulproduktion oder Modul-Stave-Integration kann dieses Modul noch für weniger sensible Bereiche des Pixeldetektors, d. h. nicht in der innersten der drei Lagen und nicht in der Mitte der Staves, Verwendung finden.

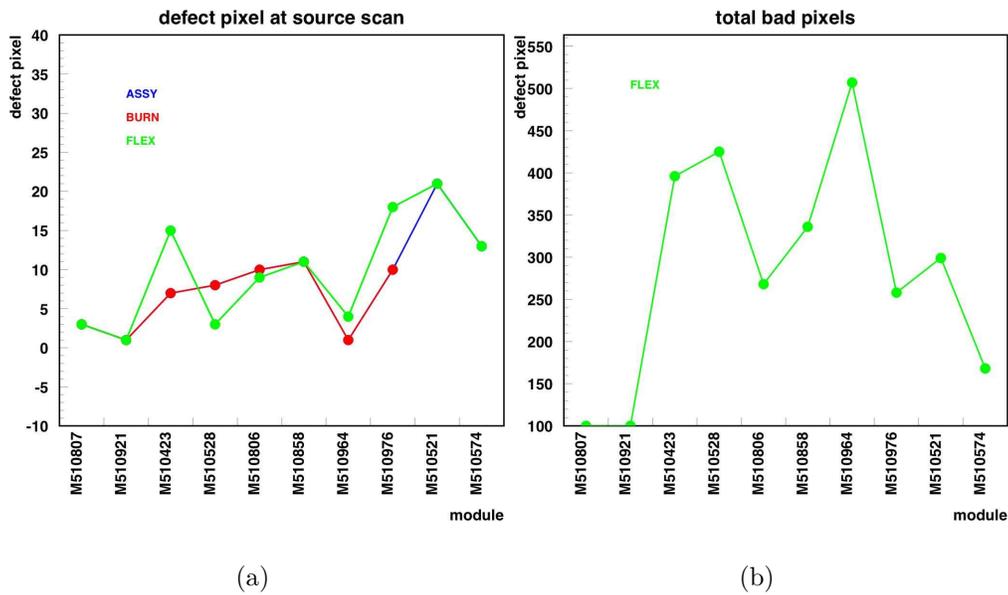


Abbildung 5.9: Pixeldefekte beim Quellenscan (a) und Summe aller bad Pixel (b)

5.3.4 Analoge FE-Eigenschaften

Die Schwelle, das Rauschen und die Schwellendispersion sind analoge Größen eines Moduls, die für einen optimalen Betrieb des Detektors für alle Module möglichst homogen sein sollten. Desweiteren ist die Schwelle einstellbar, so daß Veränderungen durch Strahlenschädigungen oder Temperatureinflüsse kompensiert werden können.

Abb. 5.10 zeigt die Mittelwerte von Noise, Schwelle und Schwellendispersion der zehn Qualifizierungsmodule. Bezüglich des Noise zeigen alle Module ein weitestgehend homogenes Verhalten. Bei der Schwelle und bei deren Dispersion fallen die beiden Module 510807 und 510858 auf. Beide zeigen eine verringerte Schwelle und jeweils eine erhöhte Schwellendispersion, also eine Verbreiterung der Schwellenverteilungskurve beim FLEX-Test. Dennoch liegen beide Module mit dieser Schwelle und der erhöhten Schwellendispersion noch innerhalb der Selektionskriterien und werden als Produktionsmodule verwendet.

5.4 Bewertung und Vergleich mit der Designerwartung

Die zehn Qualifikationsmodule, deren Testdaten in diesem Kapitel diskutiert wurden, zeigen alle ein vergleichbares Verhalten im Bereich der Sensoren und der Elektroneigenschaften. Die Abweichungen im Rahmen der Produktionsschwankungen stellen in den gemessenen Größenordnungen kein Hindernis dar, ein Modul nicht als Produktionsmodul zuzulassen.

Die erhöhte Anzahl von bad Pixeln im Fall von Modul 510964 liegt mit 507 Pixeln über der bisherigen Grenze von 460, so daß eine Verwendung dieses Moduls zum jetzigen Zeitpunkt fraglich ist. Die weitere Produktionsausbeute wird zeigen, ob diese Grenze realistisch ist oder nach oben korrigiert werden muß.

Die in Abschnitt 3.2 aufgelisteten physikalischen Anforderungen an den Pixeldetektor wurden mit dem Simulations-Softwarepaket GEANT³ simuliert [TDR98] und das Ergebnis dieser Simulation resultiert in elektronischen Eckdaten, die Tabelle 5.1 auflistet:

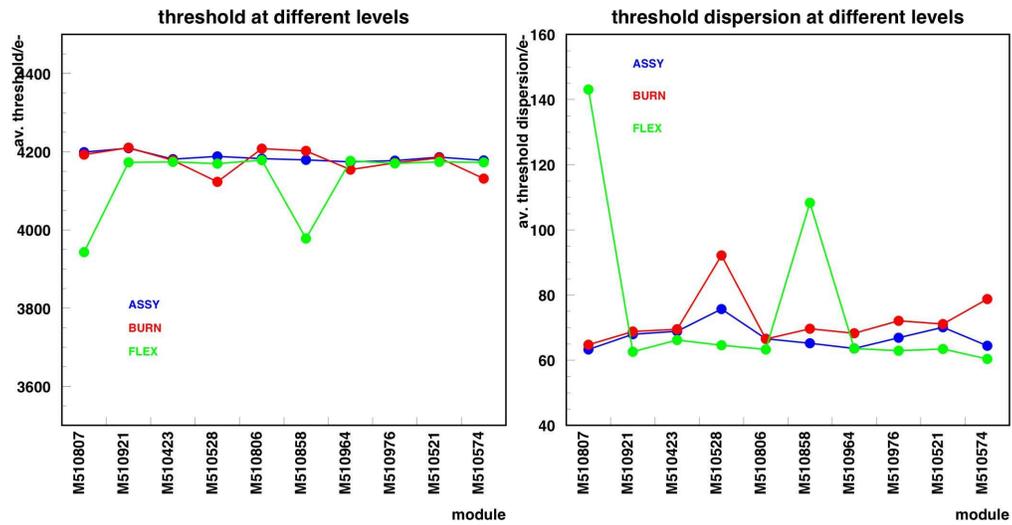
Analoge Stromaufnahme	ca. 90 mA
Digitale Stromaufnahme	ca. 50 mA
Schwellendispersion	200 e ⁻
Schwelle (vor Strahlenschädigung)	4000 e ⁻
Noise	300 e ⁻

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Elektronikanforderungen durch eine Physiksimulation des Pixeldetektors [TDR98].

Bezüglich der hier aufgelisteten Parameter erfüllen die in diesem Kapitel dargestellten Daten aus Modultests der Dortmund Produktion die Designerwartung völlig. Insbesondere Schwellendispersion und Noise dieser FE-Chipgeneration erfüllen diese Werte deutlich besser als die Designerwartung es fordert.

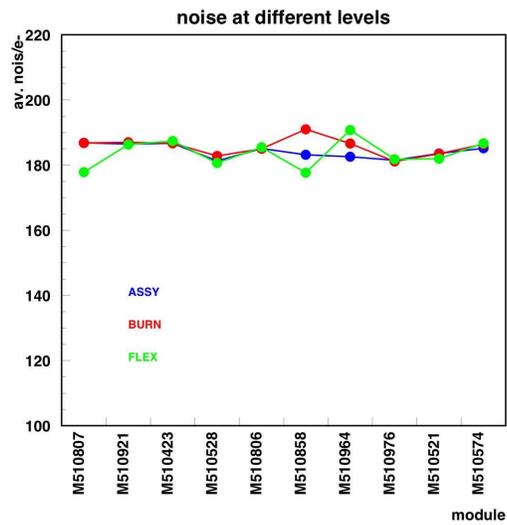
Die Schwelle soll auf 4000 e⁻ kalibriert werden, was nach der Designerwartung bei einem Signal von 19000 e⁻ vor Bestrahlung angewendet werden soll und 3000 e⁻ Schwelle nach Bestrahlung bei höchstens 10000 e⁻. Testbeamergebnisse [LAR02] zeigen, daß ein MIP ein Signal von sogar 25000 e⁻ ± 10% im ungeschädigten Fall und 20000 e⁻ ± 10% im geschädigten Fall (Strahlenbelastung nach 10 ATLAS-Betriebsjahren) ergeben. Somit liegt das Signal-zu-Schwellenverhältnis deutlich über den Erwartungen.

³Geomtry and Tracking



(a)

(b)



(c)

Abbildung 5.10: Verteilung von Schwelle (a), Schwellendispersion (b) und Noise (c) der zehn Qualifizierungmodule

Kapitel 6

Cross-Kalibration

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit von Modultestdaten wurde eine Vergleichskalibrierung eines Moduls durchgeführt. Das Modul 510904, das am Physikalischen Institut der Universität Bonn hergestellt und dort erstmalig getestet wurde, sollte in den beiden anderen nordrhein-westfälischen „assembly sites“ Universität Dortmund und Universität Siegen einer jeweils wiederholten Messung unterzogen werden, um die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Modultdaten zu gewährleisten.

Analog zu Kapitel 5 werden die gemessenen Veränderungen der Moduleigenschaften, hier allerdings von Teststandort zu Teststandort, dargestellt.

6.1 Sensoreigenschaften

Zu den hier betrachteten Sensoreigenschaften gehören die Durchbruchspannung und der Leckstrom bei 150 V Biasspannung. Nach Abbildung 6.1 (a) ist der gemessene Leckstrom dieses Moduls Schwankungen unterworfen, diese sind allerdings noch innerhalb der Meßungenauigkeit, die durch Feuchtigkeitsniederschläge zu erwarten sind. Der Grenzwert für den Leckstrom bei 150 V Biasspannung liegt bei 20 μA , alle Meßwerte liegen deutlich darunter.

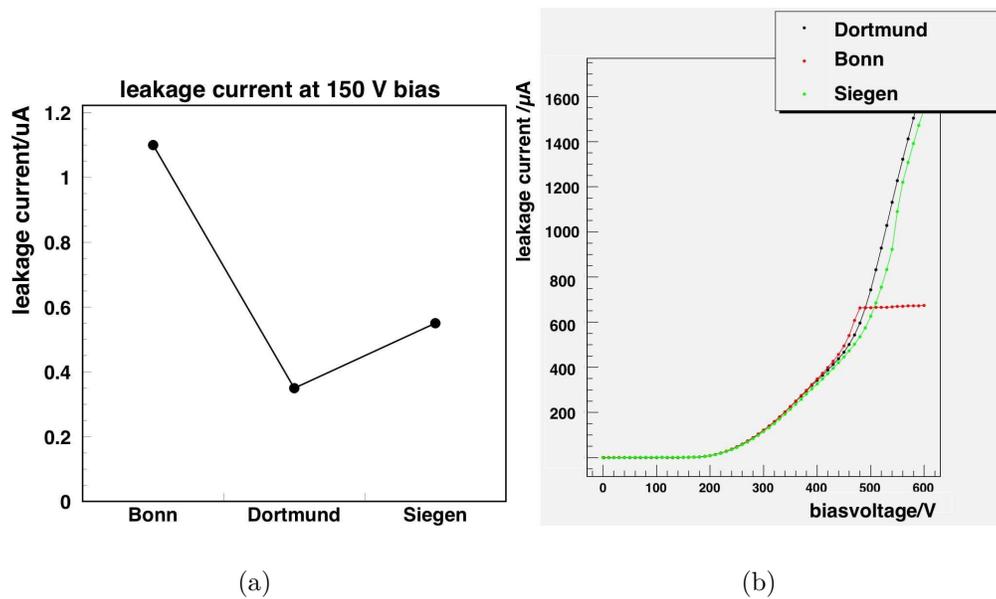


Abbildung 6.1: Leckstrom bei 150 V Biasspannung und IV-Kurven der drei Meßstandorte

Ein noch einheitlicheres Verhalten zeigt die Durchbruchspannung in Abb. 6.1 (b). Hierbei sind alle Kurven in guter Näherung deckungsgleich. Bei einer Spannung von ca. 480 Volt setzt bei der in Bonn gemessenen Kurve die Strombegrenzung des Setups ein. Für die Messung aus Dortmund und Siegen herrscht Übereinstimmung bis zum Meßende der Kurve bei 600 V.

6.2 Stromaufnahme

Die jeweils drei Meßwerte für I_{DDA} und I_{DD} sind, ähnlich wie die Leckströme, gewissen Schwankungen unterworfen. Die Stromvariationen der drei Messungen aus Bonn, Dortmund und Siegen für Modul 510904 liegen in der Größenordnung der Stromunterschiede einzelner der zehn Qualifizierungsmodule beim ASSY-, BURN- oder FLEX-Test. Abb. 6.2 zeigt die Analogströme I_{DD} in (a) und die Digitalströme I_{DD} in (b).

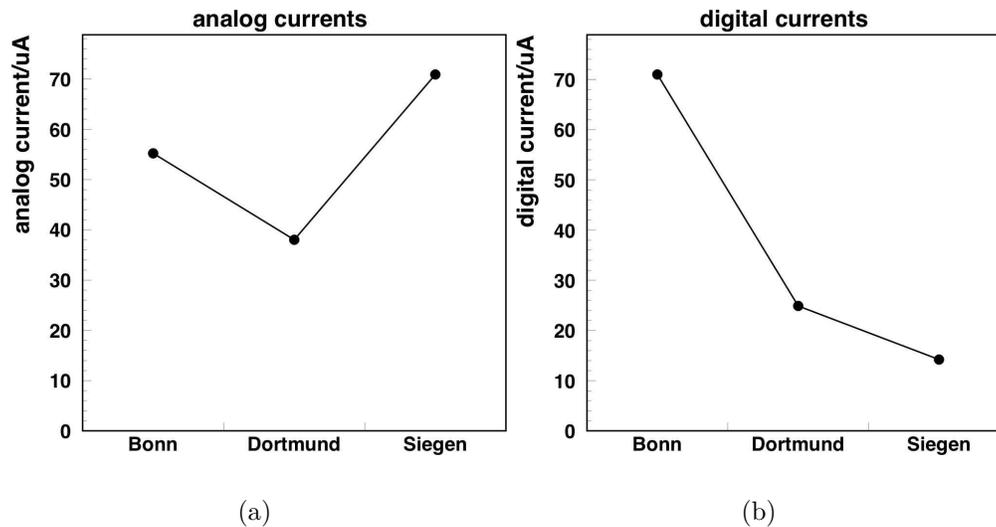


Abbildung 6.2: Analog- (a) und Digitalströme (b) der drei Messungen.

Die Variationen könnten durch die unterschiedlichen Kühlsysteme der Setups bedingt sein, sind aber dennoch innerhalb der Schwankungen, die auch ein Modul zwischen ASSY-, BURN- und FLEX-Test zeigt.

6.3 Elektronische Eigenschaften

Die analogen elektronischen Eigenschaften Schwelle, Schwellendispersion, Noise und Intime-Schwelle, die an den drei Teststandorten gemessen wurden, sind in Abb. 6.3 dargestellt.

Deutlich zu sehen ist, daß das Rauschen, die Schwelle und die Intime-Schwelle sehr gut reproduzierbar sind. Die Schwellendispersion schwankt zwischen dem Standort Bonn und den beiden anderen Standorten Siegen und Dortmund um einen Faktor 1,6. Dieser Unterschied ist tolerierbar, da der Sollwert der Schwellendispersion bei $60 e^-$ liegt, mit einer zulässigen Abweichung von $20 e^-$. Alle drei Meßwerte liegen innerhalb dieser zulässigen Spanne.

Für das Rauschen liegt der Sollwert bei $160 e^-$ mit einer zulässigen Abweichung von $20 e^-$, für die Intime-Schwelle ist es $5550 \pm 200 e^-$. Für die Schwelle ist kein Grenzwert definiert.

Prinzipiell hängt die Reproduzierbarkeit der analogen Meßwerte von der Güte der Tunings ab. Dies ist wiederum eine Frage der Temperatur, der Luftfeuchte und der Spannungskonstanz.

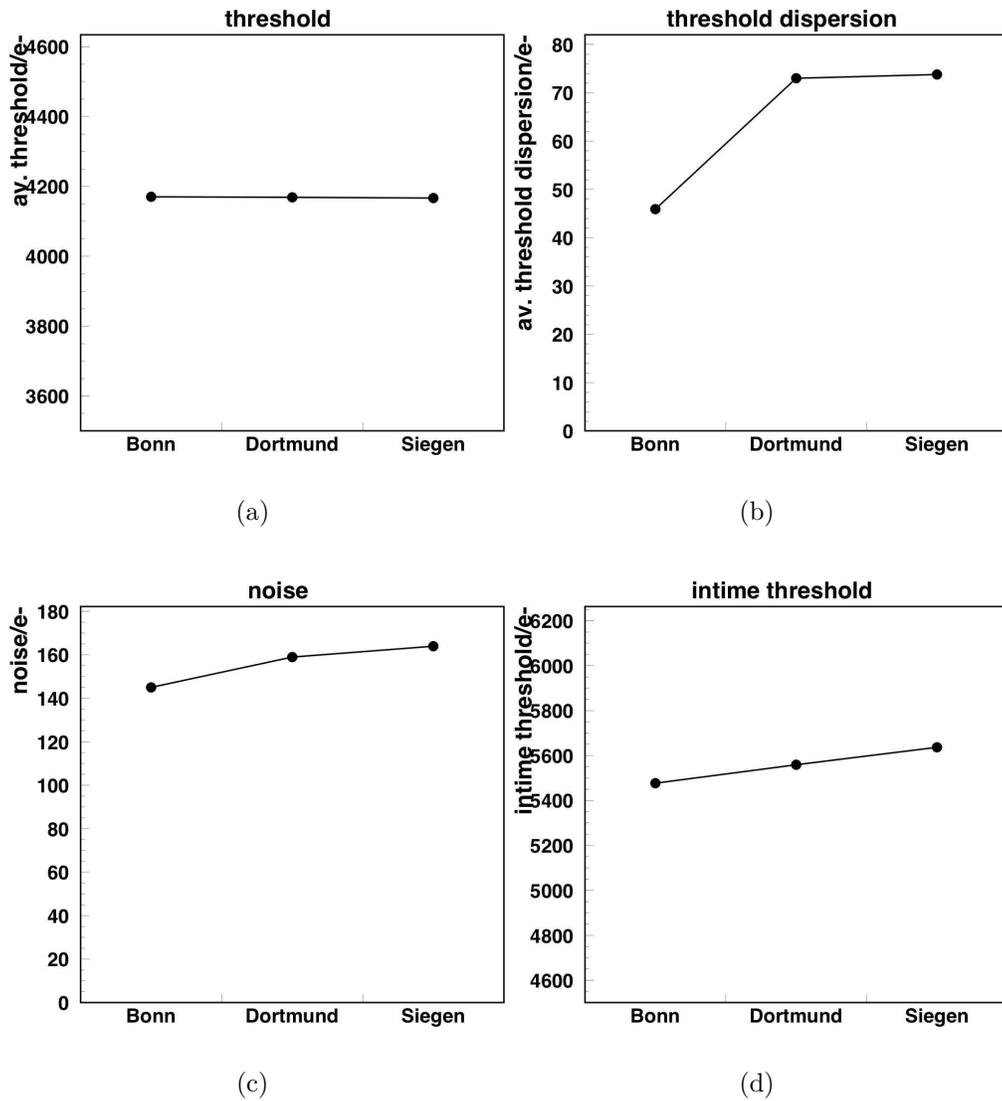


Abbildung 6.3: Analoge Elektronikparameter des Cross-Kalibrationsmoduls gemessen von den drei Meßstandorten

Diese Messung konnte zeigen, daß die analogen Ergebnisse der drei Meßstandorte reproduzierbar sind und somit einen aussagekräftigen Parameter über die Qualität eines Moduls liefern.

6.4 Bad Pixel

Abb. 6.4 zeigt die an den drei Assembly Sites errechnete Anzahl an bad Pixeln, die bei der Cross-Kalibration ermittelt wurden.

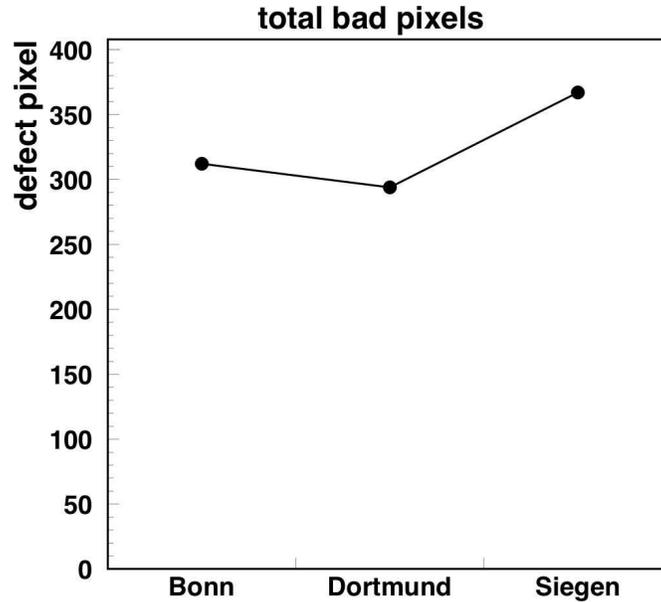


Abbildung 6.4: Anzahl der bad Pixel gemessen in Bonn, Dortmund und Siegen

Die ermittelte Anzahl an bad Pixeln schwankt von 312 für Bonn, über 294 für Dortmund bis 367 in Siegen.

Die Anzahl von bad Pixeln enthält solche Pixel, die die Selektionskriterien aus Tabelle 4.1 nicht erfüllen.

Bei genauerer Betrachtung der Zusammensetzung der bad Pixel fällt auf, daß die größten Beiträge unterschiedliche sind. Tabelle 6.1 listet die unterschiedlichen Hauptbeiträge auf.

	Bonn	Dortmund	Siegen
Intime-Schwelle	231	31	48
Schwelle	49	225	282

Tabelle 6.1: Dominierende Beiträge zur Anzahl an bad Pixeln innerhalb der Cross-Kalibrationsmessungen

Die Bonner Messung erhält die meisten bad Pixel mit der Intime-Schwelle, Dortmund und Siegen beim Schwellenscan. Die Anzahl an bad Pixeln bei diesen Scans hängt von der Güte der Kalibrierung ab. Diese wiederum ist abhängig von der Spannungs- und Temperaturkonstanz während der Kalibrierung des betreffenden Moduls im FLEX-Test. Vor diesem Hintergrund sind die Unterschiede, die in Tabelle 6.1 aufgelistet sind, tolerierbar.

6.5 Bewertung

Mit der Betrachtung der Cross-Kalibration konnte die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Modulmessungen untersucht werden.

Die Messung der Ströme ist Schwankungen von Messung zu Messung unterworfen. Keine der Messungen zeigt aber eine solche Erhöhung, ab der man von einer Schädigung der FE-Chips sprechen könnte.

Die Messung des Sensors zeigt eine sehr gute Übereinstimmung untereinander, wie die IV-Kurven aus Abb. 6.1 (b) zeigen.

Die analogen elektronischen Eigenschaften konnten gut reproduziert werden und zum Verständnis der Setups beitragen.

Die Anzahl an bad Pixeln, die die wichtigste Rankingaussage für ein Modul darstellt, ist bei diesen Messungen den o.g. Schwankungen unterworfen, die allerdings akzeptabel sind.

Diese Messungen konnte zum Verständnis der Modultests beitragen.

Kapitel 7

Testbeam-Setup und -Resultate

Die ATLAS-Pixelgruppe unterhält am SPS¹ eine Testbeamfacility. An der Beamline H8 in der CERN Nordhalle werden mit u. a. 180 GeV Pionen Prototypmodule und Produktionsmodule unter experimentnahen Bedingungen getestet. Ein Subsample der Module wurde vorher am PS² mit 24 GeV Protonen bis zu einer Dosis, die der ATLAS-Betriebsdauerfluenz entspricht, bestrahlt. Damit können Performanceaussagen über ein Modul nach 10 Jahren Betrieb im ATLAS-Experiment getroffen werden.

7.1 Beamteleskop

Die Trajektorien der Pionen, die in der Testbeamfacility ein „**device under test**“ (DUT) passieren, werden mit Hilfe eines Strahlteleskopes vermessen und mit einem Algorithmus extrapoliert. Das Strahlteleskop besteht aus vier Siliziumstreifen-zählern, deren Streifen auf der Vor- und Rückseite jeweils orthogonal zueinander sind. Dies ergibt mit jedem Teleskopmodul jeweils eine Ortskoordinate, also vier Ortskoordinaten für jede Trajektorie. Die folgende Abb. 7.1 zeigt eine schematische Darstellung des Teleskops. Das DUT steht zwischen dem zweiten und dritten Teleskopmodul im Strahl.

¹Super Proton Synchrotron

²Proton Synchrotron

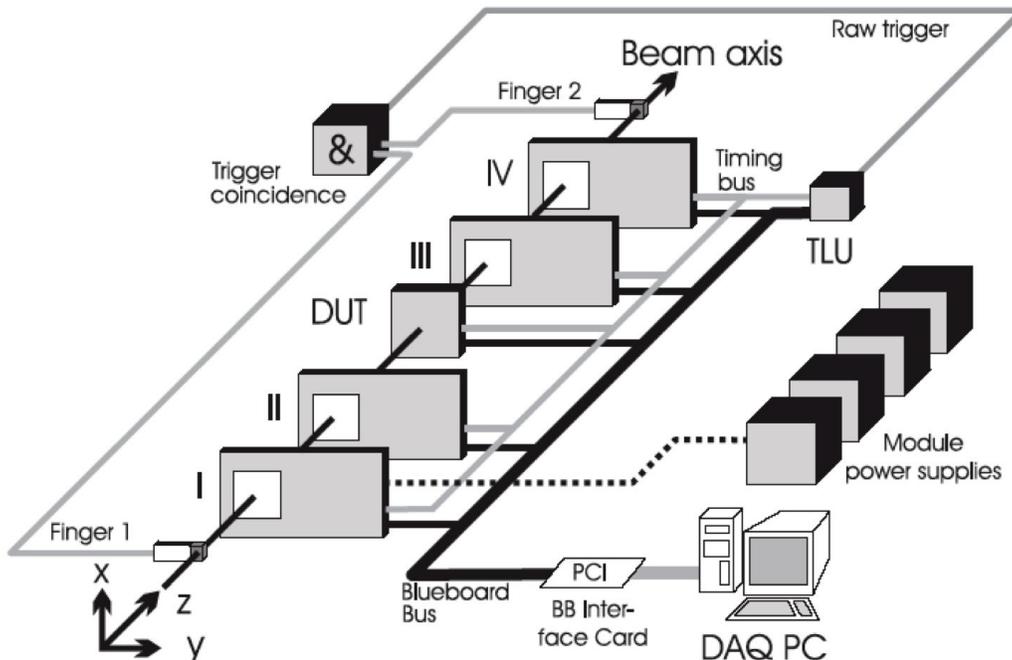


Abbildung 7.1: Schematische Darstellung des Strahlteleskops [TRE02]

Ein Teleskopmodul besteht jeweils aus einem Sensor- und einem Readoutteil. Die sensitive Fläche hat eine Ausdehnung von $3,2 \cdot 3,2 \text{ cm}^2$. Der Streifenabstand dieses Siliziumdetektors beträgt $50 \mu\text{m}$, dies macht 640 Streifen pro Seite. Drei Fingerszintillatoren am Anfang und am Ende des Setups definieren durch eine Koinzidenz den Trigger. Zur Überprüfung der Ortsauflösung bietet das Strahlteleskop eine Ortsgenauigkeit von weniger als $5,5 \mu\text{m}$ auf der DUT-Ebene, d.h. das Strahlteleskop kann Strukturen innerhalb eines Pixels auflösen [TRE02].

7.2 Zeitauflösung

Die Zeitinformation der Pixelmodule liegt, bedingt durch das 40 MHz Readout, in Einheiten von 25 ns vor, so daß das 40 MHz Bunchcrossing eine feste Phasenbeziehung zum Readout der Module hat. Diese Phase kann während des Betriebs des Pixeldetektors effizienzoptimiert werden. Pionen des H8-Strahls haben keine zeitliche Korrelation zum Readout des Moduls im Gegensatz zum ATLAS-Experiment, wo im Gegensatz zum Teststrahl Kollisionsfragmente mit einer zeitlich festen Phasenbeziehung zur 40 MHz Bunchcrossingrate des LHC den Pixeldetektor erreichen. Um im Teststrahlbetrieb, bei dem die Modulauslese ebenfalls mit einer 40 MHz

Taktung geschieht, eine zeitliche Effizienzaussage, die sogenannte Intime-Efficiency, treffen zu können, wird mit dem Triggersignal der Szintillatoren ein TDC³ gestartet, der mit dem „LVL1-triggeraccept“ gestoppt wird. Dies liefert eine Timing Präzision von 36 ps [GRO04] und ermöglicht die Effizienzbestimmung mit optimierter Phase gegenüber der ATLAS 40 MHz Clock. Abb. 7.2 zeigt die Nachweiseffizienz gegenüber der Zeit für ein mit $1,1 \cdot 10^{15} \text{MeV} n_{eq}/\text{cm}^2$ bestrahltes Modul. Das Maximum der Effizienzkurve stellt die Effizienz des Moduls im ATLAS-Experiment dar.

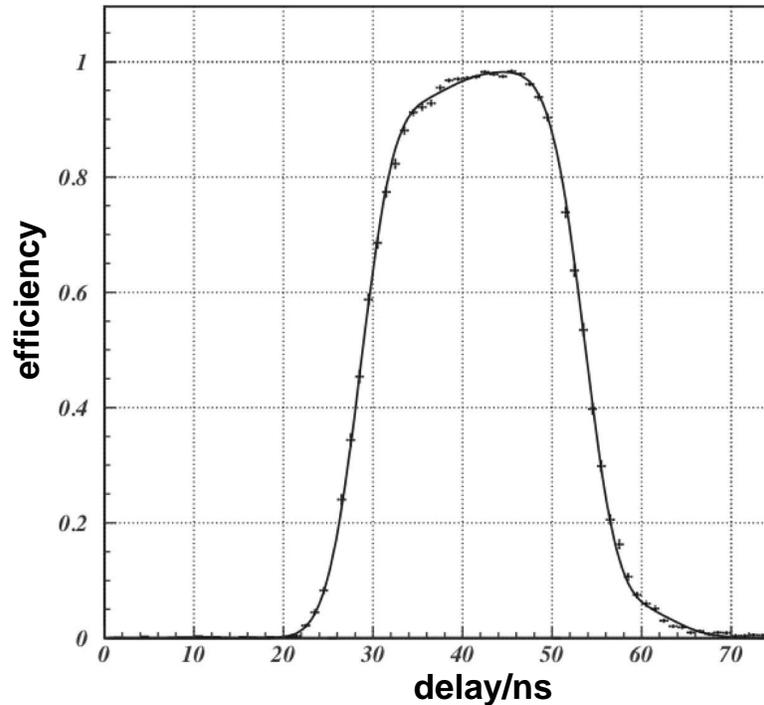


Abbildung 7.2: Nachweiseffizienz gegenüber der Zeit [LAR02] für ein bestrahltes Modul

Tabelle 7.1 listet die Effizienzen für unbestrahlte und mit der Designdosis bestrahlte Module auf.

³time digital converter

unbestrahlt	99,5 - 99,8 %
bestrahlt	ca. 98 %

Tabelle 7.1: Effizienzen für bestrahlte und unbestrahlte ATLAS-Pixelmodule[TRO04]

7.3 H8-Software

Die Pixelkollaboration verwendet zur Datennahme im Testbeam eine ATLAS-entwickelte Linux-basierte Software, die die Rohdaten der Treffer, die ein Modul im Teststrahl erhält, registriert und auf eine Festplatte schreibt. Ferner werden die Daten des Strahlteleskops ebenfalls mit dieser DAQ (**D**ata **A**cquisition) erfaßt. Jeder Trigger, der u. U. mehrere Teilchendurchgänge enthalten kann, erhält eine Eventnummer, die Daten enthalten allerdings noch keine Korrelation zwischen den Strahlteleskop-Ereignissen und den Modulereignissen. Diese Rohdaten werden dann auf dem Tape Storage Server CASTOR⁴ des CERN endgültig gespeichert. Die eventweise Extrapolation der Teilchenspuren des Strahlteleskops auf die Moduloberfläche geschieht offline mit der Extrapolationssoftware H8. Hierbei handelt es sich um ein fortranbasiertes Softwarepaket der Pixelkollaboration, das die Hits in den unterschiedlichen Ebenen des Strahlteleskops zueinander zuordnet und extrapolierte Trefferkoordinaten auf der Moduloberfläche angibt.

Die H8-Software wurde in Dortmund automatisiert, wodurch ermöglicht wurde, nicht nur jeweils einen Run, der i. d. Regel die Daten von 100k bis 300k Events beinhaltet, sondern eine definierte Liste von Runnummern eventweise zu extrapolieren. Diese Rechnungen wurden auf dem Batch-Job-Cluster des CERN prozessiert. Die dazu nötigen Kalibrations- und Konfigurationsdateien werden vom CERN-eigenen Linuxrechnercluster „lxplus“ bereitgestellt, da das Batch-Job-Cluster keinen interaktiven Zugang bietet. Die prozessierten Daten werden von der modifizierten H8-Version wieder auf CASTOR Tapes als Sicherung geschrieben und vom lxplus-Cluster aus mittels einer ssh⁵-Verbindung nach Dortmund kopiert. Eine detaillierte Beschreibung der Software liefert [DOB04]. Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht den Datenfluß.

⁴Cern **A**dvanced **S**torage **M**anager <http://castor.web.cern.ch/castor/>

⁵secure **s**hell

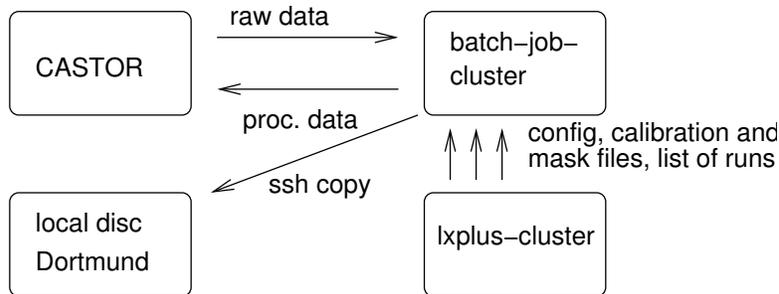


Abbildung 7.3: Datenflußdiagramm zur Prozessierung der Testbeamdaten

Die Analyse dieser prozessierten Daten geschieht lokal auf Rechnern in Dortmund mit dem Analysetool PAW⁶ und selbstentwickelten Skripten.

7.4 Ladungssammlungsverlust am Biasdot

Das in Abschnitt 3.3 beschriebene Biasgrid bewirkt neben der vorteilhaften, parallelen Kontaktierungsmöglichkeit aller Pixel zu Testzwecken auch eine Deformation des ladungssammelnden E-Feldes. Teilchen, die den Sensor im Bereich des Biasgrids oder im Bereich der Biasdots passieren, deponieren die gleiche Ladungsmenge im Silizium, die Ladungssammlungseffizienz wird aber aufgrund der Felddeformation und der kapazitiven Kopplung an das Biasgrid verringert.

Für die Herstellung der Siliziumtiles standen die Anbieter A und B zur Verfügung. Das Ladungssammlungsverhalten der Tiles beider Hersteller wird hier nun genauer diskutiert. Desweiteren stellte sich die Frage, ob das Ladungssammlungsverhalten beider Produkte Unterschiede nach der Bestrahlung mit der ATLAS-Betriebsdosis zeigt. Aus diesem Grund werden die folgenden Ergebnisse aufgeschlüsselt nach Anbieter und Bestrahlungszustand dargestellt.

7.4.1 Projektionsdarstellung auf Pixelrelativkoordinaten

Zur Untersuchung der Ladungssammlung am Biasdot wird die Trefferkoordinate eines Hits nicht in absoluten Koordinaten eines Moduls angegeben, sondern in relativen Pixelkoordinaten, d.h. daß jeweils die Differenz des extrapolierten Treffers zur Pixelmitte gebildet wird. Dies ist möglich, da in dieser Analyse keine „long“ und „ganged“ Pixel berücksichtigt werden, so daß alle analysierten Pixel dieselben Abmessungen haben. Da sich zwei jeweils gegenüberliegende Pixel einen Kontakt

⁶Physics Analysis Workshop

zum Biasgrid teilen, bilden somit zwei Pixel die kleinste sich wiederholende Einheit auf dem Sensortile, die im Verlauf der Analyse häufig betrachtet wird (vgl. Abb. 3.3).

7.4.2 Selektion der guten Tracks

Um eine korrekte Koordinate der Teilcentrajektorien sicherzustellen, wurden in der Analyse nur Extrapolationen verwendet, die genau den Pixel trafen, der den Treffer registriert hat. Ferner wurden nur Events verwendet, die jeweils genau eine Spur enthielten. Auf diese Art können Mehrdeutigkeiten in den Spuren ausgeschlossen werden.

7.4.3 Clusterbildung

Im Silizium erzeugte Ladungen können, vornehmlich wenn der Eintreffpunkt im Randbereich eines Pixels liegt, mit erhöhter Wahrscheinlichkeit auf mehrere Pixel verteilt sein, so daß die Ladungsinformation zwar weiterhin zu einer Eventnummer gehört, aber auf mehrere Pixelzellen verteilt ist. H8 ist in der Lage, mehrere getroffene Pixel eines Teilchens zu einem Cluster zusammenzufassen. Bei der Angabe der Ladung wird hierbei jeweils die aufintegrierte Clusterladung berücksichtigt. Abb. 7.4 zeigt die räumliche Verteilung der durchschnittlichen Clustergröße innerhalb des o.g. Doppelpixelarrays. Deutlich zu sehen ist, daß die durchschnittliche Clustergröße und damit die Wahrscheinlichkeit eines zweiten angesprochenen Pixels zu den Rändern größer wird.

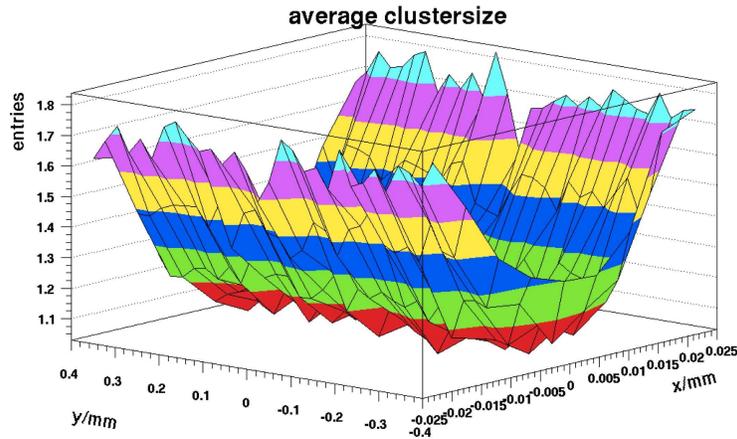


Abbildung 7.4: Verteilung der Clustergrößen auf der Pixeloberfläche. An den Rändern erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für weitere angesprochene Pixel

7.4.4 Darstellung der Ergebnisse

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch das Ladungssammlungsverhalten eines bestrahlten Moduls mit einem Sensortile von Hersteller A. Die unter Abschnitt 7.4.1 erläuterte relative Koordinatendarstellung wurde hier noch auf die Pixellängskante projiziert. Bei diesem Diagramm wurde eine Kombination einer Gauß'schen Funktion mit einer additiven Konstante angewandt. Das Minimum der Gauß'schen Funktion stellt die gesammelte Ladung im Biasdotgrid in ke^- dar, der Fitparameter der Konstanten stellt die gesammelten Ladung im übrigen Pixelbereich ebenfalls in ke^- dar. Der Quotient beider Werte ist der Ladungsverlust.

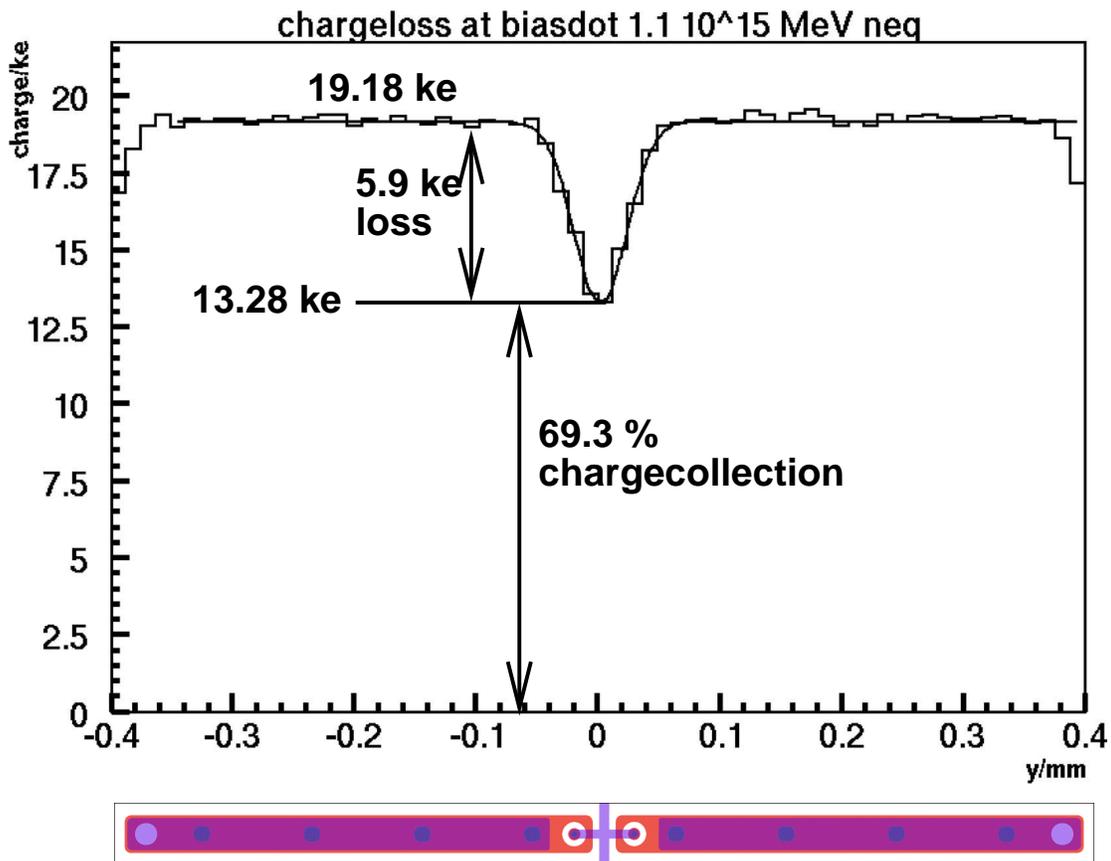


Abbildung 7.5: Projektionsdarstellung der Ladungssammlung am Biasdot, hier exemplarisch für ein bestrahltes Modul von Hersteller A, darunter in korrekter Skalierung das schematische Sensordesign

Unter dem Ladungsverlustdiagramm ist im Vergleich dazu das schematische Pi-

xeldesign dargestellt. Deutlich zu sehen ist, daß der Bereich verringerter Ladungssammlung auf die Biasdotregion reduziert ist.

Tabelle 7.2 zeigt die Ergebnisse für Hersteller A und B und jeweils die bestrahlten Zustände bei einer Biasspannung von 150 V und die unbestrahlten Zustände bei einer Biasspannung von 600 V.

Testsample	ges. Ladungsanteil
Hersteller A bestrahlt	$0,69 \pm 0,03$
Hersteller B bestrahlt	$0,68 \pm 0,05$
Hersteller A unbestrahlt	$0,86 \pm 0,02$
Hersteller B unbestrahlt	$0,85 \pm 0,02$

Tabelle 7.2: Ladungsverlust am Biasdot für Sensortiles von Hersteller A und B in bestrahltem ($1,1 \cdot 10^{15} \text{MeV} n_{\text{eq}} / \text{cm}^2$) und unbestrahltem Zustand, Fehler mittels quadr. Abweichungen vom Mittelwert aller Datenruns berechnet

Es ist erkennbar, daß sich die Ladungssammlungsverluste aufgrund des Biasgrids im Verhältnis zur gesammelten Ladung im übrigen Pixelbereich von ca. 15% im unbestrahlten Zustand auf 30% im bestrahlten Zustand verschlechtert. Für beide Hersteller von Siliziumtiles ergibt sich ein annähernd identisches Ergebnis. Inwieweit die Effizienz des Pixeldetektors von diesen Ergebnissen betroffen ist, klärt der nächste Abschnitt.

7.4.5 Auswirkung der Biasdotladungssammlung auf die mittlere Effizienz des gesamten Detektormoduls

Aus den bisherigen Ergebnissen (siehe Tab. 7.2) ergibt sich die Frage, inwiefern Teilchenspuren nicht detektiert werden und somit zur Ineffizienz des Pixeldetektors beitragen. Die Designschwelle des FE-Chips liegt bei unter $3000 e^-$ [STO04]. Im Rahmen der Labortests von ATLAS-Pixelmodulen werden die Schwellen auf $4000 e^-$ eingestellt, um Rauschtreffer auszuschließen. $4000 e^-$ sind weiterhin deutlich unterhalb der Ladungsdeposition eines MIPs. Um den Einfluß des Biasdots auf die Effizienz des Detektors abzuschätzen, ist eine Extrapolation der Strahlteilchen auf die Modulebene nötig, die unabhängig von der Modulauslese ist. Der Quotient aus Teilchendurchgängen, die vom Beamteleskop detektiert und extrapoliert wurden und gleichzeitig vom DUT detektiert wurden zu allen Trajektorien, die das Teleskop detektiert hat, stellt die Effizienz dar. Trajektorien, die ausschließlich das Teleskop registriert hat, blieben im Modul aufgrund von Ineffizienz

ungesehen.

Leider ist diese Operation nicht möglich, da zur Überprüfung der Genauigkeit jeder Trajektorie eine Abfrage nötig ist, ob der von H8 aus Teleskopdaten auf die Modulebene extrapolierte Auftreffpunkt auch der korrekte angesprochene Pixel des Moduls ist. So ist jede auf die Modulebene extrapolierte Trajektorie auch ein Ereignis im Module und der o.g. Quotient wäre immer gleich eins.

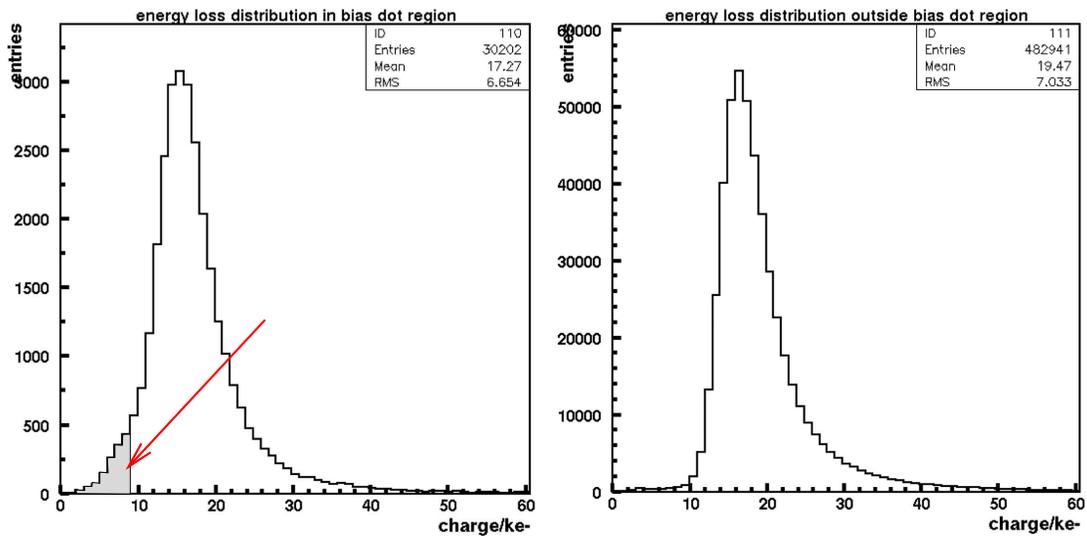
Dieses Problem kann allerdings insoweit umgangen werden, als daß die Fläche des Pixels von $50\mu\text{m} \cdot 400\mu\text{m}$ sehr klein gegenüber dem Beamspot des H8 Strahls ist, so daß innerhalb des Strahls jeder Teil eines Pixels eine homogene Ausleuchtung erfährt. So stellt der Quotient der Teilchenzahl im Biasdotbereich und der Teilchenzahl einer gleichgroßen Fläche im übrigen Pixelbereich die verringerte Effizienz des Sensors im Biasdotbereich dar. Die nachfolgende Tabelle stellt, nach Sensorhersteller und Bestrahlungszustand gruppiert, die verringerten Effizienzen des Biasdotgebietes gegenüber dem restlichen Pixel und die Auswirkung dieses Effektes auf die Gesamteffizienz des Sensors dar.

Testsample	verringerte Eff.	Auswirkung auf Gesamteff.
Hersteller A unbestrahlt	$0,95 \pm 0,01$	$0,997 \pm 0,001$
Hersteller B unbestrahlt	$0,94 \pm 0,01$	$0,996 \pm 0,001$
Hersteller A bestrahlt	$0,80 \pm 0,01$	$0,988 \pm 0,001$
Hersteller B bestrahlt	$0,77 \pm 0,01$	$0,986 \pm 0,001$

Tabelle 7.3: Verringerte Effizienz des Biasdot gegenüber dem Restpixelbereich und der Einfluß auf die Gesamteffizienz für Sensoren der Hersteller A und B

Abbildung 7.6 zeigt die Energiedepositionen zu den o.g. Regionen des Pixels. Deutlich ist im niederenergetische Teil des Histogramms, das die Daten des Biasgridbereichs zeigt (b), eine Erhöhung der Einträge zu sehen. Der rote Pfeil zeigt den Bereich zusätzlicher niederenergetischer Einträge an.

Ladungsanteile in diesem Bereich des Pixels können in fünf mögliche Nachbarpixel übersprechen oder vom Biasdot aufgenommen werden und stehen der DAQ nicht zur Verfügung. Mit der Annäherung der Ladungssammlung an die Eingangsschwelle steigt die Möglichkeit, daß Teilchen nicht detektiert werden und dies dann die Ineffizienz erhöht.



(a) Energieverlust innerhalb des Biasdotbereiches

(b) Energieverlust außerhalb des Biasdotbereiches

Abbildung 7.6: Energieverlust innerhalb und außerhalb des Biasdotbereiches

[LAR04] beschreibt ebenfalls die Ursache der wachsenden Ineffizienz des bestrahlten ATLAS-Pixelsensors im Bereich des Biasgrids jeweils an den Enden der länglichen Pixel.

7.4.6 Abhängigkeit der Ladungssammlung von der Biasvoltage

Ein Teil der Testbeamdatennahme geschah bei veränderten Biasspannungen, d.h. bei 300V, 400V, 500V, 600V und 700V. [LAR02] zeigte in einer Analyse der Daten, die unter einem Einschußwinkel von 30° gegenüber der Modulflächennormalen genommen wurden, den Zusammenhang der Verarmungstiefe und der Biasspannung für einen ATLAS-Pixelsensor mit einer Bestrahlungsdosis von $1,1 \cdot 10^{15} \text{ MeV } n_{eq}/\text{cm}^2$.

Bei der geringsten verwendeten Spannung liegt die Verarmungstiefe bei ca. $110 \mu\text{m}$ und steigert sich bis 600 Volt bis auf die maximale Tiefe von $225 \mu\text{m}$. Eine weitere Erhöhung der Biasspannung erhöht die Depletionstiefe nicht weiter [LAR02]. Nach dem in Kapitel 3.3 diskutierten Sensordesign wächst diese Depletionszone und somit das sensitive Volumen des Siliziums für typinvertierte Sensoren von der pixelierten Seite aus.

Vor diesem Hintergrund sehen die Ladungssammlungsergebnisse, die Abb. 7.7 für

die beiden Sensoranbieter darstellt, folgendermaßen aus:

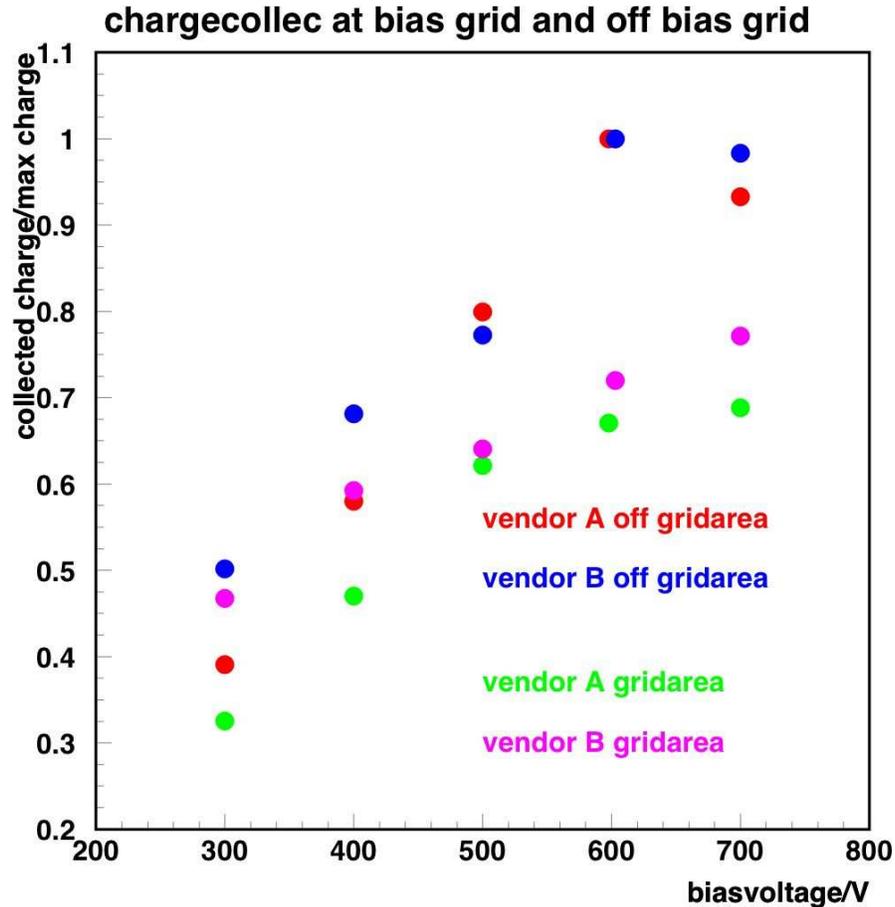


Abbildung 7.7: Ladungssammlung im Bereich des Biasgrids und im übrigen Bereich des Pixels jeweils normiert auf die höchste gemessene Ladung für die Hersteller A und B

Die Ladungsträgerpaare werden entlang der Wegstrecke eines passierenden Teilchens im Silizium erzeugt und sind somit proportional zu dieser Wegstrecke. Gesammelt werden können nur Ladungsträger, die im verarmten Volumen erzeugt werden. Einsichtig ist daher, daß die Ladungssammlung mit der Verarmungstiefe steigt, da mehr Ladungsträger gesammelt werden können.

Fraglich ist nun, warum im Bereich des Biasgrids die Ladungssammlung geringer mit der Biasspannung wächst als im übrigen Pixelbereich. Entgegen der naiven Annahme, daß die Auswirkungen des Biasgrids ein oberflächennaher Effekt ist, dessen Einfluß mit zunehmender Verarmungstiefe geringer werden sollte, zeigen die Daten beider Sensorhersteller eine Verringerung der Ladungssammlung ge-

genüber den übrigen Pixelbereichen.

Die wachsende Biasspannung hat nicht nur einen Effekt auf die Verarmungstiefe und auf die elektrische Feldstärke, sondern auch einen Einfluß auf die Veränderung der Geometrie des elektrischen Feldes.

Zur exakten Beschreibung dieses Phänomens ist eine dreidimensionale Bauteilesimulation nötig, die die unterschiedlichen Geometrien der Elektroden, die dielektrischen Konstanten der verwendeten Materialien und die strahlenschädenbedingten Veränderungen der Dotierungskonzentrationen beinhaltet. Dies würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, so daß hierbei nur die Ladungssammlung des kompletten Pixels simuliert wird.

7.5 Ladungssammlungssimulation

Die Einflüsse der Strahlenschädigung des Siliziums auf die Ladungssammlung können durch eine Simulation berechnet werden. [KRA04] beschreibt die Simulation der Ladungssammlung bei 250 μm dicken Siliziumstreifendetektoren, die zu länglichen Pixeln des ATLAS-Pixeldetektors vergleichbar sind.

Als Eingangsparameter sind die Dotierungskonzentrationen, der Leckstrom, die Trappingzeitkonstanten und die elektrische Feldverteilung im Silizium nötig.

Bewegte Ladungen induzieren auf der Zielelektrode eine Ladung dQ , diese ist proportional zur Driftgeschwindigkeit der bewegten Ladungsmenge und zum sogenannten Ramopotential \vec{E}_R .

$$dQ = q\vec{E}_R(\vec{r}) \cdot \vec{v}_{dr}dt. \quad (7.1)$$

Für unstrukturierte Halbleiterdetektoren ist \vec{E}_R analytisch berechenbar als:

$$\vec{E}_R = \frac{1}{d}\vec{e}_x. \quad (7.2)$$

Für strukturierte Detektoren besteht dieser Zusammenhang nicht. Für strukturierte Halbleiter wird die Laplacegleichung mit folgenden Randbedingungen gelöst: Das Ramopotential ist nur auf der Ladungssammlungselektrode gleich eins, zwischen den Elektroden und auf den übrigen Elektroden ist das Ramopotential gleich Null.

Für den Fall eines zweidimensionalen Pixeldetektors ergibt dies eine dreidimensionale Koeffizientenmatrix, im Falle eines eindimensionalen Streifendetektors eine zweidimensionale Koeffizientenmatrix, die zu lösen ist.

Weitere zur Simulation erforderliche Eingangsparameter sind die Bestrahlungszeit und -dosis und die Temperatur während der Bestrahlung und während der Lagerung, da diese Größen die Ausheilung von Strahlenschäden bestimmen. Die Strahlendosen sind durch das Strahlungsmonitoring aus der Bestrahlung der Module bekannt. Während der Bestrahlung wurden die Module mit einem eindimensional beweglichen Stellmotor quer zur Strahlrichtung in Längsrichtung der Module bewegt, so daß das Bestrahlungsprofil näherungsweise symmetrisch zur Längsachse der Module unterschiedliche Dosiszonen aufweist. Abb. 7.8 zeigt das Bestrahlungsprofil der getesteten Module.

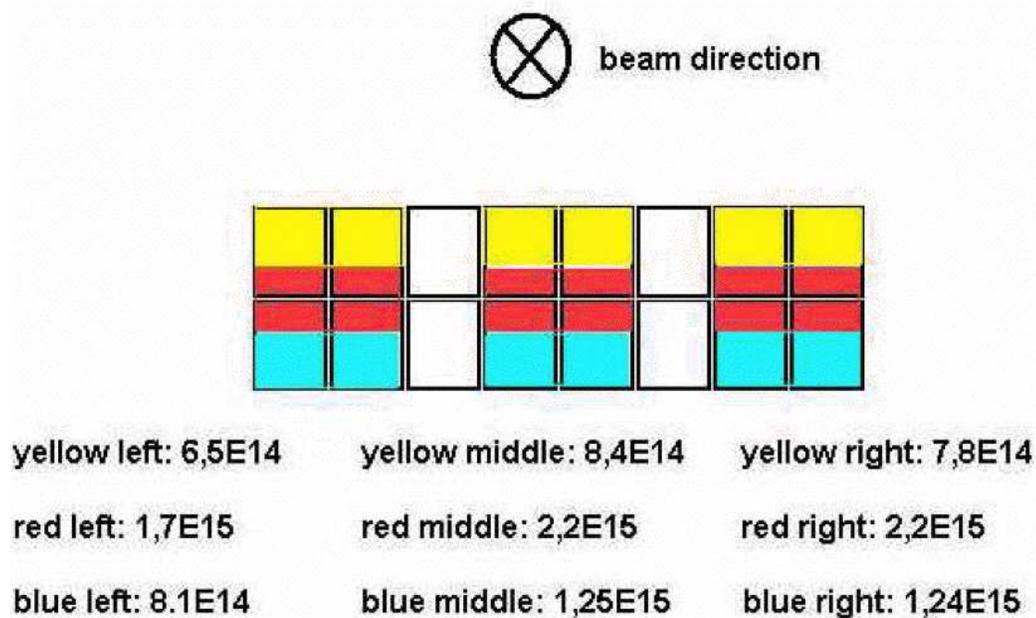


Abbildung 7.8: Bestrahlungsprofil der getesteten Module, Abb. von [EIN03]

Die angegebenen Dosen bilden die Eingangsparameter der Simulation. Die Testbeamdaten der bestrahlten Module erlauben es, die in den gezeigten Modulbereichen deponierten Ladungsmengen zu bestimmen. Bei dieser Betrachtung werden wieder Ladungen, die auf mehrere Pixel eines Clusters verteilt sind, zu einem Ladungseintrag addiert. Abb. 7.9 liefert eine Darstellung der Simulations- und der Testbeamdaten für die o.g. Bestrahlungsdosen.

Über den ganzen Bestrahlungsbereich dieser Abbildung sind die gemessenen Daten

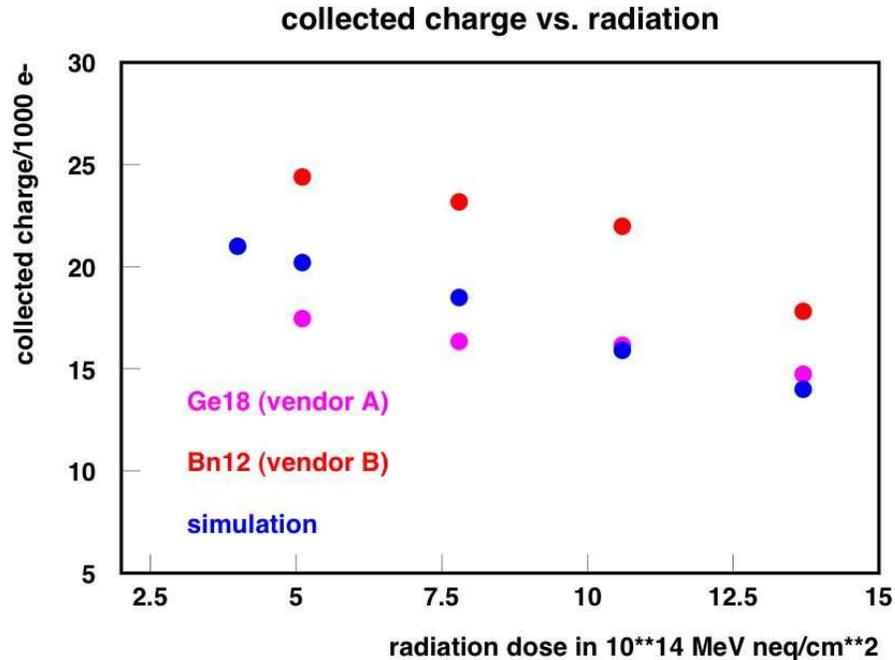


Abbildung 7.9: Ladungssammlung im Teststrahl und Simulation der Ladungssammlung für verschiedene Strahlendosen

verträglich mit den Simulationsdaten, dennoch liegen die Ergebnisse von Hersteller B tendenziell höher als die Ladungswerte von Hersteller A. Dieses Phänomen ist kalibrationsbedingt, da diese Module eine sehr inhomogene Bestrahlung erfahren haben, die sich innerhalb eines Moduls um bis zu einen Faktor 3 unterscheidet. Dies verhindert eine präzise, absolute Energiekalibrierung und führt zu Unterschieden wie bei den beiden betrachteten Modulen.

7.6 Schwellenvariationen

7.6.1 Effizienz vs. Schwelle

Eine weitere Erhöhung der Eingangsschwelle der FE-Zellen würde zu einer Reduktion der Effizienz führen, da Teilchenspuren, die den niederenergetischen Teil der Landauverteilung in Abb. 2.2 bilden, dann nicht mehr in die Datennahme gelangen. Im weiteren Betrieb des ATLAS-Experimentes wird der Sensorleckstrom, bedingt durch Strahlenschäden, steigen. Dies erzeugt ein erhöhtes Noise, weshalb die Schwelle erhöht werden muß, damit kein Noise als Treffer gewertet wird.

Um den Anteil von nicht detektierten Spuren abzuschätzen, kann die Eingangsschwelle offline in der Analyse variiert werden. Das Verhältnis der Eventzahl von anliegender Eingangsschwelle zur Eventzahl ohne zusätzliche Eingangsschwelle stellt die verringerte Effizienz gegenüber der ursprünglichen Eingangsschwelle dar. Abb. 7.10 zeigt die Ineffizienzkurve mit steigender Schwelle für die Sensoren jeweils von Hersteller A und B.

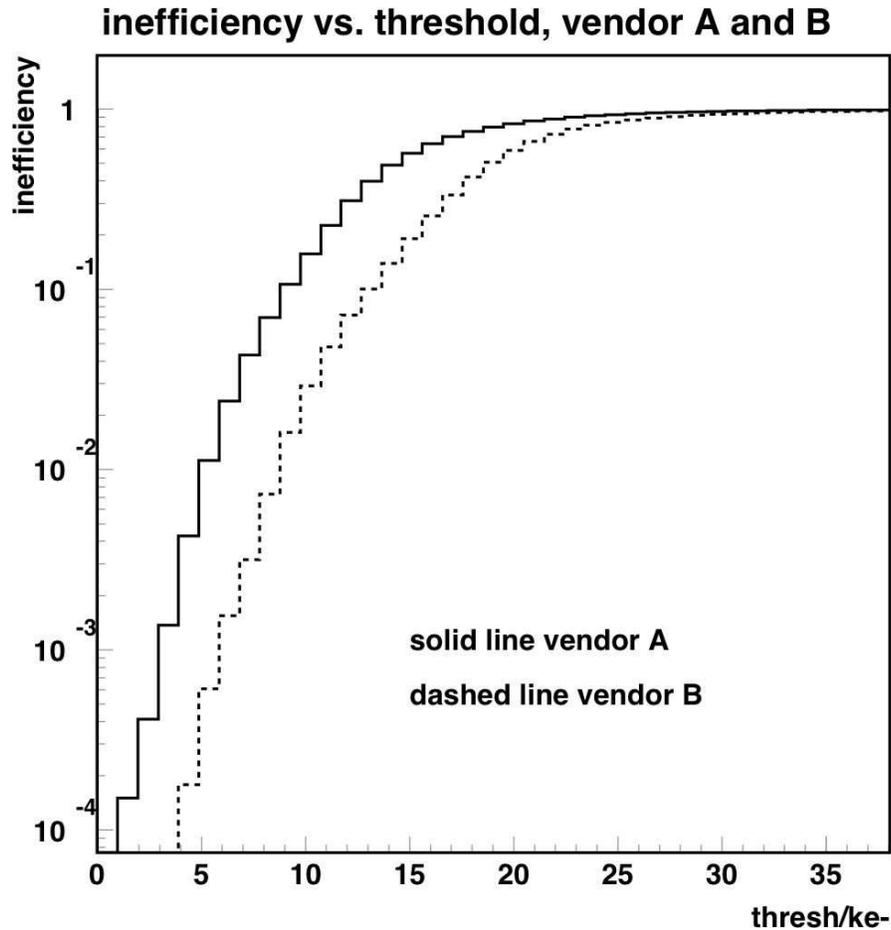


Abbildung 7.10: Verhalten der Ineffizienz gegenüber der Schwelle für bestrahlte Sensoren, jeweils für Hersteller A und B

Für Hersteller B zeigt sich ein besseres Verhalten als bei A, da die ersten meßbaren Verluste erst bei höherer Schwelle auftreten. Da eine Schwellenerhöhung von sogar 3 ke⁻ auch bei Hersteller A erst Verluste im Promillebereich bewirkt, ist für die Schwelle noch hinreichend Variationsmöglichkeit nach oben vorhanden.

7.6.2 Ortsaufgelöste Schwellenvariation

Nach diesen Darstellungen ist nun die Frage von Interesse, wo innerhalb eines Pixels mit steigender Eingangsschwelle Ineffizienzen auftreten, d.h. Teilchenspuren nicht detektiert werden können. Die folgende Sequenz in Abbildung 7.11 zeigt ortsaufgelöst von Bild zu Bild die Abnahme der gesehenen Spuren mit wachsender Eingangsschwelle. Hierbei wird ein bestrahlter Sensor des Herstellers B exemplarisch gezeigt. Prinzipiell verhält sich der Sensor des Herstellers A in diesem Aspekt qualitativ vergleichbar; die hier für Hersteller B gezeigten Effekte setzen bei Hersteller A schon jeweils bei einer um 2 ke^- geringeren Schwelle ein. Gut zu erkennen ist eine schnelle Abnahme der Effizienz zwischen den beiden Pixeln im Bereich des Biasgrids und des Biasdots, später auch in den Randbereichen der Pixel.

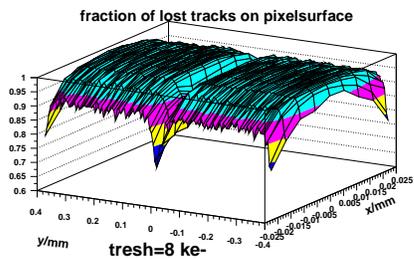
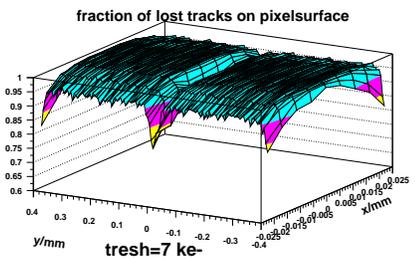
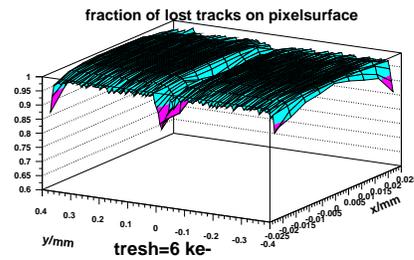
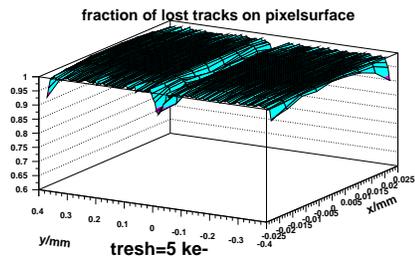
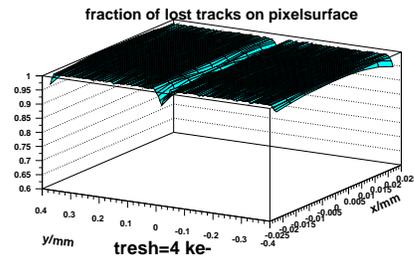
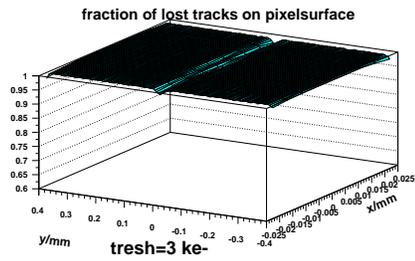
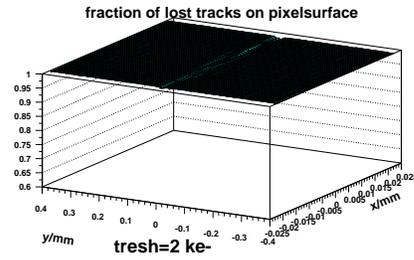
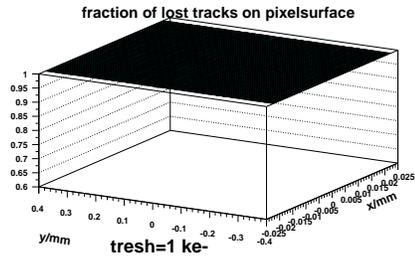


Abbildung 7.11: Verhalten der „lost tracks“ gegenüber der Schwelle exemplarisch für einen bestrahlten Sensor, Hersteller B

7.7 Ladungsverteilungen

Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, unterliegt die Ladungsdeposition in dünnen Absorbern (d.h. der Energieverlust ist klein gegenüber der Energie der passierenden Teilchen) einer Landauverteilung. Dies ist bei 180 GeV Pionen und rund 20000 generierten Ladungsträgerpaaren mit 3,69 eV pro Paar gegeben. Der Quotient $\frac{dE}{E}$ ist somit hinreichend klein.

Die deponierte Ladung wird bei einem Teilchendurchgang, wie Abschnitt 7.4.3 schon beschrieben hat, in mehreren Pixeln detektiert. Die Aufsummation aller Pixel eines Events zu Clustern ergibt die Ladung, die bei einem Teilchendurchgang deponiert wurde.

7.7.1 Vergleich von Vavilovverteilung und Landauverteilung

Die Energieverlustverteilungen von Teilchen, die dünne Absorber passieren, lassen sich zusätzlich zur Landauverteilung ebenfalls durch eine Vavilovverteilung beschreiben. Bei der Landauverteilung handelt es sich um eine integrale Verteilung der Form

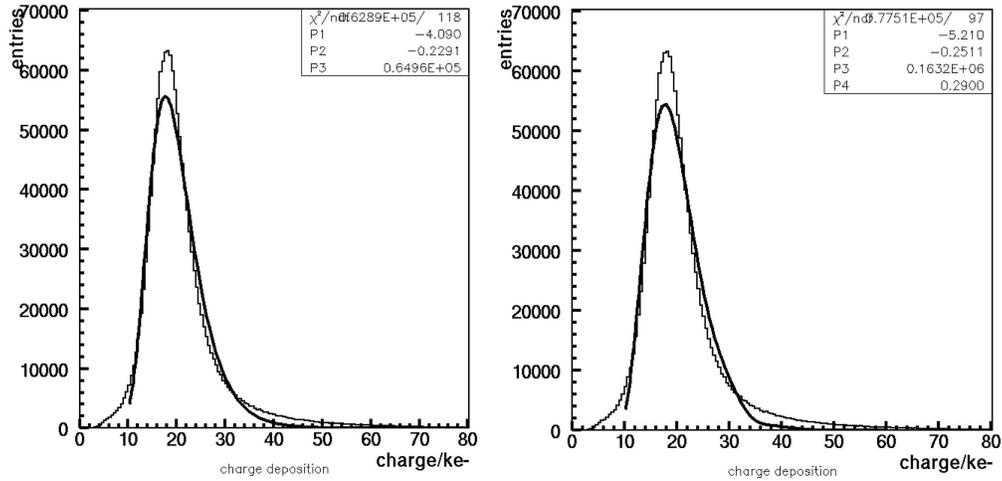
$$\phi(\lambda) = \frac{1}{2i\pi} \int_0^\infty e^{-s \log(s) - \lambda s} \sin(\pi s) ds, \quad (7.3)$$

die jeweils in akzeptablen analytischen Näherungen verwendet wird. Die Moyal'sche Näherung [MOY55] verwendet folgende Beziehung für die Landauverteilung:

$$\psi(\lambda) = \sqrt{\frac{e^{-(\lambda+e^{-\lambda})}}{2\pi}}. \quad (7.4)$$

Für die Vavilov'sche Beschreibung der Verteilung wird zusätzlich noch ein weiterer Term κ eingefügt mit $\kappa = \frac{E_{AV}}{E_{MAX}}$, wobei E_{AV} der durchschnittliche Energieverlust innerhalb der Absorberschicht ist und E_{MAX} der maximale Energieübertrag in einer einzelnen Kollision. Für kleine κ , d.h. $\kappa \leq 0,01$ geht die Vavilovverteilung in die Landauverteilung über.

Die folgende Abbildung 7.12 zeigt die Energieverlustverteilung für ein unbestrahltes Modul im 180 GeV Pionenstrahl mit einer angefitzten Landau- und Vavilovverteilungsfunktion.



(a) Energiedeposition in Silizium mit Landaufit

(b) Energiedeposition in Silizium mit Vavilovfit

Abbildung 7.12: Energieverlustkurve eines Pions im ATLAS-Pixelsensor, mit Landaufit (links) und Vavilovfit (rechts)

Bei beiden Fits werden die Spitzen der Verteilungen zu niedrig dargestellt, die Steigung der fallenden Flanke ist nicht steil genug und das hochenergetische Ende der Verteilung wird zu flach gefittet.

Das Ergebnis ist ein reduziertes χ^2 von 538 für den Landaufit und 799 für den Vavilovfit. Offensichtlich scheinen noch weitere Randbedingungen die Energiedeposition im Silizium zu beeinflussen.

7.7.2 Differenzierung nach Pixelarten

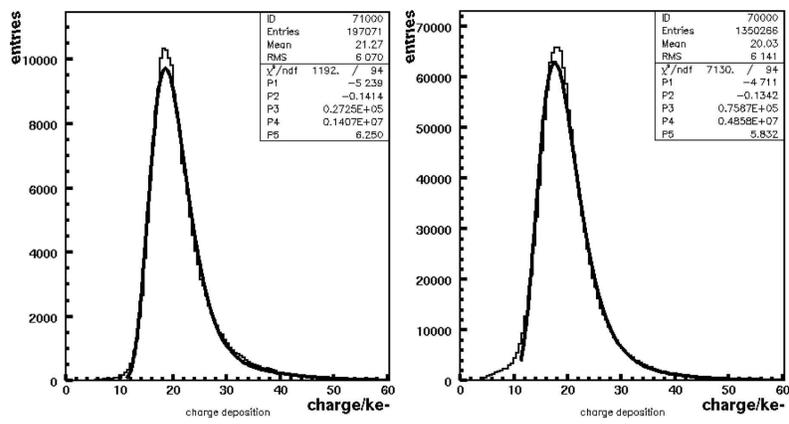
Der Sensor besteht aus 39168 normalen, 4896 long und 1792 ganged Pixeln, die zwar dieselbe Sensordicke haben, aber aus Geometriegründen unterschiedliche Kapazitäten und Ramopotentiale besitzen.

Das Übersprechen von Ladung ist aufgrund der unterschiedlichen Rand-zu-Flächenverhältnisse ebenfalls unterschiedlich.

Ladungsanteile, die möglicherweise in Nachbarpixel übergehen, deren Schwelle aber nicht überschritten wird, werden nicht registriert und diese Ladungsanteile verändern die Ladungsverteilung von der theoretisch erwarteten Form. Aus diesem Grund werden nun die unterschiedlichen Pixelarten getrennt betrachtet und in deren Randbereich und Zentralbereich unterschieden. Zum Zentralbereich zählt jeweils eine Fläche von $20 \mu\text{m}$ in x-Richtung und $160 \mu\text{m}$ ($40 \mu\text{m}$ entfernt von den

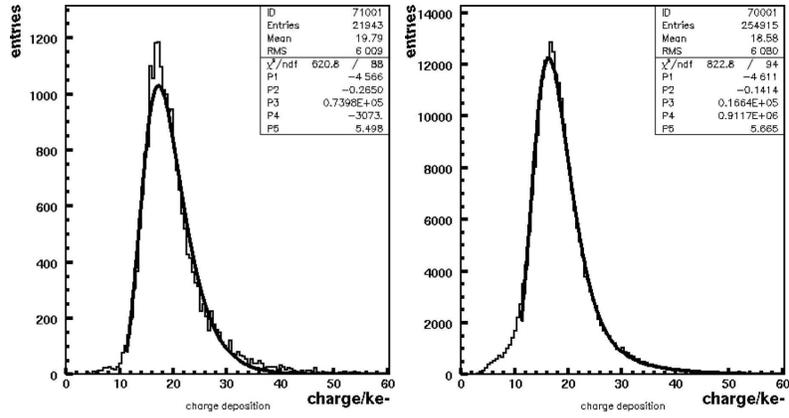
Pixelstirnseiten und den damit verbundenen Effekten auf die Ladungssammlung) in y-Richtung vom Zentrum, zum Randbereich der Rest der jeweiligen Pixelfläche. Um die endliche Auflösung des Pixeldetektors zu berücksichtigen, wurde in den nächsten Verteilungen die Faltung der genäherten Landauverteilungsfunktion mit der Gauß'schen Verteilungsfunktion verwendet:

$$f(\epsilon, x) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{\frac{e^{-(\lambda+e^{-\lambda})}}{2\pi}} \times \exp(-(\epsilon - \epsilon')^2 / 2\sigma_t^2) d\epsilon' \quad (7.5)$$



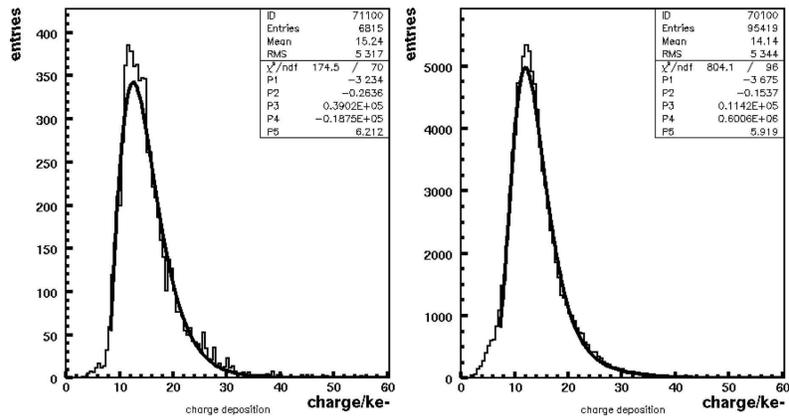
(a) Landaufit eines normalen Pixels im Zentrum

(b) Landaufit eines normalen Pixels im Randbereich



(c) Landaufit eines long Pixels im Zentrum

(d) Landaufit eines long Pixels im Randbereich



(e) Landaufit eines ganged Pixels im Zentrum

(f) Landaufit eines ganged Pixels im Randbereich

Abbildung 7.13: Energieverlustkurven gefittet mit einer Landaufunktion gefaltet mit einer Gauß'schen Funktion für normale, lange und ganged Pixel

In der Abbildung 7.13 ist eine bessere Anpassung der Fitfunktion an die Verteilungen der Pixelzentralbereiche gegenüber den Pixelrandbereichen sichtbar, was die geringeren χ^2 Werte der Pixelzentralbereiche belegen.

Desweiteren unterscheiden sich die mittleren Energiedepositionen der Pixelsorten voneinander. Dieses Phänomen behandelt Abschnitt 7.7.3.

Trotz der Konzentration auf den Zentralbereich der Pixel und der Faltung der Landau- mit der Gauß'schen Verteilungsfunktion besitzen die Annäherungen des Modells an die Verteilungen nicht die Güte, um mittels des Vergleichs der Eintragszahl zur angenäherten idealen Theorieverteilung eine Aussage über nicht detektierte Ereignisse im Niederenergiebereich des Histogramms zu treffen.

Mit den Fitparametern des mittleren und oberen Ladungsbereiches wäre der untere Kurvenbereich vorhersagbar gewesen. Schwellenbedingte Ineffizienzen lägen dann in diesem Bereich unter der Modellkurve und wären durch das Integral der Kurve quantisierbar. Damit wäre eine Effizienzaussage möglich.

7.7.3 Unterschiedliche Ladungsdepositionen

Bei dieser Betrachtung sollen die gemessenen Ladungsdepositionen der unterschiedlichen Pixelsorten betrachtet werden. Dies sind long, normal, ganged, long & ganged und interganged Pixel. Hierzu werden die Teststrahlraten zweier unbe-strahlter Module LBL 20 und LBL 22 verwendet.

Alle Pixelsorten liefern bei gleichen ionisierenden Teilchen unterschiedliche Ladungsinformationen im Falle von Modul LBL 22, obwohl die Anzahl generierter Ladungsträgerpaare jeweils nicht von der Pixelgeometrie oder Größe, sondern nur von der Dicke des depletierten Siliziums abhängen sollte. LBL 20 ergibt vergleichbare Ladungswerte für die unterschiedlichen Pixelsorten. Tabelle 7.4 listet die im Pixelzentralbereich detektierten Ladungsmengen für die o.g. Pixelsorten auf.

Pixelart	Ladung in ke^- (LBL 20)	Ladung in ke^- (LBL 22)
normal Pixel	$23,28 \pm 0,4$	$21,78 \pm 0.1$
ganged Pixel	$22,72 \pm 0,3$	$15,67 \pm 0.1$
long pixel	$22,55 \pm 0,2$	$20,28 \pm 0.2$
long & ganged Pixel	$21,88 \pm 0,3$	$14,43 \pm 0.2$
interganged Pixel	$22,55 \pm 0,1$	$19,90 \pm 0.2$

Tabelle 7.4: Mittlere Ladungsdeposition im Zentralbereich verschiedener Pixelsorten für Modul LBL 20 und LBL 22

Bei Modul LBL 20 unterscheiden sich die Extremwerte um einen Faktor 1,06 und bei Modul LBL 22 beträgt dieser Faktor 1,51.

Abb. 7.14 stellt die Ergebnisse graphisch dar. Modul LBL 20 hat ein annähernd konstantes Ladungssammlungsergebnis bei allen Pixelarten gegenüber LBL 22, dessen Ladungssammlung zwischen den Pixelarten große Schwankungen aufweist.

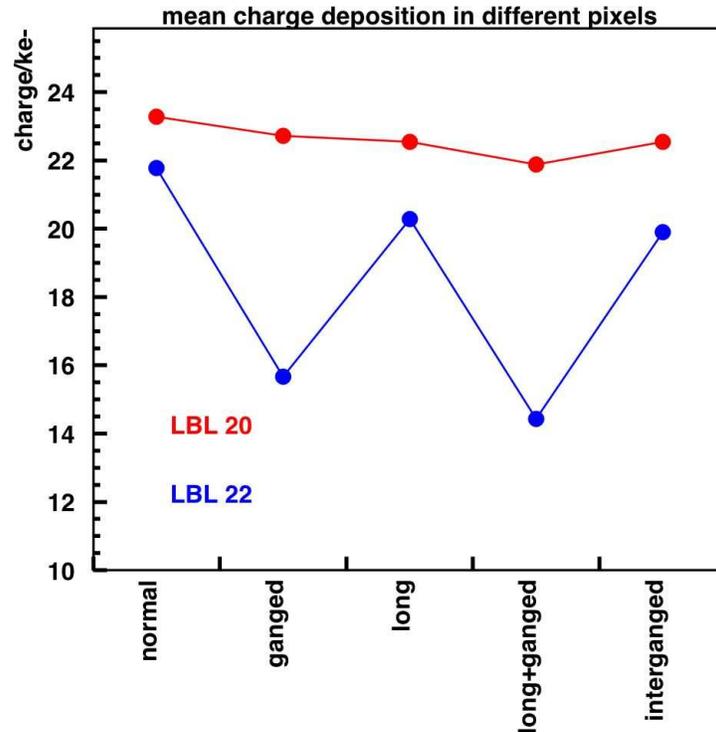


Abbildung 7.14: Schwankungen der mittleren Ladungsdepositionen bei unterschiedlichen Pixelarten für die Module LBL 20 und LBL 22

Begründen läßt sich das Phänomen der unterschiedlichen, detektierten Ladungsmengen bei gleich vielen generierten Ladungsträgerpaaren durch die unterschiedlichen Kapazitäten der Pixelarten. Die Kapazität eines Pixel ist in erster Näherung abhängig von dessen Fläche und der Dicke der depletierten Zone mit Silizium als Dielektrikum. Einen weiteren Einfluß haben die kapazitiven Kopplungen der Nachbarpixel auf den betrachteten Pixel nach folgendem Ersatzschaltbild.

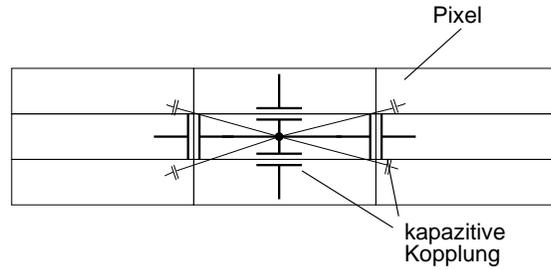


Abbildung 7.15: Ersatzschaltbild für die kapazitive Kopplung der Nachbarpixel

Die Größe des kapazitiven Beitrags hängt von der Länge der gemeinsamen Grenzfläche, im Falle der ganged Pixel von der Kontaktmetallisierung, ab. [EIN02] gibt für die Kapazitäten der unterschiedlichen Pixelsorten folgende Werte an:

Pixelsorte	Kapazität der Pixel in nF
normal Pixel	300
ganged Pixel	1000
long pixel	400
long & ganged Pixel	1000
interganged Pixel	700

Tabelle 7.5: Kapazitäten der unterschiedlichen Pixelsorten

Schaltbild 7.16 zeigt die Potentialverhältnisse der Pixelzelle. Die n-Seite des Sensors und die FE-Zelle liegen auf demselben Potential. Daher müssen bei identischen Ladungsdepositionen durch MIPs Spannungspulse gleicher Höhe an die Readoutzelle gehen.

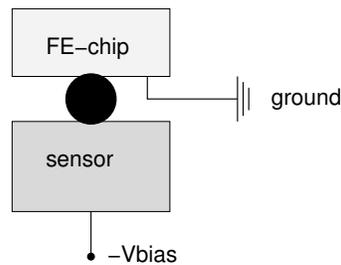


Abbildung 7.16: Schematische Darstellung der Erdungsverhältnisse zwischen Sensor und FE-Chip, FE-Chip und Sensorvorderseite liegen auf demselben Potential

Bei unterschiedlichen Pixelkapazitäten sollten nach

$$dC_{pixel} = \frac{dQ_{mip}}{dU_{pixel}} \quad (7.6)$$

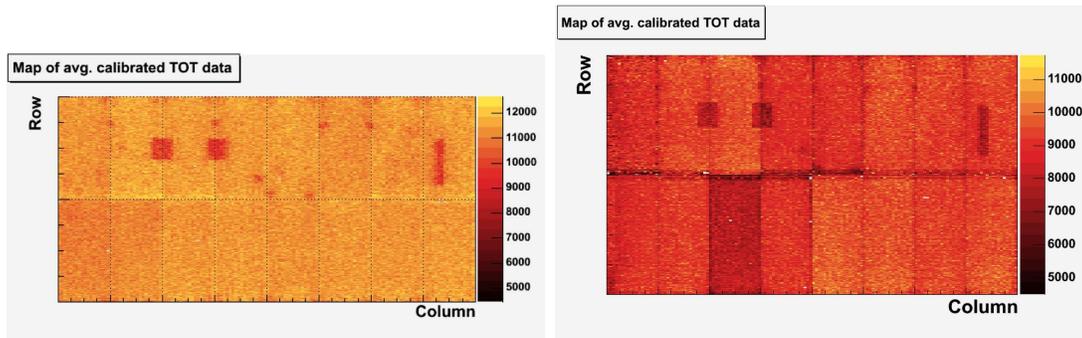
die MIP-Signale von deren Größe abhängen.

Bei LBL 22 ist dies der Fall, bei LBL 20, das einen Sensor des gleichen Herstellers besitzt, nicht. Eine Kalibrierung sollte in der Lage sein, diesen beschriebenen Effekt zu kompensieren, sofern die Pixelkapazität elektrisch mit der FE-Zelle verbunden ist.

LBL 20 und LBL 22 bestehen aus Baremodulen, die von unterschiedlichen Bumpvendorn hergestellt wurden. LBL 20 hat Zinn/Blei-Bumps, LBL 22 hingegen Indiumbumps. Beide Bumpsorten unterscheiden sich im Widerstand. Die verwendeten Zinn/Blei-Bumps haben 0,5 Ohm, die Indiumbumps hingegen 10 Ohm. Dies bedeutet, daß im Falle von Indiumbumps die Einbeziehung der Pixelkapazitäten in die Kalibrierung durch den zwanzigfach höheren Widerstand des Bumps unterdrückt ist. Da alle nicht-standard Pixel in der Summe einen Anteil von $\frac{1}{5}$ aller Pixel ausmachen, dazu $\frac{2}{3}$ aller Module Indiumbumps besitzen, werden $\frac{2}{15}$ (ca. 13%) aller Pixel keine optimale Kalibrierung besitzen. Durch einen numerischen Korrekturterm in der Ladungskalibrierung jeweils für alle ganged, long und interganged Pixel der Produktionsmodule mit Indiumbumps kann dieses Phänomen ausgeglichen werden, um im Pixeldetektor eine möglichst homogene Kalibrierung für alle Pixelsorten zu ermöglichen.

Dieses Ladungsverhalten der unterschiedlichen Bumps zeigt sich auch bei Quellenscans der produktionsbegleitenden Tests, bei denen auch im Sensor Ladungsträgerpaare generiert werden, deren Anzahl in ToT-Werten gemessen wird und durch dieselbe Kalibrierung in Einheiten von Elementarladungen umgerechnet wird. Zinn/Blei-Bumps zeigen über alle Pixelsorten ein homogenes Verhalten, bei Pixeln mit Indiumbumps zeigen insbesondere die ganged Pixel ein abweichendes Verhalten.

Im Bereich der drei großen Kapazitäten auf dem Flex wurden ebenfalls abweichende Ladungsmengen gemessen. Die Anzahl der Einträge unter diesen Kapazitäten ist, bedingt durch die Absorption dieser Bauteile um einen Faktor drei, reduziert, so daß die Einträge in diesen Bereichen nicht für eine gute Kalibrierung durch das Fitten einer Gaußverteilung an den Photopeak ausgereicht haben. Für die Quellentests im Rahmen der Modulcharakterisierung ist dies unerheblich, da hierbei nur die Bumpverbindung überprüft werden soll.



(a) Ladungsverteilung eines Moduls mit Zinn/Blei Bumps

(b) Ladungsverteilung eines Moduls mit Indium Bumps

Abbildung 7.17: Vergleich der ortsaufgelösten Ladungsdeposition beim Quellentest je eines Moduls mit Zinn/Blei Bumps (a) und Indium Bumps (b).

Abbildung 7.17 zeigt die ortsaufgelöste Ladungsdeposition eines Moduls mit Indiumbumps und eines mit Zinn/Blei-Bumps. Deutlich sind im Bereich der long und ganged Pixel abweichende Ladungseinträge im Falle der Indiumbumps zu sehen.

7.8 Diskussion der Ergebnisse

In den vorigen Abschnitten dieses Kapitels wurde die Ladungssammlung an Modulen mit Sensoren der beiden Hersteller A und B untersucht. Im Rahmen der Fehler war kein Unterschied im bestrahlten wie im unbestrahlten Fall für die Ladungssammlung im Bereich des Biasgrids festzustellen. Im Bereich des Effizienzeinflusses der Biasgridstrukturen zeigen sich geringfügige Unterschiede zwischen beiden Anbietern, die aber nicht relevant sind.

Monte-Carlo-Simulationen physikalischer Ereignisse im ATLAS-Detektor erfordern eine genaue Kenntnis über die lokalen Unterschiede der Ladungssammlung im Pixelsensor.

Die experimentellen Ergebnisse der Ladungssammlung für bestrahlte Sensoren konnten durch eine Simulation der Trappingwahrscheinlichkeit der Ladungsträger simuliert werden. Diese Simulation, deren Eingangsparameter die Daten der Bestrahlungs- und Annealing-Historie sind, zeigen sich verträglich mit den gewonnenen Daten.

Die Betrachtung zweier Module, bei denen herstellerbedingt unterschiedliche Tech-

niken und Materialien beim Flip-Chipping zur Baremodulherstellung verwendet wurden, konnte die Auswirkung auf die Güte der automatisierten Kalibrierung dieser beiden Bumpmaterialien aufzeigen. Hier besteht noch weiterer Bedarf, diese Effekte durch eine numerische Korrektur in der Kalibrierung zu beheben.

Zusammenfassung

Zu Beginn dieser Arbeit wurde das ATLAS-Experiment mit seinen Subdetektoren und dem Triggerkonzept vorgestellt. Die besondere Bedeutung des Pixeldetektors im Rahmen dieser Arbeit erforderte es, die Funktionsweise von Silizium als Teilchendetektor und das prinzipielle Designkonzept des Siliziumsensors zu verdeutlichen. Ferner wurden die Funktionsweisen der Elektronikchips des Pixeldetektors erläutert, wie Trefferdaten von der Pixelzelle aus dem Modul herausgetaktet werden. Mit diesen Erklärungen kann die Darstellung der Modultestschritte, die darauf folgenden Analysen der Initial-Qualification-Module und die Analyse der Teststrahldaten im darauffolgenden Kapitel 7 verstanden werden.

Ein Schwerpunkt der Tätigkeiten zu dieser Dissertation lag in der erfolgreichen Implementation einer Produktions- und Testlinie für ATLAS-Pixelmodule. Die Organisation und Strukturierung der Arbeitsabläufe für Tests und Montageschritte gehörten ebenso zu diesen Tätigkeiten wie die Qualifizierung Dortmunds als Produktionsstandort.

Ihre Funktionsfähigkeit stellen die gefertigten Module in den beschriebenen Modultests unter Beweis. Die Daten wurden im Analysekapitel der Moduldaten auf Systematiken der in Dortmund gefertigten ersten zehn Module untersucht. Durch Tests der Komponenten zwischen den einzelnen Montageschritten konnten Veränderungen der Eigenschaften im Fertigungsprozeß aufgezeigt werden. Diese Module stellten die „initial qualification modules“ für Dortmund als „production site“ dar. Durch wiederholtes Messen eines Moduls an unterschiedlichen Setups konnte gemeinsam mit den nordrhein-westfälischen Kollaborationspartnern die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Testdaten gezeigt werden.

Die Daten dieser Betrachtung wurden bis Mitte Oktober 2004 erhoben, wobei die Initial Qualification eine sinnvolle Zäsur bildete. Natürlich verlief die Fertigung und Charakterisierung danach unvermindert weiter. Abb. 7.18 zeigt die integrierte Produktionsrate von ATLAS-Pixelmodulen bis zur Fertigstellung der vorliegenden Arbeit im Dezember 2004.

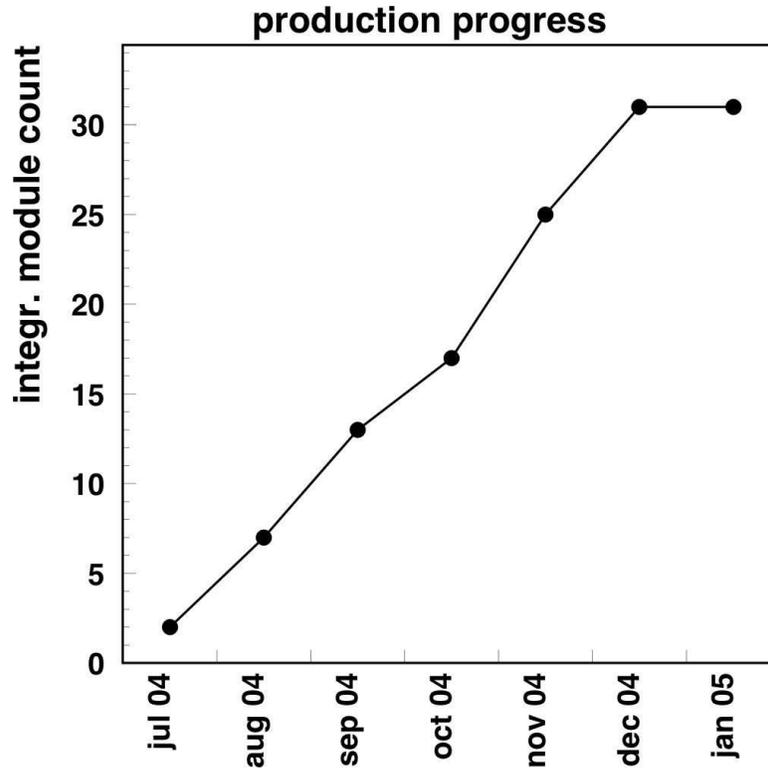


Abbildung 7.18: Integrierte Produktionsrate von Produktionsmodulen am Standort Dortmund.

Das letzte Kapitel dieser Arbeit beschreibt die Teststrahlaktivitäten der Pixel Kollaboration und das dafür verwendete Setup, um bestrahlte und unbestrahlte Module in einer experimentnahen Umgebung zu testen. Ergebnisse des Ladungssammlungsverlustes am Biasdot, dessen Funktionalität im Kapitel über das Pixeldetektordesign erläutert wurde, konnten für den Betrieb des Pixeldetektors geliefert werden, ebenso eine Abschätzung des Effizienzverlustes bezüglich der gesamten Pixeloberfläche. Durch eine Simulation der Ladungssammlung in $250 \mu\text{m}$ bestrahltem Silizium mit den zeitlichen Temperaturprofilen als Inputparameter konnten die Ladungssammlungsergebnisse untermauert werden.

Mit dieser Arbeit wurde die Funktionalität von ATLAS-Pixelmodulen in Hochenergieanwendungen gezeigt und die Dortmunder Beiträge zur Produktion und Charakterisierung der Serienmodule dokumentiert werden.

Tabellenverzeichnis

1.1	Betriebsparameter des LHC	8
4.1	Selektionskriterien und deren Grenzwerte für die Funktionstauglichkeit eines Pixels	69
4.2	Selektionskriterien und deren Grenzwerte für Produktionsmodule	70
5.1	Elektronikanforderungen des Pixeldetektors	85
6.1	Dominierende Beiträge zur Anzahl an bad Pixeln innerhalb der Cross-Kalibrationsmessungen	91
7.1	Effizienzen für bestrahlte und unbestrahlte ATLAS-Pixelmodule .	96
7.2	Ladungsverlust am Biasdot für Sensortiles von Hersteller A und B	100
7.3	Verringerte Effizienz des Biasdot gegenüber dem Restpixelbereich	101
7.4	Mittlere Ladungsdeposition im Zentralbereich verschiedener Pixel-sorten	114
7.5	Kapazitäten der unterschiedlichen Pixelsorten	116

Abbildungsverzeichnis

1.1	Der LHC-Speicherring	8
1.2	Der ATLAS-Detektor	10
1.3	Das Myonspektrometer	12
1.4	Übersicht über die Kalorimetersysteme	14
1.5	Schematische Darstellung des Innendetektors	15
1.6	Schematische Darstellung des dreistufigen Triggersystems	16
2.1	Darstellung der Bethe-Bloch-Formel	19
2.2	Energieverlustverteilungsfunktion für 250 μm Silizium	20
2.3	Bandniveauschema eines Halbleiters	22
2.4	Ladungsverteilung innerhalb eines Halbleiters	23
2.5	Ghosthits zweier orthogonaler Streifenzähler	25
2.6	Einfluß des Lorentzwinkels auf die Ortsauflösung bei ebener und geneigter Montage von Modulen	27
3.1	Der dreilagige Pixeldetektor	31
3.2	Sensorwafer	32
3.3	Layout der Pixeloberfläche dargestellt anhand zweier benachbarter „normal“ Pixel	33
3.4	Effektive Dotierung in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdosis	34
3.5	Ausbreitung der Depletionszone in das Silizium bei angelegter Biasspannung jeweils für p^+ -Pixel (a,b) und n^+ -Pixel (c,d)	35
3.6	Schematische Darstellung der moderierten p-spray Implantation	36
3.7	Zwischenpixelregion mit long, ganged und interganged Pixel	37
3.8	Blockschaltbild des analogen Teils der Auslesezone	38
3.9	7,4 · 11,0 mm ² großer FE-chip (Prototyp)	39
3.10	Querschnitt eines ATLAS-Pixelmoduls und Aufsicht auf das Flex	41
4.1	Abbildung des Flexmontageboards	44
4.2	Pigtailtools	45
4.3	Verteilung der MCC-Pulltests der ersten zehn in Dortmund gefertigten Module	47

4.4	Verteilung der FE-Chip Pulltests der ersten zehn, in Dortmund gefertigten Module	49
4.5	Schematische Darstellung des Modultestsetups	50
4.6	Modulmeßstand mit DAQPCs, VME, LV und HV-Geräten	52
4.7	Schematische Darstellung des Burn-in Setups	54
4.8	Klimakammer und Surfboard für den Burn-in Prozeß	55
4.9	Laminar-Flowbox im Dortmunder Modullabor	56
4.10	3D-Verfahrtschisch mit Vakuumchuck für die Baremodulfixierung	58
4.11	Ideale Antwortfunktion und Fit an die reale Antwortfunktion des Pixeldiskriminators beim Schwellescan	60
4.12	Flußdiagramm mit den Produktions- und Testschrittreihenfolgen	66
4.13	Logbuchseite der ersten zehn Produktionsmodule der Dortmund Assmby Site	72
5.1	Ortsaufgelöste Verteilung des Quellenscans	74
5.2	Ortsaufgelöste (a) und histogrammierte (b) Verteilung der Schwelle nach dem Tuning für Modul 510423	75
5.3	Ortsaufgelöste Verteilung des Rauschens	76
5.4	Verteilung der Noiseträger für unterschiedliche Pixelarten	77
5.5	Noise verschiedener Pixelarten gegenüber deren Kapazität	78
5.6	temperaturkorrigierte IV-Kurve	80
5.7	Durchbruchspannung (a) und Leckstromverteilung (b) der zehn Qualifizierungsmodule	81
5.8	Digitale (a) und analoge (b) Ströme der FE-Chips	82
5.9	Pixeldefekte beim Quellenscan (a) und Summe aller bad Pixel (b)	84
5.10	Verteilung von Schwelle (a), Schwellendispersion (b) und Noise (c) der zehn Qualifizierungsmodule	86
6.1	Leckstrom bei 150 V Biasspannung und IV-Kurven der drei Meßstandorte	88
6.2	Analog- (a) und Digitalströme (b) der drei Messungen.	89
6.3	Analoge Elektronikparameter des Cross-Kalibrationsmodul	90
6.4	Anzahl der bad Pixel gemessen in Bonn, Dortmund und Siegen	91
7.1	Schematische Darstellung des Strahlteleskops	94
7.2	Nachweiseffizienz gegenüber der Zeit	95
7.3	Datenflußdiagramm zur Prozessierung der Testbeamdaten	97
7.4	Verteilung der Clustergrößen auf der Pixeloberfläche	98
7.5	Projektionsdarstellung der Ladungssammlung am Biasdot	99
7.6	Energieverlust innerhalb und außerhalb des Biasdotbereiches	102

7.7	Ladungssammlung im Bereich des Biasgrids und im übrigen Bereich des Pixels	103
7.8	Bestrahlungsprofil der getesteten Module	105
7.9	Ladungssammlung im Teststrahl und Simulation der Ladungssammlung für verschiedene Strahlendosen	106
7.10	Verhalten der Ineffizienz gegenüber der Schwelle für bestrahlte Sensoren, jeweils für Hersteller A und B	107
7.11	Verhalten der „lost tracks“ gegenüber der Schwelle exemplarisch für einen bestrahlten Sensor, Hersteller B	109
7.12	Energieverlustkurve eines Pions im ATLAS-Pixelsensor	111
7.13	Energieverlustkurven gefittet mit einer Landauf Funktion gefaltet mit einer Gauß'schen Funktion	113
7.14	Schwankungen der mittleren Ladungsdepositionen bei unterschiedlichen Pixelsorten	115
7.15	Ersatzschaltbild für die kapazitive Kopplung der Nachbarnpixel	116
7.16	Schematische Darstellung der Erdungsverhältnisse zwischen Sensor und FE-Chip	116
7.17	Vergleich der orts aufgelösten Ladungsdeposition beim Quellentest je eines Moduls mit Zinn/Blei Bumps (a) und Indium Bumps (b).	118
7.18	Integrierte Produktionsrate von Produktionsmodulen am Standort Dortmund.	121

Abkürzungsverzeichnis

ALICE	A Large Collider Experiment
ATLAS	A Large Torodial Apparatus
BOC	Bottom of column region
CASTOR	Cern Advanced Storage Manager
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CMS	Compact Myon Solenoid
CSC	Cathode Strip Chambers
DAQ	Data Aquisition
DI	Data In
DO	Data Out
DSM	Deep Submicron
DUT	Device under Test
EF	Event Filter
EM	Electromagnetic Calorimeter
EoC	End of Column
FE-chip	Front End Chip
GDAC	Global Digital Analog Converter
GMA	Gesellschaft zur Mikroelektronikassemblierung
GIPB	General Purpose Interface Bus
GUT	Grand Unifying Theory
HV	High Voltage
IF	Feedback Current
LEP	Large Electron Positron Collider
LHC	Large Hadron Collider
LHCb	Large Hadron Collider beauty Experiment
LV	Low Voltage
LVL1,2,3	Level 1,2,3 Trigger
MAC	Module Adapter Card
MCC	module control chip
MDT	Monitored Drift Tube

MIP	Minimum Ionizing Particle
MXI	Multisystem eXtension Interface
NIEL	Not Ionizing Energy Loss
NTC	Negative Temperature Coefficient
PAW	Physics Analysis Workshop
PCI	Peripheral Component Interconnect
PDB	Production Database
PKA	Primary Knock on Atom
RoI	Region of Interest
RPC	Resistive Plate Chamber
SCT	Semiconductor Tracker
SPS	Super Proton Synchrotron
SuRF	Supply & Readout Fanout
TDC	Time Digital Converter
TGC	Thin Gap Chamber
ToT	Time over Threshold
TPCC	Turbo Pixel Control card
TPLL	Turbo Pixel Low Level Card
TRT	Transition Radiaton Tracker
VME	Versa Module Eurocard

Literaturverzeichnis

- [ALE98] — ALLEPO, M. RAGUSA, F. (1998) *A Measurement of the Lorentz angle*. Talk given at ATLAS Pixel Sensor Group meeting
- [ATL03] — ATLAS PIXEL COLLABORATION, . (2003) *On-detector Electronics Architecture, Draft C 3.0*. CERN
- [BAR00] — BARTSCH, V. (2000) *Dreidimensionale Bauelementesimulationen verschiedener Prototyp-Designs für den ATLAS-Pixelsensor*. Diplomarbeit Universität Dortmund
- [CAL97] — ATLAS COLLABORATION. (1997) *Calorimeter Performance, Technical Design Report*. CERN
- [CER04] — (2004) <http://user.web.cern.ch/User/Welcome.html>. Homepage des CERN
- [DOB04] — DOBOS, D. (2004) *Production accompanying testing of the ATLAS Pixel module*. Diplomarbeit Universität Dortmund
- [EIN02] — EINSWEILER, K. (2002) *Change List for FE-I2 Engineering Run*. Vortrag bei ATLAS Pixel Week, Dez. 2002
- [EIN03] — EINSWEILER, K. (2002) *Pixel Electronics Status for PDSG*. Vortrag bei ATLAS Pixel Week, Sep. 2003
- [ELS03] — ELSING, M. (2003) *Configuration of the ATLAS Trigger System*. arXiv:physics/0306046 v1
- [GIA00] — GIANOTTI, F. AND ALTARELLI, M. P. (2000) *Precision Physics at the LHC*. arXiv:hep-ex/0006016 v1
- [GIA02] — GIANOTTI, F. (2002) *Physics at the LHC*. Vorlesung der CERN Summer Student lectures, Aug. 2002

- [GRO04] — GROSSE-KNETTER, J. (2004) *The ATLAS Pixel Detector*. arXiv:physics/0401068 v1
- [HUE01] — HÜGGING, F. (2001) *Der ATLAS-Pixelsensor*. Dissertation, Universität Dortmund
- [KEI01] — KEIL, M. (2001) *Pixeldetektoren aus Silizium und CVD-Diamant zum Teilchennachweis in ATLAS bei LHC*. Dissertation Universität Bonn
- [KLA03] — KLAIBER-LODEWIGS, J.M. (2003) *Pixel Sensor Quality Assurance Plan ATL-IP-QA-0001*.
- [KLA05] — KLAIBER-LODEWIGS, J.M. (2005) *The ATLAS Pixel Sensor - properties, characterization and quality control*. Dissertation Universität Dortmund
- [KRA02] — KRASEL, O. (2002) *The Radiation Hardness of the ATLAS Pixel Sensor*. Vortrag auf 1st Workshop on Radiation Hard Semiconductor Devices for Very High Luminosity Colliders, CERN
- [KRA04] — KRASEL, O. (2004) *Charge collection in irradiated silicon detectors*. Dissertation Universität Dortmund
- [LAR02] — LARI, T. (2002) *Lorentz Angle variation with electric field for ATLAS silicon detectors*. ATL-INDET-2001-004 19/04/2001
- [LAR02] — LARI, T. (2002) *Test Beam Results of ATLAS Pixel Sensors*. arXiv:hep-ex/0210045 v1
- [LAR04] — LARI, T. (2004) *Efficiency 2004*. Vortrag auf ATLAS Pixel Week, Sep. 2004
- [LEO87] — LEO, W.R. (1987) *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer Verlag
- [LHC] — <http://lhc.web.cern.ch/lhc/> Homepage des LHC.
- [LIN01] — LINDSTRÖM, G. (2001) *Radiation Hard Silicon Detectors - Developments by the RD48 (ROSE) Collaboration*. Nucl. Instrum. Meth. A **466** 308 2001
- [LUT94] — LUTZ, G., RICHTER, R.H. (1994) *Detector layout and optimization of the detector-front end electronics system*. ATLAS Internal Note INDET-NO-056

- [LUT99] — LUTZ, G. (1999) *Semiconductor Radiation Detectors*. Springer Verlag
- [MOY55] — MOYAL, J.E. (1955) *Theory of ionization fluctuations*. Phil. Mag. **46** 263 1955
- [OLC03] — OLCESE, M., ET. AL. (2003) *Pixel Detector Cooling Requirements* ATL-IP-ES-0001 Rev. 1.1.Geneva, 2003
- [PDG02] — PARTICLE DATA GROUP, (2002) *PARTICLE DATA BOOKLET*. LBNL und CERN 2002
- [STO04] — STOCKMANN, T. (2004) *Multi-Chip-Modul-Entwicklung für den ATLAS-Pixeldetektor*. Dissertation Universität Bonn
- [SUN04] WWW.SUNWESTCAD.COM (2004) http://www.sunwestcad.com/consultant_files/gallery_hytec/images/Hytec-acis.jpg. CAD-Zeichnung des Pixeldetektors
- [TDR98] — ATLAS PIXEL COLLABORATION, . (1998) *Technical Design Report*. CERN
- [TRE02] — TREIS, J. ET AL. (2002) *A modular PC based silicon microstrip beam telescope with high speed data acquisition*. arXiv:physics/0210004 v1
- [TRO04] — TRONVON, C. (2004) *Radiation hardness performance of ATLAS pixel tracker*. NIM A **530** (2004) 65-70, 2004
- [WAL05] — WALBERSLOH, J. (2005) *Qualifizierungsmessungen an ATLAS-Pixelmodulen – Ranking und Yieldfragen*. fertig im Frühjahr 2005 Diplomarbeit Universität Dortmund
- [WEB04] — WEBER, J. (2004) *Production Accompanying Measurements on the ATLAS Pixel Sensor*. Diplomarbeit Universität Dortmund
- [WIT99] — WITZELING, W. (1999) *ATLAS Detector – a Status Report*. Proceedings of XIVth International Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory
- [WUN92] — WUNSTORF, R. (1992) *Systematische Untersuchungen zur Strahlenresistenz von Si-Detektoren für die Verwendung von HEP-Experimenten*. Dissertation Universität Hamburg