

Untersuchung von korreliertem Rauschen in 2S-Siliziumstreifenmodulen für das CMS Phase-2 Tracker Upgrade

Bachelorarbeit in Physik

von

Jan Terörde

vorgelegt der

Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der
RWTH Aachen

im

August 2024

angefertigt im

I. Physikalischen Institut B

bei

Prüfer: Prof. Dr. Lutz Feld

Zweitprüfer: Prof. Dr. Oliver Pooth

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Der LHC und das CMS Experiment	2
2.1 Der Large Hadron Collider	2
2.2 Das CMS-Experiment	3
2.2.1 Das Phase-2 Tracker Upgrade	5
3 Das 2S-Modul	7
3.1 Verschiedene Designs des Moduls	9
4 Theorie von Rauschmessungen in binären Auslesesystemen	11
4.1 Entstehung von Rauschen in ladungssensitiven Auslesesystemen	11
4.2 Messung und Charakterisierung des Rauschens	12
4.3 Simulation von Rauschdaten	14
4.4 Erkennung und Messung von korreliertem Rauschen	15
4.4.1 Hitmaps und Histogramme	15
4.4.2 Γ -Wert	17
4.4.3 Korrelationsmatrizen	19
5 Messungen in der Einzelmodul Testbox	22
5.1 Verwendeter Aufbau	22
5.1.1 Durchführung und Ablauf einer Messung	22
5.2 Regular Design SEH	24
5.3 Split-Plane Design SEH	30
5.4 Prototypmodul	33
5.5 Vergleich der verschiedenen Designs	37
6 Messung in der Klimakammer	38
7 Messungen auf einer TEDD ähnlichen Kühlstruktur	40
7.1 Setup	40
7.2 Messung mit einem Modul	43
7.3 Messung mit zwei Modulen	45
7.4 Vergleich zwischen den Messungen	47
8 Fazit und Ausblick	48
Quellenverzeichnis	50

1 Einleitung

Das Standard Modell (SM) ist die theoretische Grundlage der Teilchen- bzw. Hochenergiephysik, die einen der wichtigsten Zweige der modernen physikalischen Forschung darstellt. Diese Theorie war in der Lage, neue Elementarteilchen und deren Eigenschaften mit hoher Präzision vorherzusagen. So konnte beispielsweise im Jahr 2012 durch die Daten des CMS und des ATLAS Experiments das vorhergesagte Higgs Boson am LHC entdeckt werden [1],[2]. Dies ist einer der größten Erfolge des LHC Programms. Leistungsfähige Teilchenbeschleuniger wie der LHC spielen in der Teilchenphysik eine wichtige Rolle, da sie es ermöglichen Kollisionen mit hohen Energien in hoher Rate zu erzeugen und zu detektieren, um die Eigenschaften der Teilchen, die bei diesen entstehen, zu vermessen. Um besonders seltene Prozesse genauer vermessen zu können, werden sehr große Datenmengen benötigt. Um diese Datenmengen erreichen zu können, wird der LHC voraussichtlich 2029 verbessert. Das sogenannte High Luminosity (HL-LHC) Upgrade soll die instantane Luminosität von $2 \cdot 10^{-34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ auf einen Maximalwert von $5 - 7.5 \cdot 10^{-34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ erhöhen [3]. Dies würde es ermöglichen, die integrierte Luminosität von voraussichtlich 350fb^{-1} nach dem Ende von Run 3 auf bis zu $3000-4000 \text{fb}^{-1}$, zu erhöhen. Im Zuge des HL-LHC Upgrades wird unter anderem auch der CMS Detektor verbessert. Beispielsweise wird der Spurdetektor, auch Tracker genannt, vollständig ausgetauscht. Dafür wurde ein neuer Typ von Siliziumstreifenmodulen entwickelt. Das sogenannte 2S Modul besteht aus zwei Streifensensoren übereinander, deren Daten noch im Modul korreliert werden, um Informationen über den Transversalimpuls p_T der detektierten Teilchen zu gewinnen. Diese Informationen können im Level-1 Trigger verwendet werden, um besser entscheiden zu können, bei welchen Kollisionen interessante Prozesse aufgetreten sind. In Aachen wird ein Teil dieser 2S Module gebaut werden und es wurden bereits mehrere Prototypen und Vorserienmodule produziert. Um mögliche Probleme mit dem Design oder der Produktion festzustellen, ist es wichtig, die Eigenschaften dieser Module zu untersuchen. Eine dieser Eigenschaften ist das Rauschen. Dieses tritt in allen elektrischen Schaltungen auf, und es muss so weit wie möglich reduziert werden, da es sonst die Messungen im Detektor verfälschen könnte. Ein Spezialfall dieses Rauschens ist das korrelierte Rauschen. Dabei werden mehrere Streifen gleich beeinflusst. Da die p_T -Messung Daten verschiedener Streifen korreliert, ist es wichtig zu wissen, ob und wie stark korreliertes Rauschen in den Modulen auftritt, da sonst die Messeffizienz stark reduziert werden könnte. Im Zuge dieser Arbeit wird daher das Rauschen in verschiedenen Modulkonfigurationen auf Korrelationen untersucht.

In 2 wird der LHC und das CMS Experiment beschrieben, sowie das geplante HL-LHC Upgrade vorgestellt. 3 stellt das Konzept des 2S-Moduls und verschiedene Modulkonfigurationen vor. In 4 werden die theoretischen Grundlagen zur Entstehung von Rauschen in den Modulen beschrieben und die verwendeten Auswertungs- und Messmethoden erklärt. In 5 werden verschiedene Modulkonfigurationen in einer Aluminiumkiste vermessen und deren Rauschverhalten verglichen. In 6 wird die Temperaturabhängigkeit des korrelierten und des gesamten Rauschens untersucht. In 7 wird der Einfluss einer Kühlstruktur und eines benachbarten Moduls vermessen, bevor die Ergebnisse in 8 zusammengefasst werden.

2 Der LHC und das CMS Experiment

Der LHC ist ein etwa kreisförmiger Teilchenbeschleuniger der Europäischen Organisation für Kernforschung oder Conseil européen pour la recherche nucléaire (CERN). Er ist der größte und leistungsfähigste Beschleuniger der Welt und ermöglicht es, die Eigenschaften der kleinsten Bausteine der Materie sehr präzise zu vermessen sowie die Entdeckung neuer Teilchen wie dem Higgs Boson im Jahr 2012. Es gibt am LHC mehrere Experimente, welche die Kollisionen aufzeichnen, darunter ATLAS und CMS, die maßgeblich an der Entdeckung des Higgs Bosons beteiligt waren. Im folgenden Abschnitt wird der Aufbau und die Funktionsweise des LHC und des CMS-Experiments erläutert und der Plan für Verbesserungen an beiden im Zuge des High Luminosity Programms vorgestellt.

2.1 Der Large Hadron Collider

Der 2008 offiziell in Betrieb genommene LHC befindet sich in einem ca. 26.7 km langen, etwa kreisförmigen Tunnel, welcher ca. 50 bis 175 m unter der Erde liegt [4]. Das CERN-Areal, unter welchem sich Teile des LHC befinden, ist in der Nähe von Genf in der französisch-schweizer Grenzregion. Der LHC kann sowohl Protonen als auch schwere Ionen beschleunigen [5], wobei sich im Folgenden auf Protonen konzentriert wird. Da die Protonen eine gewisse Mindestgeschwindigkeit haben müssen, um in den LHC eingespeist werden zu können, gibt es zunächst eine Kaskade von Vorbeschleunigern wie dem Linearbeschleuniger LINAC 4 oder dem Kreisbeschleuniger PS (Proton Synchrotron). In Abb. 1 ist der LHC mit seinen Vorbeschleunigern sowie deren Verbindungen untereinander schematisch dargestellt.

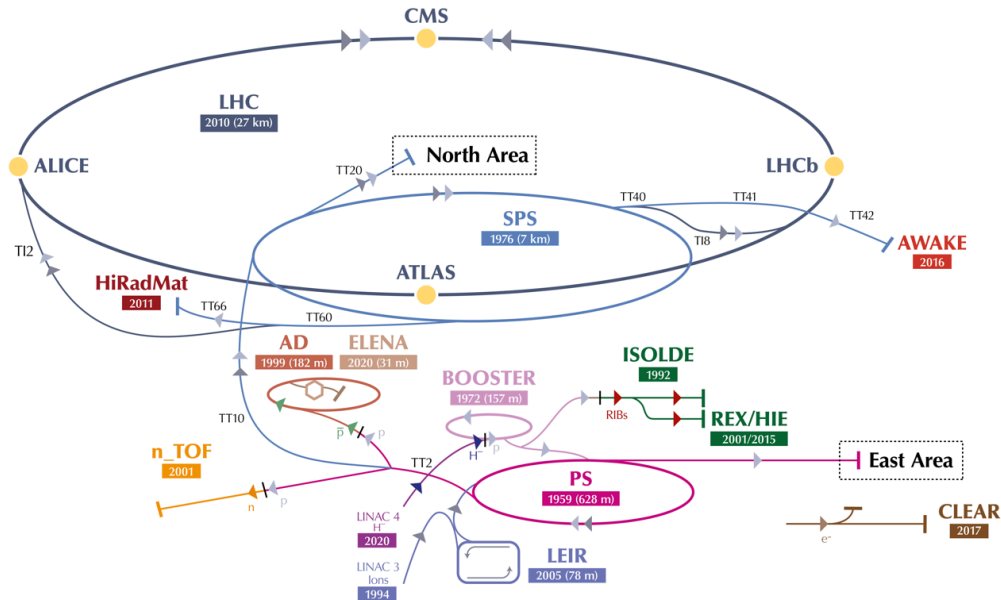


Abbildung 1: Schematische Darstellung des LHC mit seinen Vorbeschleunigern. [6]

Wenn die Vorbeschleuniger vollständig durchlaufen wurden, werden die Protonenpakete, auch Bunches genannt, welche aus ca. 10^{11} Protonen bestehen, in zwei nebeneinander liegende Vakuumröhren eingespeist, die dann in entgegengesetzte Richtungen durchlaufen werden. Zu diesem Zeitpunkt haben die Protonen eine Energie von etwa 450 GeV und eine Geschwindigkeit von über 99% der Vakuumlichtgeschwindigkeit [4].

Die Bunches werden durch sogenannte Kavitäten beschleunigt. Diese erzeugen ein ca. $5 \cdot 10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ starkes elektrisches Wechselfeld, welches mit etwa 400 Hz oszilliert [7]. Die Bunches werden dann durch supraleitende Niob-Titan Dipolmagnete, welche bei einer Betriebstemperatur von 1.9 K ein bis zu 8.3 T starkes Magnetfeld erzeugen, auf der Bahn gehalten [4]. Zur Fokussierung werden Quadrupolmagnete eingesetzt, um der elektrischen Abstoßung der Protonen entgegenzuwirken und so die Anzahl der Kollisionen zu erhöhen. Kollisionen werden erreicht, indem sich die beiden Strahlrohre an vier Punkten kreuzen. Bei jedem Aufeinandertreffen der Bunches, was mit einer Frequenz von 40 MHz geschieht [4], treten durchschnittlich 40 inelastische Kollisionen zwischen den Protonen auf [8]. Diese sind von besonderem Interesse, da dort durch die Äquivalenz von Energie und Masse aus der hohen Energie der Protonen bei der Kollision neue Teilchen entstehen können. Um deren Eigenschaften zu vermessen, sind an diesen Kollisionspunkten vier große Detektoren positioniert: Die beiden Allzweckdetektoren ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) [9] und CMS (Compact Muon Solenoid) [10], ALICE (A Large Ion Collider Experiment) [11], welcher auf die Untersuchung von Kollisionen von Blei Ionen spezialisiert ist und LHCb (LHC beauty) [12], welcher besonders auf die Vermessung von Prozessen, in denen b Quarks involviert sind, abgestimmt ist. Der Betrieb des LHCs und seiner Experimente findet während der sogenannten Runs statt, die durch längere Pausen für Wartungs- und Verbesserungsarbeiten, die sogenannten Long Shutdowns (LS), unterbrochen werden. So wurde beispielsweise die Schwerpunktsenergie $\sqrt{s}$, welche die Energie, die für die Erzeugung neuer Teilchen zur Verfügung steht, beschreibt, von 7 TeV in Run 1 (2010-2012) über 13 TeV in Run 2 auf 13.6 TeV in Run 3 erhöht, womit der LHC beinahe den vom Design her angestrebten Wert von 14 TeV erreicht [13]. Außerdem wurde auch die instantane Luminosität während der LS von $7.7 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ in Run 1 auf $2 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ in Run 2 erhöht, wodurch der Designwert von $1 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ sogar übertroffen wurde [3]. Da viele der Theorien, welche das Standardmodell erweitern oder darüber hinaus gehen, sehr kleine Abweichungen vom SM in der Größenordnung von wenigen Prozent vorhersagen, werden deutlich mehr Daten benötigt, um diese bestätigen oder verwerfen zu können. Dafür ist geplant, dass der LHC während des LS 3, welcher im Winter 2025 beginnen und 2029 enden soll, zum High Luminosity LHC (HL-LHC) verbessert wird. Es wird erwartet, dass dieser eine instantane Luminosität von $5 - 7.5 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ erreichen wird. Dies entspricht einer erwarteten integrierten Luminosität von $3000 - 4000 \text{ fb}^{-1}$ bis zum Ende seiner Lebenszeit im Jahr 2041 [14]. Um dies zu ermöglichen, wird eine Vielzahl von Verbesserungen unternommen, darunter eine verbesserte Fokussierung des Strahls, sowie eine erhöhte Anzahl von Protonen pro Bunch. So sollen Kollisionsraten von 140 bis 200 Kollisionen pro Aufeinandertreffen von Bunches erreicht werden.

2.2 Das CMS-Experiment

Der CMS-Detektor befindet sich an einem der Kollisionspunkte am LHC etwa 100 m unter der Erde in der Nähe des französischen Dorfes Cessy. Der zylinderförmige Detektor hat mit Stützstrukturen, Kühlleitungen und elektronischen Systemen eine Gesamtlänge von etwa 28.7 m und einen Radius von etwa 7.5 m. Das Gesamtgewicht beträgt dabei etwa 14000 t. Die CMS-Gruppe nutzt bei der Auslese des Detektors ein rechtshändiges Koordinatensystem, bei dem die z-Achse entlang des Strahlrohres verläuft, während die y-Achse nach oben und die x-Achse auf den Mittelpunkt des LHC zeigt. Um Positionen im Detektor anzugeben wird dann der Winkel Φ , welcher von der x-Achse in der x-y-Ebene gemessen wird, und die Pseudorapidität $\eta = -\ln\left(\tan\left(\frac{\Theta}{2}\right)\right)$ verwendet, wobei Θ

der Winkel zwischen dem Positionsvektor $\vec{r}$ und der z-Achse ist [10]. Da der CMS-Detektor als Allzweckdetektor viele verschiedene Teilchen präzise vermessen soll, besteht er aus mehreren Subdetektoren, welche in Schichten um den Kollisionspunkt angeordnet sind. Die Subdetektoren bestehen dabei jeweils aus einem zylindrischen Teil rund um das Strahlrohr (Barrel genannt) und den sogenannten Endkappen, welche kreisförmige Scheiben an den Enden des Detektors sind. Der Aufbau des CMS-Detektors ist in Abb. 2 schematisch dargestellt.

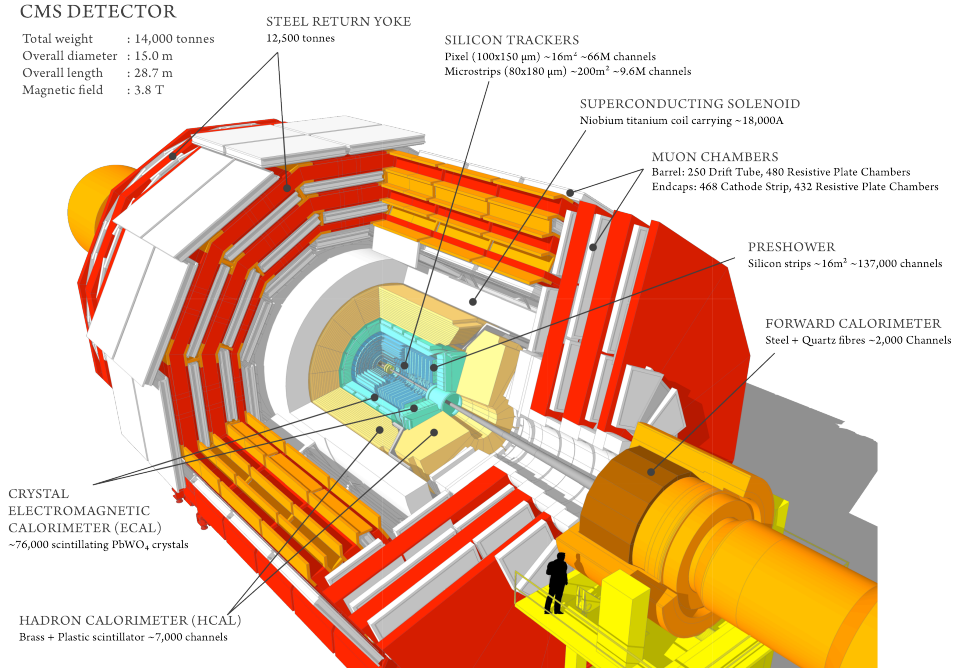


Abbildung 2: Schematische Darstellung des CMS-Detektors und seiner Subdetektoren. [15]

Tracker

Der innerste Subdetektor, welcher etwa 5.8 m lang ist und einen Radius von etwa 1.25 m hat, ist der sogenannte Tracker. Er besteht aus vielen einzelnen Siliziumdetektoren. Dieser vermisst die Spuren der entstandenen, geladenen Teilchen. Der innere Teil des Trackers, welcher sich von $R = 2.9$ cm bis 16.0 cm erstreckt, besteht aus vier Schichten von Pixeldetektormodulen und drei Schichten bei den Endkappen. Der Teil besteht dabei aus 1856 einzelnen Modulen, wobei die Pixel eine Größe von $100 \times 150 \mu\text{m}^2$ haben [16]. Dies ermöglicht eine sehr gute räumliche Auflösung, was besonders für die Bestimmung von sekundären Vertices, also Teilchenspuren, die nicht am ursprünglichen Kollisionspunkt beginnen, sehr wichtig ist. Der äußere Teil des Trackers reicht bis zu einem Radius von $R = 1.1$ m und besteht aus 10 zylindrischen Schichten und 12 Schichten bei den Endkappen, was den sensitiven Bereich auf eine Pseudorapidität von $|\eta| = 2.5$ ausdehnt. Dieser äußere Teil besteht aus 15148 Einzelmodulen mit einer sensitiven Fläche von insgesamt etwa 198 m^2 , wodurch der CMS-Tracker mit einer gesamten sensitiven Fläche von fast 200 m^2 der größte siliziumbasierte Detektor ist, der je gebaut wurde. Da die Siliziumsensoren sowie die verwendeten Kühlstrukturen und die Ausleseelektronik sehr dünn sind und die Strahlungslänge des Trackers dementsprechend hoch, wird die Energie und der Impuls der Teilchen dort so wenig wie möglich verändert.

Elektromagnetisches Kalorimeter

Ab $R = 1.2$ m beginnt das elektromagnetische Kalorimeter (ECAL). Dieses besteht aus 75000 Bleiwolframat (PbWO_4) Kristallen, welche als Szintillatoren die Energie von Teilchen über die elektromagnetische Wechselwirkung aufnehmen und in Form von Licht, welches dann detektiert wird, wieder abgeben. Hadronische Teilchen können das ECAL beinahe ungehindert durchdringen, während Elektronen, Positronen und Photonen im ECAL vollständig gestoppt werden, sodass deren Energie gut bestimmt werden kann.

Hadronisches Kalorimeter

Im Bereich $R = 1.77$ m bis $R = 2.95$ m befindet sich das hadronische Kalorimeter (HCAL). Dieses besteht aus mehreren Lagen von Messing und Kunststoffszintillatoren. Die hochenergetischen Teilchen erzeugen dabei in den Messingplatten Schauer von Teilchen, deren Energie wiederum mit den Szintillatoren gemessen wird.

Solenoidmagnet

Weiter außerhalb ist der supraleitende Titan-Niob Solenoidmagnet. Dieser ist 12.5 m lang und hat einen Durchmesser von etwa 6 m. Der bei einer Temperatur von ca. 4.5 K operierende Magnet erzeugt in seinem Inneren ein homogenes, 3.8 T starkes Magnetfeld. Durch dieses erfahren geladene Teilchen eine Lorentzkraft, welche die Bahn der Teilchen krümmt. Durch die Messung der Krümmung der Bahn lassen sich die Ladung und der transversale (senkrecht zum Strahlrohr) Impuls der Teilchen bestimmen.

Myonensystem

Ab $R = 3.2$ m folgen die Myonenkammern, welche für die Messung von Myonen verantwortlich sind. Dabei handelt es sich um verschiedene Typen von Gasdriftkammern, von denen ein Teil im Rückführjoch aus Eisen des Solenoidmagneten verbaut ist.

Triggersystem

Da die Datenmengen zu groß sind, um mit der Bunchcrossingfrequenz von 40 MHz ausgelesen zu werden, wird ein zweistufiges Triggersystem verwendet, um die Ereignisse auszuwählen, die besonders interessant sind. Die erste Stufe ist der Level-1 (L1) Trigger. Dieser ist hardwarebasiert und kann mit einer maximalen Frequenz von 100 kHz Signale aussenden. Der L1 Trigger verwendet nur grob segmentierte Daten von den Kalorimetern und den Myonenkammern, um eine Vorauswahl mit einer Latenz¹ von $3.2 \mu\text{s}$ zu treffen. Wenn der L1-Trigger ein Ereignis auswählt, werden die Daten des gesamten Ereignisses aus allen Subdetektoren ausgelesen und an den softwarebasierten High-Level Trigger weitergeleitet. Dieser nutzt komplexe Berechnungen, um mit einer maximalen Frequenz von 1 kHz eine feinere Selektion der Ereignisse durchzuführen.

2.2.1 Das Phase-2 Tracker Upgrade

Während des LS 3 soll neben dem LHC auch das CMS-Experiment ein großes Upgrade erhalten, wobei der vollständige Austausch des Trackers eines der größten Projekte darstellt. Dies ist auf Grund von mehreren Faktoren unumgänglich. Beispielsweise ist die Strahlenbelastung während Run 3 so hoch, dass an den Trackermodulen, vor allem nahe des Kollisionspunktes, schwere Strahlenschäden auftreten. Diese Veränderungen in der Kristallstruktur des Siliziums sorgen dafür, dass die Hochspannung erhöht werden muss, damit weiterhin der volle Bereich sensitiv ist und, dass der Leckstrom zunimmt [17]. Dies führt zu einer erhöhten Leistungsaufnahme und somit Wärmeentwicklung. Das Kühlsystem ist aber in seiner Leistungsfähigkeit unter anderem durch

¹Zeit zwischen dem Bunchcrossing und dem Zeitpunkt an dem entschieden wird, ob das Ereignis angenommen wird.

die Vorgaben bezüglich der verwendeten Materialmenge eingeschränkt. Da die Strahlenbelastung beim HL-LHC um etwa eine Größenordnung ansteigen wird, muss auch die Strahlenhärte der Module verbessert werden, damit diese über mindestens 3000 fb^{-1} nicht zu stark beeinträchtigt werden. Eine der wichtigsten Vorgaben, welche das Design des Phase-2 Trackers bestimmen, ist die Verwendung von Trackerdaten im L1 Trigger. Dafür werden spezielle Module im äußeren Teil des Trackers verwendet, welche direkt den Transversalimpuls der Teilchen messen können. Zusätzlich wird die Triggerfrequenz des L1 triggers auf 750 kHz und dessen Latenz auf $12.5 \mu\text{s}$ erhöht. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass eine deutlich höhere Granularität bzw. räumliche Auflösung benötigt wird, da ein Pileup² von bis zu 200 Kollisionen pro Ereignis erwartet wird, und es nur so möglich sein wird, die einzelnen Kollisionen voneinander zu trennen. Der Phase-2 Tracker ist unterteilt in den äußeren (Outer Tracker (OT)), in welchem Siliziumstreifenmodule verbaut sind und den inneren (Inner Tracker (IT)) wo Pixelmodule verwendet werden. Die geplante neue Anordnung der Module im Tracker ist in Abb. 3 gezeigt.

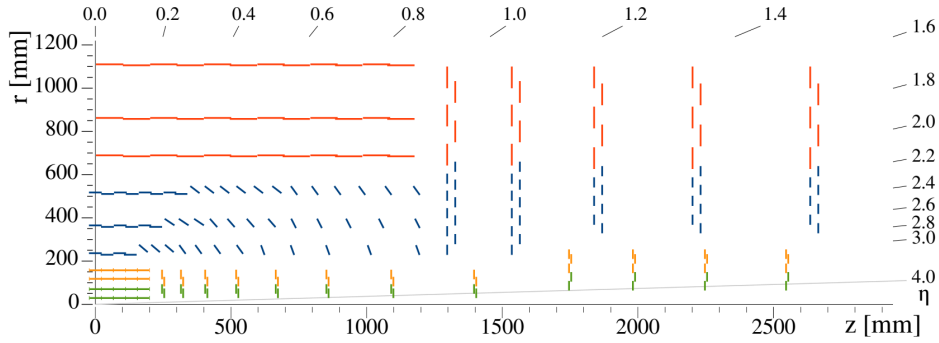


Abbildung 3: Geplante Anordnung der Module nach dem Upgrade, dargestellt für ein Viertel des Detektors. Die roten und blauen Streifen repräsentieren die 2S- und PS-Module des äußeren Trackers und die gelben und grünen die Pixelmodule des inneren. [3]

Einerseits wird der sensitive Bereich des Trackers bis auf eine Pseudorapidität von $|\eta| = 4$ ausgeweitet und andererseits sind die Module bei höheren $|z|$ geneigt, was dafür sorgt, dass die Module möglichst senkrecht durchdrungen werden, sodass sowohl Ober- als auch Unterseite der Module getroffen werden, was für die Messung des Transversalimpulses benötigt wird [8]. Im äußeren Teil werden sogenannte PS und 2S Module verbaut. Diese Module bestehen aus jeweils zwei übereinander montierten Sensoren, wobei einer davon als Makropixel (P) und die anderen als Streifen (S) strukturiert sind. Durch diese beiden Sensoren kann der äußere Tracker Informationen über Teilchen mit hohem Transversalimpuls p_T dem L1 Trigger zur Verfügung stellen, was neben erhöhten Bandbreiten dafür sorgen soll, dass die deutlich höheren Datenmengen weiterhin effizient verarbeitet werden können. Eine genauere Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise eines 2S-Moduls findet in 3 statt. Ein letztes wichtiges Upgrade betrifft das Kühlsystem des Trackers. Dieses wird auf ein evaporatives CO_2 System umgestellt, was einerseits deutlich effizienter und auch günstiger als das bisherige einphasige auf C_6F_{14} basierende System ist, auch im Bezug auf die benötigte Menge an Materie im Detektor [10]. Andererseits erreicht dieses tiefere Temperaturen von bis zu $-35 \text{ }^\circ\text{C}$, was das Rauschen in den Modulen reduziert [3].

²Pileup beschreibt, dass bei einem einzigen Bunch crossing mehrere inelastische Kollisionen stattfinden

3 Das 2S-Modul

Das 2S-Modul ist ein siliziumbasiertes Detektormodul, welches speziell für die Anforderungen des HL-LHC entwickelt wurde und Informationen über den Transversalimpuls der Teilchen messen soll, um diese im L1 Triggersystem verwenden zu können. Ein Modell des Moduls ist in Abb. 4 gezeigt.

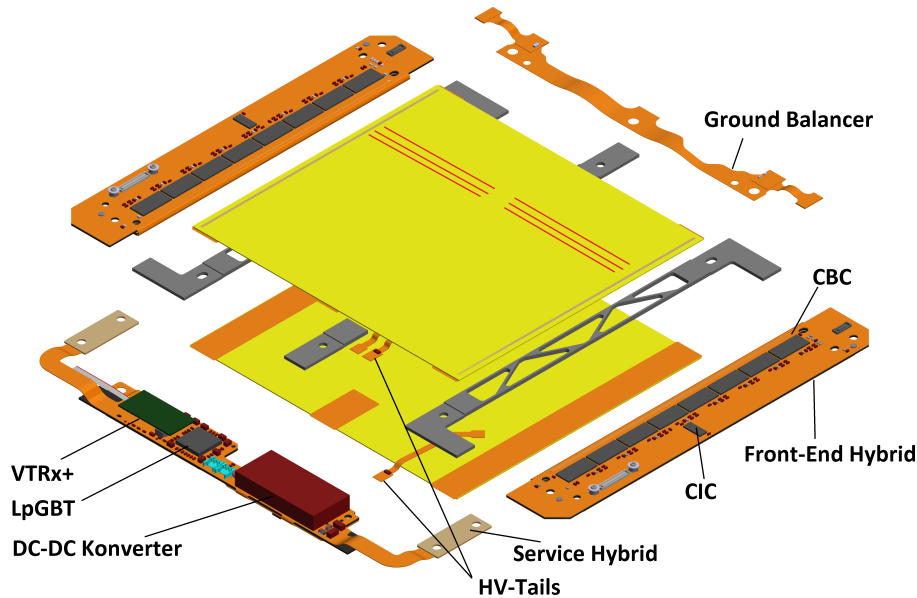


Abbildung 4: Modell des 2S-Moduls mit der Ausrichtung der Streifen (Abstände nicht maßstabsgetreu) und den einzelnen Bestandteilen des Moduls. (Verändert nach [18])

Das Modul besteht aus zwei n- in p-dotierten Siliziumsensoren, welche jeweils etwa $10 \times 10 \text{ cm}^2$ groß sind. Die Sensoren sind dabei in zwei Reihen von 5 cm langen und $90 \mu\text{m}$ breiten Streifen strukturiert, und die aktive Dicke der Sensoren beträgt $290 \mu\text{m}$. Dies ist der Bereich, der durch das Anlegen der Verarmungsspannung frei von Ladungsträgern und dadurch sensitiv für ionisierende Strahlung ist. Beide Reihen des Sensors bestehen aus 1016 Streifen, jeder Sensor hat also 2032 Streifen und das ganze Modul insgesamt 4064 Streifen [19]. Die beiden Sensoren werden von sogenannten Bridges aus Aluminium-Kohlefaser Kompositmaterial auf 1.8 mm oder 4.0 mm Abstand gehalten, je nach Position im Tracker. Die Streifen beider Sensoren sind parallel direkt übereinander angeordnet. Die beiden sogenannten Front-End Hybride (FEH) sind über Wirebonds mit den Streifen verbunden und dafür zuständig diese auszulesen. Diese FEH bestehen aus 8 CMS Binary Chips (CBCs) [20] der Generation 3.1. Jeder CBC liest die analogen Signale von 254 Streifen aus (je 127 vom oberen und unteren Sensor), erstellt daraus binäre Daten durch Vergleich der analogen Signale mit einer einstellbaren Schwelle und leitet diese an den CIC (Concentrator Integrated Circuit) [21] weiter. Dieser speichert die Daten der acht CBCs zwischen, verarbeitet sie (beispielsweise werden dort Nullen unterdrückt um die Datenmenge zu reduzieren) und leitet sie dann gebündelt an den sogenannten Service Hybrid (SEH) weiter. Wenn der CIC ein Signal vom L1 Trigger erhält, werden alle Daten gesendet, sonst werden nur die Stubs³ übertragen. Im SEH werden die Daten vom Low-Power Gigabit Transceiver (LpGBT) [22] angenommen.

³Trefferpaare auf dem oberen und unteren Sensor, die durch Teilchen mit hohem Transversalimpuls erzeugt werden, werden Stubs genannt.

Der LpGBT sendet außerdem die Clock- und Triggersignale an die Chips. Diese Signale werden vom Versatile Transceiver plus (VTRx+) [23] über optische Kommunikation empfangen und an den LpGBT weitergeleitet, während die gemessenen Daten über diese optische Schnittstelle an die Trigger- und Auslesesysteme gesendet werden. Eine weitere Funktion des SEH ist die Versorgung der verschiedenen Chips mit den richtigen Betriebsspannungen. Dafür wird die angelegte Spannung von etwa 11 V durch zwei DC-DC Konverter auf die benötigten Betriebsspannungen angepasst. Zuerst werden die 11 V durch den bPOL2V12 auf 2.55 V reduziert, welche für den VTRx+ benötigt wird. Dann wird die Spannung durch einen bPOL2V5 weiter auf 1.25 V verringert, was der Betriebsspannung der übrigen Chips (CBCs, CICs, LpGBT) entspricht. Schließlich werden die Sensoren durch das SEH über die sogenannten HV-Tails mit der zur Verarmung der Streifen benötigten Hochspannung (HV) von -300 V im unbestrahlten Zustand und mit bis zu -800 V gegen Ende der Lebenszeit des Detektors versorgt [3].

Prinzip der Transversalimpulsmessung

Da Daten des äußeren Trackers im L1 Triggersystem verwendet werden sollen, müssen die Daten mit der Bunchcrossingfrequenz von 40 MHz gesendet werden. Die Datenmengen für die ganzen Ereignisse sind allerdings zu groß, um in dieser Frequenz übertragen werden zu können, daher muss die Datenmenge bereits im Modul verringert werden. Dafür wurden die Module des OT so entwickelt, dass sie erkennen können, wenn ein Teilchen einen Transversalimpuls p_T über einer einstellbaren Schwelle hat. Das dahinterstehende Prinzip ist in Abb. 5 skizziert und wird Stub-Logik genannt.

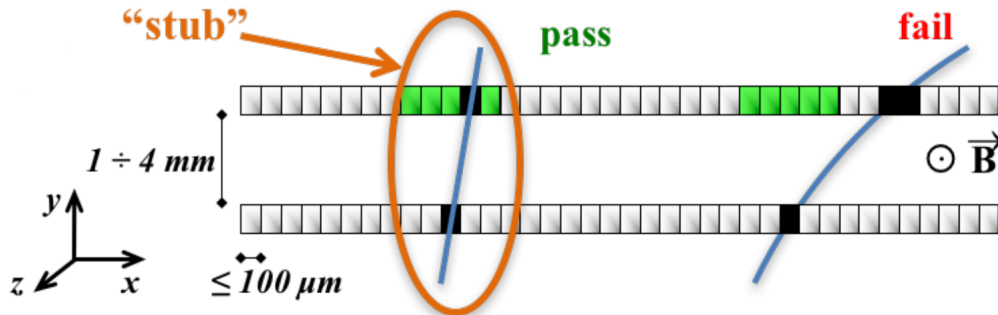


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Erkennung von Teilchen mit einem Transversalimpuls über einer eingestellten Schwelle. Im orangenen Kreis ist die Spur eines Teilchens mit ausreichendem p_T dargestellt, während dieser beim Teilchen mit „fail“ zu gering ist. [3]

Die Bahnen geladener Teilchen werden durch das 3.8 T starke Magnetfeld des CMS-Magneten gekrümmt. Dabei beeinflusst der Impuls senkrecht zum Magnetfeld, welcher dem Transversalimpuls p_T entspricht, wie stark diese Krümmung ausfällt. Ein hoher Transversalimpuls sorgt für eine schwache Krümmung, wohingegen diese bei kleinerem p_T zunimmt. Wenn ein Treffer auf der dem Kollisionspunkt zugewandten Seite registriert wird, korreliert der CBC des FEH die Daten auf der Ober- und Unterseite und legt ein Akzeptanzfenster bei dem anderen Sensor fest. Liegt der Treffer auf dem zweiten Sensor im Fenster, wird dieses Treffer-Paar, auch Stub genannt, an den L1 Trigger weitergeleitet. Liegt er dagegen außerhalb, werden die Daten nicht im L1 Trigger verwendet [24]. Um eine gewünschte Schwelle für den Transversalimpuls festzulegen, kann die Größe des Akzeptanzfensters in den Einstellungen der CBCs festgelegt werden. Eine Schwelle von $p_T > 2\text{ GeV}$ kann die Datenmenge so um etwa eine Größenordnung

verringern, was ausreicht um die übrigen Daten mit 40 MHz zu übertragen [3]. Wenn ein Ereignis vom L1 Trigger akzeptiert wurde, wird das ganze Modul ausgelesen.

3.1 Verschiedene Designs des Moduls

In den verschiedenen Messungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, wurden zwei Versionen des Moduls verwendet: ein Prototypmodul, welches in einer früheren Entwicklungsphase gebaut wurde, um dieses auf Designschwächen zu untersuchen und ein Modell der Kickoff Serie. Die Module der Kickoff Serie verwenden bereits das finale Design, welches im Detektor verwendet werden soll. Das Prototyp Modul hat die Modulnummer 2S_18_6_AAC-00004 und das Kickoff Modul die Nummer 2S_18_5_AAC-00104. Dabei wurden beim zweiten Modul verschiedene Service Hybride vermessen. Einmal der Hybrid 2SEH-210000011 welches das sogenannte Regular Design verwendet und das im Split-Plane Design produzierte SEH 2SSEH-211000004.

Unterschied zwischen dem Prototyp und dem Kickoff Modul

Das Design der beim Kickoff Modul verwendeten FEHs, wurde im Vergleich zu denen beim Prototyp nicht grundlegend verändert. Bei denen des Kickoff Moduls wurden allerdings noch Anschlussstellen für einen sogenannten Ground Balancer an den Enden gegenüber dem SEH hinzugefügt. Schließlich wurden in einer Rauschanalyse Effekte entdeckt, welche zusätzliches Rauschen verursachten. Der erste Effekt ist in Abb. 6 schematisch dargestellt. Bei diesem bilden die beiden Sensoren eine Schleife mit den HV-Tails. In diese Schleife können magnetische Wechselfelder, welche von den DC-DC Konvertern erzeugt werden, einkoppeln. Da die Impedanz für den relevanten Frequenzbereich sehr niedrig ist ($\sim \Omega$), können so starke Ströme über den Sensor entstehen. Diese Ströme fließen dann zwischen Ober- und Unterseite und erzeugen so in den Streifen zusätzliches Rauschen. Um die Impedanz zu erhöhen wurden 100Ω Widerstände in Reihe in die HV-Tails eingefügt, was das Rauschen reduziert hat [25]. Beim Kick-off Modul wurden diese Widerstände bereits fest verbaut. Beim Prototyp können sie jedoch entfernt werden, was die Untersuchung von deren Einfluss ermöglicht.

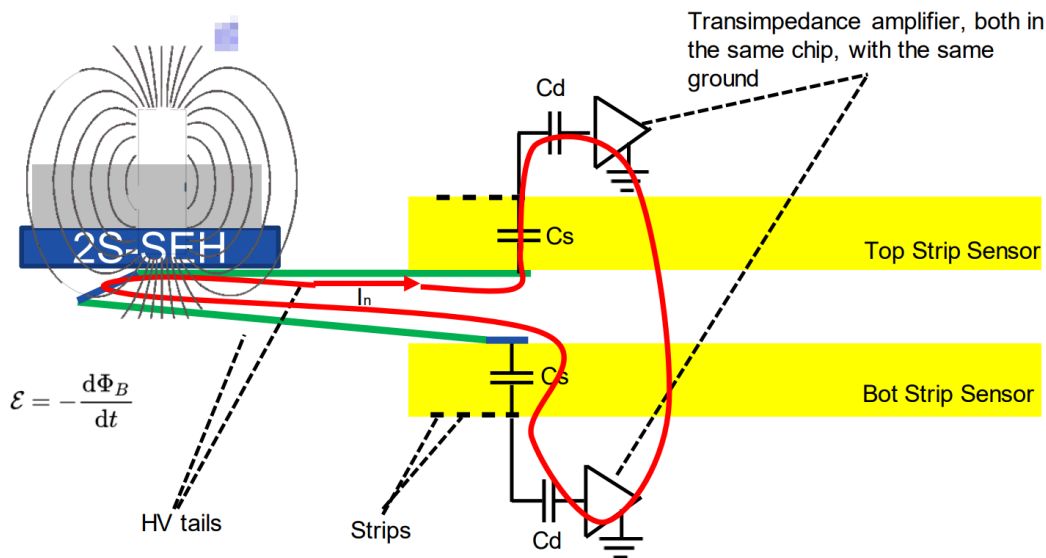


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Effekts, bei dem Magnetfelder in die HV-Tails einkoppeln. [25]

Split-Plane Design und Ground Balancer

Das Split-Plane und das Regular Design SEH wurden im Zuge der Kickoff Serie entwickelt, um das bei den Prototypmodulen beobachtete, erhöhte Rauschen, zu verringern. Der primäre Unterschied zwischen dem Regular Design SEH und dem Split-Plane Design ist, dass die Erdungsschichten beim Split-Plane Design nur in einem Punkt miteinander verbunden sind, während beim Regular Design, wie beim Prototypmodul, mehrere Verbindungen vorliegen. Diese Änderung beim Split-Plane Design soll die Erdung in welcher elektrisches Common Mode Rauschen durch die DC-DC Konverter erzeugt wird, von einer „sauberen“ Erdung entkoppeln, mit welcher die beiden FEH versorgt werden. Diese verschiedenen Strukturierungen der Erdung sind in Abb. 7 skizziert.

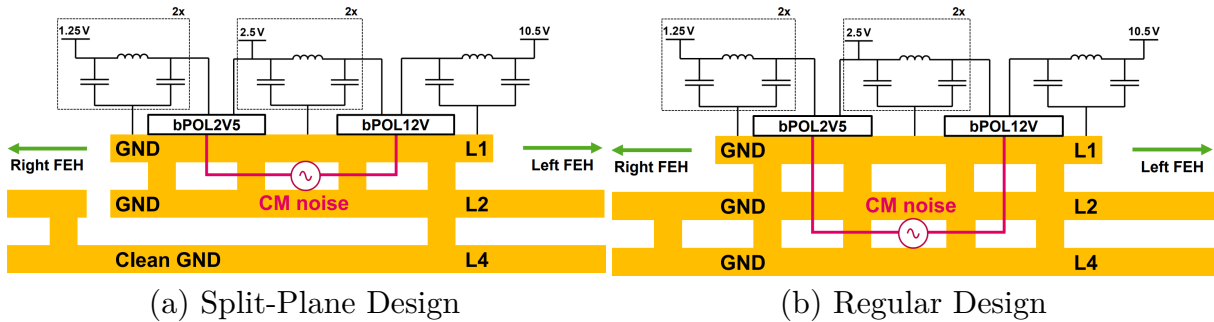


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Erdungsstrukturierung beim Split-Plane Design und beim Regular Design SEH. [26]

Ein weiterer Effekt, welcher beim Prototypmodul beobachtet wurde, ist eine Potentialdifferenz in den Erdungen zwischen linkem und rechtem FEH. Diese verursacht Ströme über den Sensor, welche zwischen den beiden FEHs fließen und in den Vorverstärkern zusätzliches Rauschen verursachen. Um diese Ströme, welche bei beiden Designs auftreten zu reduzieren oder sogar zu verhindern, wurde ein sogenannter Ground Balancer entwickelt, welcher beim Kickoff Modul ans Ende der FEHs angeschlossen werden kann. Dieser ist im Grunde eine einfache Verbindung der Erdungsschichten zwischen den beiden Hybriden mit niedriger Impedanz, sodass möglicherweise auftretende Ströme über diesen anstatt über den Sensor fließen können [27]. Auf Grund des deutlich niedrigeren Rauschens beim Regular Design SEH mit Ground Balancer, wie im Verlauf dieser Arbeit noch bestätigt werden wird, wurde sich für dieses als finales Design entschieden.

4 Theorie von Rauschmessungen in binären Auslesesystemen

Um zu verstehen, wie und warum korreliertes Rauschen in den Modulen auftreten kann, wird in 4.1 zunächst die theoretische Entstehung von Rauschen in Halbleiterdetektoren untersucht, und wie die Stärke des Rauschens gemessen werden kann. Dann wird in 4.3 erläutert, wie verrauschte Daten mit einem einfachen Monte Carlo Programm simuliert werden können, bevor in 4.4 erklärt wird, mit welchen Methoden korreliertes Rauschen untersucht und charakterisiert werden kann.

4.1 Entstehung von Rauschen in ladungssensitiven Auslesesystemen

Es gibt mehrere Größen, welche die Intensität dieses Rauschens beeinflussen. Diese Größen sind die Lastkapazität C_d , der Leckstrom I_L und die parallelen und seriellen Widerstände R_P und R_S [28]. R_P ist der Biaswiderstand, also der Widerstand zwischen der HV-Verbindung und der Erdung eines Streifens. R_S ist der Widerstand eines Streifens, welcher beispielsweise durch die Metallkontaktierung auftritt. Ein Ersatzschaltbild, welches einen einzelnen Streifen repräsentiert und diese Größen beinhaltet, ist in Abb. 8 gegeben.

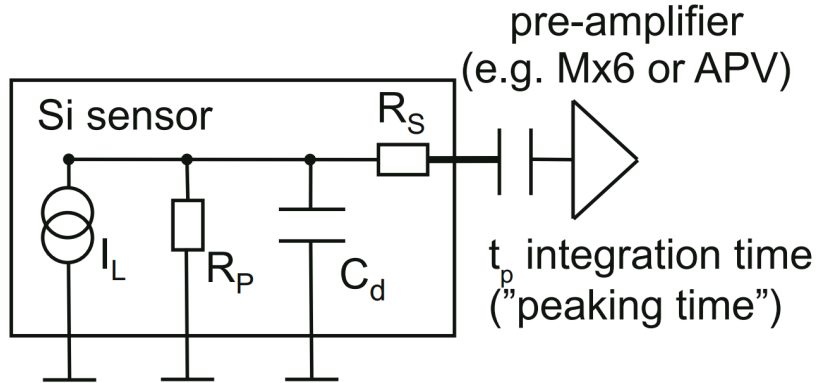


Abbildung 8: Ersatzschaltbild eines Streifens mit dem dazugehörigen Vorverstärker, bei dem die Haupteinflüsse für das Rauschen enthalten sind. [28]

Zudem hat die sogenannte Peaking Time t_p , welche die Anstiegszeit des Pulsformers beschreibt, einen starken Einfluss auf das Rauschverhalten. Das Rauschen wird oft als äquivalente Rauschladung (ENC) ausgedrückt. Diese ist definiert als Verhältnis zwischen der Spannung, die durch das Rauschen am Ausgang erzeugt wird, zu der Spannung, die man durch ein Eingangssignal von einem Elektron erhalten würde ($ENC = \frac{U_{Noise}[V]}{U_e[\frac{V}{e}]}$). Der Beitrag durch den Leckstrom ergibt sich durch Gl. 1. Dieser wird durch das Schrotrauschen hervorgerufen. Dieses beschreibt, dass die Entstehung von Ladungsträgern ein statistischer Vorgang ist, wodurch Fluktuationen entstehen.

$$ENC_{I_L} = \frac{e}{2} \sqrt{\frac{I_L \cdot t_p}{q_e}} \quad (1)$$

Das thermische Rauschen, auch Johnson Rauschen genannt, dass durch den parallelen Widerstand auftritt, kann mit Gl. 2 berechnet werden und das durch den seriellen mit Gl. 3 [28]. Dieses Rauschen beschreibt, dass an einem Widerstand Spannungsfluktationen durch die thermische Bewegung der Ladungsträger auftreten.

$$\text{ENC}_{R_P} = \frac{e}{q_e} \sqrt{\frac{k_b T t_p}{2 R_P}} \quad (2)$$

$$\text{ENC}_{R_S} = C_d \frac{e}{q_e} \sqrt{\frac{k_b T R_S}{2 t_p}} \quad (3)$$

Dabei ist e die eulersche Zahl, q_e ist die Elementarladung und k_b die Boltzmannkonstante. Der für das 2S-Modul wichtigste Beitrag ist der durch die Kapazität C_d am Vorverstärker, welcher sich durch Gl. 4 ergibt.

$$\text{ENC}_C = a + b \cdot C_d \quad (4)$$

Dieser Beitrag entsteht durch thermisches Rauschen im Kanal des Vorverstärkers. Die beiden Konstanten a und b sind dabei vorverstärkerspezifisch. Um das gesamte Rauschen zu berechnen, müssen die einzelnen Beiträge quadratisch addiert werden [28]. Die einzelnen Beiträge werden alle wie in [29] mit der Peaking Time $t_p = 20$ ns [30], dem Leckstrom pro Streifen $I_L = 0.01$ nA und den Widerständen berechnet. So erhält man für die ersten 3 Beiträge: $\text{ENC}_{I_L} \sim 5 e$, $\text{ENC}_{R_P} \sim 81 e$ und $\text{ENC}_{R_S} < 100 e$. Des Weiteren kann C_d mit Gl. 5 und der Kapazität des Sensors $C_{\text{sens}} = 6.2$ pF, der Kapazität durch die Bonds zum FEH $C_{\text{bonds}} = 0.25$ pF und der Kapazität durch die Faltung des FEHs beim unteren Sensor $C_{\text{fold}} = 0.57$ pF, berechnet werden [29]. C_{fold} muss allerdings nur für den unteren Sensor hinzugefügt werden.

$$C_d = C_{\text{sens}} + C_{\text{bonds}} + C_{\text{fold}} \quad (5)$$

Die Konstanten a und b ergeben sich für die CBC 3.1 zu $a = 256 \pm 4$ und $b = 74 \pm 1$ für $T = 30^\circ\text{C}$ und $a = 229 \pm 3$ und $b = 64 \pm 1$ für $T = -20^\circ\text{C}$ [29]. Für den oberen Sensor erhält man durch quadratische Addition der Einzelbeiträge $\text{ENC}_{\text{Top}} = 740 e$ bei $T = 30^\circ\text{C}$ und $\text{ENC}_{\text{Top}} = 650 e$ bei $T = -20^\circ\text{C}$. Analog ergibt sich für den unteren Sensor: $\text{ENC}_{\text{Bottom}} = 780 e$ ($T = 30^\circ\text{C}$) und $\text{ENC}_{\text{Bottom}} = 690 e$ ($T = -20^\circ\text{C}$).

4.2 Messung und Charakterisierung des Rauschens

Wie bereits in 3 beschrieben, werden auf den beiden FEHs CBCs der Generation 3.1 verwendet, die die analogen Signale der einzelnen Streifen messen und in binäre Hitdaten umwandeln. Das Design des analogen Front-Ends ist in Abb. 9 gezeigt.

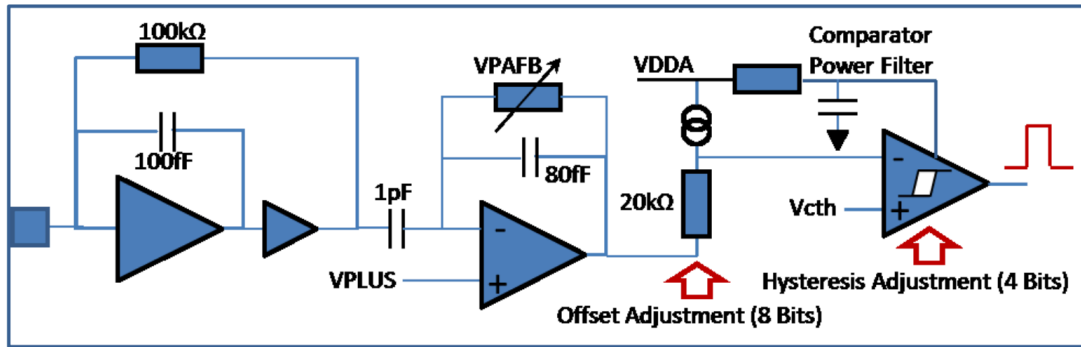


Abbildung 9: Design des analogen Front-Ends der CBC3.1. [30]

Wenn ein ionisierendes Teilchen die Raumladungzone eines Streifens durchquert, werden Elektron-Loch Paare erzeugt, welche durch die anliegende Hochspannung getrennt werden, was wiederum einen messbaren Ladungspuls erzeugt. Dieser Ladungspuls wird integriert und durch einen Vorverstärker in einen Spannungspuls konvertiert. Danach durchläuft dieser noch einen Nachverstärker, der den Puls weiter verstärkt und formt. Zudem wird das Signal durch den Nachverstärker invertiert. Dann wird die Basisspannung für jeden Streifen einzeln noch durch Verschieben um V_{Offset} angepasst, um für ein gleiches Ansprechverhalten der Kanäle zu sorgen. Dieses individuelle Einstellen der Basisspannung wird Trimmen genannt. Abschließend vergleicht ein Komparator das Spannungssignal mit einem globalen Schwellenwert V_{cth} , wodurch ein binäres Signal erstellt wird, was angibt, ob ein Treffer registriert wurde. Auf Grund der Auslese von Elektronen entspricht ein niedriger V_{cth} Wert einer hohen Schwelle, während ein hoher Wert einer niedrigen Schwelle entspricht.

Da das analoge Signal von einem, durch die elektrischen Bauteile verursachten, gaußförmigen Rauschen überlagert ist, kann es dazu kommen, dass Ereignisse fälschlicherweise als Treffer registriert werden. Um dies zu verhindern, kann die Schwelle angehoben werden, was dann aber wiederum schwache Signale ausschließt, was ebenfalls unerwünscht ist. Darum ist es wichtig das Ausmaß des Rauschens zu kennen, um die Schwelle optimal einstellen zu können. Um das Rauschen zu bestimmen, wird die eingestellte Schwelle variiert, indem V_{cth} Werte von niedrig zu hoch durchfahren werden. Dann kann für jeden Wert und Streifen die sogenannte Occupancy Ω gemessen werden. Diese Größe beschreibt das Verhältnis von gemessenen Treffern in einem Streifen N_{Hit} zu der Gesamtzahl an, durch einen Zufallstrigger mit fester Frequenz von 100 kHz ausgelösten Ereignissen N_{Trig} ($\Omega = \frac{N_{\text{Hit}}}{N_{\text{Trig}}}$). Bei niedrigen V_{cth} Werten erhält man also eine sehr niedrige Occupancy da fast nie die Schwelle überschritten wird. Für höhere Werte nimmt die Occupancy dann immer weiter zu, bis sie sich irgendwann der eins annähert, da bei jedem Ereignis ein Treffer registriert wird. Das Abtasten der Schwelle entspricht dem Integrieren des zugrundeliegenden Rauschsignal, daher erhält man für gaußverteiltes Rauschen eine sogenannte S-Kurve die in diesem Fall einer Fehlerfunktion entspricht [31]. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 10 gegeben.

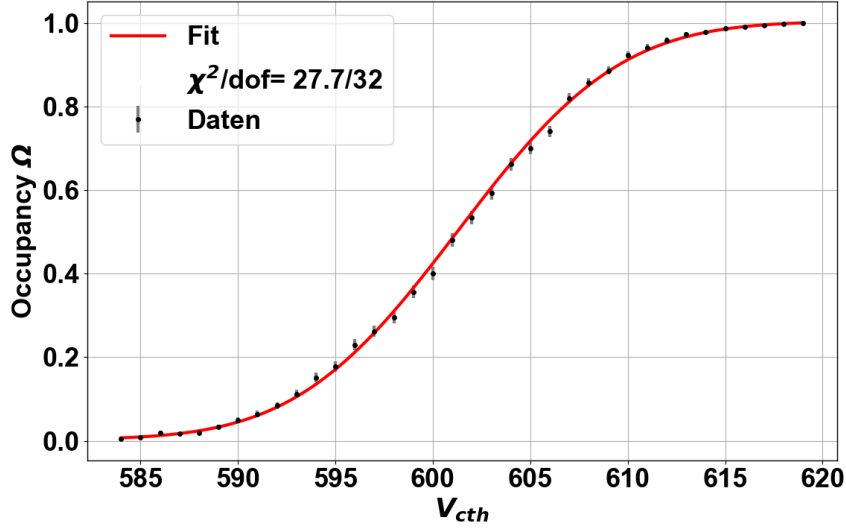


Abbildung 10: Beispiel für eine aufgezeichnete S-Kurve mit Anpassung einer Fehlerfunktion an die gemessenen Daten.

Um das Rauschniveau zu erhalten, wird dann Gl. 6 an die gemessenen Daten angepasst.

$$f = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{V_{\text{cth}} - P}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right) \quad (6)$$

Dabei ist P das sogenannte Pedestal, welches die Nulllinie des Detektorrauschens beschreibt. Am Pedestal beträgt die Occupancy daher 50 %. Durch das Trimmen der Streifen sollte dieses bei allen Streifen etwa gleich sein. Aus der Anpassung erhält man zusätzlich σ , also die Standardabweichung der dem Rauschen zugrundeliegenden Normalverteilung. Im folgenden wird σ als Rauschniveau verwendet und in Einheiten von V_{cth} angegeben. Korreliertes Rauschen beschreibt dabei, dass die Signale von Gruppen von Streifen kohärent beeinflusst werden. Dies kann beispielsweise durch das Einkoppeln elektromagnetischer Signalen in mehrere Streifen, oder Rauschen in der Versorgungsspannung und der Erdung des Moduls hervorgerufen werden. Korreliertes Rauschen erhöht dabei das Gesamtrauschen und kann zu künstlichen Treffermustern führen, da die Wahrscheinlichkeit für Treffer in den betroffenen Streifen kohärent erhöht bzw. verringert ist.

4.3 Simulation von Rauschdaten

Um die Nützlichkeit und Aussagekraft der in den folgenden Abschnitten erklärten Methoden zur Vermessung von korreliertem Rauschen evaluieren zu können, wird eine Monte-Carlo Simulation zur Generation von Daten verwendet, wie sie auch in [32] benutzt wird. Dabei werden zunächst für alle Streifen gaußverteilte Zufallswerte generiert, welche das Einzelkanalrauschen, also das zufällige Rauschen, welches alle Streifen unabhängig voneinander erfahren, simuliert. Die zugrundeliegende Gaußverteilung hat dabei Mittelwert $\mu = 0$ und Standardabweichung $\sigma = 1$. Danach wird zusätzlich eine Korrelation zwischen ausgewählten Streifen generiert, indem ein Zufallswert einer Gaußverteilung mit Mittelwert $\mu = 0$ und Standardabweichung s erzeugt und auf alle Streifen, die korreliert sein sollen, addiert wird. Soll darüber hinaus noch eine Antikorrelation simuliert werden, kann in dem Bereich, der zu dem anderen antikorreliert sein

soll, dieser Zufallswert subtrahiert werden. Die der Korrelation zugrundeliegende Verteilung muss allerdings nicht zwangsläufig gaußverteilt sein, stattdessen sind auch eine Gleichverteilung sowie eine zeitliche Sinusverteilung möglich. Diese Korrelation kann dann noch um einen Vorfaktor ergänzt werden, um zu simulieren, dass das Rauschen nicht in alle Bereiche im Modul gleich stark einkoppelt. Schließlich ist es auch noch möglich einen weiteren (gaußverteilten) Zufallswert auf Teilbereiche wie beispielsweise nur die Unterseite des Moduls hinzuzufügen, um eine eventuelle externe Rauschquelle zu simulieren, die unabhängig von der ersten ist. Um die Hitdaten zu erhalten, werden alle Streifen ausgewählt, deren Werte über einer Schwelle τ liegen. Die Schwelle kann dabei variiert werden, und simuliert bei $\tau = 0$ eine Occupancy von 50%, also das Pedestal.

4.4 Erkennung und Messung von korreliertem Rauschen

Im Folgenden werden verschiedene numerische und grafische Methoden vorgestellt, um die Art, sowie das Ausmaß des korrelierten Rauschens untersuchen und messen zu können. Dann wird deren Aussagekraft und deren Nutzen anhand von Daten, die wie zuvor beschrieben simuliert wurden, untersucht und bewertet.

4.4.1 Hitmaps und Histogramme

Eine Möglichkeit, die aufgezeichneten Treffer grafisch darzustellen, sind sogenannte Hitmaps. Es wird die Streifennummer auf der x-Achse aufgetragen und die Ereignisnummer auf der y-Achse. Wenn bei einem Ereignis in einem gewissen Streifen ein Treffer registriert wurde, wird dies in der Hitmap als schwarzer Pixel gekennzeichnet, wohingegen Streifen mit keinem gemessenen Hit weiß dargestellt werden. So lassen sich recht einfach die ersten Muster identifizieren.

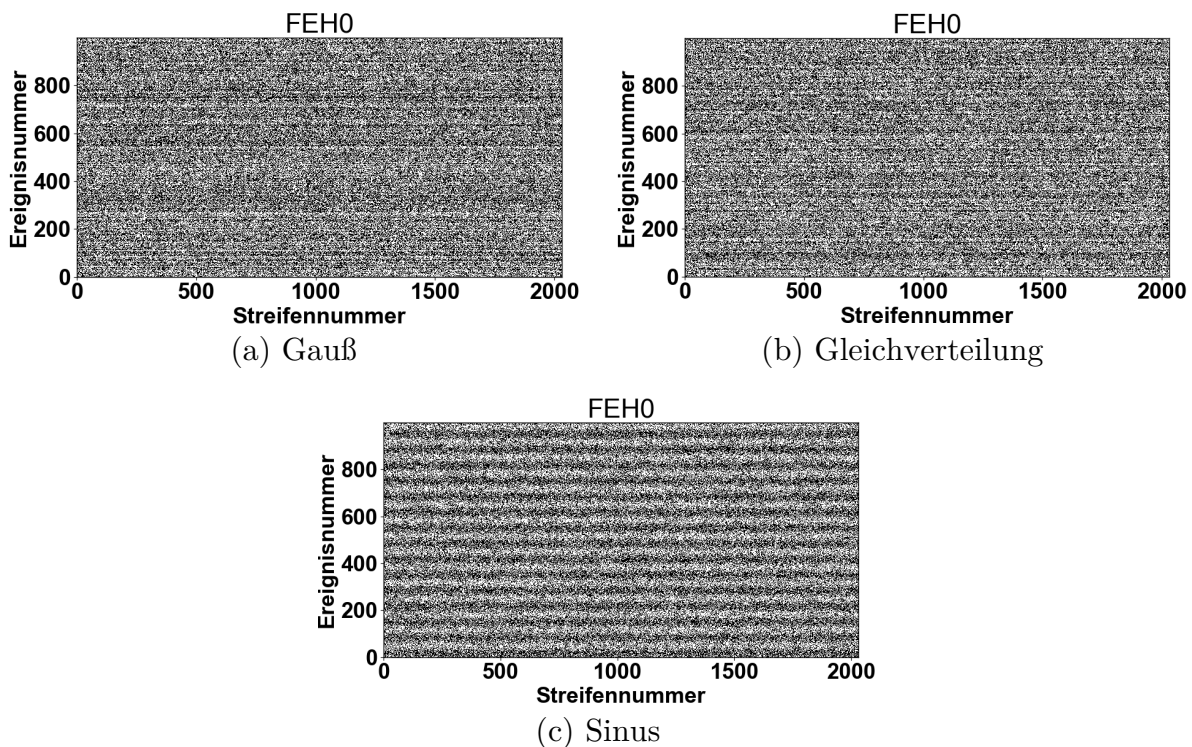


Abbildung 12: Mit simulierten Daten erstellte Hitmaps, wobei dem korrelierten Rauschen verschiedene Verteilungen zugrunde liegen: a) Gaußverteilung, b) Gleichverteilung und c) Sinus mit einer Frequenz von 1.5 kHz ($+\sin(2\pi \cdot 1500 \cdot n_{\text{Trig}})$).

Mögliche Muster sind dabei zum Beispiel horizontale Streifen, welche darauf hindeuten, dass bei diesem Ereignis entweder sehr viele oder sehr wenige Treffer registriert wurden, was ein Indiz für die Anwesenheit von korreliertem Rauschen ist, da dies die Signalhöhe in mehreren Streifen kohärent erhöht bzw. verringert und so die Wahrscheinlichkeit für Treffer in diesen Streifen erhöht bzw. verringert. Ein anderes mögliches Muster sind senkrechte Streifen, da diese bedeuten, dass ein spezieller Streifen oder eine Gruppe von Streifen sehr viele oder wenige Treffer gemessen hat. Dies kann andeuten, dass bei dem Trimmen nicht erfolgreich war oder, dass diese Streifen defekt sind. Abb. 12 zeigt beispielhaft Hitmaps von simulierten Ereignissen. Dabei wurden die Verteilungsfunktionen des korrelierten Rauschens variiert und beim Sinus mit dem Vorfaktor 0.4 multipliziert, damit die Daten für alle Verteilungen etwa gleich stark korreliert sind. Die Stärke der Korrelation entspricht dabei einem gaußverteiltem korrelierten Rauschen mit $s = 0.29$. Diese Korrelationsstärke wurde so gewählt, da sie den in den folgenden Kapiteln gemessenen ähnelt. Der Faktor 0.4 wurde so gewählt, da die Korrelationsstärke damit dem Wert $s = 0.29$ entspricht. Aus dem selben Grund wurde für die Gleichverteilung das Intervall $[-0.49, 0.49]$ verwendet. Zwischen dem gaußverteilten und dem gleichverteilten korrelierten Rauschen ist in dieser Darstellung kein nennenswerter Unterschied erkennbar. Die einzigen Verteilungen, die hier hervorstechen sind sich zeitlich verändernde Verteilungen wie der Sinus. Dieser zeigt sich recht deutlich durch die periodischen hellen und dunklen, horizontalen Streifen. Neben solchen Verteilungen lassen sich unter Umständen auch bereits Antikorrelationen erkennen, was in Abb. 13 gezeigt ist. Die Antikorrelation zeigt sich dabei in den Hitmaps dadurch, dass wenn im ersten FEH (siehe a) ein Ereignis mit vielen Treffern vorliegt, also ein dunkler Streifen sichtbar ist, bei dem gleichen Ereignis im zweiten FEH (b) ein heller Streifen erkennbar ist.

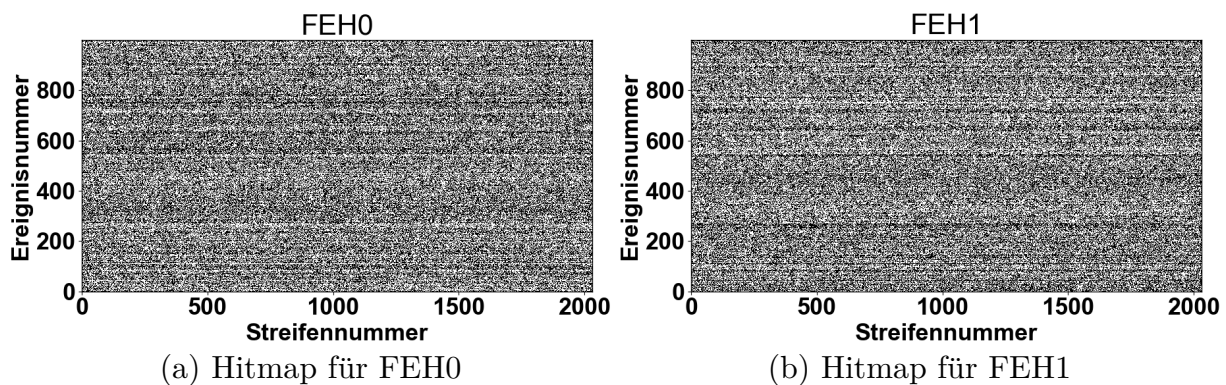
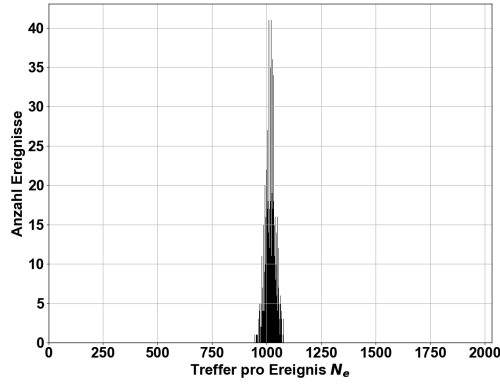


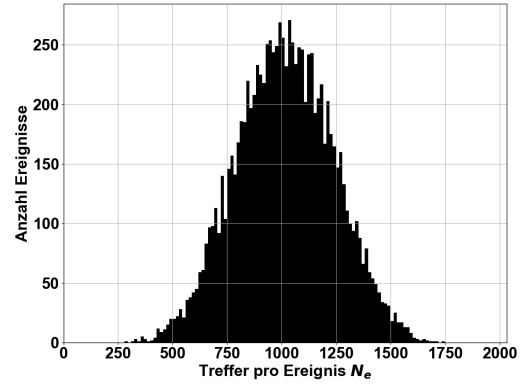
Abbildung 13: Beispiel für Hitmaps von simulierten Daten mit gaußverteiltem, korreliertem Rauschen, wobei die Signale von FEH1 gegenüber FEH0 antikorreliert ist.

Histogramme

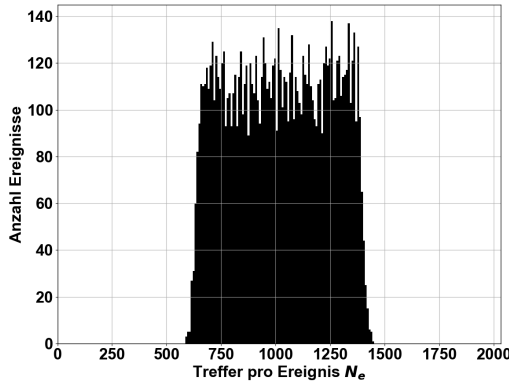
Um auch die Verteilungen unterscheiden zu können, welche zeitlich unveränderlich sind, können Histogramme wie die in Abb. 14 gezeigt, verwendet werden.



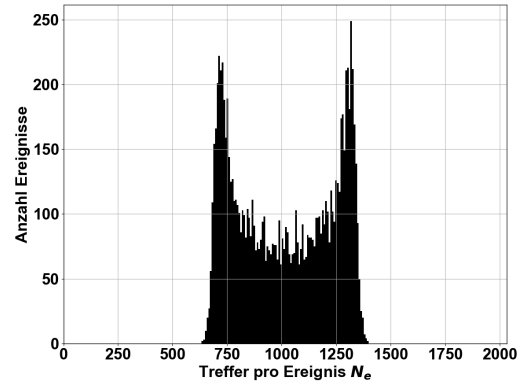
a) unkorreliertes Rauschen



b) Gauß



c) Gleichverteilung



d) Sinus

Abbildung 14: Mit simulierten Daten erstellte Histogramme der Trefferanzahl pro Ereignis, wobei dem korrelierten Rauschen verschiedene Verteilungen zugrunde liegen: a) kein korreliertes Rauschen, b) Gaußverteilung, c) Gleichverteilung und d) Sinus mit einer Frequenz von 1.5 kHz.

In den Histogrammen in Abb. 14 werden die Anzahl an registrierten Treffern pro Ereignis aufgetragen. Wie in der Abbildung zu sehen ist, sind dabei starke Unterschiede zwischen den verschiedenen Formen des korrelierten Rauschens erkennbar. Es zeichnen sich dort klar die einzelnen Verteilungsfunktionen ab. Da der Sinus zeitlich variabel ist, erhält man wegen der festen Abtastrate ein Histogramm der vom Sinus angenommenen Werte. Diese Art der Histogramme kann also dazu beitragen, herauszufinden, was für eine Verteilung einer Korrelation zu Grunde liegen könnte.

4.4.2 Γ -Wert

Um eine quantitative Aussage über die Stärke der Korrelation tätigen zu können, wird im Folgenden die Verteilung der Anzahl an Treffern pro Ereignis weiter untersucht. Die hergeleiteten Formeln und verwendeten Definition wurden zuerst in [32] vorgestellt. Wenn ein gaußverteiltes, korreliertes Rauschen vorliegt, ist dies mathematisch äquivalent dazu, dass die Schwelle τ bei jedem Ereignis aus einer Verteilung $g(\tau)$ generiert wird.

$$g(\tau) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\tau - \tau_0)^2}{2s^2}\right) \quad (7)$$

Dabei ist s wie zuvor die Standardabweichung des korrelierten Rauschens und sie wird im Verhältnis zum Einzelkanalrauschen angegeben. τ_0 beschreibt die ursprüngliche Schwelle, im Fall des Pedestals gilt also $\tau_0 = 0$. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(N_e)$ für die Anzahl an registrierten Treffern pro Ereignis N_e ergibt sich dann aus einer Superposition einer Binomialverteilung $\text{Bin}(N_e; n, p(\tau))$, welche sich aus dem Einzelstreifenrauschen ergibt und den schwankenden Schwellen.

$$P(N_e) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{Bin}(N_e; n, p(\tau)) g(\tau) d\tau \quad (8)$$

Dabei bezeichnet n die Anzahl an Streifen, also die maximal mögliche Anzahl an Treffern pro Ereignis. Die Verteilung in Gl. 8 kann dann genutzt werden, um den Mittelwert $\overline{N_e}$ und die Varianz $\text{Var}(N_e)$ zu berechnen. Die Ergebnisse dafür sind in Gl. 9 und Gl. 10 gezeigt.

$$\overline{N_e} = \sum_{N_e=0}^n N_e P(N_e) = \int_{-\infty}^{\infty} n p(\tau) g(\tau) d\tau \quad (9)$$

$$\text{Var}(N_e) = \overline{N_e^2} - \overline{N_e}^2 = \overline{N_e} (1 - \overline{N_e}) + n(n-1) \int_{-\infty}^{\infty} p(\tau)^2 g(\tau) d\tau \quad (10)$$

Am Pedestal wird dann durch $\tau_0 = 0$ und $\overline{N_e} = \frac{n}{2}$, das Integral in Gl. 10 lösbar und man erhält

$$s^2 = \frac{\sin(\alpha)}{1 - \sin(\alpha)} \quad \text{mit } \alpha = 2\pi \frac{\text{Var}(N_e) - \frac{n}{4}}{n(n-1)} \quad (11)$$

Am Pedestal, also für $p(\tau) = \frac{1}{2}$ gilt außerdem:

$$\text{Var}\left(\text{Bin}\left(n, p = \frac{1}{2}\right)\right) = np(1-p) = \overline{N_e} \left(1 - \left(\frac{\overline{N_e}}{n}\right)\right) = \frac{1}{4} \quad (12)$$

Somit erhält man am Pedestal aus der Varianz $\text{Var}(N_e)$ und dem Mittelwert $\overline{N_e}$ der Trefferanzahl pro Ereignis die Observable Γ .

$$\Gamma^2 = \frac{\sin(\tilde{\alpha})}{1 - \sin(\tilde{\alpha})} \quad \text{mit } \tilde{\alpha} = 2\pi \frac{\text{Var}(N_e) - \overline{N_e} \left(1 - \left(\frac{\overline{N_e}}{n}\right)\right)}{n(n-1)} \quad (13)$$

Das in Gl. 13 definierte Γ dient im Folgenden als Abschätzung von s am Pedestal und wird verwendet, um die Stärke des korrelierten Rauschens zu messen. Um die Aussagekraft dieses Γ -Wertes zu evaluieren, werden erneut simulierte Daten verwendet. Dabei ist besonders interessant, ob Γ für alle Werte von s eine gute Näherung ist, und wie gut diese Näherung noch ist, wenn die Messung nicht genau am Pedestal stattfand. Dies wird auf Grund der diskreten V_{cth} Punkte an denen gemessen wurde im Folgenden immer der Fall sein.

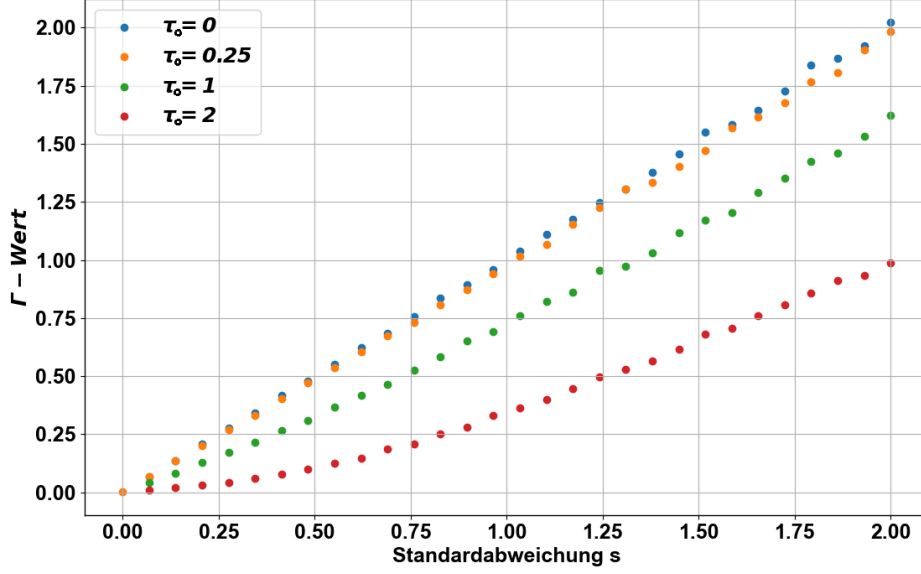


Abbildung 15: Abhängigkeit des Γ -Wertes von der Standardabweichung s des korrelierten Rauschens bei verschiedenen Schwellen τ_0 , berechnet aus simulierten Daten.

In Abb. 15 ist der berechnete Γ -Wert gegen die Standardabweichung des korrelierten Rauschens s bei verschiedenen Schwellen τ_0 aufgetragen. Dafür wurden Daten wie zuvor beschrieben mit gaußverteilterm korreliertem Rauschen für 4064 Streifen und jeweils 10000 Ereignisse generiert und aus diesen dann immer das Γ berechnet. Die Schwellen τ_0 , die dabei angewendet wurden, sind wie s in Einheiten von σ angegeben. Dabei entspricht $\tau_0 = 0.25$ der selben Occupancy wie eine $1 V_{\text{cth}}$ über dem Pedestal liegende Schwelle bei einem Rauschen von $6 V_{\text{cth}}$. Dieser Wert für τ_0 entspricht also einer oberen Abschätzung dafür, wie stark die verwendete Schwelle während der Messungen vom richtigen Pedestal abweicht. Das Γ bei $\tau_0 = 0$, also am Pedestal, stimmt sehr gut mit s überein. Γ ist also am Pedestal ein sehr gutes Maß für die Stärke der Korrelation. Auch wenn das Pedestal nicht optimal getroffen ist, wie es bei $\tau_0 = 0.25$ der Fall ist, so ist die Abweichung bei kleinen s (< 1) noch unter 3.25 %. Die Ergebnisse sollten also nur geringfügig beeinflusst werden. Bei deutlich größeren τ_0 steigt der Unterschied zwischen Γ und s allerdings stark an, weshalb dennoch darauf geachtet werden muss, dass Γ nur nah am Pedestal aussagekräftige Resultate liefert.

4.4.3 Korrelationsmatrizen

Da mit dem Γ -Wert nicht festgestellt werden kann, welche Teile des Moduls miteinander korreliert sind, und Antikorrelationen den Wert verfälschen, sodass dieser eine geringere Korrelation angibt, als tatsächlich vorliegt, wird die Methode der Korrelationsmatrizen vorgestellt, mit denen diese Untersuchung auf Korrelationen zwischen verschiedenen Bereichen des Moduls möglich wird. Der Korrelationskoeffizient der beiden Streifen x und y lässt sich dann mit Gl. 14 berechnen [32].

$$\text{cor}_{xy} = \frac{\Omega_{xy} - \Omega_x \Omega_y}{\sqrt{\Omega_x - \Omega_x^2} \sqrt{\Omega_y - \Omega_y^2}} \quad (14)$$

Dabei sind Ω_x und Ω_y jeweils die Occupancy in den Streifen x und y und Ω_{xy} ist die Occupancy von beiden Streifen, also die Anzahl von Ereignissen mit Treffern in x und

y geteilt durch die Gesamtanzahl an Ereignissen. Dies kann für jede Kombination von Streifen berechnet werden, wodurch man eine 4064×4064 Korrelationsmatrix erhält. Diese kann dann in Form einer sogenannten Heatmap wie in Abb. 16 dargestellt werden.

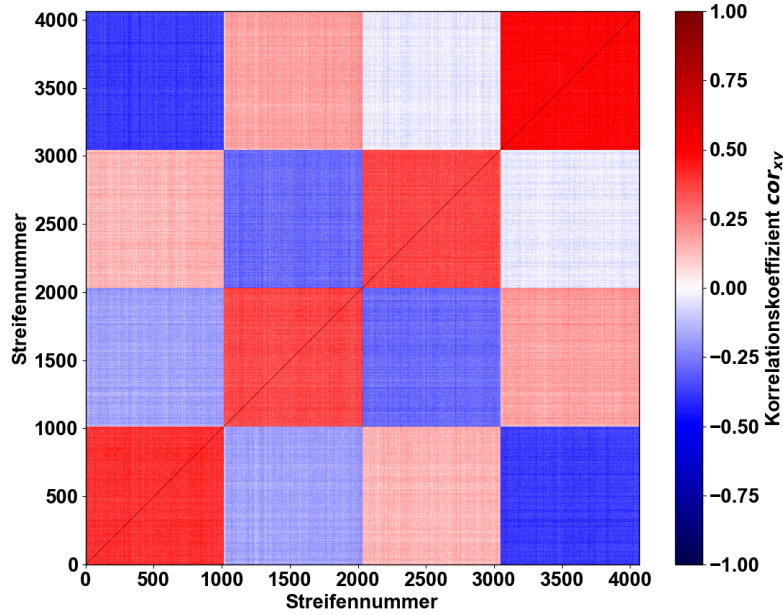


Abbildung 16: Beispiel für eine Korrelationsmatrix.

Dabei werden, um Korrelationen zwischen Ober- und Unterseite besser erkennen zu können, die Streifen so sortiert, dass die Kanalnummern 0-1016 der Unterseite des ersten Hybrids, die Nummern bis 2032 dann dessen Oberseite, und die bis 4064 dem zweiten Hybrid mit der gleichen Sortierung entsprechen. Im Idealfall wäre bei diesen Matrizen nur die Diagonale 1 und alle anderen Bereiche =0 und dementsprechend in der Abbildung weiß dargestellt. Wenn ein Bereich rot erscheint, liegt eine positive Korrelation vor. Wenn der eine Streifen einen Treffer registriert hat, ist die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass auch der andere einen Treffer gemessen hat. Diese Wahrscheinlichkeit ist bei einer Antikorrelation, die durch eine blaue Färbung erkennbar ist, reduziert, im Vergleich dazu, wenn die beiden Streifen unabhängig voneinander wären. Anhand der Korrelationsmatrizen ist es möglich, die Korrelation in den einzelnen Bereichen des Moduls separat zu bestimmen. Dies ermöglicht es beispielsweise Antikorrelationen, welche Γ verfälschen, von der Betrachtung auszuschließen, und die Stärke der Korrelation von z.B. der Oberseite und der Unterseite bei einem Hybrid zu bestimmen, was allein mit Γ nicht möglich ist. Da der Korrelationskoeffizient allerdings keine besonders anschauliche Größe ist, und es nützlich wäre wie zuvor das Verhältnis des korrelierten zum Einzelkanalrauschen zu erfahren, wird mit simulierten Daten der Zusammenhang zwischen s und dem Korrelationskoeffizienten untersucht. Dafür wurden Daten für 2032 Streifen und 10000 Ereignissen simuliert. Dabei wird das korrelierte Rauschen auf alle Streifen angewendet, wobei das s variiert wird. Für diese Daten wird dann eine Korrelationsmatrix berechnet, und der Mittelwert der Korrelationskoeffizienten bestimmt. Bei der Berechnung des Mittelwertes wird die Diagonale nicht berücksichtigt, da diese den tatsächlichen Wert verfälschen würde. Wie in Abb. 17 zu sehen, wird dieser Mittelwert dann gegen s aufgetragen, um die Abhängigkeit zwischen diesen Größen zu bestimmen.

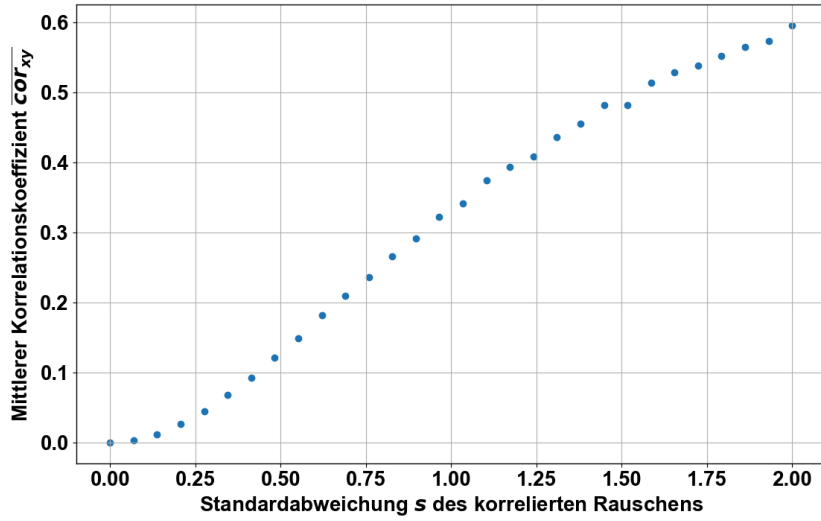


Abbildung 17: Zusammenhang zwischen dem Korrelationskoeffizienten $\overline{\text{cor}}_{xy}$ und der Standardabweichung s des korrelierten Rauschens in Einheiten von σ am Pedestal.

Die sich ergebende Kurve ist im Bereich von $s < 1$ recht stetig und deckt sich mit dem in [33] gefundenen Ergebnis. Um einen Wert für s für einen Teilbereich der Matrix zu erhalten, muss nur dessen Mittelwert bestimmt werden. Dann wird mittels einer kubischen Interpolation der dazu passende Wert von s ermittelt. Ein Beispiel dafür wie dies genutzt werden kann, um die Vergleichbarkeit von Korrelationsmatrizen, die recht ähnlich zueinander sind zu verbessern, ist in Abb. 18 gezeigt.

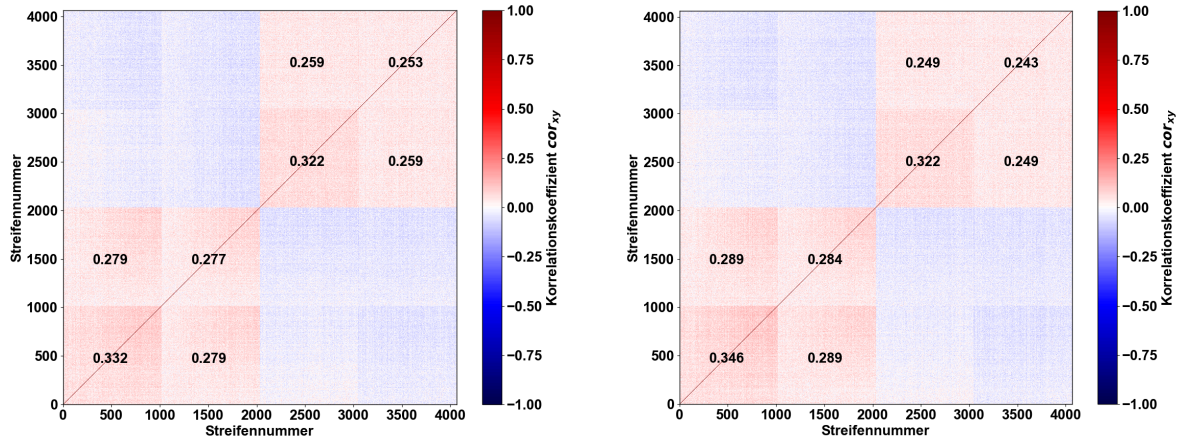


Abbildung 18: Beispiel für die Verbesserung der Vergleichbarkeit zweier Korrelationsmatrizen bei Angabe des ermittelten s . (Gleiche Messung an verschiedenen Tagen)

5 Messungen in der Einzelmodul Testbox

5.1 Verwendeter Aufbau

Um möglichst ungestörte Rauschmessungen bei Raumtemperatur an den verschiedenen Modulen und SEH-Versionen durchführen zu können, sowie den Einfluss der Widerstände an den HV-Tails und des Ground Balancers ermitteln zu können, werden Messungen in einer Aluminiumkiste durchgeführt. Der verwendete Aufbau ist in Abb. 19 gezeigt.

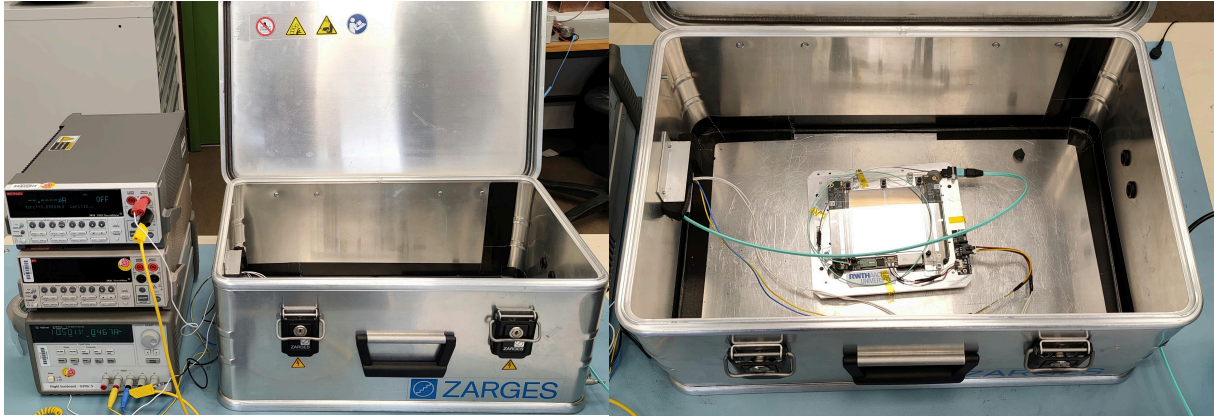


Abbildung 19: Verwendeter Aufbau für die Messungen in der Aluminiumkiste.

Die Aluminiumkiste wird verwendet, um Licht und andere elektromagnetische Strahlung abzuschirmen, die die Messung beeinflussen und verfälschen könnten. Diese Kiste wird während der gesamten Messung konstant mit Trockenluft geflutet. Das Modul wird durch ein Keithley 2400 SourceMeter Netzteil [34] mit einer Niederspannung (LV) von 10.5 V und durch ein Keithley 2410 SourceMeter Netzteil [35] mit einer Hochspannung (HV) von -350 V versorgt. Über ein Glasfaserkabel sendet der VTRx+ des Moduls Daten an eine FPGA Mezzanine Karte auf einem FC7 Board [36], welches in einem μ TCA Crate steckt. Das FC7 ist ein vom CERN entwickeltes FPGA basiertes Board, welches zur Auslese der 2S-Module verwendet wird. Es wird zum Testen der Module auch während der Serienproduktion genutzt. Im Detektor wird es allerdings nicht eingesetzt. Das FC7 ist über eine Ethernetverbindung an einen Computer angeschlossen. Vom FC7 erhält das Modul außerdem Daten wie das Clocksignal und Triggersignale.

5.1.1 Durchführung und Ablauf einer Messung

Zunächst wird die LV von 10.5 V und die HV von -350.5 V eingeschaltet. Dann wird die Routine `calibrationpedennoiseandcmNoise` der Phase-2 Acquisition and Control Framework (Ph2_ACF) [37] Software verwendet, um die eigentliche Messung durchzuführen. Ph2_ACF wurde von der Tracker Gruppe des CMS-Experiments zur Auslese der Module für Tests, entwickelt. Die Routine führt dabei verschiedene Unter Routinen nacheinander aus. Zu Beginn werden die CBCs des Moduls durch die Routine `Calibration` kalibriert, damit alle Streifen möglichst gleich auf Signale reagieren. Dafür wird V_{cth} (vgl. 4.2) so eingestellt, dass die Streifen eines CBC im Mittel eine Occupancy von 50% haben, bevor dann V_{offset} benutzt wird, damit jeder Streifen individuell eine Occupancy von 50% hat. Danach wird die `PedeNoise` Routine ausgeführt, welche den Schwellen-Scan durchführt. Dabei wird der V_{cth} Wert schrittweise verringert oder erhöht und die Occupancy für jeden Wert gemessen, bis die Occupan-

cy eine gewisse Schwelle unter- bzw. überschreitet. Für jeden V_{cth} Wert werden 1000 Zufallstriggersignale gesendet, sodass die Occupancy aus je 1000 Ereignissen berechnet wird. Dann werden noch fünf CBC Register, darunter `HIP&TestMode` und `Pipe&StubInpSel&Pwidth` zurück gesetzt, bevor die Routine `CMNoise` ausgeführt wird. Dabei kann ein gewisser V_{cth} Bereich eingestellt werden. Bei jedem Wert in diesem Bereich werden dann mit der maximal möglichen Frequenz von 100 kHz, 1000 Triggersignale vom FC7 gesendet. Bei jedem Triggersignal werden alle Trefferdaten ausgelesen und gespeichert. In den Histogrammen für hohe Occupancies wurden, wie schon in [38] unerwartete Populationen hin zu einer niedrigen Anzahl an Treffern pro Ereignis beobachtet wurden, was in Abb. 20 gezeigt ist.

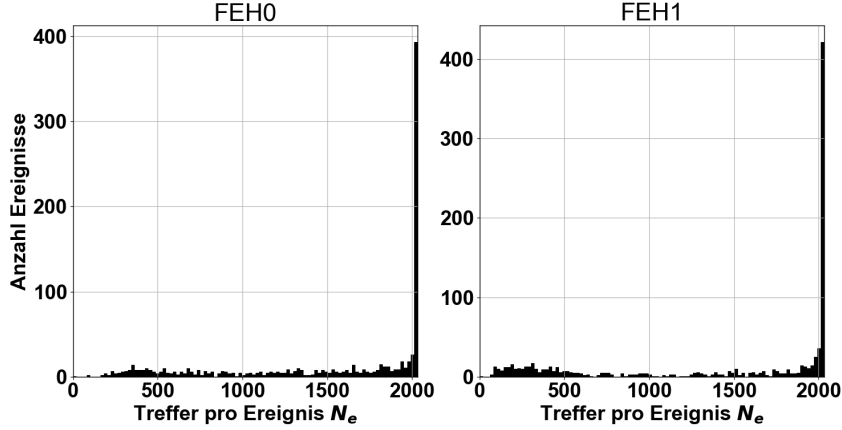


Abbildung 20: Histogramme mit erhöhter Anzahl an Ereignissen mit Wenigen Treffern, bei hohem $V_{\text{cth}} = 610$.

Durch direkte Berechnung der Occupancy Ω aus den Trefferdaten, erhält man S-Kurven wie die in Abb. 21 gezeigte. Die Unsicherheiten ergeben sich, da es sich bei der Anzahl an Treffern um eine Binomialverteilung handelt, durch Gl. 15. Dabei ist n die Anzahl an gesendeten Triggersignalen, welche in diesem Fall 1000 beträgt.

$$\sigma_{\Omega} = \frac{\sqrt{\Omega(1 - \Omega)}}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

Diese fallen allerdings zu niedrigen V_{cth} nicht, wie erwartet auf 0 ab, sondern zeigen eine starke Schwankung. Außerdem scheint die Occupancy nicht bis auf 1 anzusteigen, die gezeigte Kurve entspricht also nicht der erwarteten Fehlerfunktion.

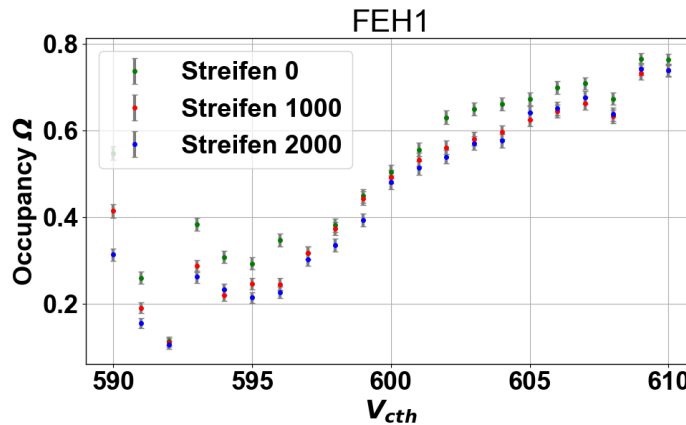


Abbildung 21: Beispiel für unsaubere S-Kurven, die aus Trefferdaten berechnet wurden

Da die S-Kurven aus dem Scan in PedeNoise keine Auffälligkeiten zeigen und das Einzige, was sich zwischen den beiden Messungen ändert, die bereits angesprochenen Register sind, werden diese einzeln nicht mehr zurückgesetzt, um herauszufinden, was diese Störung verursacht. Die Resultate sind in Abb. 23 dargestellt. Die beiden Register HIP&TestMode und Pipe&StubInpSel&Pwidth scheinen die S-Kurven zu stören, während die anderen keinen Einfluss auf deren Qualität haben.

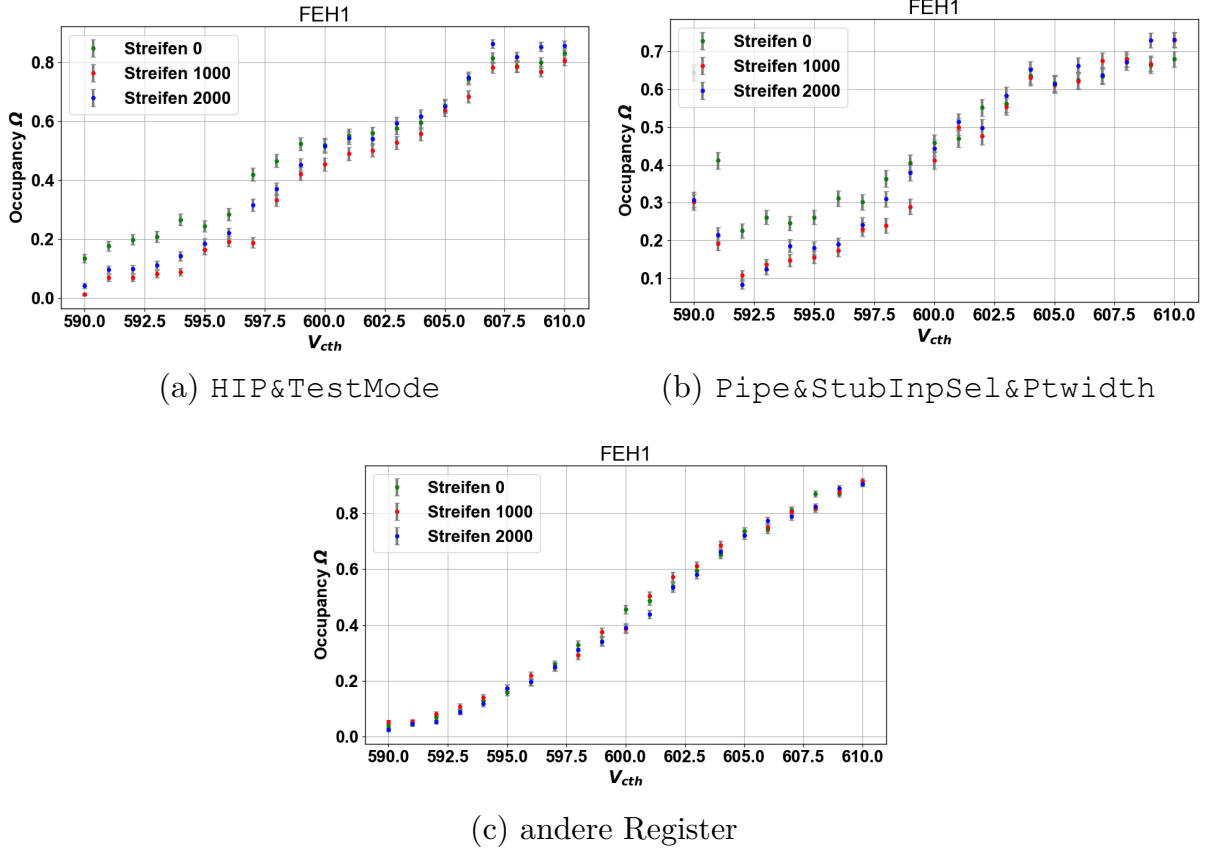


Abbildung 23: Berechnete S-Kurven wobei nur HIP&TestMode und nur Pipe&StubInpSel&Pwidth zurückgesetzt wird und bei (c) werden nur die übrigen Register zurückgesetzt.

Das Register HIP&TestMode steuert die Unterdrückung von High ionising particle Ereignissen. Bei diesen treten Signale auf, welche lang genug sind, damit sie als Treffer bei zwei Ereignissen zählen. Um dies zu verhindern, kann der Ausgang auf 0 gezwungen werden. Pipe&StubInpSel&Pwidth wird unter anderem verwendet um festzulegen welche Daten für die Stub Bestimmung verwendet werden (z.B. mit 40 MHz oder mit HIP Unterdrückung) [30]. Ohne das Zurücksetzen der Register erhält man neben sauberen S-Kurven auch keine von den beschriebenen Populationen in den Histogrammen.

5.2 Regular Design SEH

Das Regular Design SEH wurde für die Messung mit dem Kickoffmodul 2S_18_5_AAC-00104 verbunden und dann wie in 5.1.1 beschrieben, vermessen. Besonderer Fokus liegt bei dieser Messung auch darauf, welchen Einfluss der Ground Balancer auf das Rauschen und dessen Korrelation hat. Das Rauschverhalten der Streifen für Messungen mit und ohne Ground Balancer ist in Abb. 24 gezeigt.

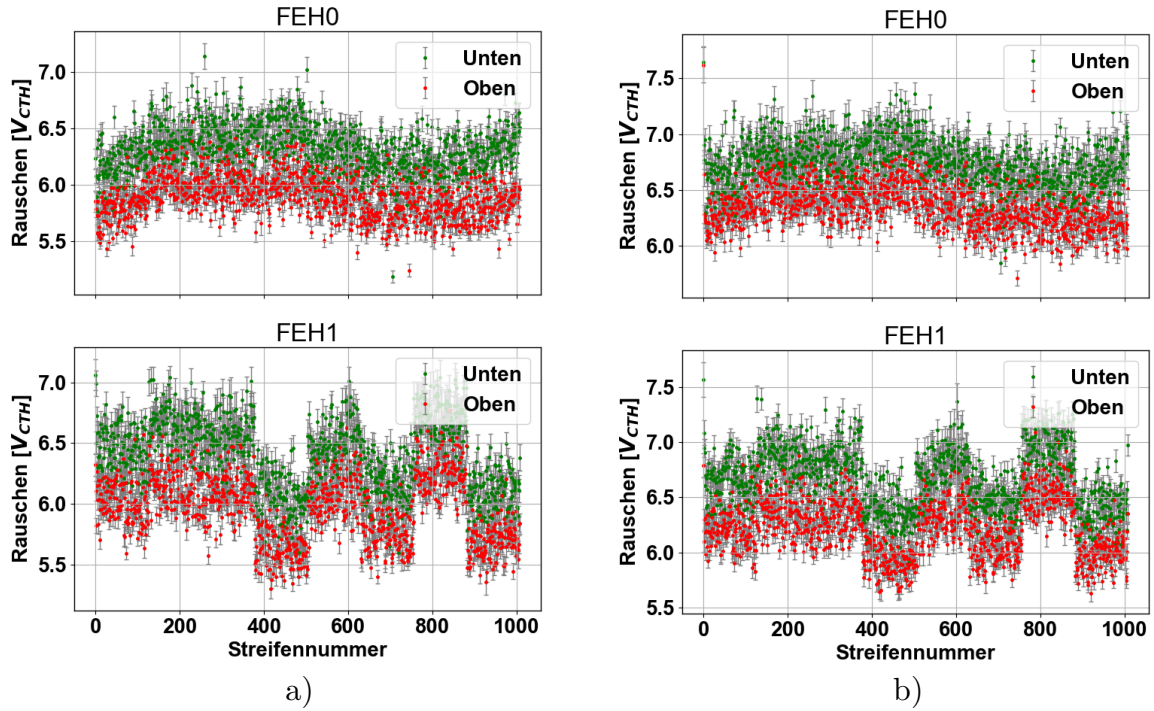
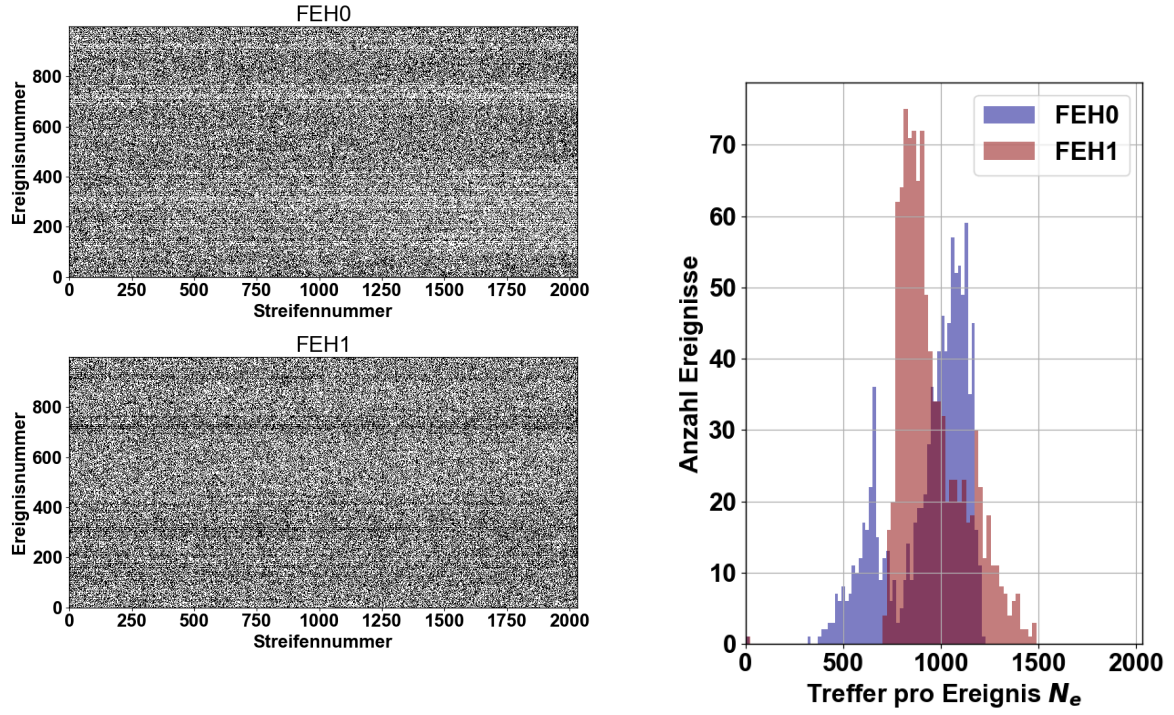


Abbildung 24: Rauschen im Modul mit Regular Design SEH a) mit angeschlossenem Ground Balancer und b) ohne.

Die Abbildung zeigt, dass das Rauschen in den CBCs des linken Hybriden (FEH1) unterschiedlich stark ist, wobei es zwei unterschiedlich hohe Niveaus gibt. Da dies auch beim Split-Plane Design zu sehen sein wird, kann dies nicht auf das SEH zurückzuführen sein. Möglicherweise ist dieses unterschiedliche Rauschverhalten auf Schwankungen im Herstellungsprozess zurückzuführen. Des Weiteren ist deutlich zu erkennen, dass das mittlere Rauschen mit $6.15 V_{cth}$ mit dem Balancer etwa 5% geringer ist, als ohne ($6.50 V_{cth}$). Der dritte auffällige Effekt ist, dass die Streifen auf der Unterseite ein um etwa ($0.45 V_{cth}$) erhöhtes Rauschen haben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die FEH um die Abstandshalter gefaltet werden, und die Streifen vom unteren Sensor auch auf der Unterseite des FEH gebonded werden, sodass die Distanz zum CBC größer ist, wodurch zusätzliches Rauschen auftritt.

Um die Art des Rauschens weiter zu untersuchen, werden die Hitmaps und Histogramme, die in 4.4.1 beschrieben wurden, verwendet. Diese sind für die Messung mit dem Ground Balancer in Abb. 25 gezeigt. Die Verteilung besteht für FEH0 ungefähr aus zwei annähernd gaußverteilten Verteilungen. Vermutlich entspricht der höhere der beiden Peaks dem normalen Rauschen, der kleinere hingegen könnte auf äußere oder modulinterne Störungen zurückzuführen sein. Auch die Daten für FEH1 ergeben eine vergleichbare Verteilung, allerdings sind die einzelnen gaußähnlichen Distributionen überlagert.



(a) Hitmaps

(b) Histogramme

Abbildung 25: Hitmaps der gemessenen Ereignisse und dazugehörige Histogramme der Trefferanzahlen für die beiden FEH am Pedestal $P = 601 V_{\text{cth}}$ für die Messung mit dem Ground Balancer.

Die beschriebenen Störungen sind auch in den Hitmaps erkennbar, für FEH0 sind sie als helle Streifen und Strukturen über mehrere Ereignisse hinweg zu sehen. Dies lässt sich auch mit Abb. 26 zeigen.

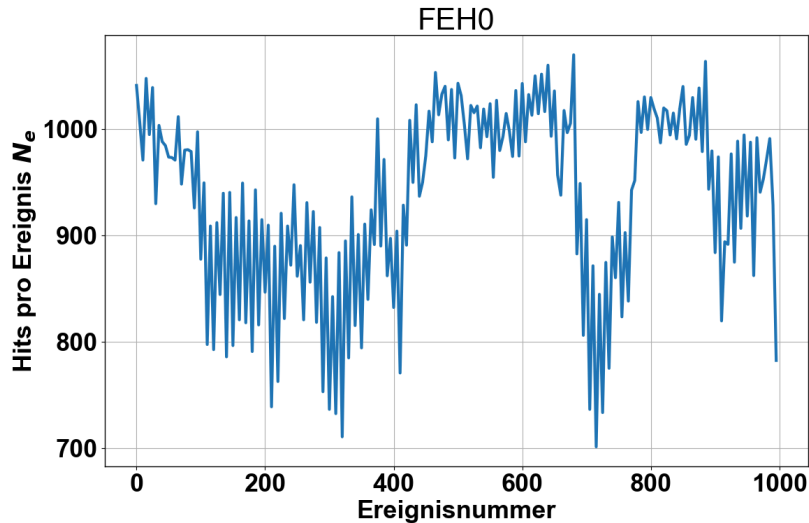


Abbildung 26: Zeitlicher Verlauf der Trefferanzahlen pro Ereignis, gemittelt über jeweils 5 Ereignisse

Dort sind die Treffermengen von je fünf Ereignisse zu einem Datenpunkt gemittelt, um größere Strukturen besser erkennen zu können. Die zuvor beobachteten Strukturen zeigen sich in den entsprechenden Bereichen (bei Ereignis 100-400 und etwa bei Ereignis

700) durch deutliche Einbrüche in der Anzahl an Treffern pro Ereignis. Sie weisen allerdings keine erkennbare Periodizität auf. Zudem sorgt die Störung für eine Korrelation der Streifen eines FEH, und für eine Antikorrelation zwischen den beiden Hybriden, was daran zu erkennen ist, dass FEH0 beispielsweise ungefähr bei Ereignis 700 besonders wenig Treffer registriert (zu sehen an dem hellen Streifen) während FEH1 dort besonders viele Treffer registriert. Dies erklärt auch, warum die beiden Histogramme in Abb. 25 spiegelsymmetrisch zueinander zu sein scheinen.

Wenn der Ground Balancer entfernt wird, nimmt, wie anhand des deutlich stärkeren Streifenmusters in Abb. 27 ersichtlich ist, die Korrelation innerhalb der Hybride, sowie die Antikorrelation zwischen den beiden deutlich zu.

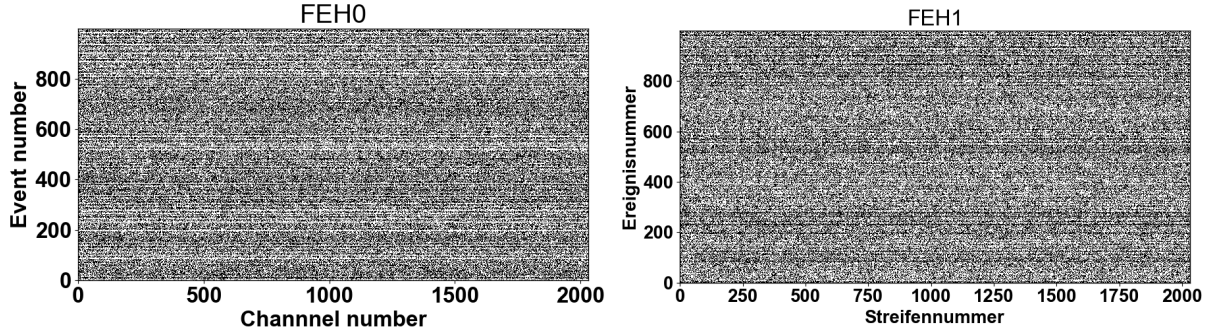


Abbildung 27: Hitmaps für die Messung ohne Ground Balancer.

Wenn in einem Hybrid wenig Treffer auftreten, werden im anderen viele registriert. Einbrüche bei den Trefferzahlen über mehrere, die zuvor noch deutlich erkennbar waren, können allerdings nicht mehr beobachtet werden, da sie von dem korrelierten Rauschen überlagert werden. Dies ist in Abb. 28 gezeigt

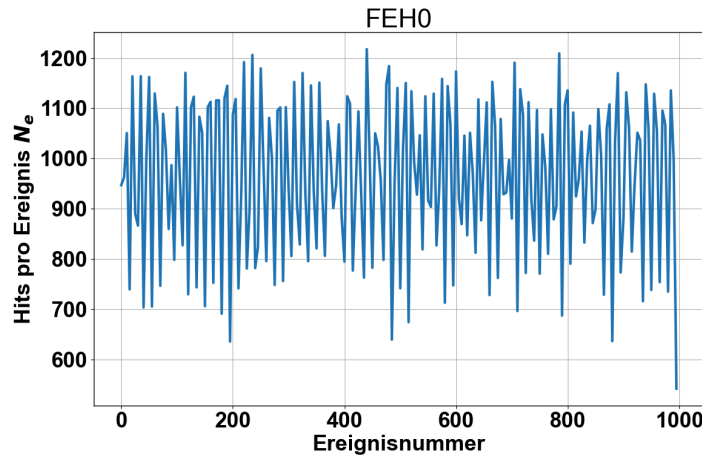


Abbildung 28: Zeitlicher Verlauf der Trefferanzahlen pro Ereignis, gemittelt über jeweils 5 Ereignisse für eine Messung mit dem Regular Design SEH und dem Ground Balancer.

Das zuvor beobachtete Korrelationsverhalten lässt sich auch in der zu der Messung ohne Ground Balancer gehörigen Korrelationsmatrix, welche in Abb. 29 gezeigt ist, erkennen. Dort sind die Viertel oben-links und unten-rechts (Streifennummern $[0 - 2032] \times [2032 - 4064]$ und anders herum), welche der Korrelation zwischen Streifen von verschiedenen FEH entsprechen, leicht blau gefärbt, was eine negative Korrelation aufzeigt.

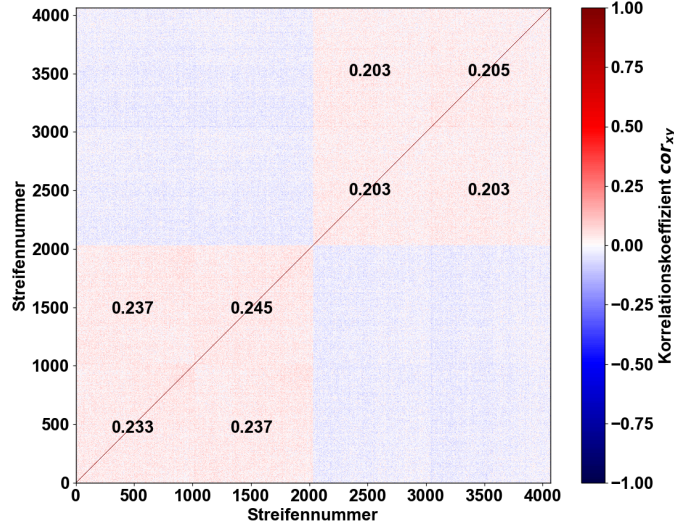


Abbildung 29: Korrelationsmatrix am Pedestal $P = 601 V_{\text{cth}}$ bei der Messung mit einem Regular Design SEH mit Ground Balancer. (Die Zahlen innerhalb des Diagramms sind die Γ -Werte für die jeweiligen 1016×1016 Quadrate in denen sie sich befinden)

Die anderen beiden Viertel (Streifennummern $[0 - 2032] \times [0 - 2032]$ und $[2032 - 4064] \times [2032 - 4064]$) sind dagegen leicht hellrot, was eine leichte positive Korrelation andeutet. Das bedeutet, dass z.B. jeder Streifen im Bereich 0-2032 mit jedem anderen in diesem Bereich positiv korreliert ist. Die beiden Hybride sind aber nicht gleich stark korreliert. Denn während man aus vier Messungen bei FEH0 für Γ , also das Verhältnis von Einzelkanalrauschen zu korreliertem Rauschen, $\Gamma_{\text{FEH0}} = 0.250 \pm 0.014$ erhält, beträgt dieses bei FEH1 $\Gamma_{\text{FEH1}} = 0.208 \pm 0.014$. Der Unterschied zwischen den beiden Hybriden ist mit 3σ also signifikant. Die mittlere, relative Abweichung beträgt 6.2%. Diese wird im Folgenden für alle Messungen angenommen, die nur einmal durchgeführt wurden. Wie außerdem noch erkennbar ist, ist die Korrelation ansonsten recht homogen auf allen Streifen eines Hybriden, egal welcher Sensor (weniger als 1σ Schwankung). Dass die Korrelation bei Entfernung des Ground Balancers zunimmt, kann auch in der Korrelationsmatrix in Abb. 30 beobachtet werden.

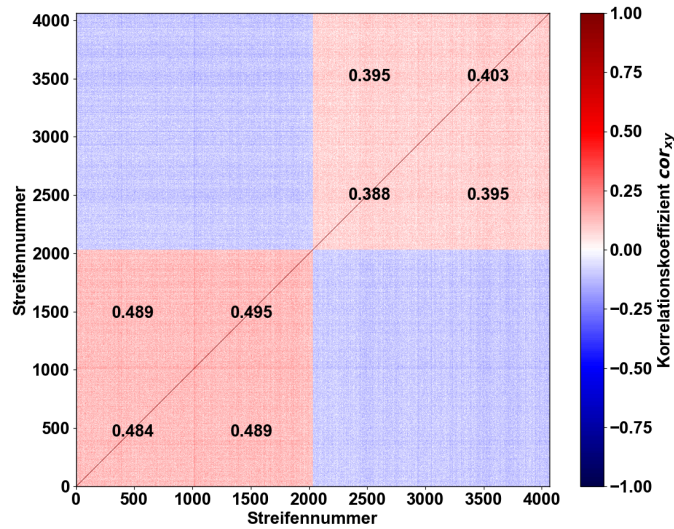


Abbildung 30: Korrelationsmatrix am Pedestal $P = 601 V_{\text{cth}}$ bei der Messung mit einem Regular Design SEH ohne Ground Balancer.

Auch hier fällt auf, dass die Hybride intern recht homogen korreliert sind, allerdings ist die Stärke der Korrelation in den beiden Hybriden unterschiedlich und, gegenüber der Messung mit dem Ground Balancer, um 95% bei FEH0 und 90% bei FEH1 erhöht. Des Weiteren ist hier erneut die Antikorrelation zwischen den Hybriden erkennbar, wobei auch diese angestiegen ist.

Um die Aussagekraft des Γ -Wertes zu evaluieren, kann Gl. 16 und die theoretische Berechnung des Einzelkanalrauschens N_{random} in 4.1 genutzt werden, um aus dem gemessenen Gesamtrauschen N_{tot} den Γ Wert zu berechnen. Wenn man den selben Wert erhält, wie in der Messung, verifiziert dies die Aussagekraft von Γ .

$$\Gamma_{\text{test}} = \frac{N_{\text{tot}}}{N_{\text{random}}} - 1 \quad (16)$$

Für die Rechnung muss N_{random} noch in V_{cth} umgerechnet werden. Dafür wird der Faktor $1 V_{\text{cth}} = 156 e$ verwendet [39]. So erhält man $N_{\text{random}}(\text{oben}) = 4.74 V_{\text{cth}}$ und $N_{\text{random}}(\text{unten}) = 5.00 V_{\text{cth}}$. Die gemessenen Werte von N_{tot} und die berechneten Ergebnisse für Γ_{test} , sowie die mittleren Gemessenen Γ Werte $\overline{\Gamma_{\text{mess}}}$ (vgl. Abb. 29 und Abb. 30) aus vier Messungen sind in Tab. 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Mit Gl. 16 berechnete Werte für Γ_{test} und die gemessenen Werte für $\overline{\Gamma_{\text{mess}}}$, ermittelt aus vier Messungen, für das Regular Design SEH mit und ohne Ground Balancer (im Fall ohne Ground Balancer wurde nur eine Messung von Γ_{mess} durchgeführt und darauf eine relative Unsicherheit von 6.2% angenommen).

Sensorbereich	$N_{\text{tot}} [V_{\text{cth}}]$	Γ_{test}	$\overline{\Gamma_{\text{mess}}}$	Ground Balancer
FEH0 unten	6.32	0.255	0.243 ± 0.013	Ja
FEH0 oben	5.89	0.243	0.258 ± 0.016	Ja
FEH1 unten	6.41	0.282	0.211 ± 0.017	Ja
FEH1 oben	5.96	0.257	0.206 ± 0.013	Ja
FEH0 unten	6.75	0.350	0.484 ± 0.030	Nein
FEH0 oben	6.35	0.340	0.495 ± 0.031	Nein
FEH1 unten	6.67	0.334	0.388 ± 0.024	Nein
FEH1 oben	6.22	0.312	0.403 ± 0.025	Nein

Wie die Tabelle zeigt, stimmt der mittlere Γ_{test} Wert für FEH0 mit dem Ground Balancer mit 0.249, im Rahmen der Unsicherheiten, gut mit dem gemessenen Wert (0.250 ± 0.014) überein. Dies ist für FEH1 nicht der Fall, da $\overline{\Gamma_{\text{test}}} = 0.270$ um 4.4σ vom gemessenen Wert (0.208 ± 0.014) abweicht. Die Abweichung kann darüber erklärt werden, dass die Annahme, dass das Einzelkanalrauschen für alle CBC gleich ist, falsch zu sein scheint. Denn in Abb. 24 wurde beobachtet, dass das Rauschen in FEH1 stark von CBC zu CBC schwankt. Es konnte aber keine erhöhte Korrelation bei diesen CBC gemessen werden, weshalb die Schwankung des Gesamtrauschens nur durch eine CBC abhängige Schwankung des Einzelkanalrauschens erklärt werden kann. Es ist also möglich, dass der Γ -Wert auch für FEH1 das richtige Verhältnis zwischen dem korrelierten und dem Einzelkanalrauschen angibt, dies lässt sich aber nicht bestätigen. Wenn man eine relative Unsicherheit von 6.1% annimmt, die beim Regular Design mit Ground Balancer gemessen wurde, weichen die gemessenen Werte für $\overline{\Gamma}$, bei der Konfiguration ohne Ground Balancer, für FEH0 um $4,8\sigma$ und für FEH1 um 3σ von den berechneten ab. Γ scheint

für diese Konfiguration also nicht das richtige Verhältnis von Einzelkanalrauschen zu korreliertem Rauschen anzugeben. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Definition von Γ nur für Gaußförmiges korreliertes Rauschen gültig ist, und wie in den Histogrammen in Abb. 31 gezeigt ist, weichen die beobachteten Verteilungen deutlich stärker davon ab als mit dem Ground Balancer. Insgesamt scheint Γ also nur bei FEH0 und nur bei nicht zu großen Abweichungen von gaußverteilterm Rauschen zuverlässig das Verhältnis zwischen Einzelkanal- und korreliertem Rauschen anzugeben. Es kann dennoch für alle Konfigurationen weiter als Maß für die Korrelationsstärke verwendet werden.

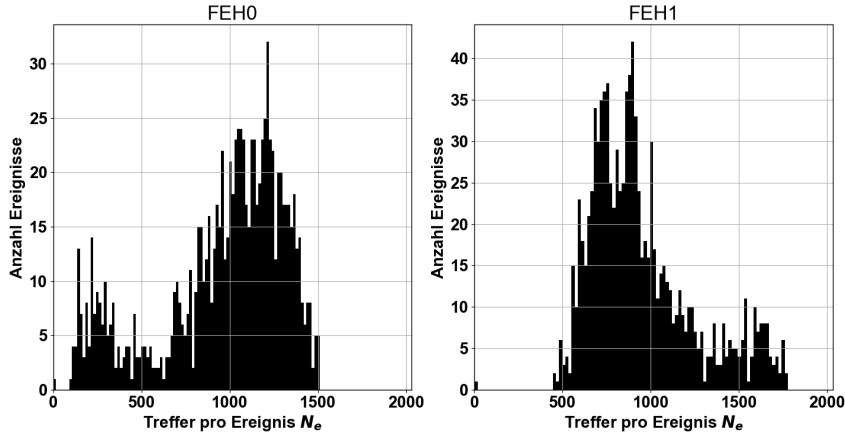
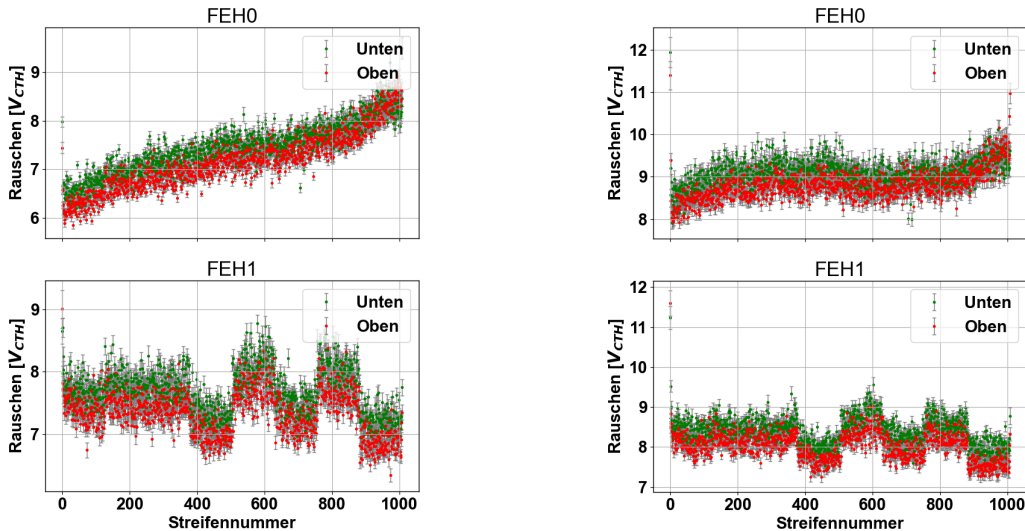


Abbildung 31: Histogramme der Treffer pro Ereignis für eine Messung mit dem Regular Design SEH und ohne Ground Balancer.

5.3 Split-Plane Design SEH

Wie zuvor beschrieben, wurde das Split-Plane Design entwickelt, um die Erdung in eine verrauschte, unter den DC-DC Konvertern und eine saubere, für die FEHs zu entkoppeln. Daher würde man erwarten, dass Rauschen und die Korrelation sinken sollte. Jedoch zeigt das in Abb. 32 dargestellte Rauschverhalten, dass dieses deutlich höher als beim Regular Design ist (vgl. Abb. 24).



(a) Mit Ground Balancer

(b) Ohne Ground Balancer

Abbildung 32: Rauschen im Modul mit Split-Plane Design SEH mit angeschlossenem Ground Balancer und ohne.

Das Rauschen mit dem Ground Balancer beträgt im Mittel etwa $7.41 V_{\text{cth}}$ und ohne etwa $8.58 V_{\text{cth}}$, wobei der Unterschied zwischen oberem und unterem Sensor mit $0.3 - 0.35 V_{\text{cth}}$ etwas geringer als beim Regular Design ist. Die Hitmaps in Abb. 33 zeigen besonders die stark ausgeprägten Streifenstrukturen, welche auf eine erhöhte Korrelation hindeuten. Diese ist ohne Ground Balancer stärker als mit. Außerdem ist ein Anstieg der Rauschens in FEH0 zu hohen Streifennummern, also zur Seite mit dem SEH, messbar. Dieser Anstieg ist mit dem Ground Balancer (ca. $2 V_{\text{cth}}$) etwa doppelt so stark wie ohne (ca. $1 V_{\text{cth}}$) (vgl. Abb. 32).

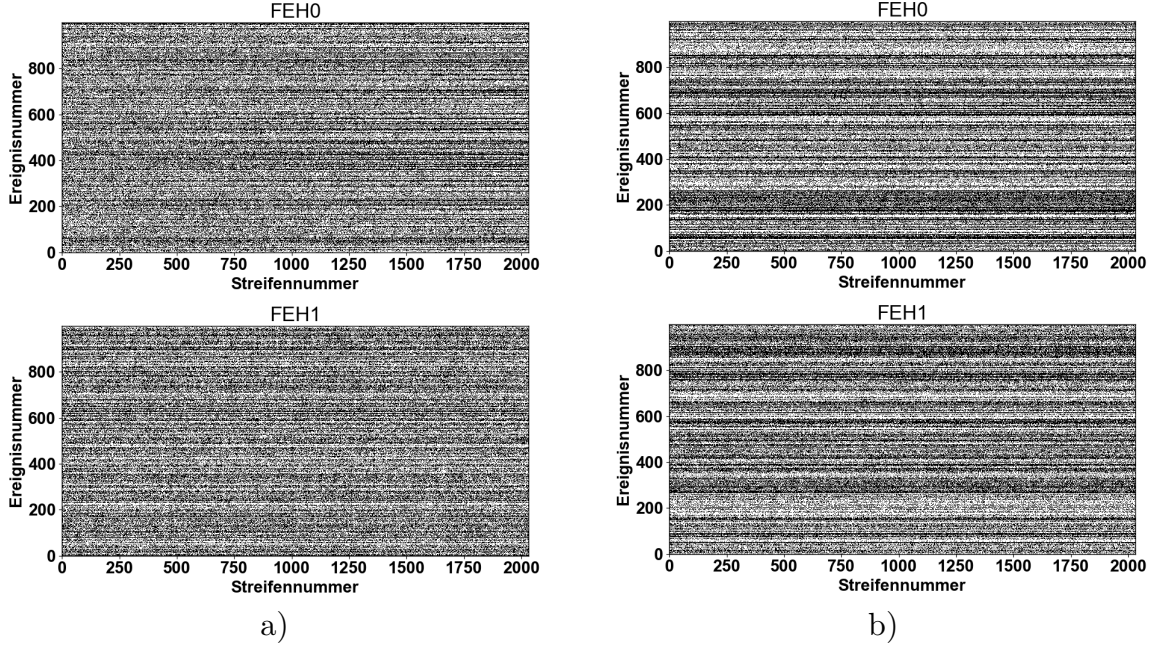
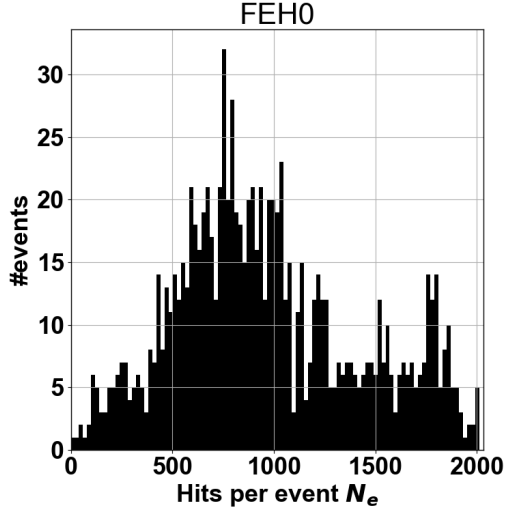
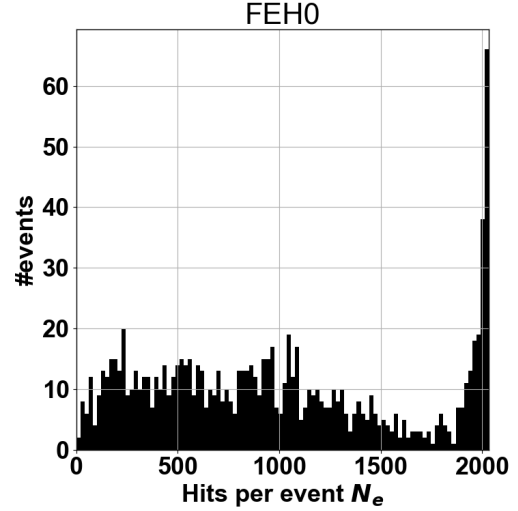


Abbildung 33: Hitmaps für Messungen mit einem Split-Plane Design SEH und a) angeschlossenem Ground Balancer und b) ohne.

Auch hier lässt sich, wie bereits beim Regular Design bei genauer Betrachtung auch die Antikorrelation zwischen den Hybriden beobachten. Allerdings können hier keine Ereignisbergreifenden Strukturen klar erkannt werden, da sie auch hier durch die starke Korrelation überlagert werden (ähnlich wie bei Abb. 28). Die in Abb. 34 dargestellten Histogramme zeigen sehr breite Verteilungen, egal ob mit oder ohne Ground Balancer, was erneut auf starke Korrelation hindeutet.



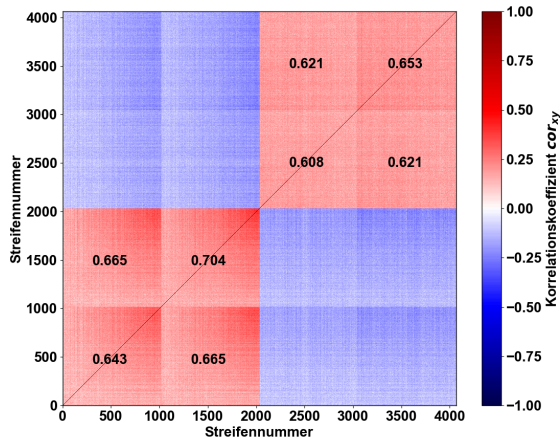
(a) Mit Ground Balancer



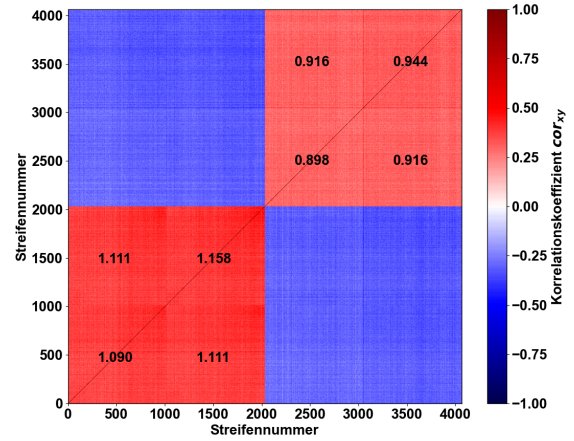
(b) Ohne Ground Balancer

Abbildung 34: Histogramme der Trefferzahlen pro Ereignis für Messungen mit einem Split-Plane Design SEH, sowie angeschlossenem Ground Balancer und ohne.

Die Verteilungen bei der Messung ohne Ground Balancer unterscheiden sich stark von denen beim Regular Design. Sie weichen außerdem deutlich von Gaußverteilungen ab. Der Grund dafür, dass ohne Balancer so viele Ereignisse mit ungefähr keinen Treffern in FEH1 und etwa allen in FEH0 auftreten, sowie die Ursache für die Verteilung allgemein, lässt sich ohne weitere Analysen nicht bestimmen. Dies würde den Rahmen dieser Arbeit allerdings überschreiten. Die beschriebenen starken Korrelationen sind auch in den Korrelationsmatrizen in Abb. 35 deutlich erkennbar.



a)



b)

Abbildung 35: Korrelationsmatrizen für Messungen mit einem Split-Plane Design SEH und a) angeschlossenem Ground Balancer und b) ohne.

Einerseits erkennt man wie schon beim Regular Design, dass der Ground Balancer sowohl die Korrelation, als auch die Antikorrelation deutlich reduzieren kann. Andererseits erkennt man, dass bei der Messung mit dem Ground Balancer im rechten FEH (FEH0) die Korrelation zu hohen Streifennummern hin ansteigt. Diese Streifen liegen näher am Service Hybrid, auf dem sich auf der rechten Seite der DC-DC Konverter befindet. Vermutlich sorgt dieser für zusätzliches, korreliertes Rauschen in den nah gelegenen Streifen. Da das korrelierte Rauschen nicht gaußverteilt zu sein scheint, kann Γ nicht zuverlässig das Verhältnis zwischen Einzelkanal- und korreliertem Rauschen

angeben, aber es kann dennoch zum Vergleich der Korrelationsstärke verwendet werden. Der Ground Balancer bewirkt, wie bereits beim Regular Design SEH, in etwa eine Halbierung des $\bar{\Gamma}$ von 1.118 auf 0.669 für FEH0 und von 0.919 auf 0.626 bei FEH1. Im Mittel ist Γ beim Split-Plane SEH und Ground Balancer um etwa 185%, verglichen mit dem Regular Design SEH mit Ground Balancer, erhöht. Das Split-Plane Design zeigt also eine deutlich erhöhte Korrelation.

5.4 Prototypmodul

Beim Prototypmodul ist es interessant, welchen Einfluss die in 3.1 angesprochenen Widerstände auf das Rauschen und seine Korrelation haben. Außerdem kann untersucht werden, wie effektiv die weiteren Verbesserungen des SEH im Bezug auf das Rauschen waren. Das Rauschverhalten des Moduls mit und ohne die Widerstände an den HV-Tails, ist in Abb. 36 gezeigt.

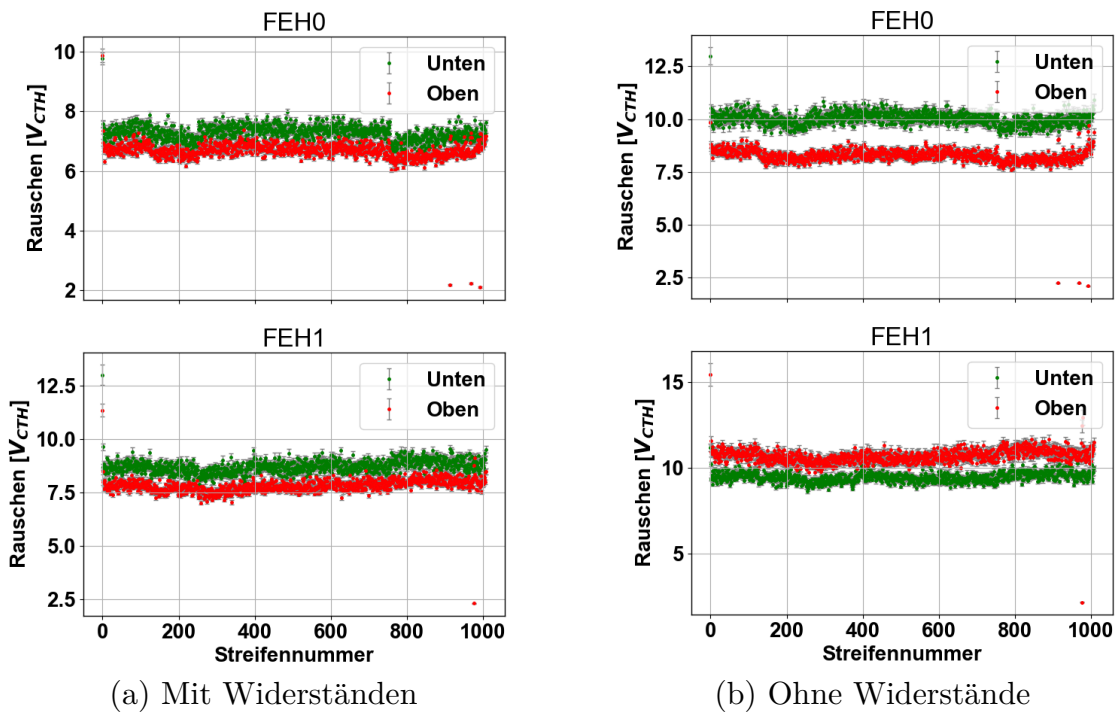


Abbildung 36: Rauschen im Prototypmodul a) mit Widerständen in den HV-Tails und b) ohne.

Die Rauschkurven unterscheiden sich stark von den Messungen mit dem Kickoff Modul. Dies kann dadurch begründet werden, dass dieses Modul andere FEH und somit andere CBCs hat, wodurch das Rauschen verändert ist. Weiterhin stechen einige Streifen durch sehr hohes und andere durch sehr niedriges Rauschen hervor. Dies deutet darauf hin, dass diese Streifen nicht korrekt ausgelesen werden können und, dass diese möglicherweise defekt sind. In den Histogrammen, die in Abb. 37 gezeigt sind, erkennt man Verteilungen, die in etwa stark verbreiterten Gaußverteilungen entsprechen.

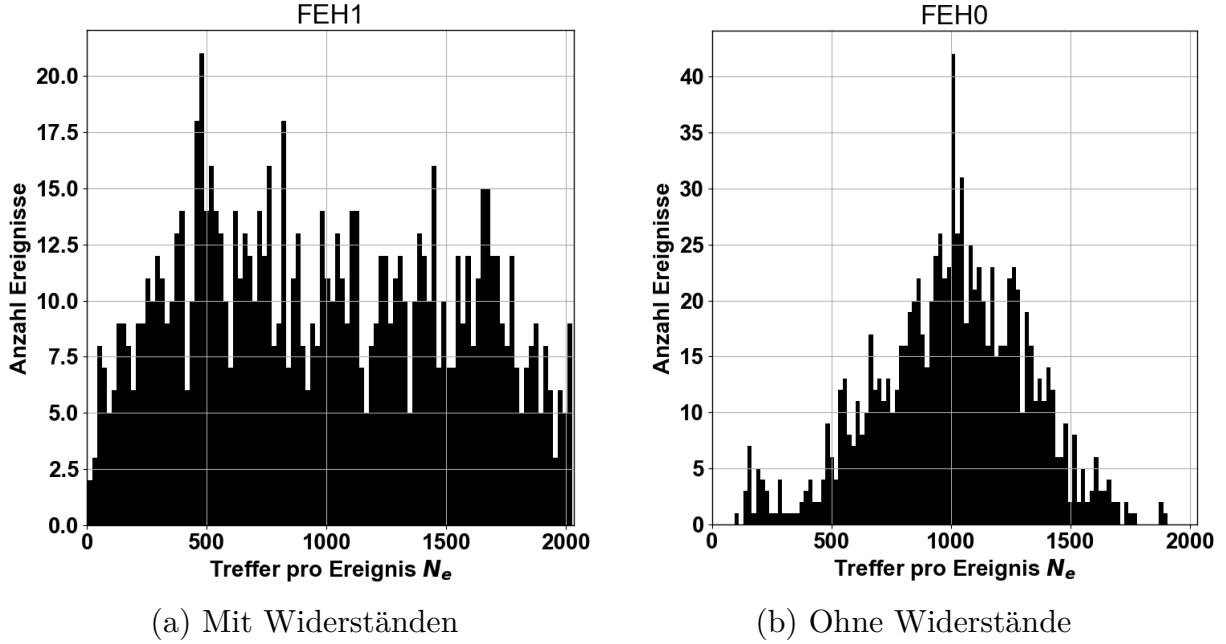


Abbildung 37: Histogramme der Trefferanzahl pro Ereignis für die Messungen mit dem Prototypmodul mit Widerständen in den HV-Tails und ohne.

Des Weiteren deutet die breitere Verteilung bei der Messung mit Widerständen in den HV-Tails an, dass die Korrelation dort stärker wäre, als ohne die Widerstände und, dass die Widerstände das Rauschverhalten verschlechtern würden. Die vermeintlich niedrigere Korrelation bei der Messung ohne Widerstände, kann durch eine Antikorrelation erklärt werden. Dies liegt daran, dass in den Histogrammen sowohl die Daten der Ober- aber auch die der Unterseite einbezogen werden. Wenn durch die starke Korrelation, zum Beispiel in der Unterseite, sehr viele Treffer auftreten, gibt es auf der Oberseite durch die Antikorrelation sehr wenige, sodass im Mittel alle Ereignisse wieder eine Occupancy von ca. 50 % haben. Dadurch wird die Verteilung deutlich schmaler. Dass eine Antikorrelation zwischen Ober- und Unterseite des Moduls vorliegt, wird anhand der Korrelationsmatrix in Abb. 38 deutlich.

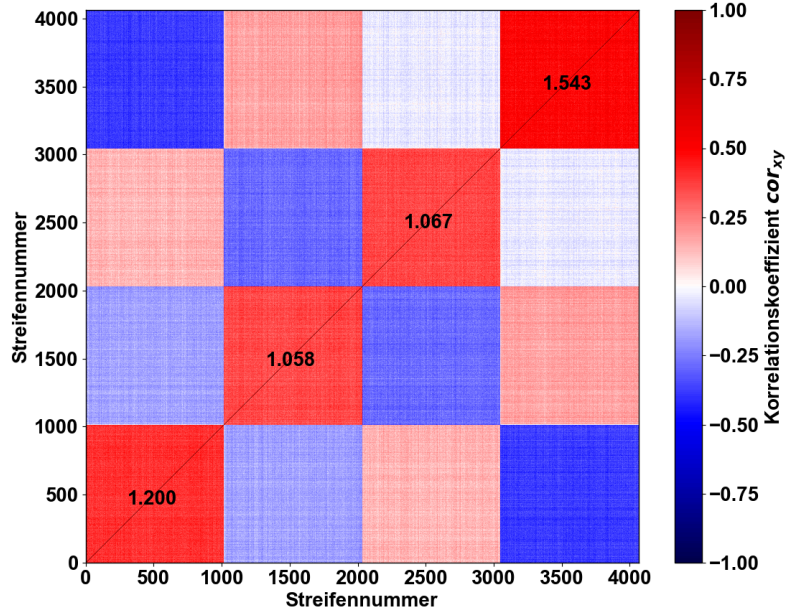


Abbildung 38: Korrelationsmatrix am Pedestal $P = 599 V_{\text{cth}}$ bei der Messung mit dem Prototypmodul ohne Widerstände in den HV-Tails

Die Korrelation innerhalb einer Hälfte jedes Sensors ist allerdings mit Werten von $\Gamma = 1.058 - 1.543$, sehr stark ausgeprägt. Bis auf die Oberseite von FEH0 zeigt jeder dieser vier Bereiche sogar eine höhere Korrelation als beim Split-Plane SEH ohne Ground Balancer. Wenn die 100Ω Widerstände in die HV-Tails eingebaut werden, wird die Antikorrelation zwischen Ober- und Unterseite aufgehoben, wie man anhand von Abb. 39 sehen kann.

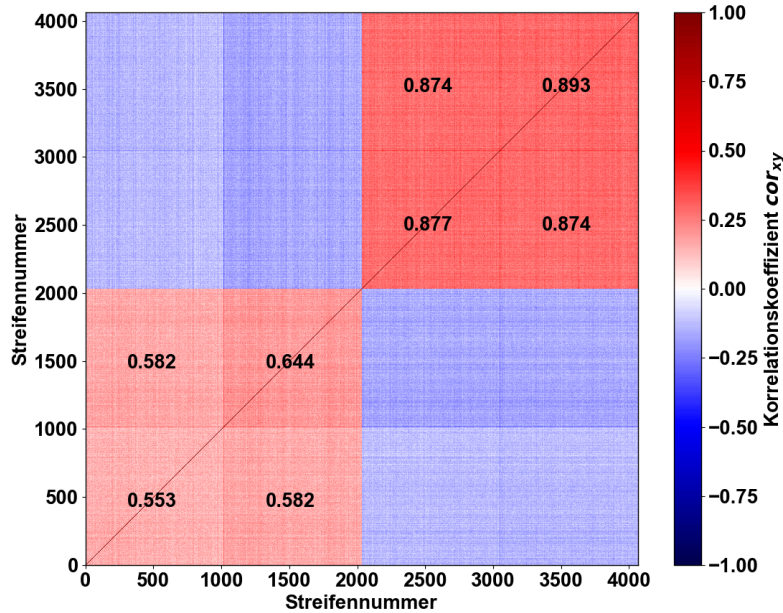


Abbildung 39: Korrelationsmatrix am Pedestal $P = 600 V_{\text{cth}}$ bei der Messung mit dem Prototypmodul mit Widerständen in den HV-Tails

Stattdessen ist ein ähnliches Muster wie bei den anderen beiden Modulkonfigurationen, also eine relativ homogene, positive Korrelation innerhalb der einzelnen Hybride und eine Antikorrelation zwischen diesen erkennbar. Es können simulierte Daten verwendet

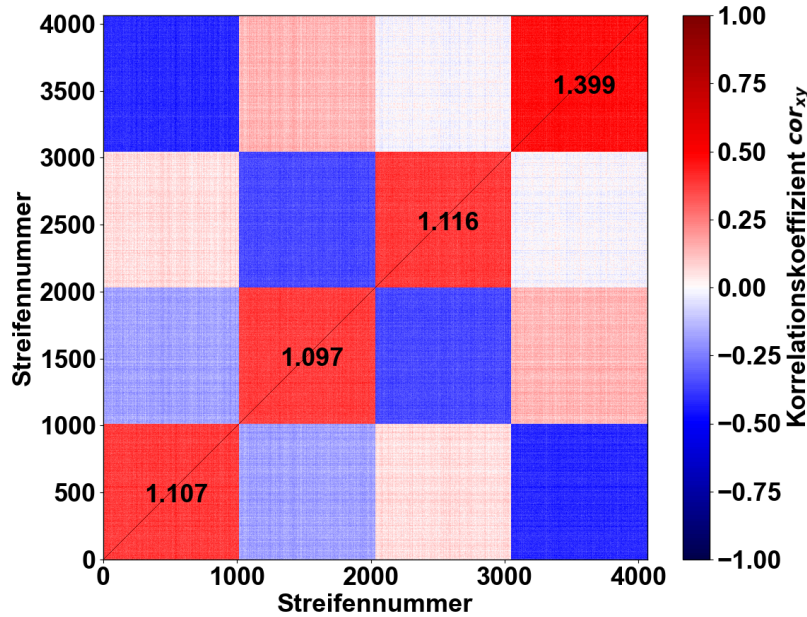
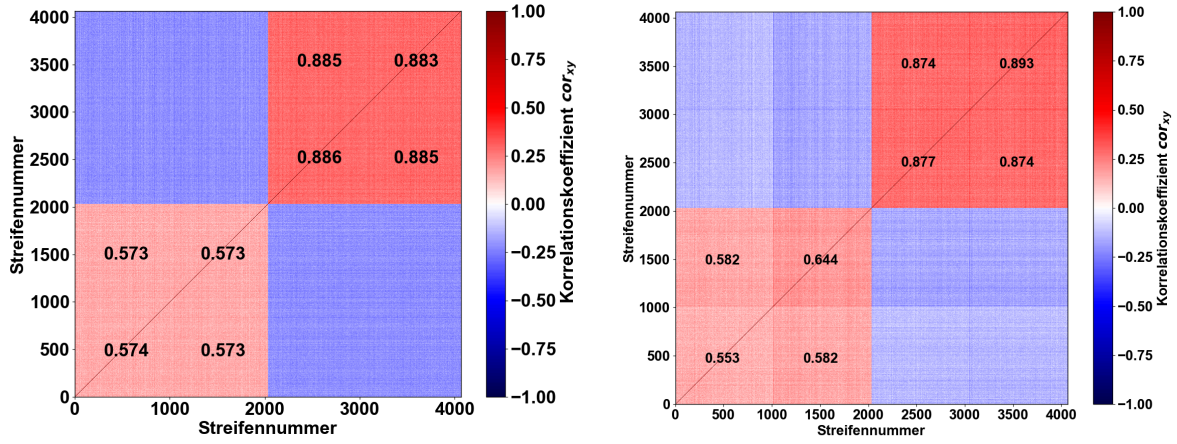


Abbildung 40: Aus simulierten Daten generierte Korrelationsmatrix, welche das Verhalten des Prototypmoduls annähern.

werden, um besser zu verstehen, wie die beobachteten Muster zustande kommen. Die Korrelationsmatrix in Abb. 40 konnte so mit simulierten Daten generiert werden. Wie in 4.3 beschrieben wurde, wird auf das Gaußsche Einzelkanalrauschen mit Standardabweichung $\sigma = 1$ zunächst ebenfalls Gaußsches, Korreliertes Rauschen mit Standardabweichung $s = 1$ aufaddiert. Um die Korrelationsstärke in den verschiedenen Bereichen der Sensoren abbilden zu können, wird der Wert aus der zweiten Gaußverteilung mit dem Faktor 0.57 für FEH0 und -0.88 für FEH1 multipliziert. Diese beiden Faktoren können beispielsweise abbilden, dass das Rauschen aus einer Quelle unterschiedlich stark in die verschiedenen Bereiche einkoppelt und das Minus im zweiten Faktor beschreibt eine Antikorrelation zwischen den Hybriden. Nach diesem ersten korreliertem Rauschen wird noch ein zweites hinzugefügt. Dafür wird ein Zufallswert aus einer einzigen Gaußverteilung mit Standardabweichung $s = 1$ mit verschiedenen Faktoren für die Ober- und Unterseiten der beiden Hybride multipliziert und auf die verschiedenen Bereiche addiert. Für FEH0 sind die Faktoren 1.05 für die Unterseite und 0.95 für die Oberseite und für FEH1 sind die Faktoren 0.7 und 1.2. Diese Werte wurden so gewählt, dass die entstehende Korrelationsmatrix in Abb. 40, die von der Messung in Abb. 39 möglichst gut annähert. Wie man sieht, sind sich die Korrelationsmatrizen der Simulation und der Messung sehr ähnlich, und mit einer weiteren Feinjustage ließe sich die Übereinstimmung noch verbessern. Dies würde allerdings weiterhin nicht belegen, dass das Rauschen auf diese Art entsteht, weshalb dies nicht gemacht wird. Ohne die zweite Korrelation, erhält man die Korrelationsmatrix in Abb. 41 a).



(a) Simulierte Daten

(b) Gemessene Daten

Abbildung 41: Korrelationsmatrizen von a) simulierten Daten, wobei die zweite Korrelation wie im Text beschrieben weggelassen wird und b) gemessenen Daten des Prototypmoduls mit Widerständen in den HV-Tails

Die Korrelationsmatrix aus der Messung wird durch die Simulation gut angenähert. Dies belegt zwar nicht, dass die Korrelation auf diese Weise entsteht, aber sie sind damit erklärbar. Des Weiteren zeigt die Simulation, dass es plausibel ist, dass die Antikorrelation zwischen linkem und rechtem Hybrid ein von der Antikorrelation zwischen Ober- und Unterseite unabhängiger Effekt ist.

5.5 Vergleich der verschiedenen Designs

Beim Vergleich der verschiedenen Konfigurationen ist ersichtlich, dass das Regular Design mit Ground Balancer die beste Leistung sowohl im Bezug auf das gesamte Rauschen als auch auf den Anteil des korrelierten Rauschens erbringt, weshalb auch diese Kombination für die Serienproduktion verwendet werden wird. Der Ground Balancer bewirkt eine signifikante Verbesserung und die Korrelation in den Hybriden, wie auch die Antikorrelation zwischen diesen, wird reduziert. Vermutlich indem Ströme, welche sonst über den Sensor fließen würden, nun über den Ground Balancer geleitet werden. Aber auch die Widerstände in den HV-Tails werden unabhängig vom Ground Balancer benötigt, da sie einen anderen Effekt unterdrücken. Zusätzlich dazu verringern auch die kleineren Designänderungen im SEH das Rauschen, da das Rauschen im Prototyp im Mittel um $1.1 V_{\text{cth}}$ höher als beim Kickoff Regular Design ohne Ground Balancer ist. Zwar kann das Rauschen auch abhängig vom verwendeten CBC um etwa $0.5 V_{\text{cth}}$ Schwanken, wie beim FEH0 beim Modul 2S_18_5_AAC-00104 bereits beobachtet, aber auch dann noch wäre das Rauschen deutlich verbessert worden. Das Split-Plane Design dagegen zeigt verglichen mit dem Prototyp ein deutlich verschlechtertes Rauschverhalten sowohl bei der Korrelationsstärke als auch bei sich ergebenden Gesamt-rauschen. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Erdungsschicht nun eine große Schleife mit dem Sensor bildet, und auftretende Ströme wegen der reduzierten Anzahl an Verbindungen zwischen den Erdungsschichten nur über diesen fließen können. Auf Grund der schlechten Leistung wurde dieses Design von den Entwicklern am CERN verworfen und wird nicht weiter verfolgt.

6 Messung in der Klimakammer

Eine wichtige Eigenschaft des korrelierten Rauschens, die untersucht wurde, ist dessen Abhängigkeit von der Temperatur, da der Tracker bei etwa -35°C betrieben werden soll. Da das Einzelkanalrauschen bei niedrigen Temperaturen abnimmt, würde sich der Anteil des korrelierten Rauschens beispielsweise erhöhen, wenn es gleich stark bliebe. Dies könnte die Leistungsfähigkeit der Module deutlich einschränken und weitere Designänderungen notwendig machen. Die benötigten Messungen wurden mit dem in Abb. 42 gezeigten Aufbau durchgeführt.



Abbildung 42: Position des Moduls in der Klimakammer und Temperatursensor auf dem Modul.

Der Aufbau ist relativ ähnlich zudem in 5 verwendeten, allerdings wird hier anstatt der Aluminiumkiste eine Klimakammer des Typs BINDER MK 240 [40] benutzt. Für die Messungen wurde nur die Temperatur variiert und die Luftfeuchtigkeit möglichst niedrig gehalten. Um die Modultemperatur genau messen zu können, wurde an einem der Abstandshalter in der Mitte des Ground Balancers ein Temperatursensor mit Wärmeleitpaste und Kaptonband festgeklebt. Um die Temperaturabhängigkeit des Rauschens zu untersuchen, wurden Rauschmessungen, wie in 5.1.1 beschrieben, in der Klimakammer bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Das Modul mit Regular Design Kickoff SEH mit Ground Balancer, welches der Konfiguration mit dem geringsten Rauschen entspricht, wurde für die Messung verwendet. Dafür wurde die Klimakammer zunächst auf etwa -40°C heruntergekühlt und dann wurde die Temperatur in 5°C Schritten erhöht, und immer 30 Minuten gewartet, damit sich eine stabile Modultemperatur einstellen kann, bevor gemessen wird. Unter anderem wurde der Anteil des korrelierten Rauschens bei verschiedenen Temperaturen untersucht. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 43 gezeigt, indem der berechnete Γ -Wert gegen die Temperatur aufgetragen wird.

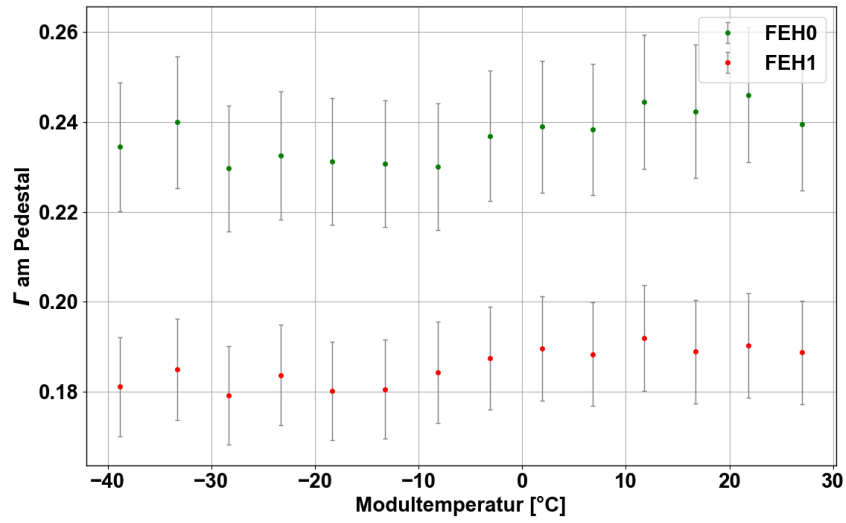


Abbildung 43: Temperaturabhängigkeit des Γ -Werts für das Modul mit einem Regular Design SEH und angeschlossenem Ground Balancer, gemessen in einer Klimakammer.

Die Unsicherheiten stellen eine relative Unsicherheit von 6.1% dar, welche zuvor für die verwendete Modulkonfiguration in der Aluminiumkiste ermittelt wurde. Die Grafik zeigt, dass der Anteil des korrelierten Rauschens über den gesamten Temperaturbereich etwa gleich bleibt. Da aber das gesamte Rauschen, wie in Abb. 44 dargestellt, sinkt, nimmt auch das korrelierte Rauschen ab. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass das korrelierte Rauschen innerhalb des Moduls entsteht und deshalb durch die niedrigere Temperatur ebenfalls abnimmt. Wenn es dagegen durch von außen eingestrahelte Signale entstehen würde, wäre nicht zu erwarten, dass sich dessen Intensität durch das Herunterkühlen des Moduls verändert. Dadurch wäre ein Anstieg von dessen Anteil am Gesamtrauschen zu erwarten, was einen höheren Γ -Wert zur Folge hätte.

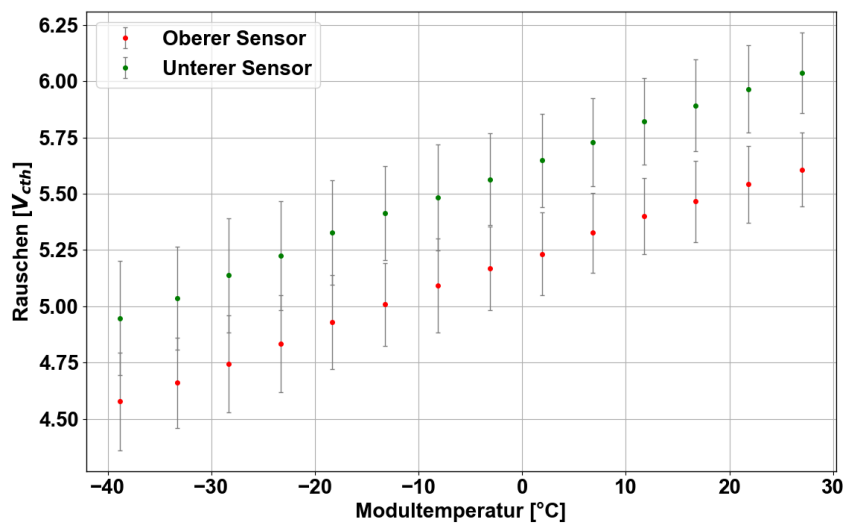


Abbildung 44: Temperaturabhängigkeit des Rauschens für das Modul mit einem Regular Design SEH und angeschlossenem Ground Balancer, gemessen in einer Klimakammer.

7 Messungen auf einer TEDD ähnlichen Kühlstruktur

Es ist wichtig zu untersuchen, ob die Struktur, welche im Detektor zur Befestigung und Kühlung der Module verwendet wird, einen Einfluss auf das Rauschverhalten des Moduls hat. Außerdem ist es wichtig zu untersuchen, ob sich benachbarte Module möglicherweise gegenseitig beeinflussen.

7.1 Setup

Für die folgenden Messungen wurden die Module auf einer von der CMS Arbeitsgruppe am DESY [41] produzierten kleinen Version, der finalen Kühlstruktur der Endkappen des Trackers befestigt. Im Folgenden wird diese Struktur nur noch Mini-TEDD genannt. Die Struktur besteht aus einem U-förmigen Edelstrahlrohr, durch welches das zwei-phasige CO_2 geleitet wird. Auf diesem sind dann Aluminium-Kühlkontakte befestigt, welche auf beiden Seiten eine Kohlefaserschicht durchdringen und auf denen dann die Module verschraubt werden können. Um die auftretenden Temperaturen gut messen zu können, sind Temperatursensoren in der Struktur verbaut. Die beschriebene Struktur ist in einer Kühlbox installiert, welche von Max Rauch im Zuge seiner Dissertation entwickelt und gebaut wurde [42]. Der gesamte verwendete Aufbau ist in Abb. 45 sowohl schematisch als auch in Form eines Fotos dargestellt.

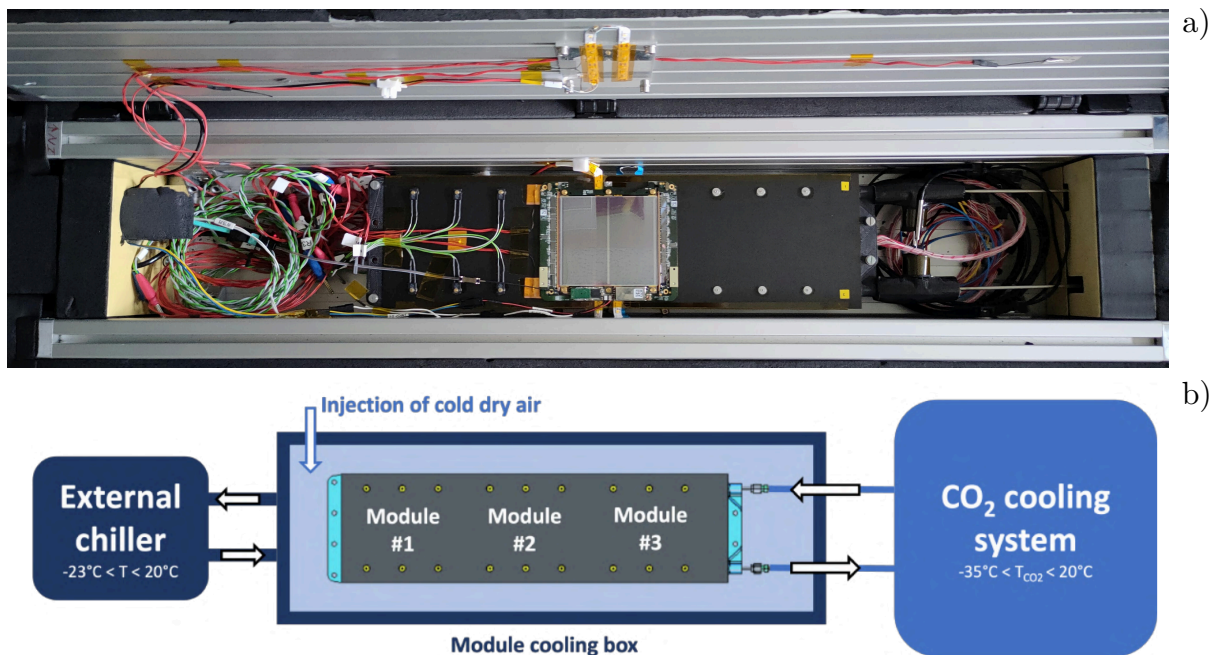


Abbildung 45: a) Foto des Verwendeten Messaufbaus und b) dessen schematische Darstellung [43].

Die Kiste wurde mit einer Kühlmachine vom Typ HUBER CC-505 gekühlt. Der Einfluss der CO_2 -Kühlung konnte aufgrund eines Defekts im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden. Während aller Kühlmessungen wurde die Temperatur sowie die Luftfeuchtigkeit über einen Temperatursensor mit Hygrometer von Labkit [44], links neben der Struktur gemessen und überwacht, um sicherzustellen, dass sich auf dem Modul kein Eis bilden kann. Damit die Luft in der Kühlkiste möglichst trocken ist, wurde die Kiste vor Beginn des Kühlens mit Trockenluft geflutet und dann wurden bei allen Messungen, konstant vier Liter Trockenluft pro Minute in die Kiste einge-

leitet. Wie man in Abb. 45 a) links neben dem Modul erkennen kann, sind auf den freien Kühlkontakten noch Heizwiderstände angebracht, welche zuvor für thermische Messungen auf dieser Struktur genutzt wurden. Für die Messungen in dieser Arbeit werden sie allerdings nicht benötigt.

Bei den ersten mit diesem Aufbau durchgeführten Messungen konnte, wie in Abb. 46 erkennbar ist, mit im Durchschnitt $6.92 V_{cth}$ ein deutlich erhöhtes Rauschen auf der Unterseite festgestellt werden, als es noch in der Aluminiumkiste gemessen wurde ($6.34 V_{cth}$). Auf der Oberseite jedoch ist mit $5.93 V_{cth}$ auf der Mini-TEDD zu $5.92 V_{cth}$ in der Aluminiumkiste kein signifikanter Unterschied messbar.

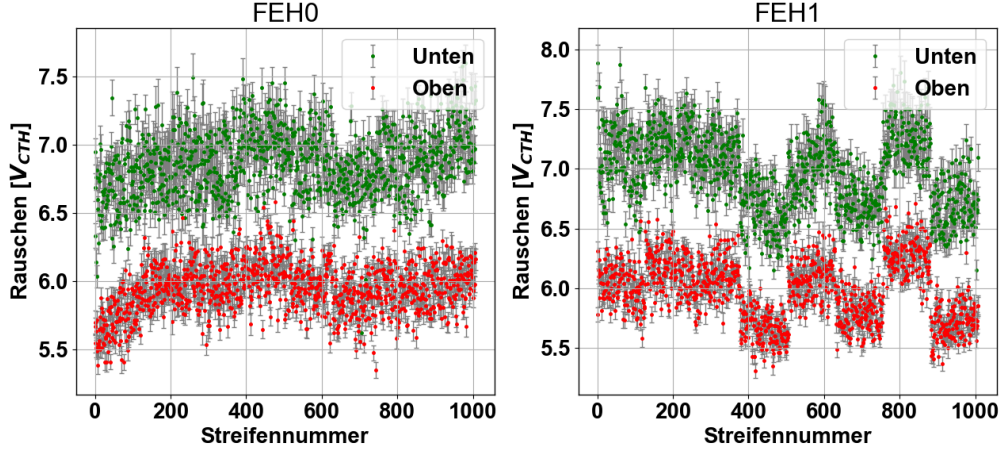


Abbildung 46: Erhöhtes Rauschen des unteren Sensors eines Moduls mit Regular Design SEH mit Ground Balancer auf der Mini-TEDD Struktur.

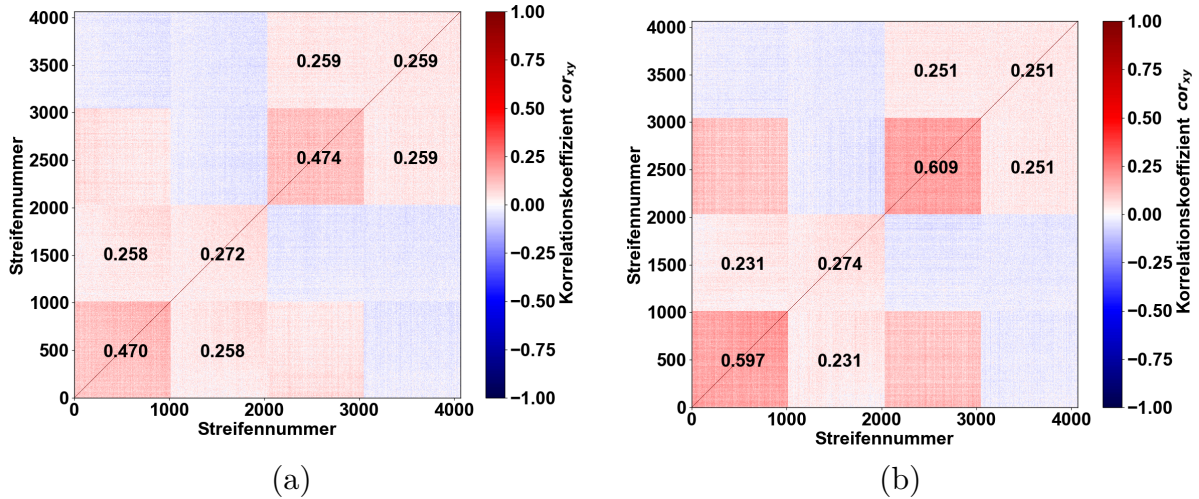


Abbildung 47: (a) Korrelationsmatrix einer Messung auf der Mini-TEDD Struktur bei Raumtemperatur und (b) Messung bei etwa $-30^{\circ}C$ Umgebungstemperatur.

Dieser Anstieg des Rauschens kann durch eine deutlich erhöhte Korrelation auf der Modulunterseite erklärt werden, wie in Abb. 47 dargestellt ist. Auffällig ist hierbei auch, dass die Korrelation bei niedrigen Temperaturen zunimmt. Diese wäre zu erwarten, wenn das Rauschen durch ein von außerhalb eingestrahltes Signal erzeugt würde, da dessen Intensität von der Temperaturänderung auf dem Modul unbeeinflusst bleibt, während das Einzelkanalrauschen wie anhand von 4.1 ersichtlich, mit der Temperatur abnimmt. Dies ist auch mit den in Abb. 48 gezeigten Korrelationsmatrizen kompatibel, welche auf simulierten Daten basieren.

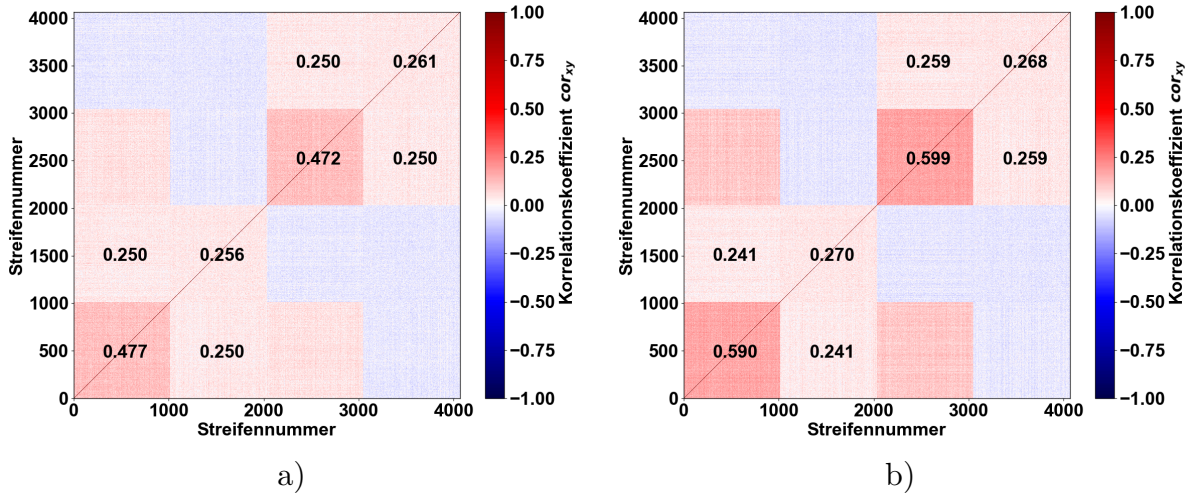


Abbildung 48: a) Korrelationsmatrix von simulierten Daten, die eine Messung auf der Mini-TEDD Struktur bei Raumtemperatur und b) Messung bei etwa -30°C umgebungstemperatur nachstellen.

Für Raumtemperatur wurden dabei wie bereits zuvor das Einzelkanalrauschen und die Korrelation im linken und rechten Hybrid simuliert, wobei $s = 0.26$ für das korrelierte Rauschen verwendet wurde. Dieser Wert wurde gewählt, da dies in etwa der in Abb. 47 gemessenen Korrelation entspricht, wenn die Unterseite ignoriert wird. Zusätzlich wird eine zweite Korrelation auf alle unteren Streifen addiert, wobei dessen Standardabweichung $s_2 = 0.4$ beträgt, und so gewählt wurde, dass die Simulation die Messung möglichst gut repräsentiert. Um die Messung im Kalten zu simulieren, wurde die Standardabweichung des Einzelkanalrauschens um den Faktor 0.75 geändert, um dessen Absinken bei Kälte darzustellen. Dieser Wert wurde so gewählt, dass das Ergebnis für die Korrelationsmatrix die Gemessene möglichst gut approximiert. Wie in der Messung in der Klimakammer (6) festgestellt wurde, ändert sich die Korrelation innerhalb der Hybride in etwa in demselben Maße. Daher wird der Faktor 0.75 auch auf s angewandt. Die beiden resultierenden Korrelationsmatrizen zeigen eine gute Übereinstimmung und bei weiterer Feinanpassung ist eine noch bessere zu erwarten. Dies zeigt, dass die Korrelation auf der Unterseite vermutlich durch von außen eingestrahelte Signale erzeugt wird. Vermutlich wird das Rauschen durch Signale mit einer Frequenz von etwa 17.5 MHz erzeugt. Diese ist überall im Labor deutlich messbar, wie auf dem Frequenzspektrum in Abb. 49 erkennbar ist.

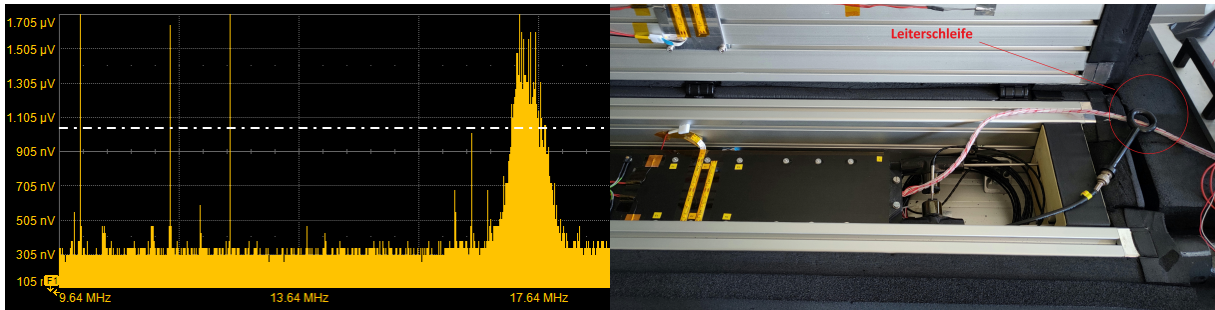


Abbildung 49: Frequenzspektrum der im Labor gemessenen 17.5 MHz Strahlung (links) und Messung der Strahlung mit einer Leiterschleife an den Kabeln der, in der Mini-TEDD verbauten Temperatursensoren (rechts).

Diese Signale koppeln dann in Kabel und andere Leiter wie das Kühlrohr ein, welche dies dann wiederum auf die Unterseite des Moduls abstrahlen. Dies kann innerhalb des Moduls korreliertes Rauschen auslösen. Da das Modul auf Signale in diesem Frequenzbereich sehr sensibel reagiert [45]. Da diese Strahlung vermutlich nicht im Detektor vorhanden sein wird, ist es wichtig dessen Einfluss zu minimieren, um schwache Effekte möglichst nicht zu übersehen. Der Einfluss kann dadurch minimiert werden, dass alle im Aufbau vorhandenen aber nicht für die Messungen benötigten Leitungen getrennt und wenn nicht anders möglich in der Kiste verstaut werden. Außerdem kann die gesamte MiniTEDD Struktur vom restlichen CO₂-Kühlsystem getrennt werden.

7.2 Messung mit einem Modul

Die im vorherigen Abschnitt angesprochenen Maßnahmen wurden für die folgenden Messungen umgesetzt, was zu einer deutlichen Verringerung der zusätzlichen Korrelation auf der Unterseite des Moduls führte. Ansonsten ist das Rauschen aber nicht signifikant höher als in der, in 5 verwendeten Aluminiumkiste, wie in Abb. 50 zu sehen ist.

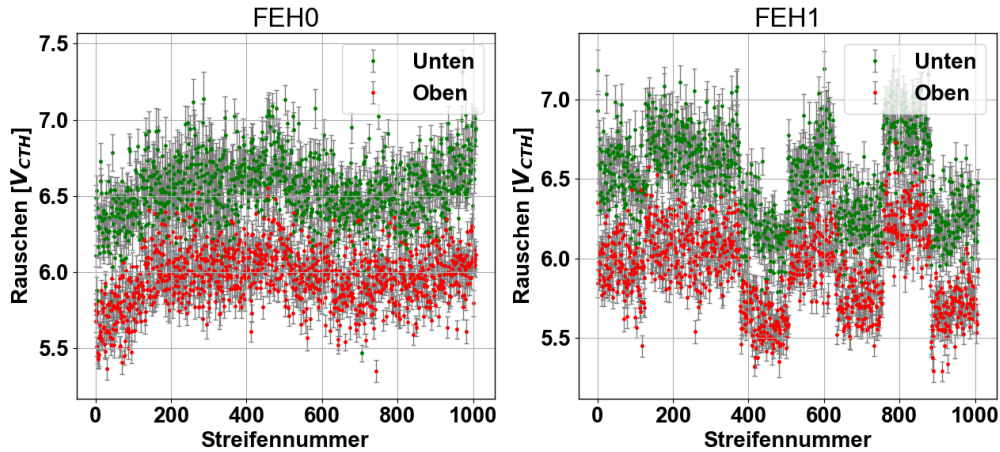


Abbildung 50: Rauschverhalten des Moduls mit Regular Design SEH und Ground Balancer bei Raumtemperatur. Der Aufbau wurde optimiert um extern eingestrahlte Signale zu vermeiden.

Dies ist anhand des Rauschens auf der Moduloberseite festzumachen, da diese nicht von dem eingestrahnten Rauschen betroffen ist. Dabei beträgt das mittlere Rauschen auf der Oberseite des Moduls $5.94 V_{cth}$. Zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit wurden vier Messungen durchgeführt und dabei eine Standardabweichung von $\pm 0.05 V_{cth}$ gemessen. Das gemessene Rauschen weicht also nicht signifikant von dem in der Aluminiumkiste ($5.93 V_{cth}$) ab. Die Struktur scheint also zumindest auf die Oberseite keinen großen Einfluss zu haben. Die zu der Messung gehörige Korrelationsmatrix ist in Abb. 51 gezeigt. In dieser ist die zusätzliche Korrelation auf der Unterseite (Streifennummern $[0 - 1016] \times [0 - 1016]$ und $[2032 - 3048] \times [2032 - 3048]$) des Moduls deutlich erkennbar, da Γ dort um etwa 0.6-0.8 höher als auf der Oberseite ist. Die Korrelation ist aber verglichen mit der Messung in Abb. 47 um etwa 30% auf 0.334 ± 0.017 abgefallen.

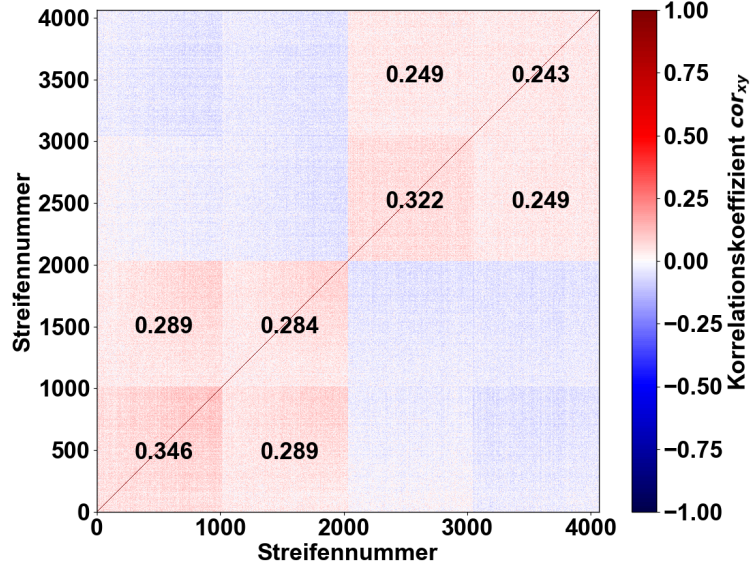


Abbildung 51: Korrelationsmatrix des Moduls mit Regular Design SEH und Ground Balancer bei Raumtemperatur. Der Aufbau wurde optimiert um extern eingestrahlte Signale zu vermeiden.

Zudem lässt sich aber auch auf der Oberseite (Streifennummern $[1016 - 2032] \times [1016 - 2032]$ und $[3048 - 4064] \times [3048 - 4064]$) ein Anstieg der Korrelation um etwa $0.03 - 0.04$ verglichen mit der Messung in der Aluminiumkiste feststellen. Die Korrelation ist mit $\Gamma = 0.283 \pm 0.006$ bei FEH0 und 0.257 ± 0.007 bei FEH1 signifikant gegenüber der Messung in der Aluminiumkiste erhöht. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Signale, welche die erhöhte Korrelation auf der Unterseite des Moduls verursachen, deutlich abgeschwächt auch im oberen Sensor korreliertes Rauschen erzeugen. Dies würde auch den Anstieg der Korrelation zwischen Streifen des oberen und unteren Sensors (z.B. Streifennummern $[1016-2032] \times [0-1016]$ und $[3048-4064] \times [2032-3048]$) erklären.

Wenn die Umgebungstemperatur in der Kühlbox auf etwa -30°C abgesenkt wird, so erkennt man in Abb. 52 wie bereits zuvor, dass die Korrelation auf der Unterseite zunimmt. Man sieht allerdings auch, dass die Korrelation auf der Oberseite des FEH0 in etwa auf das Niveau in der Aluminiumkiste abfällt, während das beim FEH1 mit $\Gamma = 0.227$ etwas erhöht bleibt. Diese Abweichung von der Messung in der Aluminiumkiste entspricht aber nur etwa 1.4σ und ist damit nicht signifikant. Wodurch diese Verringerung der Korrelation auftritt, konnte allerdings nicht ermittelt werden.

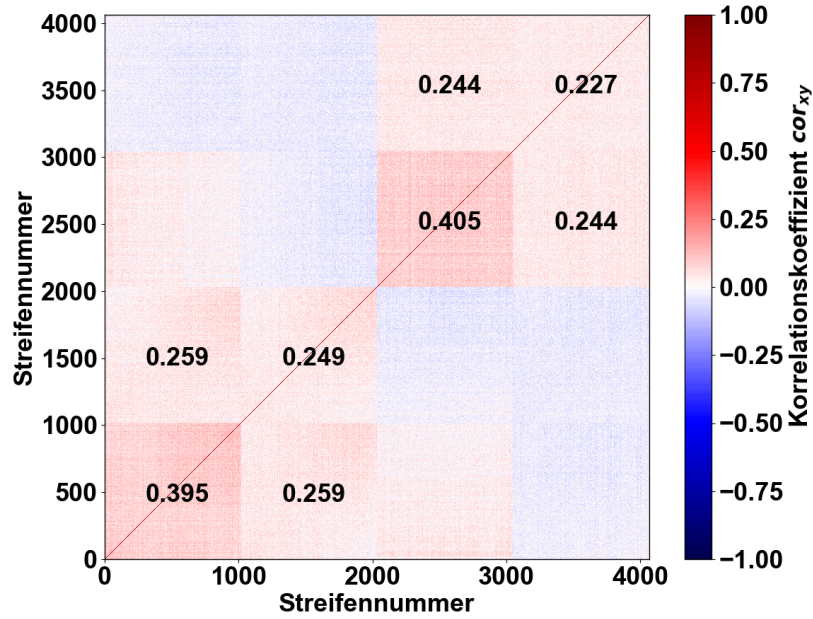


Abbildung 52: Korrelationsmatrix des Moduls mit Regular Design SEH und Ground Balancer bei ca. -30°C mit reduziertem eingestrahlt Rauschen.

7.3 Messung mit zwei Modulen

Es sollte untersucht werden, ob sich die Module gegenseitig beeinflussen. Da im finalen Detektor sehr viele von den Modulen auf sehr engem Raum zusammen montiert sein werden, könnte eine gegenseitige Beeinflussung einen sehr starken, negativen, Effekt auf die allgemeine Leistungsfähigkeit des Trackers haben. Daher wurden Messungen durchgeführt, bei dem dasselbe Modul wie zuvor auf dem mittleren Platz der MiniTEDD vermessen wurde, während ein zweites Modul mit Split-Plane SEH auf dem Platz rechts daneben betrieben wurde, wie in Abb. 53 gezeigt.

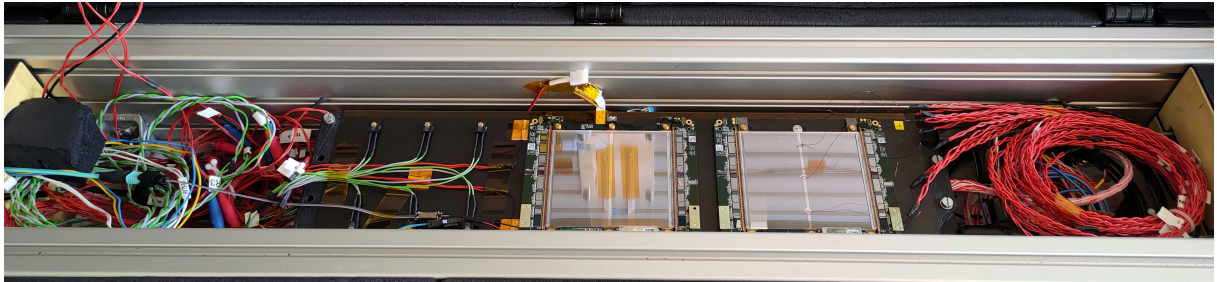


Abbildung 53: Verwendeter Aufbau für die Messung mit zwei simultan betriebenen Modulen. Das linke Modul wird ausgelesen.

Das zweite Modul wurde allerdings nur mit Spannung versorgt und die Auslesechips programmiert, aber es wird nicht aktiv ausgelesen. Da es mit dem verwendeten Aufbau nicht möglich war, mehrere Module synchron auszulesen, ist es nicht möglich die beiden Module auf Korrelationen zwischen einander zu untersuchen. Stattdessen wird nur untersucht, ob sich beim ersten Modul das Rauschverhalten ändert. Abb. 54 zeigt, dass das Rauschen bei Raumtemperatur im Mittel mit $6.03 V_{\text{cth}}$ beim oberen Sensor und $6.56 V_{\text{cth}}$ nicht signifikant von der Messung mit einem Modul abweicht.

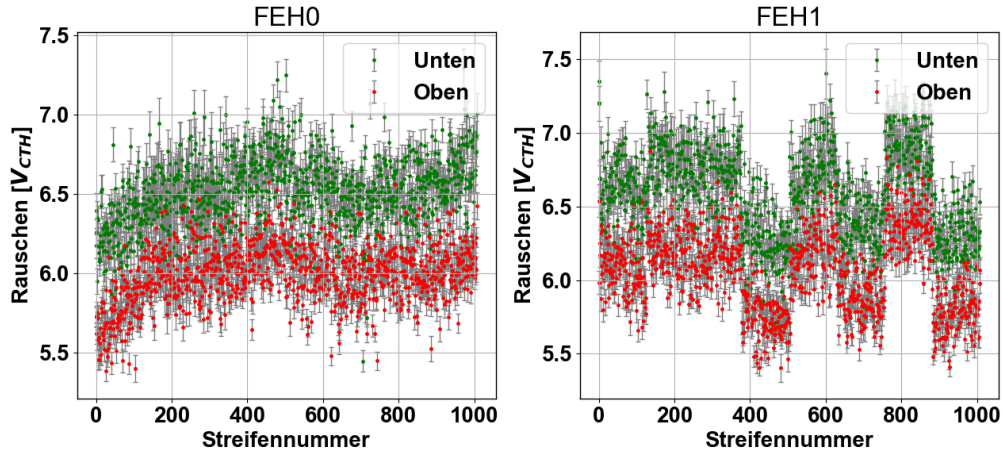


Abbildung 54: Rauschverhalten des Moduls mit regular Design SEH und Ground Balancer bei der Messung mit zwei Modulen auf der MiniTEDD Struktur.

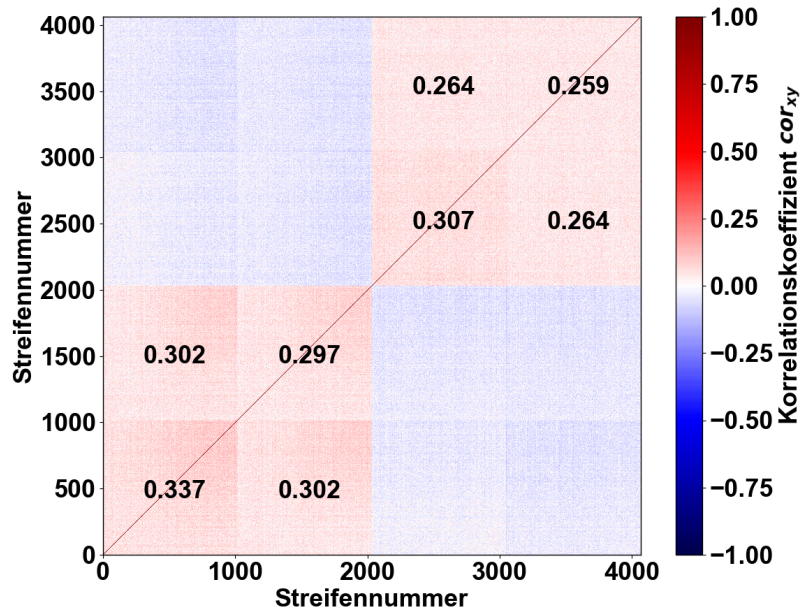


Abbildung 55: Korrelationsmatrix einer Messung des Moduls mit Regular Design SEH und Ground Balancer mit zwei Modulen auf der MiniTEDD Struktur bei Raumtemperatur.

Die zur Messung gehörige Korrelationsmatrix in Abb. 55 zeigt in etwa das gleiche Korrelationsverhalten wie bei der Messung mit einem Modul. Nur auf der Oberseite von FEH0 ist die Abweichung zur Messung mit einem Modul ($\Gamma = 0.283 \pm 0.006$) mit 2.3σ recht hoch.

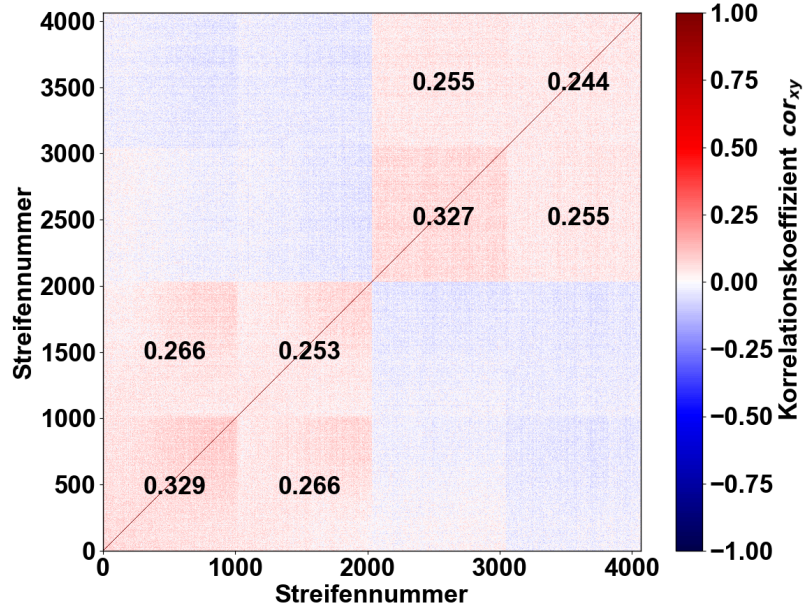


Abbildung 56: Korrelationsmatrrix einer Messung des Moduls mit Regular Design SEH und Ground Balancer mit zwei Modulen auf der MiniTEDD Struktur bei etwa -30°C .

Bei der Messung bei etwa -30°C und mit zwei Modulen ergibt sich wieder ein ähnliches Korrelationsverhalten, wie bei der Messung in der Aluminiumkiste (5). Die Oberseite weist mit $\Gamma = 0.244$ aber eine höhere Korrelation auf, als in der Aluminiumkiste. Die Abweichung beträgt etwa 2.6σ . Die Abweichung könnte also statistischer Natur sein, allerdings ist die Wahrscheinlichkeit recht gering. Um dies zu verifizieren wären allerdings weitere Messungen nötig. Verglichen mit der Messung mit einem Modul bei etwa -30°C beträgt die Abweichung unter der Annahme einer relativen Unsicherheit von 6.1% allerdings nur etwa 1.2σ . Die Abweichung scheint also nicht unbedingt durch das zweite Modul zu entstehen. Die Ähnlichkeit des Korrelationsverhaltens mit der Messung mit einem Modul zeigt insgesamt, dass sich die Module nicht signifikant zu beeinflussen scheinen.

7.4 Vergleich zwischen den Messungen

Wie anhand der Messungen deutlich wurde, ist es wichtig, dass im finalen Detektor keine externe Strahlung auftritt, da das System darauf sehr sensibel reagiert. Ansonsten scheint der Einfluss der Struktur aber recht gering zu sein. Die Messung mit zwei Modulen hat außerdem ergeben, dass sich die Module auf der Struktur nicht nennenswert beeinflussen, sodass durch deren geringen räumlichen Abstand im finalen Detektor keine Reduktion der Leistungsfähigkeit zu erwarten ist. Insgesamt konnte beobachtet werden, dass auf der Oberseite des Moduls bei etwa -30°C eine ähnliche Korrelation wie in der Aluminiumkiste vorliegt. Weiter wurde gemessen, dass die Korrelation unabhängig von der Modultemperatur ist. Es ist also erwartet, dass der Anteil des korrelierten Rauschens am gesamten Rauschen auch im Detektor etwa 17 – 20% betragen wird (basierend auf $\Gamma = 0.208 - 0.250$ und $\frac{N_{\text{Korr}}}{N_{\text{tot}}} = \frac{1}{1+\Gamma}$). Bei Raumtemperatur beträgt das Gesamtrauschen so im Mittel $5.93 \pm 0.23 V_{\text{cth}}$ für die Oberseite und $6.36 \pm 0.25 V_{\text{cth}}$ für die Unterseite. Das gesetzte Ziel von $1000 e$ [27] was etwa $6.41 V_{\text{cth}}$ entspricht kann also von der Konfiguration mit dem Kickoff Regular Design SEH und mit dem Ground Balancer erreicht und sogar etwas übertroffen werden. Durch das Herunterkühlen auf ca. -35°C kann das Gesamtrauschen noch um etwa $1 V_{\text{cth}}$ weiter reduziert werden.

8 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Messungen mit 2S-Modulen durchgeführt, um die von diesen gelieferten Daten auf möglicherweise vorhandene Korrelationen im Rauschen zu untersuchen. Dafür wurden zunächst Messungen in einer Aluminiumkiste durchgeführt. Dabei wurden zwei verschiedene Designs für das Service Hybrid an dem selben Modul untersucht, um festzustellen, ob diese ein unterschiedliches Rauschverhalten, vor allem im Bezug auf Korrelationen haben. Des Weiteren wurde mit beiden Designs der Einfluss eines zusätzlichen Bauteils, des Ground Balancers, welcher die Erdungen der beiden Front-End-Hybride verbindet, evaluiert. Außerdem wurde ein Prototypmodul vermessen, um einerseits den Erfolg einiger umgesetzter Designveränderungen am SEH zu bewerten und, um zu untersuchen, inwiefern sich die gemessenen Daten ändern, wenn zwei $100\ \Omega$ Widerstände in Serie in die HV-Tails eingebaut werden. Anschließend wurde noch untersucht, wie sich die beobachteten Korrelationen bei unterschiedlichen Temperaturen im Bereich von ca. -40 bis $30\ ^\circ\text{C}$ ändern. Schließlich wurden noch Messungen auf einer Kühlstruktur durchgeführt, welche der im finalen Detektor verwendeten sehr ähnlich ist. Dabei wurde untersucht, ob diese Struktur einen Effekt auf das Rauschen im Modul hat und ob sich zwei nebeneinander angebrachte Module beeinflussen.

Bei den Messungen in der Aluminiumkiste konnte beobachtet werden, dass das Rauschen, durch den Ground Balancer, um etwa $0.4 V_{\text{cth}}$ beim Regular Design SEH und um mehr als $1 V_{\text{cth}}$ beim Split-Plane SEH gesenkt werden konnte. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass innerhalb der FEHs eines Moduls eine relativ homogene Korrelation auftritt, während die FEHs gegeneinander antikorreliert sind. Dies gilt für beide SEH Designs, wobei die Korrelation ($+183\%$), sowie auch das gesamte Rauschen ($+20\%$) im Split-Plane SEH deutlich höher waren. Für beide SEHs konnte diese Korrelation aber durch den Ground Balancer auf fast die Hälfte abgesenkt werden, da vermutlich Ströme die zuvor über die Sensoren geflossen sind, nun über den Ground Balancer geleitet werden können. Bei der Vermessung des Regular Design SEHs fiel außerdem auf, dass es über mehrere Ereignisse hinweg dazu kommen kann, das besonders viele oder wenige Treffer registriert werden. In den Histogrammen, in denen die gemessene Anzahl an Treffern pro Ereignis dargestellt werden, wurde eine Verteilung mit zwei Peaks beobachtet, welche nicht erklärt werden konnte. Die Messungen mit dem Prototypmodul zeigen, dass die Widerstände in den HV-Tails das Rauschen deutlich reduzieren konnten. Dabei unterdrücken sie einen Effekt, welcher für eine Antikorrelation zwischen Ober- und Unterseite sorgt. Da dieser Effekt unabhängig von der Korrelation zwischen dem linken und dem rechten FEH zu sein scheint, werden, um die optimale Leistung zu erreichen, sowohl der Ground Balancer als auch diese Widerstände benötigt, da diese Bauteile nicht redundant sind. Die zusätzlichen Designverbesserungen im Prototyp gegenüber dem Modul mit Kickoff Regular Design SEH ohne Ground Balancer, waren zudem sehr erfolgreich und konnten das Rauschen um $1.1 V_{\text{cth}}$ verringern, und auch die Korrelationsstärke reduzieren. Die thermischen Messungen ergaben, dass der Anteil des korrelierten Rauschens mit der Temperatur in etwa konstant bleibt, und somit bei niedrigen Temperaturen sinkt, da auch das Gesamtrauschen bei $-38\ ^\circ\text{C}$ um etwa $1 V_{\text{cth}}$ im Vergleich zu Raumtemperatur verringert ist. Durch die Messungen auf der Kühlstruktur konnte schließlich noch herausgearbeitet werden, dass weder die Struktur selbst noch ein benachbartes Modul das vermessene Modul stark beeinflussen.

Da der Grund für die zwei Peaks in den Histogrammen der Trefferanzahlen pro Er-

ergebnis nicht ausgemacht werden konnte sowie die Verteilungsfunktion des Rauschens allgemein nicht klar bestimmt werden konnte, bedarf es in diesem Bereich noch weiterer Analysen. Des Weiteren wäre es sinnvoll, die Messungen auf der Kühlstruktur in einer Umgebung zu wiederholen, in welcher keine externe Strahlung anwesend ist. Dies würde es ermöglichen, möglicherweise auftretende schwache Effekte zu erkennen.

Quellenverzeichnis

- [1] CMS Collaboration, „Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC“, *Phys. Lett. B* **716** (2012), doi: 10.1016/j.physletb.2012.08.021.
- [2] G. Aad *u. a.*, „Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC“, *Physics Letters B* **716** 1–29 (2012), doi: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020>.
- [3] CMS Collaboration, „The Phase-2 Upgrade of the CMS Tracker“, Technical Report CERN-LHCC-2017-009, CMS-TDR-014, 2017, doi: 10.17181/CERN.QZ28.FLHW.
- [4] A. Lopes und M. L. Perrey, „FAQ-LHC The guide“, (2021), URL: <https://cds.cern.ch/record/2809109>.
- [5] L. Evans und P. Bryant, „LHC Machine“, 2008 *JINST* **3** S8001, doi: 10.1088/1748-0221/3/08/S08001.
- [6] E. Mobs, „The CERN accelerator complex in 2019. Complexe des accélérateurs du CERN en 2019“, (2019), URL: <https://cds.cern.ch/record/2684277>.
- [7] CERN, „Accelerating: Radiofrequency cavities“, URL: <https://home.cern/science/engineering/accelerating-radiofrequency-cavities>, (Aufgerufen: 23. Juli 2024).
- [8] O. Brüning *u. a.*, „The scientific potential and technological challenges of the High-Luminosity Large Hadron Collider program“, *Reports on Progress in Physics* **85** 4 46201–46202 (März 2022), doi: 10.1088/1361-6633/ac5106.
- [9] The ATLAS Collaboration, „The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider“, 2008 *JINST* **3** S8003, doi: 10.1088/1748-0221/3/08/S08003.
- [10] The CMS Collaboration, „The CMS experiment at the CERN LHC“, 2008 *JINST* **3** S8004, doi: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004.
- [11] The ALICE Collaboration, „The ALICE experiment at the CERN LHC“, 2008 *JINST* **3** S8002, doi: 10.1088/1748-0221/3/08/S08002.
- [12] The LHCb Collaboration, „The LHCb Detector at the LHC“, 2008 *JINST* **3** S8005, doi: 10.1088/1748-0221/3/08/S08005.
- [13] CERN, „LHC Run 3: physics at record energy starts tomorrow“, URL: <https://home.cern/news/news/physics/lhc-run-3-physics-record-energy-starts-tomorrow>, (Aufgerufen: 23. Juli 2024).
- [14] O. Brüning und L. Rossi, „The High Luminosity Large Hadron Collider – HL-LHC“ *World Scientific*, 2024, doi: 10.1142/9789811278952_0001.
- [15] T. Sakuma, „Cutaway diagrams of CMS detector“, (2019), URL: <https://cds.cern.ch/record/2665537>.
- [16] W. Adam et al, „The CMS Phase-1 pixel detector upgrade“, 2021 *JINST* **16** P2027, doi: 10.1088/1748-0221/16/02/P02027.

- [17] G. Lindström, „Radiation damage in silicon detectors“, *Nucl. Instrum. Meth.* **A512** (2003), doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01874-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01874-6).
- [18] N. Röwert, „CAD Modell“, private Kommunikation, 2024.
- [19] The Tracker group of the CMS collaboration, „Selection of the silicon sensor thickness for the Phase-2 upgrade of the CMS Outer Tracker“, 2021 *JINST* **16** P11028, doi: [10.1088/1748-0221/16/11/P11028](https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/11/P11028).
- [20] M. Prydderchet al, „CBC3: a CMS microstrip readout ASIC with logic for track-trigger modules at HL-LHC“, *PoS TWEPP*–17001 (2018), doi: [10.22323/1.313.0001](https://doi.org/10.22323/1.313.0001).
- [21] B. Nodari et al, „CIC: a radiation tolerant 65 nm data aggregation ASIC for the future CMS tracking detector at LHC“, 2023 *JINST* **18** C2035, doi: [10.1088/1748-0221/18/02/C02035](https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/02/C02035).
- [22] „LpGBT Main Page“, URL: <https://lpGBT-fpga.web.cern.ch/doc/html/>, (Aufgerufen: 23. Juli 2024).
- [23] J. Troska u. a., „The VTRx+, an Optical Link Module for Data Transmission at HL-LHC“, *PoS* 48–49 (2018), doi: [10.22323/1.313.0048](https://doi.org/10.22323/1.313.0048).
- [24] N. Pozzobon, „Development of a Level 1 Track Trigger for the CMS experiment at the high-luminosity LHC“, *Nucl. Instrum. Meth.* **A732** (2013), doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.06.010>.
- [25] A. Zografos et al, „CMS Outer Tracker Phase-2 Upgrade module noise and mitigation“, 2022 *JINST* **17** C12008, doi: [10.1088/1748-0221/17/12/C12008](https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/12/C12008).
- [26] A. Pauls, „Development and Implementation of Test Infrastructure and its Application during the Development and Prototyping of Service Hybrids for the Phase-2 Upgrade of the CMS Outer Tracker“, Dissertation in Vorbereitung, RWTH Aachen University, 2023.
- [27] M. Kovacs et al, „Hybrid designs and kick-off batch production experience for the CMS Phase-2 Upgrade“, 2024 *JINST* **19** C4052, doi: [10.1088/1748-0221/19/04/C04052](https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/04/C04052).
- [28] F. Hartmann, „Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics“, 2.Aufl. *Springer Cham*, 2017, doi: [10.1007/978-3-319-64436-3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-64436-3).
- [29] N. Röwert, „Assembly, Electrical, and Thermal Performance of 2S Modules for the CMS Phase-2 Tracker Upgrade at the LHC“, Dissertation in Vorbereitung, RWTH Aachen University, 2023.
- [30] M. Prydderch, „CBC3.1 User Manual“, (2019), URL: https://www.hep.ph.ic.ac.uk/ASIC/CBC_documentation/CBC3p1_User_Manual_V1p4.pdf.
- [31] H. Spieler, „Semiconductor Detector Systems“, *Oxford Science Publications*, 2005, doi: [10.1093/acprof:oso/9780198527848.001.0001](https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198527848.001.0001).

- [32] L. Feld, S. Roe, A. Ahmad, und S. Snow, „Measurement of common mode noise in binary read-out systems“, *Nucl. Instrum. Meth.* **A487** (2002), doi: 10.1016/S0168-9002(01)02171-4.
- [33] P. Bell und J. Grosse-Knetter, „Techniques for the measurement of common mode noise in binary read-out systems“, *Nucl. Instrum. Meth.* **A516** (2004), doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.07.052>.
- [34] Tektronix, „Keithley 2400 SourceMeter“, URL: <https://www.tek.com/de/products/keithley/source-measure-units/2400-standard-series-sourcemeter>, (Aufgerufen: 11. August 2024).
- [35] Tektronix, „Keithley 2410 SourceMeter“, URL: <https://www.tek.com/de/products/keithley/source-measure-units/2400-standard-series-sourcemeter>, (Aufgerufen: 11. August 2024).
- [36] M. Pesaresi et al, „The FC7 AMC for generic DAQ & control applications in CMS“, 2015 *JINST* **10** C3036, doi: 10.1088/1748-0221/10/03/C03036.
- [37] Tracker group of the CMS collaboration, „Phase-2 Acquisition and Control Framework“, URL: https://gitlab.cern.ch/cms_tk_ph2/Ph2_ACF, (Aufgerufen: 23. Juli 2024).
- [38] T. Krammler, „Characterization of 2S silicon strip modules of the final design for the CMS Phase-2 Tracker Upgrade“, Bachelor Thesis, RWTH Aachen University, 2023.
- [39] W. Adam u. a., „Test beam performance of a CBC3-based mini-module for the Phase-2 CMS Outer Tracker before and after neutron irradiation“, 2023 *JINST* **18** P4001, doi: 10.1088/1748-0221/18/04/P04001.
- [40] BINDER, „Modell MK 240 | Wechselklimaschränke für schnelle Temperaturwechsel“, URL: <https://www.binder-world.com/de-de/produkte/umweltsimulation/wechselklimaschraenke/produkt/mk-240>, (Aufgerufen: 11. August 2024).
- [41] CMS working group at DESY, „CMS | Compact Muon Solenoid Experiment“, URL: <https://desy-cms.desy.de/>, (Aufgerufen: 23. Juli 2024).
- [42] M. Rauch, „Thermal Measurements and Characterizations for the CMS Phase-1 Barrel Pixel Detector and the CMS Phase-2 Upgrade Tracker 2S Module with Evaporative CO2 Cooling Systems“, Dissertation, RWTH Aachen University, 2020.
- [43] V. Oppenländer, „Thermal Measurements with a 2S Module on a TEDD-like Structure for the CMS Phase-2 Upgrade“, Master Thesis, RWTH Aachen University, 2023.
- [44] IST, „HYGROCHIP Humidity Sensor LabKit“, URL: <https://www.ist-ag-japan.com/brand2/pdf/HYT-271.pdf>, (Aufgerufen: 23. Juli 2024).
- [45] N. Röwert et al, „Influence of high-frequency magnetic fields on the noise behavior of CMS 2S module prototypes“, 2023 *JINST* **18** C1013, doi: 10.1088/1748-0221/18/01/C01013.

Danksagung

An dieser Stelle würde ich mich gerne zunächst bei Prof. Dr. Lutz Feld für die Möglichkeit diese Arbeit zu verfassen, bedanken. Auch für die regelmäßigen Anmerkungen und Hinweise in den wöchentlichen Meetings bin ich sehr dankbar. Bedanken möchte ich mich auch für die Möglichkeit zur Tracker Woche zum CERN zu fahren. Außerdem danke ich Prof. Dr. Oliver Pooth für die Übernahme der Zweitkorrektur.

Zudem möchte ich Dr. Katja Klein für die thematische Einführung und allgemein für ihre Unterstützung während der gesamten Arbeit danken.

Ein besonderer Dank geht an Nicolas Röwert, dessen hervorragende Betreuung und Unterstützung, in allen Bereichen, maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat. Ebenso möchte ich Vanessa Oppenländer für die Hilfestellungen im Umgang mit der MiniTEDD Struktur und die Unterstützung bei einigen Messungen danken.

Ein weiterer Dank gilt Dr. Martin Lipinski für das Korrekturlesen dieser Arbeit, durch dessen Anmerkungen noch einige Schwächen dieser Arbeit ausgebessert werden konnten. Auch Alexander Pauls gilt mein Dank für die Erklärungen bezüglich der verschiedenen Designs der Hybride. Allgemein würde ich gerne allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe für die angenehme Arbeitsatmosphäre danken.

Ein letztes besonderes Dankeschön geht an meine Familie und meine Freunde, für die Unterstützung während dieser Arbeit und des gesamten Studiums, sowie für das Korrekturlesen dieser Arbeit.