

# Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	RWTH Aachen
Projektleitung:	Prof. Dr. Lutz Feld
Verbund:	05H2021
Thema:	Fortentwicklung des CMS-Experiments zum Einsatz am HL-LHC: Ausbau des Spur- und Myon-Systems

## Zusammenfassung

Die Physikalischen Institute IB, IIIA und IIIB der RWTH Aachen arbeiten, wie im beiliegenden Übersichtsteil des CMS-Verbunds dargestellt, an Entwicklung und Bau von Detektorkomponenten, die für den Betrieb des CMS-Experiments am HL-LHC benötigt werden. Die CMS-Gruppen der Physikalischen Institute IB und IIIB haben im Berichtszeitraum wichtige Beiträge zur Entwicklung der Silizium-Detektormodule für den äußeren Spurdetektor und der für diese benötigten Service-Hybride geleistet sowie Prototypen, Vorserien- und Vorproduktions-Module gebaut und getestet. Die CMS-Gruppe des Physikalischen Instituts IIIA beteiligt sich am Upgrade der „Drift Tube“ (DT)- und am Bau der „Gas-Electron Multiplier“ (GEM)-Kammern des Myon-Systems.

# Bericht

## 1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Siehe Übersichtsteil.

## 2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Alle beteiligten Gruppen haben bereits an der Entwicklung und dem Bau des äußeren Spurdetektors, des Pixeldetektors bzw. des Myon-Systems des aktuellen CMS-Detektors mitgewirkt und können auf ihre dabei gewonnene Expertise aufbauen. Die für das Upgrade des CMS-Detektors notwendigen Entwicklungsarbeiten knüpfen an den mit dem aktuellen CMS-Detektor erreichten und weltweit führenden wissenschaftlichen und technischen Stand an. Vor Beginn des Berichtszeitraums wurden von den Gruppen bereits über mehrere Jahre Entwicklungsarbeiten für das Projekt durchgeführt, welche in die Planungen der CMS-Kollaboration eingeflossen sind. In der vorherigen Förderperiode wurden Prototypen der Siliziummodule gebaut und getestet. Die GE1/1-Myonkammern wurden im CMS-Experiment installiert und Prototypen elektronischer und mechanischer Komponenten für die weiteren Myondetektor-Upgrades wurden gebaut und getestet. Hierauf bauten die Arbeiten im Berichtszeitraum auf.

## 3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Im Berichtszeitraum wurde im Bereich Tracker die Prototypenphase abgeschlossen. Die Vorproduktion wurde begonnen, und die Produktion vorbereitet. Für das Myon-System stand neben der Inbetriebnahme der GE1/1-Myonkammern ebenfalls die Vorproduktion sowie die Vorbereitung der Produktion für die weiteren Upgrades im Vordergrund. Wie im beiliegenden Übersichtsteil des CMS-Verbunds dargestellt, arbeiten die Aachener Gruppen mit den anderen deutschen CMS-Gruppen und darüber hinaus mit den Arbeitsgruppen der internationalen CMS-Kollaboration eng zusammen. Verzögerungen ergaben sich durch die Auswirkungen der Covid19-Pandemie, wodurch die Möglichkeit zur Arbeit im Labor phasenweise eingeschränkt war und welche Lieferschwierigkeiten für insbesondere elektronische Bauteile mit sich brachte.

Der Zeitplan für den HL-LHC wurde im Berichtszeitraum zweimal von CERN angepasst. Zunächst wurde der Run 3 gegenüber der vorherigen Planung um ein Jahr bis Ende 2025 verlängert. Der folgende Long Shutdown 3 (LS3) wurde um sechs Monate bis Ende 2028 verlängert. Im Frühjahr 2029 sollte der HL-LHC seinen Betrieb aufnehmen. In der zweiten Jahreshälfte 2024 wurde dann der LHC-Zeitplan ein weiteres Mal angepasst. Der LS3 soll nun im Juli 2026 beginnen und der Beginn der Datennahme am HL-LHC (Run 4) soll im Juni 2030 erfolgen. Für die Details verweisen wir auf den gemeinsamen Übersichtsteil.

Mitte 2024 wurde bekannt, dass ein Chip (LpGBT-ASIC, eine Entwicklung der CERN-Elektronikgruppe), welcher in allen HL-LHC-Upgrades verwendet wird, zwei Fehler aufweist. Dieser Chip wird auch im Tracker sowie in den DT- und GEM-Projekten (ME0) benutzt. Die Fehler wurden verstanden und ein neuer Chip noch im Oktober 2024 submittiert. Es wird erwartet, dass spätestens im zweiten Quartal 2025 neue Chips zur Verfügung stehen. Die Auswirkungen auf die Projekte sind zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht komplett abzusehen. Hier muss insbesondere bewertet werden, ob die Version 1 mit Fehlern im Detektor verwendet werden kann, welche Probleme das im Betrieb erzeugt, oder ob auf die korrigierte Version 2 gewartet werden soll und kann.

Bei den GE2/1-Kammern zeigten sich 2023 in der Qualitätskontrolle Materialprobleme mit den Oberflächen der Readout-Boards. Eine Reparatur ist möglich; allerdings bedeutet dies, alle gebauten GE2/1-Module nochmals zu zerlegen, die Readout-Boards zu passivieren und anschließend die Module wieder neu zusammen zu bauen. Die hierfür erforderliche Zeit wurde auf knapp zwei Jahre berechnet. In

Zusammenarbeit mit den LHCC-Referees wurde daher beschlossen, die Produktion der GE2/1-Kammern auf die Zeit nach der Installation der ME0-Kammern zu verschieben.

#### 4 **Verwendung der Zuwendung (wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, z. B. Investitionen, Personalmittel)**

Die bewilligten Personalmittel wurden verwendet, um Doktoranden und Postdocs zu beschäftigen, die die notwendigen Entwicklungsarbeiten durchgeführt haben. Im Teilprojekt Spurdetektor wurden zwei technische Mitarbeiterinnen beschäftigt, welche für den Modulbau und das Drahtbunden eingesetzt wurden, sowie zwei studentische Hilfskräfte, welche insbesondere die Qualitätskontrolle von Komponenten durchgeführt haben.

Die durch das BMFTR geförderten deutschen Gruppen im CMS-Experiment müssen gemäß CERN-MoU-2024-010 einen Betrag von 329.910 CHF zum CMS-Common-Fund beitragen. Hierfür wurden erst später benötigte Mittel in Höhe von 300.000 € umgewidmet und in den CMS-Common-Fund eingezahlt.

Im Bereich Spurdetektor wurden die bewilligten Investitionsmittel verwendet um

- Komponenten für den Bau von Modul-Prototypen zu beschaffen;
- die Testsysteme für Service-Hybride aufzubauen und die benötigte Elektronik zu produzieren;
- Anlagen für den Modulbau zu beschaffen, insbesondere Kühlgeräte, Auslesekomponenten, Netzgeräte, Trockenschränke;
- Werkzeuge für den Modulbau zu bauen oder zu beschaffen;
- Beiträge zu den Tracker CORE-Kosten zu leisten (2S Sensors, 2S Hybrids, 2S Mechanics, Services, Infrastructure, Common Systems); unsere Testkarte wurde teilweise als in-kind CORE Beitrag geltend gemacht;
- Beiträge zum CMS-Common-Fund zu leisten.

Im Bereich Myon-System wurden die bewilligten Investitionsmittel verwendet um

- Beiträge für die CORE-Kosten der DT- und GEM-Detektorsysteme zu leisten (Komponenten für den Bau der Minicrate-Systeme, Kabelbäume für die Niederspannungsverteilung, Testpuls-Boards, GEM-Folien, etc.);
- Beiträge zum CMS-Common-Fund zu leisten;
- ein Triggersystem für die ME0-Qualitätskontrolle zu bauen;
- das Testsystem für die Abnahme- und Hochratentests der neuen DT-OBDD-Boxen (Minicrates) auszubauen.

#### 5 **Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele**

##### 5.1 **Teilprojekt Spurdetektor**

Die CMS-Gruppen der Physikalischen Institute IB und IIIB der RWTH Aachen haben im Berichtszeitraum wichtige Beiträge zur Validierung des Modulkonzepts geleistet und die Produktion der Silizium-Detektormodule für den äußeren Spurdetektor vorbereitet. Die Arbeiten konzentrierten sich auf die „2S-Module“, in denen zwei 10x10 cm<sup>2</sup> große Silizium-Streifensensoren übereinander angeordnet sind und gemeinsam ausgelesen werden. Durch eine Korrelation der Teilchendurchgänge in beiden Sensorlagen können Spuren mit hohem Impuls ausgewählt werden.

##### 5.1.1 **Unterprojekt Service-Hybride (Unterprojekt 1.2)**

##### **Tests von Prototypen der Service-Hybride für 2S-Module (Arbeitspaket 1.2.1; IB, IIIB)**

Im Berichtszeitraum wurden 74 Prototypen von zwei Herstellern getestet. Wir haben die Tests für CERN übernommen, die Qualitätskontrolle gemacht, und die verschiedenen Generationen im Detail

charakterisiert (im Rahmen von zwei Promotionen). Dies betrifft sowohl den DC-DC-Konversionsteil (Effizienz, dynamisches Verhalten, Rauschen) als auch die Qualität der Datenübertragung (Bit Error Rate) sowie Slow-Control-Funktionalitäten (z.B. Temperaturmessung). Durch aufwendige Schnittbilder konnten wir einer Firma Probleme mit Durchkontaktierungen (Vias) nachweisen.

Weiterhin waren wir beteiligt am Test der Kick-off-Hybride, welche alle durch unsere Hand gingen. Diese Tests fanden mit der unten beschriebenen Testkarte statt. Die Vorserien-Hybride wurden am CERN unter Beteiligung eines unserer Doktoranden getestet.

Wir haben zwei Bestrahlungstests an der CIRCE-Facility (Straßburg) durchgeführt, mit jeweils zwei Hybriden. Der Fokus lag dabei auf dem bPOL12V-Chip, da dieser eine spezielle Halbleitertechnologie benutzt. Es wurden mit Protonen mit einer Energie von 25 MeV bestrahlt. Für eine integrierte Luminosität von  $3000 \text{ fb}^{-1}$  wird im Outer Tracker eine Fluenz von ca.  $1.04 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  sowie eine totale Dosis (TID) von 59 MRad erwartet. Im Juni 2023 haben wir zwei bPOL12V-Chips bestrahlt; die Fluenzen betragen  $1.17$  und  $1.33 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  und die Dosis-Leisungen 150 und 172 MRad (das Verhältnis von Fluenz zu Dosis hängt von der Energie der Teilchen ab). Beide Chips funktionierten einwandfrei während und nach der Bestrahlung. Im März 2023 haben wir zwei weitere Chips bestrahlt, um mehr Statistik zu gewinnen und auch, um in der Fluenz etwas höher zu gehen. Hierfür musste die Dosisrate erhöht werden. Der erste Chip entwickelte nach  $0.9 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  und 115 MRad Probleme. Nach einer Annealing-Phase über Nacht funktionierte er zunächst wieder. Der Chip wurde insgesamt, in mehreren Schritten und mit verschiedenen Dosisraten, zu  $1.22 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  und 156 MRad bestrahlt. Bei realistischen Dosisraten funktionierte er am Ende wieder. Der zweite Chip wurde dann mit wieder niedrigerer Dosisrate nur noch zu  $1.17 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  und 150 MRad bestrahlt, wobei keine Probleme auftraten. Die Ergebnisse wurden mit dem Chip-Designer (CERN) diskutiert. Der Ausfall eines Chips wurde auf die hohe Dosisrate zurückgeführt, welche um einen Faktor 10 000 höher ist als im Betrieb am LHC. Die Ergebnisse unserer ersten Kampagne wurden in das bPOL12V-Datenblatt aufgenommen.

### **Systemtests der Service-Hybride mit 2S- und PS-Modulen (Arbeitspaket 1.2.2; IB, IIIB)**

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurden thermische Tests von Service-Hybriden in einer Klimakammer durchgeführt und das Verhalten bei der späteren Betriebstemperatur von  $-35^\circ\text{C}$  untersucht.

In 2022 haben wir an einem Magnettest (M1-Magnet am CERN, 3T) von CMS teilgenommen (Katja Klein und ein Doktorand). Frau Klein hatte die Leitung des Tests. Wir haben insbesondere Service-Hybride im Magnetfeld in verschiedenen geometrischen Konfigurationen vermessen. Es wurden erwartungsgemäß keine Änderungen des Verhaltens festgestellt.

Wir haben Messungen auf PS-Power-Hybriden durchgeführt und konnten zeigen, dass Oszillationen in der DC-DC-Konversion aufgrund eines falsch dimensionierten Filters zu erhöhtem Rauschen führen. Der Filter wurde daraufhin für die Vorproduktion geändert.

Weitere Systemtests fanden auf 2S-Modulen statt und werden unter 5.1.2 berichtet.

Die angedachten Messungen mit finalen Kabeln und Netzteilen konnten nicht durchgeführt werden, da solche nicht zur Verfügung standen.

### **Entwicklung, Bau und Inbetriebnahme von Testsystemen für 2S-Service-Hybride für Serienfertigung (Arbeitspaket 1.2.3; IB, IIIB)**

#### *Testsystem für vertiefte Serientests und thermisches Zyklieren*

Das Testsystem wurde ertüchtigt. Es können nun drei Service-Hybride gleichzeitig zwischen Raumtemperatur und  $-35^\circ\text{C}$  zyklert und getestet werden. Alle Funktionalitäten des Hybrids werden getestet. Die Daten werden automatisch analysiert und bewertet und in einer lokalen Datenbank gespeichert und

dargestellt. Im Rahmen einer Promotion wurden Firmware und Software weiterentwickelt, wobei sich insbesondere der Übergang zwischen den Versionen des Serializer-Chips (GBTx und LpGBT), aber auch die Skalierung von einem auf drei Hybride, als sehr schwierig erwies. Das Setup ist nun in Betrieb, und wird während der Vorproduktion und Produktion benutzt werden. Es ist das einzige Setup, in welchem während der Zyklen die Hybride permanent unter Spannung gehalten und vermessen werden. Es wurden schon mehrere Probleme der Hybride mit diesem Setup gefunden, z.B. ein Problem mit den Vias in bestimmten Prototypen.

#### *Testkarte für Serientests im Crate-basierten Testsystem*

Wir haben für das am CERN und vom Hersteller während der Produktion zu benutzende Crate-basierte Testsystem eine neue Version unserer Testkarte für Service-Hybride entwickelt und produziert. Die Testkarte ist sehr komplex und testet alle Funktionen des Hybrids. Für die Karte wurde Firmware und Software entwickelt. Zusätzlich wurden diverse Adapterkarten und Kabel sowie mechanische Teile (z.B. Kühlplatten) entwickelt und produziert. Unser leitender Elektronikingenieur hat zusammen mit unserem Techniker die Schaltpläne und Layouts erstellt, die Produktion überwacht und die Firmware entwickelt. Zum Test der Karten wurden Setups aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Karten wurden qualifiziert und im Rahmen einer Masterarbeit in einem Klimaschrank eingebrannt. Es wurden 90 Karten produziert und 78 Karten an CERN ausgeliefert. Am CERN wurden sie mit Hilfe eines unserer Doktoranden in Betrieb genommen und das Team dort wurde trainiert. In 2024 wurde das System beim Hersteller installiert und in Betrieb genommen. Hier haben wir den Prozess von Aachen aus begleitet und unterstützt. Es wurden im Berichtszeitraum etwa 200 Vorproduktions-Hybride beim Hersteller und am CERN getestet, wobei wir uns an der Datenanalyse beteiligt und Feedback des Herstellers analysiert haben. Ende 2024 wurden vom Hersteller etwa 600 Produktionshybride getestet.

#### **Serientests von 2S-Service-Hybriden während Vor- und Serienproduktion (Arbeitspaket 1.2.4; IB, IIIB)**

Die vertieften Tests wurden auf Prototypen durchgeführt. Für die Vorproduktion haben wir jedoch nur die Hybride, welche wir für unsere eigenen Module erhalten haben, den vertieften Tests unterzogen. Dies lag einerseits am Zeitdruck in der Kollaboration, da die Hybride sofort an die Modulbau-Zentren verteilt werden mussten, andererseits auch daran, dass unser Setup immer noch überarbeitet wurde. Während der Produktion möchten wir möglichst alle Hybride, welche wir für unseren Modulbau erhalten, dem vertieften Test unterziehen. Dies entspräche ca. 10% der Gesamtproduktion. Die Produktion der Service-Hybride hat Ende 2024 begonnen, diese Hybride wurden jedoch noch nicht in der Kollaboration verteilt.

### **5.1.2 Unterprojekt Modulentwicklung und -produktion (Unterprojekt 1.3)**

#### **Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme von Testständen für die Qualitätskontrolle der 2S-Modul-Komponenten (Arbeitspaket 1.3.1; IB, IIIB)**

Alle Teststände zur Qualitätskontrolle von 2S-Modul-Komponenten wurden fertiggestellt.

Die Strom-Spannungs-Kennlinie der Siliziumsensoren wird in einer Probestation vermessen. Dort wird auch die automatisierte optische Kontrolle der Sensoren durchgeführt. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde ein LabView-Programm entwickelt, mit welchem alle Messungen automatisiert und nutzerfreundlich durchgeführt werden können. Die Messparameter wurden optimiert, Plots werden erstellt, und die Ergebnisse können direkt in die CMS-Datenbank geladen werden. Der Hochspannungs-Isolationstest der Kaptonstreifen und Hochspannungskabel wird ebenfalls in der Probestation durchgeführt. Hierfür wurde ein spezielles Werkzeug entwickelt. Dieser Test ist im gleichen LabView-Programm integriert.

Für die optische Inspektion der Kapton-Isolationsstreifen wurde ein Scanner-Setup entwickelt und eine Software geschrieben. Alle Streifen für die gesamte Produktion wurden schon vermessen.

Die AICF-Brücken müssen auf ihre Dimensionen geprüft werden. Hierfür wurde Werkzeug angeschafft (Grenzlehrdorne) sowie von der CMS-Kollaboration erhalten (Werkzeug zur Dickenmessung). Alle schon erhaltenen Brücken (ca. 200) wurden vermessen.

Die Funktionalität der Hybride wird durch einen Auslesetest geprüft. Hierfür haben wir zwei Testsysteme erhalten, welche vom KIT entwickelt und zentral verteilt wurden. Beide Testsysteme sind voll einsatzbereit.

Das Setup zur Vermessung der Alignierung der Sensoren („doppelseitige Metrology“) wurde im Rahmen einer Masterarbeit zur Produktionsreife gebracht. Dies beinhaltete insbesondere Verbesserungen der Software und die Quantifizierung der Messunsicherheiten, welche sehr gering sind. Das Setup erfüllt die Anforderungen.

Für die Qualitätskontrolle von Komponenten wurden zwei studentische Hilfskräfte eingesetzt.

### **Entwicklung, Bau und Test der Werkzeuge zum Bau der Module (Arbeitspaket 1.3.2; IB, IIIB)**

Einige Werkzeuge (Jigs) werden inzwischen zentral in der Kollaboration entwickelt und zur Verfügung gestellt. Dies betrifft das Sensor-Klebe-Jig (Fermilab, zwei Instanzen erhalten, weitere bestellt), das Hybrid-Klebe-Jig (KIT, fünf Instanzen erhalten), die Hybrid-Testplatte und das Werkzeug zum Biegen der Hybrid-Kabel (beide KIT, sieben und vier Instanzen erhalten).

Eigenentwicklungen sind hingegen das Kapton-Klebe-Jig, das Drahtbonding-Jig und das Pulltest-Jig. Ersteres ist komplex und wurde von unserem leitenden Ingenieur der Mechanik von Grund auf überarbeitet und in der Industrie gefertigt (unsere Werkstatt war ab Anfang 2024 nur beschränkt zugänglich aufgrund erhöhter Benz(a)pyren-Messwerte). Drahtbond- und Pulltest-Jigs wurden in der Werkstatt gefertigt.

Bis auf das Sensor-Klebe-Jig sind nun alle Jigs in ausreichender Anzahl für die Produktion vorhanden.

Unser Ingenieur hat ein Werkzeug entwickelt, mit welchem die Höhe der Einkapsulierung der Drahtbonds vermessen werden kann. Dieses wird nun zusammen mit KIT gefertigt und wird von allen 2S-Modulbau-Zentren verwendet werden.

Es wurden weitere Hilfswerkzeuge entwickelt und größtenteils, soweit möglich in unserer Werkstatt, gefertigt: Tablets zum sicheren Transport von Sensoren zwischen den Laboren, Werkzeuge zum sicheren Drehen von Sensoren, spezielle Carrier für die Module, ein Jig für den Isolationstest, etc.

Die Infrastruktur wurde in vielfältiger Weise verbessert, so haben wir ein Reinraum-Überwachungsprogramm entwickelt und alle Arbeitsplätze vorbereitet und ESD-sicher gestaltet. Viel Arbeit ging auch in die Konsolidierung der Klebprozesse. Insbesondere wurde ein Dispenser entwickelt, welcher momentan in der Testphase ist. Dieser soll mittelfristig den pneumatischen Dispenser ersetzen, mit dessen Reproduzierbarkeit wir nicht zufrieden sind.

### **Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme von Testständen für 2S-Module (Arbeitspaket 1.3.3; IB, IIIB)**

Für die Auslesetests der Module nach dem Drahtbonds und nach der Einkapsulierung wird die am KIT entwickelte Testbox (siehe oben) verwendet. Die benötigte Infrastruktur (Niederspannungs- und Hochspannungsnetzteile, Ausleseelektronik) wurde beschafft und integriert. Die Testsysteme sind im Einsatz.

Für Sample-Tests bei tiefen Temperaturen ( $-35^{\circ}\text{C}$ ) und thermische Zyklen wurden ein spezielles Setup entwickelt und gebaut. Vier Module können in diesem Setup gleichzeitig getestet werden. Die Box selbst wurde in der Werkstatt gebaut, ein Kühlgerät sowie die benötigten Netzteile und die Ausleseelektronik wurden beschafft und integriert. Hierfür wurde eine Software entwickelt. Das System wurde im Rahmen von zwei Bachelorarbeiten in Betrieb genommen und läuft automatisiert und stabil. Es war und ist im Einsatz, um Vorserien- und Vorproduktions-Module thermischen Belastungstests auszusetzen.

Zum Debugging von Modulen steht ein weiteres Setup zur Verfügung.

### **Bau und Test von 2S-Modul-Prototypen (Arbeitspaket 1.3.4; IB, IIIB)**

Im Berichtszeitraum wurden drei Prototypen gebaut. In 2022 bauten wir unser erstes 2S-Modul mit einem Sensorabstand von 1.8 mm und Prototyp-Hybriden mit LpGBT, bPOL-DC-DC-Konvertern, und VTRx+-Modul. In 2023 haben wir ein Modul mit 4.0 mm Sensorabstand und dem finalen Prototypen des Service-Hybrids sowie eines der ersten Module mit 1.8 mm Sensorabstand und der finalen Version des Concentrator-Chips CIC, Version 2.1, gebaut. Die Anzahl der Module war durch die Komponenten limitiert. Auch wenn die Anzahl an Prototypen geringer war als geplant, konnten wichtige Erfahrungen und Erkenntnisse gewonnen werden. Dies betrifft insbesondere die Prozeduren und Jigs für den Modulbau. Weiterhin wurden die Prototypen für elektrische und thermische Systemtests verwendet. Ein am Ende des letzten Förderzeitraums gebautes Prototypmodul wurde für Strahl- und Magnettests eingesetzt.

### **System-Tests und Strahl-Tests mit Prototyp- und Vorserien-Modulen (Arbeitspaket 1.3.5; IB, IIIB)**

Wir haben uns an elektrischen System-Tests führend beteiligt und viele wichtige Beiträge geliefert. So haben wir zum Verständnis der Unterschiede zwischen den beiden Service-Hybrid-Varianten mit mehreren Messungen, unter anderem im Rahmen einer Bachelor-Arbeit zu korreliertem Rauschen, beigetragen. Durch Einstrahlung von Störsignalen konnten wir die Suszeptibilität des Moduls vermessen und bestimmte Störquellen ausschließen. Wir haben durch Messungen zeigen können, dass die Ground-Potentiale der beiden Seiten des Moduls nicht ausgeglichen sind, was zur Entwicklung einer Ground-Ausgleichs-Platine geführt hat, die nun im Detektor eingesetzt wird. Wir haben einen Fehler im Layout des Kick-off-Service-Hybrids gefunden. Wir haben Module thermisch zyklert und dabei die wichtigen Modulparameter gemessen. Unser Vorserien-Modul (siehe unten) entwickelte dabei Probleme. Durch detaillierte Tests und Schnittbilder konnten wir zeigen, dass ein Chip nicht richtig verlötet war. Hierauf hat der Hersteller der Hybride seinen Lötprozess verbessert. Außerdem haben wir gezeigt, dass die optoelektrischen Konverter-Module (VTRx+) Licht emittieren und damit den Leckstrom und das Rauschen der Module erhöhen können. Auch aufgrund unserer Studien wurde eine Abschirmung entwickelt. Wir haben die Klebemethode für die Abschirmung entwickelt und validiert. Die Abschirmung wird nun im Detektor verwendet werden.

Wir haben im Rahmen zweier Doktorarbeiten Daten eines Strahl-Tests analysiert und waren führend an der Fertigstellung der Publikation beteiligt.

Von DESY haben wir einen Prototypen der mechanischen Endkappenstruktur erhalten, welche wir in unsere  $\text{CO}_2$ -Kühlanlage integriert haben. Ein 2S-Modul wurde mit 20 Temperatursensoren ausgestattet und der Leckstrom eines bestrahlten Moduls durch LED-Licht emuliert. Es konnte so im Rahmen einer Masterarbeit die Temperaturverteilung auf dem Modul vermessen und das thermische Runaway, also der exponentielle Temperaturanstieg durch die Temperaturabhängigkeit des Leckstroms, vermessen werden. Hierzu wurden Finite-Elemente-Simulationen erstellt und die Messungen mit diesen verglichen. Die Messungen bestätigten gut die Simulationen. Weitere Module wurden durch Heizwiderstände simuliert und der Effekt dieser zusätzlichen Module wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit untersucht. Mit

dem Vergleich des thermischen Verhaltens verschiedener Modultypen (Sensorabstand, Anzahl der Kühlpunkte) wurde begonnen. Diese Messungen sind einzigartig in der Kollaboration.

Wir haben eine erste Zusammenarbeit in Hinblick auf eine zukünftige Beteiligung an der Endkappen-Integration mit der Gruppe am DESY etabliert. Im Sommer 2023 haben zwei Mitarbeiter (Katja Klein und ein Doktorand) an einem Integrationstest am DESY teilgenommen und wir haben dafür auch mehrere Module zur Verfügung gestellt. Eine Doktorandin hat 2024 mehrere Messreisen zum DESY unternommen und dort verschiedene thermische Tests durchgeführt und die Daten analysiert. Diese Aktivität konzentrierte sich insbesondere auf die Vermessung des thermischen Verhaltens von PS-Modulen (dies ist der zweite Modultyp des Outer Trackers) in Zusammenhang mit der Benutzung von thermischen Interface-Materialien.

### **Bau der 2S-Modul-Vorserie (Arbeitspaket 1.3.6, IB, IIIB)**

Die Vorserie wurde CMS-seitig unterteilt in eine sogenannte Kick-off-Vorserie, eine Vorserie, und die Vorproduktion. Nur Vorproduktions-Module können im Detektor verwendet werden. Diese Nomenklatur folgt der CMS-Konvention. Die Einteilung in die Kategorien hängt mit der Version der Hybride zusammen. Die Anzahl der jeweils gebauten Module wurde durch die Verfügbarkeit der Komponenten limitiert.

Die Kick-off-Module benutzen Kick-off-Hybride, wobei es zwei Varianten des Service-Hybrids gab (Regular-Design und Split-Plane-Design). Ein Ziel war explizit, die bessere Variante zu identifizieren, welche zu niedrigerem Modulrauschen führt. Wir haben in der zweiten Jahreshälfte 2023 vier Kick-off-Module gebaut und im Detail charakterisiert. Alle Module erfüllten die Spezifikation.

Der oben erwähnte Fehler im Layout des Service-Hybrids konnte in einer kleinen Vorserie durch Abkleben einer falschen Verbindung (Bumpbond-Pad) auf der Platine herstellerseitig repariert werden, allerdings sind diese Hybride nicht im Detektor verwendbar. Wir haben ein Vorserien-Modul gebaut (Mai 2024). Das Modul erfüllte die Spezifikationen, entwickelte aber Probleme nach thermischen Zyklen (siehe oben).

Die Vorproduktion verwendet Hybride aus der Hybrid-Vorproduktion. Wir haben im zweiten Halbjahr 2024 sechs Vorproduktions-Module gebaut. Die Modul-Vorproduktion ist noch nicht abgeschlossen. Sobald weitere Komponenten zur Verfügung stehen, wird die Vorproduktion wieder aufgenommen. Eine Parallelisierung der Produktion konnte aufgrund der geringen Anzahl an Komponenten noch nicht getestet werden. Alle Module erfüllten die Spezifikationen.

Wir haben uns als Modulbau-Center soweit möglich qualifiziert. Dies beinhaltete unter anderem Drahtbond-Tests auf Samples sowie eine „Cardboard-Exercise“, in welcher der Modulbau mit Dummy-Modulen nachgestellt wurde. Außerdem sind wir im Rahmen von „Site Visits“ von Vertretern des Tracker-Upgrade-Managements besucht worden. Der letzte ausstehende Schritt ist, wie für alle Center, das erfolgreiche „Burn-in“ von fünf Vorproduktions-Modulen, welches für unser Center am DESY stattfindet. Vier Module wurden hierfür schon an DESY geliefert.

Im Rahmen der Vorserie wurden detaillierte Planungen zu den Arbeitsabläufen ausgearbeitet und soweit möglich auch getestet. Die beiden Technikerinnen für den Modulbau und das Drahtbonds wurden eingearbeitet. Sie sind in der Lage, die Arbeiten selbstständig durchzuführen. Eine lokale Datenbank wurde im Rahmen einer Masterarbeit entwickelt; sie wird zur Dokumentation aller Arbeitsschritte und Messergebnisse verwendet und dient als nutzerfreundliches Interface zur zentralen CMS-Datenbank. Außerdem beteiligen wir uns an der Entwicklung der zentralen Software zum Grading der Module, unter anderem mit einer Bachelorarbeit und im Rahmen einer laufenden Promotion.

## **Serienfertigung der 2S-Module (Arbeitspaket 1.3.7, IB, IIIB)**

Die Serienfertigung der Module hat aufgrund CMS-seitiger Verzögerungen noch nicht begonnen. Jedoch sind die Produktions-Module identisch zu den Vorproduktions-Modulen, so dass keine neuen technischen Probleme zu erwarten sind.

### **Allgemeines**

Katja Klein ist Co-Convener der Outer Tracker Hybrid Working Group. Sie war bis September 2023 Chair des Tracker Editorial Boards.

Katja Klein wurde im September 2023 zur Deputy-Tracker-Projektleiterin ernannt (L1-Position). In dieser Funktion ist sie in allen Gremien des Trackers vertreten, und sie ist Mitglied des CMS Management Boards und der CMS Upgrade Steering Group.

Katja Klein ist Chair des Annual Review Committees für das HGCALE-Projekt.

Oliver Pooth wurde im April 2024 zum Outer Tracker Module Quality Control Manager ernannt und ist in dieser Funktion Mitglied des Outer Tracker Module Production Office.

Lutz Feld vertritt Deutschland/BMBF im Tracker Finance Board und ist Mitglied des Tracker Upgrade Steering Committees.

Lutz Feld wurde in 2024 in die HL-CMS Reflection Group berufen.

## **5.2 Teilprojekt Myon-System**

### **5.2.1 Unterprojekt DT-Myonkammern (Unterprojekt 3.1)**

#### **Aufbau des Myon-Teststandes (Arbeitspaket 3.1.1; IIIA)**

Der Myon-Teststand wurde in der ursprünglich geplanten Form im Jahr 2023 in Betrieb genommen. Da allein mit kosmischen Myonen die Durchführung von Hochratentests nicht möglich ist und zudem die Überprüfung jedes einzelnen Kanals der OBDT-Box ausschließlich mit kosmischen Myonen nicht garantiert werden kann, schlug die DT-Gruppe bereits im Jahr 2021 eine Erweiterung vor. Der Teststand sollte um eine zusätzliche, FPGA-basierte Signalerzeugungsplattform ergänzt werden, welche Myon-Hit-ähnliche Signale mit hohen Raten, wie sie beim HL-LHC erwartet werden, emuliert.

Die von dieser Plattform erzeugten Signale werden mithilfe einstellbarer Maskierung der Front-End-Kanäle zu sogenannten Hit-Mustern gruppiert. Für die Integration der Komponenten dieser Erweiterungsplattform wurde im Jahr 2022 ein dediziertes Rack entworfen. Dieses umfasst neben der oben erwähnten FPGA-Plattform auch einen Backend-PC sowie ein optisches Patch-Panel. Letzteres wurde unter Berücksichtigung des neuen CMS-DT-Glasfaserbaums konzipiert und ermöglicht es der FPGA-Plattform, jede beliebige OBDT-Platine innerhalb eines fertig gebauten Minicrates anzusteuern.

Die zugrundeliegenden Komponenten der Erweiterungsplattform (Hardware sowie eine erste Version der FPGA-Firmware) wurden im Frühjahr und Sommer 2023 im Rahmen von Dienstreisen von unserem Postdoktorand und einem Masterstudenten am INFN Padua erfolgreich getestet und anschließend in Aachen vergleichbar aufgebaut.

Im Jahr 2023 wurde außerdem beschlossen, die in den Verifikationstests eingesetzte Signalschleife zwischen OBDT-Box und DT-Front-End so umzusetzen, dass sie dem finalen Aufbau möglichst genau entspricht. Die Myon-Hit-Signale werden dabei durch sogenannte Testpulse simuliert. Diese Testpulse kommen auch im regulären DT-Betrieb zum Einsatz, insbesondere zur präzisen zeitlichen Kalibration der Signalfade in der Signalschleife vom DT-Frontend zur OBDT-Box.

Die Erzeugung der Testpulse für die Phi-Superlayer erfolgt durch die OBDT-Phi Boxen. Die für die Theta-Superlayer benötigten Testpulse werden von einem separaten Testpuls-Modul erzeugt. Diese Module kommen später gemeinsam mit den OBDT-Theta-Platinen als OBDT-Theta-Box in jedem Minirate der DT-Stationen MB1, MB2 und MB3 im CMS-Detektor zum Einsatz. Die entsprechenden Testpuls-Module für die Theta-Superlayer wurden von unserer Gruppe an der RWTH Aachen entwickelt und zuerst im Aachener DT-Teststand erprobt. Darüber hinaus wurden sie im September 2023 einem einwöchigen Bestrahlungstest in der CHARM-Facility des CERN unterzogen. Dieser verlief erfolgreich.

Unsere Gruppe ist darüber hinaus im Rahmen der Hochratentest-Entwicklungen sowie der elektronischen Erweiterung des Teststands auch für die Entwicklung der Minirate-Testsoftware verantwortlich. Hierfür wird ein umfassendes Software-Framework entwickelt, das die Kontrolle des Testablaufs sowie eine lückenlose Protokollierung der Tests neuer DT-Minirates ermöglicht.

### **Kammertests an der GIF<sup>++</sup> (Arbeitspaket 3.1.2; IIIA)**

Wir haben uns bis Ende 2022 an den Messungen einer DT-Kammer an der GIF<sup>++</sup>-Facility unter verschiedenen Strahlenbelastungen und später dann bei Messungen zum Verhalten der Kammer unter Hochspannung beteiligt. Eine geringfügige Reduzierung der Hochspannung sowie der Betrieb des Gasystems im „open-loop“-Modus bewirken eine deutliche Verlangsamung der strahlungsbedingten Alterung der DT-Kammern. Ergebnisse wurden in Nucl. Instr. Meth. A 1046 (2023) und Nucl. Instr. Meth. A 1065 (2024) veröffentlicht.

### **Design / Konstruktion neuer Versorgungsrahmen (OBDT-Box) (Arbeitspaket 3.1.3; IIIA)**

Unsere Gruppe hat umfangreich zum mechanischen Design der OBDT-Boxen beigetragen. Hierbei ging es insbesondere um die Coverbleche für die OBDT-Phi- und OBDT-Theta-Boxen. Diese Bleche schützen die in den DT-Minirates verbaute OBDT-Elektronik. Außerdem ermöglichen Sie die eindeutige Zuordnung aller Anschlüsse (Front-End, Slow Control, optische Anschlüsse) bei der späteren Installation der neuen Minirates an den DT-Myonkammern im CMS-Detektor. Mehrere Prototypen wurden gebaut und in Integrationstests optimiert. Da das III. Physikalische Institut A für die Produktion dieser Teile zuständig ist, wurden alle Fertigungsschritte von uns entwickelt und dokumentiert.

Von unserer Gruppe wurde außerdem ein Teil der FPGA-Firmware entwickelt und programmiert, welche zur Auslese der Drucksensoren (PADC) zur Mehrkanal-Überwachung des DT-Kammerdrucks dient. Diese Firmware implementiert die Schnittstelle zum PADC-Modul und stellt die fortwährend ausgelesenen Druckwerte den weiteren FPGA-Firmwaremodule der OBDT-Platine zur Verfügung. Die von uns entwickelten Module wurden ausführlich getestet und dokumentiert, um der DT-Gruppe die Integration in die übergeordnete Firmware zu erleichtern.

### **Produktion von OBDT-Boxen (Arbeitspaket 3.1.4; IIIA)**

Aufgrund einer baulich bedingten Kontamination mit Benzo(a)pyren mussten die mechanische Werkstatt des III. Physikalischen Instituts A der RWTH Aachen und die angrenzende Experimenthalle im Jahr 2024 für einen längeren Zeitraum geschlossen werden. Dies hat zu Verzögerungen bei der Teileproduktion für DT und GEM (s.u.) geführt.

Die Fertigung der von uns zu liefernden mechanischen Komponenten für die OBDT-Boxen sollte ursprünglich vollständig in der Institutswerkstatt erfolgen. Aufgrund der o.g. temporären Werkstattschließung haben wir die Abfolge der Fertigungsschritte daraufhin so optimiert, dass die Fertigung teilweise von externen Firmen und anschließend durch die Institutswerkstatt durchgeführt werden kann. Die Optimierung der internen und externen Fertigungsschritte erfolgte durch die Fertigung einer Kleinserie der

Coverbleche. Basierend auf dem daran optimierten Ablauf wurde die reguläre Produktion der Komponenten Ende 2024 gestartet.

Neben den mechanischen Komponenten der OBDT-Boxen ist das III. Physikalische Institut A der RWTH Aachen auch an der Entwicklung und Produktion elektronischer Komponenten beteiligt. Ein wichtiger Teil der OBDT-Theta Boxen ist das bereits erwähnte Testpuls-Modul. Dieses Modul ermöglicht das präzise Aussenden leistungsstarker elektronischer Signale mit steilen Flanken ( $\sim 10\text{ns}$ ) an die Front-End-Elektronik der DT-Kammern. Angesteuert wird dieses Testpuls-Modul vom FPGA der OBDT-Theta-Platine. Das Modul ermöglicht eine einstellbare Amplitude der ausgesendeten Testpulse, damit die Front-End-Elektronik bei beliebig vorgegebenen Schwellenwerten der Diskriminatoren kalibriert werden kann. Die Entwicklung der Testpuls-Module erfolgte maßgeblich im Jahr 2023. Im Frühjahr 2024 wurden insgesamt 200 Stück dieser Module produziert. Das Design erreicht eine maximale zeitliche Abweichung von weniger als 2 ns innerhalb aller Kanäle einer Testpuls-Platine. Zur Verifikation werden später die Schaltzeit-Charakteristiken aller Kanäle aller produzierten Module noch ausführlich gemessen und dokumentiert.

### **Produktion Low-Voltage-Patch-Panels (Arbeitspaket 3.1.6; IIIA)**

Das III. Physikalische Institut A ist für die Ausarbeitung des Konzepts und die spätere Umsetzung der neuen Niederspannungsverteilung für die DT-Minicrates am CMS-Detektor zuständig. Das von uns ausgearbeitete und von der DT-Gruppe anschließend beschlossene Konzept sieht komplexe Kabelbäume zwischen den jeweiligen Low-Voltage Patch Panels (LVPP) und den OBDT-Boxen eines neuen DT-Minicrates vor. Das Design der Kabelbäume berücksichtigt dabei einen gleichmäßigen Spannungsabfall, damit alle OBDT-Boxen mit der passenden Niederspannung versorgt werden. Da im DT-System verschiedene Minicrate-Konfigurationen mit unterschiedlicher Anzahl an OBDT-Boxen vorhanden sind, wurde für die spätere Produktion ein Katalog der Kabelspezifikationen ausgearbeitet. Je nach DT-Kammertyp und -Position müssen auch unterschiedliche Kabellängen und -Querschnitte berücksichtigt werden. Die Produktionsspezifikation berücksichtigt dabei nicht nur die elektrischen Aspekte, sondern auch die vom CERN im Dezember 2021 verschärften Brandschutz-Anforderungen (SSI-FS-2-1). Dementsprechend wurden die zu verwendenden Materialien der Kabel sorgfältig ausgewählt.

Prototypen der neuen LVPP-Anschlussboxen und der LV-Kabelbäume für die verschiedenen DT-Kammertypen wurden in der Elektronik-Werkstatt des III. Physikalischen Instituts A produziert und im Dezember 2023 erfolgreich an einer DT-Kammer im CMS-Detektor zum Einsatz gebracht. Für die Produktion aller erforderlichen Kabelbäume wurden verschiedene Firmenkandidaten aus der Kabelindustrie evaluiert und vorausgewählt. Anschließend wurde ein Ausschreibungsverfahren durchgeführt. Eine geeignete Kabelproduktionsfirma wurde identifiziert und die Kabelproduktion Ende 2024 erfolgreich abgeschlossen.

### **5.2.2 Unterprojekt GEM-Myonkammern (Unterprojekt 3.2)**

Im Berichtszeitraum lag der Start des Run 3 mit dem Ziel, sehr viel Statistik an Kollisionsereignissen zu sammeln. Dafür wird die Luminosität durch wachsenden Pileup maximiert. Dies ist ein gutes Testszenario für die installierten GE1/1-Kammern, die am HL-LHC weiterlaufen werden. Um hierbei schnell Feedback zur Kammer-Performance zu erhalten, hat unser Doktorand die „Prompt Feedback Analyse“ entwickelt und auf die Daten angewendet. Das schnelle Feedback war eine entscheidende Voraussetzung für die erfolgreiche Optimierung der Betriebsparameter in der CMS-Umgebung. Zu Beginn der Datennahme mussten zunächst HV-Einstellungen optimiert und das Verhalten während des An- bzw. Abschaltens des CMS-Magnets verstanden und optimiert werden. Außerdem wurde erwartungsgemäß

ein höheres Rauschen beobachtet und durch Einstellung der Ausleseschwelle reduziert. Beide GE1/1-Stationen wurden in die reguläre CMS-Datennahme integriert; damit erfolgte eine weitere Optimierung der Betriebsparameter (HV, Gasfluss). Eine Dokumentation der GE1/1-Inbetriebnahme und Performance ist u.a. veröffentlicht in CMS DP-2023-069 und wurde in zahlreichen Konferenzbeiträgen gezeigt. Neben der „Prompt Feedback Analyse“ hat unser Postdoktorand die Aktivitäten der Datenzertifizierung aufgebaut und geleitet.

### **Konstruktion von GE2/1 und ME0 (Arbeitspaket 3.1.2; IIIA)**

Nach anfänglichen Verzögerungen infolge der Covid19-Pandemie begann die Produktion der GE2/1-Kammern im Jahr 2022. Wir haben an der RWTH Aachen mit der Produktion mechanischer Komponenten für die GE2/1-Kammern wie geplant begonnen und auch die Qualitätskontrolle von GE2/1-Kammern durchgeführt. Dies war eine zentrale Aufgabe unseres Doktoranden. Leider traten während der Kontrolle schwerwiegende Probleme auf, die eine normale Funktionalität verhinderten. Nach umfangreichen Untersuchungen zeigte sich, dass die Oberfläche der Ausleseboards nicht passiviert wurde, wodurch sich mikroskopisch kleine Metallteile ablösen, die dann zu Kurzschlüssen führen. Eine Reparaturstrategie wurde am MPT-Labor des CERN entwickelt. Allerdings ist es dafür notwendig, alle Kammern zu zerlegen und anschließend wieder zusammen zu bauen. Dafür wird ein Zeitraum von ca. 2 Jahren abgeschätzt. Zusammen mit der vorhandenen Verzögerung würden daher die Produktion von GE2/1-Kammern und ME0-Kammern teilweise parallel verlaufen und die Kapazitäten für Produktion und Qualitätskontrolle überfordern. Daher wurde entschieden, die GE2/1-Produktion auf die Zeit nach Ende des ME0-Teilprojekts zu verschieben. Die Installation der GE2/1-Kammern ist aufgrund der eigenen GEM-Station wesentlich flexibler, während die ME0-Kammern noch zu sogenannten „Stacks“ kombiniert werden und dann in einem engen Zeitfenster in die HGAL (High Granularity Calorimeter)-Struktur eingebaut werden müssen.

Der „Engineering Design Review“ für das ME0-Teilprojekt und der „Electronics System Review“ fanden im Mai 2023 statt. Hierfür erfolgten verschiedene Vorbereitungen. Für die geplante Produktion der mechanischen ME0-Komponenten wurden für alle Teile technische CAD-Zeichnungen von unserem Werkstatteleiter Barthel Philipps erstellt. Für ME0 soll ein Großteil der Kammerrahmen und „Patch Panels“ sowie viele verschiedene Teile für den Zusammenbau der Stacks in Aachen gefertigt werden. Erste Prototypen und eine Kleinserie wurden gefertigt und für Integrationstests zum CERN geschickt. Als Folge dieser Tests wurde das Design einiger Komponenten angepasst, um die erforderliche Dicke eines Stacks einzuhalten. Dies ist notwendig, da die Stacks in die HGAL-Mechanik eingefügt werden müssen.

### **GEM-Kammertests (GEM-Teststand) (Arbeitspaket 3.1.3; IIIA)**

An der RWTH wurde die Laborinfrastruktur für die geplante Qualitätskontrolle der ME0-Kammern eingerichtet. Die Qualitätskontrolle der ME0-Kammern ist technisch wesentlich anspruchsvoller. Anders als zuvor müssen nun zwei Module der Frontend-Elektronik kombiniert und dann durch ein weiteres Elektronik-Modul zeitlich synchronisiert werden. Wesentliche Schwierigkeiten gab es durch die Sperrung der an die Experimenthalle angrenzenden Labore aufgrund der bereits weiter oben berichteten Benzo(a)pyren-Kontamination.

Vor Beginn der Produktion muss die Performance eines kompletten ME0 Stacks verifiziert werden. Dafür wurde 2024 in zwei Kampagnen ein Stack in einem Muon-Teststrahlexperiment mit Strahlungs-Untergrund an der GIF<sup>++</sup>-Cäsium-Quelle getestet. Wir haben uns hierbei vor Ort am CERN beteiligt und beim Aufbau und der Datennahme mitgewirkt. Außerdem haben wir die Daten hinsichtlich der Zeitauflösung ausgewertet. Erstmals wurde dabei eine Zeitauflösung von etwa 5 ns für einen kompletten Stack mit sechs Lagen gemessen, wie im TDR antizipiert.

Für Tests mit kosmischen Myonen am CERN haben wir einen Szintillatortrigger mit wellenlängen-schiebenden Lichtleitstäben und Auslese durch Silizium-Photomultiplier entwickelt und gebaut. Die Funktionstests erfolgten im September und Oktober 2024, bevor der Trigger dann fristgerecht zum CERN geliefert werden konnte.

### **Alterungstest**

Die ME0-Kammern werden einem hohen Teilchenfluss von bis zu 150 kHz/cm<sup>2</sup> ausgesetzt sein. Damit werden während der Laufzeit des HL-LHC bis zu 7.9 C/cm<sup>2</sup> an Ladung akkumuliert. Dafür haben wir einen Alterungstest mit einer ME0-Kammer durchgeführt, die von September 2021 bis Juni 2023 kontinuierlich mit Röntgenstrahlung bestrahlt wurde. Regelmäßig wurde die Gasverstärkung gemessen, die sich durch eventuelle Alterungseffekte reduzieren würde. Das Ziel von 7.9 C/cm<sup>2</sup> an akkumulierter Dosis wurde erreicht. Die drei GEM-Folien dieser Kammer wurden mit einem Elektronenmikroskop optisch untersucht; außerdem wurde auch die Materialkomposition studiert. Es konnten keine wesentlichen Effekte der Bestrahlung identifiziert werden, bis auf eine Vergrößerung des inneren Durchmessers der Löcher in der GEM-3-Folie. Als dritte Stufe einer Triple-GEM Kammer ist dies die Folie mit der maximalen Ladungsmenge. Allerdings wurde keine Veränderung der Gasverstärkung beobachtet. Die Ergebnisse wurden von Kerstin Hoepfner auf der Ageing2023 Konferenz vorgestellt und wurden in Nucl. Instr. Meth. A 1066 (2024) veröffentlicht.

### **Allgemeines**

Alexander Schmidt ist seit Juli 2024 deutscher Vertreter im CMS Management Board.

Kerstin Hoepfner ist Chair des Authorship Boards und seit September 2024 auch Chair des Muon Institution Boards.

Archie Sharma ist Run Coordinator für das DT-Myon-System.

Kerstin Hoepfner und Archie Sharma sind Mitglied des Muon Management Boards.

Dmitry Eliseev ist Deputy Electronics Coordinator für das DT-System.

## **6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Ohne die durchgeführten Arbeiten hätten die Ergebnisse nicht erzielt werden können.

## **7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die Ergebnisse dieses Projekts bilden die Grundlage für den Bau des neuen Spurdetektors und den Ausbau des Myon-Systems für den Betrieb des CMS-Experiments am HL-LHC. Dabei werden neuartige Detektorkomponenten entwickelt, die auch in anderen Experimenten Anwendung finden können. Eine Reihe von Komponenten werden in der Industrie gefertigt und stellen diese vor besondere Herausforderungen, deren Bewältigung den Firmen hilft, ihre Leistungsfähigkeit weiter zu steigern. Mit dem verbesserten CMS-Detektor wird es am HL-LHC möglich sein, das Physikpotential des LHC voll zu nutzen.

## **8 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Keiner.

## 9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

### 9.1 Referierte Publikationen (z. B. in Fachzeitschriften oder -büchern und referierte Konferenzproceedings)

- a. 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.
- b. O. Bouhali, K. Hoepfner, F. Ivone, T. Kamon, H. Keller, S. Malhotra and B. Al Rashdi, Impact of the hole orientation of asymmetric GEM foils on the performance of single and triple GEM detectors, 2021 JINST 16 P10032.
- c. The GEM Muon Group of the CMS Collaboration, Performance of a triple-GEM demonstrator in pp collisions at the CMS detector, 2021 JINST 16 P11014.
- d. The GEM Muon Group of the CMS Collaboration, Benchmarking LHC background particle simulation with the CMS triple-GEM detector, 2021 JINST 16 P12026.
- e. F. Ivone, K. Hoepfner and H. Keller, Study of GEM foil etching techniques on detector performance for the CMS muon upgrade, 2021 IEEE conference proceedings, IEEE Xplore 9 Sept 2022, DOI: 10.1109/NSS/MIC44867.2021.9875458.
- f. The GEM Muon Group of the CMS Collaboration, Quality control of mass-produced GEM detectors for the CMS GE1/1 muon upgrade, Nucl. Inst. and Meth. A 1034 (2022) 166716.
- g. I. Mateos Domínguez, G. Blanchot, P. Chatagnon, S. Cooperstein, A. Di Mattia, A. Honma, K. Klein, M. Kovacs, A. La Rosa, I. Makarenko, Y. Otariid, A. Pauls, Z. Pissaki, K. Schleidweiler, S. Seif El Nasr and A. Zografos, Software tools for hybrid quality control for the CMS Outer Tracker Phase-2 Upgrade, 2023 JINST 18 C01048.
- h. C. Dziwok, L. Feld, K. Klein, M. Lipinski, A. Pauls, O. Pooth and N. Röwert on behalf of the CMS Tracker Group, Influence of High-Frequency Magnetic Fields on Noise Behavior of CMS 2S Module Prototypes, 2023 JINST 18 C01013.
- i. C. Dziwok, L. Feld, W. Karpinski, K. Klein, M. Lipinski, D. Louis, I. Oezen, A. Pauls, O. Pooth, M. Repic and M. Wlochal on behalf of the CMS Tracker Group, Test system for the Service Hybrid of the 2S Module for the CMS Phase-2 Outer Tracker Upgrade, 2022 JINST 17 C03005.
- j. The DT Muon Group of the CMS Collaboration, The Analytical Method algorithm for trigger primitives generation at the LHC Drift Tubes detector, Nucl. Inst. and Meth. A 1049 (2023) 168103.
- k. The GEM Muon Group of the CMS Collaboration, Production and validation of industrially produced large-sized GEM foils for the Phase-2 upgrade of the CMS muon spectrometer, Nucl. Instrum. and Meth. A 1057 (2023) 168723.
- l. The GEM Muon Group of the CMS Collaboration, Impact of magnetic field on the stability of the CMS GE1/1 GEM detector operation, 2023 JINST 18 P11029.
- m. Archie Sharma on behalf of the CMS Collaboration, The Phase-2 upgrade of the CMS Drift Tube detectors for High Luminosity LHC, Nucl. Instrum. and Meth. A 1046 (2023) 167657.
- n. M. Kovacs, M. Abbas, I. Ahmed, G. Blanchot, A. Honma, A. La Rosa, I. Mateos Dominguez, K. Klein, M. Mohammadi Najafabadi, K. Schleidweiler, P. Szydlík and A. Zografos on behalf of the CMS Collaboration, Hybrid designs and kick-off batch production experience for the CMS Phase-2 Upgrade, 2024 JINST 19 C04052.
- o. The Tracker Group of the CMS Collaboration, Beam test performance studies of CMS Phase-2 Outer Tracker module prototypes, 2024 JINST 19 P10032.
- p. The DT Muon Group of the CMS Collaboration, Longevity studies for the CMS Drift Tubes towards HL-LHC, Nucl. Instrum. and Meth. A 1065 (2024) 169512.
- q. K. Hoepfner for the CMS muon group, Longevity study of a triple-GEM chamber for the HL-LHC upgrade, Nucl. Instrum. and Meth. A 1066 (2024) 169583.

## 9.2 Andere Veröffentlichungen (z. B. Konferenzbeiträge wie Vorträge und Poster, unrefериerte Proceedings, Conference Notes)

- a. Alexander Pauls, Test system for the Service Hybrid of the 2S Module for the CMS Phase-2 Outer Tracker Upgrade, Poster, TWEPP 2021 (virtuell), September 2021. Dieses Poster hat einen Poster-Preis gewonnen.
- b. Dmitry Eliseev, Blade-board for stability studies of the slow-control functionality of the CMS muon DT uTCA backend, FSP-CMS Meeting, September 2021.
- c. Francesco Ivone, GEM Detectors for the CMS Muon System, FSP-CMS Meeting, September 2021.
- d. Katja Klein, Hybrids - where the trouble meets, 14th Terascale Detector Workshop, online, Februar 2022.
- e. Kerstin Hoepfner, High-rate Muon Tracking: GEM Detectors in CMS, 14th Terascale Detector Workshop, online, Februar 2022.
- f. Nicolas Röwert, Optical inspection of silicon strip sensors for the Phase 2 Upgrade of the CMS Tracker, DPG-Frühjahrstagung 2022, März 2022.
- g. Tim Ziemons, Beam test of 2S module prototypes for the Phase-2 CMS Outer Tracker, DPG-Frühjahrstagung 2022, März 2022.
- h. Christian Dziwok, Stress testing optical readout components for CMS 2S modules, DPG-Frühjahrstagung 2022, März 2022.
- i. Patrick Juraschitz, Vermessung von Streifenmodulen für das Phase-2 Tracker Upgrade bei Betriebstemperatur, DPG-Frühjahrstagung 2022, März 2022.
- j. Alexander Pauls, Testing results of the latest Service Hybrid prototypes for CMS silicon strip module, DPG-Frühjahrstagung 2022, März 2022.
- k. Archie Sharma, Group Report: DT upgrade activities during LHC long shutdown II and readiness status for Run 3, DPG-Frühjahrstagung 2022, März 2022.
- l. Francesco Ivone, The CMS Muon upgrade and the commissioning of the first GEM station, DPG-Frühjahrstagung 2022, März 2022.
- m. Dmitry Eliseev, Upgrade of a cosmic muon teststand for the CMS DT-Project, DPG-Frühjahrstagung 2022, März 2022.
- n. Shawn Zaleski, A first look at CMS gas electron multiplier data and certification, DPG-Frühjahrstagung 2022, März 2022.
- o. Nicolas Röwert, Influence of High-Frequency Magnetic Fields on Noise Behavior of CMS 2S Module Prototypes, Poster, TWEPP 2022, Bergen, Norwegen, September 2022.
- p. Patrick Juraschitz, The Double-sided Metrology Machine in Aachen, FSP-CMS Meeting, Aachen, September 2022.
- q. Alexander Pauls, Developments in prototyping and testing of service hybrids for the 2S module, FSP-CMS Meeting, Aachen, September 2022.
- r. Nicolas Röwert, Optical inspection and testing of silicon sensors during series production of 2S modules, FSP-CMS Meeting, Aachen, September 2022.
- s. Christian Dziwok, SEH testboard setup for sample-based in-depth PQC, FSP-CMS Meeting, Aachen, September 2022.
- t. Stefan Krischer, Commissioning of the Multimodule Coldbox (MMCB) for CMS 2S modules, FSP-CMS Meeting, Aachen, September 2022.
- u. Katja Klein, German Contributions to the CMS Phase-2 Upgrades, Plenarvortrag, FSP-CMS Meeting, Aachen, September 2022.
- v. Shawn Zaleski, Early Run 3 Data and Certification in the CMS Muon Subsystems, FSP-CMS Meeting, Aachen, September 2022.
- w. Francesco Ivone, GEM R&D and operation of the first station in CMS, FSP-CMS Meeting, Aachen, September 2022.
- x. Katja Klein, The Hybrids of the 2S Module, IWTD-HEP-2022 (5th International Workshop on Tracking Detectors in High Energy Physics), NCP, Pakistan, online, Oktober 2022.

- y. Francesco Ivone on behalf of CMS GEM group, Commissioning results and operational experience of the first triple-GEM station of the CMS muon system, 2022 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room Temperature Semiconductor Detector Conference, November 2022.
- z. Felix Thurn, Systematic tests of the testing infrastructure for CMS Outer Tracker Service Hybrids, DPG-Frühjahrstagung 2023, März 2023.
- aa. Vanessa Oppenländer, Thermal Measurements of 2S Modules with an Evaporative CO<sub>2</sub> Cooling System for the CMS Phase-2 Outer Tracker Upgrade, DPG-Frühjahrstagung 2023, März 2023.
- bb. Alexander Pauls, Performance of the latest Service Hybrid prototypes for CMS silicon strip modules, DPG-Frühjahrstagung 2023, März 2023.
- cc. Nicolas Röwert, Influence of High Frequency Magnetic Fields on the Noise Behavior of CMS 2S Module Prototypes, DPG-Frühjahrstagung 2023, März 2023.
- dd. Kerstin Hoepfner, Invited Talk: Precise muon detection: novel technologies for the luminosity frontier, DPG-Frühjahrstagung 2023, März 2023.
- ee. Matej Repik, High-rate On-Board Drift Tube electronics testing, DPG-Frühjahrstagung 2023, März 2023.
- ff. Francesco Ivone, Impact of environmental pressure and temperature variations on triple-GEM detector gas gain, DPG-Frühjahrstagung 2023, März 2023.
- gg. Vanessa Oppenländer, Thermal Measurements of a 2S Module on a TEDD-like Cooling Structure, FSP-CMS Meeting, DESY/Hamburg, Oktober 2023.
- hh. Felix Thurn, Systematic tests of the testing infrastructure for CMS Outer Tracker Service Hybrids, FSP-CMS Meeting, DESY/Hamburg, Oktober 2023.
- ii. Tim Ziemons, Assembly and validation of kick-off modules for the Phase-2 Outer Tracker, FSP-CMS Meeting, DESY/Hamburg, Oktober 2023.
- jj. Shawn Zaleski, Extending the CMS Endcap Muon System Using GEM Detectors, FSP-CMS Meeting, DESY/Hamburg, Oktober 2023.
- kk. Katja Klein, Outer Tracker Hybrids - Kick-off batch, pre-production, production, LHCC-P2UG Review, November 2023.
- ll. Katja Klein, Outer Tracker Hybrids - Kick-off batch, pre-production, production, Tracker Week Plenary Meeting, Januar 2024.
- mm. Katja Klein, Low mass system design: Powering, 16th Terascale Detector Workshop, Mainz, Februar 2024.
- nn. Kerstin Hoepfner, Gas detectors for very high rates, 16th Terascale Detector Workshop, Mainz, Februar 2024.
- oo. Vanessa Oppenländer, Measurement of the Thermal Runaway of a 2S Module on a TEDD-like Structure for the CMS Phase-2 Upgrade, DPG-Frühjahrstagung 2024, März 2024.
- pp. Dmitry Eliseev, Verification of the new CMS DT on-chamber electronics, DPG-Frühjahrstagung 2024, März 2024.
- qq. Tim Fabisch, Studies on GEM amplification and time resolution, DPG-Frühjahrstagung 2024, März 2024.
- rr. Shawn Zaleski, Upgrading the CMS muon end cap for the high luminosity LHC using GEM chambers, DPG-Frühjahrstagung 2024, März 2024.
- ss. Katja Klein, OT Modules, Hybrids, and MaPSAs: from Kick-off to Pre-Production, LHCC-P2UG Review, Mai 2024.
- tt. Vanessa Oppenländer, Status of the Aachen 2S Module Assembly Center, FSP-CMS Meeting, Aachen, September 2024.
- uu. Lennard Wilde, Glue dispensing and bond encapsulation on 2S modules, FSP-CMS Meeting, Aachen, September 2024.
- vv. Jan Teroerde, Investigations on Common Mode noise in Outer Tracker 2S modules, FSP-CMS Meeting, Aachen, September 2024.

- ww. Max Beckers, Grading procedures for 2S modules for the CMS Phase 2 Tracker Upgrade, FSP-CMS Meeting, Aachen, September 2024.
- xx. Shawn Zaleski, Gas electron multipliers as an upgrade to the CMS muon end cap system for the high-luminosity LHC, FSP-CMS Meeting, Aachen, September 2024.
- yy. Dmitry Eliseev, CMS Drift-Tube On-Chamber Electronics: Upgrade and Verification, FSP-CMS Meeting, Aachen, September 2024.
- zz. Niklas Herrmann, Time resolution of CMS ME0 stacks made of triple-GEM detectors, FSP-CMS Meeting, Aachen, September 2024.
- aaa. Katja Klein, CMS Upgrade and Plans, Plenary ECFA Meeting, CERN, November 2024.
- bbb. Katja Klein, Outer Tracker Hybrids - From Pre-production to Production, HLCC-P2UG Review, November 2024.

### 9.3 Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Diplom, Staatsexamen, Promotion, Habilitation)

- a. Giovanni Mocellin, Performance of the GE1/1 detectors for the upgrade of the CMS Muon Forward system, Doktorarbeit, Juli 2021.
- b. Matej Repik, Thermal Tests of the Service Hybrids for the Phase-2 Upgrade of the CMS Tracker, Bachelorarbeit, August 2021.
- c. Vanessa Oppenländer, Investigation on the Trigger Functionality of a 2S Module Prototype for the CMS Phase-2 Upgrade, Bachelorarbeit, November 2021.
- d. Anna Becker, Development of a Control Interface for Monitored and Automated Characterization of the Silicon Sensors for 2S Modules for the CMS Phase-2 Tracker Upgrade, Masterarbeit, Dezember 2021.
- e. Tim Ziemons, Assembly and Test of Prototype 2S Modules for the Phase-2 Upgrade of the CMS Outer Tracker, Doktorarbeit, August 2022.
- f. Patrick Juraschitz, Double-sided Metrology of 2S Modules for the CMS Phase-2 Tracker Upgrade: Preparations for Serial Production and Measurements at Operating Temperature, Masterarbeit, August 2022.
- g. Stefan Krischer, Inbetriebnahme der Multi-Module-Cold-Box (MMCB) für CMS-2S-Module, Bachelorarbeit, August 2022.
- h. Julian Hülsenbusch, Ein Trigger für kosmische Myonen an der Multi-Module-Cold-Box für CMS 2S Module, Bachelorarbeit, April 2023.
- i. Tobias Kramler, Characterization of 2S silicon strip modules of the final design for the CMS Phase-2 Tracker Upgrade, Bachelorarbeit, August 2023.
- j. Tim Fabisch, Measurements and simulations of GEM gas gain for different foil production techniques, Bachelorarbeit, September 2023.
- k. Max Beckers, Database and web applications for the production of CMS silicon strip detector modules, Masterarbeit, Oktober 2023.
- l. Felix Thurn, Quality control for service hybrid test cards and thermal long term tests of electronics components for the CMS Phase-2 tracker upgrade, Masterarbeit, November 2023.
- m. Vanessa Oppenländer, Thermal Measurements with a 2S Module on a TEDD-like Structure for the CMS Phase-2 Upgrade, Masterarbeit, November 2023.
- n. Matej Repik, High-rate tests of CMS On-Board Drift Tube electronics, Masterarbeit, Januar 2024.
- o. Stella Israel, Influence of neighboring modules on the thermal performance of a 2S module for the CMS Phase-2 upgrade, Bachelorarbeit, Mai 2024.
- p. Carlos Menke, Charakterisierung des Rauschverhaltens des ersten Aachener Preseries 2S-Moduls für das Phase-2 Upgrade des CMS-Experiments, Bachelorarbeit, August 2024.
- q. Jan Teroerde, Untersuchung von korreliertem Rauschen in 2S-Siliziumstreifenmodulen für das CMS Phase-2 Tracker Upgrade, Bachelorarbeit, August 2024.
- r. Konrad Räusch, Erweiterung der automatisierten Qualifizierung von 2S Siliziumstreifendetektormodulen im POTATO Framework, Bachelorarbeit, Oktober 2024.

- s. Alexander 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, Doktorarbeit, Dezember 2024.