

Langzeittests von Si-Streifendetektoren auf bestückten Substrukturen des CMS-Spurdetektors

von

Alexander Linn

Diplomarbeit in Physik

vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

im

Mai 2005

angefertigt im

III. Physikalischen Institut, Lehrstuhl B
Prof. Dr. J. Mnich

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Der LHC-Beschleuniger	1
1.2	Das CMS-Experiment	2
1.2.1	Der zentrale Spurdetektor	3
1.2.2	Die Tracker-Endkappen	4
2	Si-Streifendetektoren	7
2.1	Silizium als Halbleiter	7
2.1.1	Die Dotierung von Halbleitern	8
2.2	Halbleiterdioden	9
2.2.1	Die Verarmungszone einer Halbleiterdiode	10
2.3	Funktionsweise und Aufbau von Halbleiterdetektoren	11
2.3.1	Energierverlust geladener Teilchen in Materie	11
2.3.2	Der Nachweis von Teilchen mit Hilfe eines Halbleiterdetektors	13
2.3.3	Der Aufbau eines Silizium-Streifendetektors	13
2.3.4	Strahlenschäden in Halbleiterdetektoren des CMS-Experi- ments	14
2.4	Die Si-Streifendetektoren des CMS-Spurdetektors	15
2.4.1	Fehler auf den Si-Streifendetektoren	16
2.4.2	Der APV-Chip	16
2.4.3	Der APV-MUX-Chip	18
2.4.4	Der TPLL-Chip	18
2.4.5	Der DCU-Chip	18
3	Das Petal	21
3.1	Mechanischer Aufbau	21
3.2	Die Wärmeabgabe der Petalkomponenten	21
3.3	Die Kühlung des Petals	22
3.4	Die Petalkomponenten und ihre Funktionsweise	23
3.4.1	Das Interconnectboard	23
3.4.2	Der digitale Opto-Hybrid	23
3.4.3	Die Kommunikations- und Kontroll-Einheiten	24
3.4.4	Die Silizium-Streifenmodule	25
3.4.5	Die Analogen Opto-Hybride	26
3.5	Die Kommunikation mit und auf dem Petal	27

3.6	Die Spannungsversorgung des Petals	28
4	Die Petalintegration	29
4.1	Der Integrationsteststand	29
4.2	Die Assembly-Software	31
4.3	Eine Integration im Detail	32
4.3.1	ARC-Test	33
4.3.2	Vorbereitung	34
4.3.3	Integration der CCUs	35
4.3.4	Integration der AOHs und ICB-Test	35
4.3.5	Integration der Module	37
4.3.6	Abschluß der Integration	40
4.4	Die Integration des ersten finalen Petals	40
4.4.1	Erkenntnisse aus der Integration	42
5	Der Langzeitteststand	43
5.1	Motivation der Langzeittests	43
5.2	Der Langzeitteststand	43
5.2.1	Der Kühltank	45
5.3	Die Slow-Control	48
5.4	Die Long-Term-Software	50
5.5	Die Kommunikation zwischen Slow-Control und Long-Term-PC	53
6	Tests und Benotung der Petals	55
6.1	Grundlegende Messgrößen	55
6.1.1	Pedestal	55
6.1.2	Rauschen	55
6.1.3	Common-Mode-korrigiertes Rauschen	56
6.1.4	ADC-Einheiten	56
6.2	Tests am Petal	56
6.2.1	Optoscan	56
6.2.2	TimeTune-Test	57
6.2.3	Pedestal-Run	57
6.2.4	Kalibrationspuls-Test	58
6.2.5	Messung der IV-Kennlinien aller Silizium-Streifenmodule	59
6.2.6	Tests der Systemstabilität	59
6.2.7	Kühltests	59
6.3	Die Benotung des Petals	59
6.4	Langzeittests des ersten finalen Petals	60
6.4.1	Kalibration der Signale	61
6.4.2	Verhalten der Silizium-Streifenmodule	61
6.4.3	Kühltests	62
6.4.4	Fazit des ersten Langzeittests	63
7	Zusammenfassung und Ausblick	65

A	Tabelle zu den Modulpositionen	67
A.1	Backpetal	67
A.2	Frontpetal	68
B	Die Logistik der Tracker-Endkappen	69
C	Zeitplan der Petalintegration vom 28.02.2005 und 01.03.2005	71
D	Schematischer Aufbau der Trockenluftversorgung	73
E	Belegung des K-MUX im Langzeitteststand	75
F	Szenario des ersten Langzeittests	77
G	Aufbau der ROOT-Dateien aus der Long-Term-Software	79
H	Erklärung und Obergrenzen der Langzeittests	81
I	Testergebnisse	85
I.1	Vergleich CMN-LT-ARC	85
I.1.1	Ring 3	86
I.1.2	Ring 4	87
I.1.3	Ring 5	88
I.1.4	Ring 6	89
I.1.5	Ring 7	90
I.2	Kalibrationspuls-Test	91
I.2.1	Ring 3	91
I.2.2	Ring 4	93
I.2.3	Ring 5	95
I.2.4	Ring 6	97
I.2.5	Ring 7	99
	Abkürzungsverzeichnis	101
	Abbildungsverzeichnis	104
	Literaturverzeichnis	105
	Danksagungen	109
	Index	111

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Der LHC-Beschleuniger

Am CERN¹ wird zur Zeit in einem 27 km langen Tunnel der *LHC*² gebaut. Dieser wird Protonen mit einer Schwerpunktsenergie von 14 TeV und einer Wiederholrate von 40 MHz zur Kollision bringen. Bei LHC sollen Luminositäten von bis zu $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ erreicht werden. Damit dringt der LHC-Beschleuniger in Energieregionen vor, die bisher von keinem anderen Teilchenbeschleuniger erreicht wurden. Nötig wird ein solcher Beschleuniger, da man mit seiner Hilfe wesentliche Aspekte des Standardmodell der Elementarteilchenphysik überprüfen möchte. Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik erklärt drei der vier bekannten grundlegenden Wechselwirkungen. Die elektromagnetische, die starke und die schwache Wechselwirkung. Lediglich die Gravitation konnte bisher noch nicht in das Modell integriert werden. Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik postuliert zur Übertragung der Kräfte Austauschteilchen, sog. Feldquanten. Während das Photon und das Gluon als die Austauschteilchen der elektromagnetischen bzw. der starken Wechselwirkung masselos sind, entdeckte man, dass die Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung, W- und Z-Bosonen, eine Masse von etwa 100 GeV besitzen. Aus der Forderung nach lokaler Eichinvarianz folgen masselose Felder. Um dieses Problem zu beseitigen, wurde über den Mechanismus der spontanen Symmetriebrechung ein weiteres Feld postuliert, das Higgs-Feld. Die Feldquanten dieses Feldes werden Higgs-Bosonen genannt. Die Erweiterung des Standardmodells der Elementarteilchenphysik postuliert eine Kopplung der Higgs-Bosonen an die Feldquanten des elektroschwachen Feldes und gibt ihnen so ihre Massen. Außerdem erhalten die Fermionen ebenfalls über das Higgs-Feld ihre Massen. Das Higgs-Boson ist das einzige noch nicht entdeckte Elementarteilchen des Standardmodells. Eine Hauptaufgabe des LHC-Beschleunigers wird es deshalb sein, einen eindeutigen Nachweis des Higgs-Bosons zu liefern. Das dazu benötigte Potenzial besitzt der LHC-Beschleuniger, da die theoretisch berechnete Masse des Higgs-Bosons kleiner als 1 TeV ist. Neben der Suche nach dem Higgs-Boson soll

¹European Organisation for Nuclear Research CERN.

²Large Hadron Collider.

ebenfalls nach Physik jenseits des Standardmodells gesucht werden. Dazu gehört u.a. das Modell der supersymmetrischen Teilchen (SUSY).

Zum erhofften Nachweis der vorhergesagten Elementarteilchen werden vier Experimente in den LHC-Ring integriert:

Experiment	Bedeutung
ALICE	A L arge I on C ollider E xperiment
LHCb	L arge H adron C ollider b
ATLAS	A T oroidal L HC A pparatu S
CMS	C ompact M uon S olenoid

Der LHC wird neben Protonen auch Schwerionen beschleunigen. ALICE wurde primär entwickelt, um die Zerfallsprodukte von Schwerionenprozessen zu untersuchen. Das LHCb-Experiment wird darauf spezialisiert sein, die CP-Verletzung beim Zerfall der B-Mesonen zu untersuchen. Dem gegenüber handelt es sich bei ATLAS und CMS um „Universaldetektoren“, die alle auftretenden physikalischen Prozesse untersuchen sollen.

1.2 Das CMS-Experiment

Der CMS-Detektor ist zwiebel-schalenförmig aufgebaut, wie in Abbildung 1.1 gezeigt. Direkt um den Wechselwirkungspunkt befindet sich der zentrale Spurdetektor, dieser ist vom elektromagnetischen bzw. hadronischen Kalorimeter umgeben. Die Kalorimeter sind von einer supraleitenden Spule umschlossen, die im

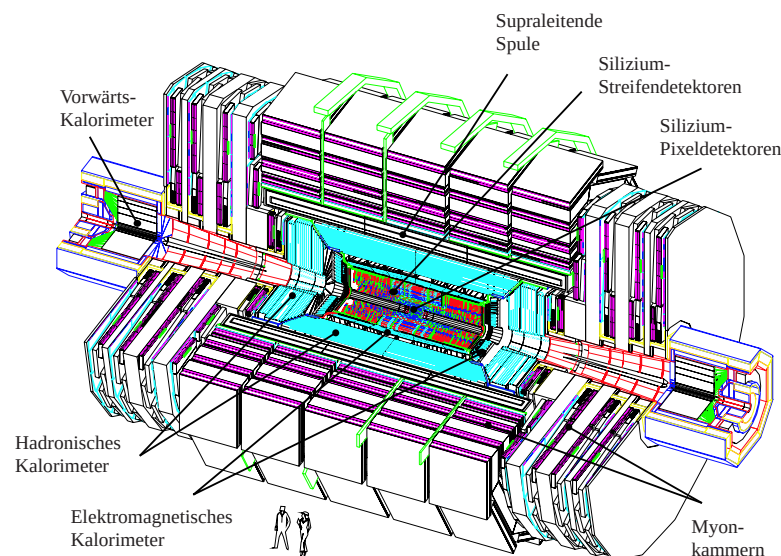


Abbildung 1.1: Schematischer Aufbau des CMS-Experiments; um die Strahl-Achse herum sind die Detektorsubkomponenten angebracht. Quelle [1].

Innern ein homogenes Magnetfeld von 4 Tesla erzeugt. Das Magnetfeld krümmt die Bahnen elektrisch geladener Teilchen und lässt so Schlüsse auf deren Impulse und Ladungen zu. Der äußere und größte Teil des CMS-Experiments wird von den Myonkammern gebildet.

Diese Arbeit befasst sich mit Tests von Substrukturen der Endkappen des zentralen Spurdetektors. Daher wird zunächst der Spurdetektor genauer beschrieben.

1.2.1 Der zentrale Spurdetektor

Der zentrale Spurdetektor (englisch Tracker) ist der Teil des CMS-Experiments, der dem Wechselwirkungspunkt der beiden Protonstrahlen am nächsten ist. Der gesamte Tracker ist aus Siliziumdetektoren aufgebaut. Insgesamt wird der zentrale Spurdetektor aus ca. 209 m² Silizium bestehen, diese Fläche wird sich auf etwa 15.000 Silizium-Streifensensoren aufteilen. Der schematische Aufbau des zentralen Spurdetektors ist in Abbildung 1.2 zu sehen. Der zentrale Spurdetektor besitzt

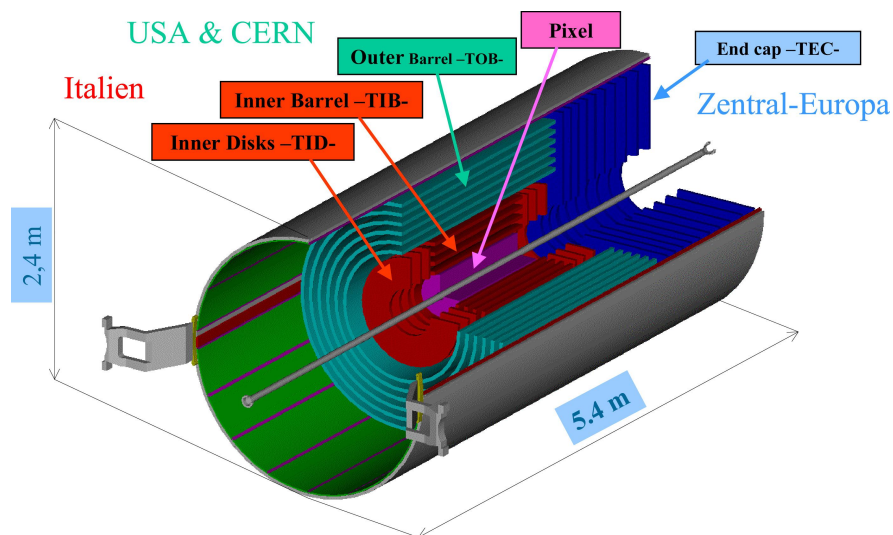


Abbildung 1.2: Schematischer Aufbau des zentralen Spurdetektors. Quelle [2].

einen Durchmesser von ca. 2,40 m und eine Längsausdehnung von ca. 5,40 m. Der Spurdetektor ist in verschiedene Unterbereiche gegliedert:

Abkürzung	Bedeutung
Pixel	Silizium-Pixel-Detektor
TID	Tracker Inner Disk
TIB	Tracker Inner Barrel
TOB	Tracker Outer Barrel
TEC	Tracker End Cap

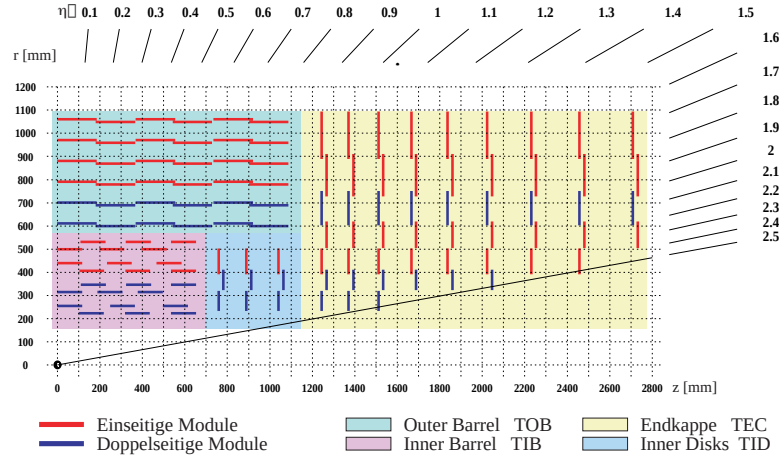


Abbildung 1.3: Viertelschnitt durch den Tracker. TIB, TID, TOB und TEC sind farbig markiert. Außerdem sind ein- und doppelseitige Module dargestellt. Weiterhin erkennt man die Abdeckungen in der Pseudorapidität η der einzelnen Subdetektoren. Quelle [3].

In nächster Nähe zum Wechselwirkungspunkt sind die Pixel-Detektoren angebracht. Zylinderförmig um die Pixel-Detektoren herum liegen TIB und TOB. TID und TEC sind radförmig aufgebaut und decken den Vorwärtsbereich des Trackers ab. In Abb.1.3 ist ein Viertelschnitt durch den Tracker gezeigt. Um die gesamte Fläche einer Tracker-Komponente mit Silizium abzudecken, werden die Siliziumdetektoren überlappend angeordnet.

Der zentrale Spurdetektor wird aufgrund der hohen Strahlenbelastung und den damit einhergehenden Strahlenschäden der Siliziumsensoren (vgl. Abschnitt 2.3.4) bei -10° Celsius betrieben werden. Die auftretenden Schäden werden damit reduziert. Um Kondensation auf den Komponenten zu vermeiden, wird der Tracker mit trockenem Stickstoff gespült.

1.2.2 Die Tracker-Endkappen

Die beiden Tracker-Endkappen (TEC) bestehen jeweils aus neun Rädern. Abbildung 1.4 ist eine schematische Darstellung einer Tracker-Endkappe. Man montiert die Siliziumdetektoren nicht direkt auf die Räder der Tracker-Endkappe, da auftretende Fehler nur sehr schwer zu beheben wären. Deswegen werden die Siliziumdetektoren auf Substrukturen (Petals³) montiert. Es gibt zwei Petal-Arten, Frontpetal und Backpetal. Die Frontpetals sind die Substrukturen, die auf die zum Wechselwirkungspunkt hinzeigende Seite eines Rads montiert werden. Die Backpetals werden auf die Rückseite eines Rads montiert. Dies wird in Abbildung 1.5 veranschaulicht. Auf den Petal werden die Siliziumdetektoren übereinander angebracht. Die Siliziumdetektoren sind ringförmig auf den Rädern der Tracker-Endkappe angebracht (siehe Abb. 1.4). Insgesamt gibt es bis zu sieben

³Englisch für: Blütenblatt, Blumenblatt.

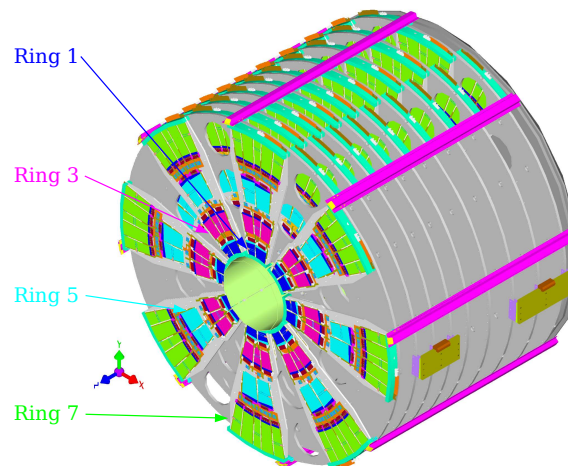


Abbildung 1.4: Schematischer Aufbau der Tracker-Endkappe. Man erkennt die neun Räder, sowie die in Ringen angebrachten Siliziumdetektoren. Quelle [4].

solcher Ringe. Die Zahl der Ringe nimmt mit zunehmender Entfernung vom Wechselwirkungspunkt ab (vgl. Abbildung 1.3), so dass es auf den Petal des neunten Rads nur noch vier solcher Ringe gibt. Durch die Montage der Siliziumdetektoren in Ringen und der Aufteilung von sich überlappenden Front- und Backpetal, erreicht man eine geschlossene Siliziumfläche auf jedem Rad der Tracker-Endkappe. Insgesamt befinden sich auf jedem Rad acht Front- und acht Backpetal. So ergibt sich eine Zahl von 144 Petals pro Tracker-Endkappe und damit 288 Petals, die mit Siliziumdetektoren bestückt werden müssen. Ein Frontpetal und ein Backpetal bilden zusammen eine autarke elektrische Einheit. Falls Probleme auftreten sollten, fallen nur diese beiden Petal und nicht das gesamte Rad zum Teilchennachweis aus. Bevor die Petal in die Tracker-Endkappen integriert werden können, müssen sie bestückt und getestet werden. Diese Arbeit gibt einen Überblick über die Struktur eines Petal und die benötigten Komponenten, um ein Petal zu bauen und anschließend zu testen.

Kapitel 2 beschäftigt sich mit dem Aufbau und der Funktionsweise von Halbleiterdetektoren. Die in der Tracker-Endkappe benutzten Siliziumdetektoren werden am Ende dieses Kapitels beschrieben. Das Ziel von Kapitel 3 ist die Erläuterung der Struktur des Petal und der benötigten Bauteile, um ein Petal zu bestücken. Anschließend wird in Kapitel 4 der Aufbau und die Funktionsweise eines Teststands zur Montage und Qualifikation eines Petal beschrieben und anhand einer Petalintegration näher erklärt. Nachdem die Petal montiert sind, müssen sie einem Langzeittest unterzogen werden, um ihre Qualifikation für den Einbau in die Tracker-Endkappen zu erhalten. Der Langzeitteststand wird in Kapitel 5 beschrieben, während sich Kapitel 6 den durchgeführten Tests zur Qualifikation des Petal widmet und erste Testergebnisse zeigt. Im abschließenden Kapitel 7 wird eine Zusammenfassung dieser Arbeit und ein Ausblick auf kommende Aufgaben gegeben.

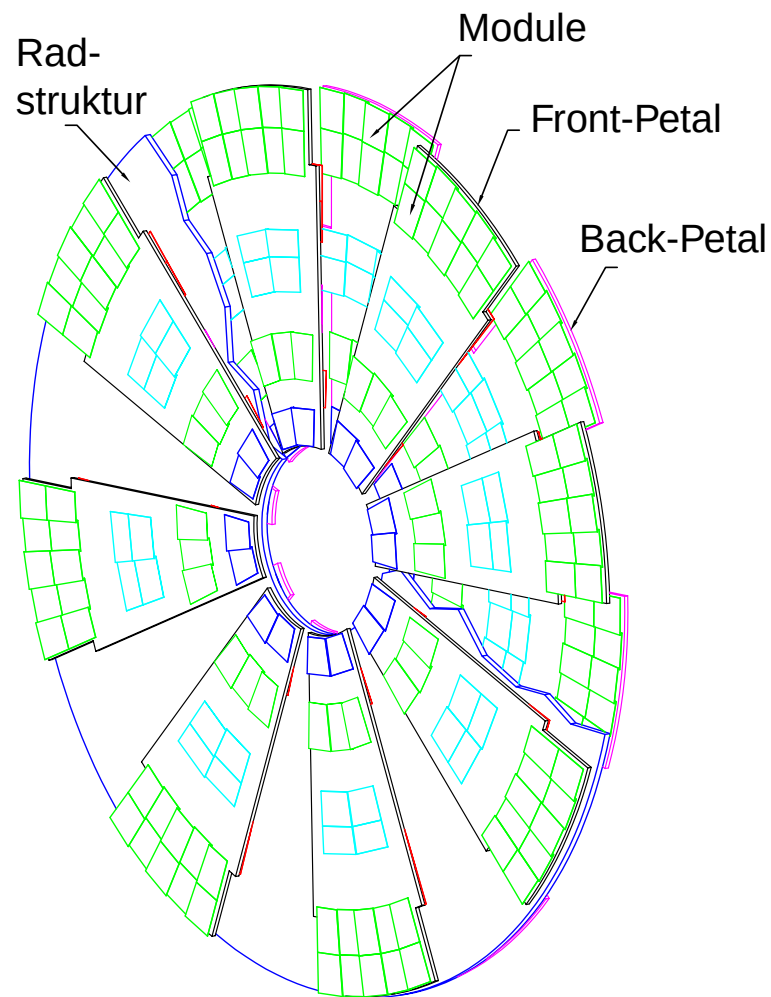


Abbildung 1.5: Prinzipieller Aufbau eines Rads der Tracker-Endkappe. Man erkennt deutlich Front- und Backpetal, sowie die darauf aufgetragenen Siliziumdetektoren (Module). Quelle [5].

Kapitel 2

Si-Streifendetektoren

In diesem Kapitel werden die Silizium-Streifendetektoren beschrieben, die beim Bau des CMS-Spurdetektors eingesetzt werden. Da es sich bei Silizium um einen Halbleiter handelt, werden zu Beginn des Kapitels die Eigenschaften eines Halbleiters erklärt. Si-Streifendetektoren sind im Prinzip Halbleiterdioden, deswegen wird kurz deren Funktionsweise beschrieben, bevor abschließend die Eigenschaften und der Aufbau von Si-Streifendetektoren des CMS-Spurdetektors erklärt werden.

2.1 Silizium als Halbleiter

Unter einem Halbleiter versteht man einen Festkörper, dessen elektrische Leitfähigkeit zwischen der von Isolatoren und Leitern liegt. Silizium ist ein Element der vierten Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente und hat somit vier Valenzelektronen. Befinden sich mehrere Siliziumatome am gleichen Ort, so gehen diese kovalente Bindungen miteinander ein. Dabei wird eine Diamant Kristallstruktur gebildet, siehe Abb. 2.1. Bei einzelnen Si-Atomen befinden sich die vier Valenzelektronen in wohldefinierten Energiezuständen. In einem Siliziumkristall können sich nach dem Pauli-Prinzip nicht beliebig viele Elektronen im gleichen Energiezustand befinden. Die Valenzelektronen des Siliziums besetzen daher un-

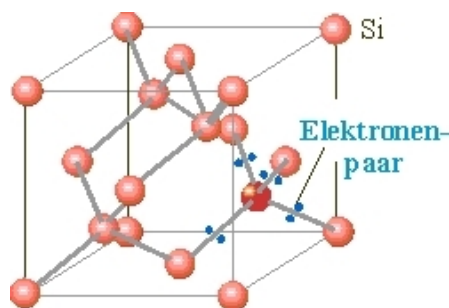


Abbildung 2.1: Ausschnitt aus einem Siliziumkristall. Das dunkelrot markierte Silizium-Atom zeigt die Bindung der Si-Atome mit Hilfe ihrer vier Valenzelektronen, siehe [6].

terschiedliche Energiezustände und man erhält ein annähernd kontinuierliches Energiespektrum, ein sog. Energieband. Die Valenzelektronen des Siliziums bilden zwei Energiebänder, das sog. Valenzband und das Leitungsband. Die Zone zwischen Valenz- und Leitungsband, deren Energiezustände nicht von Elektronen besetzt werden wird Bandlücke genannt. Damit ein Elektron vom Valenzband in das Leitungsband gelangen kann, muss es eine temperaturabhängige Energie aufbringen, die der Breite der Bandlücke entspricht. Bei Raumtemperatur entspricht diese Energie etwa 1,12 eV. Durch thermische Anregung kann einem Elektron die benötigte Energie zugeführt werden, damit es vom Valenzband in das Leitungsband gelangt. Befindet sich das Silizium am absoluten Temperaturnullpunkt, so sind alle Elektronen im Valenzband, Silizium ist also ein Isolator. Erst mit ansteigender Temperatur sammeln sich Elektronen im Leitungsband. Jedes in das Leitungsband gelangende Elektron hinterlässt im Valenzband einen unbesetzten Zustand. Dieser wird auch Defektelektron oder Loch genannt. Sowohl die Elektronen im Leitungsband, als auch die Defektelektronen im Valenzband tragen zur elektrischen Leitfähigkeit des Siliziums bei. Die Elektronen im Leitungsband können sich frei bewegen und bilden so einen Strom. Das im Valenzband erzeugte Loch kann von einem Nachbarlektron besetzt werden. Das so entstehende Loch im Valenzband wird dann wieder von einem Nachbarlektron besetzt und so fort. Dadurch entsteht im Valenzband ein dem im Leitungsband entgegengesetzt fließender Strom.

2.1.1 Die Dotierung von Halbleitern

Werden in einen Halbleiterkristall gezielt Fremdatome eingebracht, so spricht man von dotierten Halbleitern. Benutzt man zur Dotierung Atome einer höheren Hauptgruppe, so besitzt das benutzte Atom mehr Valenzelektronen als die restlichen Atome im Kristall. Die überschüssigen Elektronen sind nicht mehr an den kovalenten Bindungen des Gitters beteiligt, also leichter aus dem Valenzband zu entfernen. Ein so gebundenes Elektron befindet sich weder im Leitungsband, noch im Valenzband sondern besetzt ein neues Energieniveau, das Donatorniveau. Die benötigte Energie, um ein Elektron des Donatorniveaus in das Leitungsband zu heben, ist wesentlich kleiner als die benötigte Energie, um es vom Valenzband in das Leitungsband zu bringen. Ein so dotiertes Atomgitter wird auch n-dotiert genannt. Ähnlich verläuft die p-Dotierung mit Atomen aus einer niedrigeren Hauptgruppe. Dabei sind nicht genug Elektronen vorhanden um eine kovalente Bindung zu ermöglichen. Die fehlenden Elektronen werden als Löcher bezeichnet. Ein solches Loch kann leicht mit einem Elektron besetzt werden, um wieder eine kovalente Bindung zu ermöglichen. Durch den Elektronenmangel entstehen ebenfalls neue Energieniveaus, sog. Akzeptorniveaus. Abbildung 2.2 zeigt das Bändermodell mit eingetragenen Akzeptor und Donatorniveaus. Bei Silizium benutzt man zur p-Dotierung Atome der dritten Hauptgruppe, z.B. Bor. Man benutzt Atome der fünften Hauptgruppe um n-dotiertes Silizium herzustellen, hierzu wird z.B. Phosphor verwendet. Bei der Dotierung von Silizium verwendet man typische Verhältnisse von Dotierungsatomen zu Siliziumatomen von $1 : 10^6$ –

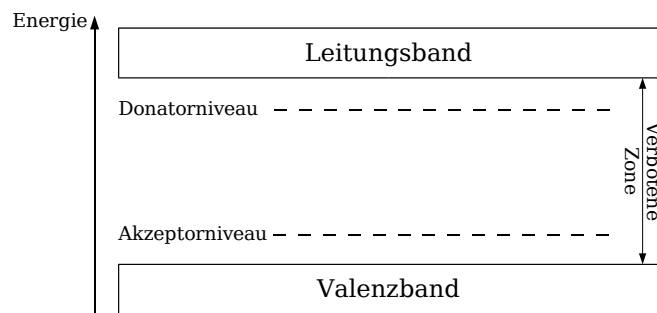


Abbildung 2.2: Das Bändermodell eines Halbleiters. Quelle [5].

10^9 . Je nach Verwendung wird dieses Verhältnis bis auf ein Fremdatom pro 100 Siliziumatome erhöht. Solche Dotierungen werden dann mit p^+ bzw. n^+ bezeichnet. Bei Si-Streifendetektoren benutzt man solche hohen Dotierungen, um einen guten elektrischen Kontakt zwischen Aluminium und Silizium herzustellen (vgl. Abschnitt 2.4).

2.2 Halbleiterdioden

Bringt man p-dotiertes und n-dotiertes Halbleitermaterial zusammen, so spricht man von einer Halbleiterdiode. Durch die unterschiedlichen Konzentrationen von Elektronen und Löchern in den beiden Schichten, diffundieren die Elektronen von der n- in die p-dotierte Schicht und die Löcher in umgekehrter Richtung. So können die beiden Ladungsträgerarten rekombinieren. In der n- bzw. p-dotierten Schicht bilden sich positiv- bzw. negativ geladene Raumladungszonen aus. Durch die Verschiebung der Ladungsträger entsteht ein elektrisches Feld, das dem Diffusionsprozess entgegenwirkt. Es entsteht ein Gleichgewichtszustand. Die Rekombination der freien Ladungen bewirkt in der Übergangszone zwischen dem n- und dem p-dotierten Bereich des Halbleiters eine verringerte Anzahl von schwach gebundenen Elektronen und Löchern. Diese Zone nennt man Verarmungszone. Abbildung 2.3 zeigt eine schematische Darstellung des p-n-Übergangs einer Diode.

Legt man nun eine Spannung an den p-n-Übergang, so überlagern sich das durch

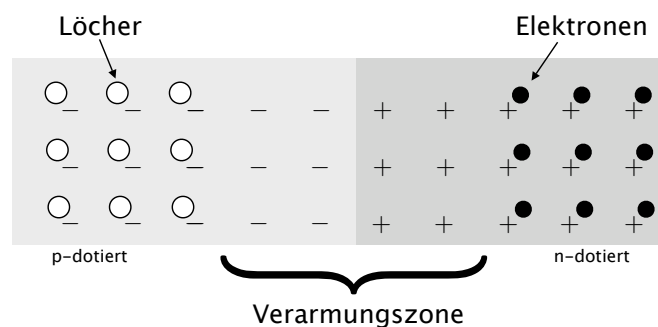


Abbildung 2.3: Verarmungszone am p-n-Übergang einer Diode. Quelle [3].

die äußere Spannung erzeugte und das durch die Rekombination entstandene elektrische Feld. Legt man eine negative Spannung an den p-dotierten Bereich und eine positive Spannung an den n-dotierten Bereich an, so wird die Verarmungszone vergrößert, und der elektrische Widerstand erhöht sich. Die Diode wird in Sperrrichtung betrieben. Die Abbildung 2.4 zeigt eine schematische Darstellung einer in Sperrrichtung betriebenen Diode. Wird die äußere Spannung umgekehrt gepolt, so erhält man eine verkleinerte Verarmungszone. Dies ist der Fall einer in Durchlassrichtung betriebenen Diode.

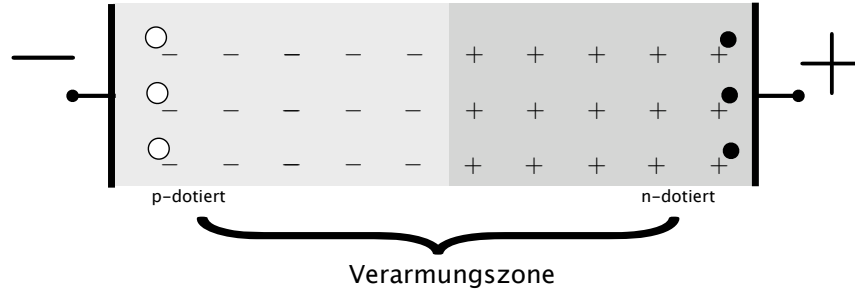


Abbildung 2.4: Eine in Sperrrichtung betriebene Diode, die Verarmungszone wird breiter. Quelle [3].

2.2.1 Die Verarmungszone einer Halbleiterdiode

Um die Ausdehnung der Verarmungszone einer Halbleiterdiode bestimmen zu können, wird hier eine Modellrechnung nach [7] durchgeführt. Mit dieser kann ein p-n-Übergang genauer beschrieben werden. Einen Ansatz für die Raumladungsdichte $\rho(x)$ in Abhängigkeit von der Breite der Verarmungszonen x_p für den p-dotierten Bereich und x_n für den n-dotierten Bereich, sowie den Konzentrationen N_A und N_D der Akzeptor- und Donatoratome, ergibt die Gleichung 2.1:

$$\rho(x) = \begin{cases} -e \cdot N_A & \text{für } -x_p < x < 0, \\ e \cdot N_D & \text{für } 0 < x < x_n, \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2.1)$$

Die Raumladungsdichte ist in Abb. 2.5 dargestellt. Diese wird in die Poissongleichung

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon} \quad (2.2)$$

eingesetzt. Als Lösung dieser Gleichung erhält man den Potentialverlauf, wie er in Abbildung 2.5 gezeigt ist. Damit erhält man für die angelegte Kontaktspannung:

$$V_0 = \frac{e}{2\varepsilon} (N_D x_n^2 + N_A x_p^2). \quad (2.3)$$

Es gilt Ladungserhaltung:

$$N_A x_p = N_D x_n. \quad (2.4)$$

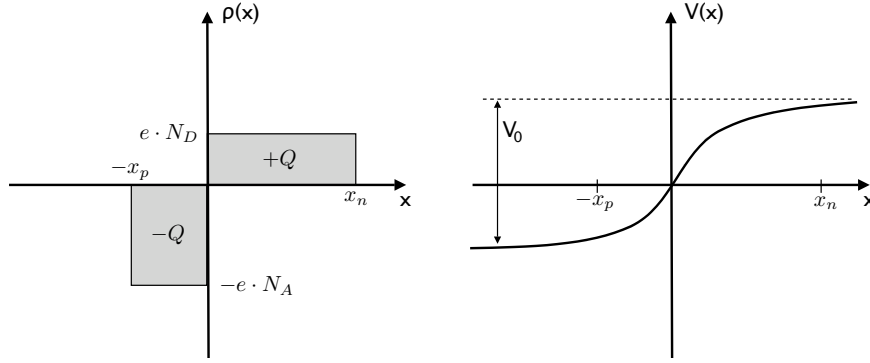


Abbildung 2.5: Die Ladungsverteilung einer als ideal angenommenen in Sperrrichtung geschalteten Diode und der daraus resultierende Potentialverlauf. Quelle [3].

Man erhält so einen direkten Zusammenhang zwischen den Eindringtiefen der Verarmungszone und der angelegten Spannung:

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{eN_D(1 + \frac{N_D}{N_A})}} \quad \text{und} \quad x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{eN_A(1 + \frac{N_A}{N_D})}}. \quad (2.5)$$

Geht man nun von einem Halbleiter aus, der sehr stark p-dotiert ist (p⁺-Typ, d.h. $N_A \gg N_D$), so breitet sich die Verarmungszone hauptsächlich in der n-dotierten Zone aus. Damit ergibt sich die gesamte Breite der Verarmungszone zu

$$d = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{e} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}. \quad (2.6)$$

Die Breite der Verarmungszone kann dann weiter genähert werden zu:

$$d \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{eN_D}}. \quad (2.7)$$

2.3 Die Funktionsweise und der Aufbau von Halbleiterdetektoren

2.3.1 Energieverlust geladener Teilchen in Materie

Fliegt ein geladenes Teilchen durch ein Material, so verliert es Energie. Dieser Energieverlust wird durch die Bethe-Bloch-Formel beschrieben:

$$-\frac{dE}{dx} = \kappa \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 \beta^2 c^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right]. \quad (2.8)$$

Neben den verwendeten Naturkonstanten gehen auch die Eigenschaften des durchquerten Mediums in die Bethe-Bloch Formel ein:

ρ	: Massendichte,
Z	: Kernladungszahl,
A	: Atomgewicht,
I	: Mittleres Anregungspotential,
δ	: Dichtekorrekturfaktor,
C	: Atomhüllenkorrekturfaktor,
W_{max}	: Maximaler Energieübertrag einer Wechselwirkung.

Die verbleibenden Größen sind die Eigenschaften des einfallenden Teilchens:

z	: Ladungszahl,
β	: Geschwindigkeit des einfallenden Teilchens in Einheiten der Lichtgeschwindigkeit c ,
γ	: $\sqrt{\frac{1}{1-\beta^2}}$ Lorentzfaktor.

Nimmt man nun beispielsweise als zu durchquerendes Medium Silizium und als geladene Teilchen π -Mesonen und trägt den mit der Bethe-Bloch-Formel errechneten Energieverlust pro Strecke gegen die Teilchenenergie auf, so ergibt sich der in Abbildung 2.6 gezeigte Kurvenverlauf. Der Energieverlust der π -Mesonen in Silizium fällt bei nicht relativistischen Teilchenenergien mit $\frac{1}{\beta^2}$ ab und erreicht dann bei $\beta \approx 0,96$ sein Minimum. Nähert sich die Teilchengeschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit, so steigt die Kurve wieder etwas an. Dieser Anstieg wird durch den logarithmischen Term in Gleichung 2.8 hervorgerufen und auch als relativistischer Wiederanstieg bezeichnet. Der Dichtekorrekturterm schwächt den Anstieg deutlich ab, und er kann in guter Näherung vernachlässigt werden. Näherungsweise verliert also jedes Teilchen mit einem Wert $\beta > 0,96$ die gleiche Energie im Silizium. Deswegen spricht man bei solchen Teilchen von MIPs¹.

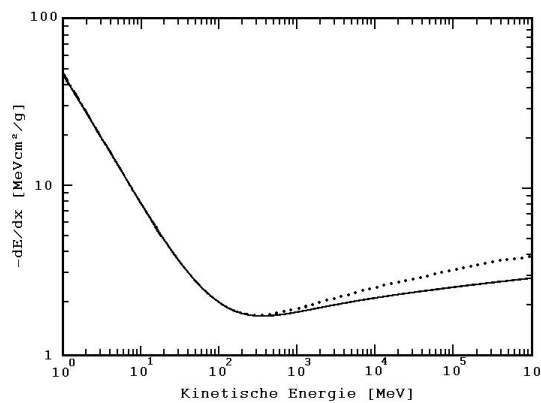


Abbildung 2.6: Mittlerer Energieverlust geladener π -Mesonen in Silizium. Die durchgezogene Linie ist das Ergebnis der Bethe-Bloch Formel mit Dichtekorrekturfaktor und die gestrichelte Linie das Ergebnis ohne den Korrekturfaktor. Quelle [8].

¹Minimum Ionising Particle: aus dem Englischen für: Minimal ionisierendes Teilchen.

2.3.2 Der Nachweis von Teilchen mit Hilfe eines Halbleiterdetektors

Wenn ein Teilchen durch Materie fliegt, so wird es durch Stöße abgebremst und verliert dabei Energie wie durch die Bethe-Bloch-Formel beschrieben. In einem Halbleiter bewirkt ein solcher Prozess die Erzeugung von Elektron–Loch–Paaren. Ist die betrachtete Diode in Sperrrichtung geschaltet, bilden sich die Elektron–Loch-Paare hauptsächlich in der Verarmungszone der Diode. Die Ladungsträger driften anschließend durch die Verarmungszone und erzeugen ein elektrisches Signal. Thermische Effekte verursachen die stetige Bildung von Elektron–Loch-Paaren und erzeugen einen meßbaren Leckstrom. Der Leckstrom lässt sich durch die Wahl von niedrigen Arbeitstemperaturen des Halbleiters unterdrücken, aber nicht vollständig verhindern.

2.3.3 Der Aufbau eines Silizium-Streifendetektors

Die Grundlage eines Silizium-Streifendetektors bildet eine Siliziumdiode, die in Sperrrichtung geschaltet ist. Abbildung 2.7 zeigt den schematischen Aufbau eines solchen Silizium-Streifendetektors. Man erkennt den großen n-dotierten Bereich,

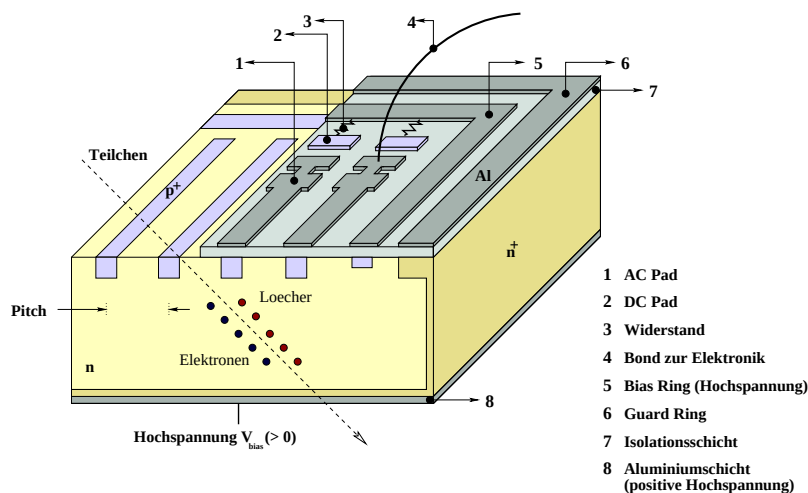


Abbildung 2.7: Schematischer Aufbau eines Silizium-Streifendetektors. Quelle [3].

der vollständig verarmt wird. Der p-dotierte Teil der Diode besteht aus den p⁺-dotierten Streifen, die an der Oberseite der n-dotierten Schicht in diese eingebettet sind. Die Verarmungsspannung wird zwischen der Aluminiumrückseite des Detektors und dem Bias²-Ring angelegt. Damit man zwischen der Aluminium-Rückseite und dem n-dotierten Silizium einen guten elektrischen Übergang zwischen Silizium und Metall hat, befindet sich dazwischen eine n⁺-dotierte Siliziumschicht. An der Außenseite des Silizium-Streifendetektors befindet sich noch ein weiterer Aluminium-Ring. Dieser Guard-Ring³ ist zum Schutz des Streifendetektors

²Englisch für Vorspannung.

³Das Wort Guard bedeutet Schutz.

angebracht. Er hält das elektrische Feld des Streifendetektors auf diesem und verhindert zusammen mit den aus n^+ -dotierten Silizium bestehenden Seitenwänden störende Randeffekte. Über das DC-Pad, das über einen Polywiderstand am geerdeten Bias-Ring angeschlossen ist, wird sichergestellt, dass jeder Auslesestreifen auf dem gleichen Potential liegt. Erzeugt ein Teilchendurchgang ein elektrisches Signal im Halbleiter, so wird dieses über die p^+ -Streifen kapazitiv an die AC-Pads ausgekoppelt. Eine kapazitive Auskopplung des Signals erreicht man, indem zwischen den Aluminiumstreifen und dem Silizium eine Isolationsschicht aus SiO_2 angebracht wird. Die AC-Pads sind über sog. *Bonds* mit der Ausleseelektronik verbunden.

2.3.4 Strahlenschäden in Halbleiterdetektoren des CMS-Experiments

Die Silizium-Streifendetektoren des CMS-Experiments werden während ihres Betriebs einer großen Strahlenbelastung ausgesetzt. Über die zehnjährige Betriebszeit von LHC erhält man eine integrierte Strahlenbelastung von $1,6 \cdot 10^{14}$ 1-MeV-Neutronenäquivalenten pro Quadratzentimeter.⁴ Eine Folge davon sind Gitterdefekte des Siliziumgitters. Bei Kernreaktionen entstehende Teilchen, wie Protonen und π -Mesonen, erzeugen nicht nur Elektron-Loch-Paare im Silizium, sondern wechselwirken auch mit den Siliziumkernen und verändern bzw. zerstören dadurch die Gitterstruktur des Silizium-Halbleiters. Durch solche Veränderungen können neue Energiezustände entstehen, die auch in der Bandlücke des Siliziums auftreten. Ein solcher Energiezustand erhöht die Wahrscheinlichkeit von Elektron-Übergängen zwischen Valenz- und Leitungsband und sorgt somit für einen höheren Leckstrom.

Die im CMS-Detektor herrschende Strahlenbelastung ändert ebenfalls die Halbleitereigenschaften des Siliziums. Fehlstellen im Silizium-Gitter wirken wie Akzeptoratome. Treten sehr viele solcher Fehlstellen auf, kommt es zum Effekt der Typinversion. Unter einer Typinversion versteht man eine durch Strahlenbelastung hervorgerufene Änderung der Dotierung eines Halbleiters (hier der Wechsel von der n - zu der p -Schicht).

Die durch Strahlenschäden entstandenen Fehlstellen im Siliziumgitter bilden sich in Strahlungspausen teilweise ohne äußere Einflüsse zurück. Dabei können Siliziumatome, die aus der Gitterstruktur gelöst wurden, wieder an ihre ursprüngliche Position im Gitter zurückdriften und der Gitterdefekt bildet sich teilweise zurück. Dieser Effekt wird *Annealing* genannt. Der Prozess des Annealings ist exponentiell zeitabhängig und hat bei Raumtemperatur eine Zeitkonstante von etwa zehn Minuten. Zu niedrigeren Temperaturen hin nimmt diese Zeit zu, so dass man für das CMS-Experiment mit Zeitskalen zwischen einigen Stunden bis hin zu einigen Tagen rechnet. Neben dem Annealing gibt es noch den für das Siliziumgitter negativen Effekt des *Reverse-Annealing*. So bezeichnet man die unumkehrbare

⁴Die Strahlung von 1-MeV-Neutronenäquivalenten pro cm^2 entspricht der Strahlenbelastung, die ein Neutron mit einer kinetischen Energie von 1 MeV verursacht. Man benutzt diese Einheit, um Strahlenbelastungen miteinander vergleichen zu können.

Anhäufung von Gitterdefekten an verschiedenen Punkten im Siliziumgitter. Wie das Annealing wird das Reverse-Annealing durch hohe Temperaturen begünstigt. Der CMS-Spurdetektor wird bei -10° Celsius betrieben werden, obwohl bei dieser Temperatur der Effekt des Annealing fast nicht stattfindet. Da der durch das Reverse-Annealing hervorgerufene Schaden viel größer wäre, als die positiven Effekte des Annealings, versucht man nötige Wartungszeiten und ein damit verbundenes Erhöhen der Temperatur so weit wie möglich zu vermeiden und Reparaturphasen kurz zu halten.

2.4 Die Si-Streifendetektoren des CMS-Spurdetektors

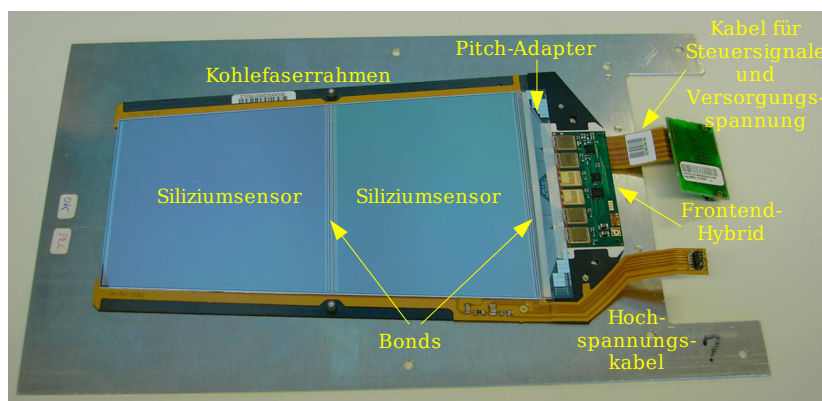


Abbildung 2.8: Ring 6 Silizium-Streifendetektor des CMS-Spurdetektors. Quelle [5].

Abbildung 2.8 zeigt einen Si-Streifendetektor des CMS-Spurdetektors. Die Basis für den Detektor bildet eine Kohlefaserstruktur, auf die die Detektor-Komponenten mit strahlenhartem Kleber geklebt werden. Die Kohlefaserstruktur besitzt vier Bohrungen, mit deren Hilfe die Si-Streifendetektoren später an den Petals in den Endkappen der Spurkammer befestigt werden. Auf den Kohlefaserrahmen werden die Siliziumsensoren geklebt, ein Sensor für einen Detektor der Ringe 1 bis 4 und zwei Sensoren für die Ringe 5 bis 7. Je nach Ring besitzen die Siliziumsensoren 512 oder 768 Silizium-Streifen. Über eine Kaptonfolie gelangt die Hochspannung an den p^+ - n -Übergang. Rechts neben den Siliziumsensoren sind der Pitch-Adapter⁵ und der Frontend-Hybrid befestigt, alle diese Komponenten sind durch Bonds verbunden. Der Frontend-Hybrid trägt die Steuerungs- und Ausleseelektronik, die je nach Geometrie des verwendeten Silizium-Streifenmoduls aus vier oder sechs APV-Chips⁶ für die Datenauslese, einem APV-MUX-Chip, der die Daten der APV-Chips multiplext, sowie dem TPLL-Chip⁷ und einem DCU-Chip⁸

⁵Englisch für: Abstandsadapter.

⁶Analogue Pipeline Voltage.

⁷Tracker Phase Locked Loop.

⁸Detector Control Unit.

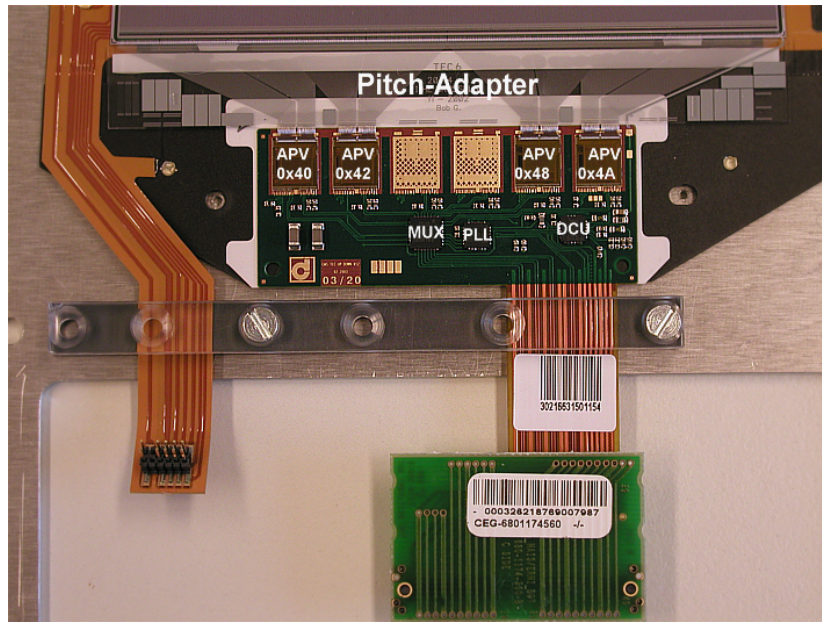


Abbildung 2.9: Frontend-Hybrid eines Silizium-Streifendetektors. Die Verbindung zu den Auslestreifen wird mit Hilfe des Pitch-Adapters hergestellt. Quelle [9].

besteht.. Eine vergrößerte Darstellung des Frontend-Hybriden ist in Abbildung 2.9 gezeigt. Die Aluminium-Streifen der Siliziumsensoren haben in den Endkappen des zentralen Spurdetektors Abstände zwischen 163 und 205 μm . Diese werden mit den APV-Chips verbunden, deren Eingangskanäle einen Abstand von nur 44 μm haben. Um die Differenz der beiden Abstände zu überbrücken, wird der Pitch-Adapter benutzt. Die Versorgungsspannung und die Steuerungsbefehle des Frontend-Hybriden werden über ein weiteres Kaptonkabel geliefert.

2.4.1 Fehler auf den Si-Streifendetektoren

Bei der Herstellung und dem späteren Umgang mit den Silizium-Streifenmodulen können Defekte entstehen. Es können z.B. die Bonds zwischen den Silizium-Streifen bei zwei-sensorigen Silizium-Streifenmodulen, oder die Bonds zwischen Pitch-Adapter und Silizium-Streifen, bzw. Pitch-Adapter und APV abreißen. Einen solchen Defekt bezeichnet man als „Open“. Sollten zwei Silizium-Streifen bei ihrer Herstellung kurzgeschlossen werden, spricht man von einem „Short“. Wird die isolierende SiO_2 -Schicht zwischen Aluminiumstreifen und p^+ -Schicht so unterbrochen, dass eine leitende Verbindung zwischen diesen Schichten entsteht, so spricht man von einem „Pinhole“. [9]

2.4.2 Der APV-Chip

Der APV-Chip empfängt über den Pitch-Adapter die analogen Signale der Auslestreifen und speichert diese in einem Ringspeicher. Der Ringspeicher ist mit

einer Speichermatrix vergleichbar, die 128 Spalten breit und 192 Zeilen tief ist. Die Menge der Spalten entspricht dabei der Anzahl an ausgelesenen Streifen. Die Taktung des APV-Chips verläuft mit 40 MHz, der Kollisionsrate des LHC-Beschleunigers. Es werden also alle 25 ns Daten in eine Zeile des APV-Chips gespeichert. Somit ergibt sich die Maximaldauer, in welcher die Daten vom APV-Chip abgerufen werden können, zu $4,8 \mu\text{s}$ bevor sie überschrieben werden. Da bei einer Speicherung aller Daten die Datenmenge zu groß würde, werden nur Signale von physikalischem Belang ausgelesen. Die Triggerentscheidung dauert $3,2 \mu\text{s}$, ist also kleiner als die Verweildauer der Signale im APV-Ringspeicher, so dass die Daten tatsächlich ausgelesen werden können.

Die Daten einer Zeile des APV-Ringspeichers werden zusammen ausgelesen. Die Datenmenge von 128 Kanälen wird dann auf einem Kanal zusammengefasst (man nennt diesen Vorgang multiplexen) und weitergeleitet. Damit reduziert man die Anzahl der benötigten Leitungen zur Datenauslese. Der so entstehende Datensatz eines APVs hat eine charakteristische Struktur, wie sie Abbildung 2.10 zeigt. Der Anfang eines Datensatzes wird durch den Datenkopf, den sog. Header, signa-

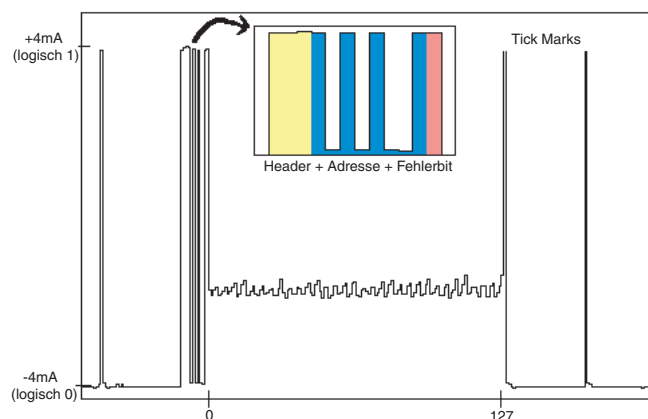


Abbildung 2.10: Charakteristischer Datensatz eines APV-Chips. Quelle [9].

liert. Dieser besteht aus drei Bits die logisch eins sind. Danach folgt die acht Bit lange Adresse der gerade ausgelesenen Speicherzeile des APVs und ein Fehlerbit. Das Fehlerbit ist bei funktionierendem APV identisch der logischen eins sonst null. Nach diesen ersten zwölf Bit folgen die analogen Daten von 128 Silizium-Streifen, die einem Strom zwischen $+4 \text{ mA}$ (logisch eins) und -4 mA (logisch null) entsprechen. Den Abschluss eines jeden Datensatzes bildet ein Synchronisationspuls, die sogenannte Tick-Mark. Durch die Tick-Mark wird eine Synchronisation mit der Ausleseelektronik gewährleistet. Sendet der APV keine Daten, so wird alle 35 LHC-Taktzyklen⁹ eine Tick-Mark gesendet, um die Elektronik zu synchronisieren.

Der APV besitzt eine interne Logik, die Kalibrationspulse senden kann. Das Ladungs-Vorzeichen dieser Pulse wird von einem internen Inverter bestimmt. Für spätere Tests der Silizium-Streifendetektoren spielen die Anstiegszeit und die Höhe des Kalibrationspulses eine wichtige Rolle. Die Form des Pulses wird vom

⁹Man kann die APVs auch mit 20 MHz betreiben, dann wird der Synchronisationspuls alle 70 Taktzyklen gesendet.

Betriebsmodus des APV-Chips bestimmt. Es gibt drei Betriebsmodi. Im Peak-Modus werden die Einträge einer Zeile des APV-Ringspeichers ausgelesen. Ein in diesem Modus erzeugter Kalibrationspuls hat eine Anstiegszeit von etwa 50 ns. Da ein LHC-Takt jedoch nur 25 ns dauert, würden sich in diesem Betriebsmodus die Daten des APV-Chips überlagern. In der ersten Betriebsphase von LHC, bei der niedrige Luminositäten geplant sind, werden die APV-Chips im Peakmodus bei angeschaltetem Inverter betrieben werden. Nach dieser Anlaufphase wird dann der Deconvolution-Modus benutzt werden. Dieser liest drei aufeinanderfolgende Speicherzeilen des APV-Chips aus und wichtet deren Einträge. Ein in diesem Modus entstandener Kalibrationspuls erreicht eine Anstiegszeit von etwa 25 ns. Neben diesen beiden Moden kann der APV auch im 3-Sample-Modus betrieben werden. Dieser spielt allerdings keine Rolle im späteren LHC-Betrieb. Hier werden die Daten dreier aufeinander folgender Speicherzeilen ausgelesen und im Peak-Modus ausgegeben. Weiterführende Informationen zum APV-Chip findet man in [10].

2.4.3 Der APV-MUX-Chip

Der APV-MUX-Chip multiplext die Daten zweier APV-Chips auf einen Auslesekanal. Insgesamt erhält man so eine Reduktion der verwendeten Auslesekanäle von 1:256. Die Gesamtzahl der Kanäle im CMS-Spurdetektor liegt bei etwa zehn Millionen. Diese Zahl wird durch das Multiplexen im APV-Chip und im APV-MUX-Chip auf etwa 40.000 reduziert. Man benötigt nur einen APV-MUX-Chip pro Frontend-Hybrid, da dieser bis zu sechs APV-Chips auf drei Leitungen multiplexen kann. [11]

2.4.4 Der TPLL-Chip

Der APV-Chip benötigt auch die Information über den LHC-Takt und den Trigger. Um weitere Leitungen zum Frontend-Hybriden einzusparen wurde der TPLL-Chip entwickelt. Ein Trigger-Signal wird nicht auf einer separaten Leitung geschickt, sondern ist auf der Taktleitung durch das Ausbleiben eines Taktsignals kodiert. Der TPLL-Chip extrahiert die Trigger aus dem LHC-Takt und gibt diese Information an den APV-Chip weiter. Zusätzlich übernimmt der TPLL-Chip die Synchronisation zwischen LHC-Takt und APV-Takt. Da die Signallaufzeiten von der Position der Silizium-Streifenmodule im CMS-Spurdetektor abhängen, würde ohne Synchronisation zwischen APV-Takt und LHC-Takt keine eindeutige Signalzuordnung möglich sein. Insgesamt kann das Signal so um 375 ns verzögert werden. [12]

2.4.5 Der DCU-Chip

Der DCU-Chip kontrolliert die Versorgungsspannungen von 1,25 V und 2,50 V des Frontend-Hybriden. Jeder DCU-Chip besitzt eine eindeutige Nummer, diese ermöglicht eine eindeutige Identifikation des zugehörigen Silizium-Streifenmoduls.

Zudem liefert der DCU-Chip Informationen über die Temperatur der Streifensensoren, des Frontend-Hybriden und des DCU-Chips selbst. Weiterhin kann mit Hilfe der DCU auch der Leckstrom der Silizium-Streifen ermittelt werden. Mehr zur DCU findet man in [13].

Kapitel 3

Das Petal

Die bestückten Substrukturen der Tracker-Endkappe des CMS-Experiments werden Petals genannt. Es handelt sich dabei um trapezförmige Strukturen aus Kohlefaser und Nomex-Papier, auf denen sowohl die Silizium-Streifenmodule als auch die Steuerungs- und Auslesekomponenten aufgebracht werden. Die so bestückten Petals werden dann in die Tracker-Endkappen des CMS-Experiments integriert.

In diesem Kapitel sollen der mechanische Aufbau der Petals beschrieben und die aufzubringenden Komponenten sowie deren Kühlung kurz erläutert werden. Anschließend wird die elektrische Kommunikation der Komponenten untereinander erklärt.

3.1 Mechanischer Aufbau

Ein Petal besteht aus einer Kohlefaserstruktur¹, die hexagonal aufgebaut ist. In diese Kohlefaserstruktur werden zur Kühlung der Petalkomponenten zwei etwa 3,50 m lange, ca. 6 mm durchmessende Kühlschlangen aus Titan eingelassen. Der Anschluss an einen externen Kühlkreislauf erfolgt über ein sog. *Cooling-Manifold*², welches ebenfalls aus Titan besteht und an die Kühlschlangen geschweißt wird. Die Petals werden beim Einbau in die Tracker-Endkappen mit Hilfe des Cooling-Manifolds befestigt. Abb. 3.1 zeigt den Ausschnitt eines Petals mit angeschweißtem Cooling-Manifold.

3.2 Die Wärmeabgabe der Petalkomponenten

Jede auf einem Petal angebrachte mit Strom versorgte Komponente hat eine Verlustleistung, die in Form von Wärmeenergie abgegeben wird. Der CMS-Spurdetektor wird zur Minimierung von Strahlenschäden bei -10° Celsius betrieben werden. Deswegen muss die von den Petalkomponenten erzeugte Wärmeenergie abgeführt werden. Nahezu die gesamte Wärmeleistung eines Petals wird von den Frontend-Hybriden erzeugt. Tabelle 3.1 gibt die gesamte Wärmeleistung eines Petals bei

¹Näheres zur Kohlefaserstruktur des Petals: siehe [5].

²aus dem Englischen für Kühlmittel Mehrfachverteiler.

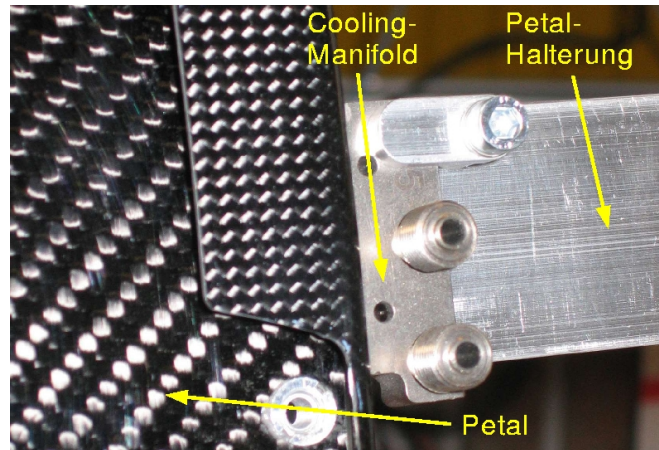


Abbildung 3.1: Petal mit angeschweißtem Cooling-Manifold.

einer Silizium-Temperatur von -15° Celsius in Abhängigkeit von seiner Position im CMS-Spurdetektor an. Zu den hinteren Rädern hin, fällt die Leistungsabgabe ab, weil die Anzahl der wärmeproduzierenden Komponenten abnimmt. Man geht davon aus, dass die nach zehn Jahren LHC-Betrieb gemessene Leistungsabgabe um ca. 10% ansteigt.

Räder	Wärmeleistung [W]	
	Frontpetal	Backpetal
1-3	75	62
4-6	62	56
7-8	49	51
9	44	48

Tabelle 3.1: Wärmeleistung eines Petals in Abhängigkeit von seiner Position in der Tracker-Endkappe. Quelle [14]

3.3 Die Kühlung des Petals

Die in die Petalstruktur eingelassenen Titan-Kühlschlangen dienen dazu, die auf den Petals erzeugte Wärme aus den Endkappen des CMS-Spurdetektors abzuführen. Der Verlauf dieser Kühlschlangen ist in Abb. 3.2 gezeigt. An den Kühlschlangen werden sog. *Inserts* angebracht, auf welchen die Silizium-Streifenmodule befestigt werden. Auf die Inserts wird vor dem Aufbringen der Silizium-Streifenmodule eine strahlenharte Wärmeleitpaste³ gegeben, um einen möglichst effizienten thermischen Kontakt zu gewährleisten. So kann die Wärme der Petalkomponenten an das Kühlmittel⁴ abgegeben werden, das durch die Kühlschlangen fließt.

³Es wird das Produkt 340 der Firma Dow Corning verwendet.

⁴Im CMS Experiment wird dies C_6F_{14} sein.

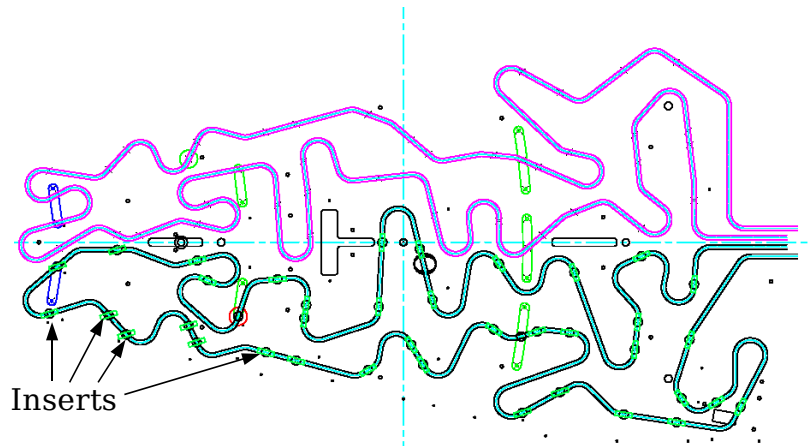


Abbildung 3.2: Kühltischschlangenverlauf in einem Petal. Quelle [5].

3.4 Die Petalkomponenten und ihre Funktionsweise

Jede im folgenden vorgestellte Petalkomponente besitzt einen Matrixcode, durch welchen sie eindeutig identifizierbar ist. In einer zentralen Datenbank⁵ findet man detaillierte Informationen unter dem Matrixcode für jede Komponente. Soweit Tests mit den Komponenten durchgeführt wurden, stehen deren Ergebnisse ebenfalls in der Datenbank.

3.4.1 Das Interconnectboard

Als erste Komponente wird auf jedes Petal das Interconnectboard (*ICB*) montiert. Es bildet die elektrische Grundstruktur, auf welche alle anderen Komponenten aufgebracht werden. Das ICB besteht je nach Petalgeometrie aus bis zu fünf Einzelteilen, die das gesamte ICB ergeben. Durch im Petal vorhandene Löcher werden die Einzelteile des ICBs zusammengesteckt. Auf Petals der hinteren Räder der Tracker-Endkappe lässt man die Teile des ICBs weg, die für die Montage der ersten Ringe vorgesehen sind. Auf dem ICB befinden sich die Anschlussstecker für die optische Auslese und für die Silizium-Streifenmodule, sowie alle auf dem Petal benötigten Signal- und Steuerleitungen.

3.4.2 Der digitale Opto-Hybrid

Die Kommunikation auf den Petals erfolgt elektrisch. Allerdings werden beim CMS-Experiment die Steuersignale optisch zu den Petals geleitet, wo sie dann mit Hilfe des *DOH*⁶ in elektrische Signale konvertiert werden. Mit 40 Mbit/s gelangen die Steuersignale zu den Petals, die vom LHC gelieferten Steuersignale

⁵Es handelt sich dabei um die CMS-Tracker-Datenbank; für weitere Informationen siehe [15].

⁶Digital Opto Hybrid.

werden mit 80 Mbit/s empfangen. Um die Kommunikation zwischen DOH und den weiteren Petalkomponenten zu sichern, sind die DOHs so ausgelegt, dass ihre Bit-Fehlerrate maximal bei 10^{-9} liegt. [16]

3.4.3 Die Kommunikations- und Kontroll-Einheiten

Zur elektrischen Ansteuerung aller Komponenten des Petals werden sog. *CCUs*⁷ verwendet. Auf jedem Petal werden zwei CCUs angebracht. Eine CCU ist für die Steuerung der Ringe 1 bis 4, die zweite CCU für die der Ringe 5 bis 7 zuständig (vgl. Kapitel 1.2). Der CCU-Chip ist auf einer CCUM⁸ angebracht. Die CCUM bildet die Basis für die CCU, d.h. alle nötigen elektrischen Grundelemente sind auf ihr vorhanden. CCUs werden elektrisch betrieben, sie erhalten die Steuersignale direkt vom DOH. Ein Front- und ein Backpetal bilden eine elektronische Einheit, die von vier CCUs gesteuert wird. Diese vier CCUs sind zu einem Kontrollring zusammengefasst, der schematisch in Abb.3.3 gezeigt ist. Der Kontrollring wird

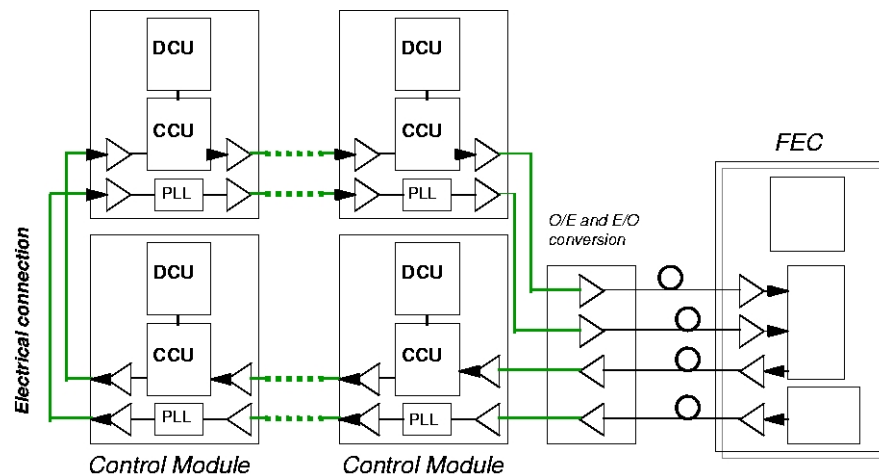


Abbildung 3.3: Aufbau des CCU-Kontrollrings. In Anlehnung an [17].

Tokenring⁹ genannt. Man wählt diese Bezeichnung, da der Kontrollring über ein von verschiedenen Firmen entwickeltes Protokoll, dem Token-Ring-Protokoll, angesprochen wird. Jede CCU ist im Tokenring eindeutig durch eine interne Adresse identifizierbar. Die CCU-Adressen sind auf den einzelnen CCUs hartverdrahtet und stammen aus einem Bereich zwischen 1 und 127.¹⁰ Der *FEC*¹¹ steuert den Tokenring. Über den Tokenring werden kleine Pakete an die CCUs gesendet. Sollen diese keine Information senden, so schicken sie das Paket unverändert weiter. Falls eine CCU Daten senden möchte, so ersetzt sie den Token durch Daten mit der Empfängeradresse. Bis zum Empfänger werden die Daten dann durch das gleiche,

⁷Communication and Control Units.

⁸Communication and Control Unit Module.

⁹Das Wort „Token“ stammt aus dem Englischen und bedeutet Kurzzeichen.

¹⁰Tatsächlich werden die CCU-Adressen hexadezimal dargestellt, hexadezimal ist der CCU-Adressbereich: 01-85.

¹¹Front End Controller.

eben beschriebene Prinzip weitergeleitet. Falls eine CCU Daten senden möchte, aber Daten einer anderen CCU empfängt, so werden diese Daten weitergeleitet und erst der nächste Token wird ersetzt. Der Empfänger ändert das letzte Zeichen nach den Daten und schickt diese ansonsten unverändert weiter. Falls die sendende CCU das so modifizierte Datenpaket zurück erhält, weiß sie, dass ihre Daten angekommen sind (da nur das letzte Zeichen geändert ist), löscht die Daten und schickt einen leeren Token los. Auf diese Weise kann die Funktionstüchtigkeit des Tokenrings untersucht werden. Da es fatale Folgen für zwei Petals hätte, falls der Tokenring ausfallen würde, wurde der Ring so konstruiert, dass eine CCU/CCUM ausfallen kann, ohne die Tokenringverbindung zu unterbrechen. Abb.3.4 zeigt den

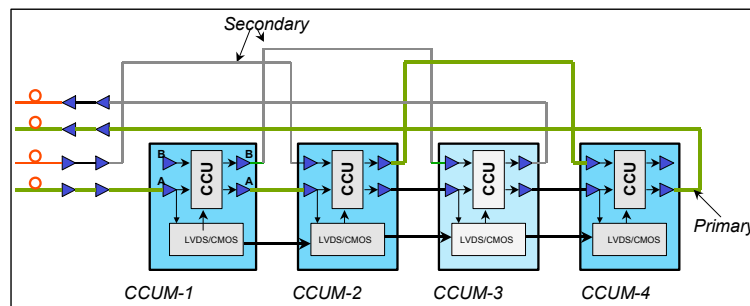


Abbildung 3.4: Schematische Funktionsweise des Tokenrings. Quelle [17].

Tokenring, in diesem Szenario ist CCUM3 ausgefallen. Der Ring ist so konstruiert, dass alle Signale auf zwei Leitungen geschickt werden können. Dementsprechend hat jede CCUM zwei Eingangsleitungen und zwei Ausgangsleitungen A und B. Der Unterschied zwischen Leitung A und Leitung B besteht darin, dass Leitung A alle CCUMs seriell miteinander verbindet, während Leitung B jeweils eine CCUM überspringt. Standardmäßig wird die Leitung A benutzt. Die in Abb. 3.4 vor der ausgefallenen CCUM3 positionierte CCUM2 schaltet auf Kanal B um und kann so CCUM3 überspringen. CCUM4 schaltet dann wieder auf Leitung A. Somit ist die Funktion des Tokenrings gesichert. Falls mehrere in direkter Folge geschaltete CCUMs eines Tokenrings ausfallen, wäre der gesamte Ring nicht ansprechbar und man müsste ihn reparieren, oder den Totalausfall zweier Petals im Tracker hinnehmen. Um mit den Petalkomponenten kommunizieren zu können, beherrscht der CCU-Chip ebenfalls die Kommunikation per I²C-Protokoll¹². [17]

3.4.4 Die Silizium-Streifenmodule

Die wichtigsten Komponenten auf jedem Petal bilden die Silizium-Streifenmodule, sie liefern die experimentellen Daten der Tracker-Endkappe und sind dort ringweise angebracht, vgl Kapitel 1.1. Auf einem Petal befinden sich die geradzahli- gen Ringe auf der einen, die ungeradzahli- gen Ringe auf der anderen Petalseite. Da die Tracker-Endkappen aus Frontpetals und Backpetals bestehen, erhält man

¹²Inter Integrated Circuit: Dabei handelt es sich um ein von der Firma Philips entwickeltes Kommunikationsprotokoll, siehe [18].

Räder	Anzahl Silizium-Streifenmodule	
	Frontpetal	Backpetal
1-3	28	23
4-6	24	21
7-8	20	19
9	17	17

Tabelle 3.2: Anzahl der Silizium-Streifenmodule in Abhängigkeit von der Petalposition in der Tracker-Endkappe.

vier Petalseiten. Die jeweils ungeradzahligten Ringe befinden sich auf den Seiten *A* (Frontpetal) und *C* (Backpetal), die geradzahligten Ringe auf den Seiten *B* (Frontpetal) und *D* (Backpetal). Die Seiten *A* und *C* zeigen zum Wechselwirkungspunkt des CMS-Experiments hin und die Seiten *B* und *D* davon weg. Um die Silizium-Streifenmodule auf den verschiedenen Ringen der Petals unterscheiden zu können, wird ihnen eine zusätzliche Bezeichnung gegeben. Zuerst wird der Ring und anschließend die Modulposition auf dem Ring angegeben. Diese wird vom Wechselwirkungspunkt aus, im Uhrzeigersinn erhöht. Position 6.4 hieße also Ring 6 Position 4 und zeigt vom Wechselwirkungspunkt weg. Je nach Petalgeometrie und Radposition befinden sich bis zu 28 Silizium-Streifenmodule auf einem Petal. Während die Petals der Räder 1 bis 3 vollständig mit Silizium-Streifenmodulen bestückt sind, nimmt die Zahl der integrierten Silizium-Streifenmodule zu den hinteren Rädern hin ab, vgl. Tabelle 3.2.

Der elektrische Aufbau der Silizium-Streifenmodule ist in Abschnitt 2.4 nachzulesen. Es existieren zehn verschiedene Modulgeometrien, jeweils eine für die Ringe 3, 4, 6 und 7 und zwei für die Ringe 1, 2 und 5, da auf diesen Doppelmodule, die aus zwei verschiedenen Einzelmodulen bestehen, verwendet werden. Man nennt diese Normal- bzw. Stereomodul. Dabei liegen die Normalmodule Rücken an Rücken mit den Stereomodulen. Um eine gute zweidimensionale Ortsauflösung zu erreichen, sind die beiden Module in einem Winkel von 100 mrad gegeneinander verdreht. Eine Einheit aus Normal- und Stereomodul wird auch als Doppelmodul bezeichnet. Die Module der Ringe 1, 2 und 5 bestehen jeweils aus 768 Siliziumstreifen, während die Module der Ringe 3, 4, 6 und 7 aus 512 Si-Streifen bestehen.

3.4.5 Die Analogen Opto-Hybride

Mit Hilfe der *AOHs*¹³ werden die elektrischen analogen Daten der Silizium-Streifenmodule in optisch-analoge Signale verwandelt, die dann zur Datenauslese des CMS-Spurdetektors gesendet werden. Die hierzu verwendeten Laser sind *InGaAsP*-Laser, die im Mittel bei einer Wellenlänge von 1.310 nm betrieben werden. Jedes Silizium-Streifenmodul ist einem AOH zugeordnet. Je nach verwendetem Silizium-Streifenmodul, werden unterschiedliche AOHs benutzt. Für Silizium-Streifenmodule mit 512 Kanälen, also 4 APVs, werden AOHs mit 2 Lasern verwendet. Besitzt das Silizium-Streifenmodul 6 APVs bzw. 768 Silizium-

¹³Analogue Optical Hybrid.

streifen (vgl. Abschnitt 2.4) werden AOHs mit 3 Lasern eingesetzt. Das von den Lasern emittierte Licht gelangt über optische Fasern an das Ende des Petals und wird von dort in die Ausleseketten des Trackers eingespeist. Bei den optischen Fasern der AOHs handelt es sich um sehr fragile Bauteile. Aus diesem Grund und wegen der unterschiedlichen Positionen der AOHs auf dem Petal werden AOHs mit verschiedenen Faserlängen gebaut. Insgesamt gibt es acht unterschiedliche Faserlängen zwischen 35 cm und 120 cm [19].¹⁴

3.5 Die Kommunikation mit und auf dem Petal

Im laufenden CMS-Experiment sollen die Steuersignale zum Petal und die Daten vom Petal zum Auslesesystem optisch gesendet werden. Die Übertragung der Steuerbefehle geschieht mit Hilfe des *O-FECs*¹⁵. O-FEC und CCU kommunizieren über den Tokenring (siehe Abschnitt 3.4.3.). Um mit den Si-Detektoren und den AOHs zu kommunizieren, wird das I²C-Protokoll verwendet. Jeder Position auf einem ICB ist eine feste I²C-Adresse zugeordnet. Steckt man eine Komponente auf das ICB, so ist sie über die I²C-Adresse des Steckers elektrisch ansprechbar.

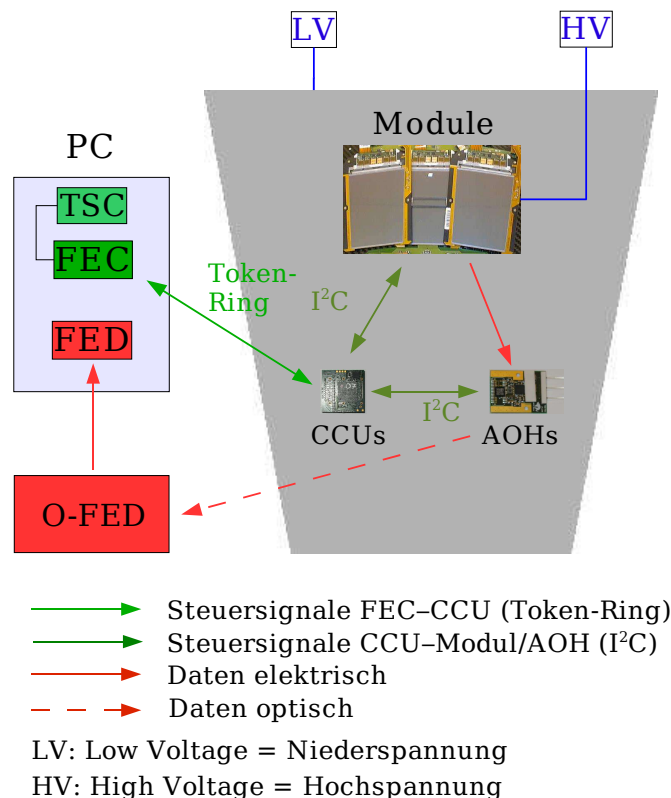


Abbildung 3.5: Schematischer Aufbau der Kommunikation auf einem Petal. Quelle [5].

¹⁴Eine genaue Auflistung der verschiedenen Faserlängen liefert Anhang A.

¹⁵Optical-FEC.

Um mit einer Komponente des Petals zu kommunizieren, wird vom FEC über den Tokenring ein Kommunikations-Token an die zuständige CCU geschickt. Diese ihrerseits kommuniziert dann via I²C-Protokoll mit der gewünschten Petalkomponente.

Zwischen Silizium-Streifenmodul und AOH werden die analogen Auslesedaten elektrisch direkt gesendet und mit Hilfe der Laser des AOHs an den *O-FED*¹⁶ weitergeleitet. Auf dem O-FED wird mit Hilfe von OECs¹⁷ das eingespeiste optische Signal in ein elektrisches Signal umgewandelt. Die Daten werden dann an den FED geschickt und können ausgewertet werden. Der schematische Ablauf einer solchen Kommunikation ist in Abb. 3.5 zu sehen.

3.6 Die Spannungsversorgung des Petals

Jede Komponente auf einem Petal benötigt eine definierte Betriebsspannung. Die CCUs werden mit 2,5 V, die AOHs und die Module ebenfalls mit 2,5 V und zusätzlich noch mit 1,25 V Versorgungsspannung betrieben, man bezeichnet diese Spannungen auch als *LV*¹⁸. Die Si-Streifenmodule benötigen zur Verarmung des Siliziums eine zusätzliche Spannungsversorgung von einigen 100 V, kurz *HV*¹⁹ genannt, wobei die genauen Werte der Hochspannung zur vollständigen Verarmung vom einzelnen Modul abhängen. Jedes Petal der Räder 1 bis 6 verfügt sowohl für die LV als auch für die HV über drei Spannungsgruppen, wie in Tabelle 3.3 gezeigt, auf den Rädern 7 bis 9 fehlen die Ringe 1 und 2 und die dortigen Petals benötigen nur die beiden Spannungsgruppen 2 und 3. Zusätzlich zu dieser Einteilung in Spannungsgruppen, ist die HV jeweils in zwei Untergruppen A und B aufgeteilt. Auf jedem Petal existieren acht Versorgungsstecker, über die die Spannungen zu den Komponenten des Petals gelangen, pro Spannungsgruppe jeweils zwei Stecker, einer für die LV und einer für die HV. Dazu kommen noch zwei Anschlüsse für die Steuersignale. Über den Stecker für die Eingangssignale wird ebenfalls die Versorgungsspannung der CCUs zum Petal geleitet, der zweite Stecker ist nur für ausgehende Signale gedacht.

Ring	Spannungsgruppe	HV-Untergruppe
1	1	A
2	1	B
3	2	A
4	2	A
5	3	A
6	2	B
7	3	B

Tabelle 3.3: Spannungsversorgungs der Si-Streifenmodule auf einem Petal.

¹⁶Optical Front End Driver.

¹⁷Optical to Electrical Converter.

¹⁸Die Abkürzung des englischen Wortes Low-Voltage = Niederspannung.

¹⁹Die Abkürzung des englischen Wortes High-Voltage = Hochspannung.

Kapitel 4

Die Petalintegration

Das Zusammenbauen der einzelnen Teile zur Gesamtstruktur eines Petals wird Petalintegration oder auch *Petal-Assembly*¹ genannt. Dabei werden die in Kapitel 3.4 vorgestellten Petalkomponenten mechanisch am Petal befestigt und auf ihre Funktionstüchtigkeit getestet. In der Trackerkollaboration gibt es speziell dafür sechs Petalintegrationszentren, sog. *PICs*². Die Arbeitsaufteilung innerhalb der Trackerkollaboration ist in Anhang B beschrieben. Jedes PIC muss dazu einen Teststand aufbauen, in welchem die Petals montiert und getestet werden können. Am III. Physikalischen Institut B der RWTH Aachen wurden in den letzten Monaten erfolgreich ein solcher Teststand aufgebaut und mehrere Petals integriert, vgl. [5]. In diesem Kapitel soll der finale Teststand kurz erklärt und die Integrationsprozedur beschrieben werden.

4.1 Der Integrationsteststand

Um ein Petal zusammenbauen zu können, bedarf es sowohl der Komponenten wie CCUs, AOHs und Module als auch der nötigen Spannungsversorgung des Petals und der Auslesekomponenten. Abbildung 4.1 zeigt den schematischen Aufbau eines Integrationsteststandes. Zur Steuerung der Integration wird ein PC verwendet, auf welchem eine spezielle Software installiert sein muss. Außerdem wird Hardware zur Steuerung des Teststandes in Form von Steckkarten benötigt. Neben dem FEC wird eine Karte mit Namen *TSC*³ gebraucht, mit der der Trigger und die Clock des LHC-Beschleunigers simuliert werden. Die von der TSC erzeugten Clock und Trigger werden zum FEC weitergeleitet und über den Tokenring an das Petal geschickt. Die LV-Versorgung des Petals wird von einem Delphi⁴-Netzgerät sichergestellt. Über ein Multi-Service-Kabel (MS-Kabel) gelangt die Spannung zum Petal. Ein MS-Kabel liefert sowohl die LV als auch die HV für jeweils eine Versorgungsgruppe des Petals. Da die Integration der Komponenten ringweise er-

¹Assembly vom englischen Wort für Montage oder Zusammenbau.

²Petal Integration Center.

³Trigger Sequencer Card.

⁴Der Name stammt vom Delphi-Experiment am LEP-Beschleuniger des CERN. Dort wurden die Spannungsgeräte früher verwendet.

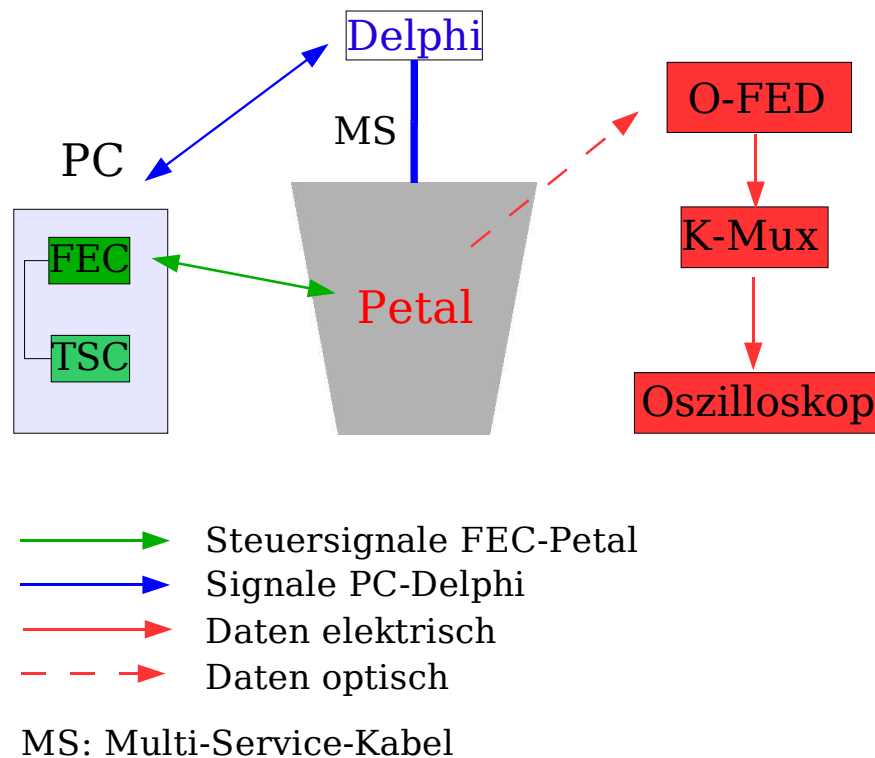


Abbildung 4.1: Schematischer Aufbau des Integrationsteststandes. Quelle [5].

folgt, braucht man allerdings immer nur eine eingeschaltete Spannungsgruppe und benutzt deswegen nur ein MS-Kabel, das zwischen den drei Spannungsgruppen umgesteckt wird. Um das ICB nicht zu sehr durch ständiges hin- und herstecken von Kabeln zu beanspruchen, wurde ein sog. *Patch-Panel*⁵ entwickelt, das alle drei Spannungsgruppen auf dem Petal versorgt und auch Stecker für die Steuerleitungen bzw. die CCU-Spannungen besitzt, siehe Abb. 4.2. Die Spannung für die CCU wird von einem handelsüblichen Netzgerät⁶ bereitgestellt. Für die optischen Fasern der AOHs wird ebenfalls ein Patch-Panel verwendet, vgl. Abb. 4.2. Dieses dient dem Schutz der Fasern und der Übersicht bei der Integration. Es wird kein HV-Versorgungsgerät benötigt, da keine HV an die Silizium-Streifenmodule angelegt wird. In einem HV-Test wird lediglich die Hochspannung simuliert, vgl. Abschnitt 4.2.

Während einer Petalintegration werden keine Daten gespeichert, es wird lediglich die Funktionstüchtigkeit der integrierten Komponenten getestet. Deswegen wird auf die Datenspeicherung verzichtet und man überprüft die Daten an einem Oszilloskop.

Die Signale der AOHs werden mit Hilfe von optischen Kabeln an die Ausleseelektronik gesendet. Dabei werden jeweils zwölf AOH-Fasern auf einem sog. *Short-Ribbon-Kabel* gebündelt. Auf einem vollbestückten Frontpetal sind bis zu 68 optische Fasern, im Integrationsteststand werden also bis zu sechs Short-Ribbon-

⁵Engl. für Stecktafel.

⁶Es wird ein Gerät der Firma Zentro Elektronik, Typ LA30/TGA verwendet.

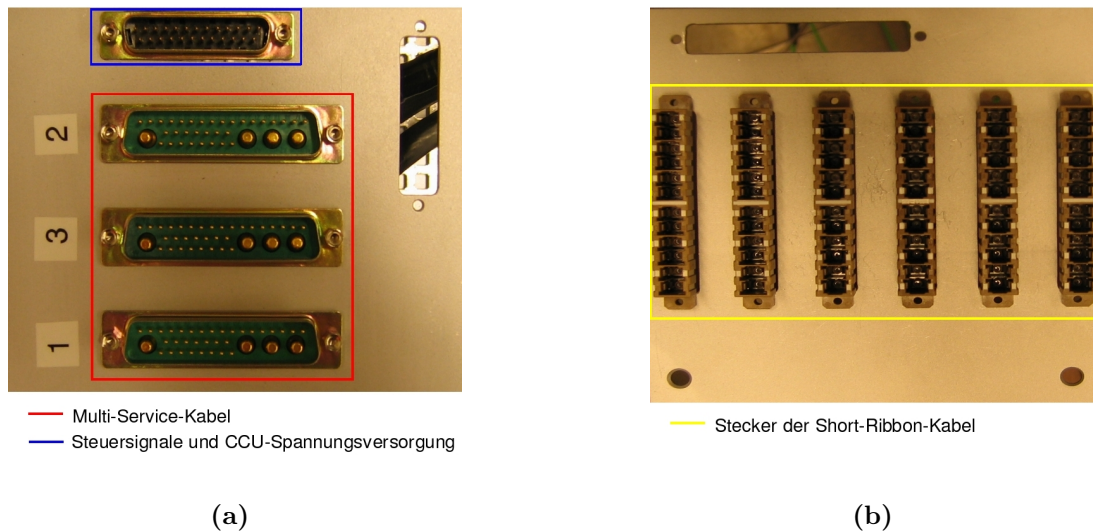


Abbildung 4.2: Abb. (a) zeigt das verwendete elektrische Patch-Panel: Je ein Stecker pro Spannungsversorgungsgruppe, sowie ein Stecker für die Steuerungsleitungen und die CCU-Spannungen sind vorhanden. Abb. (b) zeigt das optische Patch-Panel mit sechs angebrachten Short-Ribbon-Kabeln.

Kabel gebraucht. Durch ein einzelnes ca. 10 m langes optisches Kabel, dem sog. *Long-Ribbon-Kabel* werden die Daten dann zum O-FED geschickt. Die optischen Signale werden mit Hilfe des OECs in elektrische Signale umgewandelt und über zwölf Kabel an den *K-MUX*⁷ weitergeleitet, der die Daten multiplext. Der im Integrationsteststand verwendete K-MUX besteht aus zwei Karten mit jeweils zehn Eingangskanälen. Die Funktion des K-MUX ist es, nur einen der zehn Eingangskanäle auf den einen pro Karte vorhandenen Ausgangskanal zu schalten. Beide vom K-MUX kommenden Kabel werden an ein Oszilloskop angeschlossen, an welchem man den Erfolg der Tests der Petalintegration überprüft. Man gewinnt Zeit bei der Integration. Anstatt die Kabel des O-FEDs abwechselnd an das Oszilloskop anschließen zu müssen, braucht man bei einem 2-Kanal-Oszilloskop nur den betrachteten Kanal zu wechseln, da man die Verkabelung von O-FED und K-MUX nur einmal vornehmen muss. Gesteuert wird der K-MUX über das I²C-Protokoll von der Assembly-Software mit Hilfe einer I²C-PMC-Karte⁸.

4.2 Die Assembly-Software

Die Steuerung der gesamten Petalintegration wird von einer speziell zu diesem Zweck entwickelten Software übernommen. Diese sog. Assembly-Software wurde im IPNL⁹ entwickelt und gibt die Reihenfolge der mechanischen Integration

⁷Das ist die Abkürzung für Karlsruhe Multiplexer.

⁸PMC steht für **P**CI **M**ezzanine **C**ard.

⁹Institut de **P**hysique **N**ucléaire de **L**yon.

sowie die durchzuführenden Tests vor. Eine genaue Dokumentation der Assembly-Software findet man in [20]. Die Assembly-Software bietet zwei Möglichkeiten ein Petal zu bauen. Beide Varianten sehen vor, zuerst die AOHs und dann die Module zu integrieren. Bei der ursprünglichen Prozedur sollte jedes PIC nach dem gleichen Schema vorgehen. Dabei wird nach der Fertigstellung des Petals eine XML¹⁰-Datei erzeugt, in der alle integrierten Komponenten mit ihren Matrixcodes stehen. Diese XML-Datei wird dann in die Datenbank (siehe Kapitel 3.4) hochgeladen. Es ist dann jederzeit möglich, die integrierten Komponenten des Petals anhand ihres Matrixcodes zu identifizieren. Die neue Logistik der Tracker-Endkappe (siehe Anhang B) ist so aufgebaut, dass in Hamburg¹¹ alle AOHs integriert und getestet werden und die so bestückten Petals dann zur Modulintegration in die anderen PICs geschickt werden. In diesem Fall wird eine XML-Datei in Hamburg angefertigt und in die Datenbank geladen, in welcher nur die CCU- und AOH-Codes gespeichert sind. Im Integrationszentrum, welches die Module anbringt, wird eine zweite XML-Datei erzeugt, die zum gleichen Petal gehört und anschließend ebenfalls in die Datenbank geladen wird. Neben der generellen Vorgehensweise beim Petalbau bietet die Assembly-Software auch Hilfe bei der Integration der einzelnen Komponenten an. Dabei wird auf einer schematischen Zeichnung des ICBs gezeigt, welche Komponente gerade integriert werden soll und wo ihr Platz auf dem ICB ist. Abbildung 4.3 zeigt einen Bildschirmausdruck der Assembly-Software. In der oberen linken Ecke ist der Status der gerade stattfindenden Petalintegration zu sehen. Rechts daneben erkennt man die geladene XML-Datei des gerade integrierten Petals. In der rechten oberen Ecke kann man Einstellungen zur Funktionsweise der Software vornehmen. Es ist möglich die Software in einem Simulationsmodus arbeiten zu lassen, um sich mit ihr vertraut zu machen oder um absichtlich Arbeitsschritte zu übergehen, falls man z.B. einen Test während der Integration auslassen möchte, vgl. Abschnitt 4.3. Im Hauptfenster der Software werden die gerade zu integrierenden Komponenten vorgegeben und daneben die jeweilige Position auf dem ICB markiert. Unter dem schematischen Bild des ICBs werden die Informationen für die mechanische Integration gegeben. Neben den zu verwendenden Schrauben, wird auch das Drehmoment angegeben mit welchem die Silizium-Streifenmodule auf den Inserts befestigt werden sollen. Auch wird die Zuordnung zwischen AOH-Fasern und den Short-Ribbon-Kabeln vorgegeben. Sobald die mechanische Integration der vorgegebenen Komponenten erfolgreich war, müssen diese noch getestet werden. Bevor die nächsten Komponenten integriert werden können, muss ein erfolgreicher Test manuell bestätigt werden. Die verschiedenen Tests werden ausführlich im nächsten Abschnitt erläutert.

4.3 Eine Integration im Detail

Die Petalintegration wird von einem Techniker durchgeführt. Diesem zur Seite steht ein Physiker, der bei Problemen eingreift und hilft, diese zu beheben. Da

¹⁰Extensible Markup Language.

¹¹Es handelt sich um das Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg.

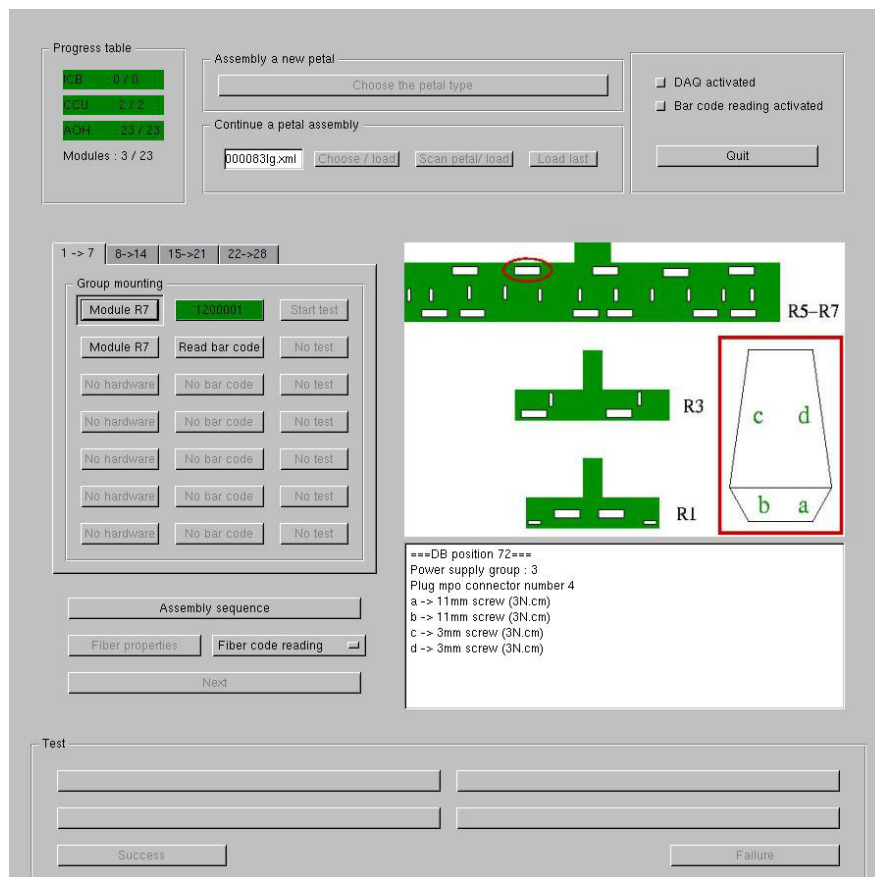


Abbildung 4.3: Bildschirmausdruck der Assembly-Software.

gerade die optischen Komponenten des Petals und der Ausleseketten sehr anfällig gegen Verschmutzungen sind, findet die Integration der Petals für den Tracker des CMS-Experimentes in einem Reinraum der ISO-Klasse¹² 6 statt.

4.3.1 ARC-Test

Bevor die Silizium-Streifenmodule auf ein Petal montiert werden, haben sie schon einige Qualitätstests hinter sich. Bei diesen Tests werden den einzelnen Modulen Noten gegeben, um die Auswahl der Module, die auf die Petals kommen, zu erleichtern. Um sicher zu stellen, dass die Si-Streifenmodule nach den letzten Tests keine neuen Fehler aufweisen, z.B. durch Transportschäden, müssen alle Silizium-Streifenmodule, die auf ein Petal montiert werden sollen, noch einem finalen Test unterzogen werden. Bei diesem Test handelt es sich um einen am III. Physikalischen Institut B in Aachen entwickelten Test, den sog. ARC-Test¹³. Erst nachdem die Silizium-Streifenmodule diesen Test erfolgreich durchlaufen haben, werden sie auf ein Petal montiert.

¹²International Standardisation Organisation. Klassifizierung nach der ISO-Norm 14644-1.

¹³APV Readout Controller. Dies ist ein speziell für Modultests entwickelter Testaufbau. Näheres zum ARC-System findet man in [21].

4.3.2 Vorbereitung

Zu Beginn der Petalintegration muss man dafür sorgen, dass alle Komponenten und alle Werkzeuge zur Verfügung stehen. Die benötigten Kleinteile wie Schrauben und Unterlegscheiben werden mit jedem Petal mitgeliefert.¹⁴

Auf den Si-Streifenmodulen befinden sich vor der Integration ein Matrixcode und ein Strichcode aus Papier. Da nur die Matrixcodes strahlenhart sind, müssen die Strichcodes entfernt werden. Alle Informationen über die Module in der Datenbank sind allerdings unter dem Strichcode gespeichert. Deswegen werden bei allen verwendeten Modulen die Strichcodes und die Matrixcodes mit Hilfe eines Matrixcode-Lesers gescannt und anschließend wird mit einem von der Datenbank zur Verfügung gestellten Werkzeug die Information des Moduls vom Strichcode auf den Matrixcode übertragen. Danach kann der Strichcode entfernt werden.

Jedes Petal wird nach seinem Bau in einen Aluminiumrahmen gespannt, den es bis zum endgültigen Einbau in die Tracker-Endkappen nicht mehr verlässt. Das Petal ist so in dem Rahmen befestigt, dass man problemlos an ihm arbeiten kann. Das zu integrierende Petal wird in einer um die horizontale Achse drehbare Haltevorrichtung, dem sog. Grill, gesichert (siehe Abb. 4.4). Dann werden am Aluminiumrahmen sowohl das elektrische als auch das optische Patch-Panel angebracht. Nun werden noch der Petalrahmen und alle an der mechanischen Integration beteiligten Personen geerdet, um mögliche Spannungsdifferenzen zwischen dem Erdpotential und dem Petal zu vermeiden.

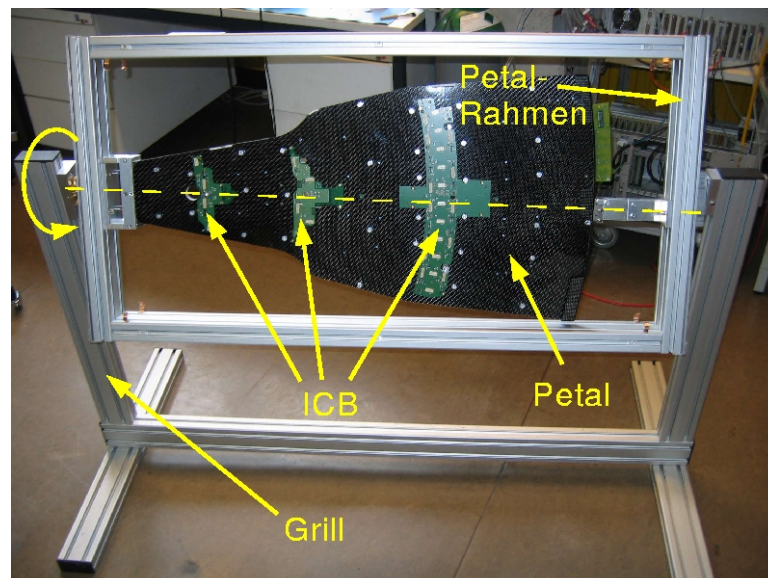


Abbildung 4.4: Petal mit montiertem ICB im Grill. Die Drehachse ist durch die gestrichelte Linie gekennzeichnet.

¹⁴Die Petals und die ICBs werden am I. Physikalischen Institut B der RWTH Aachen gebaut. Dort werden auch die ICBs auf das Petal montiert.

4.3.3 Integration der CCUs

Nacheinander werden die Matrixcodes beider CCUs gescannt. Die Assembly-Software sendet im Anschluß daran eine Anfrage an die Datenbank und überprüft den Status der CCUs. Dabei wird neben dem CCU-Typ auch der Aufenthaltsort der CCU überprüft (Diese Datenbankanfrage wird für alle zu integrierenden Komponenten durchgeführt, jedoch im folgenden nicht weiter erwähnt). Ist in der Datenbank ein anderer Ort vermerkt, muss die CCU erst in der Datenbank transferiert werden, um auf ein Petal integriert werden zu können. Sollte die zweite gescannte CCU die gleiche interne Adresse (vgl. Abschnitt 3.4.3) wie die erste haben, gibt die Software einen Fehler aus und verbietet das Montieren dieser CCU. Dann muss eine CCU mit einer abweichenden Adresse gescannt werden.¹⁵ Nun werden beide CCUs auf das ICB gesteckt und getestet. Dabei testet die Assembly-Software die Tokenring-Verbindung. Ist der Test erfolgreich, werden die CCU-Adressen in der XML-Datei des Petals gespeichert und die Integration der AOHs kann beginnen.

4.3.4 Integration der AOHs und ICB-Test

Die AOHs werden mit Ausnahme der Ringe 5 und 7 ringweise montiert. Das Einlesen der Matrixcodes und der Vergleich mit den Informationen in der Datenbank liefert bei den AOHs die Information, ob der zu montierende AOH die richtige Faserlänge und die passende Anzahl an Lasern besitzt. Sollten beide Kriterien erfüllt sein, können die AOHs montiert werden. Zur richtigen Montage gibt die Assembly-Software die zu verwendenden Schrauben und Unterlegscheiben sowie das Drehmoment an, mit dem die Schrauben angezogen werden sollen, vgl. Abb. 4.5. Außerdem wird der Steckplatz der AOH-Fasern auf dem Short-Ribbon-Kabel angegeben. Damit es später noch möglich ist, die Fasern der AOHs voneinander zu unterscheiden, werden die Faserstecker mit einem wasserfesten und strahlenharten Stift nummeriert indem man eine dreistellige Nummer angibt. Beispielsweise steht die Nummer 5.2.0 für einen AOH auf Ring 5, Position 2, erster Laser. Da es AOHs mit 2 oder 3 Lasern gibt, siehe Abschnitt 3.4.5, werden die Laser von 0 bis 2 nummeriert. Dabei wird vom Matrixcode des AOHs aus gesehen mit dem linken Laser begonnen, vgl. Abbildung 4.5(b). Besitzt ein AOH nur 2 Laser, so werden diese mit 0 und 2 bezeichnet. Der Steckplatz auf dem Short-Ribbon-Kabel ist unbedingt einzuhalten, da ansonsten das Schalten des K-MUX nicht richtig funktioniert und die Tests fehlschlagen. Zuerst wird die I²C-Kommunikation zwischen AOH und CCU überprüft. Schlägt die Kommunikation fehl, muss der AOH ausgetauscht werden. Bei erfolgreicher Kommunikation geht man zum Test der optischen Auslese über. Die optische Auslese der AOHs wird getestet, indem man die Verstärkung der Laser stufenweise erhöht. Dabei sollte auf dem Oszilloskop das Grundsignal des betrachteten Lasers in mehreren Stu-

¹⁵Man hat sich dazu entschieden, die CCU-Adresse fest mit der CCU-Position auf einem Petal zu verbinden. So werden insgesamt nur CCUs mit vier verschiedenen Adressen auf die Petals montiert.

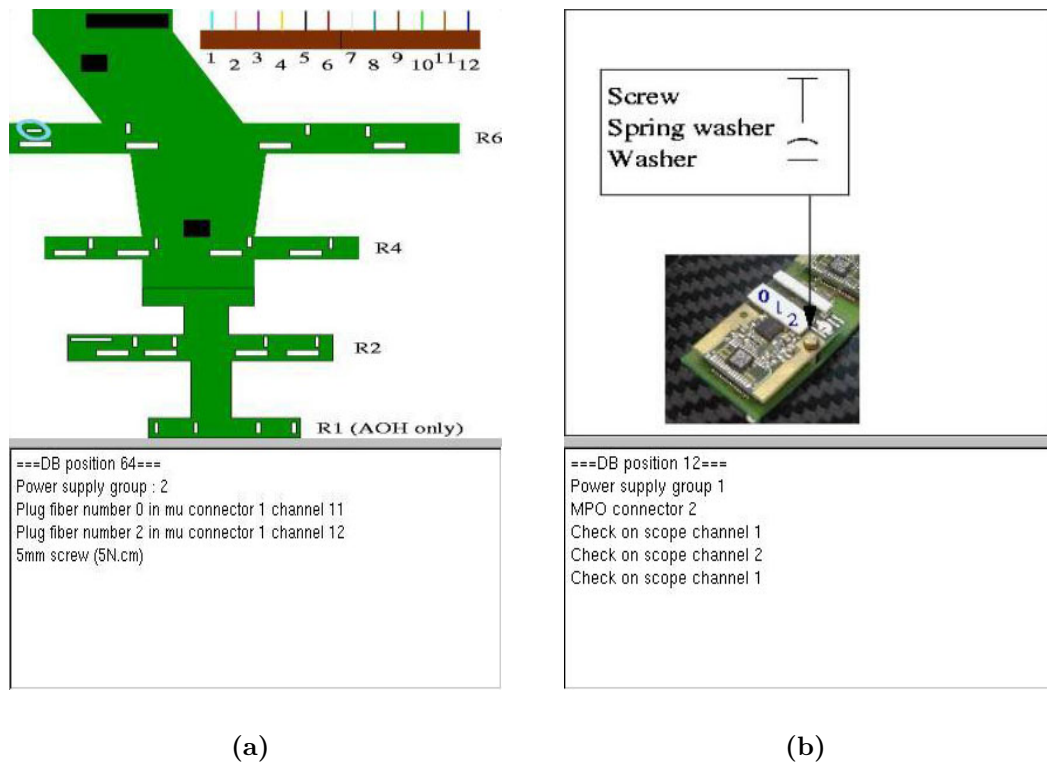


Abbildung 4.5: (a) zeigt die Position des zu integrierenden AOHs auf dem ICB und gibt die dazu benötigten Schrauben und das zu verwendende Drehmoment an. Es wird ebenfalls die Zuordnung der optischen Fasern angegeben. (b) zeigt die Reihenfolge der Unterlegscheiben und gibt Informationen zum verwendeten Short-Ribbon-Kabel für die benötigten Tests an.

fen ansteigen. Steigt das Signal nicht um mindestens 500 mV an, so ist der Test nicht bestanden und muss wiederholt werden. Da die Höhe des Signals sehr von der Qualität der optischen Kontakte zwischen Short-Ribbon-Kabel und Faser des AOHs abhängt, kann die Reinigung dieser Verbindung durchaus eine signifikante Verbesserung des Signals bewirken. Falls nach mehrmaliger Reinigung der optischen Kontakte immer noch kein besseres Signal am Oszilloskop beobachtet wird, muss dieser AOH gegen einen anderen ausgetauscht werden. Nachdem ein Ring vollständig mit AOHs bestückt ist, werden die optischen Fasern dieses Rings in sog. Clips gesteckt und so zum Rand des Petals geführt. Sind alle AOHs des Petals erfolgreich integriert, so werden alle optischen Fasern an der Petalseite gebündelt und mit Hilfe von strahlenhartem Kaptonklebeband¹⁶ am Petalrand fixiert. Abb. 4.6 zeigt einen montierten AOH und die Führung der optischen Fasern. Wenn ein AOH erfolgreich getestet wurde, wird mit seiner Hilfe ein Test der Leitungen auf dem ICB durchgeführt. Dieser Test soll sicherstellen, dass die für die Silizium-Streifenmodule vorgesehenen Stecker auf dem ICB funktionieren.

¹⁶Es wird das Produkt Isotype 51579 der Firma von Roll Isoala GmbH verwendet.

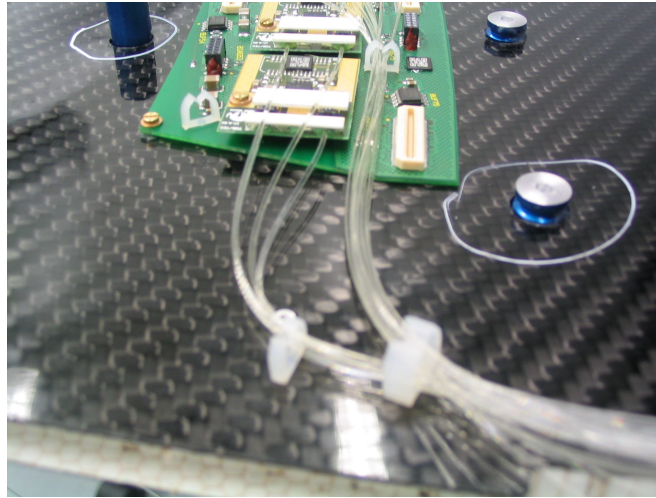


Abbildung 4.6: Montierter AOH und Führung der Fasern zum Petalrand.

Dazu nimmt man keine Silizium-Streifenmodule, sondern benutzt sog. Dummy-Hybride¹⁷. Der Hybrid wird auf den dem AOH zugeordneten Modulstecker gesteckt und mit Spannung versorgt. Am Oszilloskop wird nun überprüft, ob die von den APVs (vgl. Abschnitt 2.4.2) des Hybriden gesendeten Daten über das ICB und die optischen Fasern weitergeleitet und ob die Hybride über die ICB-Stecker mit Spannung versorgt werden. Stellt sich heraus, dass das ICB nicht funktioniert, kann es zu diesem Zeitpunkt noch relativ einfach ausgetauscht werden, denn es müssen nur die AOHs demontiert werden. Sollte dieses Problem erst bei der Montage der Silizium-Streifenmodule entdeckt werden, wäre der Arbeitsaufwand, sowohl die AOHs als auch die Silizium-Streifenmodule zu entfernen, weitaus größer und die Si-Streifenmodule wären einem großen Risiko ausgesetzt, bei der Demontage beschädigt zu werden.

4.3.5 Integration der Module

Bevor man mit der eigentlichen Integration der Si-Streifenmodule beginnen kann, muss auf die Inserts Wärmeleitpaste aufgetragen werden, um einen bestmöglichen Wärmetransport von den Modulen hin zum Kühlmittel zu gewährleisten. Die Wärmeleitpaste wird mit Hilfe eines Dispensers¹⁸ aufgetragen. Der Dispenser stellt sicher, dass immer die gleiche vordefinierte Menge an Wärmeleitpaste auf ein Bauteil gelangt. Um die Wärmeleitpaste bestmöglich aufzutragen, wird sie mit Hilfe eines kleinen Spachtels auf dem Bauteil verteilt, siehe Abb. 4.7.

Zu Beginn der Modulmontage muss der Matrixcode des zu montierenden Si-Streifenmoduls gelesen werden. Die Assembly-Software überprüft in der Datenbank, ob das Modul für die Tracker-Endkappe qualifiziert ist. Wurde ein Modul bei seinem ARC-Test als nicht gut genug für die Tracker-Endkappe einge-

¹⁷Dabei handelt es sich um funktionstüchtige Modulhybride, die wegen kleinerer Fehler nicht auf ein Si-Streifenmodul gelangt sind.

¹⁸Es wird das Modell Ultra 1400 der Firma GLT benutzt.

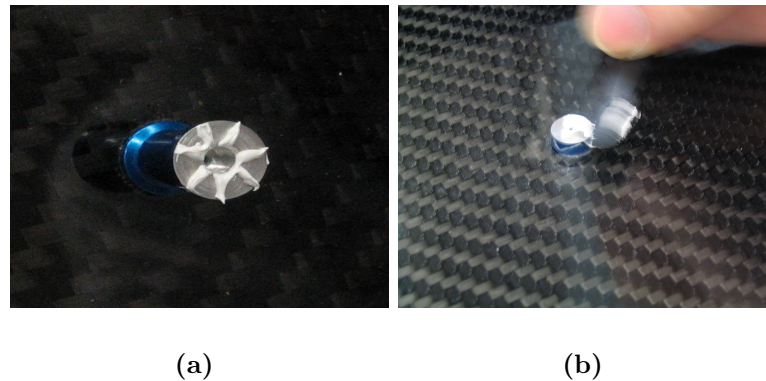


Abbildung 4.7: In (a) sieht man die mit Hilfe eines Dispensers auf ein Insert gebrachte Wärmeleitpaste, in (b) die Verteilung der Wärmeleitpaste mit Hilfe eines Spachtels.

stuft, so verbietet die Assembly-Software dessen Montage auf ein Petal. Es wird ebenfalls überprüft, ob das zu integrierende Silizium-Streifenmodul die richtige Modulgeometrie aufweist. Wenn auch dieses Kriterium erfüllt ist, kann das Modul montiert werden. Die mechanischen Aspekte der Modulmontage sind in der Assembly-Software ausführlich beschrieben. Zu jedem Arbeitsschritt gibt es eine Anleitung wie sie exemplarisch in Abb. 4.8 gezeigt wird. Auf allen Ringen sind die Siliziumstreifenmodule überlappend angeordnet (vgl. Abschnitt 1.2.2). Bei der Modulintegration werden jeweils die untersten Module zuerst montiert und getestet, bevor dann die oberen Module integriert werden. Die mechanische Befestigung der Silizium-Streifenmodule erfolgt mit Hilfe der Inserts. Die Inserts selber besitzen kein Gewinde, deswegen und wegen der mechanischen Stabilität werden Kunststoffstifte mit Gewinde in die Inserts gesteckt. Die Silizium-Streifenmodule werden dann auf die Inserts gelegt und mit Hilfe von Schrauben befestigt. Jedes Modul besitzt zur mechanischen Befestigung vier Löcher, diese befinden sich jeweils in dem Karbonrahmen des Silizium-Streifenmoduls. Zwei der Löcher sind neben dem Modulhybriden angebracht und zwei weitere befinden sich mittig neben den Silizium-Streifen. Welche Schraube mit welchem Drehmoment angezogen werden soll, wird von der Assembly-Software vorgegeben, vgl. Abbildung 4.8. Einige Inserts werden für mehrere Module des gleichen Rings benutzt, damit die Module waagrecht montiert werden, muss in solchen Fällen eine Unterlegscheibe oder eine sog. *Brücke* zwischen das untere Modul und das noch zu montierende Modul gelegt werden. Die Geometrie der zu verwendenden Unterlegscheiben und Brücken wird ebenfalls von der Assembly-Software vorgegeben. Da einige Silizium-Streifenmodule so überlagert sind, dass sich ein Loch zur Befestigung der Schrauben direkt über dem Silizium des darunter befindlichen Silizium-Streifenmoduls befindet, benutzt man Brücken. Die Brücken werden über einem Silizium-Streifenmodul montiert und haben ein Loch mit Gewinde, so dass ein überlappendes Modul sicher montiert werden kann. Abbildung 4.9 zeigt eine montierte Brücke auf einem Ring 7 Modul. Man erkennt deutlich, dass

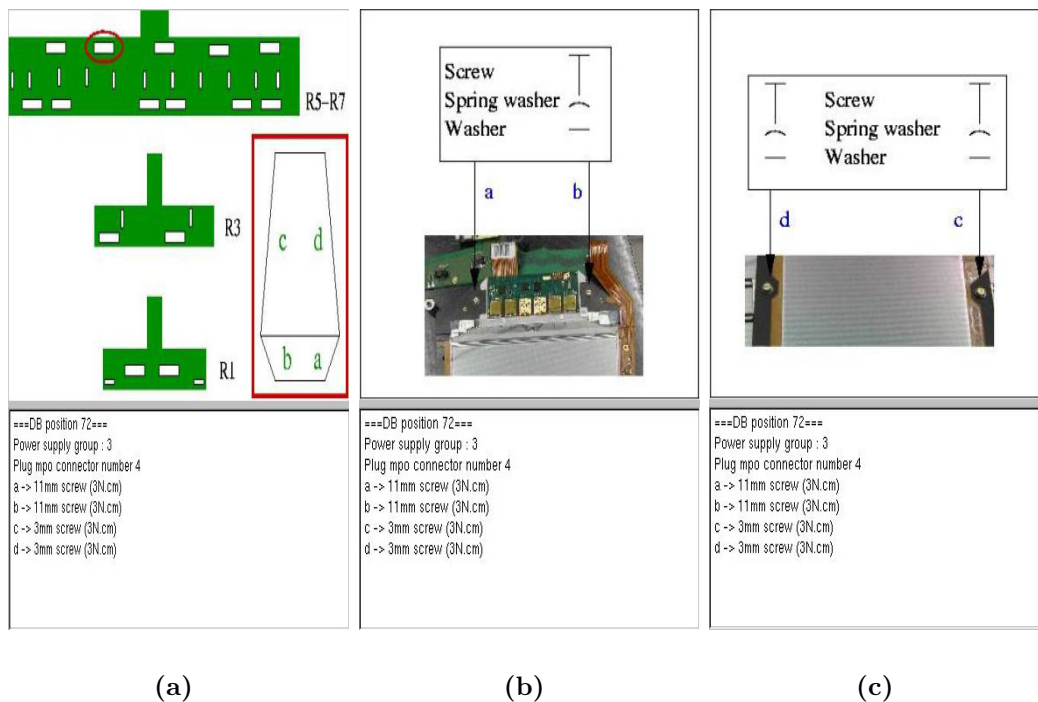


Abbildung 4.8: (a) - (c) zeigen die Montagesequenz für Silizium-Streifenmodule wie sie die Assembly-Software vorgibt.

das Schraubloch der Brücke über den Silizium-Streifen des darunter befindlichen Moduls ist. Bei den Doppelmodulringen 1, 2 und 5 werden die Doppelmodule (siehe Kapitel 3.4.4) montiert, indem zuerst das Normalmodul und darauf das Stereomodul montiert wird. Dann werden beide getestet und bei erfolgreichem Test zum nächsten Doppelmodul übergegangen. Nachdem die von der Assembly-Software vorgegebenen Silizium-Streifenmodule montiert wurden, werden diese getestet. Der erste durchzuführende Test ist ein I²C-Kommunikationstest, wie bei den anderen Petalkomponenten auch. Nach erfolgreichem I²C-Test werden die Hybride der Si-Streifenmodule getestet. Dabei werden die APVs zuerst ohne Daten und anschließend mit Daten ausgelesen, siehe Abb. 4.10. Der Erfolg dieses Tests wird am Oszilloskop bestimmt. Erkennt man ein deutliches Signal, auf dem sowohl der Header als auch die Tick-Marks und im zweiten Test auch die Daten zu sehen sind, ist das Modul erfolgreich getestet und bleibt auf dem Petal. Ein weiterer Test der Silizium-Streifenmodule überprüft, ob die Hochspannungsverbindung funktioniert und eine Hochspannung an das Modul angelegt werden kann. Dazu wird statt einer echten Hochspannung lediglich eine Spannung von 1 V angelegt und der Leckstrom des Moduls gemessen und mit dem Leckstrom ohne Spannung verglichen. Das Messergebnis dieses Tests wird auf dem Computerbildschirm ausgegeben und muss ausgewertet werden. Sollte der gemessene Leckstrom bei 1 V Spannung nicht mindestens zwei bis dreimal größer sein als ohne, so ist der Test als nicht erfolgreich zu werten. Bei allen hier beschriebenen Tests gilt, dass sobald einer dieser Tests wiederholt nicht erfüllt wird, das

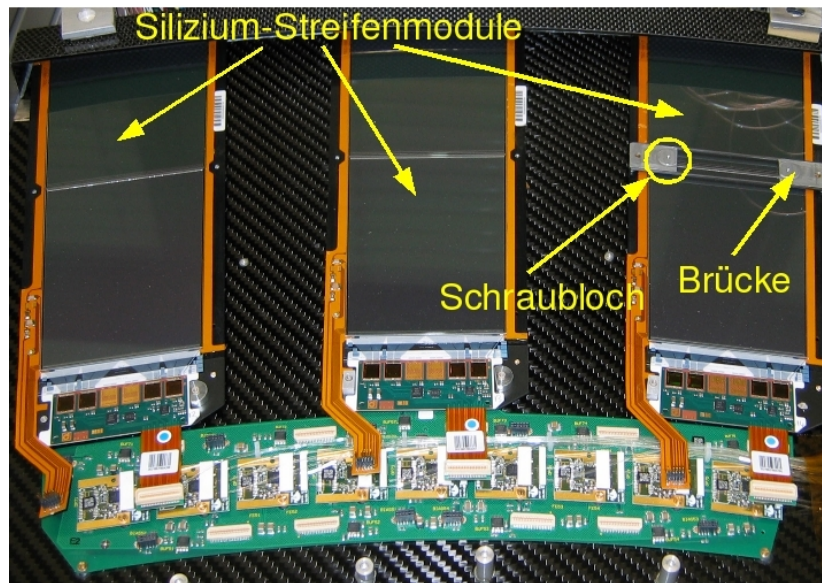


Abbildung 4.9: Montierte Brücke auf einem Ring 7 Modul mit markiertem Schraubloch über den Silizium-Streifen.

betroffene Silizium-Streifenmodul ersetzt werden muss.

4.3.6 Abschluß der Integration

Nachdem sämtliche Petalkomponenten erfolgreich auf das Petal integriert wurden, muss die von der Assembly-Software erzeugte XML-Datei in die Datenbank geladen werden. Dazu wird ein Programm namens „Big-Browser“¹⁹ verwendet, das das Hochladen der XML-Datei in die Datenbank erlaubt. Das fertige Petal wird dann in seinem Rahmen gesichert und in diesem für den Langzeitteststand vorbereitet, siehe Kapitel 5.

4.4 Die Integration des ersten finalen Petals

Die im folgenden beschriebene Petalintegration gibt die Erfahrungen wieder, die beim ersten Zusammenbau eines finalen Front-Petals der Räder 7 und 8 in der Tracker-Gemeinschaft überhaupt am 28.02.2005 und 01.03.2005 gesammelt wurden. Der genaue Zeitplan ist im Anhang C zu finden. Für die Integration wurden ausschließlich Silizium-Streifenmodule verwendet, die den ARC-Test mit der besten Note bestanden hatten. Außerdem waren noch keine AOHs auf dem Petal vorhanden, so dass auch die AOHs montiert und getestet werden mussten.

Die Vorbereitungen zur eigentlichen Integration verliefen ohne Probleme. Die Montage der AOHs ebenfalls, allerdings führte der Test des ICB mit einem Dummy-Hybriden zu wiederholten Abstürzen des FEC. Sobald der Dummy-Hybrid auf das ICB gesteckt und anschließend die Spannungsversorgung angeschaltet

¹⁹Weiterführende Informationen über den Big-Browser findet man in [15].

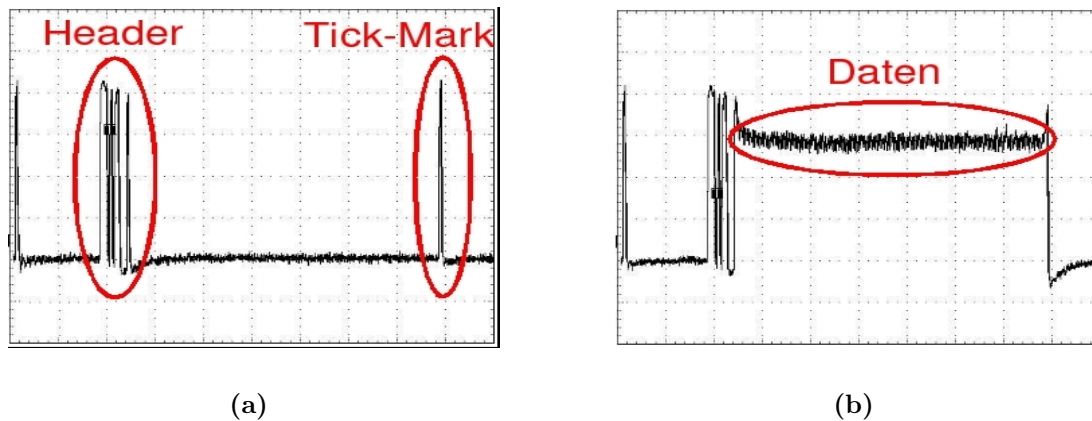


Abbildung 4.10: (a) zeigt den Bildschirmausdruck des Oszilloskopes ohne Daten. (b) zeigt den gleichen Test mit Daten. Auf beiden Abbildungen sind sowohl der Header als auch die Tick-Marks der APVs gut zu erkennen.

wurde, konnte keine Tokenring-Verbindung mit den CCUs hergestellt werden, so dass keine Kommunikation mit dem Petal mehr möglich war. Erst nachdem die Dummy-Hybride entfernt wurden und ein Neustart des Computers durchgeführt wurde, funktionierte der FEC und damit die Tokenring-Verbindung wieder. Da das verwendete ICB bereits bei seiner Herstellung getestet wurde, entschloss man sich, den ICB-Test ab jetzt im Simulationsmodus durchzuführen. Ein defekter Stecker auf dem ICB wäre ohnehin bei der Integration der Silizium-Streifenmodule aufgefallen. Bei der weiteren AOH-Integration traten kleinere Verzögerungen auf, da drei Fasern der verwendeten Short-Ribbon-Kabel defekt waren und diese getauscht werden mussten.

Im Anschluß an die AOHs wurden dann die Si-Streifenmodule integriert. Dabei wurde festgestellt, dass der für den HV-Test nötige Parallelport des Computers nicht konfiguriert war und auch nicht ohne große Verzögerungen konfiguriert werden konnte. Da alle für die Integration ausgesuchten Silizium-Streifenmodule in Aachen einen ausführlicheren ARC-Test²⁰ durchlaufen hatten, als die Integrationsprozedur vorsieht, wurde der HV-Test ebenfalls im Simulationsmodus durchgeführt. Da das ursprünglich auf Position 7.2 vorgesehene Silizium-Streifenmodul ein zu niedriges Signal bei den APV-Tests zeigte, wurde es durch ein anderes Modul ersetzt. Alle anderen Module ließen sich problemlos montieren und testen. Nach dem Ende der eigentlichen Integration wurde der ICB-Test mit Hilfe der montierten Module wiederholt. Dabei traten keinerlei FEC-Probleme auf. Der Parallelport des PCs wurde ebenfalls nach der eigentlichen Integration konfiguriert und der HV-Test der Module nachgeholt, jedes verwendete Modul bestand diesen Test. Abbildung 4.11 zeigt beide Seiten des integrierten Petal.

²⁰Bei diesen ausführlichen Tests wird unter anderem auch das Verhalten der Module unter Hochspannung getestet.

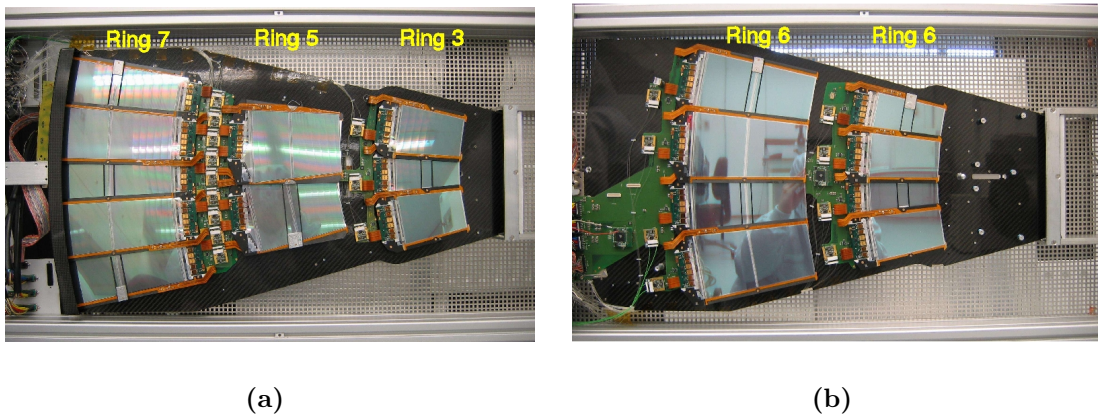


Abbildung 4.11: Abb. (a) zeigt die Seite A mit den Ringen 3, 5 und 7. Abb. (b) zeigt die Seite B mit den Ringen 4 und 6.

4.4.1 Erkenntnisse aus der Integration

Die Integration des ersten finalen Petals verlief erfolgreich. Die Assembly-Software lief während der gesamten Integration stabil und führte den anwesenden Techniker zielsicher durch die Integration, so dass keine Fragen zur Montage oder den Tests aufkamen. Das verwendete Setup lief ebenfalls stabil, die aufgetretenen FEC-Probleme konnten auf defekte Dummy-Hybride zurückgeführt werden. Damit bei späteren Petalintegrationen dieses Problem nicht noch einmal auftreten wird, werden in Zukunft nur noch vorher getestete Dummy-Hybride verwendet werden. Die verwendeten Geräte funktionierten während der gesamten Integration stabil. Da alle Geräte vorhanden waren und keine Erweiterungen des Teststands vorgesehen sind, handelt es sich bei diesem Setup um den finalen Teststand, in welchem alle Petals aus Aachen integriert werden. Die benötigte Zeit der Integration von zwei Arbeitstagen des anwesenden Technikers war vor der Integration das Ziel und konnte trotz Verzögerungen eingehalten werden. Da die in Zukunft zu integrierenden Petals bereits mit vormontierten AOHs aus Hamburg kommen, wird nur die Modulintegration durchgeführt werden müssen. Diese sollte nach den Erfahrungen der hier beschriebenen Integration in einem Arbeitstag vonstatten gehen können.

Kapitel 5

Der Langzeitteststand

In diesem Kapitel wird der Aufbau des Teststands für Langzeittests an Petals erklärt und die verwendete Steuerungssoftware erläutert.

5.1 Motivation der Langzeittests

Durch die bei der Petalintegration durchgeführten Tests (vgl. Kapitel 4.3) wird die prinzipielle Funktionsweise jeder einzelnen Petalkomponente überprüft. Allerdings wird nicht getestet, ob das Petal als Gesamtstruktur und in einer dem CMS-Experiment ähnlichen Temperaturumgebung stabil funktioniert (vgl. 1.2.1). Deswegen wird in jedem PIC neben dem Integrationsteststand ein Langzeitteststand aufgebaut, in welchem die Petals auf ihre Funktionstüchtigkeit unter thermischem Stress und die Silizium-Streifenmodule bei angelegter Hochspannung getestet werden.

5.2 Der Langzeitteststand

Der Langzeitteststand ist schematisch in Abbildung 5.1 gezeigt. Es werden zwei handelsübliche PCs benutzt, die die Petalsteuerung übernehmen. Die Petalsteuerung und Auslese entspricht in fast allen Punkten dem Aufbau, der auch bei der Petalintegration verwendet wird (siehe Kapitel 4.1). Im Rechner mit der Long-Term-Software¹ (LT) ist neben der TSC auch eine FEC-Karteeingebaut, die die Steuersignale zum Petal sendet. Da die während der Langzeittests genommenen Daten zur späteren Analyse gespeichert werden, ist im Gegensatz zum Integrationsteststand zusätzlich ein FED eingebaut. Dieser empfängt seine Daten vom K-MUX. Der beim Langzeittest verwendete K-MUX besitzt 8 Karten mit jeweils 10 Eingangskanälen. Jeder Ausgangskanal wird in einen FED-Eingang gesteckt und dort ausgelesen. Beim Langzeittest des Petals, sollen alle Komponenten gleichzeitig ausgelesen werden. Deswegen werden alle Gruppen mit Spannung versorgt. Die LV-Versorgung der Module und der AOHs liefern

¹Long-Term, aus dem Englischen für Langzeit.

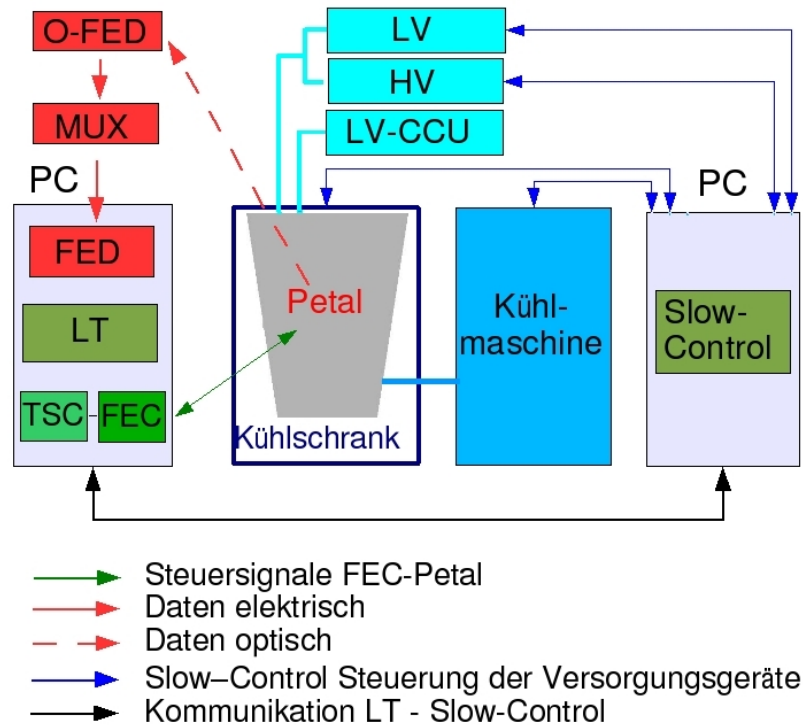


Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau des Langzeitteststands, in Anlehnung an [5].

sechs Lambda-Spannungsgeräte². Pro Spannungsgruppe des Petals (vgl. 3.6) werden zwei Lambda-Geräte benötigt, von denen eines die Versorgungsspannung von 1,25 V, das zweite die von 2,5 V liefert. Die HV-Versorgung wird von sechs DEPP-Boards³ zur Verfügung gestellt. Es liefern ebenfalls jeweils zwei DEPP-Geräte die Hochspannung für eine Spannungsgruppe, wobei jedes DEPP-Gerät die Spannung für eine Untergruppe liefert. Die Spannungen von jeweils zwei Lambda- und zwei DEPP-Spannungsgeräten, also jeweils einer gesamten Spannungsgruppe, werden über ein Multi-Service-Kabel zum Petal gebracht. Die CCU-Spannung wird beim Langzeitteststand von einem handelsüblichen Netzgerät⁴ bereitgestellt. Während des Langzeittests befindet sich das Petal in einem Kühlschranks, der die passive Kühlung des Petals übernimmt. Die passive Kühlung mit dem Kühlschrank simuliert die Temperaturumgebung wie sie im Tracker des CMS-Experiments herrschen wird. Außerdem wird der Kühlschrank mit Trockenluft gespült, um die Luftfeuchtigkeit so niedrig wie möglich zu halten, vgl. Abschnitt 5.2.1. Für die aktive Kühlung des Petals sorgt eine Kühlmaschine⁵. Das Kühlmittel gelangt mit Hilfe von isolierten Polyurethanschläuchen in den Kühlschrank und von dort ins Petal. Die aktive Kühlung des Petals mit Hilfe der Kühlmaschine dient da-

²Modell ZERO-UP1020 der Firma Lambda.

³**D**epletion **P**ower, aus dem englischen für Verarmungsspannung, siehe [22].

⁴Es wird ein Gerät der Firma Zentro Elektronik, Typ LA30/1GA verwendet.

⁵Die Kühlmaschine wurde speziell für die Petallangzeittests im Institut de Physique nucléaire der Université catholique de Louvain entwickelt.

zu, die von den Petalkomponenten produzierte Wärme über die Inserts an die Kühlflüssigkeit in den Kühlschlangen des Petals abzuführen. Aus Kostengründen wird bei den Langzeittests der Petal nicht das vorgesehene CMS-Kühlmittel benutzt, sondern eine andere, etwas kostengünstigere Kohlenstoff-Fluor-Verbindung C_8F_{18} .⁶ Der Kühltank und die Kühlmaschine sorgen dafür, dass die Siliziumtemperatur niemals -10°Celsius überschreitet. Abbildung 5.2 zeigt den Aachener Langzeitteststand.

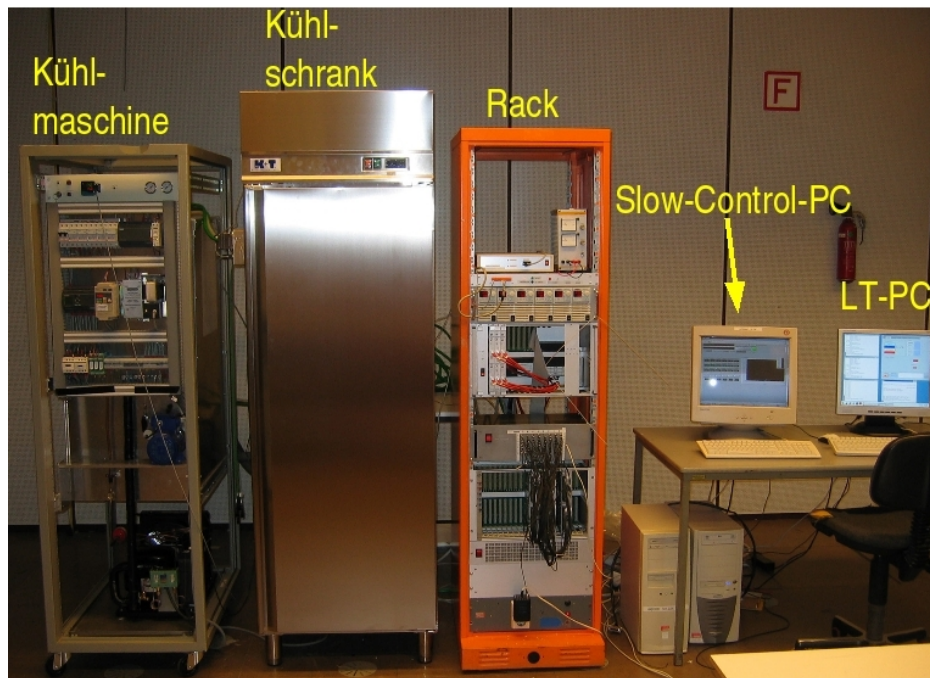


Abbildung 5.2: Der Aachener Langzeitteststand: links neben dem Kühltank steht die Kühlmaschine und rechts neben dem Kühltank ein Rack (In einem Rack befinden sich mehrere Plätze zum Einschub elektronischer Geräte) mit den Netz- und Auslesegeräten. Auf dem Schreibtisch stehen die beiden PCs der Slow-Control und der Langzeitsoftware.

5.2.1 Der Kühltank

Der für Petal-Langzeittests verwendete Kühltank⁷ muß eine Temperatur von unter -25°Celsius erreichen können. Der Kühltank sollte aktiv heizbar sein, weshalb an die linke Innenwand des Kühltanks eine $20 \cdot 30\text{ cm}$ große Heizfolie⁸ angebracht ist, die bei Bedarf den Kühltank mit bis zu 400 W aufheizt. Da die Silizium-Streifen sehr anfällig gegen durch zu hohe Luftfeuchtigkeit hervorgerufene Kondensation sind, wird der Kühltank mit Trockenluft⁹ versorgt.

⁶Es wird das Produkt FC77 der Firma 3M benutzt.

⁷Hersteller: K+T Kühlzellen GmbH, Gerät: TKU702.

⁸Die verwendete Heizfolie stammt von der Firma RS-Components: Bestellnummer 245-663.

⁹Die Trockenluft wird von einem Luftentfeuchter zur Verfügung gestellt. Dazu wird das Modell DKC 9 mit vier Zusatzfiltern der Firma BLITZ Rotary GmbH verwendet. Der genaue

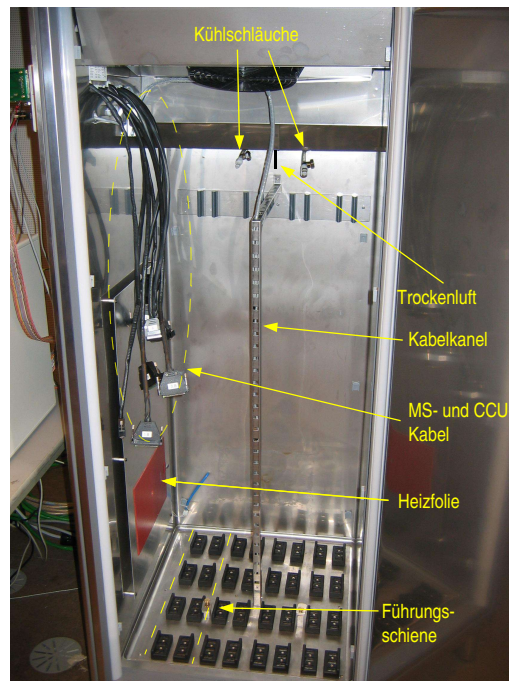


Abbildung 5.3: Der innere Aufbau des verwendeten Kühlschranks. Zu sehen sind die Einlässe für die Kühlschläuche der Kühlmaschine, der Einlass der Trockenluft, die auf einem Blech angebrachte Heizfolie, die MS-Kabel, das Spannungsversorgungskabel für die CCUs, ein Kanal für die Kabel der Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren sowie die Führungsschienen des Petals.

Zusätzlich werden die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit an kritischen Punkten im Kühlschrank gemessen.

Damit das Petal seine Betriebsspannung erhält, müssen die MS-Kabel in den Kühlschrank geführt werden. Für die sichere Befestigung des Petals im Kühlschrank sorgen spezielle Schienen am Kühlschrankboden. Abbildung 5.3 zeigt das Innere des verwendeten Kühlschranks. Es wurde die Möglichkeit geschaffen, zwei Petals zur gleichen Zeit im Kühlschrank zu betreiben. Deswegen befindet sich im Inneren des Kühlschranks die doppelte Anzahl an Versorgungskabeln für das Petal und es sind mehrere Führungsschienen eingebaut worden. Um die mechanische Struktur des Kühlschranks so wenig wie möglich zu beanspruchen, wurden in der mechanischen Werkstatt des III. Physikalischen Instituts B der RWTH Aachen Löcher in die Wände des Kühlschranks gebohrt, die den Kabeldurchmessern entsprechen. An der Außenseite des Kühlschranks wurde ein elektrisches Patch-Panel angebracht, das die Spannungsversorgung von zwei Petals vorsieht, dieses ist in Abb. 5.4 zu sehen. Neben den Steckern für die Multi-Service-Kabel und die CCU-Spannungsversorgung ist noch ein Stecker für die Auslese der Temperatur-

Aufbau des Systems ist im Anhang D beschrieben. Die zu trocknende Luft wird von der Druckluftversorgung des Physikzentrums gestellt.

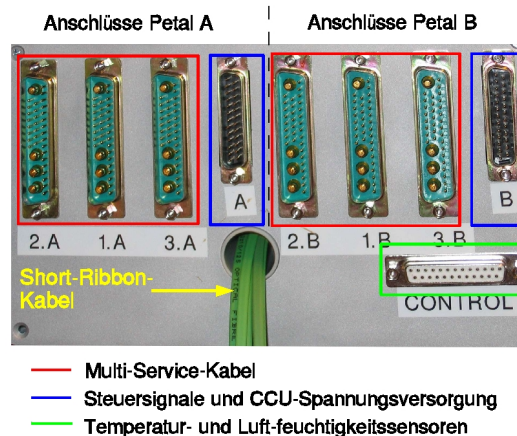


Abbildung 5.4: Das Patch-Panel an der Kühltankschrankaußenseite wurde dazu entwickelt, die Spannungen für zwei Petals weiterzuleiten. Außerdem ist dort noch ein Stecker für die Auslese der Sensoren im Kühltankschrank vorhanden.

und Luftfeuchtigkeitssensoren an dem Patch-Panel angebracht. Die Auslese der Sensoren erfolgt mit Hilfe des COOLI¹⁰. Im Kühltankschrank wird an sieben Punkten die Temperatur- und an zwei Stellen die Luftfeuchtigkeit gemessen. Abbildung 5.5 zeigt die Position der Sensoren im Kühltankschrank. Es werden fünf reine Temperatursensoren vom Typ Dallas 18B20¹¹ und zwei kombinierte Luftfeuchtigkeits bzw. Temperatur-Sensoren vom Typ SHT11¹², im folgenden Sensirionsensoren genannt, verwendet. Die Sensirionsensoren befinden sich in der Mitte des Kühltankschranks auf Höhe des unteren (Sensor Nr. 3) und des oberen (Sensor Nr. 1) Randes des Petalrahmens. Auf halber Höhe zwischen den beiden Sensirionsensoren ist ein Dallasensor (Sensor Nr. 2) angebracht, der die Temperatur misst. Desweiteren sind zwei Dallassensoren am Ein- und Auslass der Kühltankschläuche der Kühltankschrankmaschine angebracht (Sensoren Nr. 4 und 5), um so die Temperatur des Kühltanksmittels überprüfen zu können. Damit man die Temperatur der einströmenden Trockenluft kontrollieren kann, befindet sich am Einlass der Luft ein Dallassensor (Sensor Nr. 7) und am oberen Ende des Kühltankschranks, dort wo die trockene Luft in den Wärmetauscher¹³ entweicht, ebenfalls ein Dallassensor (Sensor Nr. 6). Somit ermöglichen neun Umgebungsvariablen die Verhältnisse im Kühltankschrank zu beobachten.

¹⁰Ein am III. Physikalischen Institut B in Aachen entwickeltes Auslesegerät, vgl. [23].

¹¹Hersteller ist die Firma Maxim Integrated Products, weitere Informationen zu den Sensoren gibt es in [24].

¹²Produziert von der Firma Sensirion, siehe [25].

¹³Es wird das Produkt BWT B05 der Firma Bühler Meß- und Regeltechnik GmbH benutzt, weitere Informationen siehe [26].

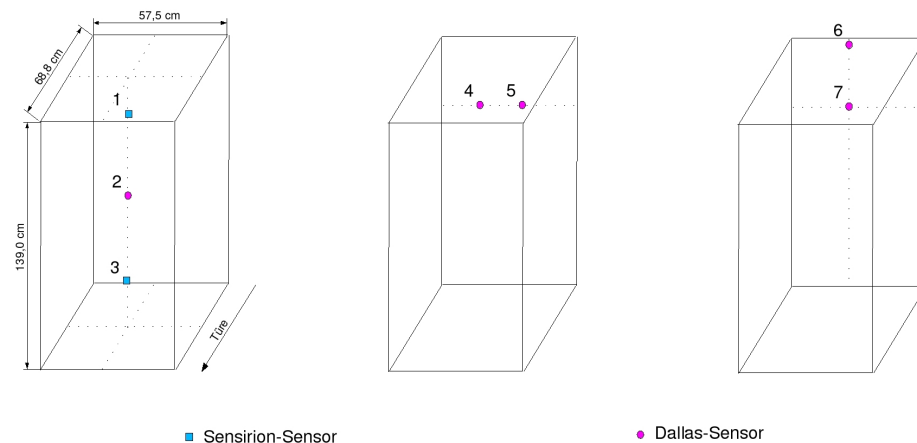


Abbildung 5.5: Positionen der im Kühlschrank angebrachten Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensoren. Insgesamt sind fünf Dallas-Temperatursensoren und zwei Sensorion-Temperatur/Luftfeuchtigkeitssensoren angebracht.

5.3 Die Slow-Control

Die Überwachung aller Netzgeräte und der beiden Kühlvorrichtungen des Petals wird von ein Sicherheitssystem (im folgenden Slow-Control genannt) übernommen. Zu diesem Zweck wurde ein Programm mit dem Namen Slow-Control entwickelt.¹⁴ Mit Hilfe der Software werden die Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensoren ausgelesen und die Temperatur der Kühlmaschine und des Kühlschranks geregelt. Die Spannungen der Netzgeräte werden auch mit Hilfe der Slow-Control eingestellt. Um mit den Geräten kommunizieren zu können, besteht zwischen dem Slow-Control-PC und den Geräten eine Verbindung über jeweils eine RS232-Schnittstelle des Rechners. Einzig die DEPP-Geräte werden über den Parallelport gesteuert. Die eigentliche Aufgabe der Slow-Control besteht allerdings darin, das Petal bei wohldefinierten Umgebungsbedingungen zu halten und, falls diese nicht mehr erfüllt sein sollten, einzugreifen, um Schaden am Petal zu verhindern. Dazu kann man in der Slow-Control Grenzwerte für die Luftfeuchtigkeit angeben. Abb. 5.6 zeigt die Interlockmaske¹⁵ der Slow-Control. Das erste Limit der Luftfeuchtigkeit gibt an, ab welchem Wert die Slow-Control ein weiteres Herabkühlen des Petals verhindert. Sollte während eines Kühlzyklus die Luftfeuchtigkeit über die erste Grenze der Luftfeuchtigkeit gelangen, so schaltet die Slow-Control die aktive Kühlung des Petals durch die Kühlmaschine aus. Weiterhin werden die Kühlmaschine und der Kühlschrank auf 20° Celsius geregelt, bis die Luftfeuchtigkeit wieder unter die erste Grenze sinkt. Danach werden die ursprünglichen Temperaturen des Kühlzyklus wieder eingestellt. Sollte allerdings auch die zweite Grenze der Luftfeuchtigkeit durchbrochen werden, so regelt die Slow-Control

¹⁴Die Entwicklung fand am Institut de Physique nucléaire der Université catholique de Louvain statt.

¹⁵Interlock bedeutet Sperre oder Verriegelung.

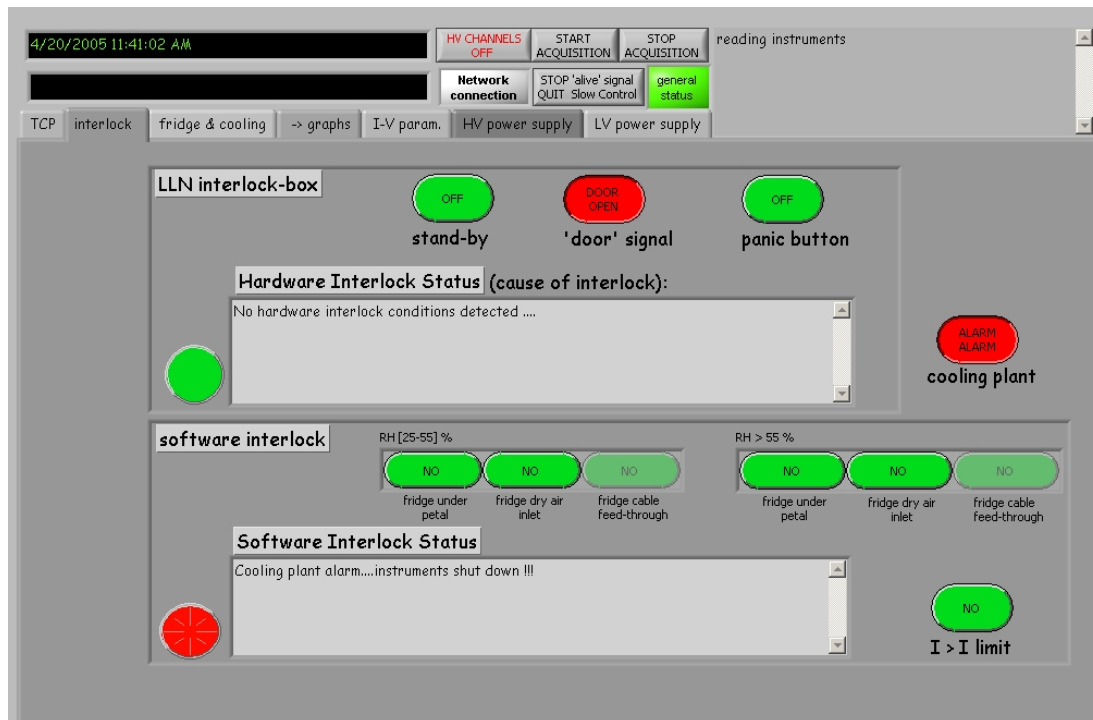


Abbildung 5.6: Interlockmaske der Slow-Control. Man erkennt die Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsgrenzen sowie den Status der Khlschranktr und den Alarmstatus der Kühlmaschine.

nicht nur die Kühlmaschine und den Kühlschrank auf 20° Celsius, sondern schaltet auch die HV aus, bis die obere Grenze wieder unterschritten wird. Die momentanen Grenzen der Slow-Control für die Luftfeuchtigkeit sind 35% RH als untere und 70% RH als obere Grenze.¹⁶ Die beiden anderen Interlockbedingungen der Slow-Control beziehen sich auf die Khlschranktr und die Kühlmaschine. An der Khlschranktr ist ein Induktionsschalter angebracht, der in einen einfachen Schaltkreis integriert und so mit der Slow-Control verbunden ist. Bei geöffneter Khlschranktr erhält die Slow-Control ein Signal, dass der Schaltkreis unterbrochen wurde.

Die Kühlmaschine ist in der Lage ein Alarmsignal an die Slow-Control zu schicken, dieses wird z.B. generiert, wenn der Pegel der Kühlflüssigkeit zu niedrig ist oder eine Komponente der Maschine ausfllt. Sollte bei laufendem Langzeittest die Khlschranktr geöffnet werden oder ein Fehler in der Kühlmaschine auftreten, wird die Slow-Control eingreifen und alle Geräte des Langzeitteststands ausschalten. Deshalb ist zusammen mit dem Slow-Control-Programm eine elektrische Interlockbox entwickelt worden, die in Abbildung 5.7 zu sehen ist. Die Interlockbox ermöglicht es, im Notfall durch einen Panikschalter alle Geräte mit einem Knopfdruck auszuschalten, um evtl. Schaden am Petal zu verhindern. An die Interlockbox ist eine Mehrfachsteckdose angeschlossen, die von der Interlock-

¹⁶Da sich die praktischen Erfahrungen dieser Grenzen auf wenige Petals stützen, ist eine Anpassung der Grenzen durchaus möglich.



Abbildung 5.7: Die Interlockbox der Slow-Control. Der Panikschalter gibt die Möglichkeit, alle Geräte des Langzeitteststands gleichzeitig abzuschalten.

box mit Spannung versorgt wird und in die alle Geräte des Langzeitteststands eingesteckt werden. Durch Drücken des Panikknopfes wird die Spannungsversorgung der Mehrfachsteckdose unterbrochen und die dort eingesteckten Geräte erhalten keine Spannung mehr. Die Interlockbox ist mit Hilfe eines I/O-Kabels¹⁷ mit dem Slow-Control-PC verbunden. Mit dem I/O-Stecker der Interlockbox wird die Kühlmaschine mit ihrem Alarmsignal und der Kühlschrank mit seinem Induktionsschalter verbunden. Neben dem Panikschalter gibt es noch einen Standby¹⁸-Schalter, mit dem man die Interlockbox ein- und ausschalten kann und einen Reset¹⁹-Schalter, der die Interlockbox nach einem Betätigen des Panik-Schalters wieder in den Bereitschaftsmodus zurückbringt.

Die anderen Programmmasken der Slow-Control dienen der manuellen Überprüfung der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensoren sowie der Petalspannungen. Man kann sich die momentanen Werte oder deren zeitlichen Verlauf anschauen. Alle Werte können gespeichert und anschließend ausgewertet werden. Während eines Langzeittests wird die Slow-Control von der Long-Term-Software gesteuert (siehe 5.4), die Betriebsspannungen und die Temperatureinstellungen der Kühlgeräte werden von der Long-Term-Software an die Slow-Control übergeben und von dieser eingestellt.

5.4 Die Long-Term-Software

Die Steuerung der Netz- sowie der Kühlgeräte und die Datenauslese und Analyse wird von der Long-Term-Software übernommen. Bevor mit den eigentlichen Langzeittests begonnen werden kann, benötigt man die in der Assembly-Software erzeugte XML-Datei, in der die gesamte Information der montierten Petalbauteile stehen (vgl. Kapitel 4.2). In der XML-Datei ist neben den Matrixcodes der integrierten Komponenten auch die Zuordnung zwischen den optischen Fasern der AOHs und den Steckern der Short-Ribbon-Kabel gespeichert. Anhand dieser Zuordnung wird die Belegung des K-MUX im Langzeitteststand vorgenommen. Die genaue Kartierung zwischen der AOH-Faser-Position auf einem Short-Ribbon-Kabel und dem K-MUX im Langzeitteststand ist im Anhang E beschrieben.

Nach dem Start der Long-Term-Software wird das zu testende Petal in das

¹⁷In/Out-Kabel, über dessen Leitungen man entweder Signale an die Interlockbox schickt oder Signale von dieser erhält.

¹⁸Englisch für Bereitschaft.

¹⁹Aus dem Englischen für Rücksetzen.

Programm geladen, indem man seine XML-Datei auswählt. Nach dieser Auswahl untersucht die Long-Term-Software, ob alle in der XML-Datei angegebenen Komponenten auf dem Petal sind. Erst bei erfolgreichem I²C-Kommunikationstest kann man mit dem eigentlichen Langzeittest beginnen. Dazu wird ein vorher in einer XML-Datei erstelltes Langzeitszenario²⁰ geladen, das dann von der Long-Term-Software abgearbeitet wird. Das Szenario definiert die an dem Petal durchgeführten Tests und Umgebungsvariablen wie Temperatur und Spannung. Abbildung 5.8 zeigt die Programmmaske der Long-Term-Software, die eine generelle Übersicht des Szenarioablaufs und der auf dem Petal entdeckten Fehler gibt. Außerdem werden die wichtigsten Variablen der Slow-Control wie die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit im KÜhlschrank, sowie der generelle Interlockstatus angegeben.

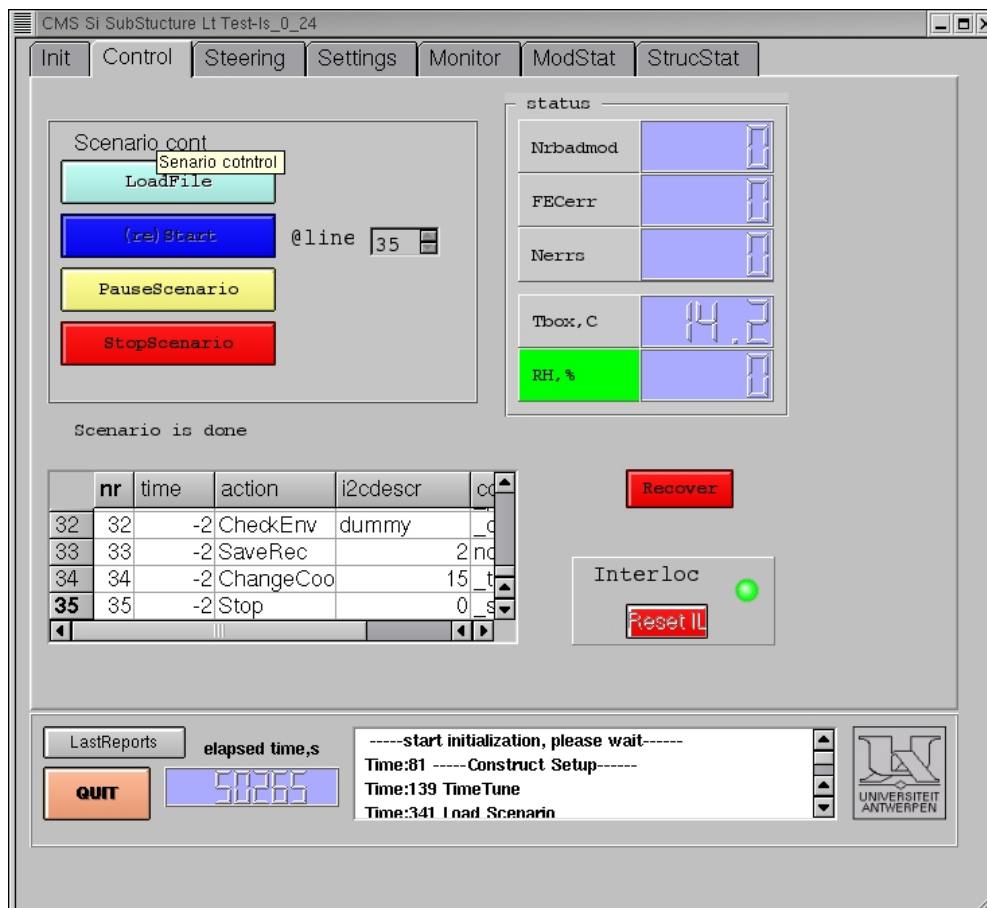


Abbildung 5.8: Die Kontrollmaske der Long-Term-Software mit den Ergebnissen der Petaltests und den wichtigsten Kontrollwerten der Slow-Control.

Die Long-Term-Software sieht ebenfalls vor, dass man alle Tests einzeln durchführen kann. Zu diesem Zweck gibt es weitere Programmmasken, auf welchen die einzelnen Tests des Petals ausgewählt und durchgeführt werden können. Mehr

²⁰Anhang F zeigt beispielhaft die in Aachen beim ersten Langzeittest verwendete Szenario-Datei.

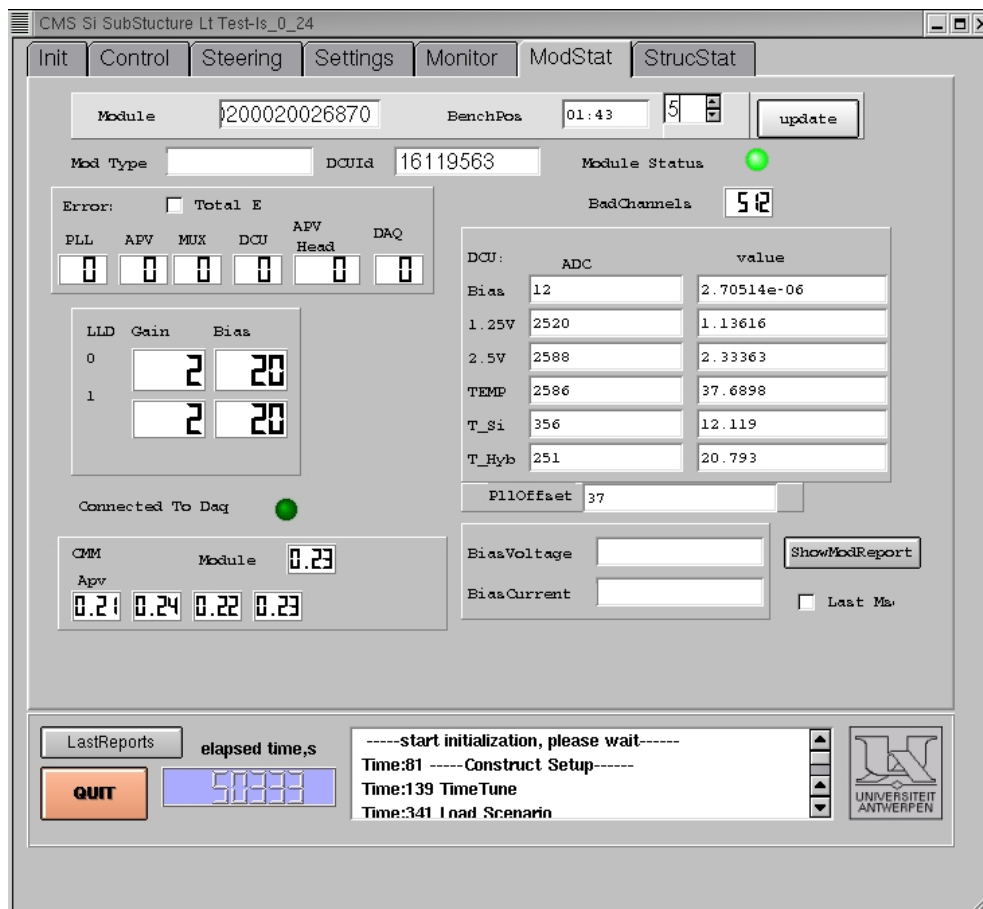


Abbildung 5.9: Die Modulmaske der Long-Term-Software gibt einen Überblick über die Silizium-Streifenmodule auf dem Petal. Es werden die individuellen Modulfehler angezeigt, sowie die Temperaturen des Hybriden und des Siliziumsensors.

zu den einzelnen Tests, siehe Kapitel 6. Eine wichtige Programmmaske ist die MODSTAT-Maske, siehe Abb. 5.9. In dieser sind auf einen Blick alle wichtigen Informationen über ein Silizium-Streifenmodul auf dem Petal überschaubar. Es wird der Matrixcode des betrachteten Silizium-Streifenmoduls angegeben und die dazugehörige DCU-Adresse. Mit Hilfe der von der DCU gelieferten Werte wird die Temperatur des Hybriden und der Silizium-Streifen von der Long-Term-Software berechnet und angezeigt. Des Weiteren gibt es eine Schnellübersicht über die bis zu diesem Testzeitpunkt gefundenen Fehler des Silizium-Streifenmoduls. Der Status des Moduls wird angezeigt. Das Rauschen des Moduls wird für jeden APV angezeigt und das gemittelte Rauschen aller APVs berechnet. Alle durchgeführten Tests werden genauso wie die Temperatur und Luftfeuchtigkeit in ROOT²¹-Dateien gespeichert. Den genauen Aufbau einer von der Long-Term-Software erzeugten ROOT-Datei findet man im Anhang G.

²¹Bei ROOT handelt es sich um ein am CERN entwickeltes objektorientiertes Datenanalysewerkzeug. Mehr über ROOT findet man in [27].

5.5 Die Kommunikation zwischen Slow-Control-PC und Long-Term-PC

Der Long-Term-PC und der Slow-Control-PC sind nicht direkt miteinander verbunden. Beide besitzen jedoch einen Zugang zum Internet. Über das TCP/IP²²-Protokoll wird eine Verbindung zwischen den beiden PCs hergestellt. Dazu wird die IP-Adresse des Slow-Control-PCs in den Einstellungen der Long-Term-Software gespeichert und ermöglicht so die Kommunikation der beiden Rechner.

²²Transport Control Protocol / Internet Protocol.

Kapitel 6

Tests und Benotung der Petals

Die an den Petals durchgeführten Tests und die abschließende Benotung des gesamten Petals basieren auf zwei grundlegenden Parametern. Zum einen die Tests mit den Petalkomponenten CCUs, AOHs und Silizium-Streifenmodulen und zum anderen die Tests die das Petal als ganze Struktur testen und zu einer Benotung des Petals führen. In diesem Kapitel werden zuerst die den Tests zugrundeliegenden Messgrößen und anschließend die Tests selbst und die daraus hervorgehende Benotung der Petals beschrieben.

6.1 Grundlegende Messgrößen

6.1.1 Pedestal

Selbst wenn ein Silizium-Streifendetektor keine durch einen Teilchendurchgang verursachten Signale sendet, misst man für jeden Streifen ein Signal. Diese ungewollten Signale stammen von dem Rauschen der elektrischen Bauteile in der Ausleseelektronik. Jeder Silizium-Streifen eines Modules hat eine unterschiedliche Signallnullage des Rauschens. Man nennt diese individuelle Nulllage Pedestal¹. Das mittlere Pedestal P_i für einen Silizium-Streifen i und N Messungen mit Messwerten $x_{i,n}$, berechnet sich zu:

$$P_i = \frac{\sum_{n=1}^N x_{i,n}}{N} \quad (6.1)$$

6.1.2 Rauschen

Die empfangenen Werte sind nicht konstant, sondern sie sind statistischen Fluktuationen um ihren Mittelwert (das Pedestal) unterworfen. Diese Abweichung vom Pedestal wird Rauschen σ_i genannt. Das Rauschen ist definiert als:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_{i,n} - P_i)^2}{N - 1}} \quad (6.2)$$

¹Pedestal ist englisch und bedeutet Sockel.

6.1.3 Common-Mode-korrigiertes Rauschen

Durch äußere Einflüsse auf das Silizium-Streifenmodul und die AOHs kann es zu einer gemeinsamen Verschiebung des Signals aller Streifen kommen. Diese Verschiebung berechnet sich aus der Differenz des gemittelten Pedestals aller 128 APV-Kanäle und des mittleren Pedestals aller Kanäle für ein Ereignis n . Man bezeichnet diese Abweichung als Common-Mode CM_n :

$$CM_n = \frac{\sum_{i=1}^{128} P_i}{128} - \frac{\sum_{i=1}^{128} x_{i,n}}{128} \quad (6.3)$$

Somit erhält man für das Common-Mode-korrigierte Rauschen CMN_i :

$$CMN_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (P_i - CM_n - x_{i,n})^2}{N - 1}} \quad (6.4)$$

6.1.4 ADC-Einheiten

Die Ausleseeinheit der gerade beschriebenen und aller anderen qualitativen Tests sind sog. ADC-Einheiten². Eine ADC-Einheit ist direkt korreliert mit einer bestimmten Anzahl an Elektron-Loch-Paaren die im Siliziumsensor eines Silizium-Streifenmoduls erzeugt werden. Näheres zur Kalibration der ADC-Einheiten findet man in [3].

6.2 Tests am Petal

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Tests am Petal während der Langzeittests beschrieben. Eine Auflistung aller durchgeführten Tests am Petal bietet Anhang H. Dort werden ebenfalls die zu erfüllenden Testgrenzen gezeigt. Alle im folgenden beschriebenen Tests werden wiederholt bei Raumtemperatur (18° Celsius) als auch in kalter Umgebung (−20° Celsius) durchgeführt, um die Stabilität des Petals unter thermischem Stress zu untersuchen.

6.2.1 Optoscan

Die Laser der AOHs können Signale mit unterschiedlichen Verstärkungen senden. Diese kann in vier Schritten zwischen Gain 0 und Gain 3 eingestellt werden, wobei die Erhöhung des Gains um 1 einem Anstieg der Leitfähigkeit um 2,5 mS entspricht. Durch Verändern des Gains kann die Leitfähigkeit der Laser zwischen 5 mS und 12,5 mS variiert werden. Da die Verstärkung der AOH-Laser temperaturabhängig ist, wird bei jedem Messpunkt eines Langzeittests ein sog. Optoscan durchgeführt. Dazu kann man den Arbeitsbereich in dem die Laser linear verstärken mit Hilfe des sog. Bias-Stroms verändern. Man benutzt zu diesem Test die Tick-Marks der APVs (vgl. Abschnitt 2.4.2). Abbildung 6.1 zeigt den Verlauf eines Optoscans und den dabei ermittelten Arbeitspunkt von acht AOH-Lasern. Mit

²Analogue Digital Converter.

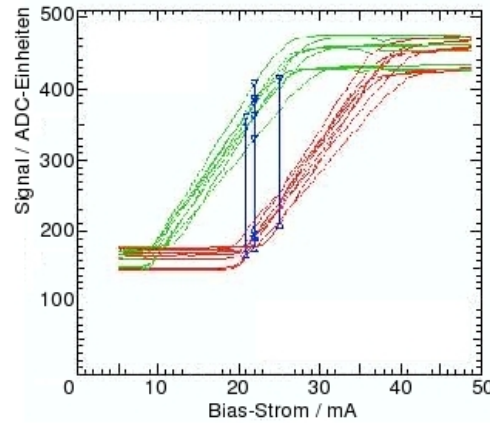


Abbildung 6.1: Bestimmung der Arbeitspunkte von acht AOH-Lasern mit Hilfe der APV-Tick-Marks. Die grünen Kurven sind die logische 1 und die roten Kurven beschreiben die logische 0. Der Arbeitspunkt wird durch Änderung des Bias-Stroms der AOH-Laser bestimmt. Es wird der Bereich gewählt, in welchem sowohl die logische 1 als auch die logische 0 linear vom Laser verstärkt werden. Die ausgewählten Arbeitspunkte sind die blauen Markierungen, basierend auf [28].

Hilfe des Optoscans wird während eines Langzeittests die Güte der optischen Kontakte der Ausleseketten getestet. Eine Änderung der Höhe der APV-Tick-Marks lässt auf eine schlechte optische Verbindung des Petals schließen. Während der Langzeittests müssen die gemessenen Tick-Marks höher als 100 ADC-Einheiten sein, ansonsten gilt der Test als fehlgeschlagen.

6.2.2 TimeTune-Test

Im TimeTune-Test werden Signallaufzeiten angepasst. Die APV-Chips und der FED erhalten von der TSC den simulierten LHC-Takt. Aufgrund der verschiedenen Kabellängen zwischen FED und den einzelnen APVs erreichen die Signale den FED zu leicht unterschiedlichen Zeitpunkten. Um die Signale zu synchronisieren, kann das Taktsignal in den TPLL-Chips so verzögert werden, dass die APVs mit kürzerem Signalweg ihre Daten erst später senden. Die Länge der notwendigen Verzögerung wird mittels des TimeTune-Tests ermittelt.

6.2.3 Pedestal-Run

Beim Pedestal-Run werden die Pedestals der Silizium-Streifen bei verschiedenen Hochspannungen gemessen und das CMN in verschiedenen APV-Moden (siehe 2.4.2) berechnet. Die Pedestals sollten in einem Bereich zwischen 150 und 400 ADC-Einheiten liegen. Das entspricht dem linearen Bereich der Laserverstärkung. Mit Hilfe der verschiedenen APV-Moden lassen sich so aus dem CMN und dem Rauschen verschiedene Defekte wie rauschende Kanäle, Opens und Shorts auf einem Silizium-Streifenmodul feststellen (vgl. Abschnitt 2.4.1). Abbildung 6.2

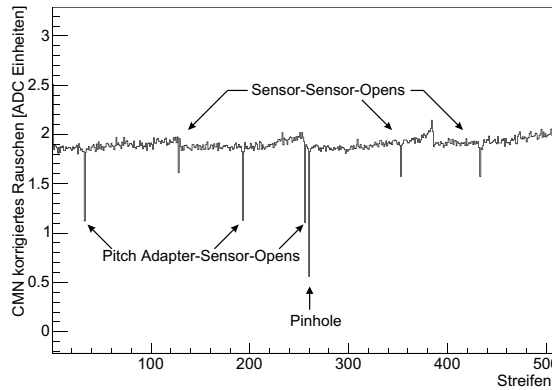


Abbildung 6.2: Rauschen eines Silizium-Streifenmoduls. Verschiedene erkannte Fehler sind markiert.

zeigt beispielhaft das CMN eines Moduls, das mehrere defekte Kanäle aufweist. Das CMN wird dazu benutzt, um die Erdung des Petals zu untersuchen, da eine falsche Erdung des Petals die Form des CMN verändert.

6.2.4 Kalibrationspuls-Test

Der Kalibrationspuls-Test überprüft die Form eines vom APV gesendeten Kalibrationspulses. Die Pulshöhe und die Anstiegszeit des Pulses sind gute Indikatoren für Fehler (Opens, Shorts und Pinholes) auf den Silizium-Streifenmodulen (vgl. Abschnitt 2.4.1). Das Ergebnis dieses Tests ist in Abbildung 6.3 exemplarisch gezeigt. Man kann deutlich die bei einem Silizium-Streifen auftretenden Fehler durch ihre Pulsform von einem fehlerfreien Silizium-Streifen unterscheiden. Der Kalibrationspuls-Test ist sehr zeitaufwändig und dauert für ein vollbestücktes Petal bis zu drei Stunden.

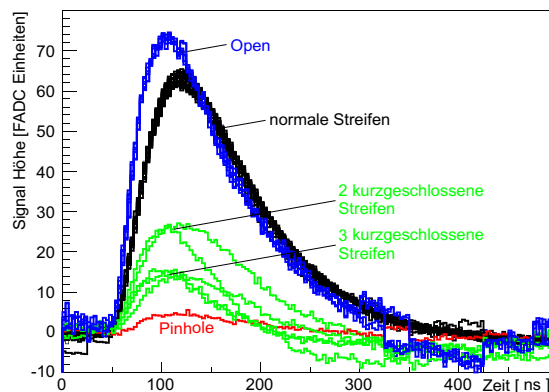


Abbildung 6.3: Verschiedene Kalibrationspulse charakterisieren unterschiedliche Fehler eines Silizium-Streifens. Das Zustandekommen der unterschiedlichen Pulsformen wird in Quelle [21] beschrieben.

6.2.5 Messung der IV-Kennlinien aller Silizium-Streifenmodule

Die IV-Kennlinien der Silizium-Streifenmodule überprüfen den Leckstrom bei unterschiedlichen HV-Werten. Der gemessene Leckstrom wird bei der späteren Benotung des Petals mit den aus der Datenbank bekannten Leckströmen der Silizium-Streifenmodule verglichen und darf nicht größer als deren fünffacher Gesamtleckstrom sein, siehe Abschnitt 6.3.

6.2.6 Tests der Systemstabilität

Die Systemstabilität wird mit Hilfe der oben beschriebenen Tests überprüft. Da bei allen Tests eine I²C-Kommunikation mit den einzelnen Petalkomponenten nötig ist, stellt eine funktionierende I²C-Kommunikation ein unverzichtbares Kriterium für die Systemstabilität des Petals dar. Ebenso werden die Kommunikationsfehler bei der APV-Ansteuerung aufgezeichnet und für eine spätere Benotung des Petals genutzt, vgl. Abschnitt 6.3.

6.2.7 Kühltests

Die Informationen der DCU-Chips jedes Silizium-Streifenmoduls werden dazu benutzt, die Temperaturen des Hybriden und der Silizium-Streifen zu berechnen. Diese werden dann mit den Temperaturen der im Kühltank befindlichen Temperatursensoren (siehe Abschnitt 5.2.1) verglichen. Anhand dieses Vergleiches kann die Effektivität der Wärmeabführung über die Inserts bestimmt werden.

6.3 Die Benotung des Petals

Nach dem Langzeittest des Petals werden diese anhand einer Benotung für den Einbau in die Tracker-Endkappen des CMS-Experiments qualifiziert. Die Benotung der Petals basiert auf drei Kriterien und sieht Noten zwischen A für die besten und D für die schlechtesten getesteten Petals vor. Tabelle 6.3 zeigt das momentan vorgesehene Schema zur Benotung der Petals.

Das erste Kriterium für die Qualifikation der Petals ist die Gesamtanzahl der defekten Silizium-Streifen-Kanäle. Ein Silizium-Streifen gilt dann als defekt, wenn er bei dem dafür vorgesehenen Test einen Grenzwert überschreitet (siehe Anhang H, Tabelle H.2). Eine weitere Auswahl findet bei den montierten Silizium-Streifenmodulen statt. Diese werden vor der Integration auf ein Petal einem ARC-Test unterzogen (vgl. Abschnitt 4.3.1).^{footnote}Notengebung im ARC-Test: Note A: <1% schlechte Kanäle, Note B: 1%<2% schlechte Kanäle, Note C: >2% schlechte Kanäle. Weitere Informationen zur Benotung in den ARC-Tests findet man in Quelle [29]. Die Note des Petals richtet sich danach, wie die Note der montierten Silizium-Streifenmodule aus dem ARC-Test ist. Das letzte Kriterium zur Notengebung des Petals ist der gemessene Leckstrom aller Silizium-Streifenmodule bei

Note	Schlechte Kanäle	Noten der integrierten Module	Leckstrom des Petals $I_{Lecktot}$ bei 450V
A	< 1%	Note A + < 50% mit Note B	$< 5 \cdot \sum I_{Datenbank}$
B	< 2%	Noten A + B	$< 5 \cdot \sum I_{Datenbank}$
C	> 2%	Noten A,B + < 50% C	$< 10 \cdot \sum I_{Datenbank}$
D	> 2%	Module jeder Note	$> 5 \cdot \sum I_{Datenbank}$

Tabelle 6.1: Die Benotung der Petals nach dem Langzeittest stützt sich auf drei Kriterien: die Gesamtzahl der schlechten Kanäle, die Anzahl und Note der integrierten Silizium-Streifenmodule und den Gesamtleckstrom aller auf dem Petal montierten Silizium-Streifenmodule. [30]

einer Hochspannung von 450 V. Dieser wird mit den in der Datenbank abgelegten Leckströmen der Silizium-Streifenmodule verglichen. Es ist vorgesehen, Petals der Noten A und B in die Tracker-Endkappen einzubauen. Alle Petals die diesen Anforderungen nicht genügen, müssen repariert und neu getestet werden. Nähere Angaben zur Qualifikation der Petals findet man in [30]. Die Benotung der Petals soll mit Hilfe eines Analyseprogramms durchgeführt werden. Als Programm soll Defect-Analyzer³ verwendet werden, das es ermöglicht die durchgeführten Tests auszuwerten und das Petal zu benoten.

6.4 Langzeittests des ersten finalen Petals

Am 12.04.2005 wurde das in Aachen integrierte kurze Frontpetal (siehe Abschnitt 4.4) in den Langzeittestand gebracht und ein ca. sechs stündiger Langzeittest durchgeführt. Da die Funktionstüchtigkeit des Luftentfeuchters nach vorangegangenen Tests nicht gewährleistet werden konnte, wählte man einen Messpunkt bei 15° Celsius und einen zweiten bei 5° Celsius Umgebungstemperatur im Kühlschrank, um die Sicherheit des Petals zu gewährleisten. An beiden Messpunkten wurden folgende Tests durchgeführt:

Test	APV-Modus	HV [V]	Dauer [min]
Optoscan	Peakmodus, Inverter aus	100	3
TimeTune	Peakmodus, Inverter aus	100	5
Pedestal-Run	Peakmodus, Inverter aus	100	10
Kalibrationspuls	Peakmodus, Inverter aus	100	100
Pedestal-Run	Peakmodus, Inverter an	100	10
Pedestal-Run	Deconvolutionmodus, Inverter aus	100	10
Pedestal-Run	Deconvolutionmodus, Inverter an	100	10

Die durchgeführten Tests dauerten an jedem Messpunkt ca. 150 min, wobei der Kalibrationspuls-Test der mit Abstand längste Test war. Nach jedem Test wurden

³Für nähere Informationen zu diesem Programm siehe [31].

die Ergebnisse in der gleichen ROOT-Datei gespeichert. Eine Auswertung der Messung und eine anschließende Benotung des Petlals mit dem Defect-Analyzer war leider nicht möglich, da sich das Programm noch in der Entwicklungsphase befindet und die benötigten Programmkomponenten noch nicht verfügbar waren.

6.4.1 Kalibration der Signale

Mit Hilfe des Optoscans und des TimeTune-Scans wurden die Signallaufzeiten und die Signalhöhen optimiert (vgl. Abschnitte 6.2.1 und 6.2.2). Die ermittelten Höhen der Tick-Marks war an der unteren von den Tests akzeptierten Grenze von 100 ADC-Einheiten. Die Ursache für diese relativ niedrigen Signale ist in der optischen Ausleseketten zu suchen. Verunreinigungen der Steckverbindungen können ein schwächeres Signal verursachen. Eine andere Ursache kann ein nicht korrekt verstärkter AOH-Laser sein, dessen Optoscan nicht richtig funktionierte. Diese Fehlerquellen sorgen auch dafür, dass die Signalhöhe der einzelnen Tests unterhalb der Signalhöhe der zum Vergleich herangezogenen ARC-Tests liegt (vgl. Abschnitt 6.4.2).

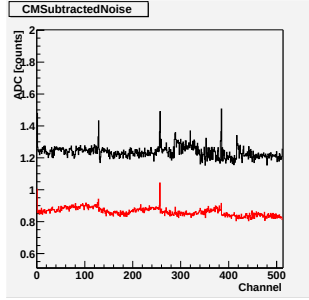
6.4.2 Verhalten der Silizium-Streifenmodule

Das Verhalten der Silizium-Streifenmodule wird hier am Beispiel des aus dem Pedestal-Run ermittelten Common-Mode-korrigierten Rauschens⁴ und des Kalibrationspuls-Tests mit den Ergebnissen ihrer ARC-Tests verglichen. Die im folgenden gezeigten Messkurven wurden im Langzeittest und auch im ARC-Test bei 15° Celsius ermittelt.

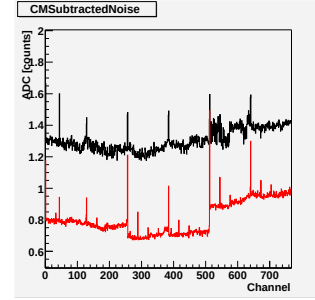
Einen generellen Überblick über das Modulverhalten, gibt das Common-Mode-korrigierte Rauschen. Es können zwar keine Fehler direkt nachgewiesen werden, der Vergleich des CMN zwischen Langzeittest und ARC-Test kann jedoch Unterschiede aufzeigen. Abbildung 6.4 zeigt das CMN der Module 4.2 und 5.1 beim Langzeittest und im ARC-Test. Das Rauschen beider Module zeigt keine generellen Unterschiede zum ARC-Test. Das CMN beim Langzeittest ist niedriger, da schon die Tick-Marks sehr klein sind. Die Höhe der Tick-Marks im ARC-Test kann nur auf ca. 240 ADC-Einheiten geschätzt werden. Somit kann in erster Näherung davon ausgegangen werden, dass die Silizium-Streifenmodule im Langzeittest ein erhöhtes Rauschverhalten im Vergleich zu den ARC-Tests zeigen. Anhang I, Abschnitt I.1 zeigt ringweise das CMN für alle Module des Petals.

Abbildung 6.5 zeigt exemplarisch die Ergebnisse des Kalibrationspuls-Tests von Modul 6.2. Auffällig sind die niedrigen Pulshöhen der Signale des Langzeittests. Vergleicht man die Signalhöhen der APVs im Langzeittest, so fällt auf, dass die APV 0x40 und 0x42 ein höheres Signal haben, als die APVs 0x48 und 0x4a. Dieser Unterschied wird durch einen schlechten optischen Kontakt oder von den AOH-Lasern hervorgerufen. Im ARC-Test wurden bei diesem Modul zwei Opens

⁴Das Common-Mode-korrigierte Rauschen wurde im Peak-Modus bei ausgeschaltetem Inverter ermittelt.



(a) Modul 4.2



(b) Modul 5.1

Abbildung 6.4: (a) und (b) zeigen den Vergleich des CMN zwischen Langzeittest und ARC-Test der Module 4.2 und 5.1. Das CMN der Langzeittests ist in rot, das der ARC-Tests in schwarz dargestellt. Der Vergleich zeigt keine signifikanten Unterschiede des Rauschens.

und vier Shorts gefunden. Man erkennt diese Kanäle an ihrer abweichenden Anstiegszeit des Kalibrationspulses. Der Vergleich von Langzeittest und ARC-Test zeigt, dass die gleichen Kanäle auch im Langzeittest wiederzufinden sind. Da diese Kanäle beim Langzeittest durch „gesunde“ Kanäle verdeckt werden, zeigt Abbildung 6.6 die beiden betroffenen APV-Chips. Jetzt sind deutlich sechs fehlerhafte Kanäle zu erkennen. Anhang I zeigt den Vergleich der Kalibrationspuls-Tests zwischen Langzeittest und ARC-Test für alle Module des getesteten Petals. Die im ARC-Test mit Hilfe des Kalibrationspuls-Tests gefundenen Moduldefekte konnten alle im Langzeittest wiedergefunden werden.

6.4.3 Kühltests

Die Messwerte der DCU-Chips wurden alle 300 s ausgelesen. Mit diesen Werten kann später der Temperaturverlauf der Silizium-Streifenmodule ausgewertet werden. Die Messwerte der DCU-Chips werden in ADC-Einheiten angegeben und in der erzeugten ROOT-Datei gespeichert. Abbildung 6.7 zeigt die gemessenen DCU-Werte. Zum Zeitpunkt des Langzeittests war die Temperaturfunktion $T(ADC)$, die es erlaubt die gemessenen ADC-Einheiten in ° Celsius umzurechnen nicht bekannt. Im Laufe der ARC-Tests wurde eine Temperaturfunktion bestimmt, mit der man die DCU-Werte in Temperaturwerte umrechnen kann [32]. Diese Umrechnung funktioniert für die im Langzeittest ausgelesenen DCU-Werte nicht, da andere Annahmen zur Umrechnung getroffen wurden. Es ist in Zukunft notwendig, die DCU-Werte direkt umzurechnen und den daraus erhaltenen Temperaturverlauf in die ROOT-Datei zu speichern. Eine Auswertung der Daten der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensoren im Kühltank war leider nicht möglich, da diese von der Slow-Control nicht gespeichert wurden.

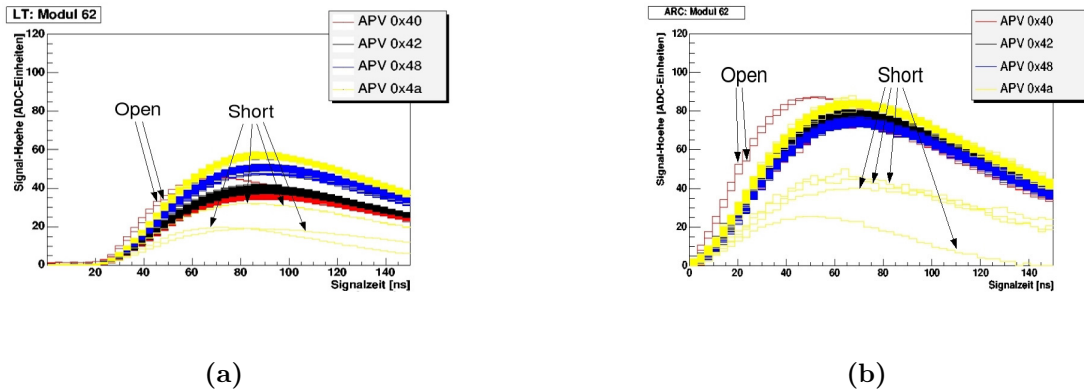


Abbildung 6.5: (a) zeigt die Kalibrationstest-Pulse des Langzeittests, (b) die des ARC-Tests (In beiden Diagrammen sind die Fehler markiert).

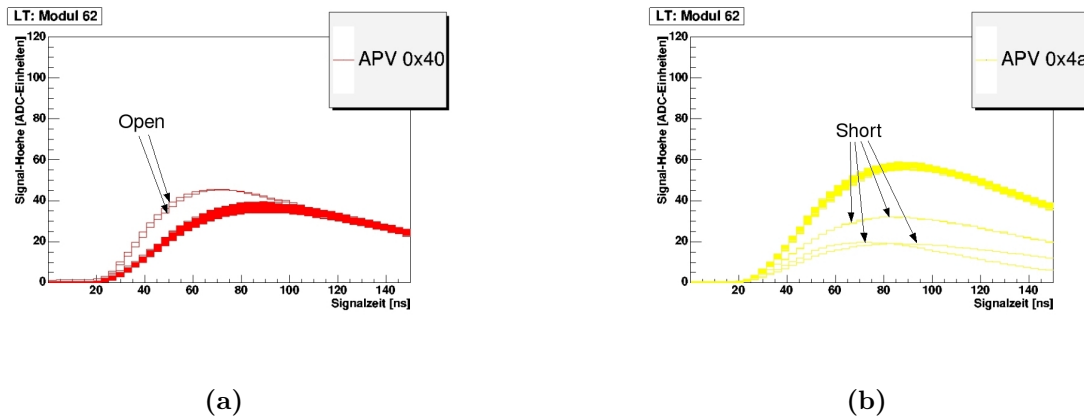


Abbildung 6.6: (a) zeigt die Kalibrationstest-Pulse der Silizium-Streifen von APV 0x40, (b) die von APV 0x4a. Die durch die Fehler hervorgerufenen unterschiedlichen Pulshöhen sind gut erkennbar.

6.4.4 Fazit des ersten Langzeittests

Der erste Langzeittest eines Petals in Aachen verlief zufriedenstellend. Das Einbringen des Petals in den Kühltank und die Verkabelung wurden in wenigen Minuten durchgeführt und stellen keine potentiellen Verzögerung für spätere Langzeittests dar. Die Kommunikation zwischen der Slow-Control und dem LT-PC konnte ebenfalls problemlos hergestellt werden. Alle von der Slow-Control gesteuerten Geräte funktionierten ohne Verzögerungen. Die Trockenluftversorgung funktionierte während des gesamten Tests ohne Probleme. Damit die Umgebungsvariablen in Zukunft immer gespeichert werden, sollte die Slow-Control so überarbeitet werden, dass sie die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit immer speichert. Die durchgeführten Tests liefen stabil. Es wurde jedoch festgestellt, dass es zu

Instabilitäten des Tokenrings kommt, sobald der Kompressor des Kühlschranks anläuft. Ist der Kompressor gestartet, so läuft der Token-Ring wieder stabil. Deswegen muss für zukünftige Tests ein Erdungsschema erarbeitet werden, damit eine maximale Stabilität des Token-Rings gewährleistet werden kann. Die Auswertung der Daten ergab, dass die Kontakte der optischen Auslekette so gut wie möglich gereinigt werden müssen, um für alle Module die gleiche Signalhöhe gewährleisten zu können. Die Kommunikation zwischen Slow-Control und LT-PC lief reibungslos. Eine Auswertung der beim Langzeittest erstellten ROOT-Datei war nur sehr eingeschränkt möglich, da der Defect-Analyzer bis zu diesem Zeitpunkt keinerlei Routinen aufweist, um ein Petal für den Einbau in die Tracker-Endkappe zu qualifizieren. Die dazu benötigten Änderungen an der Software sollten so schnell wie möglich vorgenommen werden. Die hier ausgewerteten Tests zeigen jedoch, dass die Silizium-Streifenmodule den Langzeittest gut überstanden haben. Es wurden die gleichen Fehler gefunden, die auch in den ARC-Tests ermittelt wurden.

Aus Sicht der Hardware ist der Aachener Langzeittestand geeignet die Petals zu testen. In einem Zeitraum von 72 h sollten nach den Erfahrungen des ersten Tests bis zu neun Temperaturzyklen möglich sein. Allerdings ist die Zeit um von 15° Celsius auf die vorgesehenen -20° Celsius abzukühlen noch nicht genau bekannt. Die Möglichkeit Petals zu benoten wird stark von der Entwicklung des Defect-Analyzer-Programms abhängen.

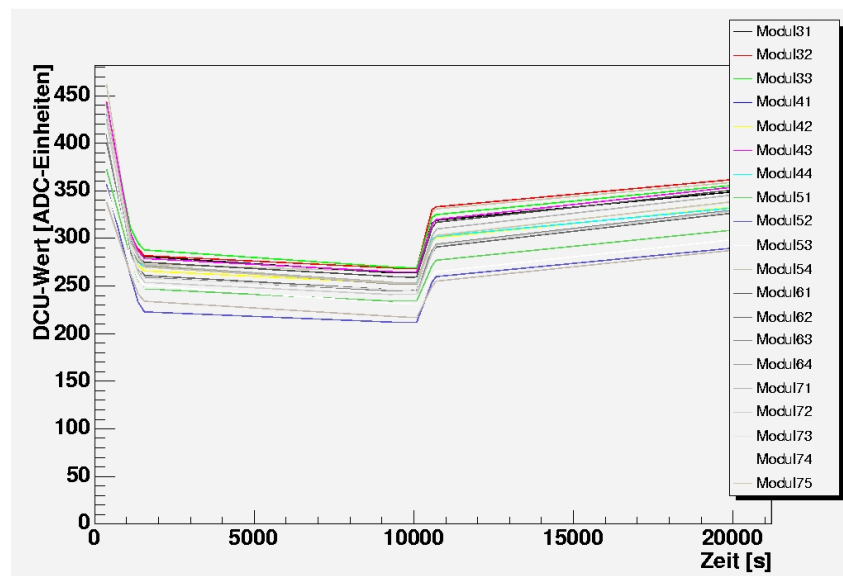


Abbildung 6.7: Die von der Temperatur abhängigen DCU-Messwerte geben den Temperaturzyklus wieder.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Nach einer kurzen Einleitung über das CMS-Experiment und der Erklärung der zum Petalbau notwendigen Komponenten in den Kapiteln 1 bis 3 wurden im 4. Kapitel der Integrationsteststand und die Integrations Prozedur ausführlich vorgestellt. Anhand der durchgeführten Petalintegration konnte gezeigt werden, dass der Integrationsteststand in Aachen betriebsbereit ist und man in der Lage ist, Petals in der dafür vorgesehenen Zeit erfolgreich zu montieren und testen.

In Kapitel 5 wurde der Langzeitteststand vorgestellt und in Kapitel 6 die durchgeführten Tests, die zu einer Qualifikation der getesteten Petals für die Endkappen des CMS-Spurdetektors führen. Mit Hilfe des ersten Langzeittests an einem Petal konnte gezeigt werden, dass man in der Lage ist, mit den Petals mehrtägige Kühlzyklen durchzuführen. Die Auslese während der einzelnen Tests verlief stabil. Kleinere aufgetretene Fehler bei den Tests konnten mittlerweile behoben werden, so dass die 41 vorgesehenen Petals langzeitgetestet werden können. Die Ergebnisse des Langzeittests zeigten allerdings auch auf, dass eine abschließende Qualifikation der Petals für die Tracker-Endkappen noch nicht möglich ist, da das dafür vorgesehene Programm noch nicht über die nötigen Auswerteroutinen verfügt.

Sobald das Programm zur Benotung der Petals über die notwendigen Auswerteroutinen verfügt, wird es möglich sein, alle bis zu diesem Zeitpunkt getesteten Petals zu benoten und ggfs. für den Einbau in die Endkappen des CMS-Spurdetektors zu qualifizieren.

Anhang A

Tabelle zu den Modulpositionen

In den folgenden Tabellen sind zu den verschiedenen Modulpositionen jeweils die Anzahl der APVs sowie die Länge der zugehörigen AOH-Fasern angegeben. Außerdem werden Normal- (N) und Stereomodule (S) unterschieden [5].

A.1 Backpetal

Position	Modulart	Anzahl APVs	Länge der optischen Fasern / cm
1.1	N	6	110
1.2	S	6	100
2.1	N	6	88
2.2	S	6	88
3.1	N	4	88
3.2	N	4	80
4.1	N	4	88
4.2	N	4	80
4.3	N	4	70
5.1	N	6	80
5.2	S	6	80
5.3	N	6	70
5.4	S	6	70
5.5	N	6	56
5.6	S	6	56
6.1	N	4	70
6.2	N	4	56
6.3	N	4	35
7.1	N	4	88
7.2	N	4	80
7.3	N	4	70
7.4	N	4	70
7.5	N	4	56

A.2 Frontpetal

Position	Modulart	Anzahl APVs	Länge der optischen Fasern / cm
1.1	N	6	120
1.2	S	6	110
1.3	N	6	110
1.4	S	6	110
2.1	N	6	100
2.2	S	6	100
2.3	N	6	88
2.4	S	6	88
3.1	N	4	100
3.2	N	4	88
3.3	N	4	80
4.1	N	4	88
4.2	N	4	80
4.3	N	4	70
4.4	N	4	70
5.1	N	6	80
5.2	S	6	70
5.3	N	6	70
5.4	S	6	56
6.1	N	4	70
6.2	N	4	56
6.3	N	4	35
6.4	N	4	35
7.1	N	4	80
7.2	N	4	80
7.3	N	4	70
7.4	N	4	70
7.5	N	4	56

Anhang B

Die Logistik der Tracker-Endkappen

Abbildung B.1 zeigt die Aufgabenverteilung und den Ablauf beim Bau der Tracker-Endkappen. Die Aufgaben der beteiligten Zentren sind wie folgt abgekürzt:

DC:	Distribution Centre
QTC:	Quality Test Centre
MAC:	Module Assembly Centre
BC:	Bonding Centre
PIC:	Petal Integration Centre
SM:	Super Module

Das CERN koordiniert die Logistik. Der erste Schritt ist die Kontrolle der Siliziumsensoren. Diese werden nach bestandenem Test zu den Silizium-Streifenmodulen zusammengebaut und zum Bonden der Komponenten weitergegeben. Damit ist die Montage der Silizium-Streifenmodule abgeschlossen und sie werden an die Petalintegration-Centre geschickt, um auf die Petals montiert zu werden. Hamburg nimmt eine Sonderstellung unter den PICs ein, da dort alle AOHs auf die Petals gebracht werden. Die so bestückten Petals werden anschließend an fünf PICs transferiert, die die weitere Petalintegration und die Petal-Langzeittests durchführen.

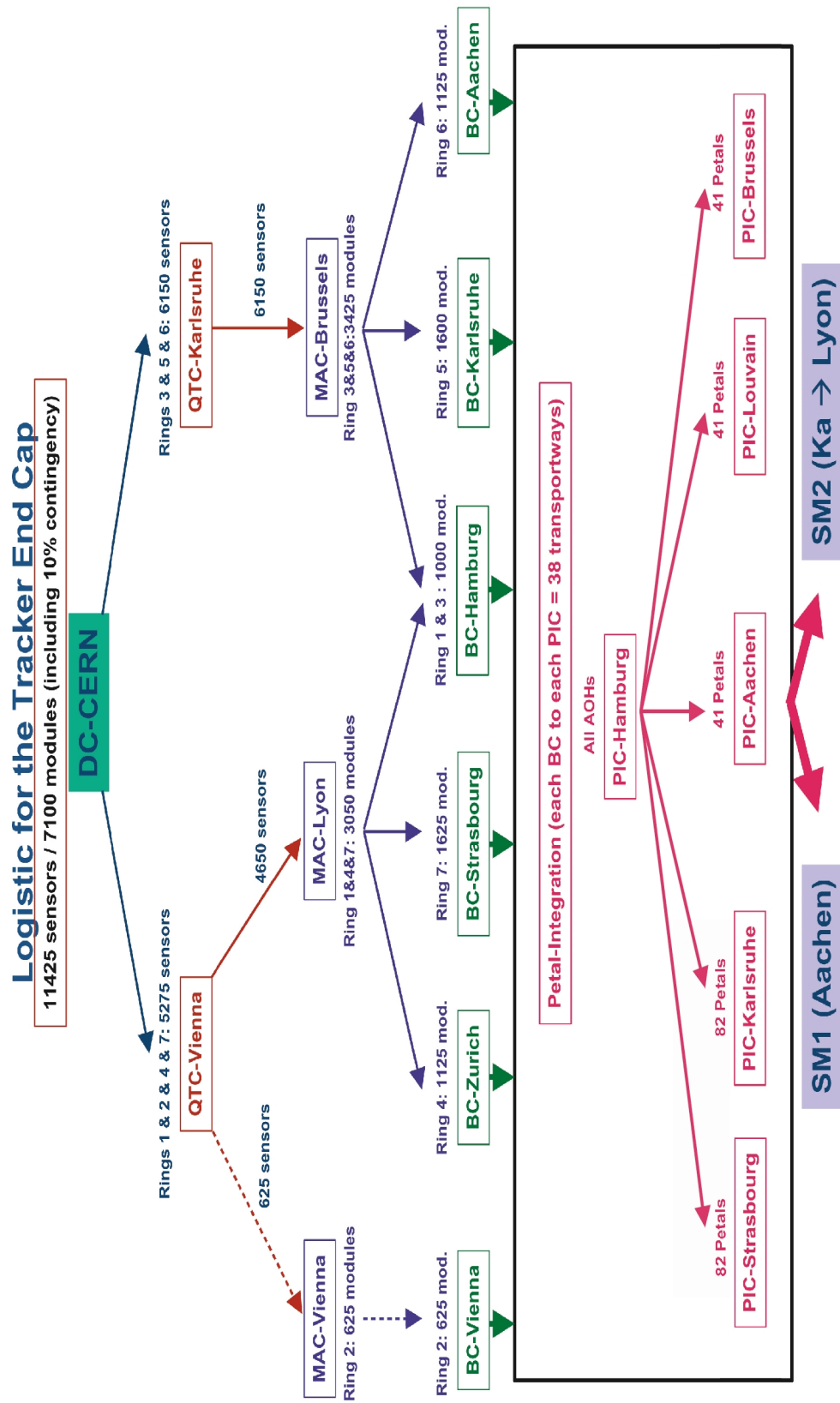


Abbildung B.1: Logistik für den Zusammenbau der Tracker-Endkappen.

Anhang C

Zeitplan der Petalintegration vom 28.02.2005 und 01.03.2005

Die unten stehende Tabelle gibt den genauen Zeitplan der Petalintegration vom 28.02.2005 und 01.03.2005 wieder.

Datum	Zeit	Dauer [min]	Aktion
Montag 28.02.2005	10:10	50	Vorbereitung
	11:00	150	Integration AOHs Ring 6 AOHs Ring 6, nun Tests
	13:30	90	Mittagspause
	15:00	26	Integration AOHs Ring 4
	15:26	10	Petal drehen
	15:36	13	Integration AOHs Ring 3
	15:49		Integration Ring 3 erfolgreicht
Dienstag 01.03.2005	07:43	64	Integration AOHs Ringe 5+7
	08:47	63	Vorbereitung Modulintegration
	09:50	160	Integration Module Ring 7
	12:30	90	Mittagspause
	14:00	113	Integration Module Ring 5
	15:53	24	Integration Module Ring 3
	16:17	3	Petal drehen
	16:20	52	Integration Module Ring 4
	17:17	27	Integration Module Ring 6
	17:44		Integration abgeschlossen
Gesamtdauer (x:xx h)		12:35 h	ohne Pausen

Anhang D

Schematischer Aufbau der Trockenluftversorgung

Abbildung D.1 zeigt den schematischen Aufbau der Trockenluftversorgung des KÜhlschranks im Langzeitteststand. Die benutzte Pressluft, wird von der zentralen Pressluftversorgung der RWTH Aachen zur Verfügung gestellt. In der Luft befinden sich noch Ölpartikel und andere Verschmutzungen, die Luftfeuchtigkeit ist bis zu diesem Punkt nicht geregelt und entspricht der ihrer Umgebung. Die Pressluft gelangt über Rohrleitungen in das Labor. Der Ausgangsdruck beträgt 8 bar und wird mit einem Druckminderer auf den gewünschten Druck eingestellt. Nun wird die Luft von zwei Vorfiltern (HF5-12) gereinigt. Diese besitzen einen Ölausscheidefilter der alle Ölpartikel die größer als $1 \cdot 10^{-8}$ m mit einer Effizienz von $< 1 \text{ ppm}^1$ ausfiltert. Nach dieser Filterung folgt der Absorptionstrockner (DKC 9). Der Absorptionsfilter besitzt zwei Trockenmittelbehälter. Während des Betriebs strömt die Luft durch einen Behälter, bis das Trockenmittel gesättigt ist. Dann schaltet der Absorptionsfilter auf den zweiten Trockenmittelbehälter um und reinigt währenddessen den ersten Behälter. Mit dieser Prozedur können Drucktaupunkte bis zu -70° Celsius erreicht werden. Bevor die trockene Luft zum KÜhlschrank gelangt, wird sie von zwei Nachfiltern (HF6-12, HF1-12) gereinigt, um Partikel, die während des Absorptionsprozesses in die Luft gelangt sind herauszufiltern. Mit dem HF6-12 Filter werden grober Staub und Schmutzpartikel bis zu einer Größe von $1 \cdot 10^{-6}$ m herausgefiltert. Der HF1-12-Filter ist ein Aktivkohle-Filter der Partikel bis $1 \cdot 10^{-8}$ m Größe und einem Restölgehalt von $< 0,003 \text{ ppm}$ gewährleistet. Die hier vorgestellten Geräte stammen von der Firma Blitz. Weitere technische Spezifikationen findet man in [33].

¹Parts Per Million.

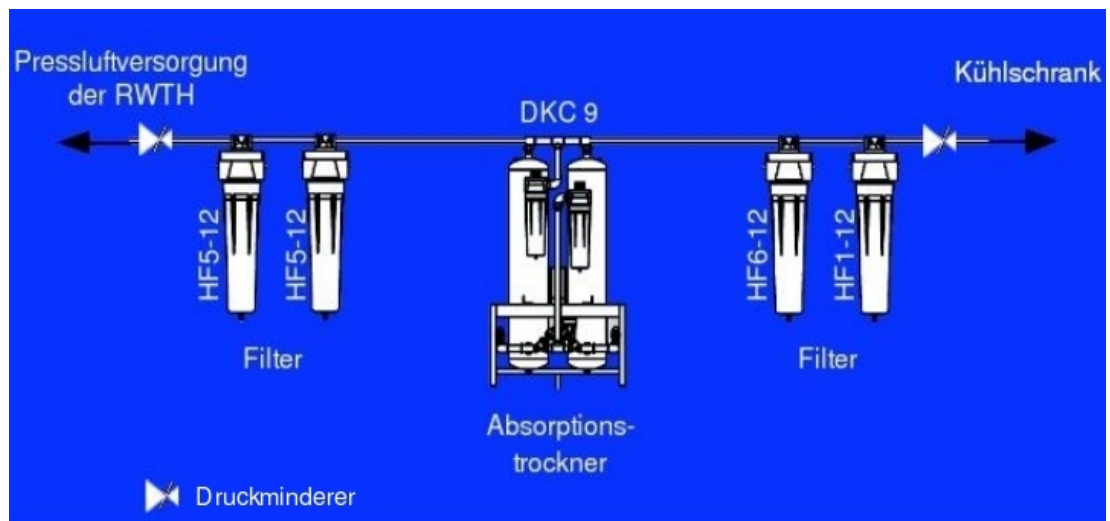


Abbildung D.1: Schematischer Aufbau der Trockenluftversorgung mit Hilfe von Filtern und eines Absorptionstrockners.

Anhang E

Belegung des K-MUX im Langzeitteststand

Durch die bei der Petalintegration erzeugte XML-Datei (vgl. Abschnitt 4.2) wird die Verkabelung von O-FED zum K-MUX im Langzeitteststand festgelegt. Die genaue Zuordnung von AOH-Laser auf einem Short-Ribbon-Kabel zu einem K-MUX Steckplatz ist in Tabelle E.1 wiedergegeben. Dabei sind die Bezeichnungen der AOH-Laser die gleichen wie sie bei der AOH-Integration verwendet werden (Ring, Position, Laser), vgl. Abschnitt 4.3.4.

K-MUX		Ausgangskanal									
Karte		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		712	722	732	742	752	612	622	632	642	-
1		710	720	730	740	750	610	620	630	640	-
2		512	532	412	442	332	222	242	112	142	-
3		511	531	410	440	330	221	241	121	141	-
4		510	530	422	312	212	220	240	110	140	-
5		522	542	420	310	211	232	112	132	-	-
6		521	541	432	322	210	231	111	131	-	-
7		520	540	430	320	-	230	110	130	-	-

Tabelle E.1: K-MUX-Belegung nach der aus dem Assembly-Programm hervorgehenden AOH-Verteilung auf den Short-Ribbon-Kabeln.

Anhang F

Szenario des ersten Langzeittests

Tabelle F ist die Szenario-XML-Datei des ersten Langzeittests. Die erste Spalte ist für die Long-Term-Software ein Eintrag, ob es sich bei der nächsten Aktion um einen Test handelt oder nicht. In der zweiten Spalte wird die durchzuführende Aktion definiert und in der dritten Spalte, die dazugehörigen Einstellungen an die Long-Term-Software übergeben. die letzte Spalte ist eine Kurzbeschreibung für den Physiker, welche Aktion durchgeführt wird.

	Befehl	Modus/Wert	Erklärung
1	Start	longterm	test
-2	SetDt	300	_dt300
-2	ChangeHV	100	_hv100
-2	ChangeCool	15	_t15
-2	TempReached	15	_tr
-2	OptoScanRun	i2cpeak	_os
-2	TimeTuneRun	i2cpeak	_ts
-2	PedRun	i2cpeak	_pp
-2	CalProfRun	i2cpeak	_c
-2	SaveRec	1	no
-2	PedRun	i2cpeakinv	_ppi
-2	SaveRec	1	no
-2	PedRun	i2cdec	_pd
-2	SaveRec	1	no
-2	PedRun	i2cdecinv	_pdi
-2	CheckEnv	dummy	_d
-2	SaveRec	1	no
-2	CheckEnv	dummy	_d
-2	ChangeCool	5	_t5
-2	TempReached	5	_tr
-2	OptoScanRun	i2cpeak	_os
-2	TimeTuneRun	i2cpeak	_tt
-2	PedRun	i2cpeak	_pp
-2	CalProfRun	i2cpeak	_c
-2	PedRun	i2cpeak	_pp
-2	SaveRec	2	no
-2	PedRun	i2cpeakinv	_ppi
-2	SaveRec	2	no
-2	PedRun	i2cdec	_pd
-2	SaveRec	2	no
-2	PedRun	i2cdecinv	_pdi
-2	CheckEnv	dummy	_d
-2	SaveRec	2	no
-2	ChangeCool	15	_t15
-2	Stop	0	_stop

Tabelle F.1: Szenario-Datei des Langzeittests

Anhang G

Aufbau der ROOT-Dateien aus der Long-Term-Software

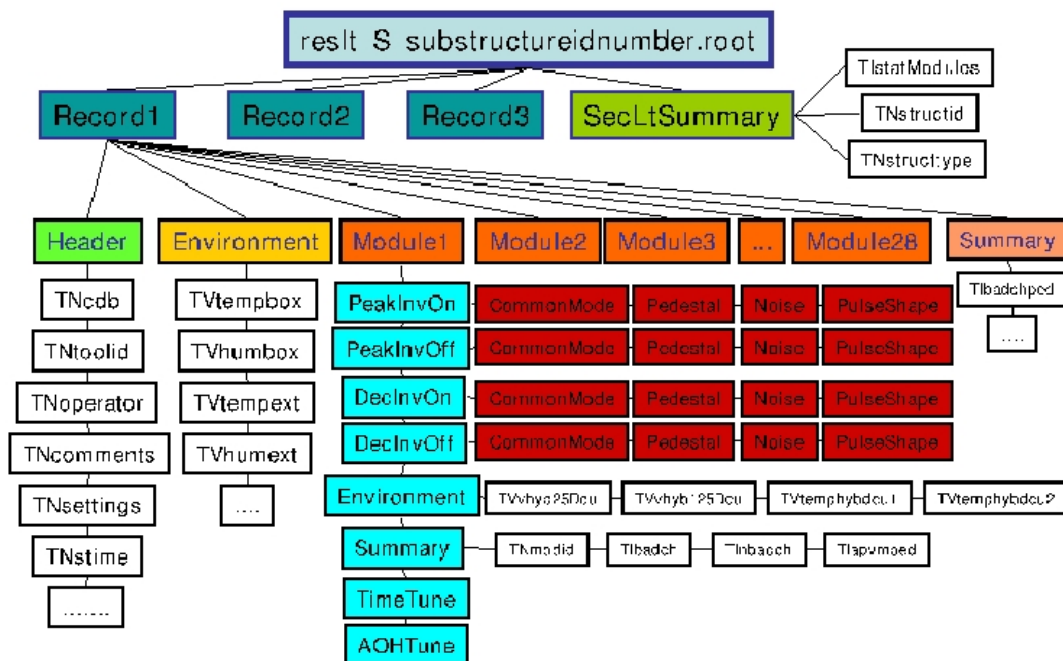


Abbildung G.1: Schematischer Aufbau einer ROOT-Datei wie sie von der Long-Term-Software erzeugt wird, Quelle [34].

Anhang H

Erklärung und Obergrenzen der Langzeittests

Tabelle H.1 zeigt alle während eines Langzeitzyklus durchgeführten Tests und die während dieser Tests gemessenen Parameter. Die Testobergrenzen sind in Tabelle H.2 angegeben, sollte eine dieser Obergrenzen durchbrochen werden, muss das Petal repariert werden. Mehr zu den durchgeführten Tests und den Testobergrenzen findet man in [30].

Test	Erklärung	Gemessener Parameter	Überprüfter Parameter
Optoscan	AOH gain und bias werden gemessen	Höhe der APV Tick-Marks	Einstellungen der AOHs optische Kontakte
TimeTune-Test	PLL Einstellungen	Höhe der APV-Tick-Marks	Signal Verzögerung
Pedestal Run	APV Test bei 400 V in allen Moden: Peakmodus, Inverter an/aus	Pedestal (in allen APV-Moden) CMN (Peakmodus, Inverter aus) Rauschen (Peakmodus Inverter an)	Höhe der Tick-Marks Erdung verrauschte Kanäle, Opens, Shorts, Pinholes Kommunikationsfehler mit APV
Kalibrationspuls Test	Deconvolutionmodus, Inverter an/aus Kalibrationspuls bei 400 V Peakmodus (Inverter an)	Anzahl Kommunikationsfehler Kalibrationspulsgröße Anstiegszeit Anzahl der I ² C Kommunikationsfehler	Opens, Shorts, Pinholes Opens, Shorts, Pinholes Kommunikationsfehler
Kalibrationstest	Kalibrationspuls Amplitude bei fester Latenz, 0 und 400 V, Peakmodus, Inverter an	Kalibrationspuls Amplitude	Opens, Shorts, Pinholes
IV-Test	IV-Kurve für jede HV Gruppe	I_{Leck} bei 450 V	Stabilität des Leckstroms
Slow-Control-Test	DCU Werte der Module	Temperaturverteilung der Hybride und CCUs	Stabilität des Leckstroms

Tabelle H.1: Alle beim Langzeittest durchgeführten Tests mit Beschreibung.

Gemessener Parameter	Wert
APV- Tick-Mark	> 100 ADC Einheiten
Pedestal (alle APV-Moden)	$150 - 400$ ADC Einheiten
CMN (Peak Modus, Inverter aus, 400 V)	$< 0,5$ ADC Einheiten
Rauschen (Peakmodus, Inverter an, 400 V)	$> 5\sigma$ Noisy oder Pinhole
CMN (Rauschen, Inverter an, 400 V) normiert	$> 5\sigma$ Noisy oder Pinhole $< 5\sigma$ open
Kalibrationspulshöhe (Peakmodus, Inverter an, 400 V)	$< 0,8$ Hybrid-Sensor Open $< 0,9$ Sensor-Sensor Open $< 0,8$ Short oder pinhole
Anstiegszeit Kalibrationspuls (Peakmodus, Inverter an, 400 V)	< 10 ns Hybrid-Sensor Open < 5 ns Sensor-Sensor Open
Kalibrationspulshöhe (Peakmodus, Inverter an, 0 V)	$< 0,7$ Hybrid-Sensor Open $< 0,8$ Sensor-Sensor Open $< 0,8$ Short
Anzahl I ² C Kommunikationsfehler	$< 1\%$
Anzahl Auslesefehler	$< 1\%$
Anzahl APV-Adressierungsfehler	0
Leckstrom I_{leck} bei 450 V, auf Temperatur normiert pro Silizium-Streifenmodul pro HV-Gruppe	$< 5 \cdot I_{Datenbank}$ $< 5 \cdot \sum I_{Datenbank}$
normierte DCU-Temperaturen	innerhalb von 20% Abweichung

Tabelle H.2: Alle angegebenen Testwerte stellen Obergrenzen für die durchgeführten Tests dar. Sollten diese Grenzen überschritten werden, muss das Petal repariert werden.

Anhang I

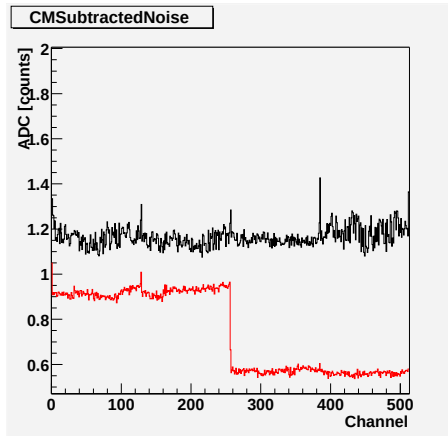
Testergebnisse

Die Ergebnisse des Kalibrationspulstests und die Ergebnisse des Pedestal-Runs sind in diesem Anhang ringweise für alle Module des Petals anhand von Plots gezeigt.

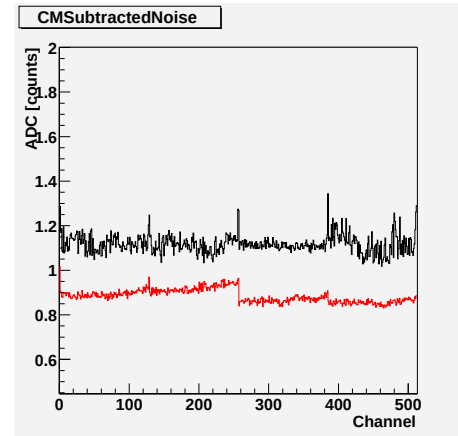
I.1 Vergleich CMN-LT-ARC

Ringweiser Vergleich des im Langzeittest beim Pedestal-Run ermittelten CMN mit dem CMN der ARC-Tests. Das CMN des Langzeittests ist in rot gezeigt, das der ARC-Tests in schwarz. Die Module der Ringe 6 und 7 zeigen für die ersten beiden APVs jeweils eine Struktur im Rauschen, verhalten sich aber ansonsten unauffällig.

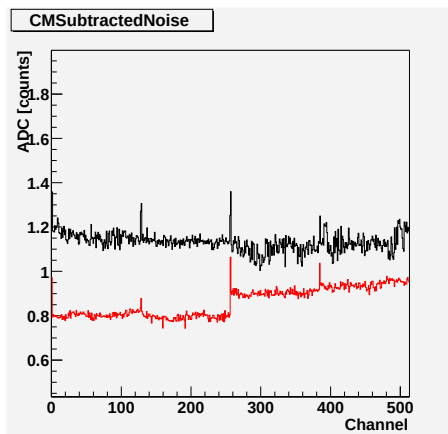
I.1.1 Ring 3



(a) Modul 3.1

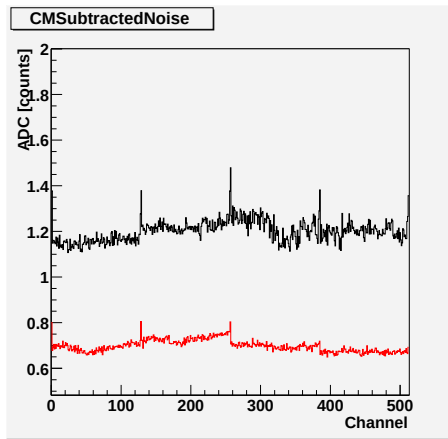


(b) Modul 3.2

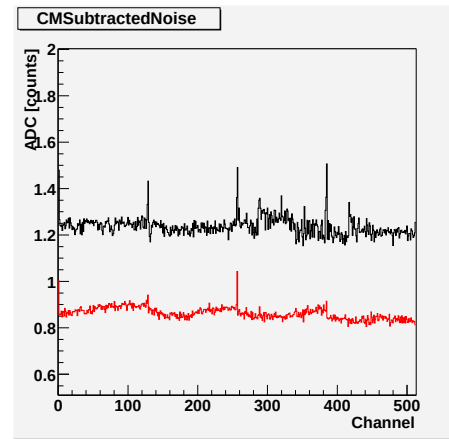


(c) Modul 3.3

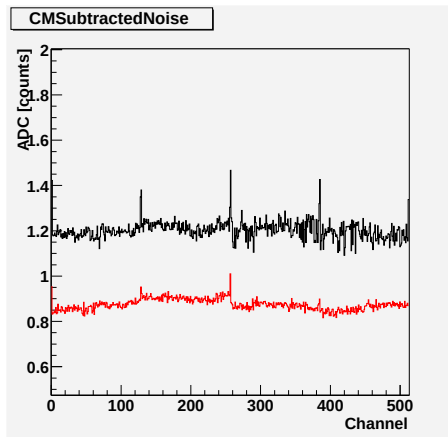
I.1.2 Ring 4



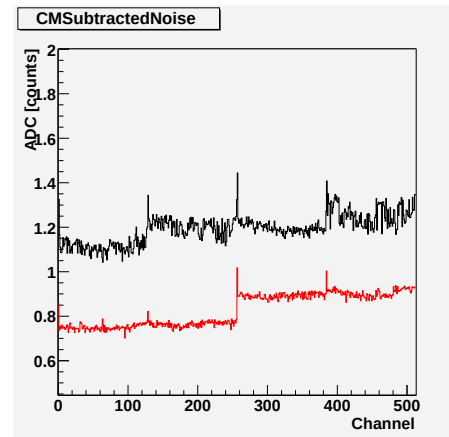
(d) Modul 4.1



(e) Modul 4.2

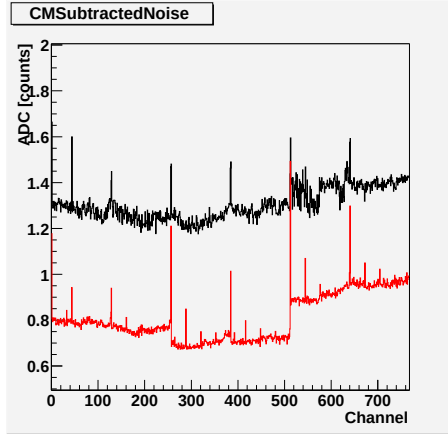


(f) Modul 4.3

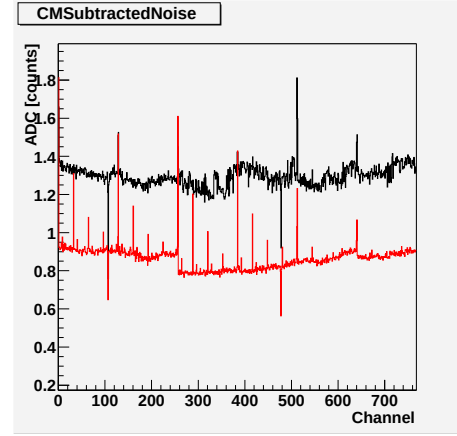


(g) Modul 4.4

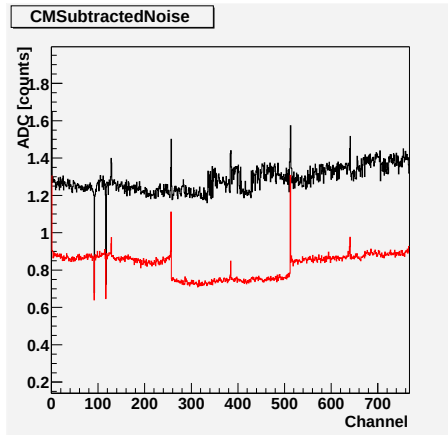
I.1.3 Ring 5



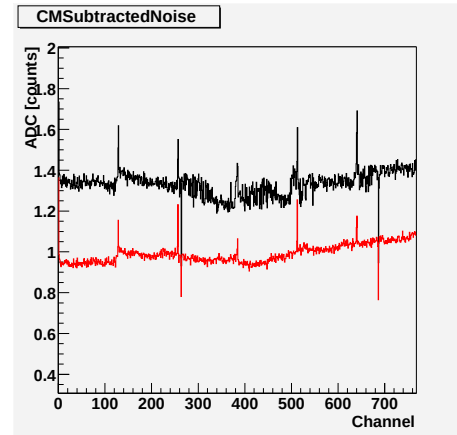
(h) Modul 5.1



(i) Modul 5.2

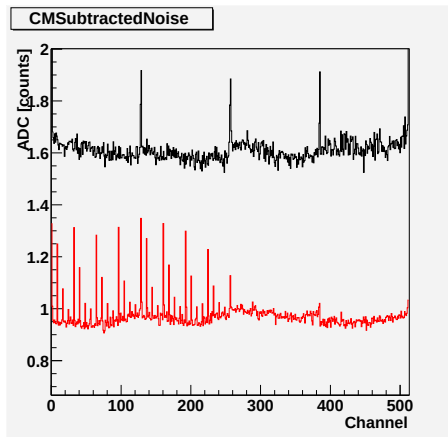


(j) Modul 5.3

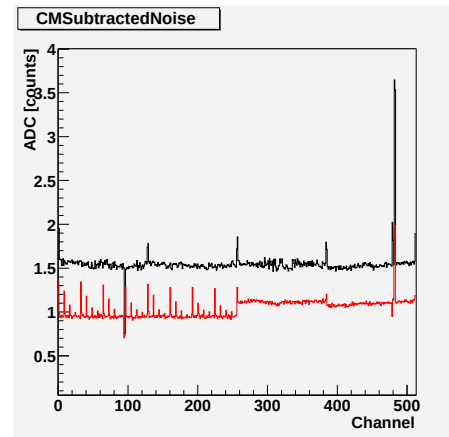


(k) Modul 5.4

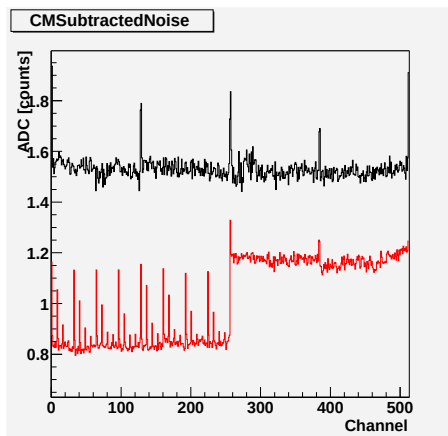
I.1.4 Ring 6



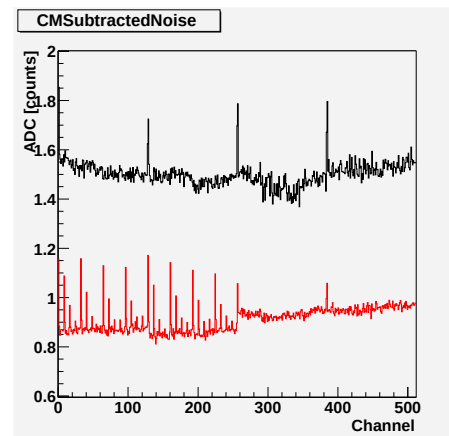
(l) Modul 6.1



(m) Modul 6.2

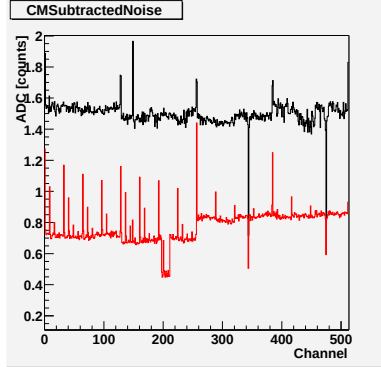


(n) Modul 6.3

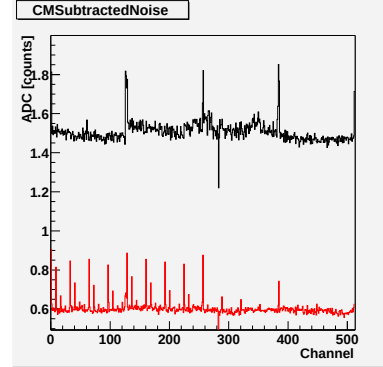


(o) Modul 6.4

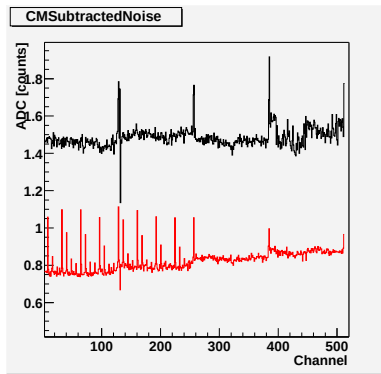
I.1.5 Ring 7



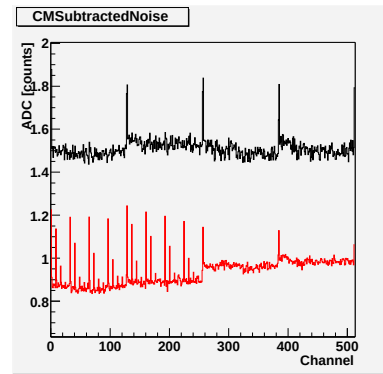
(p) Modul 7.1



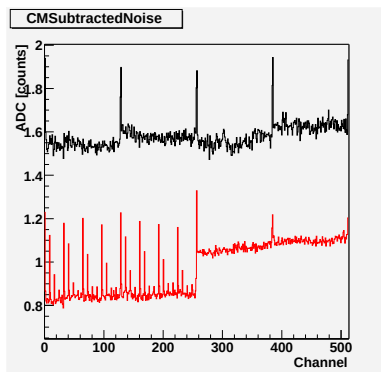
(q) Modul 7.2



(r) Modul 7.3



(s) Modul 7.4

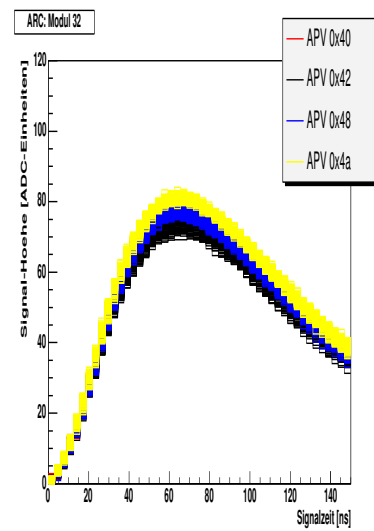
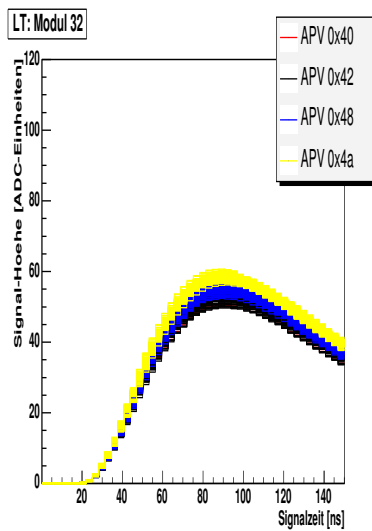
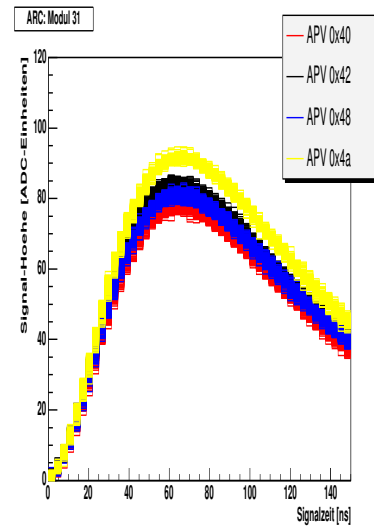
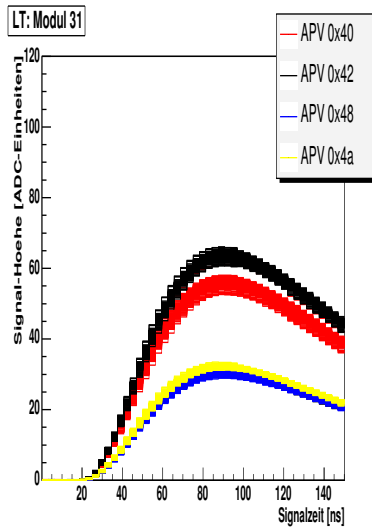


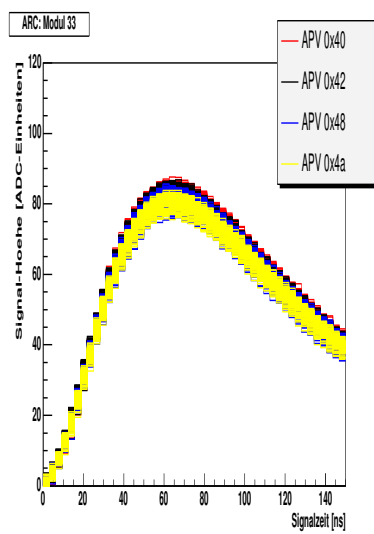
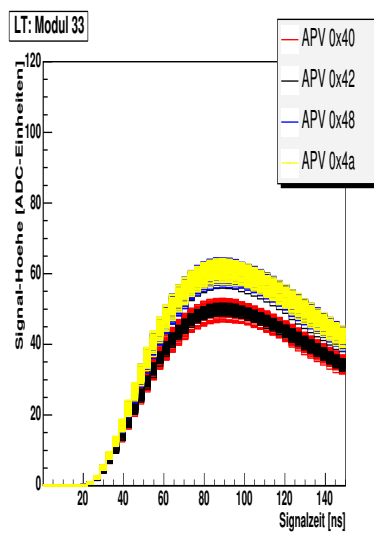
(t) Modul 7.5

I.2 Kalibrationspuls-Test

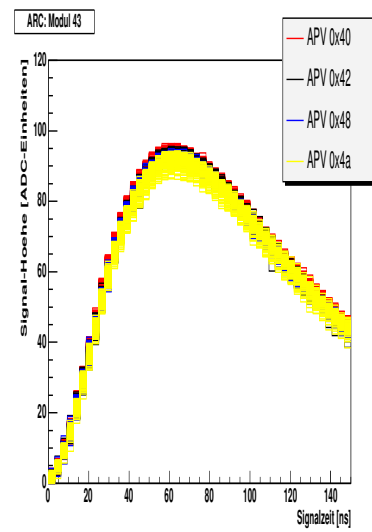
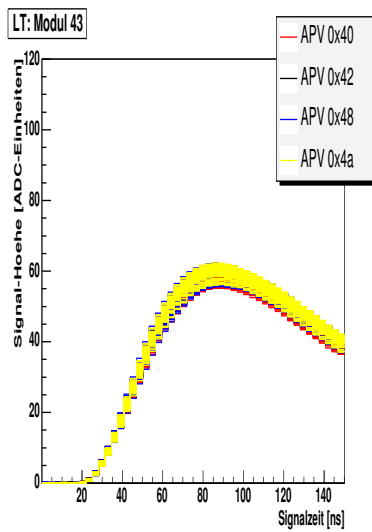
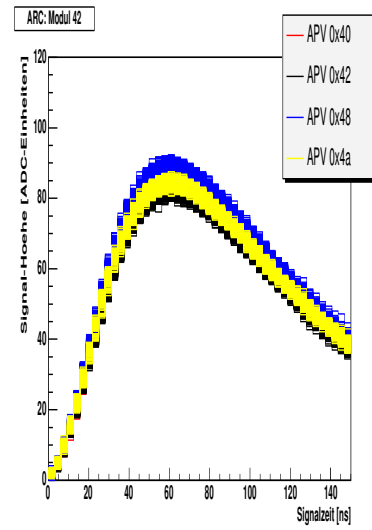
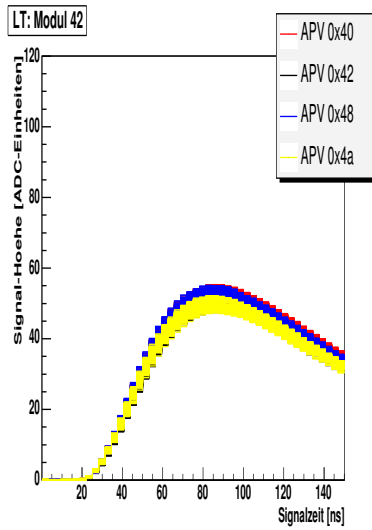
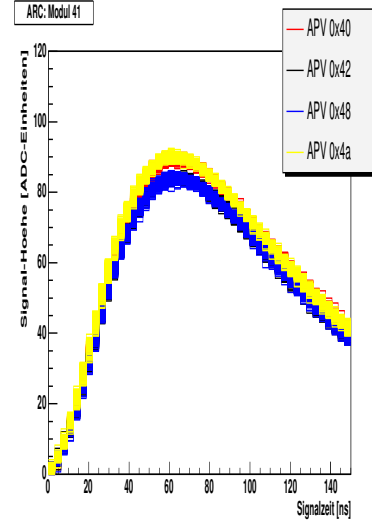
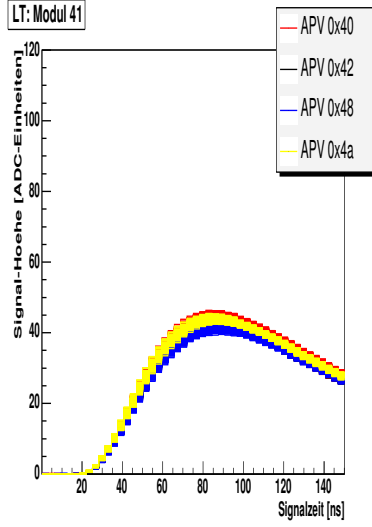
Auf der linken Seite sind die Ergebnisse des Langzeittests gezeigt. Die Ergebnisse des ARC-Tests sind rechts aufgetragen.

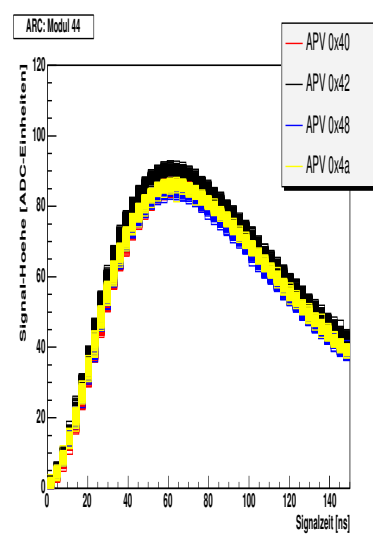
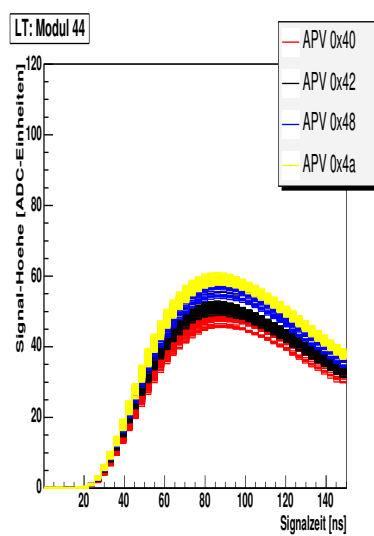
I.2.1 Ring 3



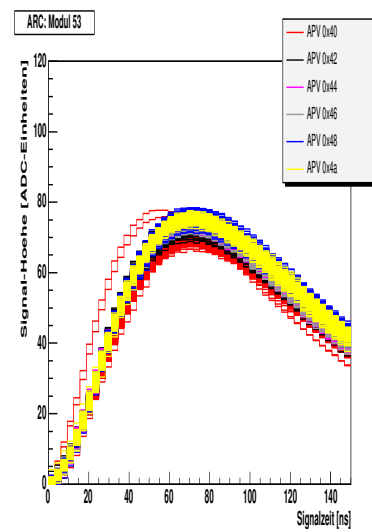
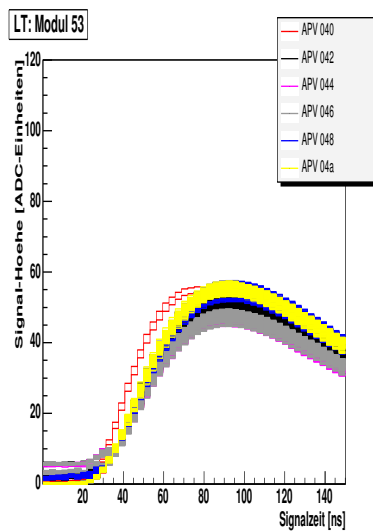
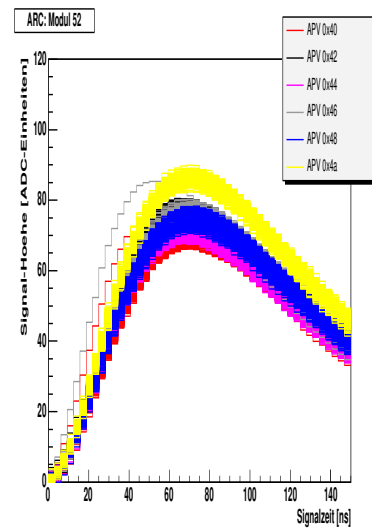
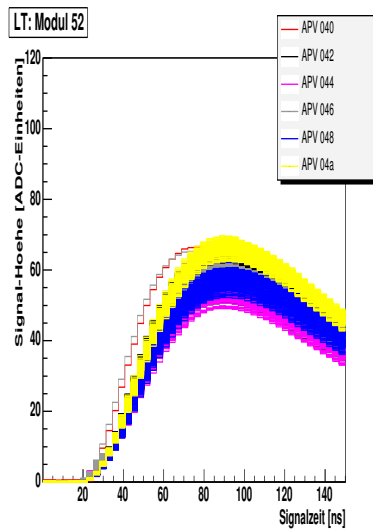
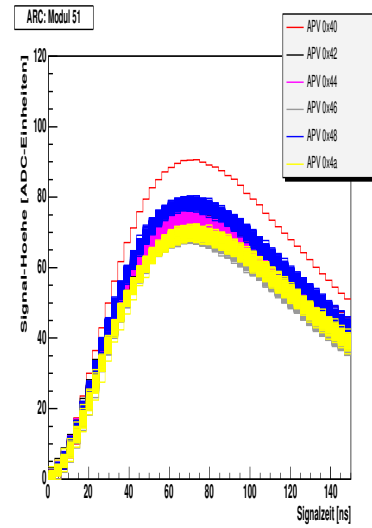
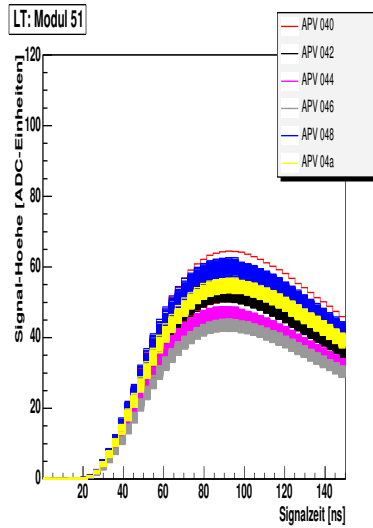


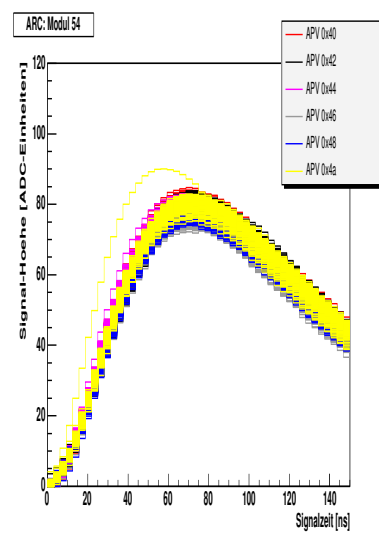
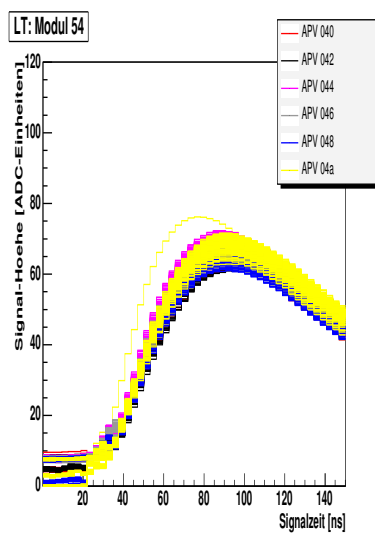
I.2.2 Ring 4



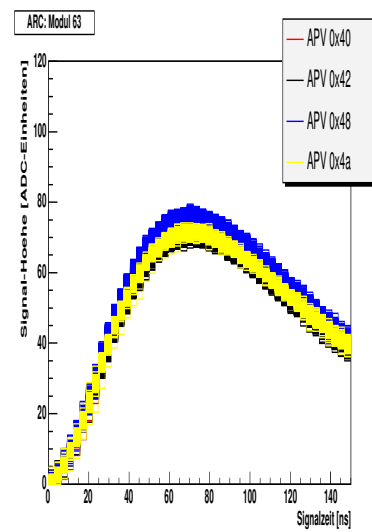
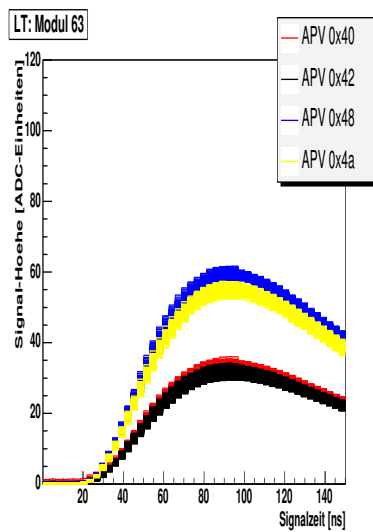
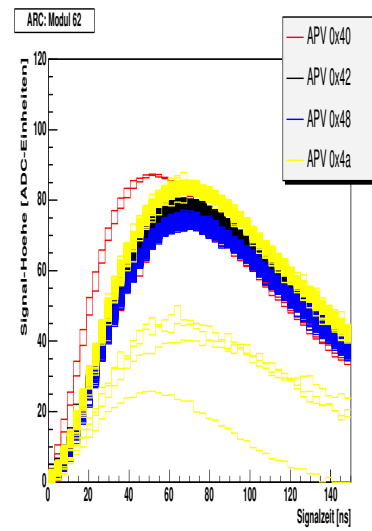
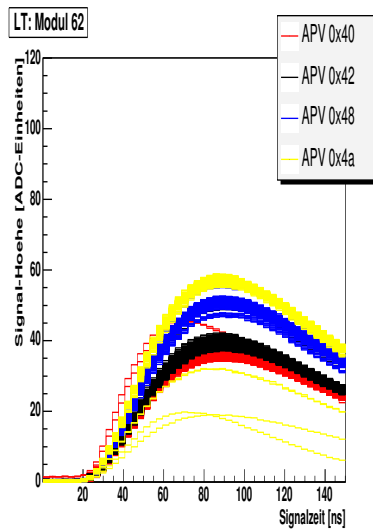
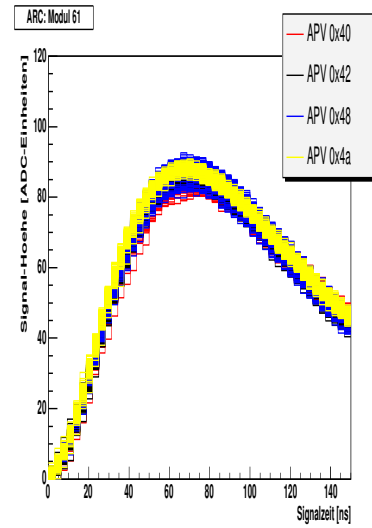
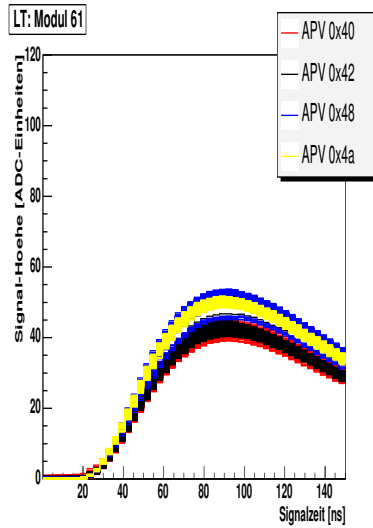


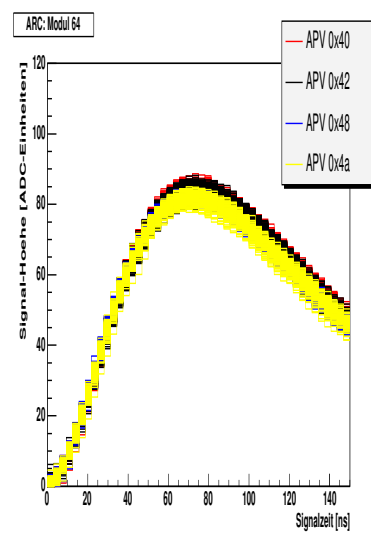
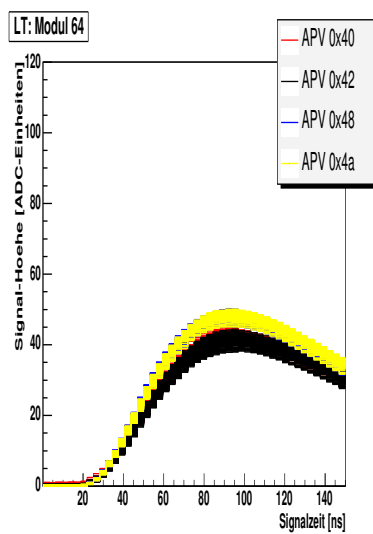
I.2.3 Ring 5



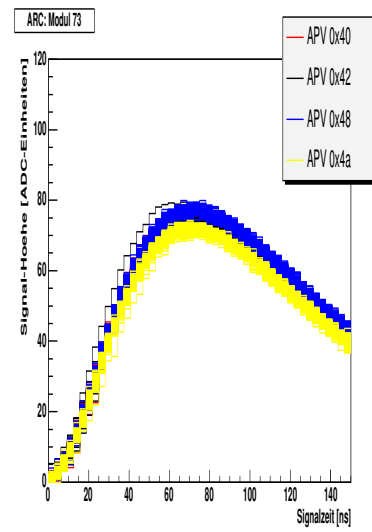
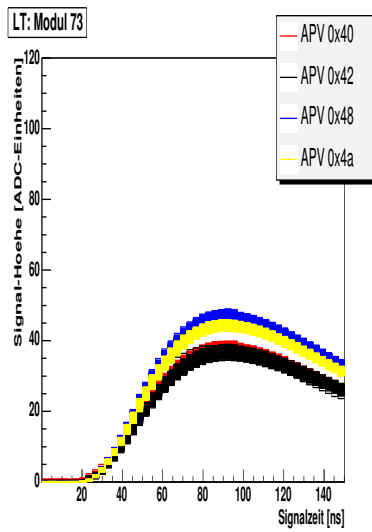
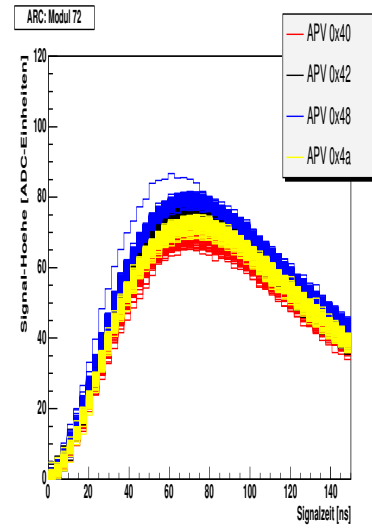
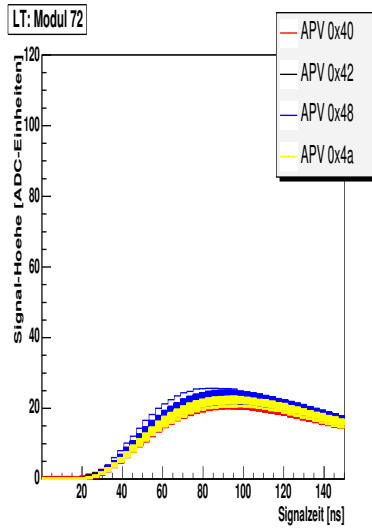
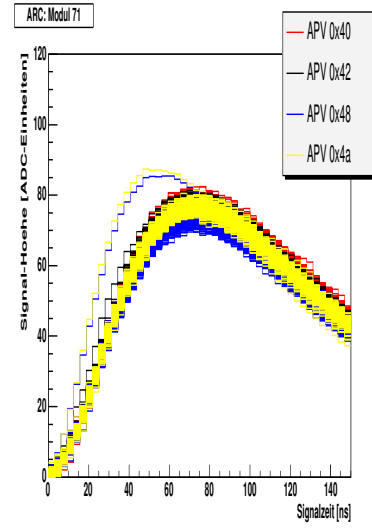
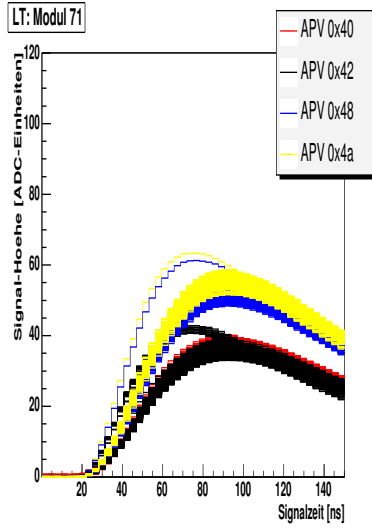


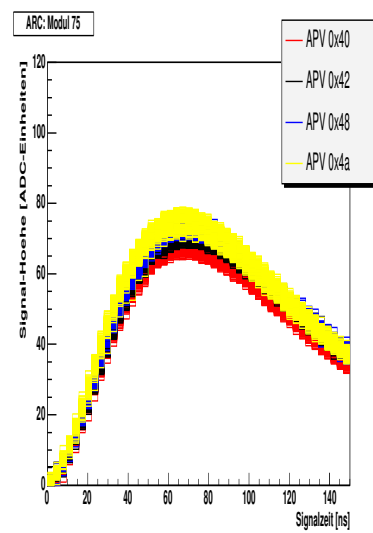
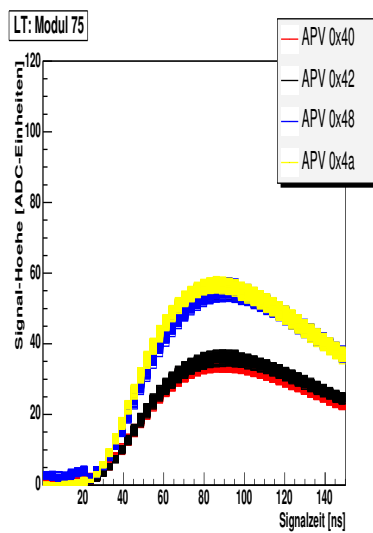
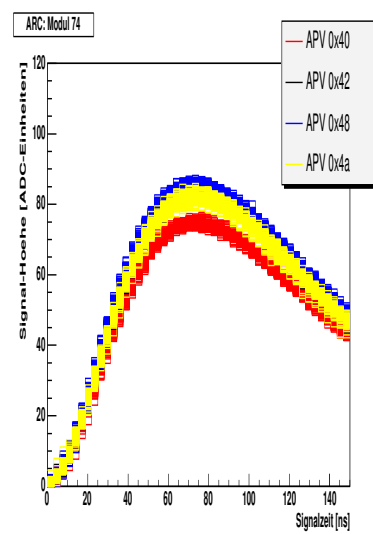
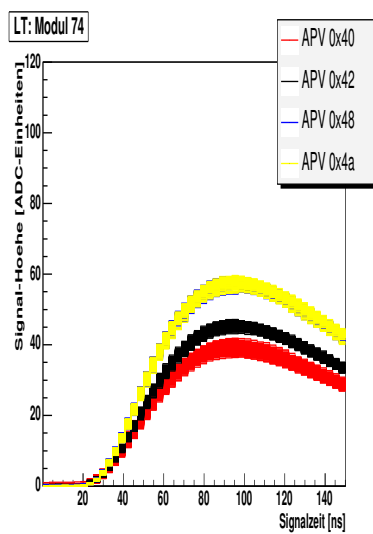
I.2.4 Ring 6





I.2.5 Ring 7





Abkürzungsverzeichnis

ADC Analogue Digital Converter

AOH Analog Opto Hybrid

APV Analogue Pipeline Voltage Mode

ARC APV Read Out Controller

CCU Central Control Unit

CCUM Central Control Unit Module

CMN Common Mode Noise

CMS Compact Muon Solenoid

DCU Detector Control Unit

DEPP Depletion Power

DOH Digital Opto Hybrid

FEC Front End Controller

FED Front End Driver

HV High Voltage

ICB Inter Connect Board

I²C Inter Integrated Circuit

ISO International Standardisation Organisation

LHC Large Hadron Collider

LV Low Voltage

K-MUX Karlsruhe Multiplexer

MS Multi Service

OEC Optical Electrical Converter

O-FEC Optical Front End Controller

O-FED Optical Front End Driver

PC Personal Computer

PIC Petal Integration Centre

PMC PCI Mezzanine Card

TEC Tracker End Cap

TIB Tracker Inner Barrel

TID Tracker Inner Disc

TOB Tracker Outer Barrel

TPLL Tracker Phase Locked Loop

TSC Trigger Sequencer Card

XML Extensible Markup Language

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematischer Aufbau des CMS-Experiments	2
1.2	Schematischer Aufbau des zentralen Spurdetektors des CMS-Experiments	3
1.3	Viertelschnitt durch den Tracker des CMS-Experiments	4
1.4	Schematischer Aufbau der Tracker-Endkappe	5
1.5	Prinzipieller Aufbau eines Rads der Tracker-Endkappe	6
2.1	Kristallstruktur des Siliziums	7
2.2	Das Bändermodell eines Halbleiters	9
2.3	Schematische Darstellung des p-n-Übergangs einer Halbleiterdiode	9
2.4	Schematische Darstellung einer in Sperrrichtung betriebenen Halbleiterdiode	10
2.5	Ladungsverteilung und Potentialverlauf einer in Sperrrichtung geschalteten Diode	11
2.6	Energieverlust von geladenen π -Mesonen in Silizium	12
2.7	Schematischer Aufbau eines Silizium-Streifendetektors	13
2.8	Silizium-Streifendetektor des CMS-Spurdetektors	15
2.9	Der Frontendhybrid eines Silizium-Streifendetektors	16
2.10	Der charakteristische Datensatz eines APV-Chips	17
3.1	Petal mit Cooling-Manifold	22
3.2	Kühlschlangenverlauf	23
3.3	CCU-Kontrollring	24
3.4	Aufbau des Tokenrings	25
3.5	Schematischer Aufbau der Petalkommunikation	27
4.1	Schematischer Aufbau des Integrationsteststands	30
4.2	Die verwendeten Patch-Panel	31
4.3	Die Assembly Software	33
4.4	Petal im Grill	34
4.5	AOH-Integration	36
4.6	Integrierter AOH und Faserführung	37
4.7	Aufbringung von Wärmeleitpaste auf ein Insert	38
4.8	Montagesequenz bei der Modulintegration	39
4.9	Integration der Silizium-Streifenmodule Ring 7	40
4.10	Integrationstest der Silizium-Streifenmodule	41

4.11	Das integrierte Petal	42
5.1	Schematischer Aufbau des Langzeitteststands	44
5.2	Photo des Aachener Langzeitteststands	45
5.3	Der beim Langzeittest verwendete Kühlschrank	46
5.4	Das elektrische Patch-Panel des Kühlschranks	47
5.5	Positionen der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensoren im Kühlschrank	48
5.6	Interlockmaske der Slow-Control	49
5.7	Die Interlockbox	50
5.8	Kontrollmaske der Long-Term-Software	51
5.9	Modulmaske der Long-Term-Software	52
6.1	Wahl des Arbeitsbereichs eines AOH-Lasers	57
6.2	Rauschen eines Silizium-Streifenmoduls mit markierten Fehlern.	58
6.3	Kalibrationprofil-Test	58
6.4	Common-Mode-korrigiertes Rauschen zweier Module	62
6.5	Kalibrationstest-Pulse Modul 6.2	63
6.6	Kalibrationstest-Pulse zweier APVs	63
6.7	DCU-Messwerte während des Langzeittests	64
B.1	Logistik der Tracker-Endkappen	70
D.1	Schematischer Aufbau der Trockenluftversorgung	74
G.1	Aufbau einer von der Long-Term-Software erzeugten ROOT-Datei	79

Literaturverzeichnis

- [1] CMS-Outreach, CERN: *Drawing of the Complete CMS Detector*
<http://cmsdoc.cern.ch/cms/outreach/html/CMSdocuments/DetectorDrawings/DetectorDrawings.html>.
- [2] M. Pöttgens: *Produktion von CMS-Tracker-Modulen am CERN*
Vortrag auf dem Seminar des III. Physikalischen Institutes in Bad Honnef, September 2002.
- [3] B. Hegner: *Integration von Si-Streifenmodulen in den Vorwärtsbereich des zentralen CMS-Spurdetektors*
Diplomarbeit in Physik, III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen, Februar 2004.
- [4] K.-H. Dreger, M. Wlochal: *Technische Zeichnungen und CAD-Zeichnungen*
I. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen.
- [5] A. Floßdorf: *Aufbau eines Teststandes zur Integration von Silizium-Streifendetektoren in den Vorwärtsbereich des CMS-Experimentes*
Diplomarbeit in Physik, III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen, September 2004.
- [6] U. Finckh, E. Leitner: *Physik-Web für die 10. Klasse*
http://www.physik.uni-muenchen.de/leifiphysik/web_ph10/umwelt-technik/15si_kristall/si_kristall02.gif
- [7] H. Ibach And H. Lueth: *Festkörperphysik, Einführung in die Grundlagen.*
Springer-Verlag, 1995.
- [8] G. Lutz: *Semiconductor radiation Detectors, Device Physics*
Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999.
- [9] Th. Hermanns: *Aufbau eines Systems für Kühlttests zur Qualitätsüberwachung von CMS Silizium-Modulen.*
Diplomarbeit in Physik, III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen, Januar 2004.

- [10] L. Jones: *APV25-S1, User Guide Verion 2.2*, September 2001
http://hep.ucsb.edu/people/affolder/User_Guide_2.2.pdf.
- [11] P. Murray: *APVMUX user guide version 1.0*, Mai 2000
http://www.te.rl.ac.uk/me/projects/High_Energy_Physics/CMS/APVMUXPLL/pdf/UserGuide.pdf.
- [12] A. Marchioro, P. Moreira, P. Placidi: *CMS Tracker PLL Reference Manual*, Version 2.0, Juli 2000
<http://cmstrackercontrol.web.cern.ch/cmstrackercontrol/documents/PauloMoreira/TrackerPLLManual.pdf>.
- [13] G. Magazzu, A. Marchioro, P. Moreira: *DCU2 User Guide*, Oktober 2001
http://cmstrackercontrol.web.cern.ch/CMSTrackerControl/documents/Magazzu/DCU2_User_Manual%20v2.12.pdf.
- [14] D. Oellers: *Kühlung des CMS Spurdetektors*
Diplomarbeit in Physik, I. Physikalische Institut B, RWTH Aachen, 2005.
- [15] CERN: *CMS Tracker Database Browser*
<http://c.home.cern.ch/c/cmstrkdb/public/html/>.
- [16] K. Gill, G. Dewhirst, R. Grabit, A.M. Sandvik, J. Troska, F. Vasey: *80Mbit/s Digital Optical Links for Control, Timing and Trigger of the CMS Tracker*
http://cms-tk-opto.web.cern.ch/cms-tk-opto/control/publications/pdf/lecc02_gill_sandvik.pdf.
- [17] A. Marchioro, C. Ljuslin, C. Pillard: *CCU25 Communication and Control Unit ASIC for Embedded Slow Control*, Februar 2002
<http://cmstrackercontrol.web.cern.ch/cmstrackercontrol/documents/Sandro/CCU25Specs%20v2-1.pdf>.
- [18] Philips Semiconductors: *The I²C-bus Specification.*, Version 2.1, January 2000
http://www.semiconductors.philips.com/acrobat_download/literature/9398/39340011.pdf.
- [19] CERN: *CMS Tracker Optical Readout Link Specification, Part 2: Analogue opto-hybrid*
https://edms.cern.ch/file/312573/3.2/analogue_optohybrid3.4.pdf.
- [20] B. Trocme: *Software Documentation*
Institut de Physique Nucléaire de Lyon
<http://lyoinfo.in2p3.fr/cms/cmstraces/PetalAssembly/Software/software.html>.

- [21] M. Axer: *Development of a Test System for the Quality Assurance of Silicon Microstrip Detectors for the Inner Tracking System of the CMS Experiment*
Dissertation in Physik, III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen, Dezember 2003.
- [22] F. Beiel: *DEPP, Version 1.0, Dezember 2002*
III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen.
- [23] F. Beiel: *Cooli – Cold Box Control Serial Interface*, Version 2.0, Juli 2003
III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen.
- [24] Maxim Integrated Products Inc.: *DS18B20 Programmable Resolution 1 – Write Digital Thermometer*
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
- [25] Sensirion: *SHT1x/SHT7x Humidity & Temperature Sensor*
http://www.sensirion.com/en/pdf/Datasheet_SHT1x_SHT7x.pdf.
- [26] Bühler: *l- /Wasserkhler, Baureihe BWT*, Version Oktober 2003
<http://www.buehler-ratingen.com/deutsch/pdf/207/dd340001m.pdf>.
- [27] R. Brun, F. Rademakers, S. Panacek, I. Antcheva, D. Buskulic: *ROOT – An Object-Oriented Data Analzsis Framework, Juli 2004*
ftp://root.cern.ch/root/doc/Users_Guide_4_08.pdf.
- [28] L. Mirabito: *Tracker Data Acquisition User Gude, August 2003*
http://cmsdoc.cern.ch/cms/cmt/System_aspects/Daq/tkdaq.pdf.
- [29] M. Meschini, C. Marchettini, A. Affolder, L. Demaria T. Franke, M. Poettgens, V. Zhukov: *Procedures For CMS Silicon Tracker Module Testing Using ARC Systems*
CMS Internal Note-2004/018.
- [30] V. Zhukov: *Qualification of Tracker Substructures(Petals)*
<http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~zhukov/Cms/petalaccept.ps>.
- [31] L. Neukermans: *The Defect Analyzer package: Module and Structure Tests*
<http://w3.iihe.ac.be/cms/1%20Detector%20Construction/2%20Petal%20Construction/data/DefAna/DefAna.html>.
- [32] T. Hermanns, F. Franke: *DCU Calibration of the Modules for the Test Beam Petal.*
<http://www.physik.rwth-aachen.de/group/IIIphys/CMS/tracker/results/DCU-Calibration.pdf>.

- [33] Blitz: *Druckluftaufbereitung*, Version November 2003
http://blitz.rotarylift.com/pdf/Druckluftaufbereitung_d.pdf.
- [34] W. Beaumont, L. Neukermans, J. Fernandez, V. Zhukov: *Defect analysis of the CMS silicon strip detectors*
CMS Internal Note, Version vom 8.Oktober 2004.

Danksagungen

- Bei Herrn Prof. Dr. J. Mnich und Herrn Prof. Dr. G. Flügge sowie Herrn Prof. Dr. A. Stahl möchte ich mich für das letzte Jahr am III. Physikalischen Institut bedanken. Ich habe nicht nur eine Menge gelernt, sondern auch die tolle Arbeitsatmosphäre genossen.
- Herrn Dr. Oliver Pooth danke ich für die Unterstützung meiner Arbeit, nicht nur von fachlicher Seite, sondern auch durch seine stets freundliche Art.
- Herrn Franz Beissel danke ich für seine Unterstützung bei allen auftretenden technischen Problemen und seine geduldigen Erklärungen. Ohne ihn wäre so manches Leck am Kühlschrank unentdeckt geblieben. Genauso gilt mein Dank der elektronischen Werkstatt des III. Physikalischen Instituts B, die auch eilige Wünsche ohne zu Zögern umsetzten.
- Ich Danke der mechanischen Werkstatt des III. Physikalischen Institutes B, die meine Wünsche stets schnell umsetzten und oft verbesserten. Herrn Carsten Gillissen danke ich für seine Hilfe bei der Petalintegration und für die Entwicklung sehr nützlicher Werkzeuge, die die Modulmontage stark erleichtern.
- Bei Frau Dr. Katja Klein und Herrn Richard Brauer möchte ich mich für viele Hilfen rund um das Thema Petal bedanken, aber auch für die stets unkomplizierte Möglichkeit unser Setup mit ihren Komponenten zu testen.
- Herrn Benedikt Hegner und Herrn Alexander Floßdorf danke ich für die Hilfe bei meiner Arbeit, die auch über die Grenzen Aachens hinaus vorbildlich war. Die Zusammenarbeit mit Euch war spitze.
- Herrn Dirk Heydhausen und Herrn Werner Schraml danke ich für ihr Mitarbeit beim Aufbau des Langzeitteststands. Ohne Euren Einsatz wäre der erste Langzeittest nicht möglich gewesen.
- Herrn Dr. Andreas Nowack danke ich für sein immer freundlichen Art, mir an meinem Rechner auftretende Probleme zu erklären und diese zu lösen. Ebenfalls bedanke ich mich für die Hilfe bei dieser Diplomarbeit.
- Bei Herrn Torsten Franke, Herrn Manuel Giffels, Herrn Thomas Hermanns, Herrn Dr. Thomas Kreß und Herrn Michael Pöttgens bedanke ich mich für

ihr immer offenes Ohr, bei Fragen rund Silizium-Module und bei Computerfragen.

- Frau Martina Davids danke ich für die Korrektur meiner Arbeit.
- Bei den hier nicht namentlich erwähnten Kollegen möchte ich mich für die tolle Arbeitsatmosphäre bedanken.
- Natürlich gebührt mein Dank auch meiner Freundin. Mara ohne dich wäre ich nicht so weit gekommen.
- Der größte Dank gilt allerdings meinen Eltern, die mich während meines gesamten Studiums unterstützt haben und immer ein offenes Ohr für mich hatten.

Index

Übergang

p-n-, 9

ADC-Einheit, 58, 63, 64

Akzeptorniveau, 8

ALICE, 2

Annealing, 14

Reverse-, 14

AOH, 26, 28, 30, 32, 40, 52

AOH-

Bias, 58

Faser, 27, 30, 32, 35, 52

Gain, 58

Laser, 26, 63

APV, 15, 16, 58–60

APV-MUX, 15, 18

ARC-Test, 33, 37, 40, 61, 63, 64

ATLAS, 2

Bandlücke, 8

Benotung, 61

Bond, 14, 15

Brücke, 38

CCU, 24, 27, 28, 30, 32, 35, 41

CCUM, 24

Clip, 36

CMN, 58, 59, 63

CMS, 2

Cooling-Manifold, 21

Datenbank, 23, 32, 35, 40, 61, 62

DCU, 15, 18, 54, 61, 64

Defect-Analyzer, 62, 63, 65

Defektelektron, 8

DOH, 23

Donatorniveau, 8

dotiert

n-, 8, 13

p-, 8, 13

Dummy-Hybrid, 37, 41, 42

Elektron–Loch–Paar, 13

FEC, 24, 29, 41, 42, 45

FED, 45, 59

Frontend-Hybrid, 15, 21

Grill, 34

Halbleiter, 7

Halbleiterdiode, 9

Header, 39

Higgs-Boson, 1

HV-Test, 30

I²C-

Kommunikation, 35, 39, 53, 61

PMC-Karte, 31

Protokoll, 25, 27

ICB, 23, 27, 30, 35, 41

Insert, 22, 32, 37, 61

Interlock-

bedingung, 51

box, 51

Inverter, 17

K-MUX, 31, 35, 45, 52, 79

Kühlschrank, 46, 47, 61, 65

Kabel

Long-Ribbon-, 31

Multi-Service-, 29, 46, 48

Short-Ribbon-, 30, 32, 35, 41, 52

Kalibrationspuls, 17, 60, 63

Kontrollring, siehe Tokenring, 24

Langzeittest, 45, 52, 65

Leckstrom, 13, 19, 39, 61

Leitungsband, 8

- LHC, 1
- LHCb, 2
- Matrixcode, 23, 32, 34, 35, 52
- O-FEC, 27
- O-FED, 28, 31
- OEC, 28, 31
- Open, 16, 59, 60, 63
- optischer Kontakt, 36, 59, 63
- Optoscan, 58
- Optpscan, 63
- Patch-Panel-
 - elektrisch, 30, 48
 - optisch, 30
- Pedestal, 57, 59, 63
 - Run, 59
- Petal, 21, 48, 52
 - Back-, 4–6, 22, 24, 25
 - Front-, 4–6, 22, 24, 25, 40, 62
- Petalintegration, 29, 30, 40
- PIC, 29, 32
- Pinhole, 16, 60
- Pitch-Adapter, 15, 16
- Position
 - AOH-, 35
 - Modul-, 26
- Rad, 4, 6, 22
- Rauschen, 57, 59, 63
- Ring, 4, 29
- Short, 16, 59, 60, 64
- Silizium
 - Modul, 18
 - Streifendetektoren, 7
 - Streifenmodul, 22
- Silizium-
 - Detektor, 3
 - Streifen, 59, 60
 - Streifenmodul, 25, 33, 37, 54, 59, 61, 63, 64
- Silizium-Streifendetektor, 13, 15
- Simulationsmodus, 32, 41
- Slow-Control, 47, 50, 53
- Software
 - Assembly-, 31, 35, 40, 42
 - Long-Term-, 45
 - Longterm-, 52
- Sperrrichtung, 13
- sperrrichtung, 10
- Strahlenbelastung, 14
- Strahlenschäden, 4
- Strichcode, 34
- Szenario, 53, 81
- TEC, 3, 4, 62
- Teststand
 - Integrations-, 29
 - Langzeit-, 45, 62
- TIB, 3, 4
- Tick-Mark, 17, 39, 58, 63
- TID, 3, 4
- TimeTune, 59, 63
- TOB, 3, 4
- Tokenring, 24, 27, 29, 35, 41, 65
- TPLL, 15, 18, 59
- Tracker, 3
- Tracker-Endkappe, siehe TEC, 6, 21
- TSC, 29, 45, 59
- Typinversion, 14
- Valenzband, 8
- Valenzelektron, 7
- Verarmungsspannung, 13, 28
- Verarmungszone, 9
- XML-Datei, 32, 35, 40, 52