

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Fakultät für Mathematik und Physik
Physikalisches Institut



Diplomarbeit

Entwicklung und Untersuchung von
Silizium-Streifendetektor-Modulen für das
Upgrade des ATLAS-Experiments

Sven Wonsak

Betreuer:
Prof. Dr. Karl Jakobs
Dr. Ulrich Parzefall

Freiburg, Juli 2012

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Siliziumdetektoren	3
2.1. Wechselwirkung von Teilchen mit Materie	3
2.2. Energieverlust	4
2.3. Halbleiter	6
2.4. Der pn-Übergang	7
2.4.1. Verarmungsspannung	8
2.4.2. Kapazität	9
2.4.3. Leckstrom	10
2.5. Detektorherstellung	11
2.5.1. Produktion von Silizium	11
2.5.2. Fertigung eines Detektors	12
2.6. Funktion eines Streifendetektors	16
2.7. Rauschen	19
2.8. Strahlenschäden	21
2.8.1. Substratschäden	22
2.8.2. <i>Annealing</i>	25
2.8.3. Oberflächenschäden	26
3. Das ATLAS-Experiment	27
3.1. Der ATLAS-Detektor	27
3.2. Das ATLAS-Upgrade	30
3.2.1. Das <i>Stave</i> -Konzept	30
3.2.2. Das Supermodul-Konzept	32
3.2.3. Aufbau des inneren Detektors	35
4. Das HSIO-Auslesesystem	37
4.1. Aufbau des HSIO-Auslesesystems	37
4.2. Funktion eines Auslesechips	44
4.3. Testmethoden des HSIO-Auslesesystems	44
4.3.1. <i>Strobe Delay Test</i>	44
4.3.2. <i>Threshold Scan</i>	45
4.3.3. <i>Three Point Gain Test</i>	46
4.3.4. <i>Response Curve</i>	47
4.3.5. <i>Noise Occupancy Test</i>	47

4.3.6. <i>Trim Range</i>	48
5. Bau von <i>Barrel</i>-Modulen	49
5.1. Komponenten eines Moduls	49
5.2. Klebetests	50
5.2.1. Klebetests mit Plexiglas	50
5.2.2. Klebetests mit Glasattrappen	51
5.2.3. Optimierung der Klebstoffhöhe	56
5.3. Klebetests mit defekten ASICs und mechanischen Sensoren	57
5.3.1. Bondtests mit defekten ASICs	59
5.4. Funktionsfähige Module	61
5.4.1. Sensorcharakteristik	62
5.4.2. Höhenmessungen	63
5.4.3. Bonden	65
6. Modultests mit dem HSIO-Auslesesystem	69
6.1. Test der bestückten Hybride	69
6.2. Test der Module	72
6.2.1. Variation der Hochspannung	76
6.2.2. Messunsicherheit der einzelnen Kanäle	79
6.3. Tests am CERN	85
6.3.1. Teststand am CERN	85
6.3.2. Vergleichsmessungen von Modulen	86
6.3.3. Messungen mit einem DC-DC <i>Stavelet</i>	90
7. Endkappenmodulbau in Freiburg	95
7.1. Werkzeuge	98
8. Zusammenfassung	101
A. Anhang	I
A.1. Wichtige Abkürzungen und Begriffe	I
A.2. Sonstiges	II
A.3. Zusatz zu Höhenmessungen	IV
A.4. Bonden von Modulen an Testrahmen	IV
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XI
Literaturverzeichnis	XIII
Danksagung	XIX
Erklärung	XXI

1. Einleitung

Schon im antiken Griechenland machten sich die Philosophen Gedanken darüber, woraus die Welt, die sie umgibt, besteht. Leukipp und sein Schüler Demokrit stellten sich im 5. Jahrhundert vor Christus vor, dass alles aus leerem Raum und Materie besteht und die Materie aus kleinsten Teilchen, den Atomen (von atomos: nicht teilbar), zusammengesetzt ist.

Dieses Bild hat sich lange Zeit nicht verändert. Mit der Entdeckung des Elektrons im Jahre 1897 durch J.J. Thomson begann eine neue Ära der Teilchenphysik. Durch bessere und genauere Experimente sind weitere Substrukturen entdeckt worden. So besteht ein Atom aus einem Kern und einer "Elektronenwolke" und der Kern seinerseits ist aus Neutronen und Protonen aufgebaut. Auch dies sind nicht die elementarsten Teilchen, denn die Nukleonen sind wiederum aus noch kleineren Teilchen, den Quarks, zusammengesetzt.

Vier fundamentale Wechselwirkungen beschreiben nach unserem heutigen Verständnis das Zusammenspiel aller Teilchen miteinander. Das sogenannte Standardmodell beschreibt verschiedene elementare Teilchen und deren Eigenschaften, sowie die elektromagnetische, starke und schwache Wechselwirkung. Die Gravitation als vierte Wechselwirkung ist nicht eingebunden, da sie im Bereich der Teilchenphysik vernachlässigbar klein ist. Mit den mathematischen Werkzeugen des Standardmodells lassen sich Erzeugungs- und Zerfallsprozesse der Partikel vorhersagen und mit den Ergebnissen aus Experimenten vergleichen. Bisher stimmen die Vorhersagen recht gut, aber mit vielen freien Parametern scheint dies möglicherweise noch nicht die fundamentale Theorie zu sein, mit der alles beschrieben werden kann.

Das letzte noch nicht experimentell nachgewiesenen Teilchen des Standardmodells ist das Higgs-Boson. Am 04.07.2012 wurde von der ATLAS¹-Kollaboration und der CMS²-Kollaboration unabhängig voneinander die Entdeckung eines neuen Teilchens in einem Massenbereich, welcher für das postulierte Higgs-Teilchen des Standardmodells erwartet wird, bekanntgegeben. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass es gleiche Eigenschaften wie das Higgs-Teilchen hat, jedoch müssen noch weitere Daten gesammelt und ausgewertet werden, um zu bestätigen, dass es sich um das Higgs-Teilchen handelt.

Diese Entdeckung wurde durch das momentan größte Experiment der Teilchenphysik auf dem Gelände des CERN³ in Genf, Schweiz, ermöglicht. Im Ringbeschleuniger LHC⁴

¹A Toroidal LHC ApparatuS

²Compact Muon Solenoid

³Conceil Européen pour la Recherche Nucléaire

⁴Large Hadron Collider

werden zwei Protonenstrahlen mit einer bisher technisch unerreichten maximalen Schwerpunktsenergie von bis zu 7 TeV pro Strahl in vier großen Experimenten zur Kollision gebracht. Zwei davon sind ATLAS und CMS, die alle entstehenden Teilchen nachweisen sollen. Zu diesem Zweck werden in beiden Experimenten verschiedene Detektorprinzipien verwendet, die im Zwiebschalenprinzip um den Kollisionspunkt herum aufgebaut sind. Direkt um den Wechselwirkungspunkt des ATLAS-Experiments befindet sich der innere Detektor, bestehend aus mehreren Siliziumdetektoren (Pixeldetektor und SCT⁵) und einem Übergangsstrahlungsdetektor.

Um das volle Potential des LHC auszunutzen ist für das Jahr 2022 eine Aufrüstung zum HL⁶-LHC geplant, bei der die Designluminosität um den Faktor fünf gesteigert werden soll. Dadurch können insbesondere seltene Prozesse, die im LHC durch statistische Fehler dominiert sind, besser untersucht werden und das Entdeckungspotential erhöht sich. Der momentane innere Detektor ist nicht für die erhöhte Luminosität ausgelegt. Mit der steigenden Luminosität und der damit verbundenen Steigerung der auftretenden Ereignisraten erhöht sich außerdem die Strahlenbelastung, vor allem für den inneren Detektor. Daher ist eine Aufrüstung erforderlich, bei der der gesamte innere Detektor ausgetauscht und ausschließlich Siliziumdetektoren verwendet werden sollen.

Um die Integration zu vereinfachen wurde ein neues Montagekonzept für den Bereich des jetzigen SCT entwickelt. Die Arbeitsgruppe Jakobs war am Bau des bisherigen SCT beteiligt und auch für die Aufrüstung soll eine aktive Rolle beim Bau übernommen werden. Zu diesem Zweck wird im Rahmen dieser Diplomarbeit der Zusammenbau neuer Siliziumdetektoren mit der Ausleseelektronik für das neue Montagekonzept untersucht und die Bauteile werden auf ihre Funktion hin überprüft. Der jetzige und der neue SCT haben einen zylinderförmigen Aufbau und werden in zwei Bereiche unterteilt, den Zylindermantel (*Barrel*) und die zwei Endkappen.

Die für den *Barrel*-Bereich entwickelten Werkzeuge und Methoden sind im Rahmen dieser Diplomarbeit in Freiburg erstmalig erfolgreich zur Anwendung gekommen und die neugebauten Detektorkomponenten wurden getestet. Darüber hinaus wurden die für den Bau der Endkappen benötigten Werkzeuge im Rahmen der Arbeit geplant, produziert und erfolgreich eingesetzt.

⁵Semi Conductor Tracker

⁶High Luminosity

2. Siliziumdetektoren

Die Hochenergiephysik beschäftigt sich mit der Untersuchung des Standardmodells der Teilchenphysik und der Suche nach neuer Physik. Dazu ist es notwendig entstehende Teilchen und deren Eigenschaften zu bestimmen. Beim ATLAS-Experiment werden dafür verschiedene Materialien als Detektoren eingesetzt, wobei die für diese Arbeit verwendeten aus Silizium bestehen. Um die Funktionsweise eines Siliziumdetektors zu verstehen werden in diesem Kapitel die Wechselwirkungen von Teilchen mit Materie diskutiert, wobei näher auf den Energieverlust eingegangen wird. Die Funktion eines Silizium-Halbleiterdetektors beruht auf dem pn-Übergang. In diesem Zusammenhang wird auch auf die Detektorherstellung und Funktion eingegangen.

2.1. Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Die Teilchenidentifikation und Bestimmung ihrer Eigenschaften geschieht über die Wechselwirkungsprozesse der verschiedenen Teilchen mit der Detektormaterie. Die typischerweise einen Detektor durchfliegenden Teilchen können in drei Hauptklassen, je nach Art der Wechselwirkung und der Teilcheneigenschaften, eingeteilt werden: Geladene Teilchen, Photonen und, als langlebigstes neutrales Teilchen, das Neutronen.

Photonen lassen sich über drei für sie typische Prozesse nachweisen. Bei geringen Energien (weniger als 100keV ¹.) ereignet sich der Photoeffekt. Die Photonen geben ihre gesamte Energie an Atomelektronen ab. Bei Energien von etwa 1MeV überwiegt der Compton-Effekt: Die Photonen geben einen Teil ihrer Energie durch Streuung an einem quasifreien Atomelektron ab. Da das Photon noch Energie übrig hat, kann es mit anderen Teilchen weiter wechselwirken. Erreicht die Energie noch größere Werte (viel größer als 1MeV) überwiegt schließlich die Paarerzeugung. Im Coulombfeld des Kerns wird ein Elektron-Positron Paar erzeugt. Das Photon verliert dabei seine gesamte Energie.

Geladene Teilchen wechselwirken direkt elektromagnetisch mit Materie. Dabei treten drei Prozesse auf: Ionisation von Atomen, Erzeugung von Cherenkov-Licht und Übergangsstrahlung bei inhomogenen Materialien. Überträgt ein geladenes Teilchen so viel Energie auf ein Hüllenelektron, dass dieses die Anziehung des Kerns überwindet und als freies Elektron weiterfliegt, wird ein Atom ionisiert. Das verbleibende Atom (Kern plus restliche Hüllenelektronen) hat eine positive Nettoladung. Beim Cherenkov-Effekt übersteigt die Geschwindigkeit des Teilchens die Lichtgeschwindigkeit im Medium und Cherenkov-Licht wird emittiert. Übergangsstrahlung entsteht beim Übergang des gela-

¹Ein Elektronen-Volt (eV) ist die Energie, die ein Elektron erhält, wenn es über eine Potentialdifferenz von einem Volt beschleunigt wird. In SI-Einheiten ergibt sich: $1\text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}\text{J}$

denen Teilchens von einem Medium in ein anderes mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften.

Da Neutronen elektrisch neutral sind, wechselwirken sie nicht elektromagnetisch. Sie können streuen oder bei Atomen eine Kernspaltung einleiten. Um Neutronen nachzuweisen, müssen sie erst durch die starke Wechselwirkung mit Kernen geladene Teilchen erzeugen, welche dann wie oben beschrieben detektiert werden können.

In dieser Aufzählung fehlen die langlebigen neutralen Neutrinos. Diese können lediglich mit Hilfe der schwachen Wechselwirkung mit Materie interagieren, allerdings ist der Wechselwirkungsquerschnitt so gering, dass sie in LHC-Detektoren generell nicht detektiert werden.

2.2. Energieverlust

Bei jeder Wechselwirkung von Teilchen tritt Energieverlust auf, welcher statistischer Natur ist. Der mittlere Energieverlust durch Ionisation eines geladenen schweren Teilchen² lässt sich durch die Bethe-Bloch-Formel gut annähern [Gru93]:

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

Dabei sind:

$-\frac{dE}{dx}$ = Energieverlust pro Länge x des durchquerten Absorbers

N_A = Avogadrokonstante

r_e = klassischer Elektronenradius

m_e = Elektronenmasse

c = Lichtgeschwindigkeit

z = Ladung einfallendes Teilchen in Elementarladungen

Z, A = Kernladungszahl, Massenzahl des Absorbers

$\beta = \frac{v}{c}$, v : Teilchengeschwindigkeit

γ = Lorentzfaktor := $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$

I = materialabhängige Ionisationskonstante

δ = Parameter, der Dichte-Effekt berücksichtigt

In der Nähe von $\beta\gamma \approx 4$ gibt es ein Minimum der Energie-Verlust-Verteilung (siehe Abbildung 2.1). Relativistische Teilchen (nahe der Lichtgeschwindigkeit; $\beta \approx 1$) die sich

²mit Ausnahme von Elektronen

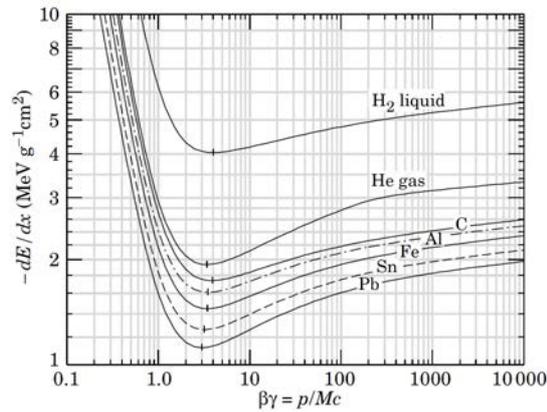


Abbildung 2.1.: Bethe-Bloch Energieverlustverteilung in verschiedenen Materialien [PB⁺12].

in diesem befinden werden minimal-ionisierende Teilchen (*Minimal Ionizing Particle*, MIP) genannt.

Für schnelle geladene Teilchen dominiert ein anderer Effekt als die Ionisation: Bremsstrahlung. Dabei verliert das Teilchen Energie, indem es mit dem Coulombfeld von Kernen wechselwirkt und Photonen abstrahlt. Der Energieverlust ist hierbei sowohl für schwere geladene Teilchen, als auch für die leichteren Elektronen, proportional zur Energie [Gru93]. Der Energieverlust von Elektronen ist komplizierter, da einerseits schon bei vergleichsweise kleinen Energien Bremsstrahlung eine große Rolle spielt und andererseits die Massen der Stoßpartner wegen der geringen Elektronenmasse gleich sind. Für eine eingehende Erläuterung sei auf [Gru93] verwiesen.

Für Elektronen als einfallende Teilchen lässt sich eine neue Größe definieren: die Strahlungslänge X_0 [Gru93]:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0} . \quad (2.2)$$

Diese Formel definiert die Strahlungslänge. Anschaulicher kann man die Strahlungslänge als diejenige Dicke x der durchquerten Materie identifizieren, bei der die Energie E des Teilchens auf den Faktor $1/e$ abgefallen ist.

Die Strahlungslänge wird auch als wesentliches Kriterium bei der Planung von großen Detektoren berücksichtigt. Generell soll zuerst die Teilchenbahn bestimmt werden und danach die Teilchenenergie. Daher ist es wichtig, dass die Sensoren zur Teilchenbahnbestimmung sehr dünn sind, um hauptsächlich Photonkonversion (Bildung von e^+e^- Paaren) und Streuung zu verringern, aber auch den Energieverlust. Allerdings müssen sie auch dick genug sein, damit die geladenen Teilchen ausreichend Energie deponieren die nachgewiesen werden kann. Eine Schwierigkeit beim Detektorbau ist es, hier einen guten Kompromiss zu finden.

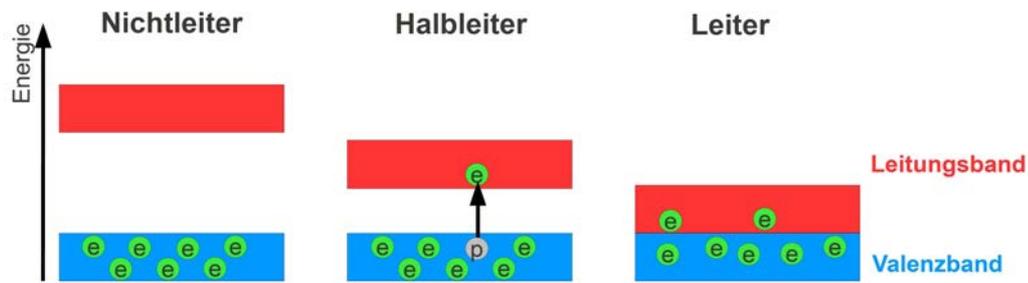


Abbildung 2.2.: Darstellung des Bändermodells mit Elektronen (e) und Löchern (p) für Nichtleiter (links), Halbleiter (mitte) und Leiter (rechts).

2.3. Halbleiter

Teilchendetektoren können aus festen, flüssigen oder gasförmigen Materialien bestehen. Die Wahl hängt vom jeweiligen Verwendungszweck ab. Die für diese Arbeit verwendeten Sensoren bestehen aus dem Halbleitermaterial Silizium.

Wenn Materialien gemäß ihrer elektrischen Leitfähigkeit untersucht werden, lässt sich eine Einteilung in drei verschiedene Gruppen finden. Zum einen die Nichtleiter oder Isolatoren die keinen Strom leiten. Die zweite Gruppe besteht aus den Leitern, die den Strom sehr gut leiten, und die Halbleiter bilden die dritte Gruppe. Es handelt sich dabei um Stoffe, die je nach Temperatur eine mehr oder weniger gute elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Anhand des Bändermodells der Festkörperphysik lässt sich dieses Verhalten anschaulich erklären.

In einem Festkörper gibt es verschiedene Bereiche, in denen sich Elektronen gemäß der Schrödingergleichung aufhalten dürfen, die sogenannten Bänder. Nach dem Pauliprinzip werden diese, beginnend mit der niedrigsten Energie, mit Elektronen gefüllt. Das letzte Band, in dem sich noch Elektronen befinden (bei einer Temperatur von 0 K) wird als Valenzband bezeichnet, das energetisch nächsthöhere Band ist das Leitungsband. In einem Isolator ist die Energiedifferenz zwischen beiden Bändern so groß, dass selbst durch thermische Anregung keine Elektronen in dieses Band wechseln können (Abbildung 2.2 links) und es somit keinen Stromfluss gibt. In einem Leiter (Abbildung 2.2 rechts) hingegen überlagern sich Valenz- und Leitungsband, so dass das Material immer leitfähig ist. In Halbleitern ist die Bandlücke (Energiedifferenz zwischen Leitungs- und Valenzband) sehr klein. Die bekanntesten Halbleiter sind Silizium mit einer Bandlücke von 1.14 eV und Germanium mit 0.66 eV [Sze81]. Mit Erhöhung der Temperatur reicht die thermische Anregung aus, um einzelne Elektronen in das Leitungsband zu heben. Im Valenzband entsteht dabei eine Lücke, ein sogenanntes Loch.

Die Fermienergie bezeichnet das chemische Potential bei einer Temperatur von $T = 0 \text{ K}$ in dem alle Zustände bis zu dieser Energie mit Elektronen besetzt sind. Als Fermi-Niveau wird die Energie mit einer Besetzungswahrscheinlichkeit von $1/2$ bei endlichen Temperaturen bezeichnet, welches sich bei Isolatoren oder Halbleitern genau zwischen dem Leitungs- und dem Valenzband befindet.

Dotierung Eine Möglichkeit die Leitfähigkeit von Halbleitern zu erhöhen, besteht darin Fremdatome in den Halbleiter einzubringen, das Dotieren. Silizium und Germanium gehören der vierten Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente an. In kristalliner Form sind die vier Valenzelektronen eines Atoms durch Paarbindung mit Nachbaratomen gebunden.

n-Typ Es kann ein Atom der fünften Hauptgruppe in das Kristallgitter eingebunden werden. Vier Elektronen sind durch das umgebende Silizium stark gebunden, das fünfte Elektron lässt sich leicht in das Leitungsband anheben. Als Fremdatome eignen sich beispielsweise Phosphor oder Arsen welche als Donatoren bezeichnet werden. Im Bändermodell wird ein Donator-Niveau etwa 0.05 eV unterhalb des Leitungsbandes geschaffen wodurch sich das Fermi-niveau verschiebt (siehe Abbildung 2.3 oben links). Da die freien Ladungsträger hier die Elektronen sind, wird diese Sorte Halbleiter n-Typ (negativ) genannt.

p-Typ Anstelle eines fünfwertigen Atoms kann auch mit einem dreiwertigen Atom dotiert werden (zum Beispiel Bor oder Indium). Diesen Akzeptoren fehlt ein Elektron, so dass eines von benachbarten Atomen das entstehende Loch schließen kann. Anstelle eines freien Elektrons im Leitungsband wird hier die Leitfähigkeit durch eine Fehlstelle (Loch) im Valenzband erreicht. Dieses Loch kann anschaulich als positiver Ladungsträger angesehen werden, daher wird diese Halbleiter als p-Typ (positiv) bezeichnet. Das hier geschaffene Akzeptorniveau liegt etwa 0.05 eV oberhalb des Valenzbandes was auch hier zu einer Verschiebung des Fermi-niveaus führt (siehe Abbildung 2.3 oben rechts).

Die Fermienergien für p- und n-Typ Halbleiter sind in Abbildung 2.3 oben eingezeichnet.

2.4. Der pn-Übergang

Eine Diode ist ein gutes Beispiel dafür, wie man mit Hilfe von verschiedenen dotierten Halbleitern ein elektrisches Bauteil anfertigen kann. Dioden haben die Eigenschaft, dass sie nur in einer Stromrichtung leitend sind. Dies wird realisiert, indem ein n-Typ Halbleiter und ein p-Typ Halbleiter zusammengebracht werden. An der Grenzfläche können sich die freien Elektronen des n-Typs zu den Löchern des p-Typs bewegen und dadurch eine Zone ohne freie Ladungsträger schaffen, die Verarmungszone. Es bleiben nur noch die positiven (n-Typ) und negativen (p-Typ) Atomrümpfe übrig. Dadurch bildet sich ein elektrisches Feld, welches der Bewegung der Elektronen entgegengesetzt ist. Die freien Elektronen können so lange in die p-Schicht wandern, bis das entstehende elektrische Feld zu groß ist: Es entsteht ein Gleichgewicht und kein Strom fließt mehr. In Abbildung

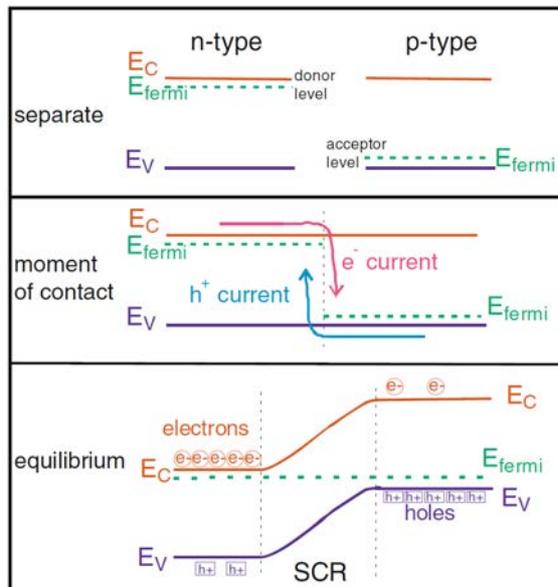


Abbildung 2.3.: pn-Übergang im Bändermodell: oben getrennte Halbleiter, mitte bei Zusammenführung, unten nach Stabilisierung; E_C : Energie des Leitungsbands, E_V : Energie des Valenzbands, E_{fermi} : Fermienergie, SCR: Verarmungszone (*Space Charge Region*) [Har09].

2.3 oben sind die zwei separaten unterschiedlich dotierten Halbleiter mit ihren jeweiligen Fermi-Energien dargestellt. Im Moment des Kontakts (mittlere Darstellung) bewegen sich die Elektronen und Löcher, da sich die Fermi-niveaus einander angleichen möchten. Im unteren Abschnitt des Bildes sieht man das sich einstellende Gleichgewicht. Die Leitungs- und Valenzbänder haben sich verschoben und es gibt Bereiche, in denen sich Elektronen/Löcher bevorzugt aufhalten möchten (links/rechts). In der Mitte befindet sich die Verarmungszone ohne freie Ladungsträger.

Durch Anlegen einer äußeren Spannung (V_{bias}) kann das Verhalten der Bänder beeinflusst werden. Wird eine positive Spannung an die n-Schicht angelegt, vergrößert sich die Verarmungszone, die Diode wird in Sperrrichtung betrieben. Wird hingegen eine negative Spannung an die n-Schicht angelegt, so verringert sich die Sperrschicht bis sie fast verschwindet und der Strom kann ungehindert fließen (Durchlassrichtung).

2.4.1. Verarmungsspannung

Durch das Lösen der Poissonsgleichung für den pn-Übergang ergibt sich ohne äußere Spannung für die Dicke der Verarmungszone W [Sze81]

$$W = \sqrt{\frac{\epsilon_S}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_{bi}} \quad (2.3)$$

wobei q die Ladung des Teilchens ist und N_A und N_D die Donator- beziehungsweise Akzeptordichte der entsprechenden Schicht sind. Mit ϵ_S wird die dielektrische Konstante bezeichnet die aus dem Produkt der dielektrischen Leitfähigkeit von Silizium ($\epsilon_{Si} = 11.7$) und der elektrischen Feldkonstante ($\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m) gebildet wird. Bei V_{bi} handelt es sich um die sogenannte *built-in-* oder Diffusionsspannung, das heißt die Spannung die aufgrund der Ionenrümpfe in der Raumladungszone abfällt.

Wenn der Anteil einer Dotierung dominiert, vereinfacht sich die Formel zu

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_S V_{bi}}{qN_B}} \quad (2.4)$$

mit $N_B = N_D$ oder N_A je nach Dotierung. Mit Hilfe der Formel für die Resistivität ρ

$$\rho = \frac{1}{q\mu N_B} \quad (2.5)$$

lässt sich die Dotierkonzentration durch die bekannte Ladungsträgerbeweglichkeit μ (Elektronen: $1415 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$; Löcher: $480 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$ [RFRW06]) ersetzen und es ergibt sich für die Dicke der Verarmungszone

$$W = \sqrt{2\epsilon_S \rho \mu V_{bi}} \quad (2.6)$$

Das entstandene Gleichgewicht wird allerdings gestört, wenn eine äußere Spannung angelegt wird. Eine wichtige Größe ist die Spannung, bei der das gesamte Halbleiterbauelement verarmt ist, infolge deren es fast keine freien Ladungsträger mehr gibt. Zur Berechnung der notwendigen Spannung (sogenannte Verarmungsspannung V_{dep}) kann Formel 2.6 verwendet werden. Dazu wird die relativ kleine Diffusionsspannung V_{bi} durch die größere äußere Spannung, die der Verarmungsspannung entspricht ($V_{bias} = V_{dep} \gg V_{bi}$), ersetzt und die bekannten Detektoreigenschaften eingesetzt. Es folgt für eine Detektordicke D :

$$V_{dep} = \frac{D^2}{2\epsilon_S \rho \mu} \quad (2.7)$$

Beispielsweise ergibt sich für typische Werte von $D = 320 \mu\text{m}$, $\mu = 1415 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$ und $\rho = 1.5 \text{k}\Omega\text{cm}$ eine Verarmungsspannung von $V_{dep} = 233 \text{V}$.

2.4.2. Kapazität

Eine weitere interessante Größe ist die Gesamtkapazität des Bauelements. Die Grenzflächen zwischen verarmter und nichtverarmter Zone werden als Platten eines Kondensators angesehen, wobei die Raumladungszone (oder Verarmungszone) die Aufgabe eines Dielektrikums erfüllt. Mit diesem einfachen Ansatz ergibt sich nach Referenz [Har09] für die Kapazität C :

$$C(V_{bias}) = \begin{cases} A \sqrt{\frac{\epsilon_{Si}}{2\rho\mu V_{bias}}} & V_{bias} \leq V_{dep} \quad , \\ A \frac{\epsilon_{Si}}{W} = \text{konstant} & V_{bias} > V_{dep} \quad . \end{cases} \quad (2.8)$$

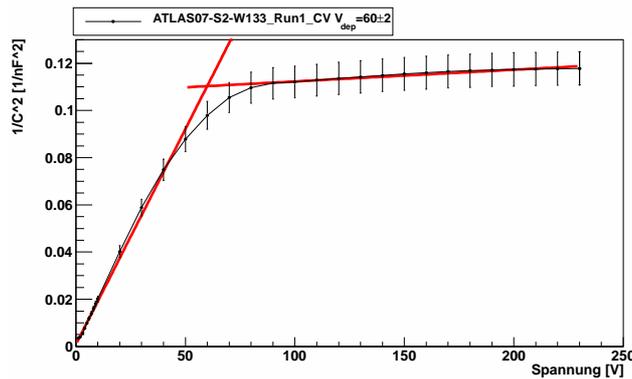


Abbildung 2.4.: Kapazitätsmessung des ATLAS07 p-Typ Streifendetektors W133 auf der *Probe-Station* in Freiburg, dargestellt ist $1/C^2$ als Funktion der angelegten Spannung. Zusätzlich sind die Geradenanpassungen des Kurvenanstiegs und des konstanten Bereichs eingezeichnet, die zur Bestimmung der Verarmungsspannung (Schnittpunkt) dienen.

Bei der Konstanten A handelt es sich um die Oberfläche der Grenzfläche. Im ersten Fall ist nur ein Teil des Halbleiterelements verarmt und mit steigender äußerer Spannung nimmt die Breite der Verarmungszone zu, so dass die Kapazität abnimmt. Ist das Bauteil vollständig verarmt, bleibt die Kapazität, auch bei steigender angelegter Spannung, konstant, da sich an den geometrischen Abmessungen des “Kondensators” nichts mehr ändert.

Dieses Verhalten der Kapazität wird ausgenutzt, um aus Messdaten die Verarmungsspannung zu bestimmen. Dazu wird die Kapazität (C) in Abhängigkeit der Spannung gemessen. In einer Graphik wird $1/C^2$ als Funktion von V aufgetragen. Einen Knick in der Kurve (exemplarisch für den ATLAS07 p-Typ Streifendetektor W133 in Abbildung 2.4) ist deutlich erkennbar bei ungefähr 60 V. Die Fehlerbalken in der Abbildung ergeben sich aus der systematischen Messunsicherheit der Kapazität, die auf 3 % des Messwerts geschätzt wurde. Durch das Anpassen einer Geraden an den Kurvenverlauf bis ca. 50 V wird der veränderlichen Anteil der Kapazität bestimmt, da nach Formel 2.8 gilt, dass die Spannung V_{bias} proportional zum quadratischen Kehrwert der Kapazität C ist. Im Bereich von 90 bis 230 V befindet sich der nahezu konstante Anteil. Durch Bestimmung des Schnittpunktes der beiden Geraden lässt sich aus der Abszisse direkt die Verarmungsspannung ablesen. Die Auswertung ergibt mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung eine Verarmungsspannung von (60 ± 2) V.

2.4.3. Leckstrom

Durch thermische Anregung entstehen im Halbleitermaterial Ladungsträgerpaare. Auch Verunreinigungen im Kristall begünstigen dieses Verhalten. Die so entstehenden Elektronen und Löcher können wieder rekombinieren und es wäre kein Effekt messbar. Durch das Anlegen einer äußeren Spannung jedoch werden die Ladungsträger getrennt und es ist ein Strom feststellbar, der sogenannte Dunkelstrom oder Leckstrom I_L , der sehr stark

temperaturabhängig ist [Spi05]:

$$I_L(T) \propto T^2 \exp\left(-\frac{E}{2k_B T}\right). \quad (2.9)$$

E bezeichnet die Aktivierungsenergie, die hier mit der Bandlückenenergie ($E_g = 1.12 \text{ eV}$) gleichgesetzt werden kann. Bei k_B handelt es sich um die Boltzmann-Konstante, T ist die Temperatur in Kelvin. Dieser funktionale Zusammenhang lässt sich ausnutzen, um die Messwerte bei verschiedenen Temperaturen zu vergleichen, indem sie auf einen Referenzwert mit nachfolgender Formel nach [Spi05] umgerechnet werden:

$$\frac{I_L(T_2)}{I_L(T_1)} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B} \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2}\right). \quad (2.10)$$

Als Referenzwert wird üblicherweise nach [Chi04] eine Temperatur von 20°C verwendet.

2.5. Detektorherstellung

Silizium hat den großen Vorteil, dass neben der geringen Ionisationsenergie die Herstellungskosten in einem akzeptablen Rahmen bleiben. Dies begründet sich in der leichten Verfügbarkeit von Silizium, welches als Siliziumdioxid ein Hauptbestandteil von Sand ist und der großen Erfahrung der Industrie bei der Verarbeitung und Verwendung. Auch auf der physikalischen Seite gibt es ein mehrere Gründe Silizium zu verwenden: Der Energieverlust in Silizium ist relativ gering (siehe dazu auch Abschnitt 2.6) und es hat eine geringe Strahlungslänge, da schon kleine Detektordicken ($< 1 \text{ mm}$) ausreichend für das Detektieren von Teilchen sind. Die geringe Detektorstärke verringert auch Vielfachstreuung, so dass die Teilchen den Sensor fast unbeeinflusst passieren können. Daher eignet sich Silizium sehr gut für die Detektorherstellung, die im folgenden skizziert werden soll.

2.5.1. Produktion von Silizium

Zuerst muss das Silizium von Verunreinigungen befreit werden. Dazu wird Sand auf 1500°C bis 2000°C erhitzt. Das nach diesem Schmelzprozess erhaltenen Silizium hat einen Reinheitsgrad von 95 % bis 99 %. Für die Verwendung in der Hochenergiephysik reicht dies noch nicht aus. In einem Wirbelschichtreaktor wird unter Zusatz von Chlorwasserstoff (HCl) Trichlorsilan gewonnen. Dabei wird ein Großteil der Verunreinigungen entfernt, so dass nur noch 1 ppb^3 an Fremdstoffen übrig bleibt. Aus Trichlorsilan werden mittels chemischer Dampfablagerung bei 1000°C innerhalb einiger Tage dünnen Stäbe reinen Siliziums hergestellt [Har09]. Zur Erzeugung einkristallinen Siliziums, wie es für Detektoren verwendet wird, kommen hauptsächlich zwei im Folgenden skizzierte Verfahren in Betracht [Har09].

³*parts per billion*: Teile pro Milliarde

Czochralski-Verfahren Hierbei werden die Siliziumstäbe wieder zerkleinert und verflüssigt. Die Schmelze hat eine Temperatur von nur wenigen Grad über dem Schmelzpunkt, wenn ein einzelner, rotierender Silizium-Einkristall an die Oberfläche gebracht wird (siehe Abbildung 2.5 links). Durch langsames Herausziehen erstarrt die Schmelze an dem Impfkristall und nimmt dabei dessen Gitterstruktur an. Mit Hilfe der Zugrate, der Schmelztemperatur und der Rotationsgeschwindigkeit lässt sich das Verfahren steuern. Das Ergebnis ist ein perfekter Kristallstab (Ingot) der weiterverarbeitet werden kann. Wenn der Schmelze Dotieratome (oder Sauerstoff) hinzugefügt werden, so sind diese im späteren Ingot sehr homogen verteilt. Ein äußeres Magnetfeld kann zusätzlich für die Gleichmäßigkeit der Fremdatome sorgen (*magnetic Czochralski*). Das ganze Verfahren findet innerhalb eines geschlossenen Behälters, welcher mit Edelgas geflutet wird, statt, um keine unerwünschten Verunreinigungen einzubringen. Trotzdem werden Sauerstoffatome (Größenordnung 10^{18} cm^{-3} [RFRW06]) dem Silizium hinzugefügt, die aus dem Schmelzriegel stammen. Daher wird diese Herstellungsmethode normalerweise nicht für Siliziumsubstrate die eine Resistivität von mehr als $10 \Omega \text{ cm}$ benötigen verwendet.

Float-Zone-Verfahren Das zweite Herstellungsverfahren (Abbildung 2.5 rechts) unterscheidet sich deutlich. Hierbei wird ein schon vorhandener Stab aus Polysilizium (verunreinigt und kein Einkristall) in Kontakt mit einem Impfkristall (*Seed*) gebracht. Dann wird von dieser Kontaktstelle an der Stab mit einem Induktionsheizgerät geschmolzen. Verunreinigungen haben eine andere Diffusionskonstante und bleiben bevorzugt in der Schmelzzone, welche sich langsam den gesamten Stab von unten nach oben entlangbewegt. Der gesamte Vorgang findet unter Schutzatmosphäre statt. Auch auf diesem Weg erhält man einen reinen Siliziumkristall welcher weiter verwendet werden kann. Mit einem spezifischen Widerstand von mehr als $1 \text{ k}\Omega \text{ cm}$ eignet sich diese Herstellungsmethode auch sehr gut für Detektorsilizium [RFRW06].

Fremdatome können eingebracht werden, indem sie als gasförmiger Zusatz der Schutzatmosphäre beigefügt werden. Diese dringen in die Schmelze ein und gelangen so in den Kristall.

Um aus einem Ingot die fertigen Detektoren herzustellen, muss dieser noch bearbeitet werden. Erst einmal müssen die nicht ganz runden Ränder abgeschliffen werden, so dass ein Zylinder entsteht. Von diesem werden nun mit einer diamantbesetzten Säge dünne Scheiben ($< 1 \text{ mm}$), die Wafer, abgeschnitten. Diese werden erst geglättet, dann folgt eine chemische Reinigung und am Ende werden die Wafer noch gründlich poliert. Abbildung 2.6 zeigt einen Ingot sowie mehrere Wafer.

2.5.2. Fertigung eines Detektors

Die eigentliche Herstellung eines Detektors erfolgt in mehreren Schritten. Anhand der Graphik 2.7 aus Referenz [RFRW06] soll dies für einen p^+ -in-n-Sensor erläutert werden.

Zuerst wird der Siliziumwafer (auch Substrat genannt) beidseitig mit Siliziumoxid überzogen (Bild 1). Eine Schichtdicke von 150 nm bis $2 \mu \text{ m}$ (je nach Dauer) wird dadurch erreicht, indem der Wafer bei einer Temperatur von 900° C bis 1200° C in einer Sauerstoff-

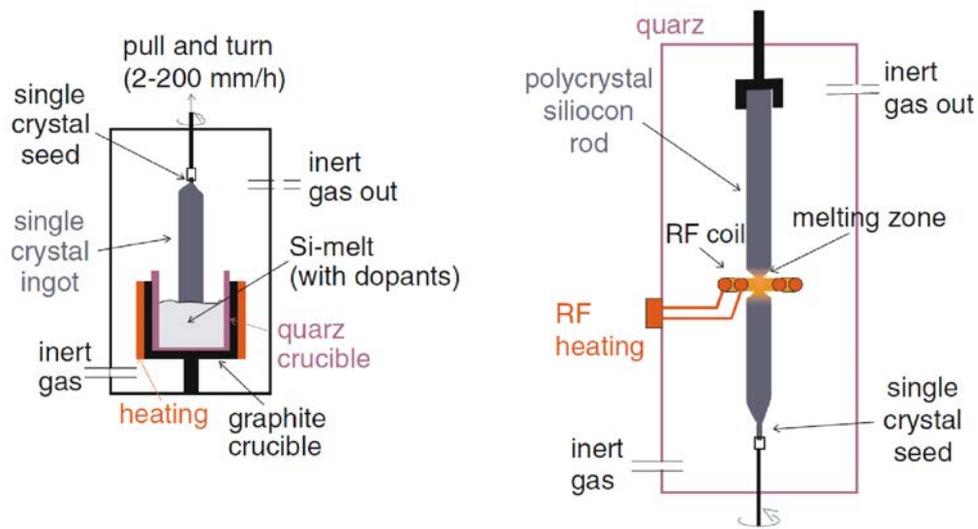


Abbildung 2.5.: Links: Czochralski-Verfahren; rechts: *Float-Zone*-Verfahren [Har09].



Abbildung 2.6.: Silizium Ingot und geschnittene Wafer [Har09].

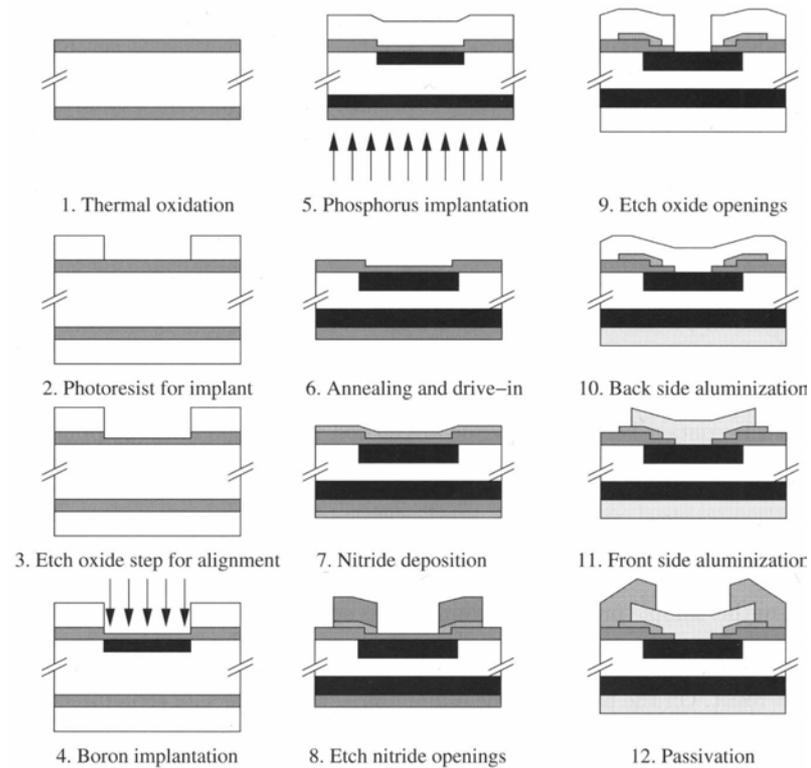


Abbildung 2.7.: Möglicher Prozess für die Produktion eines p^+ -in-n Sensors [RFRW06].

atmosphäre gelagert wird.

Danach wird der Detektor vollständig mit einer Schicht Photolack benetzt. Mittels einer Maske und Bestrahlung mit UV-Licht lassen sich nun sehr genaue Strukturen festlegen. Durch Entwicklung des Lackes werden die späteren Leiterbahnen oder dotierte Streifen freigelegt (Bild 2 in Abbildung 2.7). Um jedoch die entsprechenden Stellen zu bearbeiten, muss zuerst die schützende Siliziumdioxidschicht wieder entfernt werden. Dies wird durch ein Bad in einer Ätzflüssigkeit erreicht. Der Photolack dient dabei als Schutz für die nicht zu behandelnden Regionen (Bild 3). Diese freien Flächen können dann im nächsten Schritt mit Fremdatomen dotiert werden. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten: zum einen können bei einer Temperatur von $800 - 1200^\circ\text{C}$ die Dotieratome in das Silizium diffundieren. Der Wafer befindet sich dazu in einem geschlossenen Gefäß welches mit gasförmigem Dotiermaterial geflutet ist. Die zweite Möglichkeit besteht darin, dass die Dotieratome ionisiert und dann beschleunigt werden. Dadurch können sie an die richtigen Stellen des Wafers "geschossen" werden. Dieses Verfahren funktioniert bei Raumtemperatur und ermöglicht eine genaue Bestimmung der Konzentration über eine Messung der Dosis. Die zweite Methode wird bevorzugt, da dafür das Silizium nicht noch einmal zu hohen Temperaturen erhitzt werden muss. Bei diesem Beispiel wird in Bild 4 der Streifen mit Bohr dotiert (p^+ -Streifen) während im nachfolgenden Schritt die Rückseite mit Phosphor dotiert wird um eine n^+ -Schicht zu erhalten.

Anschließend erfolgt eine Phase des thermischen Ausheilens (siehe auch Abschnitt 2.8.2), da durch die Bestrahlung mit den Dotierungsatomen die Kristallstruktur beschädigt wurde (Bild 6). Falls es gewünscht wird, können weitere Schichten mit Fremdatomen aufgebracht werden (z.B. Nitrid wie in Bild 7 und Bild 8). Um einen guten elektrischen Kontakt herzustellen wird die Oxidschicht über den Streifen entfernt (Bild 9). Da die Rückseite in der Regel nicht segmentiert ist, wird sie vollständig mit einer Aluminiumschicht überzogen (Bild 10). Auf der Vorderseite werden lediglich schmale Streifen aus Aluminium über den p^+ -Implantaten angebracht (Bild 11).

Als letzter Schritt wird die empfindliche Oberfläche passiviert, indem eine schützender Belag aus Siliziumnitrid oder Siliziumoxid aufgebracht wird (Bild 12).

Es wird anhand der Dotierung zwischen zwei unterschiedlichen Detektortypen unterschieden: Beim p-in-n Detektor sind die Streifen p-dotiert und das Substrat n-dotiert, während beim n-in-p Detektor die Streifen n-dotiert und das Substrat p-dotiert ist. Wird ein Halbleiter stark dotiert so wird dies durch hinzufügen eines + an den Dotiertyp gekennzeichnet, beispielsweise p^+ oder n^{++} für einen sehr stark n-dotierten Halbleiter. Für einen p^+ -in-n-Detektor werden die Streifen stark p^+ -dotiert mit einer Akzeptorkonzentration von $N_A > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ [RFRW06] während das Substrat nicht so stark n-dotiert ist ($N_D \approx 10^{12} \text{ cm}^{-3}$). Dies ist sehr wenig im Vergleich zu dem Siliziumgitter in welchem sich $5 \cdot 10^{22} \text{ Atome/cm}^3$ befinden.

2.6. Funktion eines Streifendetektors

Das Prinzip eines Halbleiterdetektors beruht auf dem pn-Übergang. Der Halbleitersensor besteht beispielsweise aus einem n-dotierten Substrat (*bulk*) in das die dotierten Streifen oder Pixel (hier p^+) eingearbeitet sind. Ziel des Detektors ist es, die durch geladene Teilchen deponierte Ladung zu messen.

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben verlieren geladene Teilchen einen Teil ihrer Energie durch Ionisation oder Bremsstrahlung. Während sie ein Medium durchqueren erzeugen sie dabei Elektron-Loch-Paare entlang ihrer Bahn und genau diese werden für die Ortsbestimmung genutzt. Hier zeigt sich der Vorteil der Halbleiter: Während in Gasen eine mittlere Energie von etwa 30 eV benötigt wird um ein Elektron-Loch-Paar zu erzeugen (und in Szintillatoren über 400 eV), reichen in Silizium 3.6 eV und in Germanium sogar 2.8 eV aus [Gru93]. Die Anzahl der erzeugten Ladungsträgerpaare ergibt sich aus der deponierten Energie geteilt durch die benötigte Energie zur Erzeugung eines Paares. In reinem Silizium bei einer typischen Detektorgröße etwa 10^9 freie Ladungsträger [Har09], alleine durch thermische Anregung entstehen. Dagegen werden durch ein minimalionisierendes Teilchen nur etwa 23 000 Elektronen in 300 μm Siliziumdicke erzeugt [RFRW06]. Die erzeugten Ladungsträger sind im Vergleich zur thermischen Anregung so gering, dass sie ohne Verarmung nicht als Signal identifiziert werden können. Dadurch, dass an den Detektor eine äußere Spannung angelegt wird, wird er verarmt. Das bedeutet, dass die meisten freien Ladungsträger durch das elektrische Feld zu den Polen der Spannungsquelle driften. Werden nun durch ein geladenes Teilchen neue Elektronen erzeugt können diese nachgewiesen werden.

Wie in Abschnitt 2.5.2 erläutert werden auf einer Seite des aus n-dotiertem Silizium (*n-bulk*) bestehenden Wafers p^+ -dotierte Streifen prozessiert. Dadurch ergibt sich eine Struktur wie die einer Diode. Auf einem Streifen-Detektor befinden sich viele parallele Streifen mit einem typischen Abstand (*pitch*) von 80 μm . Durch Aluminiumkontakte können diese einzeln ausgelesen werden (siehe Abbildung 2.8). Fliegt ein geladenes Teilchen durch den Detektor, so erzeugt es auf seinem Weg entlang der Trajektorie Elektronen-Loch Paare. Diese bewegen sich gemäß ihrer Ladung bei angelegter äußerer Spannung entweder zur Rückseite oder zu den Streifen des Detektors (siehe Abbildung 2.8). Der Unterschied liegt in der Mobilität der Teilchen in einem elektrischen Feld: Während diese für Elektronen bei $(1415 \pm 46) \text{ cm}^2/\text{Vs}$ liegt, bewegen sich Löcher nur mit $(480 \pm 17) \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [RFRW06]. Dies ist der bestimmende Faktor für die Auslesegeschwindigkeit. Bei einer Detektordicke von 300 μm und einem äußeren Feld von 10^3 V/cm braucht ein Elektron etwa 20 ns um den Detektor vollständig zu passieren. Dieses elektrische Feld, welches die Ladungsträger zu den Messstreifen bewegt, wird dadurch erzeugt, dass der Detektor vollständig verarmt wird. Es wird auch verhindert, dass die Paare sofort wieder rekombinieren können, da sie in entgegengesetzte Richtung driften.

In Abbildung 2.9 sind schematisch die Feldlinien bei einem voll-verarmten Detektor eingezeichnet. Man erkennt deutlich, dass sie sich zu den Streifen hin verjüngen. Dies sorgt dafür, dass die Ladungsträger auch die Streifen erreichen und nicht in den nicht-sensitiven Bereich dazwischen gelangen. Da die Teilchen aber nicht immer senkrecht zur Detektoroberfläche eindringen, werden Signale auf mehreren Streifen erzeugt. Benach-

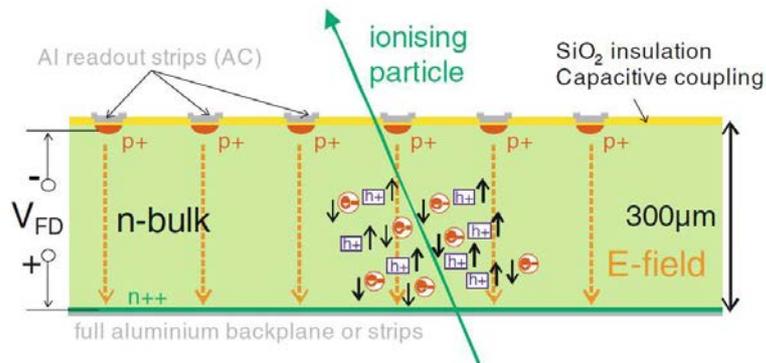


Abbildung 2.8.: Seitenansicht eines $300\ \mu\text{m}$ dicken Streifendetektors, durch den ein ionisierendes Teilchen fliegt und dabei Ladungsträger erzeugt; Elektrisches Feld aufgrund der Verarmungsspannung (V_{FD}) sowie SiO_2 -Passivierung und Aluminium-Rückseitenkontakt sind eingezeichnet [Har09].

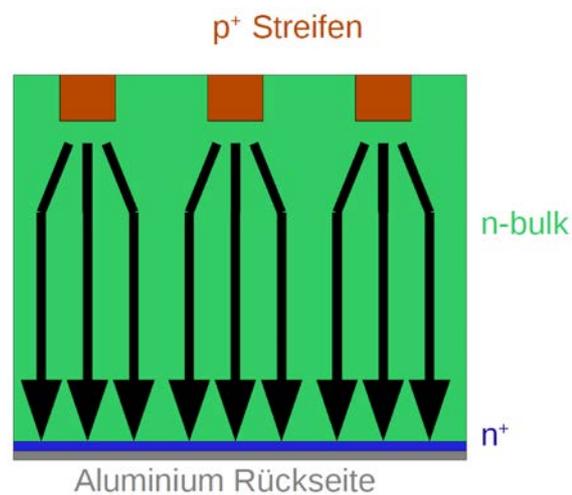


Abbildung 2.9.: p^+ -dotierte Streifen auf einem n-Substrat, Rückseite n-dotiert (n^+) und mit Aluminium für Auslese versehen; Angelegte Spannung erzeugt elektrisches Feld entlang der schwarzen Linien vom positiven Pol (p^+ Streifen) zum negativen Pol (n^+ Rückseite).

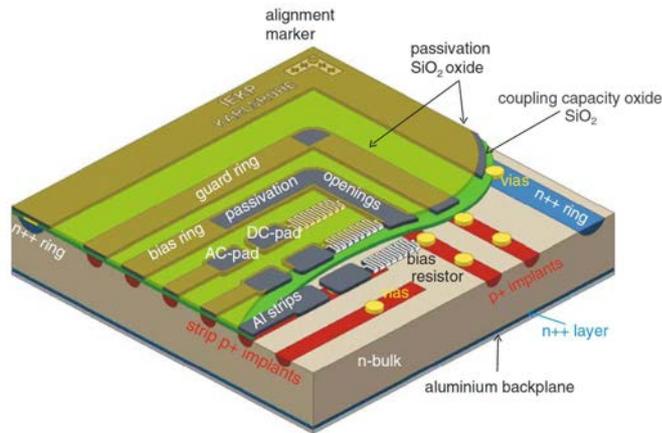


Abbildung 2.10.: Ausschnitt aus der Oberflächenstruktur eines p-in-n Streifendetektors [Har09].

barte Streifen können durch Induktion ebenfalls Signale aufweisen. Außerdem bewegen sich die Teilchen aufgrund von Diffusion nicht exakt entlang der Feldlinien. Die Diffusionskonstante ist dabei abhängig von der Mobilität der Ladungsträger.

Für die Ortsauflösung sind die Streifen verantwortlich. Unter Annahme einer Rechteckverteilung mit einem Streifenabstand p ergibt sich nach Referenz [Gru93] ein Auflösungsvermögen von:

$$\sigma_z = \frac{p}{\sqrt{12}} . \quad (2.11)$$

Bei einem typischen Streifenabstand von $80 \mu\text{m}$ beträgt das Auflösungsvermögen somit etwa $23 \mu\text{m}$. Allerdings kann das Auflösungsvermögen noch erhöht werden. Da in der Regel mehr als ein Streifen angesprochen wird, lässt sich der Schwerpunkt des Signals ermitteln und so eine höhere Auflösung erzielen.

Die Art der gesammelten Ladungsträger an den Streifen hängt davon ab, ob die p-dotierte oder n-dotierte Seite segmentiert ist. Ein Detektor aus n-Typ Substrat mit p-Typ Streifen (p-in-n) sammelt die entstehenden Löcher an den Streifen während umgekehrt ein p-Typ Substrat mit n-Typ Streifen (n-in-p) Detektor die Elektronen sammelt. Da beide immer paarweise erzeugt werden, sind die beiden Sensortypen fast äquivalent, lediglich die Beweglichkeit der zu sammelnden Ladungsträger (und damit die Integrationszeit) ist unterschiedlich.

Oberflächenstruktur

Die Oberflächenstruktur eines Detektors besteht nicht nur aus den Streifen. In Abbildung 2.10 ist ein Ausschnitt eines typischen Streifendetektors dargestellt. Es handelt sich hierbei um einen Sensor mit stark p-dotierten Streifen (p^+) auf n-dotierten Substrat. Die Rück-

seite ist stark n-dotiert (n^{++}) und mit einer Aluminiumschicht versehen um eine elektrische Kontaktierung zu ermöglichen. Auf den Streifen befindet sich eine dünne Schicht aus Siliziumdioxid (SiO_2 , nichtleitend), auf der die Aluminium-Streifen prozessiert sind um eine Auslese der Streifen zu ermöglichen. Hierdurch wird eine kapazitive Kopplung der Streifen erreicht. Die erzeugten Ladungsträger induzieren eine Spannung an den Aluminiumstreifen, welche in einem angeschlossenen Verstärker gemessen werden kann (AC-Kopplung). Um den Detektor vollständig zu verarmen, müssen die Streifen allerdings auch mit einer Gleichspannungsquelle verbunden werden. Dies geschieht über sogenannte DC-Pads welche über eine Durchkontaktierung direkt mit den dotierten Streifen verbunden sind. Diese Pads können auch für die Auslese verwendet werden. Um die Streifen herum befindet sich ein geschlossener Ring (*bias ring*) welcher über hochohmige Widerstände (*bias resistors*) mit den Streifen verbunden ist und die Spannungsversorgung (*Biasspannung*) ermöglicht. Der praktische Aspekt ist, dass es einfacher ist den *bias ring* an einer Stelle zu kontaktieren und damit alle Streifen zu versorgen als jeden Streifen einzeln über das DC-Pad zu kontaktieren (über 1000 pro Sensor) und durch das Kontaktieren des *bias rings* wird gewährleistet, dass alle Streifen auf dem gleichen homogenen Potential sind. Zum Schutz vor Schäden ist die gesamte Oberfläche noch einmal mit einer Schicht Siliziumdioxid überzogen. Lediglich an den Kontaktstellen für die Streifen (AC/DC-Pads) oder dem *bias ring* ist dies nicht der Fall.

Ein Problem stellen die Gitterdefekte an den Detektorkanten dar, die beim Sägen entstehen. Diese Defekte beeinflussen die Form des elektrischen Feldes am Rand. Eine wirkungsvolle Methode, dies zu vermeiden stellt der Schutzring (*guard ring*) dar. In Abbildung 2.10 ist ein solcher dargestellt. Dieser wird auf das gleiche Potential wie die Streifen gelegt. Dadurch ist das elektrische Feld im Bereich der Streifen homogen und ändert sich erst im Bereich zwischen *guard ring* und Detektorkante. Auf dem Sensor in der Abbildung befindet sich ganz außen noch ein Ring aus n^{++} -dotiertem Material, welcher auf dem gleichen Potential wie die Rückseite liegt. Dieser verhindert damit hohe Feldstärken an der Schnittkante. Eine andere Möglichkeit ist es, mehrere *guard rings* herzustellen, durch die das Potential schrittweise gesenkt wird. Während der den Streifen am nächsten liegende auf deren Potential ist, befindet sich der ganz außen liegende *guard ring* auf dem gleichen elektrischen Potential wie die Rückseite. Außerhalb des äußeren Rings gibt es somit keine Raumladungszone mehr.

2.7. Rauschen

Mit dem Begriff Rauschen wird eine zufällige Fluktuation eines elektrischen Signals in einem elektrischen Schaltkreis bezeichnet. Da dies auch in vollständig verarmten Detektoren geschieht, werden die zu messenden Signale beeinflusst. Für einen guten Detektor ist es essenziell, dass das Verhältnis von Signal zu Rauschen groß ist. Die Signalstärke hängt primär von der Anzahl der Elektron-Loch Paare, die durch das einlaufende ionisierende Teilchen erzeugt werden, ab. Das Signal kann lediglich durch die Dicke des Sensors variiert werden. Der andere Aspekt besteht in der Minimierung des Rauschens. Es gibt verschiedene Quellen, die mit den Betriebsparametern (Temperatur T , Auslesegeschwin-

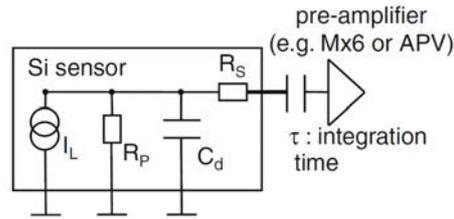


Abbildung 2.11.: Ersatzschaltbild mit relevanten Parametern für das Detektorrauschen [Har09].

digkeit t_p) und der Prozessierung (Widerstände, Kapazitäten) zusammenhängen.

Die Einheit für das Rauschen ist die äquivalente Rauschladung (*Equivalent Noise Charge*). Die einzelnen Beiträge addieren sich quadratisch, so dass nach Referenz [Har09] gilt:

$$ENC = \sqrt{ENC_C^2 + ENC_{I_L}^2 + ENC_{R_P}^2 + ENC_{R_S}^2} . \quad (2.12)$$

Die einzelnen Komponenten sind:

Der Leckstrom (I_L) liefert einen Beitrag ENC_{I_L} :

$$ENC_{I_L} = \frac{e}{2} \sqrt{\frac{I_L \cdot t_p}{q_e}} \approx 107 \sqrt{I_L / \text{nA} \cdot t_p / \mu\text{s}} ,$$

mit der Elektronenladung q_e und der Eulerschen Zahl e .

Auch der parallele Biaswiderstand R_P (*bias resistor*) liefert einen Beitrag ENC_{R_P}

$$ENC_{R_P} = \frac{e}{q_e} \sqrt{\frac{k_B T \cdot t_p}{2R_P}} \approx 44.5 \sqrt{\frac{T/\text{K} \cdot t_p / \mu\text{s}}{R_P / \text{M}\Omega}} ,$$

(k_B : Boltzmann-Konstante) ebenso wie der serielle Metallstreifenwiderstand R_S ⁴:

$$ENC_{R_S} = C_d \frac{e}{q_e} \sqrt{\frac{k_B T \cdot R_S}{6t_p}} \approx 0.025 C_d / \text{pF} \sqrt{\frac{T/\text{K} \cdot R_S / \Omega}{t_p / \mu\text{s}}} .$$

Einen wichtigen Beitrag liefert die Lastkapazität C_d :

$$ENC_C = a + b \cdot C_d .$$

a und b sind Parameter des Vorverstärkers. In Abbildung 2.11 ist ein Ersatzschaltbild dargestellt, in dem noch einmal alle relevanten Parameter eingezeichnet sind.

Um das Rauschen zu minimieren, sollten verschiedene Parameter bei der Prozessierung angepasst werden [Har09]

⁴Widerstand der Streifenmetallisierung

- kleine Lastkapazität C_d ,
- kleiner Leckstrom I_L ,
- hoher paralleler *Bias*widerstand R_P ,
- geringer Reihenwiderstand (Streifenwiderstand) R_S ,
- Betrieb bei niedriger Temperatur T .

Drei der Rauschquellen hängen auch mit der Auslesegeschwindigkeit t_p zusammen. Diese lässt sich aber nicht beliebig ändern. Sie hängt sehr von den Voraussetzungen des Experiments ab. Am LHC beispielsweise gibt es alle 25 ns einen Proton-Proton Zusammenstoß, welche die Auslesegeschwindigkeit festlegen, da jedes Ereignis und alle dazugehörigen Partikel einzeln registrieren werden sollen. Gerade diese Tatsache sorgt dafür, dass das Rauschen hauptsächlich auf den Faktor ENC_C , welcher von der Lastkapazität abhängt, zurückgeht.

In einem Streifendetektor gibt es mehrere Quellen für Kapazitäten. Da sich zwischen Streifenimplantat und Metallisierung eine dünne Isolatorschicht aus Siliziumdioxid befindet, entsteht eine Kapazität, genannt Kopplungskapazität $C_{coupling}$. Sie sollte einen hohen Wert haben, da sie direkt proportional zum Signal ist, aber dies bedeutet dass die Oxidschicht dünn ist. Es muss darauf geachtet werden, dass es keine Berührungspunkte zwischen Implantat und Metallisierung gibt, da sonst die kapazitive Kopplung verloren geht. Bei der kapazitiven Kopplung werden nur Änderungen des Signals registriert. Wird hingegen der Streifen direkt ausgelesen wird das gesamte Signal, bestehend aus einem konstanten "Untergrund" und der Änderung, gemessen. Auch zwischen den Streifen gibt es eine Kapazität. Diese ist bei manchen Detektoren erwünscht, da sich dadurch die gemessene Ladung auf mehrere Streifen verteilt, was zu einer höheren Raumauflösung führt. Die Zwischenstreifen-Kapazität ($C_{inter-strip} = C_{int}$) ist viel kleiner als die Kopplungskapazität. Es lässt sich ebenfalls eine Kapazität zwischen Streifen und Rückseite messen (C_b). Diese kann Aufschluss über die Güte des Streifens geben, da sich Beschädigungen auf den Wert auswirken.

Die Streifenkapazität ($C_{strip} = C_d$) setzt sich aus der Zwischenstreifen- und Rückseitenkapazität zusammen. Sie spiegelt die gesamte Kapazitätsbelastung für den Verstärker wieder.

2.8. Strahlenschäden

In der Hochenergiephysik ist es notwendig, dass die Detektoren für verschiedenen Teilchensorten und auch Teilchenenergien funktionieren. Dabei werden sie teilweise hohen Strahlenbelastungen aufgrund der hohen Teilchenrate ausgesetzt, wodurch die Detektoreigenschaften verschlechtert werden. Für Siliziumstreifendetektoren kann eine erste Einteilung der Schädigung dahingehend vorgenommen werden, an welcher Position des Sen-

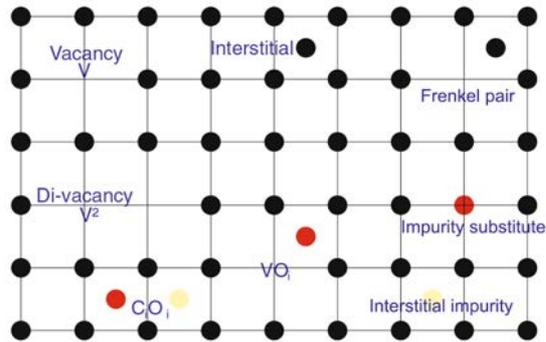


Abbildung 2.12.: Schäden im Siliziumkristallgitter durch Strahlung: Zwischengitteratome (*Interstitials*) und Leerstellen (*Vacancy*, V) ändern die Bandstruktur. Es treten auch doppelte Leerstellen (*Di-Vacancy*; V^2) und Verunreinigungen (beispielsweise Kohlenstoff C oder Sauerstoff O) auf. Der Index gibt die Schadensart an: i für *Interstitials* [Har09].

sors die Defekte auftreten. Zum einen passieren sie im Substrat und zum anderen an der Oberfläche (beispielsweise dem Bereich der Streifen).

2.8.1. Substratschäden

Teilchen, welche den Detektor passieren, interagieren auf unterschiedliche Weise mit dem Detektormaterial. Sie können Gitteratome ionisieren oder auch mit den Atomkernen wechselwirken. In Abbildung 2.12 sind einige dieser Schadensarten im Kristallgitter dargestellt. Das Entfernen eines Gitteratoms von seinem Gitterplatz hinterlässt eine Leerstelle (*Vacancy*). Außerdem verschwindet das entfernte Atom nicht einfach sondern nimmt einen neuen Platz ein (*Interstitial*). Die Kombination aus einer Leerstelle und einem Zwischengitteratom wird Frenkel-Paar genannt. Durch diese beiden Schädigungen verändert sich die Bandstruktur und die Eigenschaften des Kristallgitters ändern sich [Har09]. Zum einen wächst der Dunkelstrom aber auch die Verarmungsspannung ändert sich da neue Akzeptorniveaus entstehen. Die Leerstellen wirken wie Fallen für Ladungsträger wodurch die Ladungssammlungseffizienz negativ beeinflusst wird. Wenn ein Elektron in solch einer Falle gefangen wird (*trapping*), so dauert es einige Zeit, bis es sich wieder frei bewegen kann. Da für die Ladungssammlung aber aufgrund der Ausleselektronik nur eine sehr begrenzte Zeitdauer zur Verfügung steht, werden nicht alle durch das primäre Teilchen erzeugten Ladungsträger eingesammelt. Treten mehrere dieser Defekte in einem lokal begrenzten Bereich auf wird dies als *Cluster* bezeichnet. Die Auswirkungen auf das Bändermodell werden in Abbildung 2.13 noch einmal deutlich.

Die Art der Schäden hängt mit der Fluenz⁵ zusammen [Har09]: Bei etwa $10^{14} n_{1\text{MeV}}/\text{cm}^2$ ist der dominierende Effekt der Schäden der anwachsende Leckstrom,

⁵Um die Schäden verschiedener Teilchen und Energien zu vergleichen werden alle Fluenzen mit der NIEL-Hypothese [Har09] auf einen Referenzwert für eine Bestrahlungsfluenz von 1 MeV Neutronen umgerechnet: $n_{1\text{MeV}}$.

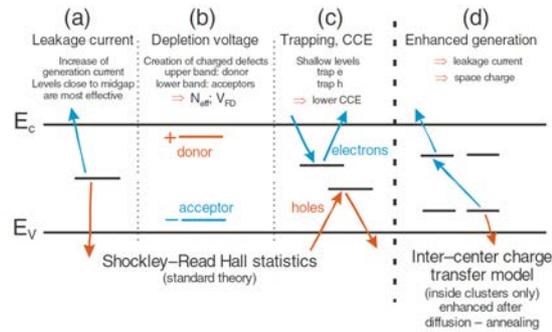


Abbildung 2.13.: Verdeutlichung von Strahlenschäden am Bändermodell: (a) Beeinflussung des Leckstroms durch neue Zustände im Verbotenen Bereich, (b) Veränderung der Verarmungsspannung durch neuen Zustände, (c) Ladungsträgereinfang (*trapping*) beeinflusst die Ladungssammlungseffizienz (*Charge Collection Efficiency*), (d) verschiedene Defekte in Cluster wirken verstärkend aufeinander [Har09].

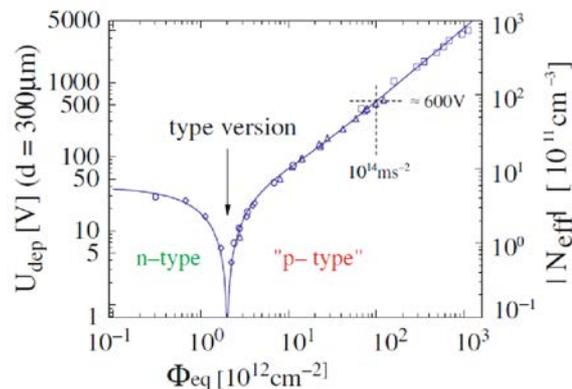


Abbildung 2.14.: Effektive Dotieratomkonzentration (N_{eff}) sowie Verarmungsspannung (U_{dep}) als Funktion der Äquivalenz-Strahlendosis (Φ_{eq}) [Mol99].

während bei etwa $10^{15} n_{1\text{MeV}}/\text{cm}^2$ die hohe Verarmungsspannung hauptsächlich beitragend ist. Ab $10^{16} n_{1\text{MeV}}/\text{cm}^2$ schließlich überwiegt das *trapping*, wodurch die Ladungssammlungseffizienz deutlich sinkt.

Typinversion

Wird im unbestrahlten Zustand die äußere Spannung an den Detektor angelegt, so breitet sich die Verarmungszone von der segmentierten Seite (Streifen) her zur nicht segmentierten Seite (Unterseite) aus. Dadurch wird gewährleistet, dass auch bei einem nicht vollständig verarmten Detektor eine gute Ortsauflösung erreicht wird. Der Grund dafür ist, dass die Verarmung immer am pn-Grenzübergang beginnt. In Abbildung 2.15 wird dies bei verschiedenen Spannungen dargestellt. In der linken Graphik reicht die äußere Spannung nicht, um den Sensor vollständig zu verarmen. Man sieht, dass das elektrische Feld beim pn-Übergang am stärksten ist. Das mittlere Bild zeigt einen Sensor der gerade vollständig

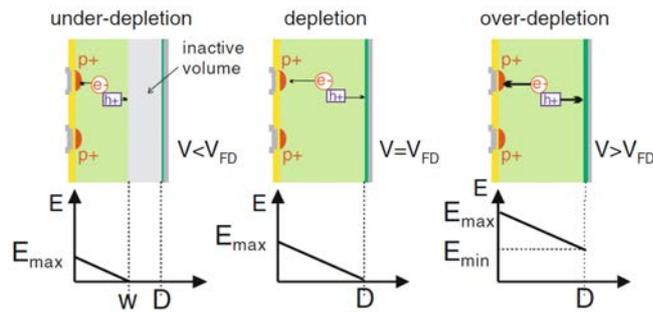


Abbildung 2.15.: Verarmungszone und elektrisches Feld als Funktion der angelegten Spannung bei einem p-in-n Detektor [Har09].

verarmt ist. Das elektrische Feld hat beim Rückseitenkontakt einen Wert von Null. Da das Feld aber auch dazu gedacht ist, die erzeugten Ladungsträger zu den Streifen hin zu bewegen, ist dies keine gute Lösung. Die Funktion des Detektors wird besser, wenn man ihn in Überverarmung (*Overdepletion*) betreibt, das bedeutet dass eine Spannung größer als die Verarmungsspannung gewählt wird. Dadurch hat auch die dem pn-Übergang gegenüberliegende Seite des Detektors ein elektrisches Feld mit nichtverschwindender Größe E_{min} , welches dafür sorgt, dass die zu sammelnden Ladungsträger mit ausreichender Geschwindigkeit zu den Streifen driften (Abbildung 2.15 rechts).

Bei einem n-Typ Sensor kann durch Strahlenschäden ein negativer Effekt auftreten. Die effektive Dotieratomkonzentration N_{eff} , welche die Differenz zwischen Donator-Anzahl und Akzeptor-Anzahl angibt, ändert sich während der Bestrahlung. Dies liegt daran, dass die Strahlteilchen mit den Atomkernen wechselwirken und Defekte nach [Spi05] eher akzeptorartig sind. Bei einem ursprünglichen n-Typ Detektor sorgt dies dafür, dass die effektive Dotierkonzentration mit ansteigender Äquivalenz-Strahlungsdosis Φ_{eff} sinkt. Zwischen 10^{12} und $10^{13} n_{1MeVcm^{-2}}$ ändert sich das Vorzeichen der Netto-Dotierung und aus einem n-Typ Sensor wird ein Detektor der das gleiche Verhalten wie ein p-Typ Detektor hat (siehe Abbildung 2.14). Da die Verarmungsspannung V_{dep} maßgeblich von der Dotieratomkonzentration im Substrat abhängt (siehe Formel 2.4), ändert sich diese auch mit der Bestrahlung. Im abgebildeten Beispiel liegt die Spannung für eine vollständige Verarmung vor der Bestrahlung unterhalb von 50 V, hingegen bei einer Fluenz von $10^{14} n_{1MeVcm^{-2}}$ liegt sie bereits bei etwa 600 V. Dies muss bei der Konstruktion der Spannungsversorgung beachtet werden.

Durch die Typinversion beginnt außerdem die Verarmung eines n-Typ Detektors auf der Rückseite. Ist der Detektor nicht vollständig verarmt, so bildet sich nicht im gesamten Detektor ein elektrisches Feld (siehe Abbildung 2.16), vor allem nicht im Bereich der Streifen. Dadurch wird die Ortsauflösung verschlechtert, da die Ladungsträger im nicht-verarmten Bereich zu einem beliebigen Streifen diffundieren.

Bei einem p-Typ Detektor tritt keine Typinversion auf, so dass er auch bei hohen Bestrahlungen und nur teilweiser Verarmung eine gute Ortsauflösung liefert. Der Preis für diesen Vorteil ist aber, dass zur vollständigen Verarmung eine deutlich höhere Spannung benötigt wird.

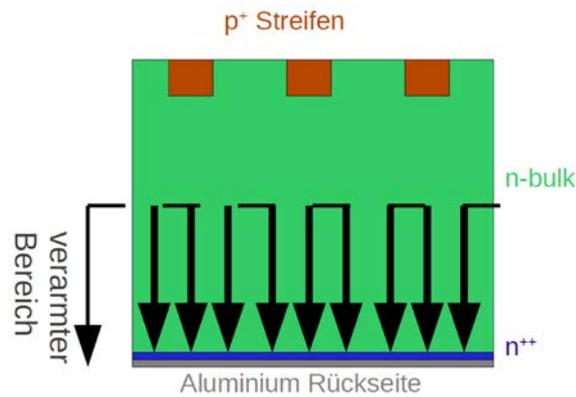


Abbildung 2.16.: Elektrische Feldlinien in einem n-Typ Detektor nach Typinversion, der nur teilweise verarmt ist.

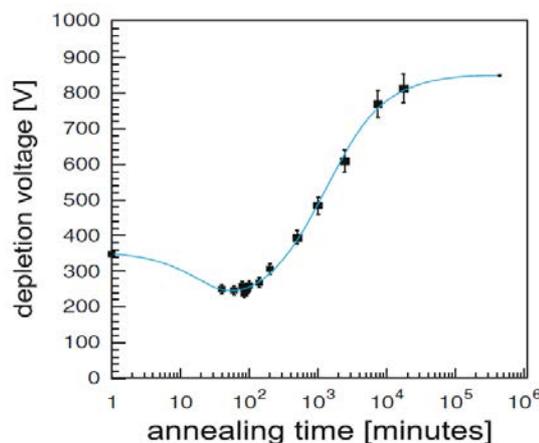


Abbildung 2.17.: Verarmungsspannung als Funktion der Ausheilzeit bei 60°C: Durch das *beneficial annealing* sinkt die Verarmungsspannung während sie beim später auftretenden *reverse annealing* steigt [Har09].

2.8.2. Annealing

Mit *annealing* wird die Temperaturbehandlung von Detektoren und das Ausheilen/Verändern von Defekten bezeichnet. Leerstellen und Zwischengitteratome als Defekte des Siliziumgitters sind bei einer Temperatur von mehr als 150 K sehr mobil, so dass sie auch wieder rekombinieren können und der Defekt ausheilt. Es gibt zwei Arten des Ausheilens: *beneficial annealing* und *reverse annealing*. Beim *beneficial annealing* werden Schäden reduziert, während beim *reverse annealing* makroskopische Sensoreigenschaften schlechter werden. Wenn der Detektor erwärmt wird tritt zuerst das *beneficial annealing* ein, gefolgt vom *reverse annealing*.

Während der Dunkelstrom beim *annealing* stetig sinkt, sieht dies bei der Verarmungsspannung anders aus (siehe Abbildung 2.17). Auch hier sinkt die Spannung erst (*beneficial annealing*), aber dann steigt sie wieder und zwar auch über den ursprünglichen Wert hinaus (*reverse annealing*).

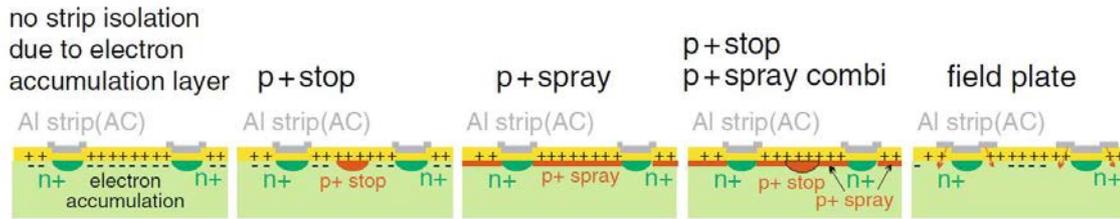


Abbildung 2.18.: Verschiedene Möglichkeiten der Streifenabschirmung: *p-stop*, *p-spray*, *p-stop* und *p-spray*, Feldplatten [Har09].

Das Ausheilen ist stark temperaturabhängig. Bei Temperaturen unterhalb von 0°C “friert” das *annealing* praktisch ein. Dies wird ausgenutzt indem bestrahlte Detektoren eine kurze Zeit erwärmt werden um den positiven Effekt des Ausheilens auszunutzen, aber dann rechtzeitig wieder eingefroren, werden damit es nicht zu einer Verschlechterung der Detektorparameter kommt.

2.8.3. Oberflächenschäden

Die Schäden an der Oberfläche von p-Typ Sensoren treten auf, weil das Material ionisiert wird. In der Isolationsschicht (SiO_2) werden Elektron-Loch-Paare erzeugt, die nicht wieder vollständig rekombinieren. Dies resultiert aus der Tatsache, dass Elektronen schneller als Löcher sind, wodurch sich die Paare trennen. Die Elektronen driften zur Metallelektrode, während die Löcher zur Grenze zwischen Silizium und Siliziumdioxid wandern. Dadurch entsteht eine positive statische Ladung an der Grenzfläche. Allgemein ergibt sich, dass die Kapazität zwischen den Streifen wächst und damit auch das Rauschen ansteigt.

Die Auswirkungen dieser positiven Ladungen lassen sich folgendermaßen erklären und vermeiden: Elektronen, welche in der Ionisationsspur des zu bestimmenden Teilchens erzeugt werden, driften zu den Löchern an der Grenzschicht und werden aufgrund der positiven Ladung gesammelt. Dies führt zu dem Problem, dass Streifen dadurch kurzgeschlossen werden können (siehe Abbildung 2.18 ganz links). Eine Möglichkeit dies zu verhindern besteht darin, zwischen den n^+ -Streifen zur Messung noch Streifen aus p-dotiertem Material zu prozessieren, das sogenannte *p-stop* Verfahren. Dadurch wird die Elektronenverbindung der Streifen unterbrochen (Abbildung 2.18, zweite von links). Eine andere Möglichkeit ist es, die gesamte Siliziumoberfläche mit einer p-dotierten Schicht zu versehen (*p-spray*) (Abbildung 2.18, Mitte) welche sich am Ende zwischen Silizium und Passivierung befindet. Dadurch werden die positiven statischen Ladungen abgeschirmt. Auch eine Kombination aus *p-spray* und *p-stop* ist möglich (Abbildung 2.18, zweite von rechts). Eine andere Option ist, die Aluminiumstreifen etwas zu verbreitern. Dadurch wird ein Feld in der Nähe der n^+ -Streifen generiert, welches die Anlagerung von Elektronen verhindert (Feldplatten).

3. Das ATLAS-Experiment

Der größte und modernste Beschleuniger im Bereich der Hochenergie-Teilchenphysik befindet sich am CERN in Genf. Im Tunnel des ehemaligen *Large Electron-Positron Colliders* (LEP) etwa 100m unterhalb der Erdoberfläche wurde 2008 der *Large Hadron Collider* (LHC) gestartet, in dem zwei gegenläufige Protonenstrahlen mit einer geplanten, bisher nicht erreichten, Schwerpunktsenergie von bis zu 7 TeV je Strahl (im Moment jeweils 4 TeV) an verschiedenen Wechselwirkungspunkten zur Kollision gebracht werden. Um zwei diese Punkte herum wurden die bisher größten Detektoren gebaut: ATLAS und CMS, welche darauf ausgelegt sind möglichst alle Teilchen, die bei den Proton-Proton Kollisionen entstehen, nachzuweisen. Dabei werden verschiedene Detektorkomponenten verwendet, die zwiebelschalenförmig zusammengesetzt sind und jeweils einen eigenen Zweck erfüllen.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden ausschließlich Siliziumhalbleiterdetektoren des ATLAS-Detektors betrachtet. Diese dienen zur Spurrekonstruktion und damit zur Bestimmung des Primärvertex (und eventueller Sekundärvertizes) und zur Ladungsbestimmung geladener Teilchen. Dazu sind die Siliziumdetektoren in direkter Umgebung um den Kollisionspunkt im inneren Detektor aufgebaut.

Der ersten Abschnitt dieses Kapitels befasst sich mit dem ATLAS-Detektor, wobei auf den inneren Detektor detaillierter eingegangen wird. Anschließend wird die Aufrüstung des Detektors für eine Luminositäts¹erhöhung¹ erläutert: Die zwei möglichen Konzepte werden diskutiert und die geplanten Veränderungen des inneren Detektors näher betrachtet.

3.1. Der ATLAS-Detektor

Damit der ATLAS-Detektor seine Aufgabe erfüllen kann, möglichst alle Teilchen der Protonen-Kollisionen nachzuweisen, ist er nach dem Zwiebelschalenprinzip um den Wechselwirkungspunkt herum aufgebaut (siehe Abbildung 3.1). Die in diesem Abschnitt verwendeten Details stammen aus [TA⁺08] und [ATL11a]:

Der gesamte Detektor, mit einer Länge von 45m und einem Durchmesser von 25m, lässt sich in drei Bereiche unterteilen: Direkt um die Strahlröhre befindet sich der innere Detektor, gefolgt von den Kalorimetern. Die äußerste Lage besteht aus dem Myondetektor.

Der innere Detektor (Abbildung 3.2), mit einer Länge von 6.2m und einem Durchmesser von 2.1m, besteht aus drei verschiedenen Detektortypen und hat die Form eines

¹Luminosität $L = \frac{\text{Anzahl der Teilchenpakete} \times \text{Teilchenanzahl in den Paketen} \times \text{Kollisionsfrequenz}}{\text{Querschnittsfläche}}$

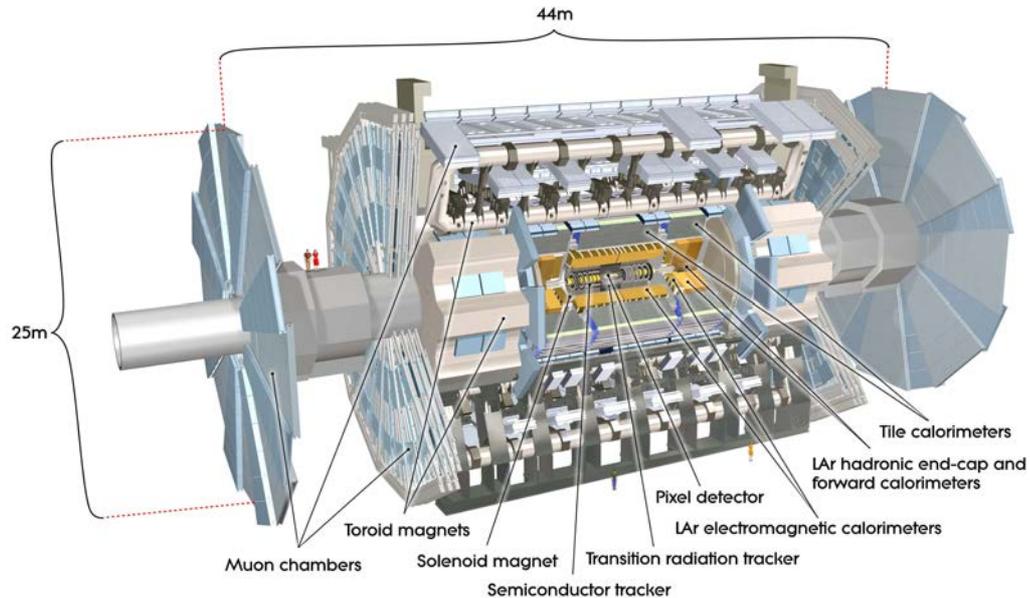


Abbildung 3.1.: Aufbau des gesamten ATLAS-Experiments [ATL12].

Zylinders. Direkt um den Wechselwirkungspunkt befindet sich der Pixeldetektor. Dieser besteht aus drei Halbleitersensorlagen im Zylindermantel (siehe Abbildung 3.3), die an jeder Seite von drei Kreisscheiben (*disks* oder Endkappen) abgeschlossen werden. Der Pixeldetektor umfasst lediglich eine Fläche von 1.7 m^2 auf der jedoch 80 Millionen Pixel untergebracht sind. Jedes Pixel ist $50 \times 400\ \mu\text{m}^2$ groß, wodurch sich eine Ortsauflösung von $14\ \mu\text{m}$ in $R-\phi$ und $115\ \mu\text{m}$ in z -Richtung² ergibt. Umgeben ist der Pixeldetektor vom SCT, welcher aus Siliziumstreifendetektoren besteht. Im *Barrel*-Bereich (Zylindermantel) befinden sich vier Lagen, die jeweils doppelseitig mit Sensoren bestückt sind. Ein kleiner Winkel von $40\ \text{mrad}$ der Streifen in Bezug auf die Strahlachse auf einer Seite einer Lage ermöglicht es, eine zweidimensionale Ortskoordinate zu bestimmen. Der Streifenabstand beträgt $80\ \mu\text{m}$ und jeweils eine Seite der Sensorlagen ist so ausgerichtet, dass die Streifen parallel zur Strahlröhre sind. Die zwei Endkappen bestehen jeweils aus neun *disks*, wobei die Streifen hier alle senkrecht zur Strahlachse angeordnet sind, jedoch haben ebenfalls einige *disks* einen kleinen Winkel von $40\ \text{mrad}$ gegenüber den radialen Streifen für die Bestimmung der Ortskoordinaten. Für den *Barrel*-Bereich ergibt sich eine Ortsauflösung in $R-\phi$ Richtung von $17\ \mu\text{m}$, sowie $580\ \mu\text{m}$ für die z -Richtung. Für die Endkappen beträgt die Ortsauflösung $17\ \mu\text{m}$ in $R-\phi$ Richtung und $580\ \mu\text{m}$ für die Bestimmung des radialen Abstands R . Insgesamt gibt es etwa 6.3 Millionen Streifen, die auf einer Fläche von 60 m^2 verteilt sind. Die äußerste Schicht bildet der Übergangstrahlungsdetektor TRT³ welcher aus $4\ \text{mm}$ dünnen Röhren (*straw tubes*) besteht. Mit ihnen ist es nur möglich, Informatio-

² R : radialer Abstand zur Strahlachse, ϕ : Azimutwinkel um Strahlachse, z : Koordinate entlang der Strahlachse

³Transition Radiation Tracker

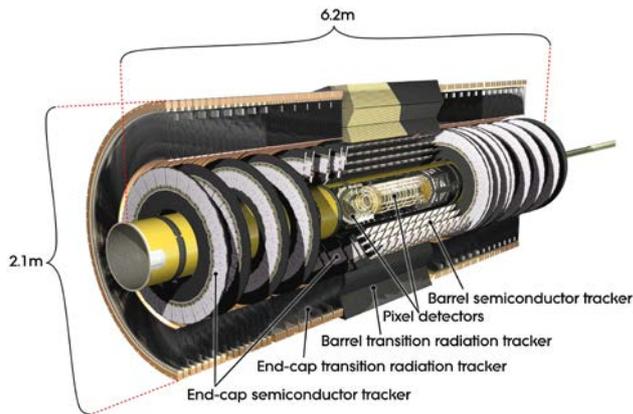


Abbildung 3.2.: Aufbau des inneren Detektors [ATL12].

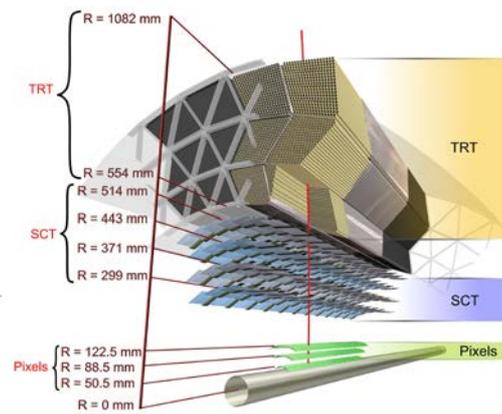


Abbildung 3.3.: Schematischer Aufbau des inneren Detektors von ATLAS (nur *Barrel*) [ATL12].

nen in R - ϕ Richtung mit einer Genauigkeit von $130\ \mu\text{m}$ pro Rohr zu erhalten. Während die *straw tubes* in der *Barrel*-Region parallel zur Strahlachse angeordnet sind, verlaufen sie in den Endkappen radial mit insgesamt etwa 351 000 Auslesekanälen. Der Aufbau des inneren Detektors erlaubt eine genaue Bestimmung der Bahn von geladenen Teilchen. Um den Impuls und die Ladung zu bestimmen ist der gesamte innere Detektor in einem 2 T Magnetfeld eingebettet, welches vom zentralen Solenoid erzeugt wird.

Um den inneren Detektor sind die Kalorimeter gebaut. Der Strahlachse am nächsten befindet sich das elektromagnetische Kalorimeter, welches die Energie von Elektronen und Photonen misst. Im *Barrel*-Bereich ist das Kalorimeter in zwei identische Hälften geteilt, die in drei Lagen unterteilt sind, während die Endkappenkomponenten, die sich in einem eigenen Kryostat befinden, in zwei koaxiale Räder unterteilt sind. Das Kalorimeter besteht aus einem *lead-LAr*⁴ Detektor mit ziehharmonikaförmigen Elektroden und Bleiabsorbern. Um das elektromagnetischen Kalorimeter herum befindet sich das hadronische Kalorimeter, welches sich in das Plattenkalorimeter im *Barrel*-Bereich und das LAr hadronischen Kalorimeter in den Endkappen aufteilt. Das Plattenkalorimeter nutzt Stahl als Absorber und szintillierende Platten zur Messung.

Die äußerste Detektorkomponente in ATLAS ist das Myonsystem. Die Myonen werden in präzisen Spurkammern nachgewiesen. In großen supraleitenden toroidalen Magneten mit einem Luftkern erfolgt eine magnetische Ablenkung der Myonbahn für die Bestimmung der Ladung. Im *Barrel*-Bereich sind die Kammern in drei zylindrischen Lagen um die Strahlachse herum aufgebaut und in den Endkappenregionen befinden sich drei Ebenen, die senkrecht zur Strahlachse liegen. Bei den Myonkammern handelt es sich hauptsächlich um *Monitored Drift Tubes* (Driftkammern), während bei kleinen Abständen zur Strahlachse auch Vieldrahtproportionalkammern mit segmentierten Kathoden zum Einsatz kommen. Zusätzlich werden als Triggersysteme *Resistive Plate Chambers* im *Barrel*-Bereich und *Thin Gap Chambers* in den Endkappen verwendet. Diese dienen unter

⁴lead *Liquid Argon*: Blei - flüssiges Argon

anderem dazu, die Myonkoordinate in der Richtung senkrecht zu den Spurkammern festzustellen.

Die Proton-Proton-Interaktionsrate für die maximale Luminosität liegt bei etwa 1 GHz, während die Rate zur Datenaufzeichnung aufgrund technischer und materieller Begrenzungen bei ungefähr 200 Hz liegt. Um die Datenmenge zu reduzieren, werden drei Triggerstufen eingesetzt. Der Level 1 Trigger (*L1 trigger*) sucht nach festgelegten Kriterien und verwendet dazu Informationen ausgewählter Detektoren. Außerdem werden einer oder mehrere interessante Bereiche (*Regions-of-Interest*) festgelegt, die im 2. und 3. Level genauer untersucht werden und anhand von Selektionskriterien des Triggermenüs ausgewählt werden können, um die Datenrate auf 200 Hz zu reduzieren.

3.2. Das ATLAS-Upgrade

Um das Potential des LHC vollständig auszunutzen, ist im Jahr 2022 eine Aufrüstung zum HL-LHC geplant, bei dem die Designluminosität um den Faktor fünf gesteigert werden soll [Fer12]. Die erhöhte Luminosität, die gesamte Strahlenbelastung und die steigende Ereignisrate (*Occupancy*) führen dazu, dass der momentane innere Detektor nicht die benötigte Leistungsfähigkeit liefern kann um das volle Entdeckungspotential des HL-LHC auszunutzen.

Mit seiner Nähe zum Kollisionsspunkt ist die Strahlenbelastung des inneren Detektors mit einer erwarteten Fluenz von mehr als $1 \times 10^{16} n_{1\text{MeV}}/\text{cm}^{25}$ besonders groß. Die bisher verwendeten n-in-p-Detektoren haben den Nachteil, dass sie nach einer Typinversion und höheren Fluenzen (siehe Abschnitt 2.8.1) aufgrund der hohen Strahlenbelastung nicht mehr an den Streifen verarmen. Die p-in-n Detektoren haben diesen Nachteil nicht und sind deshalb die erste Wahl für den Ausbau. Des weiteren treten aufgrund der Strahlenbelastung eine erhöhte Verarmungsspannung und erhöhte Leckströme auf, sodass die Kühlung der Detektoren essentiell ist. Im Rahmen des Phase 2 *Upgrades* für den HL-LHC wird geplant, den inneren Detektor des ATLAS-Experiments, während einer Betriebspause im Jahr 2022/2023 [All12], komplett umzubauen. Eine wichtige Neuerung besteht darin, dass die Übergangsstrahlungsdetektoren durch weitere Lagen von Siliziumdetektoren ersetzt werden sollen. Dies geschieht, da der Übergangsstrahlungsdetektor bereits im Rahmen seiner Möglichkeiten voll ausgenutzt wird und eine Verbesserung für das *Upgrade* im erforderlichen Maße im Bezug auf die erhöhte Teilchenanzahl nicht erwartet wird.

Um die Strahlungslänge des Detektorsystems zu verringern, den Aufbau effizienter zu gestalten und die Integration zu vereinfachen gibt es im *Barrel*-Bereich zwei neue Konzepte zu deren Installation: das *Stave*-Konzept oder das Supermodul-Konzept.

3.2.1. Das *Stave*-Konzept

Dieses Konzept basiert darauf, dass die sogenannten Module nicht mehr einzeln eingebaut werden, sondern mehrere zusammen auf einer Aufnahmestruktur, dem *Stave*.

⁵ Bestrahlungsfluenz von 1 MeV Neutronen: $n_{1\text{MeV}}$.

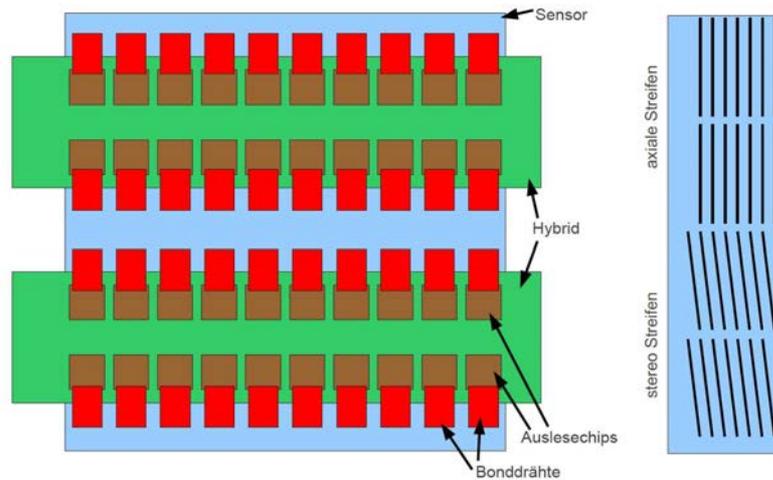


Abbildung 3.4.: Darstellung eines *Barrel* Moduls: Sensor (blau) mit aufgeklebten Hybriden (grün) und insgesamt 40 ASICs (braun) sowie den Drahtbondverbindungen zwischen Auslesechips und Sensor (rot). Rechts ist die Segmentierung der Streifen in axiale (parallel zur Sensorkante) und stereo (kleiner Winkel zur Sensorkante) Streifen skizziert.

Ein Modul besteht aus einem Siliziumdetektor und zwei Hybriden mit jeweils 20 Auslesechips. Zur Auslese der 1280 Streifen eines ATLAS07 Testensors muss jeder mit einem der 128 Kanäle des Auslesechips verbunden werden. Bei den Auslesechips handelt es sich um ABCN25 ASIC's⁶ in 250 nm CMOS⁷ Technologie [Miñ10], die speziell für diese Anwendung entworfen wurden.

Die Streifen der Testensoren sind nicht über die gesamte Detektorlänge von 9.75 cm durchgehend sondern in vier gleichgroße Segmente aufgeteilt: Zwei Segmente haben Streifen, die parallel zur Sensorkante sind (axiale Streifen), während bei den anderen beiden Segmenten die Streifen einen kleinen Winkel (40 mrad) im Bezug zur Sensorkante haben (stereo Streifen). Daraus ergibt sich die Notwendigkeit von 40 Auslesechips für einen einzelnen Detektor. Jeweils 20 Chips werden mit entsprechender Stromversorgung und Auslesekänen zu einem Hybrid zusammengefasst. Die Hybride werden mit einem wärmeleitenden, aber nicht elektrisch leitenden, Klebstoff auf der Streifenoberfläche angebracht. In Abbildung 3.4 ist ein solches Modul schematisch dargestellt. Im rechten Teil der Abbildung ist die Segmentierung der Streifen skizziert.

Der *Stave* besteht aus einem Kern aus honigwabenartigem Kohlenstoff. In Inneren befindet sich eine Kühlleitung in Form eines U-Rohrs, welche in einen Schaumstoff eingebettet ist. Boden und Deckel werden aus Kohlenstofffaserplatten gefertigt. In Abbildung 3.5 sind die einzelnen Lagen eines *Stave* dargestellt. Der *Stave* sollte möglichst leicht sein, dabei aber trotzdem steif gegenüber Verformungen aufgrund des Eigengewichts. Ein solcher *Stave*-Kern ist 120 mm breit und hat eine Dicke von 5.14 mm [CJS10]. Die Länge der Staves variiert je nach Abstand von der Strahlachse: für kleine Abstände beträgt sie

⁶Application Specific Integrated Circuit: anwendungsspezifische integrierte Schaltung

⁷Complementary Metal Oxid Semiconductor: komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter

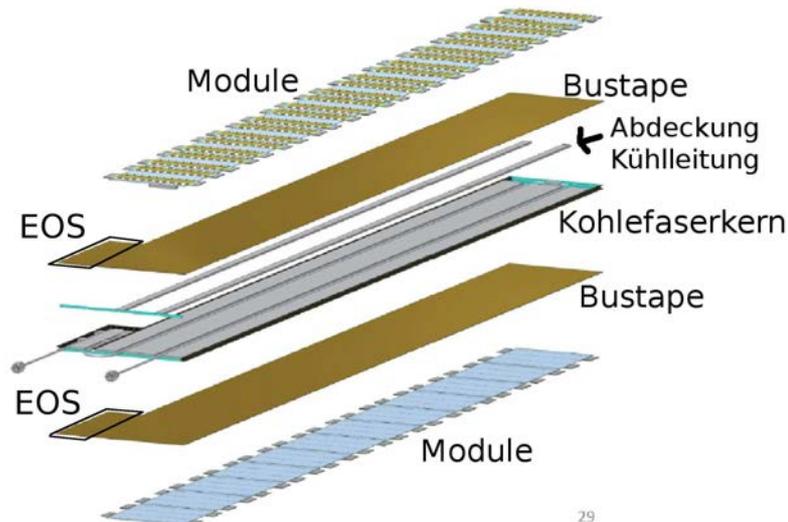


Abbildung 3.5.: Schematische Darstellung eines *Staves* mit den einzelnen Schichten: oben und unten die Sensoren mit den aufgeklebten Hybriden (Module) gefolgt vom *Bustape* mit den elektrischen Leitungen (braun). Auf jeder Seite werden neben den Modulen noch die EOS-Karten platziert. In der Mitte ist die Kühlleitung mit dem Kohlefaser-Kern dargestellt [Nic12].

1 m, für größere Abstände 2 m [H⁺07].

Auf der Oberfläche wird ein Kapton-Kupfer-Kabel (*Bustape*) angebracht, in dem sich Leitungen für die Spannungsversorgung der Hybride (Auslesechips für Sensor und dazugehörige Schaltungen) und Sensoren sowie die Datenleitungen von den Modulen zur *End-of-Substructure* (EOS) Karte befinden, welche die Verbindung zur Datenerfassung herstellt. Die einzelnen Module und die EOS-Karte werden auf dieses Kabel geklebt. Es ist möglich, den *Stave* sowohl einseitig (zu Testzwecken) als auch beidseitig (für das *Upgrade*) mit Modulen zu bestücken (siehe Abbildung 3.6).

Beim *Stave* wird die Abwärme der Elektronik durch den Detektor hindurch zur Kühlleitung geführt. Bei einer Temperatur der Kühlflüssigkeit von -25°C ist der Detektor 2°C wärmer und die Chips sogar 8°C [H⁺07]. Statt einer Operationstemperatur der Siliziumdetektoren von bisher 7°C soll sie höchstens -27°C betragen [K⁺07]. Außerdem wird durch diese Bauweise die Materialmenge verringert und die Konstruktion wesentlich vereinfacht.

3.2.2. Das Supermodul-Konzept

Das weitere Konzept für den SCT-Ausbau ist das Supermodul. Schlüsselpunkt ist die modulare Bauweise. Das Design sieht vor, dass die Hybride brückenartig über die Detektoren geführt werden, aber auch ein direktes Verkleben wie im *Stave*-Konzept ist denkbar. Das Supermodul besteht aus 12 Modulen (vergleichbar mit den *Stave*-Modulen, da die gleichen Sensoren verwendet werden) sowie der Träger- und Versorgungsstruktur wie es

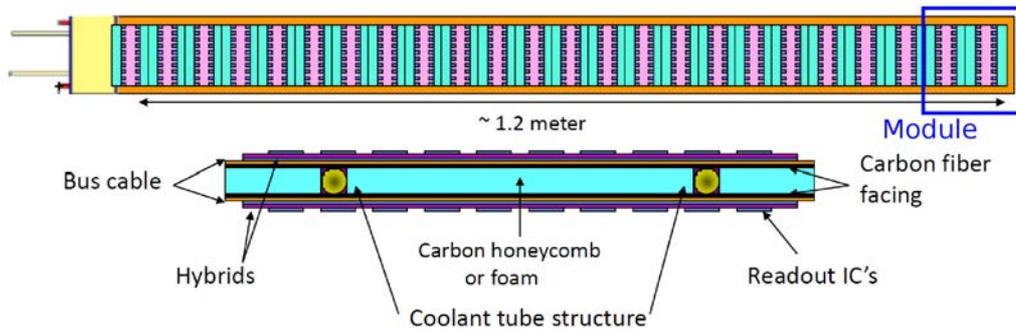


Abbildung 3.6.: *Stave* von oben und von der Seite; oben: Detektoren in türkis, Hybride in rosa, zwei Hybride auf einem Sensor bilden ein Modul (blauer Kasten); unten: *Stave* von der Stirnseite, deutlich sind die Kühlluftleitungen zu erkennen [Bur10].

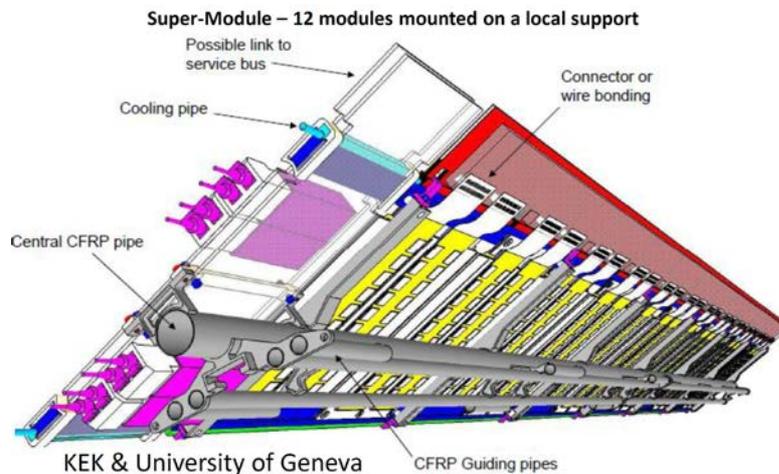


Abbildung 3.7.: Darstellung der Trägerstruktur mit angebrachten Modulen (Hybride gelb), welche das Supermodul bildet. Die Versorgungsleitungen sind ebenfalls dargestellt [Bur10].

in Abbildung 3.7 dargestellt ist. Vorteilhaft ist, dass die einzelnen Schritte voneinander unabhängig und nicht vom Moduldesign abhängig sind. Entlang der Strahlachse soll eine vollständige Abdeckung mit Modulen erreicht werden. Ein wichtiger Punkt ist die Möglichkeit bis zur Inbetriebnahme noch Nachbesserungen vornehmen zu können. Die Module werden reversibel mit der Trägerstruktur verbunden, so dass es möglich ist auch einzelne auszubauen, ohne sie zu zerstören. Der Einbau erfolgt jeweils von den Enden her, was eine hohe Flexibilität beim Einbau und auch bei Nachbesserungen ermöglicht. Für ein Modul werden bei diesem Konzept zwei Detektoren Rücken an Rücken verwendet (siehe Abbildung 3.8).

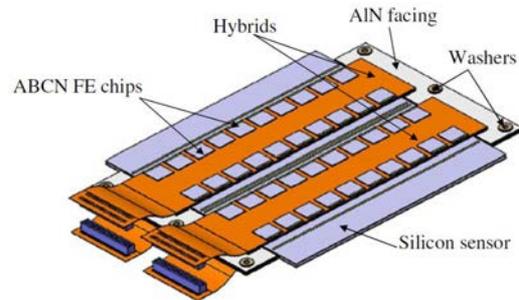


Abbildung 3.8.: Doppelseitiges Modul des Supermodul-Konzepts [GS⁺10].

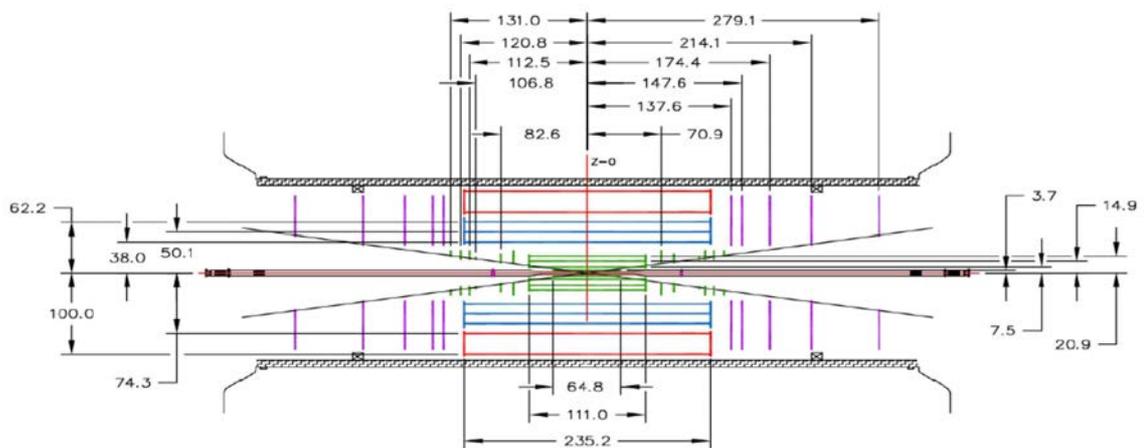


Abbildung 3.9.: Schema des inneren Detektors nach dem *Upgrade* (Utopia Design nach Referenz [Fer12]): in grün ganz innen die vier Lagen Pixeldetektoren, danach (blau) drei Lagen Siliziumdetektoren und ganz außen (rot) noch einmal zwei Lagen Streifendetektoren; alle Abmessungen in cm.

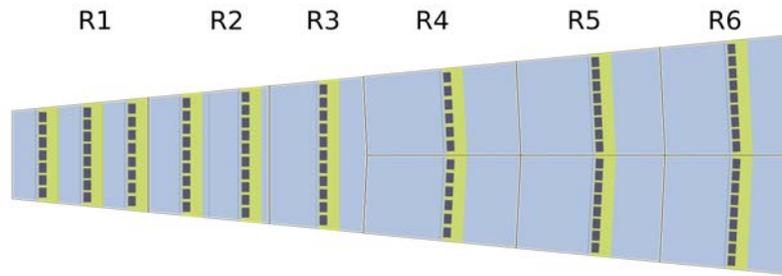


Abbildung 3.10.: Bild eines *Petal*s nach [Lac12]. Die verschiedenen Sensoren sind in Ringe (R1 bis R6) unterteilt die jeweils unterschiedliche Sensoren benötigen. Ab R4 werden zwei Sensoren nebeneinander platziert.

3.2.3. Aufbau des inneren Detektors

Durch die Ersetzung der Übergangsstrahlungsdetektoren beim *Upgrade* wird neuer Platz geschaffen, der durch Siliziumdetektoren gefüllt werden soll. In Abbildung 3.9 ist ein schematischer Aufbau mit den einzelnen Detektorlagen und den Abmessungen dargestellt. Im *Barrel*-Bereich des ehemaligen TRT sollen zwei Lagen Streifendetektoren mit einer Streifenlänge von 9.7 cm [Miñ10] eingebaut werden. Der bisherige SCT wird durch drei Lagen mit einer Streifenlänge von 2.4 cm ersetzt. Die zugehörigen *Staves* sollen eine Länge von 1 m bei einem Abstand vom Wechselwirkungspunkt von 20 bis 50 cm haben [H⁺07]. Jeweils 2 dieser *Staves* werden zu einer 2 m langen Detektorfläche zusammengebaut. Ab einem Abstand von 50 cm ist der Einsatz von 2 m langen *Staves* geplant, von denen jeweils 2 zu einer 4 m lange Fläche zusammengesetzt werden. Für den Pixelbereich sind vier Lagen von Pixeldetektoren vorgesehen [Miñ10].

Die Konstruktion der Endkappen ist aufwendiger, da diese eine runde Form haben, funktioniert aber nach dem gleichen Prinzip wie für die *Staves*. Auch hier sollen mehrere Module zusammengefasst werden zu dem sogenannten *Petal* (Blütenblatt) (siehe Abbildung 3.10). Jede der insgesamt zehn *disks* der Endkappen besteht aus 32 *Petals*. Es gibt verschiedene Design-Vorschläge wie der Endkappenbereich aussehen kann. Einer davon sieht vier verschiedene *disks*, je nach innerem Radius, vor [Sol09], beim Utopia-Design (siehe Referenz [Fer12]) sind alle *disks* (bis auf die äußerste) gleich groß (siehe Abbildung 3.9). Beim Cartigny-Design (siehe Referenz [Els12]) hingegen werden insgesamt zwölf große und fünf kleine *disks* eingeplant um einen möglichst großen Bereich abzudecken (siehe Abbildung 3.11). Eine endgültige Entscheidung, welches Design verwendet werden soll, wurde noch nicht getroffen.

Für ein *Petal* sind sechs verschiedene Sensortypen (neun verschiedene Sensoren, 3 spiegelsymmetrische) notwendig um die gewünschte Form zu erhalten. Insgesamt wird beim inneren Detektor eine Fläche von etwa 200 m² mit Halbleiterdetektoren (Pixel und SCT) überdeckt, im Vergleich zur aktuellen von 61.7 m².

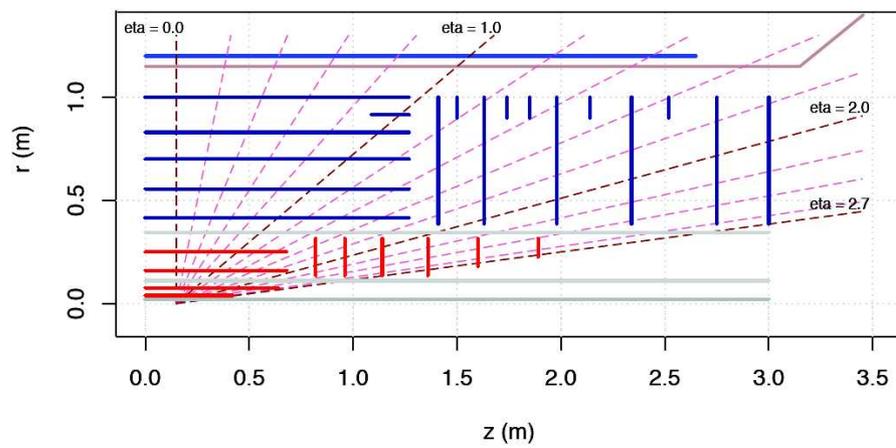


Abbildung 3.11.: Cartigny Design für das ATLAS-Upgrade; rot der Pixel Bereich und blau der SCT Bereich [Els12].

4. Das HSIO-Auslesesystem

Um die im Rahmen dieser Arbeit gebauten Module zu untersuchen, wird ein System benötigt, welches die Auslesechips testet, um die Funktion zu überprüfen, sie zu kalibrieren und das Rauschen zu bestimmen. Für die aktuell verwendeten Module im ATLAS-Detektor gibt es dazu das SCTDAQ¹-System. Am SLAC² wurde dieses weiterentwickelt zu dem in dieser Arbeit verwendeten HSIO³-Auslesesystem.

In diesem Kapitel wird zuerst der Aufbau des HSIO-Auslesesystems für den Test von Hybriden und Modulen erläutert. Anschließend wird die Funktionsweise eines Auslesechips dargestellt. Im Anschluss werden die Testmöglichkeiten des HSIO-Auslesesystems beschrieben.

4.1. Aufbau des HSIO-Auslesesystems

Das Herzstück des neuen binären Auslesesystems HSIO ist ein programmierbarer Virtex-4 FPGA⁴ [Vir]. Neben der Hauptplatine wird noch ein *Interface-Board* benötigt, welches die Schnittstellen für die Testobjekte zur Verfügung stellt. In Abbildung 4.1 ist das gesamte Auslesesystem dargestellt. Für die ROOT-basierte Datenanalyse mit einer graphischen Benutzeroberfläche auf einem Computer wird die Verbindung zum *HSIO-Board* über ein Netzkabel hergestellt. Um die Ergebnisse aller Kanäle der Auslesechips in der Benutzeroberfläche darzustellen werden jeweils 10 der insgesamt 20 Auslesechips eines Hybrids zusammen in einem sogenannten *Stream* dargestellt, so dass für ein Module mit zwei Hybriden vier *Streams* angezeigt werden.

Abbildung 4.2 zeigt den Messaufbau mit dem HSIO-Auslesesystem, verschiedenen Spannungsquellen (Sensorhochspannung, *HSIO-Board*, Hybridspannung und *LVDS Buffer Board*⁵), einem Digitaloszilloskop und einem Testobjekt (hier für Modultests). Zusätzlich wird bei allen Tests Vakuum benötigt, welches von einer Vakuumpumpe geliefert wird (zu sehen in Abbildung 4.3), neben der sich auch ein Kühlaggregat für das Kühlen von Modulen bis zu Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt befindet.

Abbildung 4.4 zeigt ein mit dem HSIO-Auslesesystem verbundenes Hybrid. Während der Tests wird das Hybrid durch Vakuum angesaugt, damit es sich aufgrund der Hitzeentwicklung der Auslesechips nicht verbiegt. Ein Lüfter sorgt für zusätzliche Kühlung.

¹SCT Data Acquisition: SCT Datenerfassung

²Stanford Linear Accelerator Center, USA

³High Speed Input/Output

⁴Field Programmable Gate Array: (Anwendungs-)Feld programmierbare (Logik-)Gatter-Anordnung

⁵Wird für das Testen von Modulen benötigt, Details siehe Referenz [Gre12]

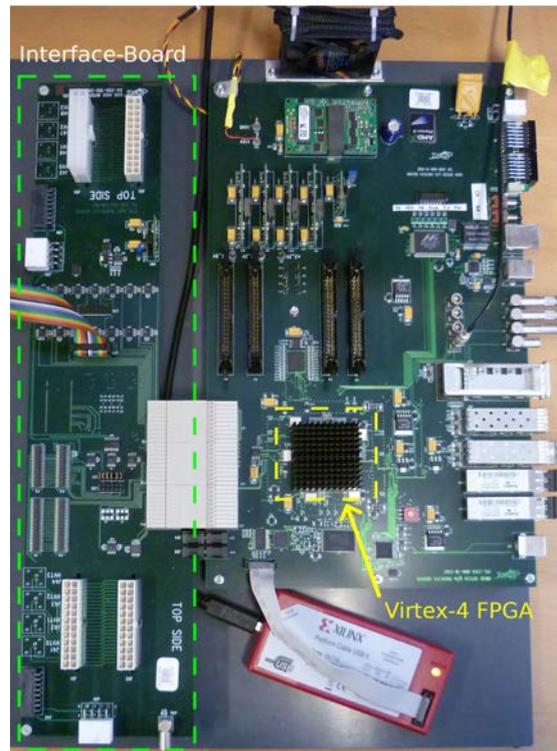


Abbildung 4.1.: Bild des HSIO-Auslesesystems: rechts *HSIO-Board* mit Virtex-4 FPGA unter dem Passiv-Kühler, links das *Interface-Board* mit angeschlossenem Flachbandkabel zum Testobjekt.

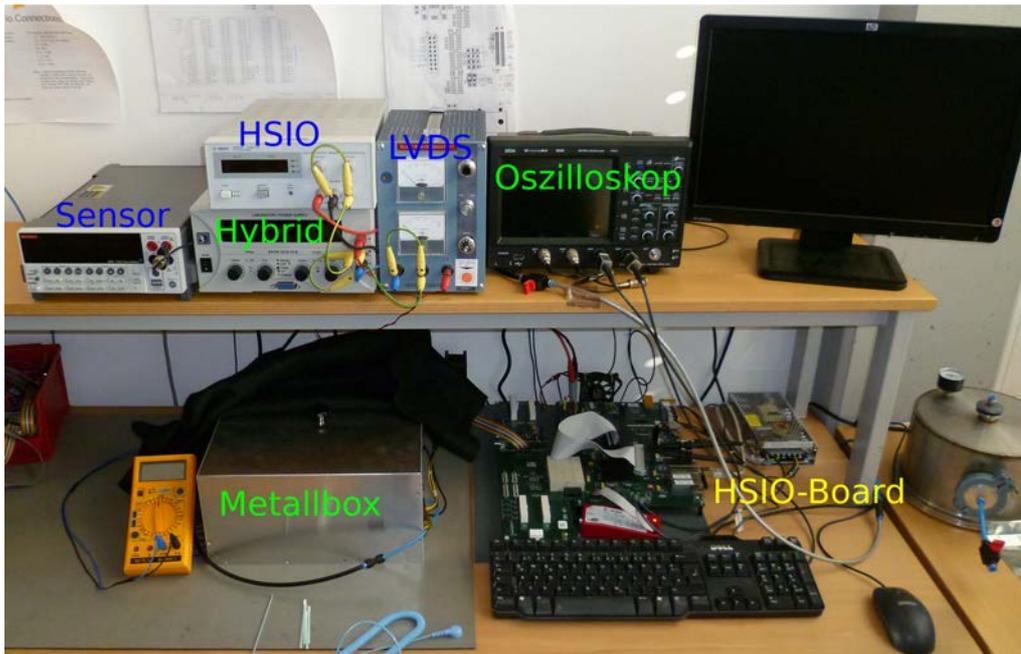


Abbildung 4.2.: HSIO-Auslesesystem: Auf der Ablage befinden sich mehrere Spannungsquellen für die Hochspannung der Sensoren (Keithley 2410), für das HSIO-Auslesesystem (Agilent E3615A), für die Spannungsversorgung der Hybride (EA-PS 3016-10 B) und für das *LVDS Buffer Board* (Coutant LA 100.2) sowie ein Digitaloszilloskop (LeCroy WwaveJet 354A). Darunter befindet sich eine Metallbox für das Testen von Modulen und rechts daneben das *HSIO-Board*.



Abbildung 4.3.: HSIO-Auslesesystem: Ein Kühlaggregat (Julabo FP 50) für die Kühlung von Modulen (links) und die Vakuumpumpe (EDWARDS 5 Vacuum Pump) zum Fixieren der Testobjekte (rechts).

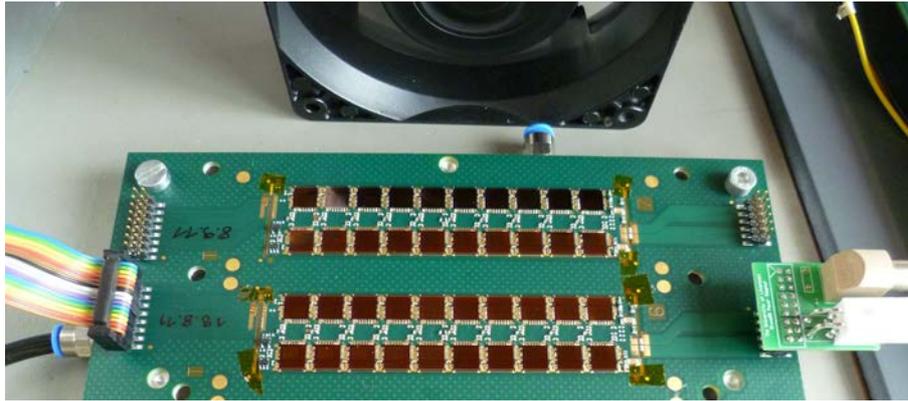


Abbildung 4.4.: Ein an das HSIO-Auslesesystem angeschlossenes Hybrid; links: Verbindungskabel zum *HSIO-Board* und Vakuum; oben: Lüfter zur Kühlung; rechts: Spannungsversorgung.

Zum Testen von Modulen müssen zwei Voraussetzungen erfüllt werden: Erstens darf kein Licht auf die Sensoroberfläche gelangen, da ansonsten Ladungen im Silizium erzeugt werden, die die Messung verfälschen. Zweitens muss das Modul gekühlt werden, da sich das Hybrid während der Tests stark erhitzt und der Leckstrom im Sensor temperaturabhängig ist. Abbildung 4.5 zeigt die dafür konstruierte Testbox, die in Freiburg gebaut wurde. In der Mitte befindet sich ein mit einem Testrahmen verbundenes Modul auf der (nicht sichtbaren) *Module Testing Plate*, in der hauseigenen Werkstatt hergestellt wurde. An diese Platte werden oben zwei Schläuche für die Kühlung angeschlossen, durch die Frostschutzmittel mittels des Kühlaggregates gepumpt wird. Um das Modul flach auf der Testplatte zu halten und Verformungen durch Betrieb der Hybride zu vermeiden, wird an die Platte rechts Vakuum angeschlossen. Da auf bis zu 8°C gekühlt wird, besteht die Gefahr, dass sich Kondenswasser auf dem Modul bildet. Um dieses zu vermeiden, wird die gesamte Testbox durch einen Anschluss (oben rechts in Abbildung 4.5) mit Stickstoff geflutet. Am Testrahmen befinden sich zwei Anschlüsse: Unten rechts für die Spannungsversorgung (sowohl der Hybride als auch des Sensors) und oben links für die Datenauslese. In der Abbildung ist des Weiteren das *LVDS Buffer Board* zu sehen, welches zwischen Flachbandkabel und Testrahmen gesteckt wird und für das Testen von Modulen notwendig ist. Das *Board* stellt Treiber für Signale an das *BCC-Board* zur Verfügung und verarbeitet das Signal der Hybride (näheres siehe [Gre12]).

Die Hochspannungsversorgung des Sensors erfolgt zusammen mit der Spannungsversorgung der Hybride über den Rahmen. Ein Pol der Spannungsquelle muss mit dem *bias ring* des Sensors verbunden werden. Dies geschieht über eine Drahtbondverbindung zwischen Testrahmen und Hybrid. Der andere Pol der Spannungsquelle muss mit der Rückseite des Sensors verbunden werden, um den Stromkreis zu schließen. Vorher wird die Spannung allerdings noch mittels eines Kondensators auf dem Hybrid gefiltert. Dazu wird eine Drahtbondverbindung vom Testrahmen auf das linke Hybrid hergestellt (rechte Hybridseite) und anschließend wird eine weitere Drahtbondverbindung zurück auf den Rahmen (linke Hybridseite) hergestellt um den Rückseitenkontakt zu ermöglichen. Der

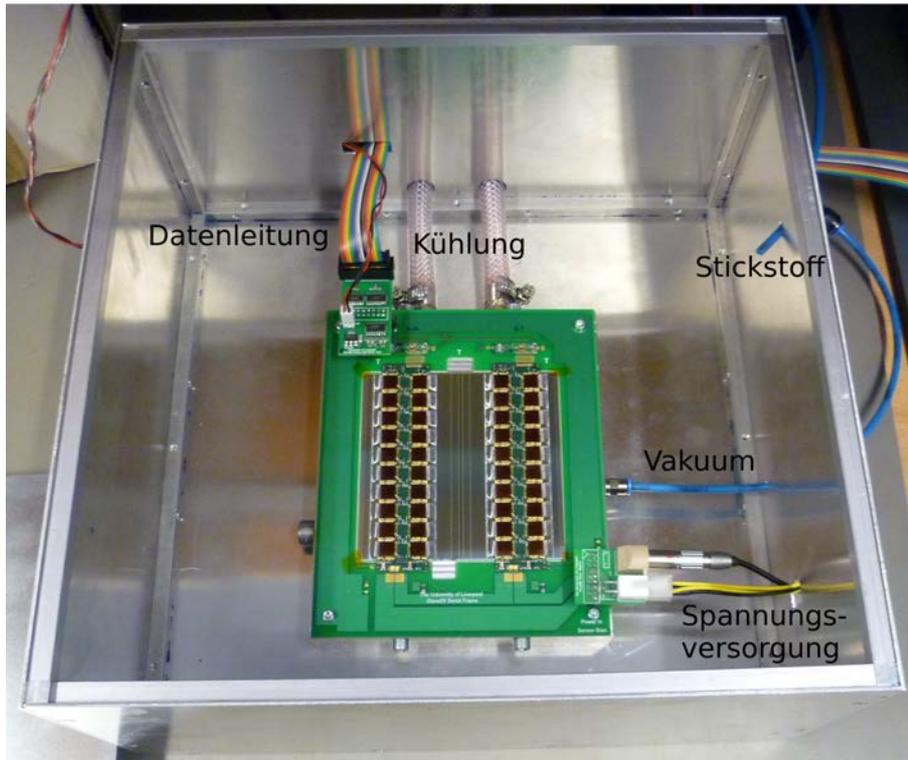


Abbildung 4.5.: Modultestbox: oben links Verbindung zum HSIO-Auslesesystem, oben Mitte angeschlossene Kühlung, oben rechts Stickstoffversorgung, rechts Mitte Vakuuanschluss, rechts unten Spannungsversorgung.

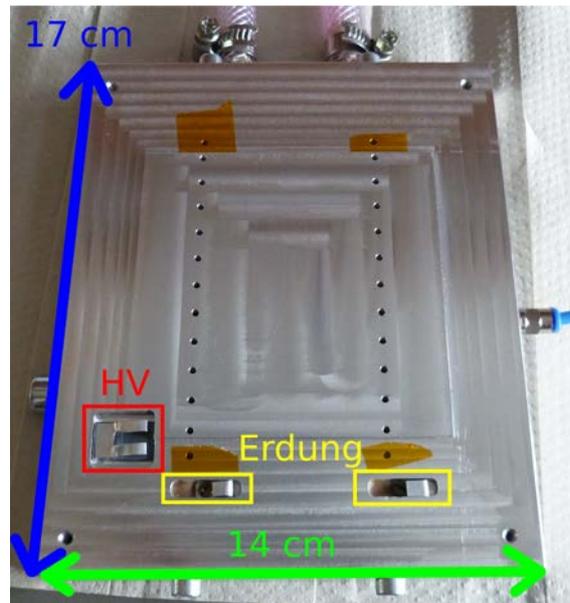


Abbildung 4.6.: *Module Testing Plate* mit Federn für die Hochspannung (HV) des Sensors und die Erdung der Hybride. Am Testrahmen befinden sich an den entsprechenden Stellen Metallflächen für die elektrische Verbindung.

Strom wird durch eine Durchführung auf die Rückseite des Rahmens geleitet, wo eine leitende Feder den Kontakt zur Hybridrückseite herstellt. Da die *Module Testing Plate* (siehe Abbildung 4.6) über zwei andere Federn geerdet ist, aber eine Hochspannung von einigen hundert Volt auf die Sensorrückseite geführt wird, ist die Isolation sehr wichtig: Die Rückseite des Sensors sowie die Feder für die Hochspannungsversorgung müssen elektrisch von der Testplatte isoliert sein. Dies wird dadurch erreicht, dass die gefährdeten Stellen, an denen Kurzschlüsse zwischen Hochspannung und Masse entstehen könnten, mit Kapton-Klebeband isoliert werden. Damit das Vakuum der Testplatte besser verteilt wird, befindet sich zwischen Sensor und Platte noch eine Schicht Reinraumpapier, die ebenfalls isolierend wirkt.

Um die Risiken eines Kurzschlusses zu minimieren, wurde am LBNL⁶ eine neue Version dieser Testplatte entwickelt. Diese besteht aus zwei Teilen, die sehr gut voneinander isoliert sind: Die Platte, auf der der Sensor aufliegt und dem restlichen Bauteil (siehe Abbildung 4.7). Die Verbindung zwischen Testrahmen und Testplatte erfolgt nicht mehr über Federn, sondern über leitende Schrauben, wodurch eine besser Kontaktierung gewährleistet werden soll.

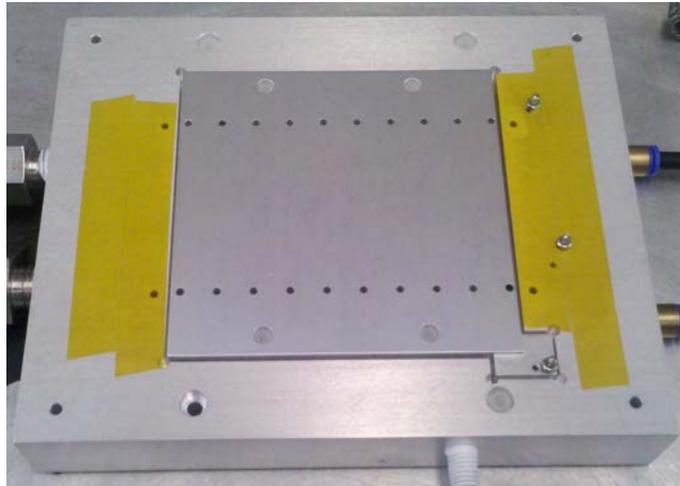


Abbildung 4.7.: LBNL Version der *Module Testing Plate* [Mod12].

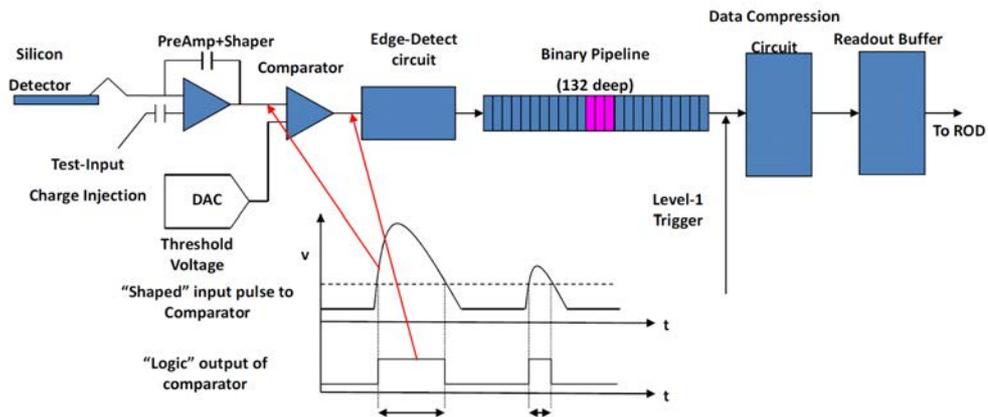


Abbildung 4.8.: Aufbau des ABCD3T Chips (momentan im SCT verwendet) [Bar11].

4.2. Funktion eines Auslesechips

Anhand von Abbildung 4.8 soll die Wirkungsweise eines Auslesechips für einen Kanal (einen Streifen) erklärt werden, um die Testmethoden des HSIO-Auslesesystems zu verdeutlichen. Der ABCD3T Chip wird im momentanen ATLAS-Detektor verwendet, während für das Upgrade bereits neue Chips entwickelt wurden (ABCN). Ganz links in der Abbildung ist der Siliziumdetektor angedeutet, von dem ein Streifen mit der dazugehörigen Elektronik verbunden ist. Ein geladenes Teilchen, welches den Detektor passiert, deponiert Ladung (siehe Abschnitt 2.2). Diese Ladung wird als Signal als erstes vom Vorverstärker und Signalformer (*PreAmp+Shaper*) verarbeitet. Dabei wird aus einem beliebigen Signal, dessen Fläche ein Maß für die Ladung ist, eine einheitliche Signalform, dessen Amplitude proportional zur Ladung ist, erzeugt. Hier besteht außerdem die Möglichkeit, über den Test Eingang (*Test-Input*) eine Ladung zu injizieren (*Charge Injection*). Das nächste Bauteil ist der Komparator. Seine Aufgabe ist es, das Signal mit einem vom DAC (*Digital to Analog Converter*) vorgegebenen Schwellenwert (*Threshold*) zu vergleichen und nur bei einem Wert, der über dieser Schwelle liegt, ein logisches Signal zu erzeugen. In der Graphik darunter ist dies zu erkennen: Die gestrichelte Linie zeigt die Schwelle an. Sofern das Eingangssignal über der Schwelle liegt, wird ein Ausgangssignal erzeugt. Der *Edge-Detector-circuit* sorgt dafür, dass das Signal des Komparators mit dem *Clock*-Signal (vom HSIO-Auslesesystem erzeugtes Taktsignal) synchronisiert wird, das heißt, dass eine Taktgeschwindigkeit vorgegeben wird. In der *Pipeline* werden diese digitalen Signale zwischengespeichert. Dazu werden FIFO⁷-Elemente verwendet. Erreicht ein Level 1 Trigger die *Pipeline* werden bis zu drei benachbarte Ereignisse ausgelesen und weiterverarbeitet.

Bei jedem der vom HSIO-Auslesesystem durchgeführten Tests wird eine vorher festgelegte Anzahl an Triggern (typischerweise 100) gesendet. Die empfangenen Werte, die über der Schwelle liegen werden im Verhältnis zur gesamten Anzahl der Trigger angezeigt (*Occupancy*). Anschließend wird ein Parameter geändert und der Test erneut durchgeführt. Nachfolgend werden die verschiedenen mit dem HSIO-Testsystem durchgeführten Tests dargelegt.

Für eine detailliertere Beschreibung der Voreinstellungen des HSIO-Auslesesystems und der Testmethoden sei auf die TWiki-Seite [Bar12] und die Anleitung [Won12] sowie das Handbuch [Nel10] und die Internetseite [War12] verwiesen.

4.3. Testmethoden des HSIO-Auslesesystems

4.3.1. *Strobe Delay Test*

Der *Strobe Delay Test* (englisch für Abtastverzögerungs-Test) wird als erstes durchgeführt, um die Verzögerung (*delay*) der einzelnen ASICs beim eigentlichen Test zu ermitteln. Dazu wird eine Testladung von 4fC injiziert und mit einer Schwelle (*threshold*)

⁶Lawrence Berkeley National Laboratory, USA

⁷First In First Out

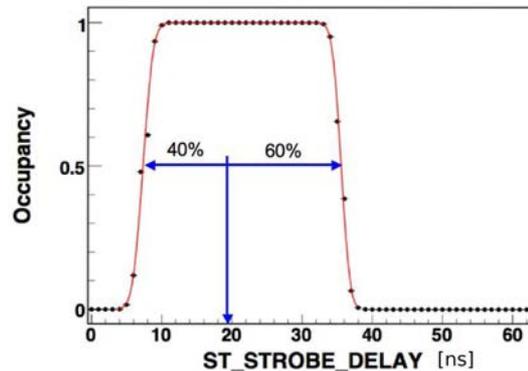


Abbildung 4.9.: Ergebnis eines *Strobe Delay Tests* mit dem Arbeitspunkt aus Referenz [Dem07]; x-Achse: Verzögerung; y-Achse: Effizienz.

von 2 fC ausgelesen. Bei diesem Test wird der Zeitpunkt der Auslese variiert. Wenn die gesamte Ladung injiziert wurde und der Auslesezeitpunkt gut gewählt wird, sollte eine einhundertprozentige Effizienz oder Besetzung (*Occupancy*) erreicht werden. Das bedeutet, dass jeder Kanal ein Signal liefert, welches über dem Schwellenwert liegt. Wird allerdings zu früh ausgelesen, so ist noch nicht die gesamte Ladung injiziert. Bei zu später Auslese hingegen ist ein Teil der Ladung schon wieder zerfallen und die Effizienz sinkt. In Abbildung 4.9 ist ein typisches Ergebnis für diesen Test dargestellt. Als Arbeitspunkt für die Verzögerung wird der Wert gewählt, der sich bei 40% der Zeit zwischen ansteigender und abfallender Flanke bei einer *Occupancy* von 0.5 befindet. Es ist wichtig, dass bei den späteren Tests die gewünschte Ladung auch vollständig in den Auslesekänen injiziert wurde und noch nicht zerfallen ist.

4.3.2. *Threshold Scan*

Einige Tests der Detektoren mit Hilfe des HSIO-Auslesesystems basieren auf einem *Threshold Scan* (Abtastung der Schwellenwert). Hierbei wird eine feste Testladung in die Kanäle der Auslesehchips injiziert. Die Messschwelle wird variiert und dadurch die Signalhöhe vermessen. Das Ergebnis eines solchen *Scans* ist in Abbildung 4.10 dargestellt, während in Abbildung 4.11 die Verteilung der injizierten Testladungen zu sehen ist.

Naiv könnte davon ausgegangen werden, dass genau die gewünschte Testladung injiziert wird (hier 1.21 fC, blaue Linie in Graphik 4.11). Das Ausgangssignal des *PreAmp* + *Shaper* hat dadurch immer die gleiche ladungsabhängige Form. Beim *Threshold Scan* wird die Messschwelle für jeden Messschritt variiert, angefangen bei 0 mV, wobei jede Messung mehrfach durchgeführt wird (hier: 100 mal). Solange die Schwelle kleiner als die Amplitude des Ausgangssignals ist, wird vom Komparator ein logisches 1-Signal erzeugt, liegt der Schwellenwert über dem Amplitudenwert folgt eine logische 0. Das Ergebnis eines solchen Schwellenwert-*Scans* entspricht einer Rechteckkurve wie sie in der Abbildung 4.10 als blau gestrichelte Linie dargestellt ist. Doch dieser naive Ansatz entspricht nicht den Beobachtungen. Die Ladung ist aufgrund des Rauschens gaußförmig um

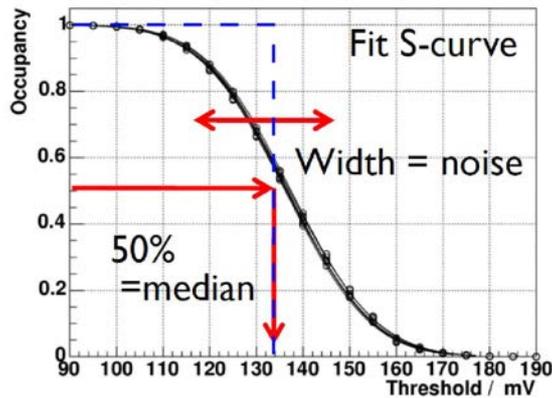


Abbildung 4.10.: *Threshold Scan* mit Mittelwert nach Referenz [Bar10]; blau gestrichelt ist der ideale Verlauf ohne Rauschen dargestellt.

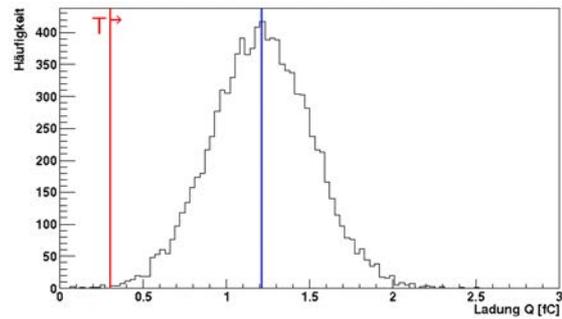


Abbildung 4.11.: Simulierte Ladungsverteilung um den Wert 1.21 fC; blaue Linie: 1.21 fC; rote Linie: Messschwelle T.

den gewünschten Testwert verteilt. In Abbildung 4.11 ist ersichtlich dass von 10 000 gaußförmig zufallsverteilten simulierten Testladungen weniger als 450 genau den gewünschten Wert von 1.21 fC haben. Für einen Messwert mit 100 Einzelmessungen werden diejenigen der 100 Wiederholungen gezählt, bei denen die jeweilige Testladung über dem Schwellenwert liegt und daraus die *Occupancy* bestimmt (Anzahl positiver Tests/Gesamtzahl der Tests). Dies entspricht der Integration über alle Werte der Ladungsverteilung ab einem festen Schwellenwert T (durch rote Linie in Abbildung 4.11 dargestellt). Die Integration ergibt eine Gaußsche Fehlerkurve (S-Kurve) wie sie in Abbildung 4.10 dargestellt ist. Die Breite dieser Kurve entspricht dem Rauschen des getesteten Kanals.

Ein besonderer Wert ist diejenige Messschwelle, bei der eine Belegung von 50% (0.5 *Occupancy*) erreicht wird: der Mittelwert (V_{t50}) der Gaußschen Ladungsverteilung. Aus Abbildung 4.10 kann ein Wert von 134 mV abgelesen werden. Mit einer für die Auslesechips ABCN25 typischen Verstärkung (*Gain*) von 110 mV/fC ergibt sich eine injizierte Ladung von 1.21 fC, die im oben angeführten Beispiel verwendet wird.

4.3.3. *Three Point Gain Test*

Bei diesem Test handelt es sich vom Prinzip her um Schwellenwertabtastungen, nur dass hier nicht nur eine Testladung verwendet wird, sondern drei verschiedene (beispielsweise 0.5 fC, 1.0 fC und 1.5 fC). Dieser Test dient dazu, den Zusammenhang zwischen Schwellenwert in Volt und Ladung in Coulomb herzustellen. Dazu wird für jede Testladung der Schwellenwert mit einer Belegung von 50% verwendet (V_{t50}), um mittels einer linearen Anpassung an den Werten aus der Steigung die Verstärkung zu bestimmen. In Abbildung 4.12 sind links drei *Threshold Scans* mit den jeweiligen Schwellenwerten eingezeichnet und rechts ist der lineare Fit von drei Messpunkten abgebildet. Durch eine Anpassung der Gaußschen Fehlerfunktion an die S-Kurve ist es außerdem möglich das Rauschen zu bestimmen. Mit Hilfe des *Gains* kann dieses auch in Elektronen umgerechnet werden.

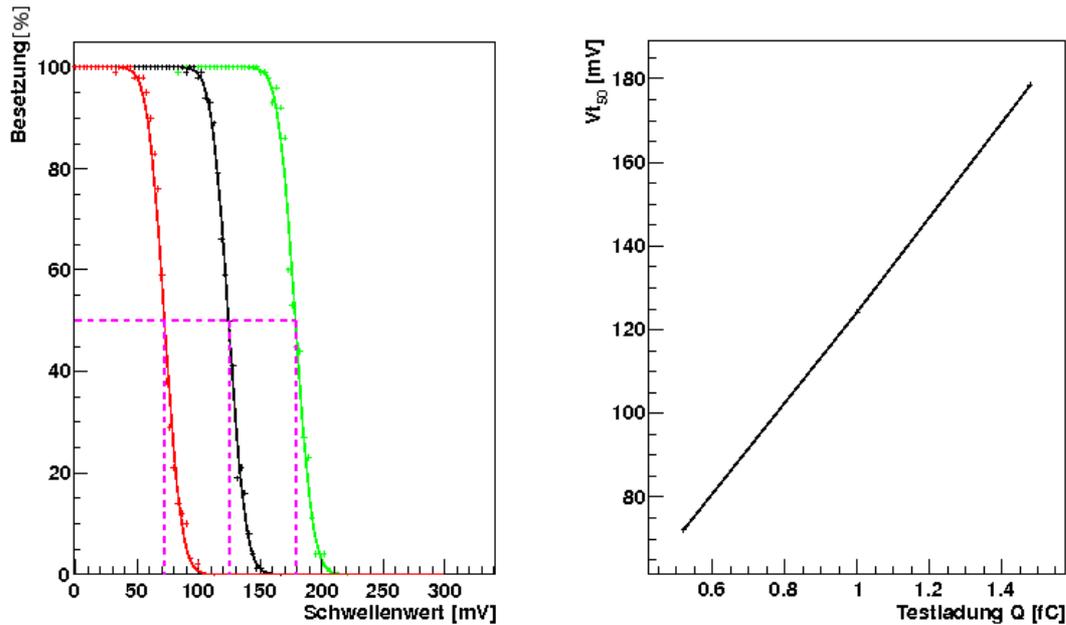


Abbildung 4.12.: Links: *Three Point Gain Test* Resultat mit drei S-Kurven und Bestimmung der V_{t50} -Werte; Rechts: Bestimmung der Verstärkung durch Anpassung einer Ausgleichsgeraden an Graphik der V_{t50} -Werte als Funktion der injizierten Testladung.

4.3.4. Response Curve

Auch die *Response Curve* beruht auf den gleichen Verfahren wie der *Three Point Gain Test*. Der Unterschied ist, dass hierbei nicht mehr nur drei Testladungen verwendet werden sondern zehn, welche über den gesamten zur Verfügung stehenden Bereich von 0 fC bis 8 fC verteilt sind. Das Ziel ist auch hier, aus der Steigung der Ausgleichsgeraden der V_{t50} -Werte als Funktion der Ladung einen Umrechnungsfaktor zu erhalten. Es ist nur zu beachten, dass als Ansatz keine lineare Funktion mehr verwendet wird (was für kleine Ladungen durchaus seine Berechtigung hat) sondern ein Polynom 2. Grades.

4.3.5. Noise Occupancy Test

Bei diesem Test wird keine Testladung injiziert. Das bedeutet, dass das erwartete Signal beträgt Null und bei der Messung erhält man nur das Rauschen als Ergebnis. Mit dem Ansatz eines gaußförmigen Signalverlaufs erhält man:

$$\text{Occ} \propto \exp\left(-\frac{T^2}{\sigma^2}\right),$$

wobei Occ die Besetzung/Belegung (*Occupancy*) bezeichnet, T den Schwellenwert und σ die Standardabweichung der Gaußverteilung welche dem Rauschen entspricht. Durch Auftragen der logarithmischen Belegung ($\ln(\text{Occ})$) als Funktion der quadratischen Schwellenwertes (T^2) erhält man aus der Steigung der linearen Ausgleichsgeraden das Rauschen.

4.3.6. *Trim Range*

Um das Ansprechverhalten bei injizierten Ladungen der ABCN-Chips zu kalibrieren, wird für jeden ASIC eines Hybrids aus dem *Strobe Delay Test* ein globaler Arbeitspunkt festgelegt. Da sich dieser aus dem Mittelwert für einen *Scan* aller Kanäle eines Chips ergibt, ist dieser nicht für alle Kanäle gleich gut. Daher gibt es noch für jeden Kanal einen kleinen Speicher, den sogenannten TrimDAC, welcher kleine Variationen des Arbeitspunktes erlaubt. Beim *Trim Range Test* werden alle möglichen Einstellungen des TrimDAC durchprobiert und am Ende die beste für jeden Kanal verwendet. Durch diese Kalibration werden nachfolgende Testresultate für das gesamte Hybrid in der Regel genauer, da die Eigenheiten jedes einzelnen Kanals berücksichtigt werden.

5. Bau von *Barrel*-Modulen

Für das momentan laufende ATLAS-Experiment hat sich die Gruppe von Professor Jakobs in Freiburg am Bau der Endkappen des SCT aktiv beteiligt. Auch für die Aufrüstung des SCT soll dies wieder der Fall sein. Um ein *Petal* zu bauen, müssen allerdings erst einmal die notwendigen Arbeitsschritte aus dem *Stave*-Konzepts entwickelt und angepasst werden. Die Universität Liverpool hat die Vorreiterrolle im Bereich der *Barrel*-Module übernommen und für die Modulherstellung Werkzeuge und Arbeitstechniken entwickelt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde in Freiburg der Modulbau nach diesen Methoden etabliert und gegebenenfalls angepasst.

Um mit den Werkzeugen Erfahrung zu sammeln, wurden diese nach Vorgaben des Autors in der hauseigenen mechanischen Werkstatt des Physikalischen Instituts hergestellt. Lediglich die *Chip Tray* Schablone wurden von der Universität Liverpool hergestellt, während für die Klebemasken (*stencil*) die Firma Becktronic [Bec12] in Deutschland beauftragt wurde. Alle Baupläne sind auf der TWiki-Seite [Mod12] für die Kollaboration veröffentlicht.

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Bau von *Barrel*-Modulen. Zuerst wird der Aufbau eines solchen Moduls erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse der Klebetests präsentiert, die durchgeführt wurden, um den Modulbau zu simulieren. Vor der Verwendung von funktionsfähigen Komponenten werden zuerst Tests mit defekten Auslesechips und mechanischen Sensoren durchgeführt, bei denen auch das Bonden getestet wird. Im letzten Teil des Kapitels werden die für diese Arbeit gebauten Module und deren Komponenten präsentiert.

5.1. Komponenten eines Moduls

Ein Modul besteht aus zwei Komponenten, dem Sensor und dem Hybrid. Für das *Barrel-Upgrade* werden zwei verschiedenen Sensortypen verwendet und zwar mit kurzen Streifen und mit langen Streifen. Für die ersten Tests stehen nur Sensoren mit kurzen Streifen zur Verfügung.

Es handelt sich dabei um Sensoren mit der Bezeichnung ATLAS07, die von der Firma HPK¹ in Japan [Ham12] hergestellt wurden. Jeder ist quadratisch mit einer Kantenlänge von 97.5 mm. Die Sensorstreifen sind in vier Segmente unterteilt: Zwei benachbarte Segmente haben Streifen, die parallel zur Sensorkante verlaufen, während die Streifen der anderen beiden nebeneinander liegenden Segmente einen kleinen Winkel zur Kante aufweisen.

¹Hamamatsu Photonics K.K.

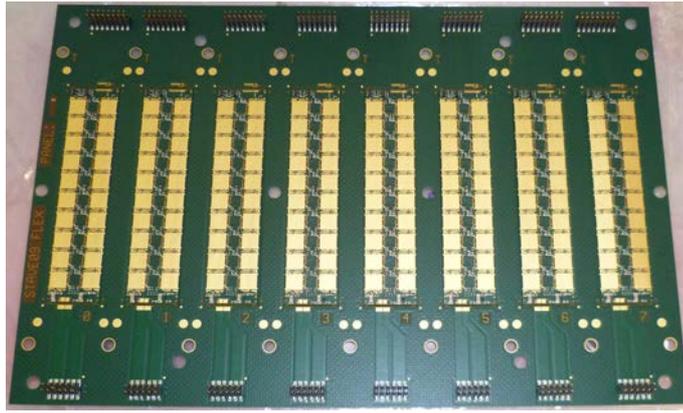


Abbildung 5.1.: *Panel* mit 8 Hybriden, die bereits mit SMD-Komponenten bestückt sind.

Für das Auslesen der Sensoren sind die Hybride zuständig. Da es bei den Testsensoren vier Segmente mit jeweils 1280 Streifen gibt, werden zwei Hybride benötigt. Diese werden jeweils mittig an der Grenze zweier Segmente angebracht, so dass beide Segmente von einem Hybrid ausgelesen werden können. Die Hybride mit den äußeren Abmessungen von $(24 \times 108) \text{ mm}^2$ und einer Höhe von $310 \mu\text{m}$ bestehen aus einem PCB²-Material in dem sich mehrere Lagen Kupfer-Leitungsbahnen befinden. Jeweils acht Hybride werden auf einem *Panel* zusammengefasst und so vom Hersteller Stevenage Circuits (England) [Ste12] nach dem Design der Universität Liverpool (siehe Referenz [Gre12]) gefertigt. Anschließend werden die Hybride mit SMD³-Komponenten (Widerstände, Kondensatoren) von der Firma Hawk Electronics Ltd (England) [Haw12] bestückt. In Abbildung 5.1 ist ein solches *Panel* dargestellt.

Bei den verwendeten Auslesechips handelt es sich um ABCN25 ASICs [DAD⁺09] in 250 nm CMOS-Technologie mit jeweils 128 Auslesekanälen und den äußeren Abmessungen $(7.5 \times 7.7) \text{ mm}^2$, die von IBM⁴ [IBM12] hergestellt werden. Der Zusammenbau der Komponenten zu einem vollständigen, in dieser Arbeit verwendeten Module erfolgt ausschließlich in Freiburg.

5.2. Klebetests

5.2.1. Klebetests mit Plexiglas

Erste Klebetests wurden durchgeführt, um das Verbinden des Hybrids mit dem Sensor zu simulieren. Beide Objekte wurden aus passgenauen Plexiglasstücken nachgebildet. Als Klebstoff kam Araldit 2011 [Ara12], ein Zweikomponentenkleber auf Epoxidharzbasis, zum Einsatz. Um die resultierende Verteilung des durchsichtigen Klebstoffes besser zu

²*Printed Circuit Board*: Leiterplatte

³*Surface Mounted Device*: hier Passive Bauteile wie Widerstände oder Kondensatoren

⁴International Business Machines Corporation



Abbildung 5.2.: Klebetest mit Plexiglasattrappen und eingefärbtem Araldit.

erkennen, wurde dieser zusätzlich mit Graphitstaub versetzt. Die von der Universität Liverpool entwickelte Methode sieht vor, den Klebstoff mittels Rakeltechnik auf den Sensor aufzutragen. Dazu wird eine Maske mit Aussparungen an den Stellen, an denen sich später Klebstoff befinden soll, auf die Streifen-Oberfläche des Sensors gelegt. Anschließend wird mit einem Rakel (hier ein Stück Pappe) der Klebstoff auf der Maske verteilt. Anschließend werden Überschüsse entfernt. Durch die Dicke der Maske ist die verwendete Klebstoffmenge gut bestimmbar.

Als Rakelmaske dient eine Schablone aus Reinraumpapier mit einer Stärke von $110\ \mu\text{m}$, welches ungefähr der gewünschten Klebstoffdicke von $100\ \mu\text{m}$ entspricht. Entsprechend dem Verfahren in Liverpool wurde der Klebstoff auf der Sensorattrappe aufgebracht und anschließend die Hybridattrappe darauf platziert und mit Gewichten beschwert. In Abbildung 5.2 ist exemplarisch ein Ergebnis dieser Versuche abgebildet. Am Rand erkennt man Streifen aus Reinraumpapier, welche dafür sorgen sollten, dass der Abstand zwischen Hybrid und Sensor eingehalten wird. Bei Tests in Liverpool hat sich herausgestellt, dass das Design der Rakelschablone überarbeitet werden muss. Während bei der alten Version die äußeren Streifen eine Breite von 3 mm und der innere eine von 5 mm hatte, sind bei der neuen Version alle Streifen 3 mm breit. Abbildung 5.3 zeigt die nach diesen Vorgaben in Freiburg entwickelte neue Schablone.

Im Verlauf dieser Tests hat sich in Freiburg ergeben, dass der Klebstoff nicht auf dem Sensor aufgebracht werden sollte, sondern besser auf der Rückseite des Hybrids. Dies hat den Vorteil, dass nicht die äußerst empfindliche Sensoroberfläche mittels der Rakeltechnik mit Klebstoff bestrichen werden muss, sondern die mit Lötstoplack beschichtete Rückseite des Hybrids. Dadurch wird es außerdem möglich, eine Rakelschablone aus Metall zu verwenden, wodurch die Klebstoffmenge sehr viel genauer definiert wird.

5.2.2. Klebetests mit Glasattrappen

Die Plexiglasattrappen weisen zwar die gleiche Fläche wie die realen Bauteile auf, nicht jedoch die gleiche Höhe, wodurch sie für Klebetests mit den Werkzeugen ungeeignet sind. Daher werden Sensorattrappen aus Glas mit den exakten äußeren Maßen der tatsächlichen Detektoren für weitere Studien verwendet. Da bei der späteren Fertigung auch ASICs auf Hybride geklebt werden, finden dafür ebenfalls Glasnachbildungen Verwendung.

Bei der industriellen Herstellung sind einige Hybride angefallen, die für den Modulbau ungeeignet sind, sich aber hervorragend für Klebestudien eignen um die Positionierung der Glas-ASICs zu überprüfen. Zusätzlich werden die in der Endmontage benutzten Klebstoffe bereits bei diesen Tests verwendet, um möglichst realistische Ergebnisse zu

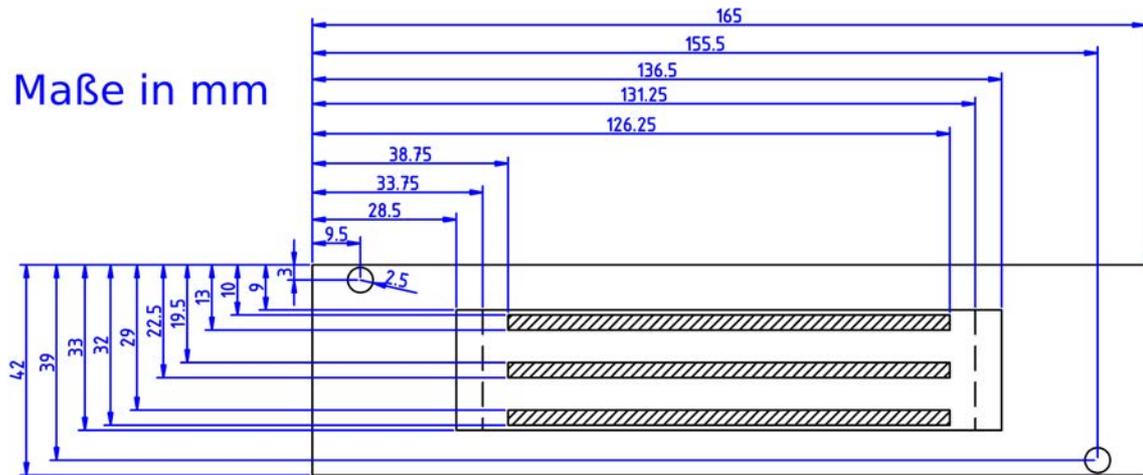


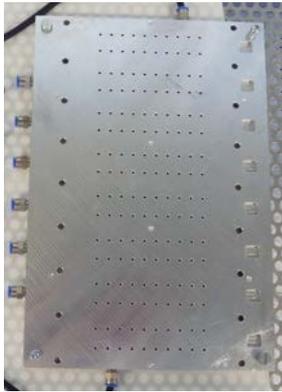
Abbildung 5.3.: Freiburger Rakelmaske Version 1. Die äußeren Umrisse des Hybrids sind aufgezeichnet; Die schraffierten Flächen werden ausgeschnitten, um hier den Klebstoff zu verteilen.

erzielen. Es handelt sich zum einen um den Zweikomponenten-Silberleitklebstoff TRADUCT [Tra02] für das Befestigen der ASICs auf den Hybriden und zum anderen um den Zweikomponenten-Epoxidharzklebstoff Epolite [Epo11] für das Anbringen der bestückten Hybride auf dem Sensor.

Um die Glas-ASICs zu kleben werden diese im *Chip Tray* aus ESD⁵ sicherem Kunststoff platziert (Abbildung 5.6). Mit dem *Hybrid Pickup Tool* (Abbildung 5.4 c) werden die Glas-ASICs angesaugt und das *Tool* wird mit den ASICs nach oben auf dem *Hybrid Pickup Tool Holder* (Abbildung 5.4 f) platziert. Danach wird die Rakelschablone mit den runden Löchern (*ASIC Glue Stencil*, Abbildung 5.4 e) und einer Dicke von 130 μm darauf platziert. Die genaue Ausrichtung erfolgt anhand der Positions-Pins im *Pickup Tool* (siehe Abbildung 5.7). Mittels eines Rakels aus Pappe, verstärkt mit Kapton, wird der Klebstoff gleichmäßig verteilt und überschüssiger Silberleitkleber abgestreift (siehe Abbildung 5.8). Nach Abheben der Rakelmaske sollte der Kleber in gleichmäßigen runden Punkten wie in Abbildung 5.9 auf den ASICs aufgetragen sein. Als nächstes werden die ASICs auf ein Hybrid geklebt. Das Hybrid im *Panel* befindet sich auf dem *8 Way Vacuum Jig* (Abbildung 5.4 a), mit welchem jedes Hybrid einzeln durch Vakuum festgesaugt werden kann unter Verwendung des *8 Way Vacuum Manifold* (Abbildung 5.4 b). Auch hier erfolgt die genaue Positionierung durch die Stifte am *Pickup Tool*. Abschließend wird das *Pickup Tool* noch mit einem Messinggewicht beschwert und der Klebstoff kann mehrere Stunden bei angeschlossenem Vakuum aushärten (Abbildung 5.10). Es zeigt sich ein Ergebnis wie in Abbildung 5.11: Die Klebstoffpunkte wurden etwas komprimiert, es tritt aber kein Silberleitkleber an den ASIC-Kanten hervor.

Die Einstellung dieser Klebehöhe ist ein wichtiges Element des Modulbaus. Sie muss so gewählt werden, dass die Klebepunkte komprimiert werden, wodurch sichergestellt

⁵*Electro-Static Discharge*: Elektrostatische Entladung



a) 8 Way Vacuum Jig



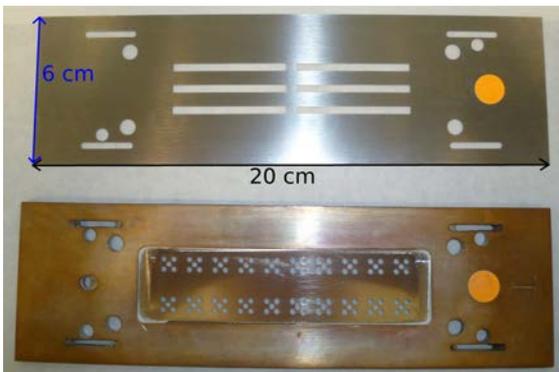
b) 8 Way Vacuum Manifold



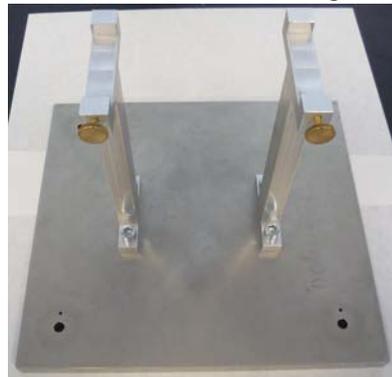
c) Hybrid Pickup Tool



d) Chip Tray; Oben: mit Laser gefertigte Schablone auf Messingblock; Unten: aus ESD sicherem Kunststoff gefräst

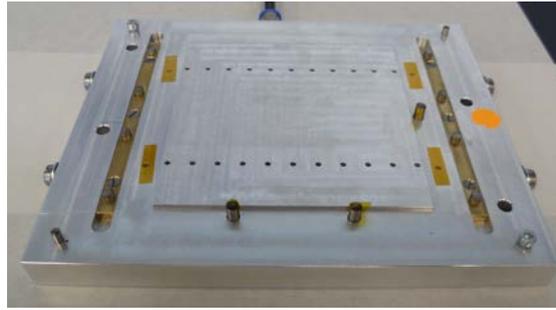


e) Oben: Hybrid Glue Stencil;
Unten: ASIC Glue Stencil mit Rahmen



f) Hybrid Pickup Tool Holder; Entwurf von DESY

Abbildung 5.4.: Bilder der Werkzeuge zum Bau von Barrel-Modulen (Teil 1).



a) *Module Assembly Plate*

Abbildung 5.5.: Bilder der Werkzeuge zum Bau von *Barrel*-Modulen (Teil 2).

wird dass die ASICs auf dem Hybrid festkleben. Gleichzeitig darf kein Klebstoff am Rand austreten, da sich direkt neben den ASICs *Bondpads* befinden, die keinen elektrischen Kontakt zur Rückseite der Chips haben dürfen. Für die exakte Höheneinstellung werden vier Feingewindeschrauben (Abbildung 5.7) am *Pickup Tool* mit einer Steigung von 0.35 mm verwendet.

Der nächste Schritt besteht im Kleben des Hybrids auf den Sensor. Dazu wird das Hybrid durch Vakuum angesaugt und die Verbindung mit dem *Panel* getrennt. Anschließend kommt wieder das *Pickup Tool* zum Einsatz. Es wird auf das Hybrid gesetzt und mit Vakuum werden die ASICs angesaugt. Nach Ausschalten des Vakuums am *8 Way Vacuum Jig* kann das Hybrid mittels des *Pickup Tools* hochgehoben und auf den Halter gelegt werden.

Die gewünschte Klebstoffhöhe zwischen Sensor und Hybrid beträgt hier etwa $100\ \mu\text{m}$. Die Einstellung erfolgt wieder mittels der Feingewindeschrauben am *Pickup Tool*. Dazu wird das Hybrid ohne Klebstoff auf die *Module Assembly Plate* (Abbildung 5.5 a) gelegt. Zwischen Sensoroberfläche und Hybrid werden drei dünne Streifen Reinraumpapier (circa $100\ \mu\text{m}$ dick) wie in Abbildung 5.12 platziert. Die Schrauben werden anschließend so eingestellt, dass es gerade nicht mehr möglich ist das Reinraumpapier leicht zu bewegen, wodurch gewährleistet ist, dass das Hybrid aufliegt.

Wie beim ASIC-Kleben wird die Rakelmaske, diesmal mit Streifen und einer Stärke von $250\ \mu\text{m}$, auf das Hybrid gelegt. Da dieser Schritt von der in Liverpool entwickelten Methode abweicht, wurde vom Autor dieser Arbeit eine eigene Rakelmaske entwickelt. In Abbildung 5.13 ist ein Bild der ersten Version gezeigt. Am DESY⁶ wurde ebenfalls eine Metallrakelmaske für diese Methode entwickelt, die jedoch jeden Streifen in mehrere Segmente unterteilt. Dadurch wird die Maske gerade in der Mitte mehr stabilisiert. Diese Idee wurde aufgegriffen und bei der zweiten Version der Rakelmaske berücksichtigt: In der Mitte der Streifen wurde ein Steg eingebaut um die Rakelmaske in diesem Bereich zu versteifen (Abbildung 5.14). Um die Rakelmaske zusätzlich zu verstärken, ist es möglich einen Rahmen aus Aluminium beidseitig aufzukleben, wie dies bei der ASIC-Klebbmaske immer getan wird. Dieses Design und die Methode erfüllen alle Anforderungen für den Modulbau in den Tests. Daher wurde im Februar 2012 beschlossen, dass alle am *Stave-*

⁶Deutsches Elektronen SYnchrotron



Abbildung 5.6.: Glas ASICs auf dem *Chip Tray*.



Abbildung 5.7.: Positions-Pins und Feingewindeschrauben an *Pickup Tool*.

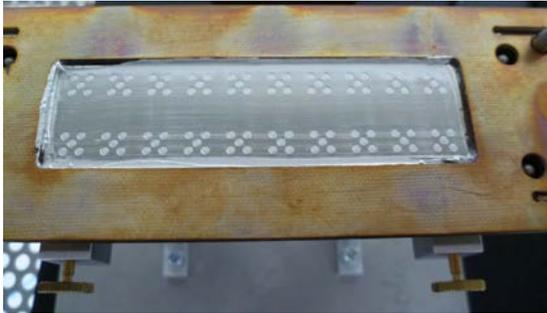


Abbildung 5.8.: Silberleitkleber wird mittels Rakeltechnik auf ASIC-Rückseite verteilt.

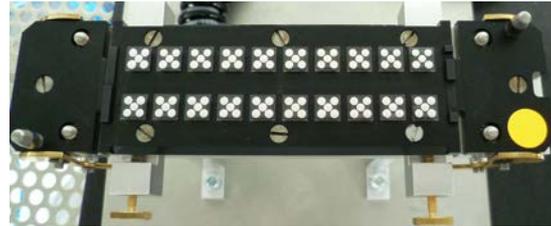


Abbildung 5.9.: Klebstoff-Punkte auf ASIC-Rückseite.



Abbildung 5.10.: ASICs werden auf ein Hybrid geklebt.

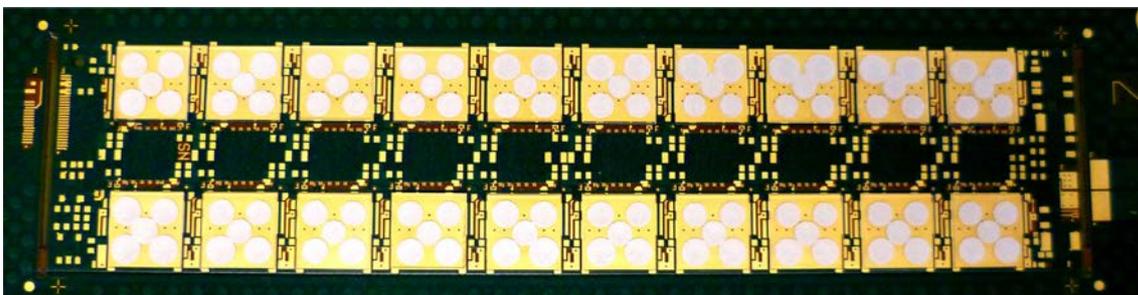


Abbildung 5.11.: Glas-ASICs sind auf ein defektes Hybrid geklebt.

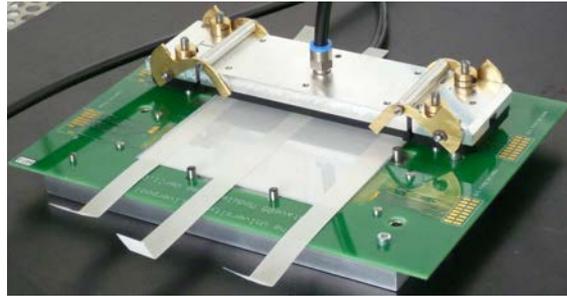


Abbildung 5.12.: Einstellung der Klebstoffhöhe zwischen Sensor und Hybrid durch Verwendung von Streifen aus Reinraumpapier.

Modulbau beteiligten Gruppen diese Rakelmaske verwenden.



Abbildung 5.13.: Erste Version der Freiburger Rakelmaske.



Abbildung 5.14.: Zweite Version der Freiburger Rakelmaske.

Der verwendete Klebstoff Epolite ist nach dem Mischen sehr flüssig und sollte daher etwa 30 Minuten ruhen, wodurch eine zähere Konsistenz (ähnlich der von Honig) erreicht wird und er besser zu verarbeiten ist. Die Verteilung erfolgt ebenfalls mittels der Rakeltechnik auf der Maske und nach Abheben der Rakelmaske ergibt sich ein Bild wie in Abbildung 5.15. Dann wird das Hybrid auf die Sensor-Attrappe gelegt, die sich bereits von Vakuum angesaugt auf der *Module Assembly Plate* befindet. Es ist darauf zu achten, dass zwischen *Plate* und Sensor eine Schicht Reinraumpapier liegt, um das Vakuum besser zu verteilen und Schäden am Sensor zu vermeiden. Solche Schäden wurden beobachtet und von Maira Thomas untersucht (siehe [Tho11]). Auch hier wird das *Pickup Tool* mit dem Messinggewicht beschwert und der Klebstoff mehrere Stunden aushärten gelassen. In Abbildung 5.16 ist das Ergebnis zu sehen bei dem der Klebstoff die Glassensoroberfläche an den gewünschten Stellen bedeckt und etwas verlaufen ist.

5.2.3. Optimierung der Klebstoffhöhe

Bei den verschiedenen Klebeschritten wird jeweils die Einstellung der Feingewindeschrauben verändert, wodurch die Ergebnisse nicht reproduzierbar sind. Eine Verbesserung besteht darin, eine Vorlage für die Schraubeneinstellung für das ASIC-Kleben herzustellen. Dazu werden Glas-ASICs auf eine Plexiglas-Platte geklebt, wobei großen Wert auf ein gleichmäßiges Aussehen und eine leichte Verbreiterung der Klebepunkte gelegt wird. Werden nun die Schrauben für das Hybrid-auf-Sensor-Kleben verändert, lässt sich die ursprüngliche Einstellung wieder herstellen, indem das *Pickup Tool* auf die Plexiglasplatte



Abbildung 5.15.: Klebstoff wurde auf Hybridrückseite aufgetragen.



Abbildung 5.16.: Klebstoffverteilung nach dem Kleben eines Hybrids auf einen Glassensor.

mit den ASICs gelegt wird. Nach Einschalten des Vakuums ist ein Zischen zu hören, wenn der Abstand zu groß ist und das *Pickup Tool* nicht aufliegt. Dann wird durch Verstellen der Schrauben der Abstand in kleinen Schritten solange reduziert, bis das Zischen aufhört. Auch diese Methode liefert nicht sehr gut reproduzierbare Ergebnisse. Am Besten ist es, wenn die Feingewindeschrauben gar nicht mehr verändert werden müssen. Um dies zu erreichen, wird die *Module Assembly Plate* entsprechend angepasst. An jeder Seite befinden sich zwei Messingstreifen, in denen jeweils vier Stifte eingebaut sind, auf denen die Schrauben aufsitzen (siehe Abbildung 5.5 a). Auf dem *Panel* mit den Hybriden werden für jedes Hybrid bei der Herstellung vier Punkte prozessiert, die auf gleicher Höhe wie die oberste Leiterschicht auf den Hybriden sind. Mit den Feingewindeschrauben soll damit die Klebstoffhöhe zwischen ASICs und Hybrid-Oberfläche exakt eingestellt werden. Für den nächsten Klebeschritt gibt es zwei Möglichkeiten: Erstens kann die Klebehöhe mit Hilfe von Abstandsblechen, die auf den Stiften der *Module Assembly Plate* aufliegen, eingestellt werden; zweitens kann die *Module Assembly Plate* selbst sehr genau gefertigt werden.

Für den weiteren Modulbau wurde die zweite Methode gewählt. Dazu wird die Höhe des Hybrids mittels eines Messmikroskops vermessen und der Abstand zwischen Sensorauflagefläche und Oberseite der Stifte berechnet. In Abbildung 5.17 sind die einzelnen Komponenten und deren Höhen dargestellt. Das Ziel ist eine Klebstoffhöhe zwischen Hybrid und Sensor von $120\ \mu\text{m}$. Die Sensorauflagefläche und die Stifte werden in einem Durchgang mit der gewünschten Höhendifferenz von $857\ \mu\text{m}$ gefräst, da nur so die notwendige Genauigkeit ($5\ \mu\text{m}$ Maschinenpräzision) erreicht werden kann und auf diese Weise sichergestellt ist, dass die Oberflächen parallel sind.

Der Abstand zwischen den Stiften und der Sensorauflagefläche wird mit dem Messmikroskop gemessen. Dabei ergibt sich eine maximale Abweichung von $22\ \mu\text{m}$ vom gewünschten Wert. Da die geplante Klebstoffhöhe bei $120\ \mu\text{m}$ liegt, aber $100\ \mu\text{m}$ ausreichend sind, ist das Ergebnis zufriedenstellend.

5.3. Klebetests mit defekten ASICs und mechanischen Sensoren

Der nächste Schritt ist das Verwenden von defekten ASICs und mechanischen Sensoren. Diese haben die gleichen Eigenschaften wie die funktionierenden Komponenten, sowohl

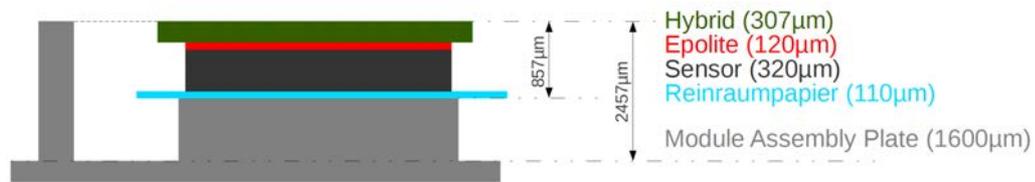


Abbildung 5.17.: Skizze zur Höheneinstellung der *Module Assembly Plate*.

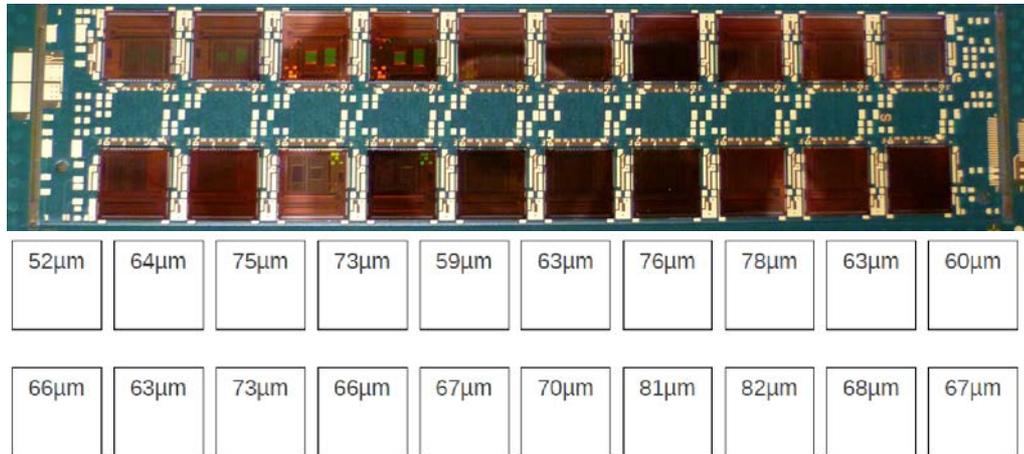


Abbildung 5.18.: Oben: defekte ASICs geklebt auf ein defektes Hybrid; unten: dazugehörige Ergebnisse der Klebstoffhöhenmessung.

was das Material angeht, als auch die Höhe. Die Schritte zum Bau eines Moduls sind die gleichen wie bei den Glas-Tests, jedoch ist nun auch eine Höhenmessung möglich.

Abbildung 5.18 oben zeigt ein defektes Hybrid, auf das defekte ASICs geklebt wurden. Bei der Platzierung der ASICs im *Chip Tray* ist darauf zu achten, dass die Seite der Auslesechips mit den Bondpads für die Streifen zur Außenkante des Hybrids zeigen. Für die Bestimmung der Klebstoffhöhe wird die Höhe eines ASICs mit dem Messmikroskop gemessen. Durch Mittelwertbildung für mehrere Messpunkte ergibt sich eine Höhe von $(303 \pm 1) \mu\text{m}$. Der Fehler des Mittelwerts \bar{x} berechnet sich für N einzelnen Messwerte x_i nach [Roe92] :

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N - 1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} . \quad (5.1)$$

Für die Höhenmessung des Klebstoffs werden bei dem Hybrid für jeden ASIC mehrere Messpunkte aufgenommen und zu jedem davon einer auf der Hybridoberfläche. In Abbildung 5.18 unten ist das Ergebnis dargestellt.

Das Kleben zweier defekter Hybride auf einen mechanischen Sensor (nur Silizium mit Metallstreifen) erlaubte die Bestimmung der Klebstoffhöhe für diesen Bauschritt. Abbildung 5.19 zeigt ein solches Modul mit einem defektem Hybrid, bei dem das zweite Hybrid gerade geklebt wird. Für die Bestimmung der Höhendifferenz wird ein Punkt auf dem

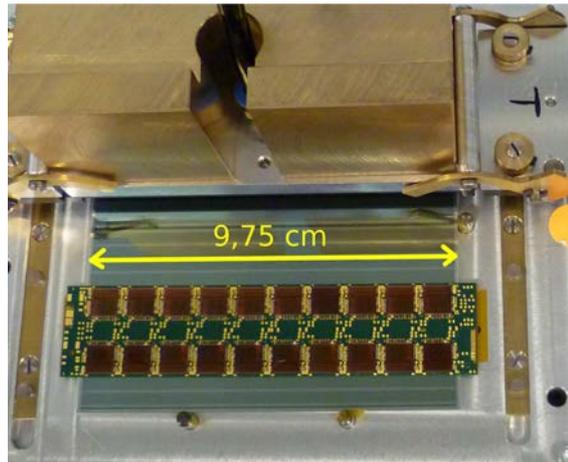


Abbildung 5.19.: Defektes Hybrid auf mechanischem Sensor, zweites defektes Hybrid wird gerade geklebt.

Hybrid und ein naheliegender Punkt auf der Sensoroberfläche gewählt und die Dicke des Hybrids (durch separate Messung: $(307 \pm 2) \mu\text{m}$) subtrahiert.

Für das erste mechanische Modul ergibt sich eine mittlere Klebstoffhöhe zwischen Sensor und den beiden Hybridmodulen von $(126 \pm 13) \mu\text{m}$ und $(156 \pm 16) \mu\text{m}$. Bei den hier angegebenen Unsicherheiten handelt es sich nicht um die Unsicherheit auf den Mittelwert sondern um die Unsicherheit auf den einzelnen Messwert nach [Roe92]:

$$\sigma_{x_i} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.2)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{N-1} \left[\left(\sum_{i=1}^N x_i^2 \right) - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \right]} \quad (5.3)$$

Dadurch werden die Fluktuationen der Werte bei den einzelnen Auslesechips in der Unsicherheit besser widerspiegelt. Die Klebstoffhöhe für das erste Hybrid liegt beim gewünschten Wert von $120 \mu\text{m}$, die des anderen Hybrids ist etwas zu hoch, jedoch ist die Höhendifferenz deutlich kleiner als die durch die Rakelmaske gegebenen Klebstoffhöhe. Detailliertere Angaben zur Durchführung der Höhenmessung können Anhang A.3 entnommen werden.

5.3.1. Bondtests mit defekten ASICs

Die Hybride und Module mit defekten ASICs und mechanischen Sensoren dienen auch noch einem anderen Zweck, sie werden für Bondtests benötigt. Die Leitungsverbindungen von den Auslesechips zu den Hybridmodulen und zu den Streifen erfolgen über Drahtbonds. Dafür wird die Bondmaschine Delvotec 6400 (Abbildung 5.20) und ein Bonddraht mit einem Durchmesser von $25 \mu\text{m}$ verwendet. Abbildung 5.21 zeigt links den Bondplan und



Abbildung 5.20.: Freiburger Bondmaschine: Delvotec 6400.

rechts einen gebondeten Auslesechip. Zu beachten ist, dass jeder Auslesechip seine eigene Konfiguration von Adressbonds an der markierten Stelle im Bondplan hat, wodurch jeder Auslesechip eine individuelle Kennung erhält und so vom Computer angesteuert werden kann. Die ursprünglichen Bondpläne wurden von Ashley Greenall von der Universität Liverpool angefertigt (siehe [Gre11]).

Da in Liverpool eine andere Bondmaschine verwendet wird, mussten eigene Bondprogramme entwickelt werden, an deren Entstehung der Autor beteiligt war. Eine Erschwerung bestand darin, dass der Verfahrensweg der Bondmaschine es nicht ermöglicht, alle Hybride eines *Panel*s auf einmal zu bonden. Es lassen sich nur 4 der 8 Hybride nacheinander bearbeiten, danach muss das *Panel* umgedreht werden. Da die Hybride dabei um 180° gedreht werden, sind unterschiedliche Bondprogramme notwendig welche in Referenz [WJMD12] genau beschrieben sind.

Für die Auslese der Hybride auf dem *Panel* müssen Bondverbindungen für die Datenleitungen und die Spannungsversorgung hergestellt werden. Durch diese wird auch die Auslesegeschwindigkeit festgelegt. In Abbildung 5.22 sind die zwei verfügbaren Möglichkeiten dargestellt. Die Auslese ist mit 40 MHz und 80 MHz möglich. Damit die Hybride auf den Sensor geklebt werden können, müssen diese Bondverbindungen wieder abgerissen werden. Für die Auslese von Modulen stehen Testrahmen zur Verfügung, an die das HSIO-Auslesesystem sowie die Versorgungsspannung der Hybride und die Hochspannung für die Sensoren angeschlossen werden. Die Verbindung von Rahmen zum Modul erfolgt ebenfalls über Bonddrähte.

Abbildung 5.23 zeigt ein gebondetes mechanisches Modul (defekte Hybride und mechanischer Sensor) in einem Testrahmen. Bei diesem Testrahmen befinden sich auf der

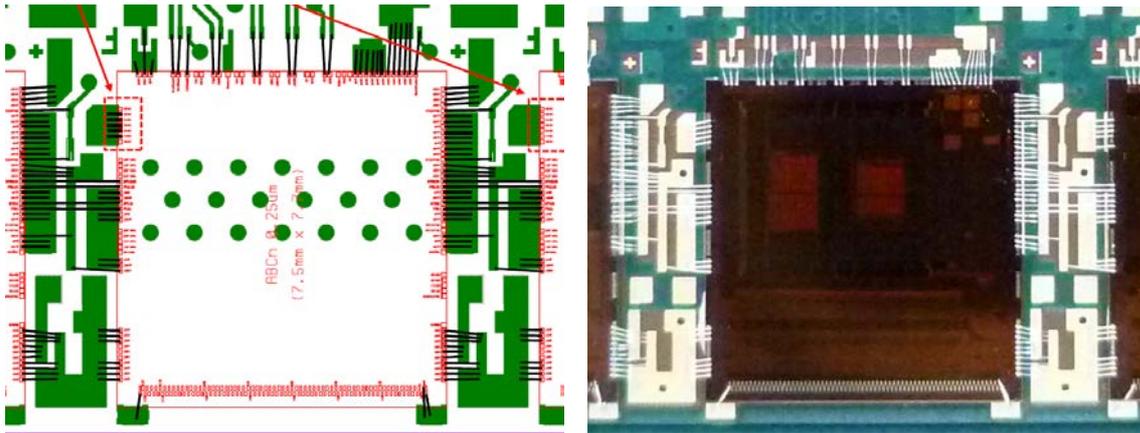


Abbildung 5.21.: Links: Bondplan für einen ASIC [Gre11]; rechts: gebondeter Auslesechip.

Modul	Hybride	Sensor
Module_0	F02, F03	ATLAS07-MECHANICAL No 16
Module_1	FR3_6, FR3_5	ATLAS07-P-SSSD-Series2 VPX73814-FZ2-Pstop- W133
Module_2	FR3_4, FR3_3	ATLAS07-P-SSSD-3rd VXX73025- W26

Tabelle 5.1.: Auflistung aller für diese Arbeit hergestellten voll funktionsfähigen Module.

linken Seite die Anschlüsse für die Datenleitungen zum HSIO-Auslesesystem und auf der rechten Seite die Anschlüsse für die Spannungsversorgung.

5.4. Funktionsfähige Module

Nachdem alle Schritte des Modulbaus mit Attrappen erfolgreich durchgeführt wurden, wurden dann funktionsfähige Module gebaut. Für das erste Module (Module_0) wurden von der Universität Liverpool zwei Hybride und ein Sensor zur Verfügung gestellt, die für den Modulbau nicht qualifiziert waren. Die weiteren Module (Module_1 und Module_2) werden mit Sensoren der Kategorie B aus dem Freiburger Kontingent gebaut: Diese haben eine andere Resistivität (FZ2, siehe Anhang Tabelle A.1) als Kategorie-A-Sensoren und dadurch ein anderes Strom-Spannungs-Verhalten. Weitere Sensoren stammen aus der einer der ersten Testserien (3rd). Die Hybride stammen alle von einem *Panel* mit der Nummer 3 und sind von 0 bis 7 durchnummeriert. Die Bezeichnung der Hybride setzt sich aus dem Kürzel FR für Freiburg, der *Panel*-Nummer und der Nummer des Hybrids zusammen, beispielsweise FR3_0. In Tabelle 5.1 sind alle Module und deren Komponenten aufgelistet.

Jeder Auslesechip auf einem Hybrid hat seine individuelle Adressierung, wobei für

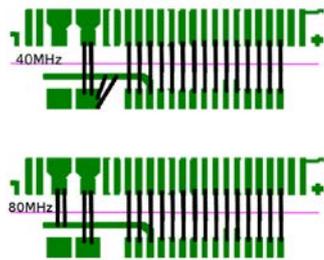


Abbildung 5.22.:
Bonddiagramm für die zwei verschiedenen Auslesegeschwindigkeiten: oben 40 MHz, unten 80 MHz.

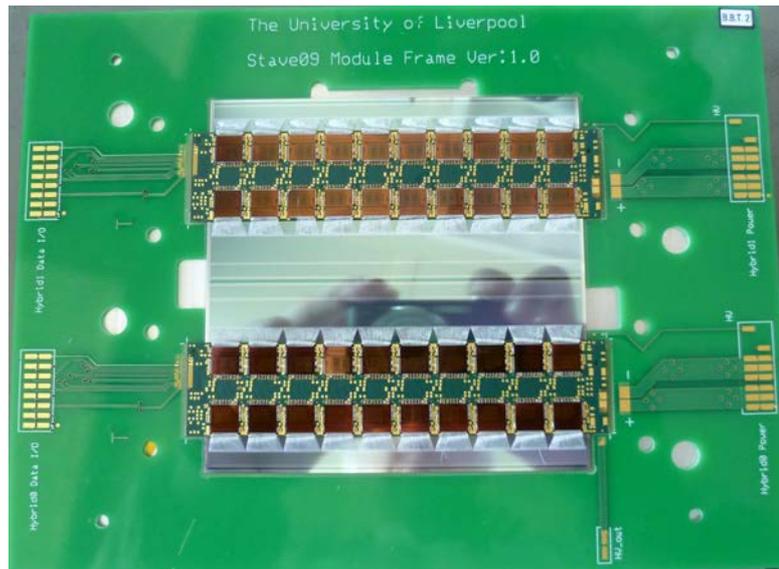


Abbildung 5.23.: Gebondetes mechanisches Modul in einem Teststrahlen.

jede Reihe die Nummerierung beginnend mit 32 und 64 jeweils um 1 steigt. In Abbildung 5.24 sind die drei Module mit den dafür verwendeten Hybriden schematisch dargestellt. Für die Auslese befinden sich an der oberen Seite Bondpads, während die Verbindung für die Spannungsversorgung (*Power*) durch Bondpads an der Unterseite erfolgt. In diesen Abbildungen sind auch die Streifen angedeutet, so dass ersichtlich ist, welches Hybrid für die Auslese welcher Segmente des Sensors zuständig ist. Alle Module haben den gleichen Aufbau in Bezug auf die Stromversorgung und die Streifenausrichtung und entsprechen damit dem von der Universität Liverpool vorgegebenen Schema.

5.4.1. Sensorcharakteristik

Um die Sensoren zu Charakterisieren, wurden von den Freiburger Sensoren Strom-Spannungs- (IV) und Kapazität-Spannungs-Kurven (CV) aufgenommen, während der Sensor für Module_0 in Liverpool vermessen wurde. Die Abbildungen 5.25, 5.27 und 5.29 zeigen die IV-Kurven der Sensoren: Die schwarzen Messpunkte wurden vor dem Kleben aufgenommen, die roten (zunehmende Messspannung) und grünen (abnehmende Messspannung) danach. Um die Messreihen besser vergleichen zu können, sind die Punkte einer Messreihe jeweils mit einer Linie verbunden. W133 und W26 wurden nach dem Kleben bei einer Temperatur von 8°C getestet, daher sind die Messwerte mit Formel 2.10 auf 20°C skaliert, wie in [Chi04] festgelegt.

Für den Sensor ATLAS07-MECHANICAL No 16 ist in Abbildung 5.25 zu sehen, dass die IV-Kurven nach dem Kleben deutlich von der vorher gemessenen Kurve in Liverpool abweicht. Dies könnte auf eine andere Messmethode zurückzuführen sein: In Liverpool wurde eine CV-Messung durchgeführt und der dabei gemessene Strom für die Graphik verwendet, während in Freiburg direkt eine IV-Kurve aufgenommen wurde. Bis etwa

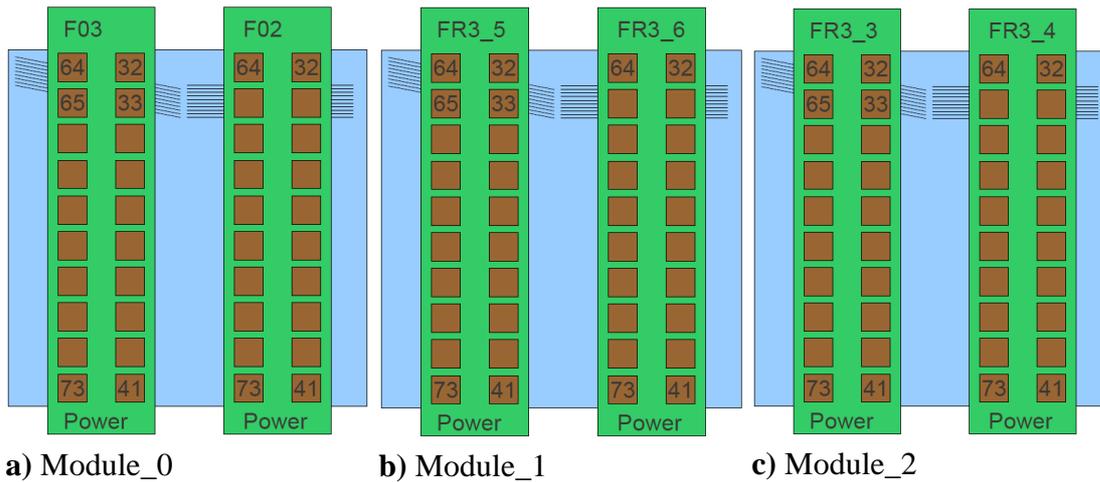


Abbildung 5.24.: Zuordnung der sechs Hybride zu den Sensoren für die im Rahmen dieser Arbeit gebauten Module Module_0, Module_1 und Module_2.

300 V steigt der Strom nur wenig an, bei größeren Spannungen ist der Anstieg deutlich stärker. Dieses Verhalten ist nicht typisch im Vergleich zu den beiden anderen Sensoren, daher ist dieser Sensor nicht für eine weitere Verwendung geeignet. Bei Module_1 stimmen bis etwa 400 V alle Kurven überein und auch Module_2 zeigt eine gute Übereinstimmung bis etwa 350 V spannung. Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass die Module auch nach dem Kleben funktionstfähig sind. Es fällt auf, dass die gemessene Stromstärke von W1133 (Abbildung 5.27) deutlich höher ist als von W26 (Abbildung 5.29). Dies liegt an der unterschiedlichen Resistivität des dotierten Siliziums. Kategorie-B-Sensoren (FZ2, siehe Tabelle A.1) wie W133 zeigen einen deutlich höheren Leckstrom als Kategorie-A-Sensoren (FZ1).

Wie in Abschnitt 2.4.2 erläutert kann aus der Messung der Kapazität in Abhängigkeit der angelegten Spannung die Verarmungsspannung berechnet werden. In den Abbildungen 5.26, 5.28 und 5.30 sind die Messwerte und die Verarmungsspannungen für die drei Sensoren dargestellt. Die in allen CV-Kurven eingezeichneten Fehlerbalken ergeben sich aus der systematischen Messunsicherheit der Kapazität. Für den Sensor W133 ergibt sich eine Verarmungsspannung von (60 ± 2) V und für den *Preseries* Detektor W26 (157 ± 5) V. Der nicht für den Modulbau geeignete Sensor (MECHANICAL No 16) hat mit einem Wert von (275 ± 13) V eine deutlich höhere Verarmungsspannung. Zum Vergleich ist in Abbildung 5.31 eine CV-Kurve eines Kategorie A (W205) Sensors mit einer Verarmungsspannung von (236 ± 9) V abgebildet, welche innerhalb der Unsicherheiten mit dem Sensor MECHANICAL No 16 übereinstimmt.

5.4.2. Höhenmessungen

Analog zu den mechanischen Modulen wurde für die funktionsfähigen Module eine Höhenmessung durchgeführt. Zuerst wurden die Höhendifferenzen zwischen den Auslese-

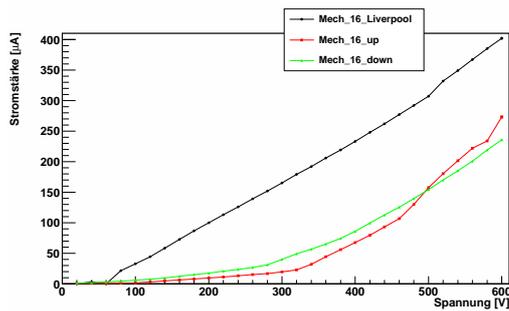


Abbildung 5.25.: MECHANICAL No 16: Vergleich der IV-Kurve vor dem Kleben (schwarz) und danach (rot/grün).

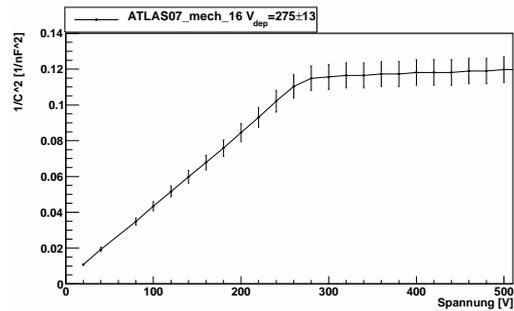


Abbildung 5.26.: MECHANICAL No 16: Kapazitätsmessung zur Bestimmung der Verarmungsspannung.

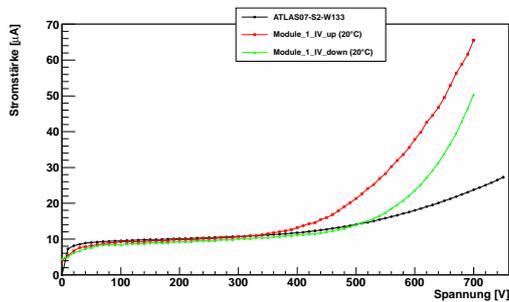


Abbildung 5.27.: W133: Vergleich der IV-Kurven vor dem Kleben (schwarz) und danach (rot/grün).

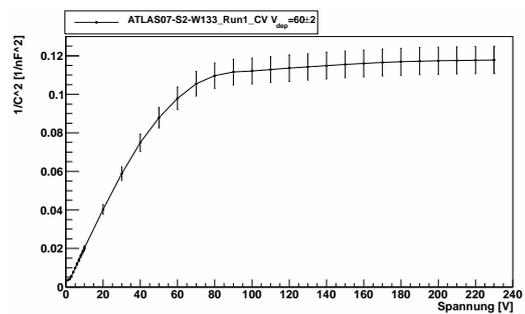


Abbildung 5.28.: W133: Kapazitätsmessung zur Bestimmung der Verarmungsspannung.

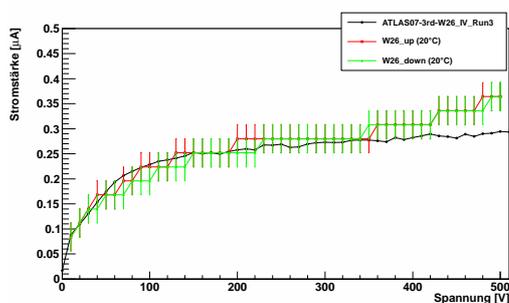


Abbildung 5.29.: W26: Vergleich der IV-Kurven vor dem Kleben (schwarz) und danach (rot/grün).

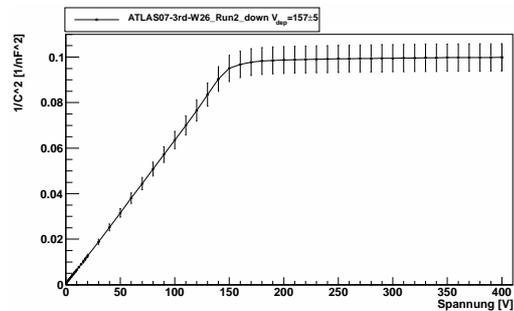


Abbildung 5.30.: W26: Kapazitätsmessung zur Bestimmung der Verarmungsspannung.

Die Fehlerbalken der Kapazitätsmessungen zeigen die systematische Unsicherheit bei der Messung der Kapazität.

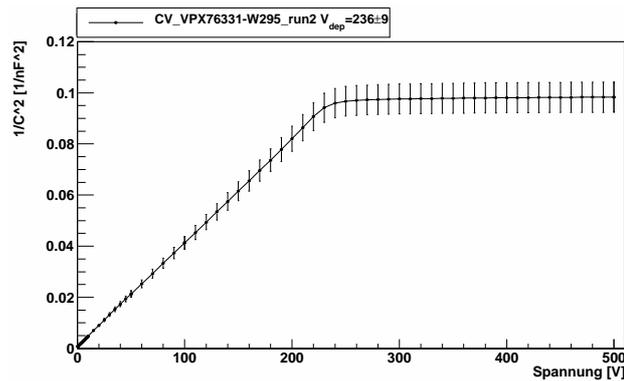


Abbildung 5.31.: CV-Messung eines ATLAS07 Grad A Sensors (W293) [Hau12]. Die Fehlerbalken zeigen die systematische Unsicherheit bei der Messung der Kapazität.

chips und den Hybriden auf dem *Panel* vermessen. In Abbildung 5.32 ist das Resultat dargestellt, wobei für jedes Hybrid zwei Messreihen (A und B) existieren die jeweils eine Reihe von 10 ASICs darstellen. Wenn Abbildung A.1 zugrunde gelegt wird, bezeichnet A die 10 unteren ASICs während B für die oberen steht. Lediglich bei Hybrid 0 sind A und B vertauscht. Es ist ersichtlich, dass fast alle ASICs eine mittlere Klebstoffhöhe zwischen $60\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ aufweisen. Lediglich Hybrid 2 A zeigt ein abweichendes Verhalten, da aber alle Auslesechips fest mit dem Hybrid verbunden sind kann es für den Modulbau verwendet werden.

Während es für die Dicke der Klebstoffschicht zwischen Hybrid und ASICs keine Vorgabe gibt, sollte beim Kleben von Hybrid auf den Sensor mindestens eine Höhe von $100\ \mu\text{m}$ erreicht werden. Wie in Abschnitt 2.7 beschrieben hängt das Rauschen der Sensoren vor allem von der Streifenkapazität ab. Durch das Kleben eines Objekts auf die Streifen wird diese beeinflusst. Zum einen befindet sich über den Streifen, die wie die Platten eines Kondensators sind, nun ein Dielektrikum (Klebstoff) und nicht mehr Luft, zum anderen ist das Hybrid ein elektronisches Bauteil dessen unterste (dem Sensor zugewandte) Schicht aus einer Abschirmung besteht, nämlich einer geschlossenen Kupferschicht, die geerdet ist. Dadurch bildet sich eine zusätzliche Kapazität zwischen dieser Abschirmung und den Streifen. Berechnungen von Dr. Affolder (Universität Liverpool) zeigen, dass diese Effekte hinreichend klein sind, wenn der Abstand zwischen Sensoroberfläche und Hybridrückseite mindestens $100\ \mu\text{m}$ beträgt. Die Abbildungen 5.33, 5.34 und 5.35 zeigen die Ergebnisse der Höhenmessungen für die Module. Alle Messpunkte liegen über dem geforderten Wert, wobei Module_2 die vorgesehene Klebstoffdicke von $120\ \mu\text{m}$ erreicht.

5.4.3. Bonden

Durch die Vorstudien mit defekten Hybriden und defekten Auslesechips konnten die notwendigen Bondprogramme erstellt und getestet werden. Bei den Hybriden in Produktionsqualität trat aber ein unerwartetes Problem auf: Beim Bestücken mit den SMD-Bauteilen haben sich die Verbindungen zwischen Hybrid und *Panel* verändert. In Abbildung 5.37 ist ein solches Hybrid gezeigt.

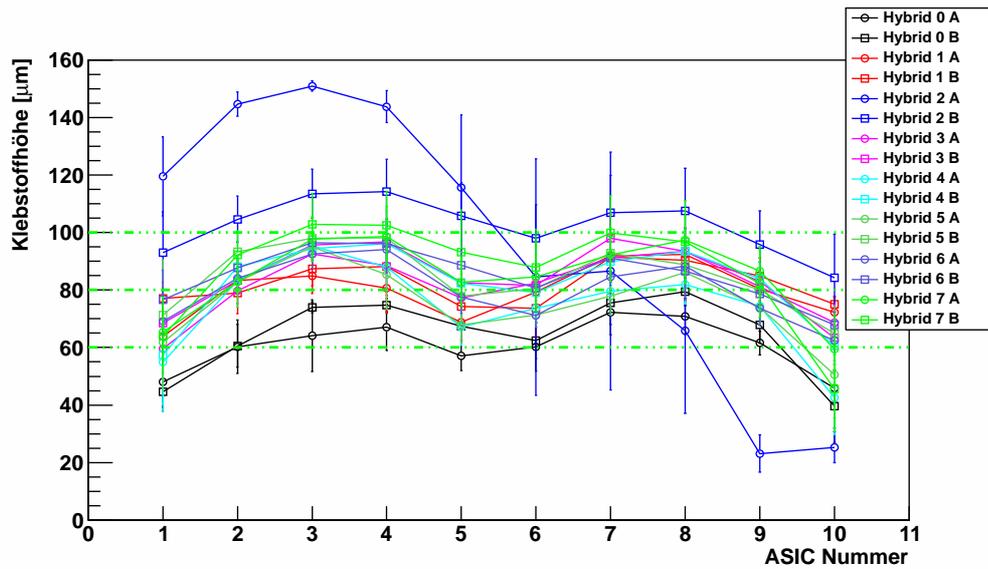


Abbildung 5.32.: Mittlere Klebstoffhöhe aller Hybride auf Panel 3 für die einzelnen Auslesechips (ASICs).

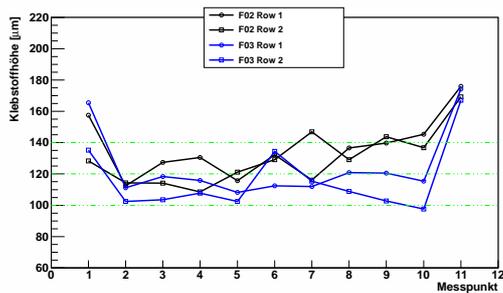


Abbildung 5.33.: Module_0: Klebstoffhöhe zwischen Hybridunterseite und Sensoroberfläche.

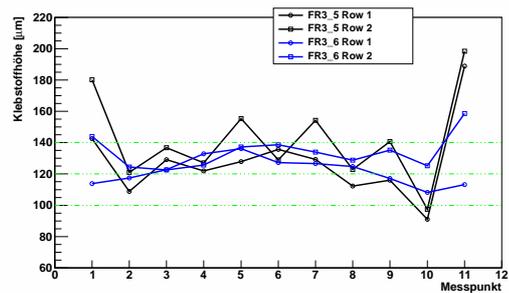


Abbildung 5.34.: Module_1: Klebstoffhöhe zwischen Hybridunterseite und Sensoroberfläche.

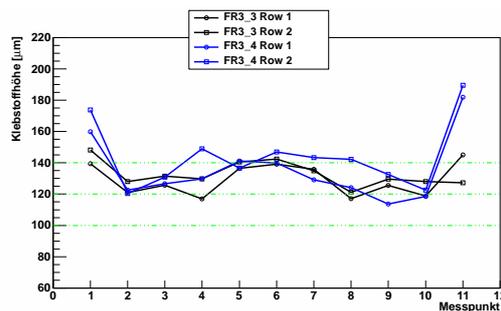


Abbildung 5.35.: Module_2: Klebstoffhöhe zwischen Hybridunterseite und Sensoroberfläche.

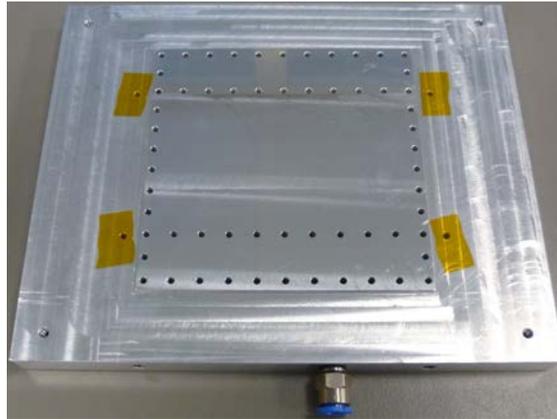


Abbildung 5.36.: *Module Bonding Plate.*

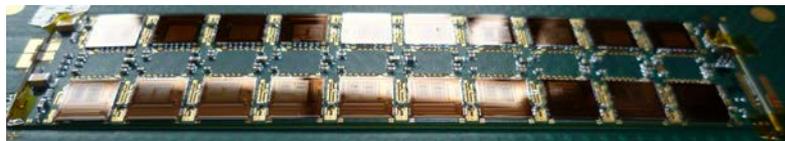


Abbildung 5.37.: Verformtes gutes Hybrid.

Um ein Modul zu testen, wird es an einen Testrahmen gebondet, in dem sich eine Vertiefung von $300\mu\text{m}$ für den Sensor befindet, wodurch die Positionierung erleichtert wird. Die *Module Bonding Plate* (siehe Abbildung 5.36), die zum Bonden eines Moduls verwendet wird, ist so gebaut, dass die Sensorauflagefläche, auf der der Sensor mittels Vakuum festgehalten wird, auf der gleichen Höhe ist wie die Rahmenoberfläche. Für eine bessere Vakuumverteilung befindet sich zwischen *Plate* und Sensor noch eine Schicht Reinraumpapier. Durch die entstehende Höhendifferenz zwischen Testrahmen und Hybrid ist das Bonden unmöglich. Um die verbogenen Hybride dennoch zu bonden wurden sie an die Testrahmen geklebt. Näheres zu diesem Thema ist in Anhang A.4 aufgeführt.

6. Modultests mit dem HSIO-Auslesesystem

Ein Modul besteht aus zwei Hybriden und einem Sensor. Jede dieser Komponenten wird vor dem Zusammenbau einzeln getestet. Für die Sensoren werden IV- und CV-Kurven aufgenommen und daraus die Verarmungsspannung bestimmt. Bevor die Hybride auf den Sensor geklebt werden, muss sichergestellt werden, dass alle Auslesechips ordnungsgemäß funktionieren. Dazu werden die Hybride noch auf dem *Panel* mit dem HSIO-Auslesesystem (siehe Kapitel 4) getestet. Funktionierende Hybride werden anschließend für den Modulbau verwendet und auch die Module werden einem Test mit dem HSIO-Auslesesystem unterzogen. In diesem Kapitel werden die Resultate der verschiedenen Tests, sowohl von einzelnen Hybriden als auch von kompletten Modulen, vorgestellt. Zudem wurden Messungen am CERN durchgeführt, die ebenfalls hier präsentiert werden.

6.1. Test der bestückten Hybride

Nach dem Bestücken der Hybride mit den ABCN25 Auslesechips, die bereits vom Hersteller getestet werden und dem Bonden wird jedes Hybrid mit dem HSIO-Auslesesystem getestet. Auf dem *Panel* sind dazu bereits Anschlüsse für die Spannungsversorgung und die Verbindung zum HSIO-Auslesesystem angebracht, wobei die Verbindung mit dem Hybrid durch Drahtbonds geschieht (siehe Abschnitt 4.1). Für den Betrieb eines einzelnen Hybrids liefert die Spannungsquelle einen Strom von 5 A bei einer Spannung von etwa 2.6 V. Die Aufnahme mit der Infrarotkamera T360 der Firma Flir (Abbildung 6.1) zeigt, dass die Auslesechips eine Temperatur von mehr als 70°C erreichen können, wobei ein deutlicher Temperaturunterschied zwischen Hybridmitte und Rand erkennbar ist.

Für jedes Hybrid gibt es eine eigene Datei für die Konfiguration der Auslesechips. Außerdem ist eine globale Konfigurationsdatei vorhanden, welche auf die Hybriddatei verweist und globale Parameter des Hybrids vorgibt, unter anderem die Verzögerungswerte der Datenströme. Mit einem *iDelay Scan (input delay)* werden die genauen Werte für diese Verzögerung ermittelt und zwischengespeichert. Die Werte können anschließend in der Konfigurationsdatei angepasst werden. Der *iDelay* Wert variiert die Phase zwischen eingehenden Daten und der Systemuhr. Eine Anpassung ist wichtig um Abtastfehler zu vermeiden. Für jeden Auslesechip gibt es zusätzlich in der Hybridkonfigurationsdatei einen eigenen Verzögerungswert. Um diesen zu ermitteln wird ein *Strobe Delay Test* durchgeführt. In Abbildung 6.2 ist der Effekt dieses Tests dargestellt. Ohne eine Anpassung an die richtigen Werte ergibt sich nach einem *Three Point Gain Test* eine Verstärkung für einen Datenstrom wie in Abbildung 6.2 oben dargestellt, bei der die Werte einzelner Aus-

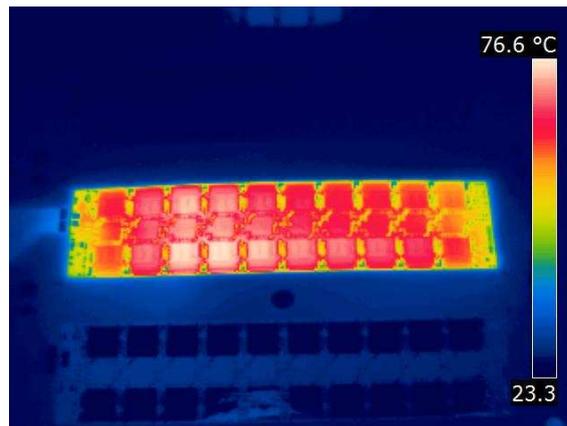


Abbildung 6.1.: Infrarotaufnahme der Wärmeabgabe eines Hybrids während der Messung mit dem HSIO-Auslesesystem. Ein zweites Hybrid am unteren Bildrand ist nicht angeschlossen und daher deutlich kälter.

lesechips aufgrund falscher Verzögerungswerte stark schwanken. Die Abbildung zeigt die Verstärkungswerte für jeden Kanal. In der mittlere Graphik ist das Ergebnis eines *Strobe Delay Tests* mit den Verzögerungswerten (SD) für jeden Auslesechip dargestellt und in der unteren Abbildung ist die Verstärkung unter Verwendung dieser Werte angezeigt. Eine deutliche Verbesserung des Kurvenverlaufs ist sichtbar. Vor der Korrektur weicht die Verstärkung einiger Auslesechips deutlich vom Normalwert (etwa 110 mV/fC) ab. Erst nach der Korrektur wird die Verstärkung für alle Auslesechips korrekt bestimmt. Eine genaue Anleitung wie die Tests durchgeführt werden und eine Erläuterung der Konfigurationsdateien kann der Beschreibung [Won12] entnommen werden.

Bereits diese ersten Tests für die Kalibrierung zeigen, ob alle Auslesechips funktionieren. Der wichtigste Test ist der *Three Point Gain Test* mit injizierten Testladungen von 0.5 fC, 1 fC und 1.5 fC. Mit diesem wird das Rauschen jedes Kanals bestimmt. In Abbildung 6.3 sind exemplarisch die Ergebnisse eines *Three Point Gain Tests* für ein Hybrid dargestellt. Sie zeigt das Rauschen¹ für jeden Kanal der Auslesechips bei einer injizierten Testladung von 1 fC. Die Grenze zwischen zwei Auslesechips ist grün gestrichelt und für jeden Auslesechip wird der Mittelwert des Rauschens über alle Kanäle berechnet und ausgegeben. Alle Auslesechips zeigen ein Rauschen von etwa 400 Elektronen, was mit Messungen einzelner Hybride der anderen am *Stave-Modulbau* beteiligten Universitäten übereinstimmt. Sofern alle Kanäle der Auslesechips ein solches Rauschen zeigen, hat das Hybrid den ersten Qualitätstest bestanden und kann für den Modulbau verwendet werden.

Parallele Auslese von zwei Hybriden Für die Verbindung vom Hybrid zum Auslesesystem stehen auf dem *Interface-Board* des HSIO-Auslesesystems zwei Anschlüsse zur Verfügung. Dies ermöglicht es, zwei Hybride gleichzeitig zu testen. Die Durchführung eines *Three Point Gain Tests* ergibt wiederum die erwarteten Rauschwerte von

¹Rauschen in ENC: *Equivalent Noise Charge*. Bei der Berechnung wird das Rauschen aus der Messung in mV ermittelt und dann mit Hilfe der Verstärkung in Elektronen umgerechnet.

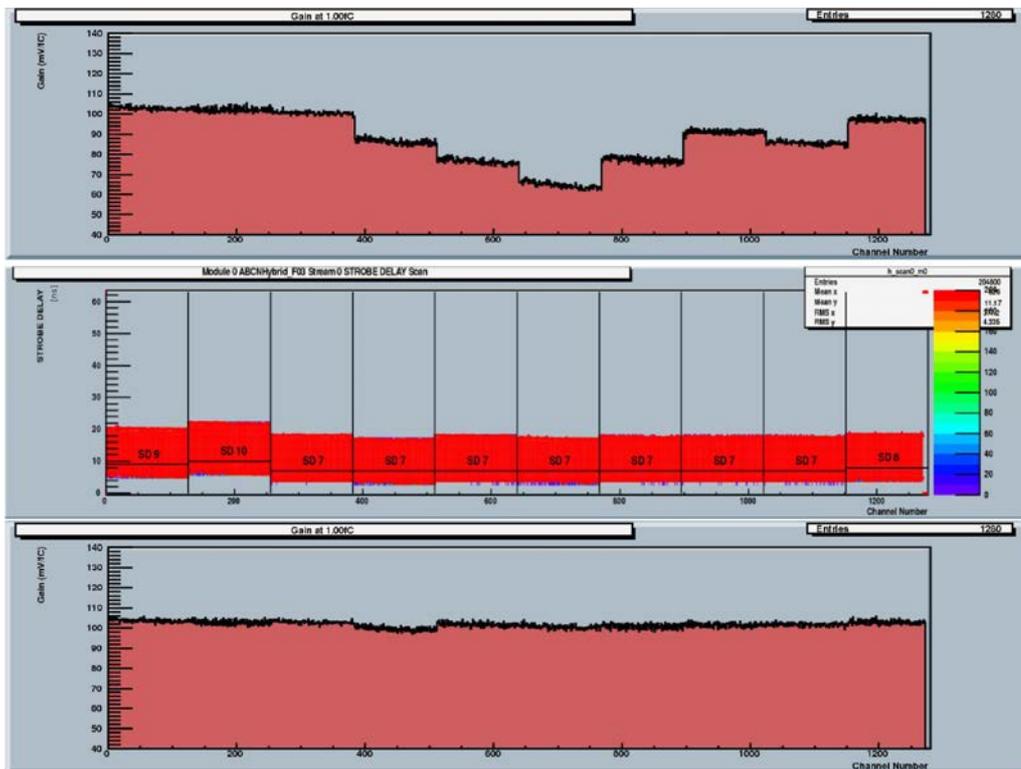


Abbildung 6.2.: Beispiel für Verzögerungszeit-Korrektur an Hybrid F03 für die ersten 10 ASICs. Oben: Verstärkung von 10 ASICs vor *Strobe Delay* Korrektur; Mitte: Ergebnis des *Strobe Delay Tests* mit den für jeden ASIC daraus berechneten *Strobe Delay* Werten; Unten: Verstärkung nach *Strobe Delay* Korrektur. Vor der Korrektur ist die Verstärkung für einzelnen ASICs abweichend vom Normalwert, nach der Korrektur ist die Verstärkung für alle Auslesechips gleichförmig.

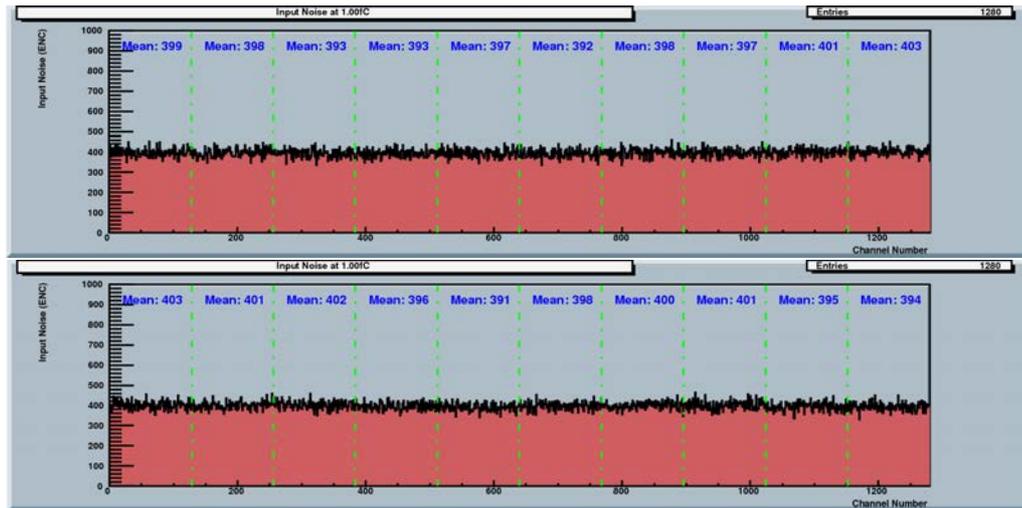


Abbildung 6.3.: Ergebnis eines *Three Point Gain Tests* für Hybrid FR3_0. Gezeigt wird das Rauschen für jeden Kanal der Auslesechips bei einer Testladung von 1 fC; der Mittelwert für jeden Auslesechip wird berechnet und in blauer Schrift dargestellt.

400 Elektronen. Auch das gleichzeitige Auslesen von zwei Hybriden beeinflusst das Rauschen also nicht negativ.

Variation der Auslesegeschwindigkeit Die Hybride und das *Panel* sind so konstruiert, dass es möglich ist, sie bei zwei verschiedenen Geschwindigkeiten auszulesen, nämlich mit 40 MHz oder mit 80 MHz. Die Auslese des inneren Detektors erfolgt momentan mit einer Frequenz von 40.08 MHz [TA⁺08]. Ein Modul besteht aus zwei Hybriden, soll aber als ein Objekt ausgelesen werden. Dazu werden die beiden Signale der Hybride zu einem Signal zusammengefasst, wodurch die einzelnen Hybride mit doppelter Geschwindigkeit (80 MHz) ausgelesen werden müssen. Die Auswahl der Auslesegeschwindigkeit erfolgt über unterschiedliche Bondverbindungen zwischen *Panel* und Hybrid. Zwei Hybride wurden in beiden Konfigurationen getestet und es konnten keine Unterschiede beim Rauschen oder bei der Verstärkung festgestellt werden.

6.2. Test der Module

Um Module zu testen, müssen diese über Drahtbondverbindungen mit einem Testrahmen verbunden werden. In Abbildung 6.4 und 6.5 sind zwei Testrahmen mit jeweils einem Modul abgebildet. Oberhalb der Hybride ist eine zusätzliche Baugruppe auf den Rahmen geklebt, das *BCC²-Board*. Dieses dient dazu, die Datensignale der beiden Hybride zu einem Signal zusammenzufügen, welches an das HSIO-Auslesesystem gesendet wird. Die beiden Testrahmen unterscheiden sich in der Art der Spannungsversorgung der Hybride. Sie können in Reihe geschaltet werden oder parallel. Jedes Hybrid benötigt für den Be-

²Buffer Control Chip

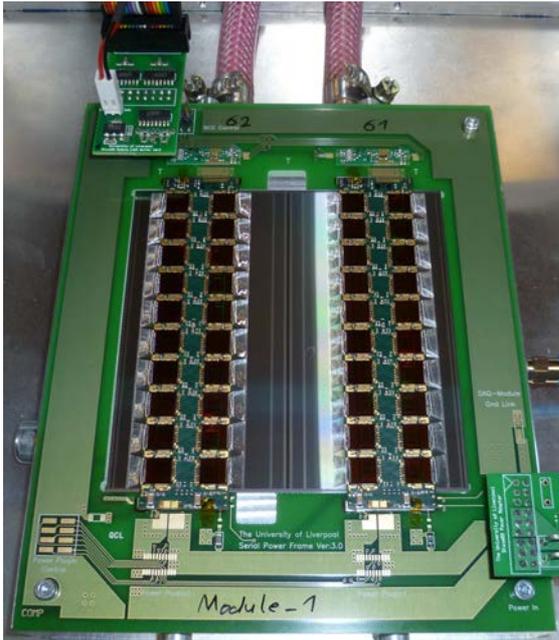


Abbildung 6.4.: Angeschlossener *Module Serial Power Testing Frame* mit Modul.



Abbildung 6.5.: DC-DC Testrahmen mit Modul; Unten links DC-Transformator, unten rechts Kupferblock mit Wärmeleitpaste.

trieb einen Strom von 5 A. An jedem Hybrid ergibt sich ein Spannungsabfall von 2.5 V. Sind die Hybride in Reihe geschaltet wird eine Betriebsspannung von über 5 V (siehe Abbildung 6.6). Um durch die Spannungsversorgung induziertes Rauschen der Hybride zu reduzieren, werden die negativen Anschlüsse der Hybride geerdet. Da dieser sich beim linken Hybrid jedoch auf einem positiven Potential gegenüber der Masse befindet, erfolgt die Erdung kapazitiv mittels eines Kondensators. Beim rechten Hybrid gibt es keine Potentialdifferenz zwischen negativem Anschluss und Masse, so dass die Erdung mittels eines 0Ω Widerstands erfolgt. Diese Schaltung ist auf dem *Module Serial Power Testing Frame* (SP Rahmen) verwirklicht (siehe Abbildung 6.6). Bei Parallelschaltung der Hybride auf dem *Module DC-DC Power Test Frame* (DC-DC Rahmen) wird die angelegte Spannung von 5 V bis 10 V von einem DC Transformator pro Hybrid auf den benötigten Wert von etwa 2.5 V heruntergeregelt. Die Erdung der Hybride erfolgt ohmsch durch den Transformator (siehe Abbildung 6.7). Der DC Transformator wird mittels eines Steckers auf dem Testrahmen befestigt. Um die entstehende Wärme abzuleiten befindet sich unter dem Transformator ein Kupferblock, der beidseitig mittels Wärmeleitpaste eine thermische Verbindung zum Testrahmen herstellt.

Alle im Rahmen diese Diplomarbeit angefertigten Module wurden jeweils mit beiden Testrahmen getestet. Dabei hat sich gezeigt, dass die Rauschwerte bei Verwendung des DC-DC Rahmens niedriger sind als bei Verwendung des *Serial Power Testing Frame*. Abbildung 6.8 zeigt exemplarisch die Testergebnisse von *Module_2* für eine Reihe von zehn Auslesechips des Hybrids FR3_3 mit beiden Rahmen. Beide Tests wurden bei einer am

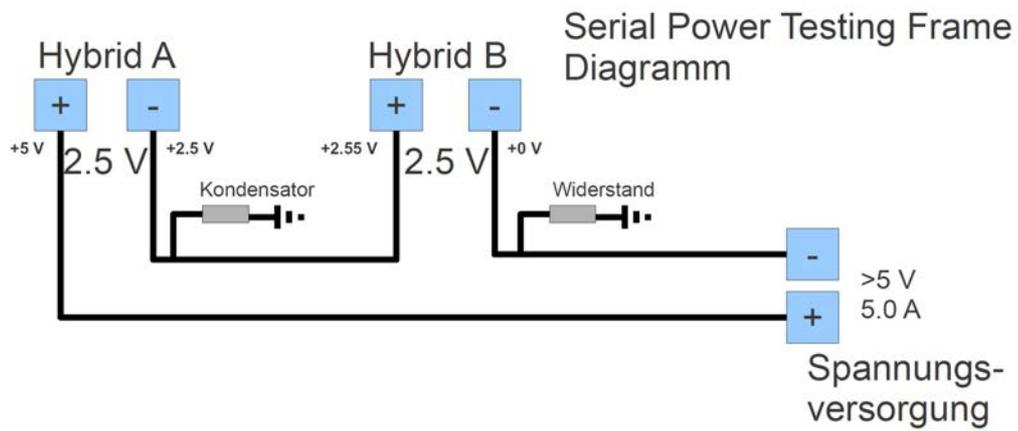


Abbildung 6.6.: Schema für Reihenschaltung der Hybride.

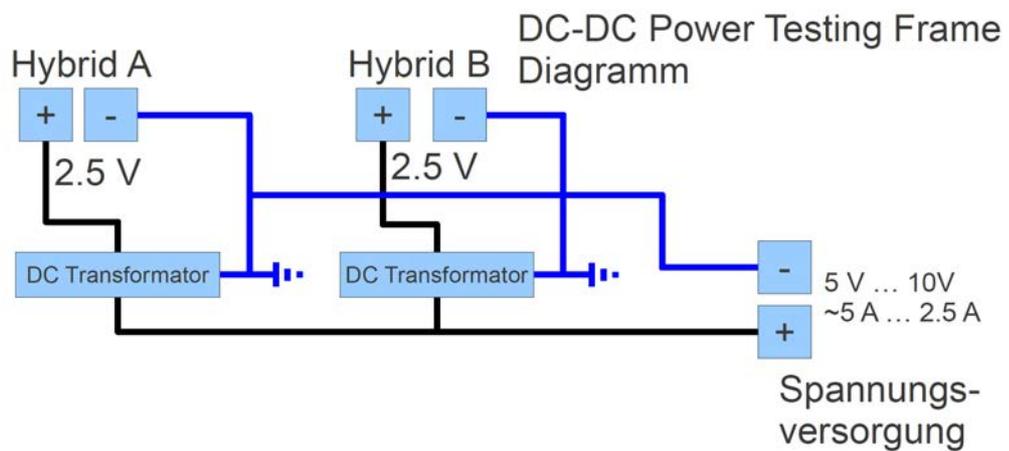


Abbildung 6.7.: Schema für Parallelschaltung der Hybride.



Abbildung 6.8.: Vergleich des Rauschens für zehn Auslesechips eines Moduls; Oben: *Module Serial Power Testing Frame*; Unten: DC-DC Rahmen mit geringerem Rauschen.

Hybrid	Rauschen der Auslesechips [ENC]									
FR3_5 A SP	701	709	703	718	689	711	756	755	770	734
FR3_5 A DC	642	668	648	647	631	647	675	680	680	651
FR3_5 B SP	658	652	651	669	650	666	635	678	661	688
FR3_5 B DC	600	592	599	603	593	596	597	632	622	629
FR3_6 A SP	680	664	668	673	664	678	665	658	670	670
FR3_6 A DC	641	641	656	672	664	661	659	657	685	676
FR3_6 B SP	640	648	649	652	648	647	639	645	657	656
FR3_6 B DC	589	607	617	614	625	599	617	626	634	635

Tabelle 6.1.: Rauschvergleich für SP- und DC-DC-Testrahmen für Module_1, Hochspannung 200 V, Kühlmitteltemperatur 8°C.

Sensor angelegten Spannung von 200 V und einer Kühlmitteltemperatur von 8°C durchgeführt. Tabelle 6.1 zeigt die Ergebnisse exemplarisch für Module_1. Die mit dem DC-DC Rahmen erhaltenen Rauschwerte liegen 40 bis 50 Elektronen unter den Werten mit dem SP Rahmen. In Tabelle A.2 im Anhang sind vergleichende Ergebnisse aus Rauschmessungen für alle drei Module mit beiden Testrahmen angegeben. Für nahezu alle Auslesechips verbessert sich das Rauschen bei Verwendung des DC-DC Testrahmens, teilweise nur um wenige Elektronen, teilweise um bis zu 60 Elektronen.

Bei der Optimierung des Teststands am LBNL durch Dr. Sergio Diez-Cornell zeigte sich, dass sich auf der Hauptplatine des HSIO-Auslesesystems eine Rauschquelle befindet. Die Spannungsversorgung erfolgt über ein 48 V Netzteil. Diese Spannung wird über einen Wandler auf der Hauptplatine in 12 V umgewandelt wodurch starkes Rauschen verursacht werden kann. Da für den Betrieb des HSIO-Auslesesystems eine Spannung von 12 V benötigt wird, wird diese nach der Optimierung an zwei Steckplätzen direkt im An-

schluss an den Wandler durch ein externes Netzteil zur Verfügung gestellt. Obwohl beim Freiburger Teststand keine signifikante Verbesserung des Rauschens durch diese Modifikation festgestellt werden konnte, wird diese Änderung beibehalten.

Ein Vergleich zwischen Abbildung 6.3 und 6.8 zeigt, dass das Rauschen nach dem Bonden der Auslesechips an den Sensor ansteigt. Aufgrund von Berechnungen und Messungen wird ein Rauschen von etwa 600 bis 650 Elektronen für ein verarmtes Modul erwartet. Bei Messungen mit dem DC-DC Testrahmen wird dieser Wert für alle Module erreicht (siehe Tabelle 6.1 und Tabelle A.2).

Rauschmessungen erlauben es, etwas über die Qualität der zusammengebauten Hybride auszusagen. Zu hohes Rauschen kann unter anderem dadurch verursacht werden, dass der Klebstoff sich auf eine größere Fläche als vorgesehen verteilt hat. Einzelne Kanäle können anhand ihrer Rauschwerte untersucht werden. Abbildung 6.9 zeigt mögliche Unterschiede in den Messergebnissen: in (a) sind normale Werte dargestellt. Bei (b) haben mehrere Kanäle (zwei oder mehr) stark erhöhtes Rauschen, was darauf hindeutet, dass sich die Bonddrähte berühren, oder dass eine andere Störung vorliegt. (c) zeigt einige Kanäle mit niedrigerem Rauschen. Diese haben einen Wert von etwa 400 Elektronen, was darauf hindeutet, dass sie nicht mit dem Sensor verbunden sind. Ganz rechts ist ein Auslesechip abgebildet, bei dem zum Nachbarchip hin das Rauschen abnimmt. Durch die Sensorsegmente mit schrägen Streifen nimmt die Streifenlänge zu einer Sensorseite hin ab, wodurch auch das Rauschen dieser Streifen abnimmt. Dass dies anscheinend zur Sensormitte hin geschieht, liegt an der Richtung in der die Kanäle ausgelesen werden und der Adressierung der Auslesechips (siehe Abbildung 6.10). Die Auslesechips mit den Adressierungen 32 bis 41 werden in der gleichen Richtung ausgelesen, in der die Adressierung zunimmt (obere Reihe in Abbildung 6.10). Die anderen zehn Auslesechips mit den Adressierungen 64 bis 73 sind auf dem Hybrid gegenüberliegend angeordnet, wodurch ihre Ausleserichtung entgegengesetzt der Adressnummernzunahme verläuft (untere Reihe in Abbildung 6.10). In den Diagrammen des HSIO-Auslesesystems werden die Daten der Auslesechips von links nach rechts mit steigender Adressierung angezeigt. Dadurch werden die Kanäle der Chips mit den Nummern 64 bis 73 in umgekehrter Reihenfolge dargestellt.

6.2.1. Variation der Hochspannung

Die bisher gezeigten Messwerte wurden alle bei der gleichen Spannung von 200 V am Sensor aufgenommen. Für jedes Modul wurden weiterhin auch Rauschmessungen bei verschiedenen Spannungen aufgenommen. Dazu wird die Spannung ab einem niedrigen Startwert langsam erhöht und anschließend wieder auf den Ausgangspunkt abgesenkt. Für vergleichende Ergebnisse wurden *Three Point Gain Tests* mit einer mittleren injizierten Testladung von 1 fC bei einer Kühlmitteltemperatur von 8°C durchgeführt. Im folgenden werden die Ergebnisse für verschiedene Module gezeigt.

Module_0 Für Module_0 wurde eine Spannungsabtastung mit dem DC-DC Testrahmen durchgeführt, beginnend bei einer Startspannung von 100 V bis zu einem Maximal-

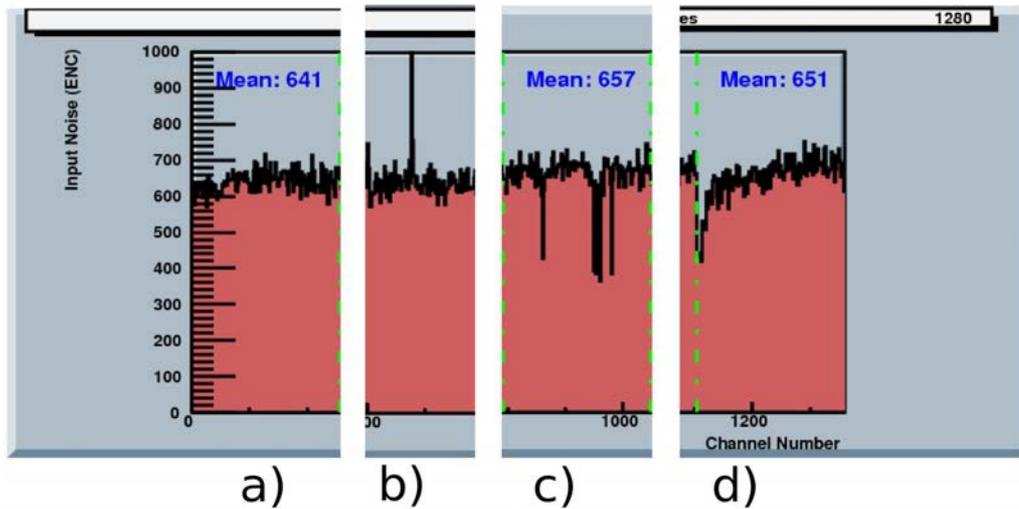


Abbildung 6.9.: Ausgewählte Rauschmessungen, aus dessen Vergleich Probleme und Fehler beim Modulbau erkennbar sind: a) gute Kanäle, b) Kanäle mit sehr hohem Rauschen, c) ungebondete Kanäle, d) kürzere Streifenlänge.



Abbildung 6.10.: Schematische Darstellung eines Hybrids mit Ausleserichtung (blaue Pfeile) der ASICs (Adressierung gelb). Die Darstellung der Rauschmessungen für 10 Auslesechips erfolgt in einem Histogramm, wobei von links nach rechts die ASIC-Nummerierung ansteigt (durch gelben Pfeil symbolisiert). Für die ASICs 32 bis 41 stimmt die Ausleserichtung mit der Darstellungsrichtung überein, nicht aber für die ASICs 64 bis 73. Dadurch ist beispielsweise für ASIC 64 der erste angezeigte Kanal nicht auch der Sensorstreifen ganz links.

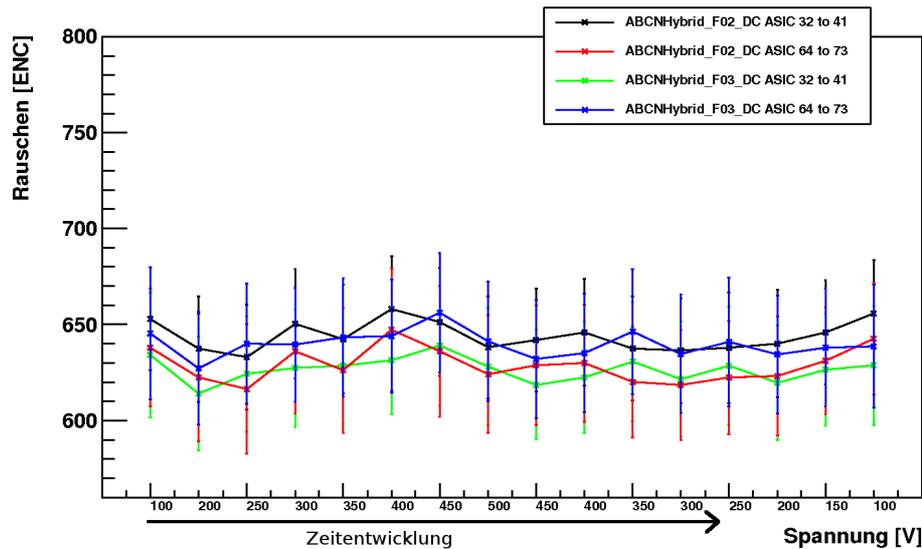


Abbildung 6.11.: Rauschen bei einer Spannungsabastung von Module_0 mit dem DC-DC Rahmen. Die dargestellte Spannung gibt von links nach rechte den zeitlichen Verlauf der Messung wieder.

wert von 500 V. In Abbildung 6.11 ist das Ergebnis dargestellt, wobei die Spannung von links nach rechts zuerst ansteigt bis zum Maximalwert und dann wieder sinkt. Diese Spannungsabfolge wird bei allen weiteren Diagrammen beibehalten und entspricht der zeitlichen Entwicklung der Spannung, die am Sensor angelegt wird. Dabei wurde jeweils für eine Reihe von 10 Auslesechips der Mittelwert gebildet. Die Fehlerbalken ergeben sich aus Formel 5.2 wobei hier nicht die Unsicherheit des Mittelwerts sondern die Unsicherheit des Einzelwerts verwendet wird. Dies geschieht, damit die Fehlerbalken eine Aussage über die Variation der Rauschwerte der einzelnen Kanäle bei der Mittelwertbildung ermöglichen. Die Abbildung zeigt einen flachen Verlauf mit Rauschwerten von maximal 650 Elektronen. Dies entspricht den Erwartungen: Sobald der Sensor verarmt ist, sollte das Rauschen auch mit höherer Spannung nicht weiter ansteigen.

Module_1 Die Ergebnisse der Spannungsabastung für Module_1 sind in den Abbildungen 6.12 und 6.13 dargestellt. Die maximale an den Sensor angelegte Spannung von 600 V liegt höher als die empfohlene Maximalspannung der Hybride von 500 V, jedoch sind keine Schäden bemerkbar. Bei diesen Tests zeigt sich die schon früher festgestellte Diskrepanz zwischen Reihenschaltung und Parallelschaltung der Hybride: Bei der Reihenschaltung (Abbildung 6.12) ist das Rauschen deutlich höher als bei der Parallelschaltung (Abbildung 6.13). Im Gegensatz zu Module_0 ist der Kurvenverlauf bei Parallelschaltung der Module nicht mehr gleichbleibend flach: Das anfängliche Abfallen des Rauschens deutet darauf hin, dass der Sensor bei 200 V noch nicht vollständig verarmt ist. Beim Senken der Spannung zeigt sich allerdings ein deutliches Ansteigen des Rauschens, weit über die vorher gemessenen Werte hinaus. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten könnte ei-

ne Temperaturerhöhung während der Messung sein. Um dies nachzuprüfen wurden über einen längeren Zeitraum mehrere Messungen bei gleichbleibenden Bedingungen (200 V Spannung, 8°C Kühlmitteltemperatur) durchgeführt. In Abbildung 6.14 zeigt sich, dass sich das Rauschen innerhalb der ersten Stunden um bis zu 50 Elektronen erhöht, danach hingegen einigermaßen konstant bleibt. Während des gesamten Tests wurden die Hybride mit Spannung versorgt. Bei der Durchführung der Messung, wenn die Auslesechips arbeiten, steigt die Temperatur noch einmal deutlich um mehrere Grad, was durch die Messung eines temperaturabhängigen Widerstands auf dem Hybrid sichtbar ist. Da zwischen den einzelnen Messpunkten jeweils eine Zeitdifferenz von bis zu einer Stunde liegt, konnte sich das Module etwas abkühlen, wohingegen bei der Spannungsabtastung die Messungen innerhalb kurzer Zeit durchgeführt werden. Dies erklärt das Verhalten, dass die Werte unterhalb der aus der Spannungsabtastung ermittelten Maximalwerte bleiben.

Module_2 In Abbildung 6.15 und Abbildung 6.16 sind die Resultate der Spannungsabtastung für Module_2 gezeigt. Für beide Möglichkeiten der Hybrid-Spannungsversorgung zeigt sich das erwartete flache Verhalten bis zu einem Wert von etwa 400 V beim Senken der *Biasspannung*. Bei den weiteren Messwerten nimmt das Rauschen deutlich zu.

6.2.2. Messunsicherheit der einzelnen Kanäle

Die im vorherigen Abschnitt verwendeten Fehlerbalken der Rauschwerte sollen vor allem die Variation der einzelnen Kanäle der Auslesechips bei der Berechnung der Mittelwerte zeigen. Für eine qualitative Aussage über die Messgenauigkeit des Rauschens eines Kanals ist die verwendete Methode nicht geeignet, da bei der Berechnung verschiedene Kanäle gemittelt werden. Um eine Abschätzung der Messgenauigkeit eines Kanals zu erhalten, muss ein Modul mehrfach bei gleichen Bedingungen gemessen werden.

Dazu wurden mit Module_2 auf dem DC-DC Rahmen 250 Messungen bei einer *Biasspannung* von 200 V und einer Kühlmitteltemperatur von 8°C durchgeführt, wobei sich eine Gesamtmesszeit von fast 24 Stunden. In Abbildung 6.17 sind die Ergebnisse der Rauschmessungen gezeigt. Wie bei den Spannungsabtastungen zeigt sich ein Ansteigen des Rauschen mit der Messzeit. Die angenommene Temperaturerhöhung als Grund erklärt allerdings nicht, wieso das Rauschen auch nach fast 24 Stunden nicht konstant ist. Dies ist anhand der eingezeichneten horizontalen Linien ersichtlich, wobei der Effekt stark nachlässt und sich das Rauschen ab etwa der 150. Messungen nur noch wenig ansteigt.

Für die Bestimmung der Messunsicherheit der einzelnen Kanäle werden die ersten 50 Messungen nicht verwendet, da das Rauschen in diesem Bereich sehr stark ansteigt. Dies ist in der Abbildung als vertikale Linie dargestellt. Als Grundlage der Berechnung der Unsicherheit der Rauschmessung eines Kanals dient Formel 5.3, doch anstatt wie bisher über die Messwerte aller Kanäle zu summieren wird nun für jeden Kanal ein Wert durch Summation aller Messungen verwendet. In Abbildung 6.18 sind die Ergebnisse für die beiden Hybride des Moduls zusammengefasst: Oben sind die Rauschwerte aller Kanäle und aller Messungen in einem Histogramm dargestellt. Dabei wird der Unterschied der Mit-

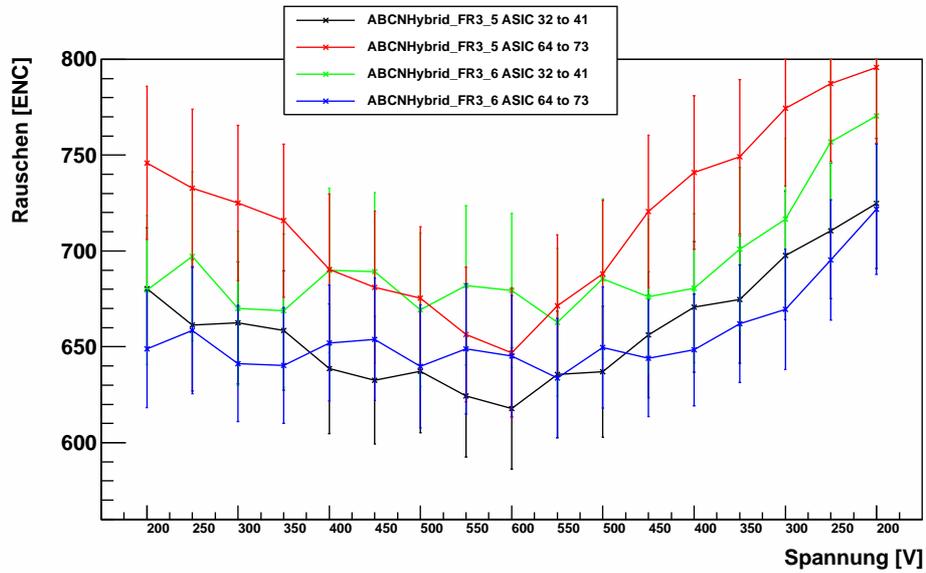


Abbildung 6.12.: Rauschen bei Spannungsabtastung von Module_1 mit dem SP Rahmen. Die dargestellte Spannung gibt von links nach rechte den zeitlichen Verlauf der Messung wieder.

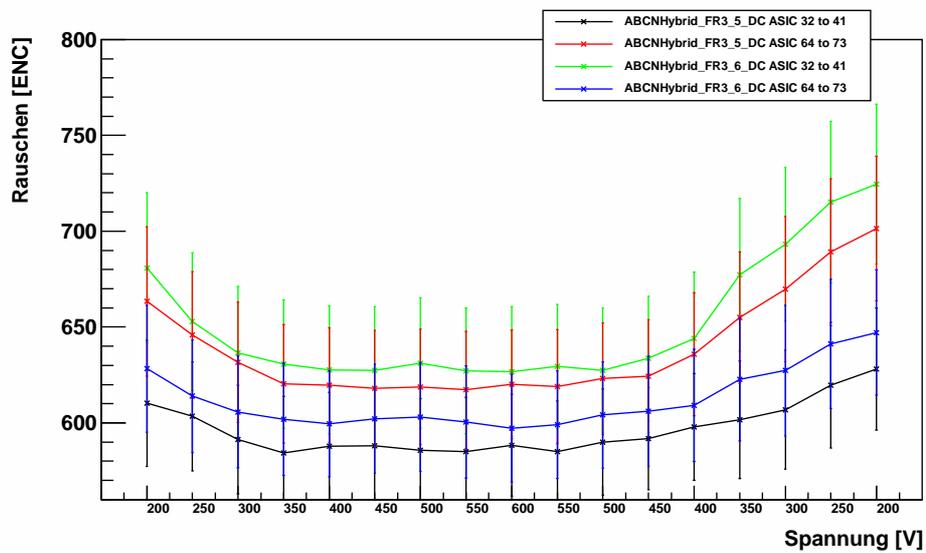


Abbildung 6.13.: Rauschen bei Spannungsabtastung von Module_1 mit dem DC-DC Rahmen. Die dargestellte Spannung gibt von links nach rechte den zeitlichen Verlauf der Messung wieder.

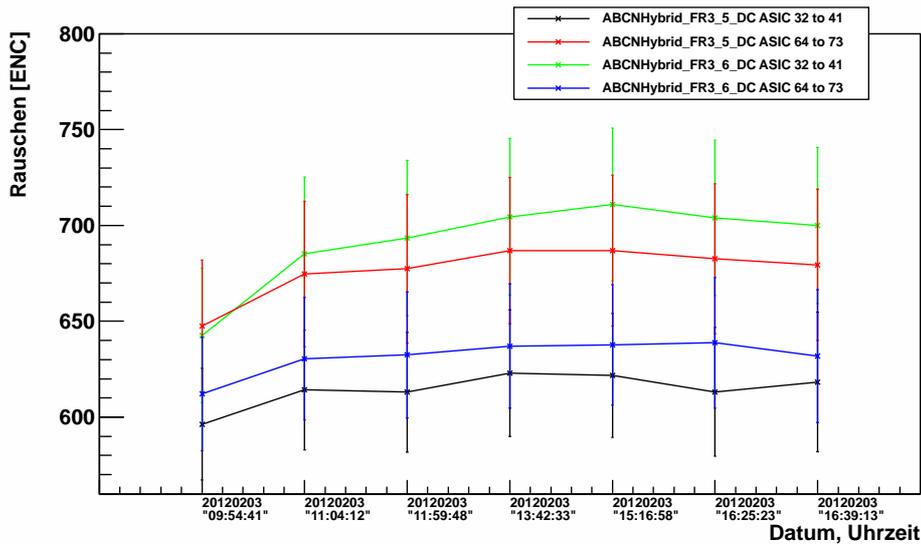


Abbildung 6.14.: Rauschen bei einem Dauertest von Module_1 auf dem DC-DC Rahmen.

telwerte der beiden Hybride deutlich: Bei FR3_3 liegt der Mittelwert des Rauschens bei 644 Elektronen und bei FR3_4 liegt er bei 659 Elektronen. In den unteren Histogrammen sind die Unsicherheiten der einzelnen Kanäle aufgetragen. Für Hybrid FR3_3 ergibt sich eine mittlere Messunsicherheit auf die Rauschmessung eines Kanals von ± 25 Elektronen und für Hybrid FR3_4 eine mittlere Messunsicherheit von ± 26 Elektronen. Durch das Ansteigen der Rauschwerte mit der Zeit steigt mit dieser Methode auch die Messunsicherheit der Einzelkanäle.

Das gleiche Verfahren wurde auch auf ein einzelnes Hybrid (FR6_1) angewendet. Abbildung 6.19 zeigt das Rauschen der Langzeitmessung mit 200 Messwerten. Nach einem anfänglichen Anstieg des Rauschens von etwa 5 Elektronen pendeln sich die Werte bei etwa 395 Elektronen ein und bleiben während der gesamten Messung nahezu konstant.

Die Auswertung ist in Abbildung 6.20 dargestellt: Das Rauschen aller Kanäle von allen Messungen (Abbildung oben) ergibt einen Mittelwert von 396 Elektronen. Die Verteilung der Werte ist unerwartet breit, es gibt eine signifikante Anzahl an Messwerten die ein Rauschen von 350 Elektronen oder 440 Elektronen zeigen. Das Rauschen des Hybrids wird lediglich durch die elektronischen Komponenten verursacht, wodurch erwartet werden kann, dass die Verteilung wesentlich schmäler ist. Dies spiegelt sich auch in der Messunsicherheit des Rauschens für einen Einzelkanal wieder, der bei ± 19 Elektronen liegt (mittlere Abbildung).

Der Vergleich zwischen den Werten für ein Modul und einem einzelnen Hybrid zeigt, dass die Messunsicherheit des Rauschens für einen Kanal hauptsächlich auf die Streuung der Werte beim Hybrid zurückzuführen ist. Durch die Verbindung von Sensor und Hybrid steigt die Messunsicherheit für einen einzelnen Kanal um etwa 6 Elektronen.

In Tabelle 6.2 sind noch einmal die wichtigsten Resultate zusammengefasst: Der Ver-

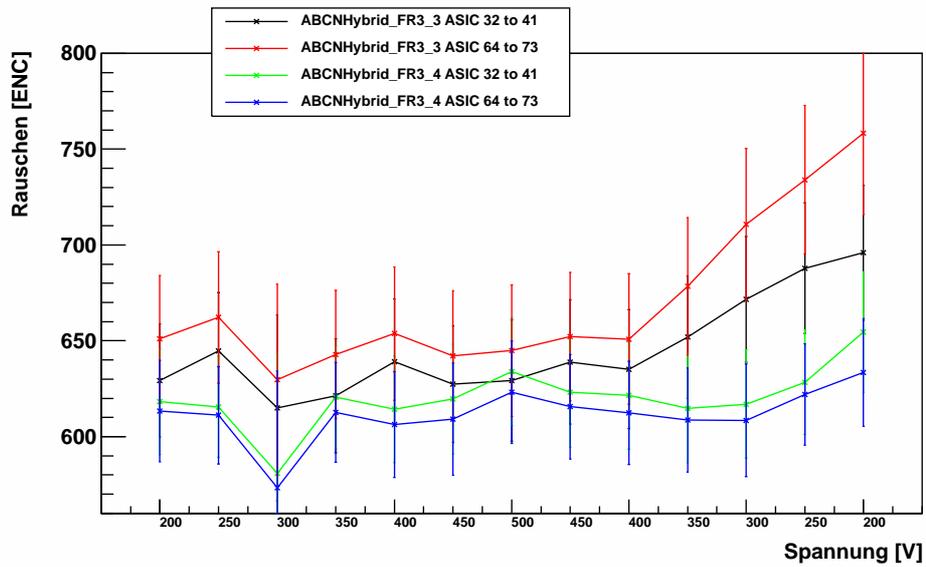


Abbildung 6.15.: Rauschen bei Spannungsabtastung von Module_2 mit dem SP Rahmen. Die dargestellte Spannung gibt von links nach rechte den zeitlichen Verlauf der Messung wieder.

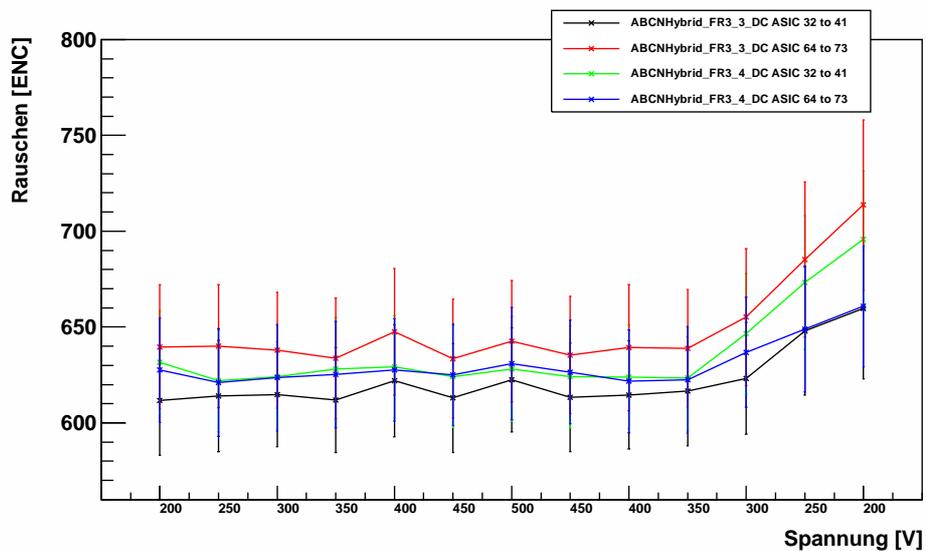


Abbildung 6.16.: Rauschen bei Spannungsabtastung von Module_2 mit dem DC-DC Rahmen. Die dargestellte Spannung gibt von links nach rechte den zeitlichen Verlauf der Messung wieder.

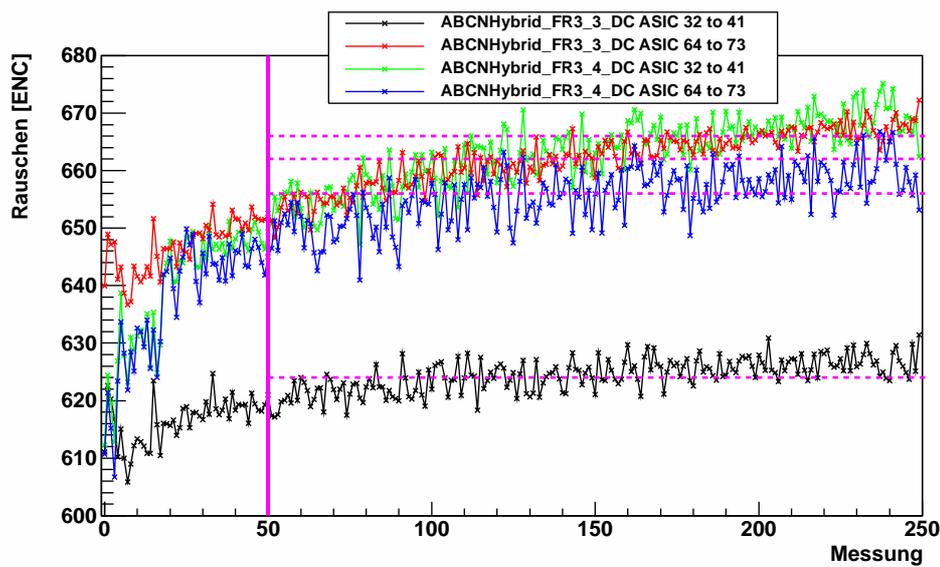


Abbildung 6.17.: Rauschen einer Dauermessung von Module_2 auf dem DC-DC Rahmen. Die x-Achse zeigt die Nummerierung der Messungen.

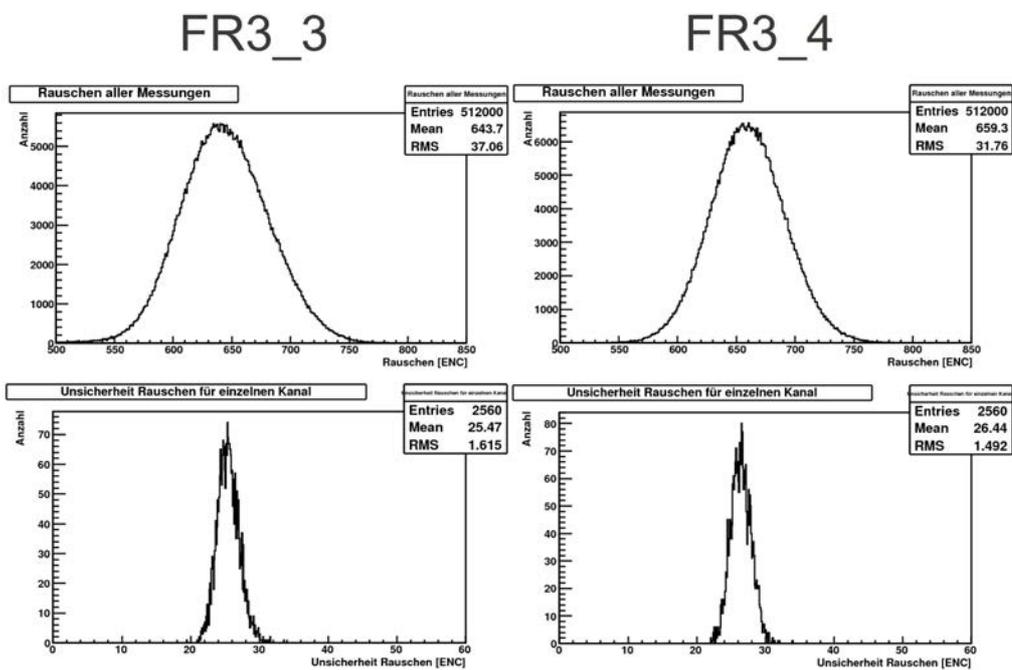


Abbildung 6.18.: Histogramme mit Ergebnissen zur Einzelkanalmessunsicherheit des Rauschens beider Hybride von Module_2; Oben: Rauschen aller Kanäle und aller Messungen; Unten: Messunsicherheit des Rauschens der einzelnen Kanäle.

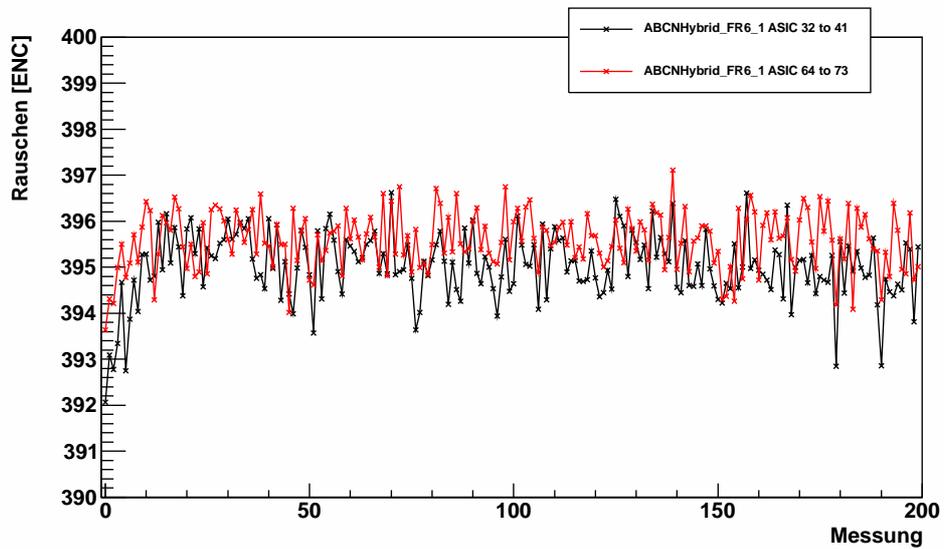


Abbildung 6.19.: Rauschen bei einer Dauermessung von Hybrid FR6_1. Die x-Achse zeigt die Nummerierung der Messungen.

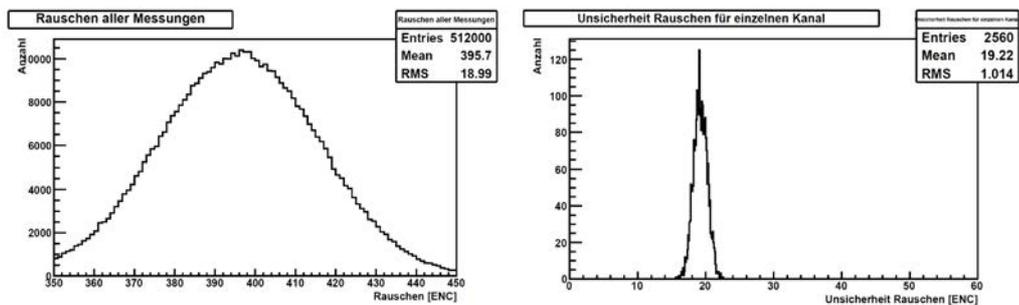


Abbildung 6.20.: Histogramme mit Ergebnissen zur Einzelkanalmessunsicherheit des Rauschens von Hybrid FR6_1; Links: Rauschen aller Kanäle und aller Messungen; Rechts: Messunsicherheit des Rauschens der einzelnen Kanäle.

Modul	Hybrid	SP Rahmen Rauschen [ENC]	DC-DC Rahmen Rauschen [ENC]	Verhalten des Rauschens bei Spannungsabtastung
Module_0	F02 A	631 ± 2	638 ± 3	DC: flacher Verlauf
	F02 B	629 ± 3	621 ± 3	
	F03 A	653 ± 3	614 ± 3	
	F03 B	666 ± 3	627 ± 4	
Module_1	FR3_5 A	725 ± 9	657 ± 5	SP: starker Anstieg bei sinkender <i>Biasspannung</i> nach Erreichen des Maximalwerts; DC: flach in der Nähe der maximalen <i>Biasspannung</i> , stark ansteigend bei anschließendem Sinken der <i>Biasspannung</i>
	FR3_5 B	661 ± 5	606 ± 5	
	FR3_6 A	669 ± 2	661 ± 4	
	FR3_6 B	648 ± 2	616 ± 5	
Module_2	FR3_3 A	626 ± 3	611 ± 4	SP/DC: anfänglich flach, beim Senken der Spannung vom Maximum zum Ausgangswert ansteigend
	FR3_3 B	666 ± 4	640 ± 3	
	FR3_4 A	613 ± 4	612 ± 2	
	FR3_4 B	607 ± 2	611 ± 3	

Tabelle 6.2.: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Rauschmessungen (Mittelwerte) für die drei in dieser Arbeit verwendeten Module bei einer *Biasspannung* von 200 V und einer Kühlmitteltemperatur von 8°C. Die Unsicherheiten ergeben sich aus der mittleren quadratischen Abweichung des Mittelwerts.

gleich zwischen SP Testrahmen und DC-DC Testrahmen zeigt, dass das Rauschen beim Verwenden des DC-DC Rahmens kleiner ist. Die Spannungsabtastung zeigt ein Ansteigen des Rauschens beim Senken der Spannung vom Maximalwert zum Ausgangswert, was durch einen Temperaturanstieg des Moduls erklärt werden kann.

6.3. Tests am CERN

6.3.1. Teststand am CERN

Ein Teststand mit HSIO-Auslesesystemen befindet sich im Reinraum des Gebäudes 180 auf dem CERN-Gelände (siehe TWiki Seite [B1812]). Die Abbildungen 6.21 und 6.22 zeigen den dortigen Aufbau: Ein Unterschied zum Aufbau in Freiburg ist, dass sich die *Module Testing Plate* in einem lichtdichten Gefrierschrank befindet. Zusätzlich zum Teststand für einzelne Module ist es auch möglich größere Strukturen zu testen.

Die einzelnen Module sollen zu einem bis zu zwei Meter langen *Stave* zusammengebaut werden. Um das Zusammenspiel mehrere Module zu testen, werden kleinere Test-

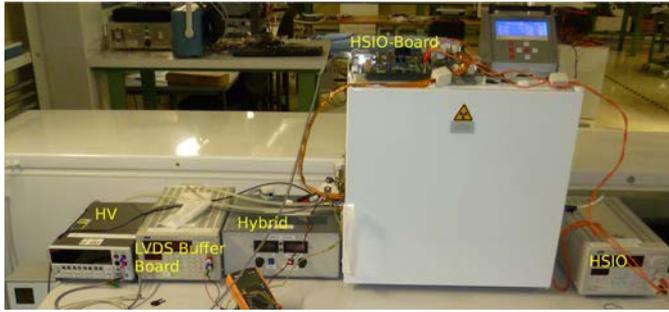


Abbildung 6.21.: CERN Teststand für Modultests; links Netzteile für die Spannungsversorgung des Sensors, des *LVDS Buffer Boards*, der Hybride; daneben eine Gefriertruhe mit der *Module Testing Plate* und ganz rechts das Netzteil für die Spannungsversorgung des *HSIO-Boards*.

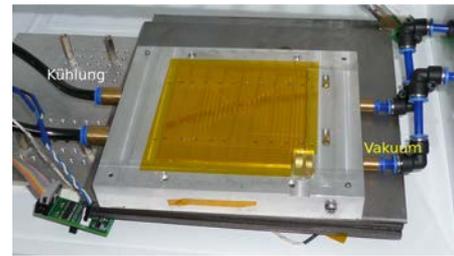


Abbildung 6.22.: Details des CERN Teststands für Modultests: *Module Testing Plate* mit Anschlüssen für Vakuum (rechts) und Kühlflüssigkeit (links). Isolation der Testplatte für die Hochspannung erfolgt durch oranges Kapton-Klebeband.

strukturen gebaut, die *Stavelets*. Sie bestehen anstelle von 12 Modulen nur aus vier. Abbildung 6.23 zeigt ein solches *Stavelet*: die vier Module sind auf einen Kohlefaserkern geklebt, in dem sich eine Titanröhre zur Kühlung befindet. Auf diesem *Stavelet* sind die Hybride parallel geschaltet nach der gleichen Methode wie in den DC-DC Teststrahlen, daher die Bezeichnung DC-DC *Stavelet*. Rechts neben den Modulen befindet sich die *End-of-Stave-Karte* (EOS), über die die Auslese erfolgt und die Spannungsversorgung, sowohl der Sensoren als auch der Hybride geregelt wird. Das hier abgebildete *Stavelet* befindet sich in einer Aluminiumtransportbox, da es nicht auf dem CERN-Gelände montiert wurde, sondern im Rutherford Appleton Laboratory in England. Die Module wurden in Liverpool zusammengebaut.

Abbildung 6.24 zeigt den lichtdichten Teststand für ein *Stavelet* und in Abbildung 6.25 ist dessen Inneres zu sehen. Über dem *Stavelet* befindet sich eine motorisierte Testhalterung für verschiedenen Sonden. Das elektromagnetische Feld in der *Stavelet*-Umgebung kann vermessen werden und es können Messungen durchgeführt werden, bei denen mit einem Laser Ladungen im Silizium erzeugt werden.

6.3.2. Vergleichsmessungen von Modulen

Jedes HSIO-Auslesesystem kann durch nahegelegene Geräte unterschiedlich stark beeinflusst werden. Um zu untersuchen, inwieweit die Messungen in Freiburg mit Messungen anderer Gruppen vergleichbar sind, wurden zwei Module mit dem HSIO-Auslesesystem am CERN getestet, die zuvor in Freiburg getestet wurden. Des Weiteren sollen diese Messungen überprüfen, ob der bei den Spannungsabtastungen beobachtete Anstieg des Rauschens (beim Senken der Spannung zum Ausgangswert) auch an anderen Teststationen beobachtet wird.



Abbildung 6.23.: DC-DC *Stavelet* in Aluminiumtransportbox: Ein aus vier Modulen aufgebautes *Stavelet*, dessen Module parallel geschaltet sind. Rechts neben den Modulen befindet sich die *End-of-Stave*-Karte, über die die Auslese und die Spannungsversorgung geregelt wird.



Abbildung 6.24.: Lichtdichte Box des CERN Teststand für ein *Stavelet*.

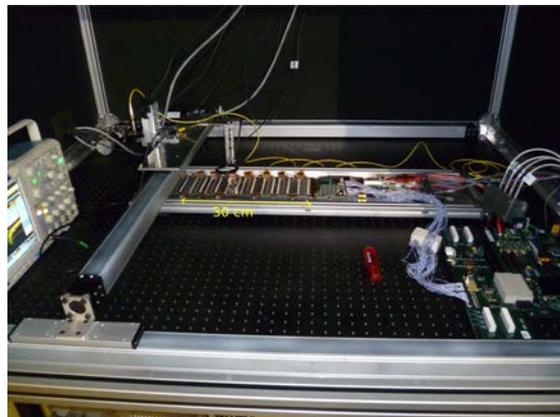


Abbildung 6.25.: Innenansicht des CERN Teststand für ein *Stavelet*. Über dem *Stavelet* befindet sich eine motorisierte Testhalterung, hier mit einer Sonde für Feldmessungen, rechts am Bildrand ist das HSIO-Auslesesystem zu erkennen.

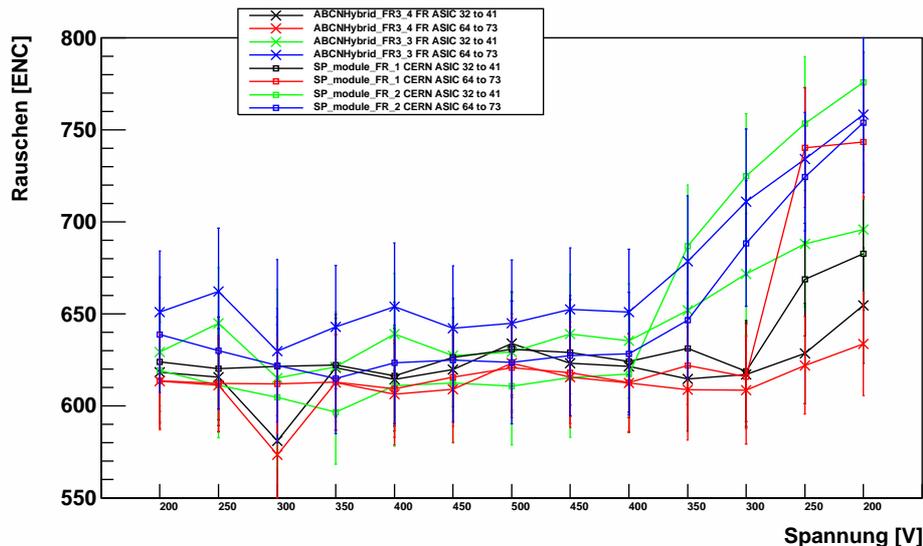


Abbildung 6.26.: Module_2 auf SP Teststrahlen: Vergleich des Rauschens bei einer Spannungsabtastung zwischen Freiburg (Kreuze) und CERN (Quadrate), durchgeführt in Freiburg am 17.02.2012 und am CERN am 20.03.2012. Die dargestellte Spannung gibt von links nach rechte den zeitlichen Verlauf der Messung wieder.

Variation der Hochspannung Eines der getesteten Module ist Module_2, welches mit einem Teststrahlen zur Reihenschaltung der Hybride verbunden ist. In Abbildung 6.26 sind die Ergebnisse der Messungen dargestellt: Es wurde eine Spannungsabtastung von 200 V bis zu einem Maximalwert von 500 V und einem anschließenden Absenken auf den Ausgangswert durchgeführt. Die in Freiburg erhaltenen Messwerte sind durch Kreuze dargestellt, während die am CERN erhaltenen Werte durch Quadrate symbolisiert sind. Zum besseren Vergleich der Werte sind gleiche Reihen von Auslesechips gleich eingefärbt.

Bis zum Wert von 400 V bei sinkender Spannung stimmen alle Messwerte innerhalb der dargestellten Unsicherheit überein. Danach kommt es bei zwei Reihen von Auslesechips zu größeren Abweichungen von bis zu 80 Elektronen, die durchaus ein Effekt des steigenden Rauschens sein können.

Da bei den bisherigen Tests die Messungen von in Reihe geschalteten Hybriden stets höheres Rauschen zeigen, wurde ein zweites Module mit parallel versorgten Hybriden getestet (Module_1). Die erhaltenen Ergebnisse, in Abbildung 6.27, zeigen nur geringfügige Abweichungen im Rauschen, die im Allgemeinen 20 Elektronen nicht überschreiten.

Variation der Hybridspannung Da die Hybridspannung für ein Modul mit parallel geschalteten Hybriden von den DC Transformatoren so geregelt wird, dass immer 2.5 V am Hybrid anliegen, können verschiedene Spannungen an den Eingang des Transformators angelegt werden, wobei sich dabei die Stromstärke entsprechend ändert. Bei den bisher in Freiburg durchgeführten Messungen wurde eine Spannung von 5 V verwendet. Die am CERN durchgeführten Messungen mit anderen Modulen erfolgten allerdings bei

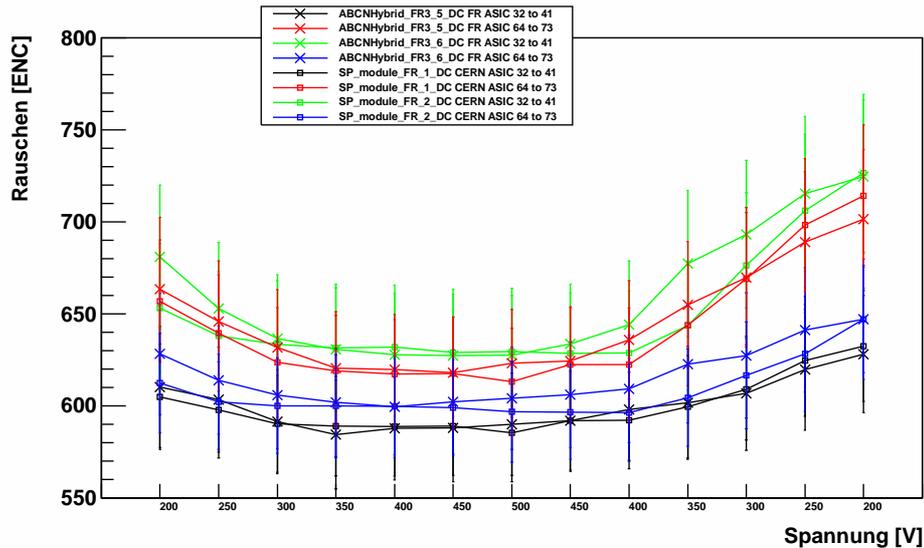


Abbildung 6.27.: Module_1 auf DC-DC Teststrahlen: Vergleich des Rauschens bei einer Spannungsabtastung zwischen Freiburg (Kreuze) und CERN (Quadrate), durchgeführt in Freiburg am 02.02.2012 und am CERN am 26.03.2012. Die dargestellte Spannung gibt von links nach rechte den zeitlichen Verlauf der Messung wieder.

einer Spannung von 10 V. Um mögliche Veränderungen der Rauschwerte festzustellen, wurde eine Spannungsvariation der Hybridspannung durchgeführt, beginnend bei einer Spannung von 5 V bis zum Maximalwert von 10 V und wieder zurück zu 5 V.

Für Module_1 mit paralleler Spannungsversorgung der Hybride zeigen die Messwerte in Abbildung 6.28 bei steigender Hybridspannung und konstanter *Biasspannung* von 200 V ein Ansteigen der Rauschwerte um etwa 30 Elektronen. Allerdings sinken diese nicht mit abnehmender Spannung, was zu dem Schluss führt, dass dieser Effekt auf eine Temperaturerhöhung zu Beginn der Messung zurückzuführen ist. Bei maximal angelegter Spannung (10.0 V) hat sich die Temperatur eingependelt, so dass die Rauschwerte konstant bleiben. Bei den blauen (Hybrid FR3_6, hier FR_2; ASICs 64 bis 73) und schwarzen (Hybrid FR3_5, hier FR_1; ASICs 32 bis 41) Messwerten ist ein leichtes Sinken des Rauschens erkennbar. Am Ende erfolgte noch einmal eine Messung bei 10 V mit einem Unterschied des Rauschens von etwa 15 Elektronen.

Da bei Module_2 die Hybride in Reihe geschaltet sind, lässt sich hier die Spannung nur geringfügig variieren. Für den optimalen Betrieb der Hybride wird eine Stromstärke von 5 A benötigt. Um die Auswirkungen von Stromschwankungen zu untersuchen wurde deshalb eine Stromvariation durchgeführt, beginnend bei 4.5 A bis zu einem Maximalwert von 5.5 A und wieder zurück zu 4.5 A. Die Ergebnisse dieser Messreihe sind in Abbildung 6.29 dargestellt: Mit steigender Stromstärke steigt auch das Rauschen (sehr deutlich bei den blauen Messwerten (Hybrid FR3_6, hier FR_2; ASICs 64 bis 73)) bis zu einem Maximalwert bei maximaler Stromstärke. Dieser Wert bleibt stabil während des anschlie-

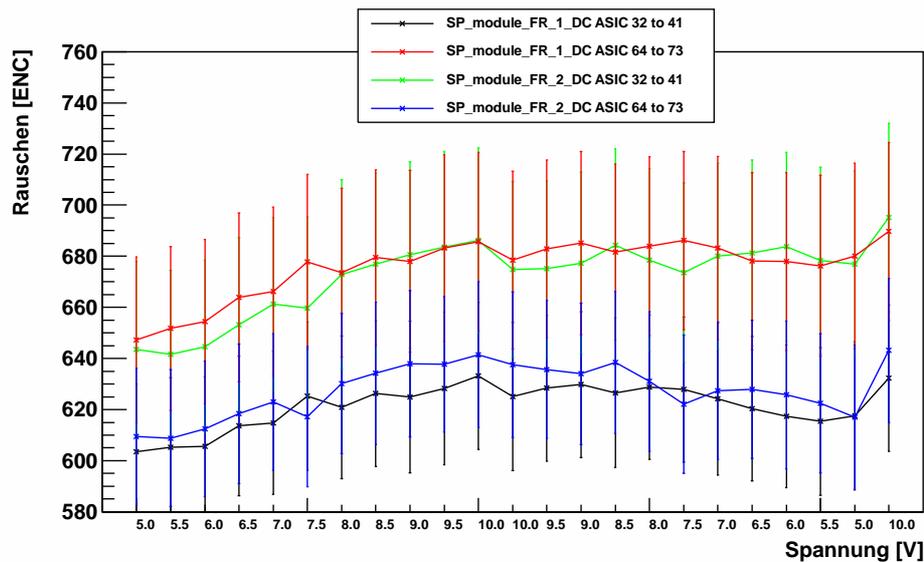


Abbildung 6.28.: Rauschen bei Variation der Hybridspannung bei Module_1 auf dem DC-DC Rahmen (CERN). Die dargestellte Spannung gibt von links nach rechte den zeitlichen Verlauf der Messung wieder.

ßen Senkens der Stromstärke, so dass analog zu Module_1 davon ausgegangen werden kann, dass es sich hierbei um einen Temperatureffekt handelt. Die maximale Variation der Rauschwerte ergibt einen Unterschied von etwa 30 Elektronen.

6.3.3. Messungen mit einem DC-DC *Stavelet*

Mit dem DC-DC *Stavelet* wurden verschiedene Messungen bei einer Temperatur des Kühlaggregates von 12°C und einer Hybridspannung von 10.3 V durchgeführt, um das Verhalten einer größeren Struktur zu untersuchen. Die Bezeichnungen der einzelnen Module und Hybride können Abbildung 6.30 entnommen werden. Ebenso wie bei den einzelnen Modulen wurde eine Spannungsabtastung durchgeführt: Beginnend bei 50 V wurde die Spannung bis zu einem Maximalwert von 300 V erhöht und anschließend wieder bis 100 V gesenkt. Der Maximalwert wird durch das Leckstromverhalten des Moduls M01 festgelegt (siehe dazu [Gar12]). Um die Stabilität der Messwerte zu überprüfen, wurde die Messung jedes Spannungswertes zweimal hintereinander durchgeführt. In Abbildung 6.31 sind die Ergebnisse dargestellt: Drei Module zeigen einen Abfall des Rauschens bis zu einem Minimalwert von 650 bis 700 Elektronen bei einer Sensorspannung oberhalb 250 V, lediglich Modul M03 zeigt für alle Reihen von Auslesechips ein konstantes Rauschen von etwa 620 Elektronen (ABCNmoduleM17_55) und 640 Elektronen (ABCNmoduleM17_56).

Auch das Verhalten des *Stavelets* bei verschiedenen Spannungen für die Hybride wurde untersucht. Dabei wurden die Werte von 10.3 V bis zu einem Maximum von 14.0 V und wieder zurück zu 10.3 V variiert, bei konstanter Hochspannung der Sensoren von 250 V. In Abbildung 6.32 ist ersichtlich, dass ein leichtes Ansteigen des Rauschens mit steigender

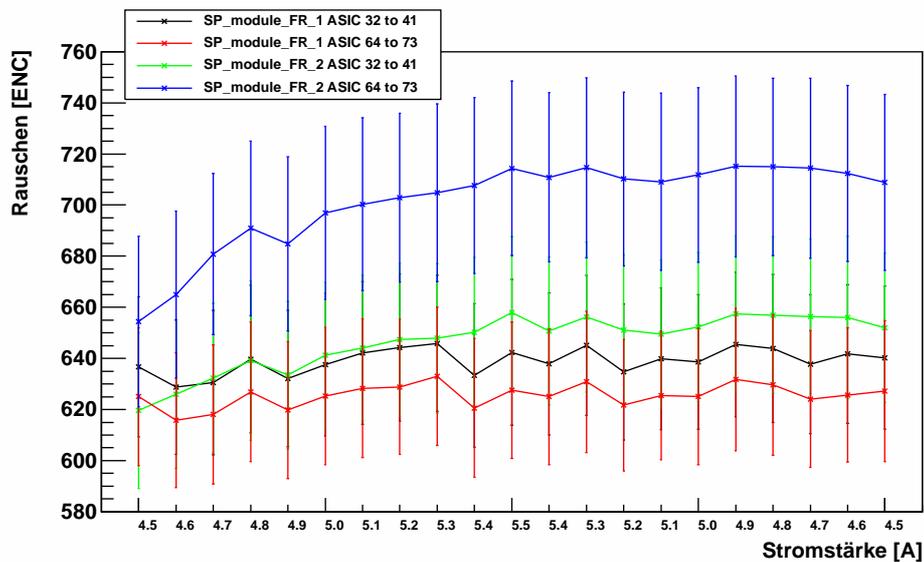


Abbildung 6.29.: Rauschen als Funktion der Hybridstromstärke bei Module_2 auf den SP Rahmen (CERN). Die dargestellte Stromstärke gibt von links nach rechte den zeitlichen Verlauf der Messung wieder.

M00	M01	M02	M03	EOS
ABCNmodule M16_62	ABCNmodule M14_60	ABCNmodule M15_58	ABCNmodule M17_56	EOS
ABCNmodule M16_61	ABCNmodule M14_59	ABCNmodule M15_57	ABCNmodule M17_55	

Abbildung 6.30.: Position der vier Module auf dem *Stavelet*: Links die Bezeichnung der Module zum einen für die graphische Benutzeroberfläche des HSIO-Auslesesystems (M00 ... M03) und darunter die Hybridbezeichnung. Rechts befindet sich das *End-of-Stave Board* (EOS).

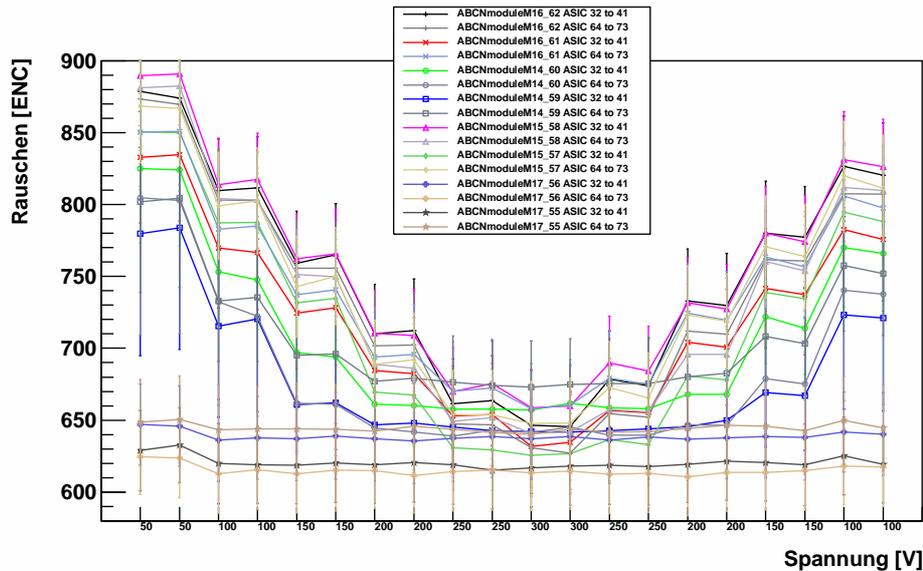


Abbildung 6.31.: Ergebnis des Rauschens bei einer Spannungsabtastrung für das DC-DC *Stavelet*. Die dargestellte Spannung gibt von links nach rechte den zeitlichen Verlauf der Messung wieder.

Spannung auftritt, sich die Werte allerdings bei sinkender Hybridspannung nicht wieder verändern.

Tests mit dem *Versatile Link* Im ATLAS-Detektor erfolgt die Datenübertragung durch Faseroptiken, wozu die Signale in Lichtimpulse umgewandelt werden müssen. Dies geschieht mittels des *Versatile Links* auf der *End-of-Stave*-Karte. Die dabei entstehenden Hochgeschwindigkeitssignale könnten durch kapazitive und induktive Kopplung, oder elektromagnetische Strahlung, andere Komponenten des *Staves* stören. Ein *Versatile Link* [VLP12] soll für die Datenübertragung im zukünftigen SCT verwendet werden, daher ist es von Interesse ob die Störungen sich auf das *Stavelet* auswirken. Zur Überprüfung möglicher Einflüsse wurde ein *Versatile Link Prototype* (VLP) verwendet, der nicht an das *Stavelet* angeschlossen war, sondern durch zusätzliche Geräte betrieben wird. In verschiedenen Tests wurde die Position des Prototyps verändert, um die Wechselwirkung mit verschiedenen Bauteilen zu überprüfen. Dazu wurden Rauschmessungen durchgeführt, wobei nur das direkt neben der *End-of-Stave* Karte liegende Module (M03) getestet wurde, da für dieses die größten Störungen zu erwarten sind:

1. Referenzmessung ohne VLP
2. VLP neben EOS positioniert, wie für *Stave* erwartet (Abbildung 6.33)
3. wie 2., nur Stromleitung unter VLP
4. VLP liegt auf EOS mit physischem Kontakt

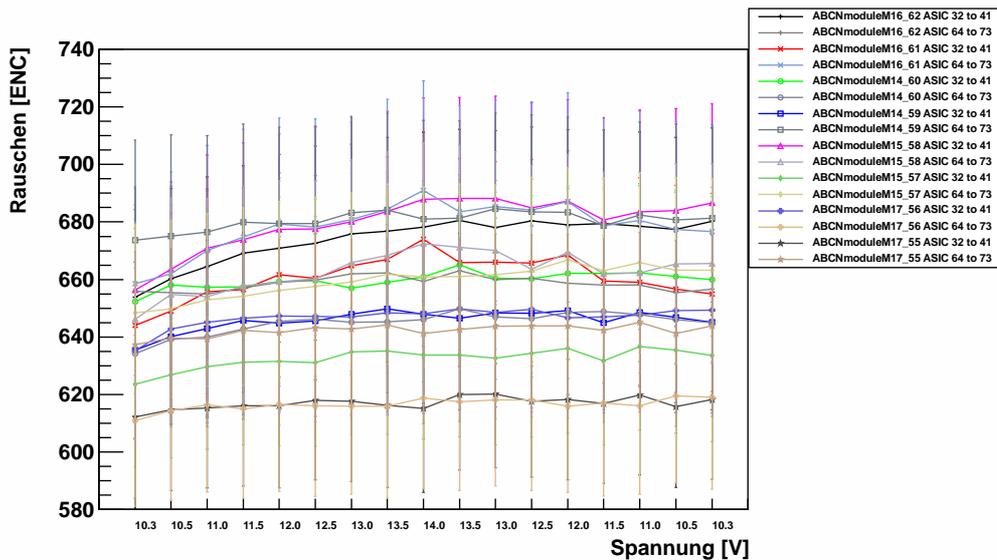


Abbildung 6.32.: Ergebnis des Rauschens bei einer Hybridspannungsvariation des DC-DC *Stavelets*. Die dargestellte Spannung gibt von links nach rechte den zeitlichen Verlauf der Messung wieder.

5. VLP wurde über Auslesechip positioniert mittels der motorisierten Testhalterung
6. VLP ausgeschaltet als Referenzmessung
7. vor Test Spannungsversorgung des *Stavelet* aus- und wieder eingeschaltet; VLP ausgeschaltet
8. wie 7. vor Test Spannungsversorgung aus- und wieder eingeschaltet; VLP eingeschaltet

In Abbildung 6.34 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Zwischen Messung 4 und 5 zeigt sich ein leichter Anstieg des Rauschens, allerdings bleibt der erhöhte Wert bei allen nachfolgenden Messungen konstant, so dass dies nicht auf eine Wechselwirkung zwischen *Stavelet* und *Versatile Link Prototype* zurückzuführen ist. Es ist hinsichtlich des Rauschens kein Einfluss des *Versatile Link Prototype* auf das *Stavelet* zu erkennen.

Die Details der Tests dieses Abschnitts sind in der ATLAS Internal Note ATL-COM-UPGRADE-2012-014 [GHTW12] beschrieben.

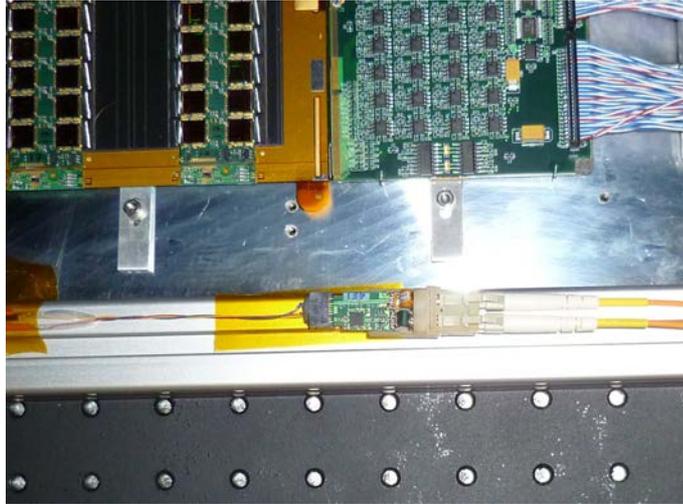


Abbildung 6.33.: Versatile Link Prototype (unten) mit optischen Leitungen (rechts) und Spannungsversorgung (links) neben *Stavelet*.

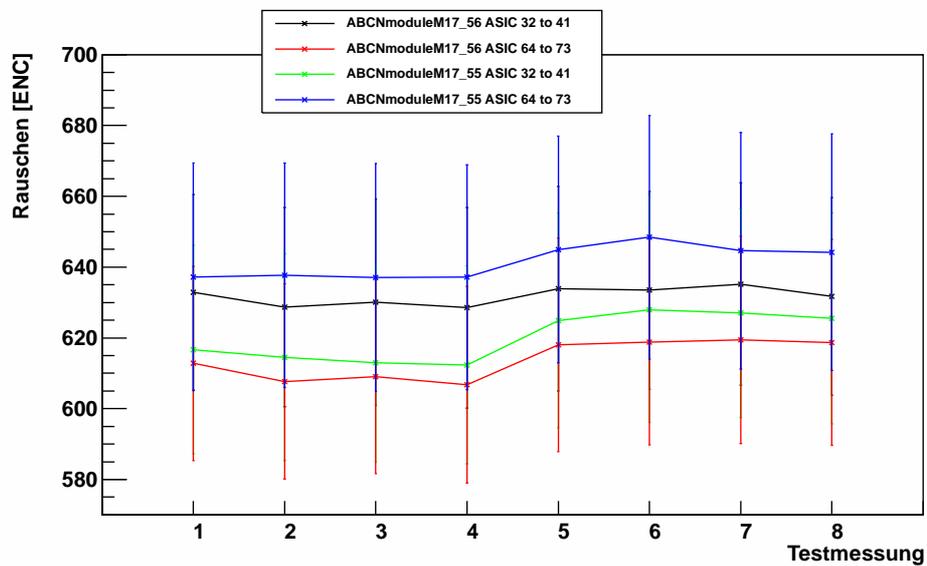


Abbildung 6.34.: Ergebnisse der Rauschmessungen mit dem DC-DC *Stavelet* und dem Versatile Link Prototype.

7. Endkappenmodulbau in Freiburg

Die Arbeitsgruppe Jakobs war beim bisherigen SCT in der Produktion der Endkappenmodule beteiligt. Auch für die Aufrüstung zum HL-LHC soll wieder eine aktive Rolle in den Endkappen übernommen werden. In diesem Kapitel werden die bisher durchgeführten Arbeiten im Endkappenbereich vorgestellt.

Durch den Bau von *Barrel*-Modulen konnten einige Erfahrungen im Bereich des *Stave*-Baus gemacht werden. Diese können für den Bau von Endkappenmodulen verwendet werden, um die Werkzeuge und Methoden, die benötigt werden, zu entwickeln. Entsprechend der kleinen Version der *Staves* im *Barrel*-Bereich, ist auch im Endkappenbereich der Bau einer kleinen *Petal*-Version geplant, das *Petalet*. Dabei wird ganz besonders auf zwei kritische Stellen des *Petals* eingegangen. Die Sensoren, die der Strahlachse am nächsten sind, sollen einen sehr kleinen Streifenabstand haben. Daraus resultiert, dass der Abstand der Auslesechips auf den Hybriden ebenfalls kleiner sein muss als im *Barrel*-Bereich. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass die Streifen der Endkappensensoren nicht parallel verlaufen, sondern dass mit steigendem Abstand von der Strahlachse auch der Streifenabstand wächst. Bei größeren Entfernungen von der Strahlachse wird auf dem *Petal* nicht mehr ein Sensor verwendet, sondern zwei nebeneinander liegende (siehe Abbildung 3.10). Mit dem *Petalet* soll der Übergang von einem Sensor zu zwei Sensoren getestet werden, da hier besondere Anforderungen an die Module gestellt werden. In Abbildung 7.1 ist das Modell eines *Petalets* abgebildet: Das *Petalet* besteht pro Seite aus drei Sensoren und wird analog zum *Stave*-Konzept auf beiden Seiten mit Modulen bestückt. Da der Streifenabstand an den Enden der Sensoren nicht konstant ist, stellt dies eine besondere Herausforderung für das Bonden von Hybrid auf den Sensor dar. Eine Methode zur Vereinfachung besteht darin, zusätzliche Bondpads auf der Sensoroberfläche anzubringen, die einen gleichmäßigen Abstand untereinander haben. In Abbildung 7.2 ist dies anhand des unteren Sensors dargestellt, wobei die zusätzlichen Bondpads (*Embedded Pads*) mittels einer zweiten Metallschicht realisiert werden. Alle Bondpads sind in rot dargestellt und die *Embedded Pads* sind durch einen grünen Kasten hervorgehoben.

Für den Bau der *Petals* gibt es zwei mögliche Versionen, die sich darin unterscheiden, wie die Hybride mit dem *Bustape* verbunden werden. Die erste Möglichkeit (*“Lamb & Flag“*¹) sieht vor, dass sich alle Anschlüsse an einer Seite des Hybrids befinden (siehe Abbildung 7.3 links). Dadurch hat jeder Sensor sein eigenes Hybrid und die Module sind

¹Die Versionen sind aus historischen Gründen nach Pubs in Oxford benannt.

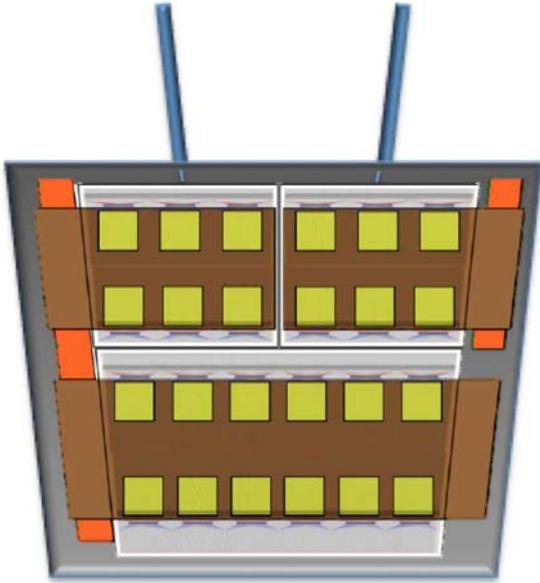


Abbildung 7.1.: Modell eines *Petalets* [Pet12b].

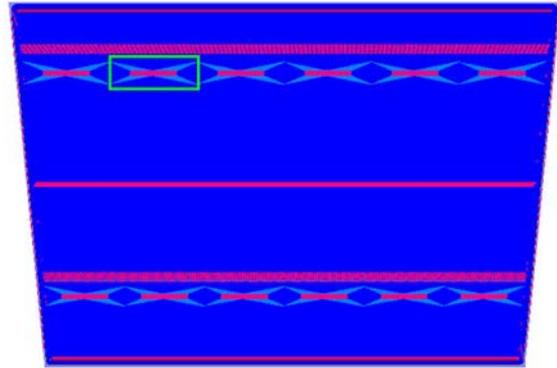


Abbildung 7.2.: Großer *Petaletsensor* mit normalen Bondpads (unterbrochene rote Linien) und *Embedded Pads* (in grünem Kasten) [UBL12].

unabhängig voneinander, was ein einfaches Testen der Module ermöglicht. Die Schwierigkeit dieses Designs liegt in dem Layout der Leitungsbahnen des *Bustapes*, da sowohl Spannungsversorgung als auch Datenleitungen direkt nebeneinander verlaufen müssen.

Bei der zweiten Möglichkeit (*“The Bear“*) befinden sich die Anschlüsse entsprechend den *Staves* an beiden Seiten der Hybride, wobei an einer Seite die Spannungsversorgung erfolgt und an der anderen die Datenleitungen weitergeleitet werden (siehe Abbildung 7.3 rechts). Bei diesem Design werden die Sensoren der Radien R4 bis R6 verbunden, da es zwischen den Hybriden auf den Sensoren Bonddrahtverbindungen für die Stromversorgung und die Datenleitung gibt. Der Vorteil dieser Version ist, dass die Planung des *Bustapes* erheblich vereinfacht wird.

Die Entwicklung und Herstellung der Sensoren für das *Petalet* erfolgt bei CNM² in Barcelona. Die Entwicklung der Hybride erfolgt in zwei Instituten: Das Hybrid für den großen Sensor wird im Physikalischen Institut der Universität Freiburg entworfen und die erste Version ist nach dem *“Bear“* Design hergestellt worden und hat die äußeren Abmessungen $(85 \times 28) \text{ mm}^2$. An der Universidad de Valencia werden die beiden kleineren Hybride für die oberen Sensoren entwickelt, wobei das Design des Freiburger Hybrids als Grundlage dient.

²Centre National de Microelectrónica

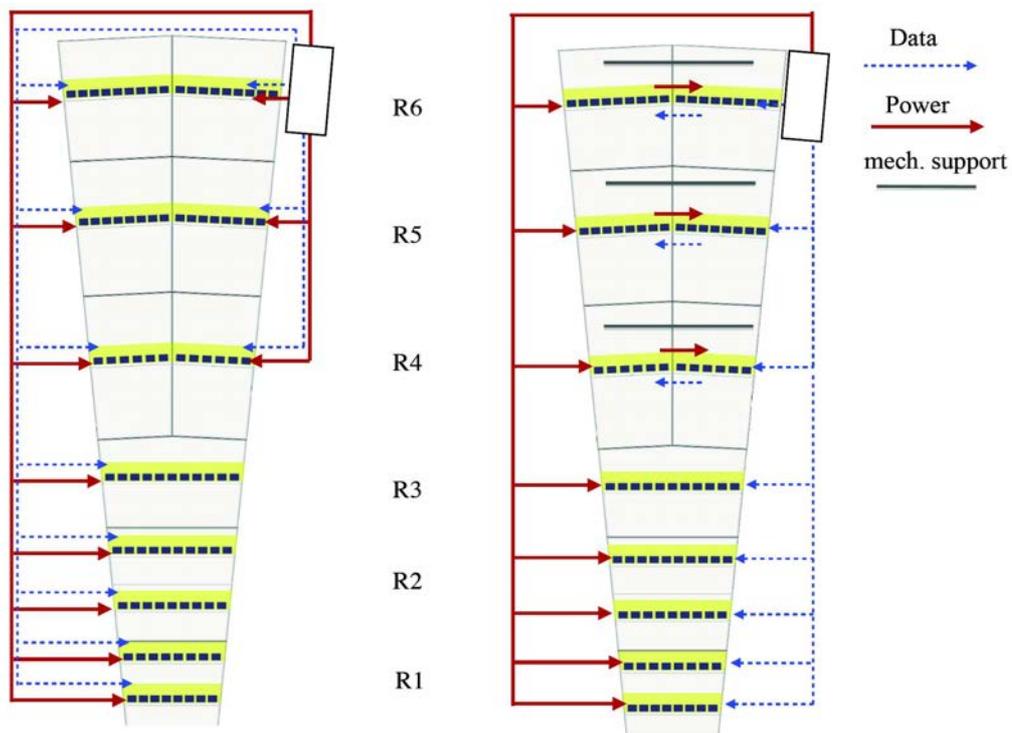


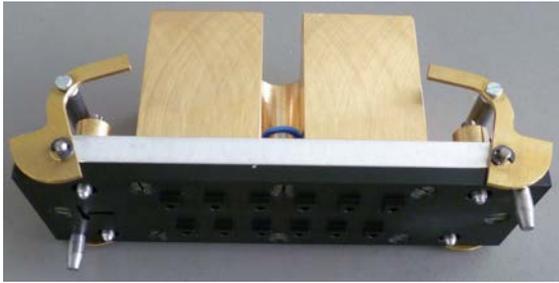
Abbildung 7.3.: Zwei Versionen für die Spannungsversorgung und Datenauslese eines *Petals*: links *”Lamb & Flag”*, rechts *”The Bear”* nach Referenz [Gro12]. R1 bis R6 bezeichnet die verschiedenen Sensorringe und rechts oben am *Petal* befindet sich die *End-of-Substruktur* Karte. Die gestrichelten Pfeile stellen den Weg der Datenleitungen dar, die durchgezogenen Pfeile die der Spannungsversorgung.

7.1. Werkzeuge

Verschiedene Werkzeuge werden zum Bestücken der Hybride mit Auslesechips und um Module zu bauen benötigt. Diese Werkzeuge wurden in Freiburg entwickelt und hergestellt. Die Pläne, die hauptsächlich vom Autor dieser Arbeit erstellt wurden, orientieren sich an den Werkzeugen zum Bau von *Barrel*-Modulen und sind auf der TWiki-Seite [Pet12a] für die *Petalet*-Kollaboration veröffentlicht. Alle Werkzeuge sind in Abbildung 7.4 abgebildet.

Die Endkappenhybride werden von der Firma Würth Elektronik in Deutschland hergestellt und einzeln, anstatt in einem *Panel*, ausgeliefert. Die Hybride werden daher zur Bestückung einzeln auf dem *Hybrid Assembly and Test Jig* (Abbildung 7.4 f) platziert um sie zu bestücken. Dazu werden die Auslesechips in den *Chip Tray* (Abbildung 7.4 e) eingeordnet und mit dem *Pickup Tool* (Abbildung 7.4 a) angehoben, um mit Hilfe des *ASIC Glue Stencils* (Abbildung 7.4 b) auf ihre Rückseite Silberleitkleber aufzutragen. Anschließend können die Hybride mit dem Testrahmen auf dem gleichen *Jig* getestet werden. Nach erfolgreicher Prüfung wird das Hybrid auf den Sensor geklebt, unter Verwendung des *Hybrid Glue Stencils* (Abbildung 7.4 c) und des *Module Building Jigs* (Abbildung 7.4 d). Der hier verwendete *Jig* trägt den speziellen Bondpads des Sensors Rechnung: Die Messingklötze an den beiden Seiten ermöglichen mit den Positionspins des *Pickup Tools* die Ausrichtung des Hybrids. Da die *Embedded Pads* einen Abstand von 3 cm zu den normalen Bondpads haben können über verschiedene Sätze von Messingklötzen die Hybride so auf den Sensor geklebt werden, dass das Hybrid mittig zwischen den normalen Bondpads oder den *Embedded Pads* liegt. Zum Testen der Module wird der *Module Test Jig* (Abbildung 7.4 g), der an das LBNL Design angelehnt ist, sowie der Testrahmen (Abbildung 7.4 h) verwendet. Für die elektrische Isolation der Sensorauflagefläche gegenüber dem restlichen *Jig* wird dieser vom Freiburger Materialforschungszentrum [FMF] mit Parylen beschichtet. Der verwendete Testrahmen ist sowohl für die Messung mit einzelnen Hybriden als auch für Module geeignet, da jeweils nur ein Hybrid verwendet wird. Um beide Objekte testen zu können, gibt es verschiedene Einlagen (*Inlays*). Außerdem ist der Testrahmen so geplant, dass die Verbindung zum HSIO-Auslesesystem sowohl direkt als auch über ein *BCC-Board* möglich ist.

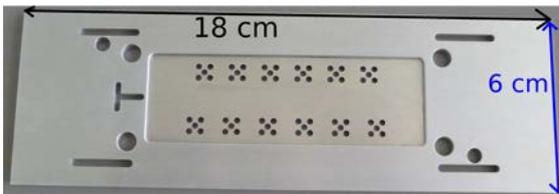
Abbildung 7.5 zeigt ein bestücktes Hybrid, auf das defekte Auslesechips geklebt wurden. Die Position der Auslesechips stimmt sehr gut mit der vorgesehenen Position überein, was zeigt dass alle dafür benötigten Werkzeuge richtig geplant und gefertigt worden sind. Auch das Kleben eines Hybrids auf einen Sensor wurde getestet, indem anstelle der Auslesechips und des Sensors Glasattrappen verwendet wurden. In Abbildung 7.6 ist ein solches Ergebnis dargestellt: Ein Hybrid wurde auf eine Glassensornattrappe geklebt. Für Bondtests wurden von CNM Glassensornattrappen mit Bondpads hergestellt. Eine solche Attrappe liegt unter dem Testmodul um zu überprüfen, ob die Ausrichtung des Hybrids in der Mitte der Bondpadreihen stimmt und das Modul bondbar ist. Dies trifft zu, was in der Abbildung deutlich zu erkennen ist.



a) *Pickup Tool* mit Messinggewicht



e) *Chip Tray* [Hau12]



b) *ASIC Glue Stencil*



f) *Hybrid Assembly and Test Jig* für Bestückung der Hybride mit Auslesechips



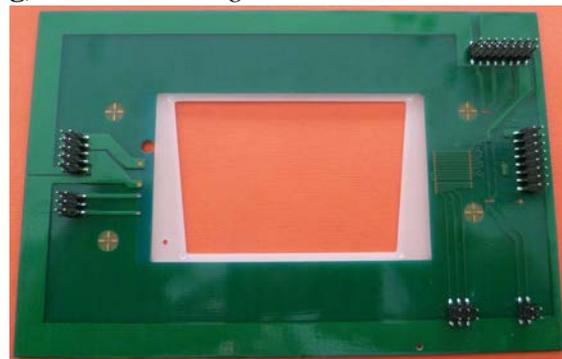
c) *Hybrid Glue Stencil*



g) *Module Test Jig*



d) *Module Building Jig* [Hau12]



h) Testrahmen mit *Inlay* (weiß) für Modultest

Abbildung 7.4.: In Freiburg entwickelte und produzierte Werkzeuge für den *Petalet*-Modulbau.



Abbildung 7.5.: Vollständig bestücktes *Petalet* Hybrid [Hau12].

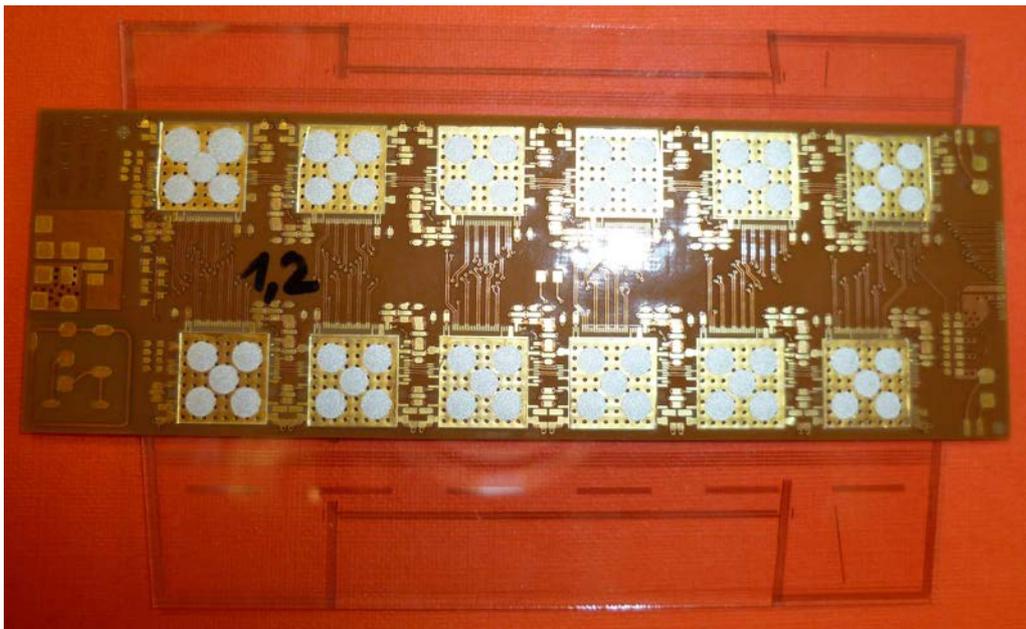


Abbildung 7.6.: *Petalet*-Modulattrappe: Hybrid mit Auslesechips aus Glas sind auf eine Glas-Sensorattrappe geklebt. Im Hintergrund befindet sich eine Glassensorattrappe mit Bondpads um die Positionierung zu überprüfen.

8. Zusammenfassung

Ein wesentlicher Ausbau des ATLAS-Detektors ist für das Jahr 2022/2023 vorgesehen. Dabei soll der innere Detektor komplett erneuert und gegen ein System aus Siliziumdetektoren ausgetauscht werden, wobei das neue *Stave*-Konzept verwendet werden soll. Im Rahmen dieser Arbeit wurden für dieses neue Detektorsystem Module aus Siliziumstreifensensoren und Ausleseelektronik gefertigt. In Freiburg konnten erfolgreich *Barrel*-Module für den Bau von *Staves* gebaut und getestet werden. Die Herstellung aller notwendigen Werkzeuge in der universitätseigenen Werkstatt stellte kein Probleme dar. Mit den Werkzeugen wurden erfolgreich mehrere Module gebaut. Diese erfüllen alle Anforderungen der ATLAS-Kollaboration. Die vom Autor dieser Arbeit entwickelte Prozedur, den Klebstoff nicht mehr auf der Sensoroberfläche unter Verwendung einer Papierrakelmaske zu verteilen, sondern auf der Hybridrückseite mit Hilfe einer Metallschablone, wurde erfolgreich getestet. Die im Rahmen der Arbeit entwickelte Schablone wird von allen am Modulbau beteiligten Gruppen als neuer Standard verwendet.

Sowohl einzelne Hybride als auch komplette Module konnten mit dem HSIO-Auslesesystem erfolgreich getestet werden. Für alle Hybride ergibt sich ein Rauschwert von etwa 400 Elektronen, wie er auch von anderen Modulbaugruppen gemessen wird. Die Messungen der Module ergeben Werte zwischen 600 und 700 Elektronen für das Rauschen; diese sind allerdings abhängig von der Spannungsversorgung der Hybride. Es zeigt sich, dass bei paralleler Spannungsversorgung der Hybride (DC-Konfiguration) auf einem Modul das Rauschen niedriger ist als bei einer Reihenschaltung (SP-Konfiguration). Für Module_0 ergibt ein mittleres Rauschen von (645 ± 10) Elektronen in der SP-Konfiguration und (625 ± 6) Elektronen in der DC-Konfiguration, bei Module_1 wurden im Mittel (673 ± 17) Elektronen (SP-Konfiguration) und (635 ± 16) Elektronen gemessen, während sich bei Module_2 (628 ± 15) Elektronen (SP-Konfiguration) und (619 ± 10) Elektronen ergeben. Die Werte in der DC-Konfiguration befinden sich im erwarteten Bereich zwischen 600 und 650 Elektronen. In Tabelle 6.2 sind die Mittelwerte des Rauschens von jeweils zehn Auslesechips für die verschiedenen Messungen und Module, die in dieser Arbeit verwendet wurden, aufgeführt, während in Tabelle A.2 die Werte für jeden Auslesechip einzeln angegeben sind.

In Spannungsabstastungen konnte der Effekt beobachtet werden, dass das Rauschen bei Senken der Spannung stärker als erwartet ansteigt, was sich auf eine Temperaturerhöhung zurückführen lässt. Langzeittests zeigen ebenfalls ein starkes Ansteigen des Rauschens innerhalb der ersten Stunden. Allerdings stabilisieren sich die Werte nicht (wie erwartet) bei einem Wert, sondern ein leichter Anstieg ist selbst noch nach nahezu 24 Stunden sichtbar. Um diesen Effekt zu erklären sind noch weitere Tests notwendig.

Um eine Abschätzung der Messgenauigkeit des Rauschens für einen einzelnen Kanal zu erhalten, wurden Langzeitmessungen einzelner Module und einzelner Hybride ausge-

wertet. Für das Modul ergibt sich eine mittlere Messungenauigkeit des Rauschens eines einzelnen Kanals von ± 25 Elektronen. Die Auswertung der Langzeitmessung eines einzelnen Hybrids, welches nicht mit einem Sensor verbunden ist, ergibt eine mittlere Messungenauigkeit des Rauschens eines einzelnen Kanals von ± 19 Elektronen. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die Messunsicherheit hauptsächlich durch die Schwankungen der Messwerte in der Elektronik des Hybrids hervorgerufen wird und nicht durch die Verbindung mit dem Siliziumdetektor.

Das *Stave*-Programm sieht vor, noch weitere *Stavelets* und auch einen *Stave* in England zu bauen. Dazu werden von der ganzen Modulbaukollaboration Module benötigt. Die drei in dieser Arbeit gebauten und getesteten Module zeigen die erwarteten Werte und können daher dafür verwendet werden.

Die Rauschmessungen von zwei Modulen, sowohl am CERN als auch in Freiburg ausgeführt, zeigen vergleichbare Resultate, wodurch gezeigt ist, dass der Testaufbau in Freiburg vergleichbar mit anderen Standorten ist. Die ebenfalls auf dem CERN-Gelände durchgeführten Messreihen mit dem DC-DC *Stavelet* weisen ein Verhalten auf, das mit dem einzelner Module übereinstimmt. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass ein *Versatile Link Prototype*, der für die optische Datenverbindung des *Staves* verwendet werden soll, keinen Einfluss auf das Rauschen des DC-DC *Stavelets* hat. Die Ergebnisse dieses Tests wurden in der ATLAS Internal Note ATL-COM-UPGRADE-2012-014 [GHTW12] veröffentlicht.

Sowohl für das *Stavelet* als auch für die einzelnen Module konnte gezeigt werden, dass die Variation der Spannungs- und Stromversorgung der Hybride über einen kleinen Bereich keine signifikanten Auswirkungen auf das Rauschen hat. Dies bestätigt, dass die Ergebnisse innerhalb der Kollaboration auch bei veränderten Werten der Hybridversorgung miteinander verglichen werden können.

Die Methoden für den Bau von *Barrel*-Modulen konnte erfolgreich auf die Endkappen übertragen werden. Für die im Physikalischen Institut der Universität Freiburg entwickelten Hybride wurden alle Werkzeuge für den Modulbau entwickelt und gebaut. Klebetests mit Glasattrappen zeigen, dass sowohl die Positionierung der Auslesechips als auch die Ausrichtung des Hybrids auf dem Sensor wie geplant erfolgen. Abschließend sind somit in dieser Diplomarbeit viele wichtige Schritte für den erfolgreichen Bau der Endkappen des Siliziumstreifendetektors des ATLAS-Experiments für das HL-LHC *Upgrade* erreicht worden.

A. Anhang

A.1. Wichtige Abkürzungen und Begriffe

CERN: Conceil Européen pour la Recherche Nucléaire.

LHC: Large Hadron Collider: Hadronenbeschleuniger am CERN.

HL-LHC: High Luminosity-LHC: *Upgrade* des LHC.

Luminosität: $\frac{\text{Anzahl der Teilchenpakete} \times \text{Teilchenanzahl in den Paketen} \times \text{Kollisionsfrequenz}}{\text{Querschnittsfläche}}$.

CMS: Compact Muon Solenoid: großes Experiment des LHC am CERN.

ATLAS: A Toroidal LHC ApparatuS: großes Experiment des LHC am CERN.

SCT: Semi Conductor Tracker: Halbleiterspurdetektor, Teil des inneren Detektors von ATLAS.

TRT: Transition Radiation Tracker: Übergangsstrahlungsdetektor, Teil des inneren Detektors von ATLAS.

Barrel: Zylindermantel: Eine Region des inneren Detektors von ATLAS.

p-Typ: Halbleiter, dotiert mit Akzeptoren (Löcher: positive Ladungsträger).

n-Typ: Halbleiter, dotiert mit Donatoren (Elektronen: negative Ladungsträger).

n-in-p Detektor: Detektor mit n-dotierten Streifen in p-dotiertem Substrat.

p-in-n Detektor: Detektor mit p-dotierten Streifen in n-dotiertem Substrat.

HSIO: High Speed Input/Output: hier Auslesesystem für Hybride und Module.

Threshold: Schwellenwert.

Occupancy: Besetzung/Belegung: Wert der sich aus der gemessenen Anzahl der Ereignisse die über einem Schwellenwert liegen geteilt durch die Anzahl an Messungen ergibt.

Gain: Verstärkung: Wird aus dem Ergebnis des *Three Point Gain Tests* berechnet.

ASIC: Aplication Specific Integrated Circuit: anwendungsspezifische integrierte Schaltung, hier Auslesechip für die Sensoren.

SMD: *Surface Mounted Device*: hier Passive Bauteile wie Widerstände oder Kondensatoren.

PCB: *Printed Circuit Board*: Leiterplatte.

Panel: Trägerstruktur auf der 8 Hybride vom Hersteller geliefert werden.

SP Rahmen: Testrahmen für Modultests, bei dem die Hybride in Reihe mit Spannung versorgt werden.

DC-DC Rahmen: Testrahmen für Modultests, bei dem die Hybride parallel mit Spannung versorgt werden.

AC-Kopplung: Elektrische Kopplung die mittels eines Kondensators durchgeführt wird

(Alternating Current).

DC-Kopplung: Elektrische Kopplung die mittels eines ohmschen Widerstands durchgeführt wird (**D**irect **C**urrent).

Stave: Bis zu zwei Meter lange Trägerstruktur auf der mehrere Module aufgeklebt sind.

Stavelet: Kleine Testversion eines *Stave* mit 4 Modulen.

DC-DC Stavelet: *Stavelet* bei dem alle Module parallel mit Spannung versorgt werden.

Petal: Analog zum *Stave* Trägerstruktur mit aufgeklebten Modulen für die Endkappen.

Petalet: Kleine Testversion eines *Petal* mit sechs Modulen (beidseitig).

LBNL: Lawrence Berkeley National Laboratory, USA.

DESY: Deutsches Elektronen Synchrontron.

CNM: Centre National de Microelectrónica, Spanien.

SLAC: Stanford Linear Accelerator Center, USA.

eV: Ein Elektronen-Volt (eV) ist die Energie, die ein Elektron erhält, wenn es über eine Potentialdifferenz von einem Volt beschleunigt wird. In SI-Einheiten ergibt sich:

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

$n_{1\text{MeV}}/\text{cm}^2$: Bestrahlungsfluss von 1 MeV Neutronen pro Quadratcentimeter.

A.2. Sonstiges

Wafer: 6 inch, p-Type
Streifenabstand: 74.5 μm
Streifenlänge: 2.39 cm
Winkel der stereo-Streifen: 40 mrad
Resistivität ρ (FZ1): $\sim 6.7 \text{ k}\Omega\text{cm}$
Resistivität ρ (FZ2): $\sim 6.2 \text{ k}\Omega\text{cm}$
Dicke: 320 μm
Äußere Abmessungen: $(9.75 \times 9.75) \text{ cm}^2$

Tabelle A.1.: Eigenschaften der von HPK hergestellten ATLAS07 Sensoren nach Referenz [Unn08] und [Unn10].

Hybrid	Rauschen der Auslesechips [ENC]									
F02 A SP	632	639	638	634	626	625	635	620	632	627
F02 A DC	642	658	632	634	636	631	640	627	640	636
F02 B SP	630	633	632	639	625	615	645	621	625	621
F02 B DC	614	631	628	634	604	610	622	618	624	626
F03 A SP	639	639	656	652	651	658	663	645	668	657
F03 A DC	632	602	620	624	613	614	610	602	612	612
F03 B SP	681	658	670	680	661	659	661	669	675	651
F03 B DC	641	635	645	629	622	622	613	626	636	605
FR3_5 A SP	701	709	703	718	689	711	756	755	770	734
FR3_5 A DC	642	668	648	647	631	647	675	680	680	651
FR3_5 B SP	658	652	651	669	650	666	635	678	661	688
FR3_5 B DC	600	592	599	603	593	596	597	632	622	629
FR3_6 A SP	680	664	668	673	664	678	665	658	670	670
FR3_6 A DC	641	641	656	672	664	661	659	657	685	676
FR3_6 B SP	640	648	649	652	648	647	639	645	657	656
FR3_6 B DC	589	607	617	614	625	599	617	626	634	635
FR3_3 A SP	626	638	628	632	647	626	622	617	610	616
FR3_3 A DC	615	607	591	623	627	617	622	613	602	594
FR3_3 B SP	664	677	669	671	674	665	679	669	636	654
FR3_3 B DC	636	655	646	645	640	628	650	646	634	619
FR3_4 A SP	589	614	613	627	610	600	618	625	618	620
FR3_4 A DC	611	606	623	618	602	608	609	613	619	614
FR3_4 B SP	611	594	616	608	606	609	595	611	607	612
FR3_4 B DC	609	614	617	606	595	610	600	607	617	632

Tabelle A.2.: Rauschvergleich für SP- und DC-DC-Testrahmen für Module_0 (F02, F03), Module_1 (FR3_5, FR3_6) und Module_2 (FR3_3, FR3_4); Hochspannung 200 V, Kühlmitteltemperatur 8°C.

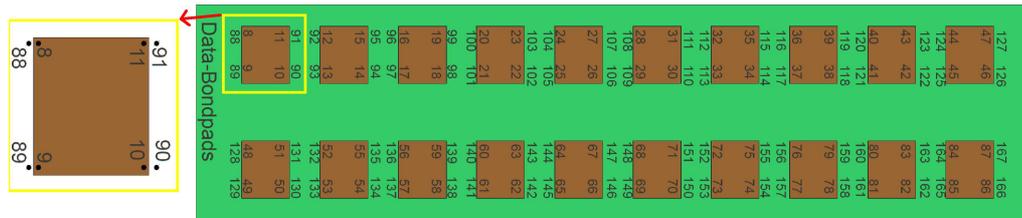


Abbildung A.1.: Messpunkte auf dem Hybrid zur Bestimmung der Klebstoffhöhe. Links ist eine Detailansicht für einen Auslesechip dargestellt.

A.3. Zusatz zu Höhenmessungen

Klebstoffhöhe zwischen Auslesechip und Hybrid Für die Bestimmung der Klebstoffhöhe zwischen Auslesechip und Hybrid wurden bei der ersten Messung insgesamt 298 Messpunkte bestimmt. Um zukünftige Messungen zu vereinfachen und zu beschleunigen wurde ein neues Messschema entwickelt (Abbildung A.1), bei dem nur noch vier Messpunkte auf der ASIC-Oberfläche gewählt werden. Die Nummerierung beginnt aufgrund von Voreinstellungen des Messmikroskops nicht mit 1.

Klebstoffhöhe zwischen Hybrid und Sensor Abbildung A.2 zeigt die Position der Messpunkte auf dem Modul an, die für die Höhenmessung zur Bestimmung der Klebstoffhöhe zwischen Hybrid und Sensor verwendet werden. In Abbildung A.3 ist die genaue Position des Messpunktes auf dem Hybrid für die Bestimmung der Klebstoffhöhe dargestellt. Die Stelle darf nicht zu nah am Rand (hier links) liegen, da das Hybrid dort leicht gekrümmt ist und eine genaue Abstandsmessung verfälscht.

A.4. Bonden von Modulen an Teststrahlen

Bei den Hybriden in Produktionsqualität trat aber ein unerwartetes Problem auf: Beim Bestücken mit den SMD-Bauteilen haben sich die Verbindungen zwischen Hybrid und *Panel* verändert. Während das Hybrid vorher flach im *Panel* lag, hat es sich nach dem *Reflow*-Prozess¹ nach außen gewölbt. Der wahrscheinlichste Grund ist, dass sich beim Erhitzen der Hybride die Verbindungen zwischen Hybrid und *Panel* verändert haben. In Abbildung A.4 ist die Verformung eines vollständig bestückten Hybrids deutlich sichtbar. Wird das Hybrid durch Vakuum an das *Panel* gesaugt so ist es in der Mitte flach. Allerdings zeigen sich an den Rändern starke Wölbungen (siehe Abbildung A.5), wobei auch das Durchtrennen der Verbindungen zum *Panel* nur wenig hilfreich ist. Dadurch ist das Hybrid in diesem Bereich äußerst nachgiebig, wodurch das Bonden erheblich erschwert wird.

¹Lötpaste wird auf das Hybrid mittels Rakeltechnik aufgebracht, dann werden die SMD-Bauteile platziert. Anschließend wird das Hybrid in einem Ofen erhitzt, damit sich das Lot verflüssigt und die Verbindung zwischen Hybrid und Bauteil hergestellt wird.

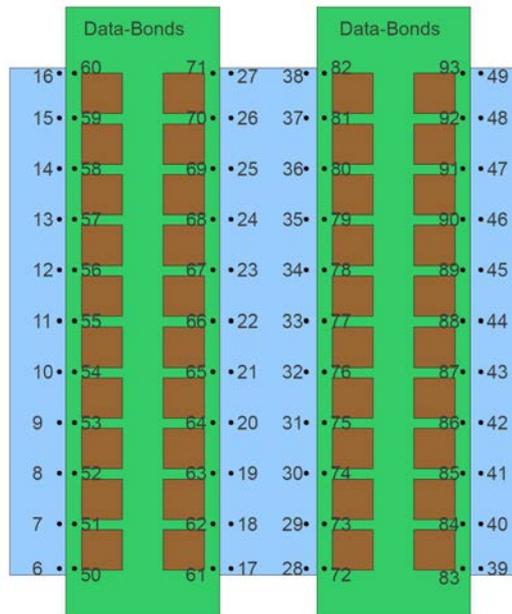


Abbildung A.2.: Messpunkte für Bestimmung der Klebstoffhöhe zwischen Hybridunterseite und Sensoroberfläche.



Abbildung A.3.: Detailansicht des Messpunkts auf dem Hybrid zur Bestimmung der Klebstoffhöhe zwischen Hybrid und Sensor.

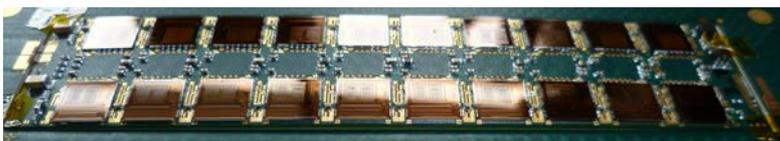


Abbildung A.4.: Verformtes gutes Hybrid.

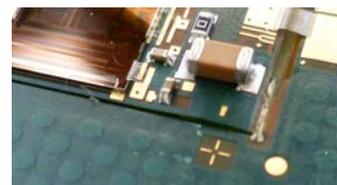


Abbildung A.5.: Verformung eines guten Hybrids, dass mit Vakuum an das *Panel* gesaugt wird.

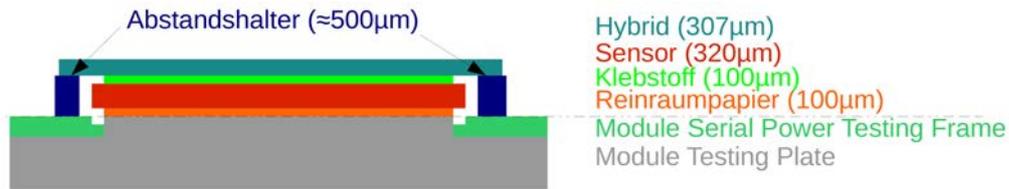


Abbildung A.6.: Schema für Abstandshalter auf dem Testrahmen.

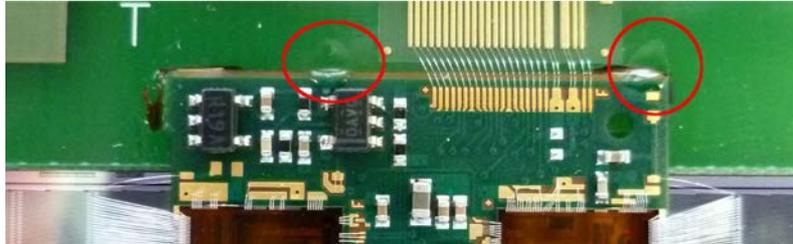


Abbildung A.7.: An Testrahmen geklebtes Hybrid, Klebepunkte sind mit Kreisen hervorgehoben.

Um ein Modul zu testen, wird es an einen Testrahmen gebondet, in dem sich eine Vertiefung von $300\mu\text{m}$ für den Sensor befindet, wodurch die Positionierung erleichtert wird. Die *Module Bonding Plate* (siehe Abbildung 5.5 b) ist so gebaut, dass die Sensorauffläche, auf der der Sensor mittels Vakuum festgehalten wird, auf der gleichen Höhe ist wie die Rahmenoberfläche. Für eine bessere Vakuumverteilung befindet sich zwischen *Plate* und Sensor noch eine Schicht Reinraumpapier. Dadurch entsteht eine Höhendifferenz zwischen Hybrid- und Rahmenoberfläche von über $800\mu\text{m}$. Da das Hybrid größer als der Sensor ist, ist es in diesem Bereich frei schwebend und gibt beim Bondvorgang stark nach. Ohne zusätzliche stabilisierende Maßnahmen wird dadurch das Bonden unmöglich.

Eine Möglichkeit besteht darin, unter das Hybrid Abstandshalter auf den Rahmen zu kleben, so dass das Hybrid stabilisiert wird (siehe Abbildung A.6). Bei Tests hat sich allerdings gezeigt, dass der Abstand zwischen Rahmen und Hybrid nicht für alle Module gleichbleibend ist, was zum einen an einer unterschiedlichen Klebstoffdicke liegen kann und zum anderen an der Verformung der Hybride. Dadurch ist diese Methode für den praktischen Einsatz ungeeignet.

Bei der schlussendlich verwendeten Methode wird das Hybrid durch kleine Tropfen Araldit mit dem Rahmen verklebt (Abbildung A.7). Dadurch wird die notwendige Stabilität für das Bonden gesichert, das Modul lässt sich jedoch auch leicht wieder vom Rahmen trennen.

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Bethe-Bloch Energieverlustverteilung in versch. Materialien [PB ⁺ 12].	5
2.2.	Darstellung Bändermodell von Nichtleiter, Halbleiter und Leiter.	6
2.3.	pn-Übergang im Bändermodell [Har09].	8
2.4.	1/C ² -V-Kurve des Detektors ATLAS07 W133 in Freiburg.	10
2.5.	<i>Float-Zone</i> - und <i>Czochralski</i> -Verfahren [Har09].	13
2.6.	Silizium Ingot und geschnittene Wafer [Har09].	13
2.7.	Möglicher Prozess für die Produktion eines p ⁺ -in-n Sensors [RFRW06].	14
2.8.	Seitenansicht eines Streifendetektors [Har09].	17
2.9.	Schema elektrische Feldlinien in p-in-n Detektor.	17
2.10.	Ausschnitt der Oberflächenstruktur eines Streifendetektors [Har09].	18
2.11.	Ersatzschaltbild mit Parametern für Detektorrauschen [Har09].	20
2.12.	Schäden im Siliziumkristallgitter durch Strahlung [Har09].	22
2.13.	Strahlenschäden im Bändermodell [Har09].	23
2.14.	Effektive Dotieratomkonzentration bei Bestrahlung [Har09].	23
2.15.	Verarmungszone und elektrisches Feld eines Detektors [Har09].	24
2.16.	Elektrische Feldlinien in Detektor nach Typinversion, teilweise verarmt.	25
2.17.	Verarmungsspannung als Funktion der Ausheilzeit bei 60°C [Har09].	25
2.18.	Verschiedene Möglichkeiten der Streifenabschirmung [Har09].	26
3.1.	Aufbau des gesamten ATLAS-Experiments [ATL12].	28
3.2.	Aufbau des inneren Detektors [ATL12].	29
3.3.	Aufbau des inneren Detektors von ATLAS (nur <i>Barrel</i>) [ATL12]	29
3.4.	<i>Barrel</i> Module Schema	31
3.5.	<i>Stave</i> -Komponenten [Nic12].	32
3.6.	<i>Stave</i> [Bur10].	33
3.7.	Trägerstruktur und Module Supermodul [Bur10].	33
3.8.	Doppelseitiges Modul des Supermodul-Konzepts [GS ⁺ 10].	34
3.9.	Schema des inneren Detektors nach Upgrade [Fer12].	34
3.10.	<i>Petal</i> [Lac12].	35
3.11.	Cartigny Design für das ATLAS-Upgrade [Els12].	36
4.1.	Bild des HSIO-Auslesesystems.	38
4.2.	HSIO-Auslesesystem 1.	39
4.3.	HSIO-Auslesesystem 2.	39
4.4.	Ein an das HSIO-Auslesesystem angeschlossenes Hybrid.	40
4.5.	Modultestbox.	41
4.6.	<i>Module Testing Plate</i>	42

4.7.	LBNL Version der <i>Module Testing Plate</i> [Mod12].	43
4.8.	Aufbau des ABCD3T Chips [Bar11].	43
4.9.	<i>Strobe Delay Test</i> [Dem07].	45
4.10.	<i>Threshold Scan</i> nach Referenz [Bar10].	46
4.11.	Simulierte Ladungsverteilung um 1.21 fC.	46
4.12.	Links: <i>Three Point Gain Test</i> Resultat; Rechts: <i>Gain</i> -Bestimmung	47
5.1.	<i>Panel</i> mit 8 Hybriden, die bereits mit SMD-Komponenten bestückt sind.	50
5.2.	Klebetest mit Plexiglasattrappen und eingefärbtem Araldit.	51
5.3.	Freiburger Rakelmaske, Version 1.	52
5.4.	Bilder der Werkzeuge zum Bau von <i>Barrel</i> -Modulen (Teil 1).	53
5.5.	Bilder der Werkzeuge zum Bau von <i>Barrel</i> -Modulen (Teil 2).	54
5.6.	Glas ASICs auf dem <i>Chip Tray</i>	55
5.7.	Positions-Pins und Feingewindeschrauben an <i>Pickup Tool</i>	55
5.8.	Silberleitkleber wird mittels Rakeltechnik auf ASIC-Rückseite verteilt.	55
5.9.	Klebstoff-Punkte auf ASIC-Rückseite.	55
5.10.	ASICs werden auf ein Hybrid geklebt.	55
5.11.	Glas-ASICs sind auf ein defektes Hybrid geklebt.	55
5.12.	Einstellung der Klebstoffhöhe zwischen Sensor und Hybrid.	56
5.13.	Erste Version der Freiburger Rakelmaske.	56
5.14.	Zweite Version der Freiburger Rakelmaske.	56
5.15.	Klebstoff wurde auf Hybridrückseite aufgetragen.	57
5.16.	Klebstoffverteilung nach Kleben eines Hybrids auf einen Glassensor.	57
5.17.	Skizze zur Höheneinstellung der <i>Module Assembly Plate</i>	58
5.18.	Defekte ASICs auf defektes Hybrid geklebt mit Klebstoffhöhe.	58
5.19.	Defektes Hybrid auf mechanischem Sensor.	59
5.20.	Freiburger Bondmaschine: Delvotec 6400.	60
5.21.	Bondplan für einen ASIC [Gre11] und gebondeter Auslesechip.	61
5.22.	Bonddiagramm für die zwei verschiedene Auslesegeschwindigkeiten.	62
5.23.	Gebondetes mechanisches Modul in einem Testrahmen.	62
5.24.	Aufbau der gebauten Module.	63
5.25.	MECHANICAL No 16 IV-Kurvenvergleich.	64
5.26.	MECHANICAL No 16 Kapazitätsmessung.	64
5.27.	W133 IV-Kurvenvergleich.	64
5.28.	W133 Kapazitätsmessung.	64
5.29.	W26 IV-Kurvenvergleich.	64
5.30.	W26 Kapazitätsmessung.	64
5.31.	CV-Messung eines ATLAS07 Grad A Sensors (W293) [Hau12].	65
5.32.	ASIC Klebstoffhöhe aller Hybride auf <i>Panel 3</i>	66
5.33.	Module_0: Klebstoffhöhe zwischen Hybrid und Sensor.	66
5.34.	Module_1: Klebstoffhöhe zwischen Hybrid und Sensor.	66
5.35.	Module_2: Klebstoffhöhe zwischen Hybrid und Sensor.	66
5.36.	<i>Module Bonding Plate</i>	67
5.37.	Verformtes gutes Hybrid.	67

6.1. Infrarotaufnahme eines Hybrids während der Messung.	70
6.2. Beispiel für Verzögerungszeit-Korrektur.	71
6.3. Ergebnis eines <i>Three Point Gain Tests</i> für Hybrid FR3_0.	72
6.4. <i>Moduel Serial Power Testing Frame</i> mit Modul.	73
6.5. DC-DC Testrahmen mit Modul.	73
6.6. Schema für Reihenschaltung der Hybride.	74
6.7. Schema für Parallelschaltung der Hybride.	74
6.8. Rauschvergleich für SP- und DC-DC Testrahmen.	75
6.9. Mögliche Fehler des Rauschens der Auslesekanäle beim Modulbau. . . .	77
6.10. Hybrid Ausleserichtung.	77
6.11. Rauschen bei Spannungsabtastung von Module_0 mit DC-DC Rahmen. . .	78
6.12. Rauschen bei Spannungsabtastung von Module_1 mit SP Rahmen.	80
6.13. Rauschen bei Spannungsabtastung von Module_1 mit DC-DC Rahmen. . .	80
6.14. Rauschen bei einem Dauertest von Module_1 auf dem DC-DC Rahmen. . .	81
6.15. Rauschen bei Spannungsabtastung von Module_2 mit SP Rahmen.	82
6.16. Rauschen bei Spannungsabtastung von Module_2 mit DC-DC Rahmen. . .	82
6.17. Rauschen einer Dauermessung von Module_2 auf dem DC-DC Rahmen. . .	83
6.18. Ergebnisse zur Einzelkanalmessunsicherheit des Rauschens eines Moduls. .	83
6.19. Rauschen bei einer Dauermessung von Hybrid FR6_1.	84
6.20. Ergebnisse zur Einzelkanalmessunsicherheit des Rauschens eines Hybrids. .	84
6.21. CERN Teststand für Modultests.	86
6.22. Details des CERN Teststands für Modultests.	86
6.23. DC-DC <i>Stavelet</i>	87
6.24. CERN Teststand für <i>Stavelet</i>	87
6.25. Innenansicht des CERN Teststands für ein <i>Stavelet</i>	87
6.26. Module_2 Vergleich des Rauschens in Freiburg mit dem CERN.	88
6.27. Module_1 Vergleich des Rauschens in Freiburg mit dem CERN.	89
6.28. Rauschen: Variation Hybridspannung bei Module_1 auf DC-DC Rahmen. . .	90
6.29. Rauschen: Variation Hybridstromstärke bei Module_2 auf SP Rahmen. . .	91
6.30. Position der Module auf dem <i>Stavelet</i>	91
6.31. Rauschens bei Spannungsabtastung für das DC-DC <i>Stavelet</i>	92
6.32. Rauschens bei Hybridspannungsvariation des DC-DC <i>Stavelets</i>	93
6.33. <i>Versatile Link Prototype</i> neben <i>Stavelet</i>	94
6.34. Rauschmessungen mit DC-DC <i>Stavelet</i> und <i>Versatile Link Prototype</i>	94
7.1. Modell eines <i>Petalets</i> [Pet12b].	96
7.2. Großer <i>Petalets</i> sensor mit <i>Embedded Pads</i> [UBL12].	96
7.3. Zwei Versionen für Spannungsversorgung und Datenauslese eines <i>Petals</i> . . .	97
7.4. In Freiburg entwickelte und produzierte Werkzeuge für <i>Petalet</i> -Modulbau. .	99
7.5. Vollständig bestücktes <i>Petalet</i> Hybrid [Hau12].	100
7.6. <i>Petalet</i> -Modulattrappe.	100
A.1. Messpunkte auf dem Hybrid zur Bestimmung der Klebstoffhöhe.	IV
A.2. Messpunkte für Klebstoffhöhe zwischen Hybrid und Sensor.	V

A.3. Detailansicht: Höhenmessung zwischen Hybrid und Sensor.	V
A.4. Verformtes gutes Hybrid.	V
A.5. Verformtes gutes angesaugtes Hybrid.	V
A.6. Schema für Abstandshalter auf dem Testrahmen.	VI
A.7. An Testrahmen geklebtes Hybrid, Klebepunkte sind hervorgehoben. . . .	VI

Tabellenverzeichnis

5.1. Auflistung aller hergestellten voll funktionsfähigen Module.	61
6.1. Rauschvergleich für SP- und DC-DC-Testrahmen bei Module_1.	75
6.2. Zusammenfassung der Ergebnisse.	85
A.1. Eigenschaften des ATLAS07 Sensors nach [Unn08] und [Unn10].	II
A.2. Rauschvergleich für SP- und DC-DC-Testrahmen.	III

Literaturverzeichnis

- [All12] ALLPORT, Philip: ATLAS Upgrade Week - Conclusion. Vortrag ATLAS Upgrade Week. <https://indico.cern.ch/sessionDisplay.py?sessionId=56&confId=158038#20120330>. Version: März 2012
- [Ara12] Araldite 2011 Datenblatt. Version: 2012. <http://www.dawex.cz/userFiles/technicke-listy/huntsman/araldite-2011.pdf>
- [ATL11a] ATLAS Fact Sheet. Version: 2011. www.atlas.ch/fact-sheets.html
- [ATL11b] ATLAS Technical Challenges Brochure. Version: 2011. www.atlas.ch/brochures.html
- [ATL12] ATLAS Homepage. www.atlas.ch/photos/index.html. Version: 2012
- [B1812] TWiki Seite: Building 180 Tracker Tests. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/Atlas/StripsUpgradeB180>. Version: Juli 2012
- [Bar10] BARBER, Thomas J.: The Data Acquisition System of the ATLAS Semiconductor Tracker. Vortrag IoP HEPP 2010. http://www.hep.ucl.ac.uk/iop2010/slides.php?values=105_PARALLEL-3A_Wednesday+March+31_Cruciform-1_11:00-11:15_DAQ+System+for+the+ATLAS+Semiconductor+Tracker_Tom+Barber_Cambridge_. Version: 2010
- [Bar11] BARBER, Thomas J.: New Physics Search in the ZZ Sector with the ATLAS Experiment, King's College; University of Cambridge, Diss., Februar 2011
- [Bar12] BARBER, Thomas J.: TWiki Seite: StripsUpgradeDAQUserFreiburg. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/Atlas/StripsUpgradeDAQUserFreiburg>. Version: Juli 2012
- [Bec12] Becktronic, Derschen (Deutschland). www.becktronic.de. Version: 2012
- [Bur10] BURDIN, Sergey: ATLAS Tracker Upgrade: Silicon Strip Detectors for the sLHC. 13th ISTC SAC Seminar "New Perspectives of High Energy Physics; Novosibirsk, Russland". <http://ssrc.inp.nsk.su/ISTC2010/>. Version: September 2010
- [Chi04] CHILINGAROV, Alexander: Recommendations towards a standardisation of the macroscopic parameter measurements / CERN - RD50. 2004 (RD50-2003-03). – Forschungsbericht

- [CJS10] COOKE, Peter ; JONES, Tim ; SUTCLIFFE, Peter: The Design, Construction and Testing of a UK Stavelet / Oliver Lodge Laboratory, Department of Physics, University of Liverpool. 2010. – Forschungsbericht
- [DAD⁺09] DABROWSKI, W. ; ANGHINOLFI, F. ; DRESSNANDT, N. ; DWUZNIAK, M. ; GONZALEZ-SEVILLA, S. ; KAPLON, J. ; LA MARRA, D. ; NEWCOMER, M.F. ; PERNECKER, S. ; POLTORAK, K. ; SWIENIEK, K.: Design and performance of the ABCN-25 readout chip for ATLAS Inner Detector Upgrade. In: Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC), 2009 IEEE, 2009. – ISSN 1095–7863, S. 373–380
- [Dem07] DEMIRKÖZ, Bilge M.: Construction and Performance of the ATLAS SCT Barrels and Cosmic Test, Balliol College, Oxford University, Diss., April 2007
- [Els12] ELSING, Markus: Conclusion of the Layout Task Force. Vortrag ATLAS Upgrade Week 2012. <http://www.slac.stanford.edu/exp/atlas/events/2012/ATUW/>. Version: März 2012
- [Epo11] Epolite FH-5313 Datenblatt. Version: Juni 2011. <http://www.lot-oriel.com/files/downloads/andover/en/epolite.pdf>
- [Fer12] FERRÉRE, Didier: The Upgrade of the ATLAS Inner Detector / CERN. 2012 (ATL-INDET-PROC-2012-009). – Forschungsbericht
- [Fle07] FLETA, Celeste: 3D production status in CNM and IceMOS. Vortrag 10. RD50 Workshop. <https://rd50.web.cern.ch/rd50/10th-workshop/default.htm>. Version: 2007
- [FMF] FMF - Freiburger Materialforschungszentrum. <http://www.fmf.uni-freiburg.de/>
- [Gar12] GARCÍA ARGOS, Carlos: DC-DC Stavelet Studies in CERN B180. Vortrag ATLAS Upgrade Week 2012. <http://www.slac.stanford.edu/exp/atlas/events/2012/ATUW/>. Version: März 2012
- [GHTW12] GARCÍA ARGOS, Carlos ; HUFFMAN, Todd ; TROSKA, Jan ; WONSAK, Sven: Measurement of the potential electromagnetic interaction of the Versatile Link with the Strips Upgrade Stavelet / CERN. Geneva, Jun 2012 (ATL-COM-UPGRADE-2012-014). – Forschungsbericht
- [Gre11] GREENALL, Ashley: Stave Hybrid WireBonding Ver2 auf TWiki Seite. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/Atlas/ModuleAssembling4ATLASSCTUpgrade>, Dezember 2011
- [Gre12] GREENALL, Ashley: TWiki Seite: ShortStripsHybridLiverpool. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/Atlas/ShortStripsHybridLiverpool>. Version: Juli 2012

- [Gri08] GRIFFITHS, David: Introduction to Elementary Particles. Second Revised. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008
- [Gro12] GROUP, ITK-SC Module W.: Electrical Design and Performance of Single- and Double-Sides Silicon Modules for the ATLAS Phase II Upgrade. Zusatzdokument zum Phase II Letter of Intent, 2012. – Bisher unveröffentlicht
- [Gru93] GRUPEN, Claus: Teilchendetektoren. BI Wissenschaftsverlag, 1993
- [GS⁺10] GONZALEZ-SEVILLA, Sergio u. a.: A silicon strip module for the ATLAS inner detector upgrade in the super LHC cooler. In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, In Press, Corrected Proof (2010). <http://dx.doi.org/DOI:10.1016/n.nima.2010.04.092>. – DOI DOI: 10.1016/n.nima.2010.04.092. – ISSN 0168–9002
- [H⁺07] HABER, Carl u. a.: Development of large area integrated silicon tracking elements for the LHC luminosity upgrade. In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 579 (2007), Mai, S. 801–805
- [Ham12] Hamamatsu, Japan. www.hamamatsu.com. Version: 2012
- [Har09] HARTMANN, Frank: Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009 (Springer tracts in modern physics 231)
- [Hau12] HAUSER, Marc: Im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführte Messungen / Arbeiten; Private Kommunikation. 2012
- [Haw12] Hawk Electronics Ltd, Accrington (England). www.hawkelectronics.co.uk/index.html. Version: 2012
- [IBM12] IBM. www.ibm.com. Version: 2012
- [K⁺07] KOHRIKI, Takashi u. a.: Hybrid and module designs for ATLAS silicon tracker upgrade for super LHC. In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 579 (2007), Mai, S. 806–811
- [Kle05] KLEINKNECHT, Konrad: Detektoren für Teilchenstrahlung. 4. Auflage. B. G. Teubner, 2005
- [Köh09] KÖHLER, Michael: Test Beam Measurements with 3D-DDTC Silicon Strip Detectors. Vortrag 14. RD50 Workshop. <https://rd50.web.cern.ch/rd50/14th-workshop/default.htm>. Version: 2009
- [Köh10] KÖHLER, Michael: ATLAS Tracker Upgrade: Silicon Strip Detectors for the sLHC. <http://cdsweb.cern.ch/record/1306783>. Version: November 2010

- [Lac12] LACASTA, Carlos: Strip Sensor Procurement - Specifications and funding. Vortrag ATLAS Upgrade Week 2012. <http://www.slac.stanford.edu/exp/atlas/events/2012/ATUW/>. Version: 2012
- [LR09] LEROY, Claude ; RANCOITA, Pier-Giorgio: Principles of Radiation Interaction in Matter and Detection. zweite. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2009
- [Lut99] LUTZ, Gerhard: Semiconductor Radiation Detectors. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999
- [Miñ10] MIÑANO, Mercedes: ATLAS Tracker Upgrade: Silicon Strip Detectors and Modules for the sLHC. ATL-INDET-PROC-2010-026. <http://cdsweb.cern.ch/record/1298311>. Version: Oktober 2010
- [Mod12] TWiki Seite: Module Assembling for ATLAS SCT-upgrade. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/Atlas/ModuleAssembling4ATLASSCTUpgrade>. Version: Juli 2012
- [Mol99] MOLL, Michael: Radiation Damage in Silicon Particle Detectors, DESY-THESIS-1999-40, Diss., 1999
- [Nat] Naturkonstanten; Physikalisch-Technische Bundesanstalt. www.ptb.de/de/naturkonstanten/_zahlenwerte.html
- [Nel10] NELSON, David: HSIO Development Platform Users Guide - Version C02. Revision 1.1, April 2010. <http://www.slac.stanford.edu/~djn/Atlas/hsio/>
- [Nic12] NICKERSON, Richard: Upgrade Tracker Stave Status. Vortrag ATLAS Upgrade Week. <http://www.slac.stanford.edu/exp/atlas/events/2012/ATUW/>. Version: März 2012
- [PB⁺12] PARTICLE DATA GROUP ; BERINGER, Jurg u. a. ; GROUP, Particle D. (Hrsg.): The Review of Particle Physics. Phys. Rev. D86, 010001. <http://pdg.lbl.gov/>. Version: 2012
- [Pet12a] TWiki Seite: PetaletTooling. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/Atlas/PetaletTooling>. Version: Juli 2012
- [Pet12b] TWiki Seite: StripUpgradePetal. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/Atlas/StripUpgradePetal>. Version: Juli 2012
- [RFRW06] ROSSI, Leonardo ; FISCHER, Peter ; ROHE, Tilman ; WERMES, Norbert: Pixel Detectors; From Fundamentals to Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006

- [Roe92] ROE, Byron P.: Probability and Statistics in Experimental Physics. Springer-Verlag New York, Inc., 1992
- [Sol09] SOLDEVILA, Urmila: The ATLAS Tracker Upgrade: Short Strips Detectors for the SLHC. <http://cdsweb.cern.ch/record/1222532?>
Version: November 2009
- [Spi05] SPIELER, Helmuth: Semiconductor Detector Systems. Oxford University Press, 2005
- [SS05] SADROZINSKI, Hartmut F.-W. ; SEIDEN, Abraham: Tracking detectors for the sLHC, the LHC upgrade. In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 541 (2005), Februar, S. 434–440
- [Ste12] Stevenage Circuits Ltd, Stevenage (England). www.stevenagecircuits.co.uk. Version: 2012
- [Sze81] SZE, Simon M.: Physics of Semiconductor Devices. 2nd. John Wiley & Sons, 1981
- [TA⁺08] THE ATLAS COLLABORATION ; AAD, Georges u. a.: The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider. In: Journal of Instrumentation, 3 (2008), Nr. 08, S. S08003
- [Tho11] THOMAS, Maira: Bachelorarbeit: Vergleichende Charakterisierung von Prototypen von Siliziumstreifendetektoren. August 2011
- [Tra02] TRA-DUCT 2902 Datenblatt. Version: November 2002. <https://tds.us.henkel.com//NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/8F6D7873703EA92C85257575004508BA/\protect\T1\textdollarFile/TRA-DUCT%202902-EN.pdf>
- [UBL12] ULLÁN, Miguel ; BENITEZ, Victor ; LACASTA, Carlos: Status of End Cap Sensor Prototypes. Vortrag ATLAS Upgrade Week 2012. <http://www.slac.stanford.edu/exp/atlas/events/2012/ATUW/>. Version: März 2012
- [Unn08] UNNO, Yoshinobu: The SLHC Upgrade of the ATLAS SCT. Vortrag RESMDD08 in Florenz. <http://www.astro.unifi.it/resmdd/>.
Version: 2008
- [Unn10] UNNO, Yoshinobu: SLHC upgrade of the ATLAS SCT tracker. In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 612 (2010), S. 439–447
- [Vir] XILINX Virtex-4 FPGA Datenblatt. <http://www.xilinx.com/support/documentation/virtex-4.htm>

- [VLP12] Versatile Link Project Public Area. <https://espace.cern.ch/project-versatile-link/public/default.aspx>. Version: 2012
- [War12] WARREN, Matt: TWiki Seite: StripsUpgradeDAQ. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/Atlas/StripsUpgradeDAQ>. Version: Juli 2012
- [WJMD12] WONSAK, Sven ; JOOS, Dieter ; MESSMER, Ines ; DILGER, Thomas ; INTERNE DOKUMENTATION (Hrsg.): Wirebonding - Dokumentation für das Bonden eines Barrel Hybrids in Freiburg (TWiki Seite). Interne Dokumentation, Juli 2012. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/Atlas/ModuleAssembling4ATLASSCTUpgrade>
- [Won12] WONSAK, Sven ; INTERNE DOKUMENTATION (Hrsg.): Manual - How to build and test a Stave Module (auf TWiki Seite). Interne Dokumentation, Juli 2012. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/Atlas/StripsUpgradeDAQUserFreiburg>

Danksagung

Ich möchte die Gelegenheit nutzen, um ein paar Menschen zu danken, ohne die diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Ich bedanke mich ganz herzlich bei Prof. Dr. Karl Jakobs, der es mir ermöglicht hat in seiner Abteilung diese Diplomarbeit zu verfassen. Ich habe die Zeit, die ich als Teil dieser großartigen Abteilung verbringen durfte, sehr genossen.

Dr. Ulrich Parzefall gilt mein ganz besonderer Dank. Er hat mich während der ganzen Zeit großartig betreut und hatte immer ein offenes Ohr, wenn es Probleme oder Nachfragen gab.

Außerdem danke ich Dr. Thomas Barber für die Erklärungen zum HSIO-Auslesesystem und die Hilfe bei Problemen mit der Programmierung von ROOT-Makros. Des Weiteren gilt mein Dank Dr. Susanne Kühn für den motivierenden Zeitdruck und das Korrigieren dieser Arbeit, so dass ich am Ende keine Nachtschicht einlegen musste.

Äußerst dankbar bin ich auch dem Technikerteam Ines Messmer und Dieter Joos, die mit dem Bonden der Module und der dazu notwendigen Programmierung der Maschine viele Stunden verbrachten und mir dabei einiges zeigten. Auch Thomas Dilger von der mechanischen Werkstatt gilt mein Dank für die Unterstützung beim Bonden, das Erstellen der Werkzeuge und die Verbesserungen der Plänen der *Petalet*-Werkzeuge. Zudem danke ich Dr. Kambiz Mahboubi für die Planung und Herstellung des *Petalet*-Hybrids und die Unterstützung bei der Planung der dazugehörigen Werkzeuge für die Bestückung.

Ich bin der gesamten *Stave*-Modulbaugruppe sehr dankbar für die Unterstützung und die hilfreichen Ratschläge in den Telefonkonferenzen alle zwei Wochen, die ohne Nathen nur halb so lustig gewesen wären. Leider kann ich nicht alle Personen der beteiligten Gruppen² namentlich nennen, doch mein besonderer Dank gilt Dr. Anthony Affolder von der Universität Liverpool, der dieses Projekt leitet und bei Problemen immer hilfreiche Tipps geben konnte.

Für die Zeit am CERN und die Arbeit an der ATLAS-Note bedanke ich mich herzlich bei Dr. Todd Huffman, Carlos Garcia Argos und Jan Troska.

Meinen momentanen und ehemaligen Kollegen aus dem Hardwarebüro Sophie Aslan, Adrian Driewer, Marc Hauser, Dr. Michael Köhler, Besnik Lecini und Maira Thomas danke ich für die tolle Zeit und die vielen anregenden Diskussionen.

Zuletzt möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Familie bedanken, die mich immer in allem unterstützten. Vielen Dank.

Ich habe von einem Kommilitonen gehört dass ein bestimmtes Wort in jede Diplomarbeit hineingehört, daher möchte ich dieses abschließend erwähnen: Transversalimpulsverteilung.

²Universitäten Liverpool, Cambridge, Glasgow und Santa Cruz; DESY; LBNL

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass diese Arbeit von mir selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet wurden.

Freiburg, den 24. Juli 2012

Sven Wonsak