

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Verbund: 05P2021 - Aufbau von CBM bei FAIR

Zuwendungsempfänger: Eberhard Karls Universität Tübingen
Projektleitung: Prof. Dr. Hans Rudolf Schmidt
E-Mail: hans-rudolf.schmidt@uni-tuebingen.de
Förderkennzeichen: 05P21VTFC1
Förderzeitraum: 01.07.2021 - 30.06.2024
Zuwendung: 925.717,16 €
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt: hans-rudolf.schmidt@uni-tuebingen.de
Zusätzlicher Name: Hans Rudolf Schmidt

| Genutzte Großgeräte: | Labor FAIR | Gerät FAIR | Experiment CBM |
|----------------------------|---------------|---------------|-------------------|
| Diplomarbeiten: | 0 | | |
| Dissertationen: | 4 | | |
| Habilitationen: | 0 | | |
| Referierte Publikationen: | 6 | | |
| Andere Veröffentlichungen: | 7 | | |
| Patente: | 0 | | |
| Bachelorarbeiten: | 0 | | |
| Masterarbeiten: | 0 | | |
| Staatsexamen: | 0 | | |

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 12.03.2025 11:09 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

| | |
|----------------------|---|
| Zuwendungsempfänger: | Eberhards Karls Universität, Tübingen |
| Projektleitung: | Prof. Dr. Hans Rudolf Schmidt |
| Verbund: | Verbundprojekt 05P2021 (ErUM-FSP T06) |
| Thema: | Entwicklung und Bau des Kühlsystems für den Silizium-Spurdetektorsystems des FAIR-CBM Experiments |

Zusammenfassung

Innerhalb der Laufzeit des Vorhabens (07/21-06/24) sollte eine komplexe 50kW Kühlanlage zur Kühlung des CBM Silicon Tracking Systems (STS) beschafft und in Betrieb genommen werden. Die Kühlanlage soll mit GWP=1 betrieben werden. Im Rahmen dessen wurde in Zusammenarbeit mit den Firmen COMPACT/Dresden und KKR/Langen ein entsprechendes Kühlkonzept entwickelt. Es basiert auf einem primären CO₂-Kühlkreislauf und NOVEC 649 als sekundärem Kühlmittel. Dieses Konzept ist noch kein Industriestandard und erfordert für Betrieb und Wartung weitere Entwicklungsarbeiten, die von uns mit übernommen wurden.

Eine solche Kühlanlage ist insbesondere erforderlich, da in unmittelbarer Umgebung der Sensoren ca. 50 kW Abwärme durch die Ausleseelektronik produziert wird, die eine ordnungsgemäße Funktion der Siliziumsensoren verhindern würde (Abb. 1). Diese Abwärme muss komplett neutralisiert werden.

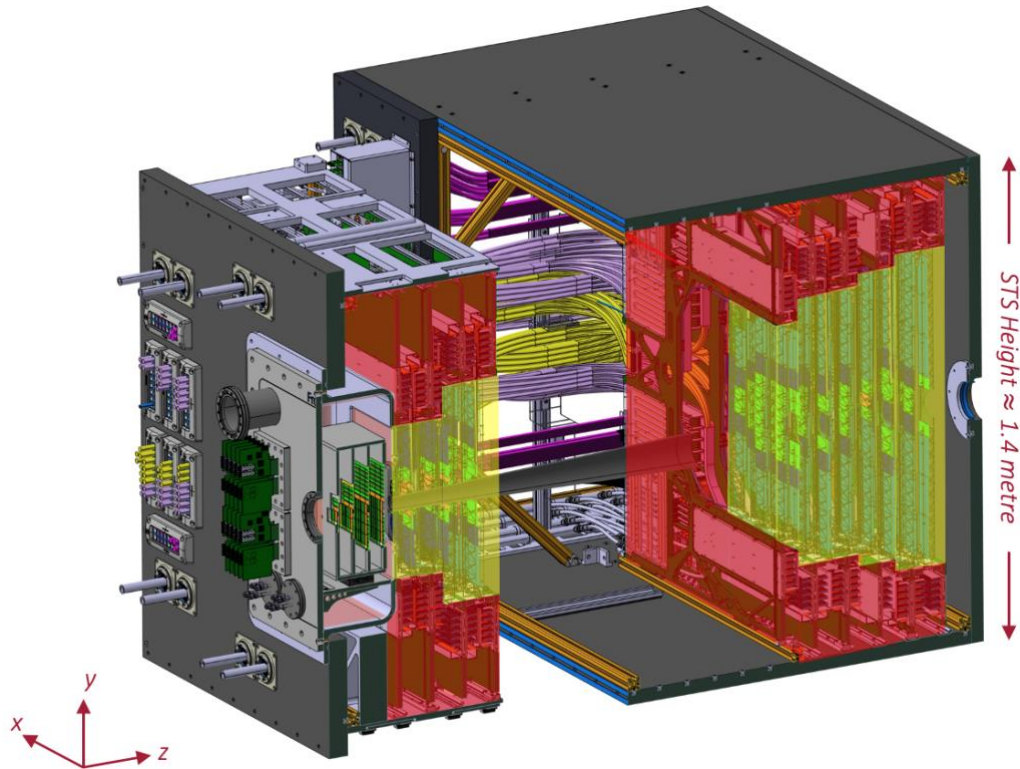


Abbildung 1: Aufbau des STS und seinen thermalen Zonen. Ausleseelektronik mit einer Dissipation von 50 kW (rot) und Sensoren (grün) mit dem Ziel einer Betriebstemperatur von 10-15 °C.

Im Berichtszeitraum wurde bereits ein 7.5 kW Prototypkühlsystem der Firma COMPACT erfolgreich in Betrieb genommen (Abb. 2). Es konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die in die Spezifikationen für das 50 kW System einfließen werden. Anders als ursprünglich geplant wurde das 50 kW Kühlsystem im Berichtszeitraum noch nicht ausgeschrieben, da aufgrund der Verzögerung im Bau von FAIR das CBM-Cave noch nicht fertiggestellt ist und es keinen sinnvollen Installationsort gab. Sobald absehbar ist, dass das CBM Cave inklusive der technischen Gebäudeausstattung (TBA) fertiggestellt sein wird, kann der Ausschreibungs- und Bestellprozess in Gang gesetzt werden.

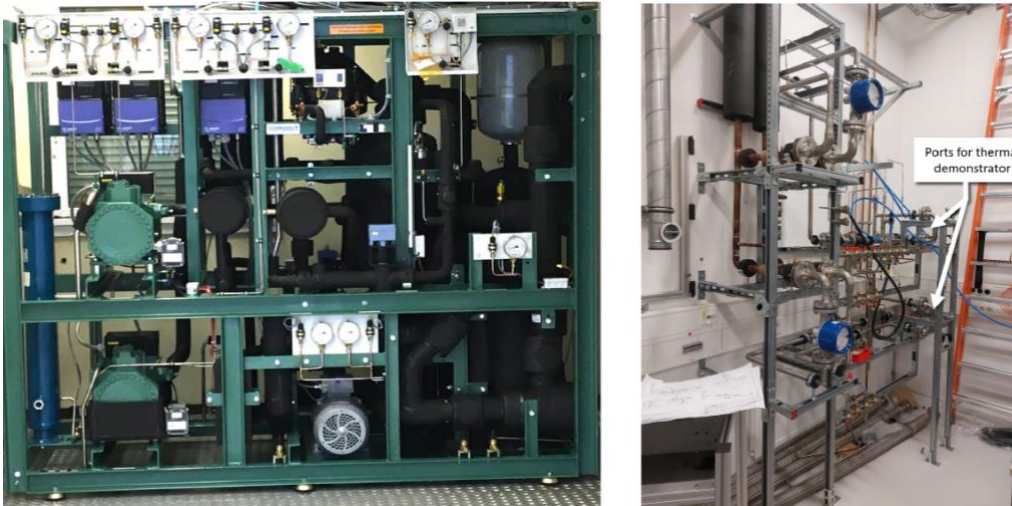


Abbildung 2: 7.5 kW Prototyp Kühlsystem (links) und das zugehörige Verteilsystem (rechts)

Des Weiteren wurde im Berichtszeitraum ein sogenannter „Thermal Demonstrator“ gebaut (Abb. 3) und in Betrieb genommen. Der „Thermal Demonstrator“ ist ein realistisches Modell von etwa 1/8 des STS. Es konnten essenzielle Erkenntnisse über das thermische Verhalten des Silizium Tracking Systems gewonnen werden und Strategien erarbeitet werden, die es erlauben werden, das System über viele Jahre stabil zu betreiben und einen „Thermal Runaway“ (Abb. 6) durch die hohe Strahlenbelastung innerhalb der prognostizierten „Lebensdauer“ des Experiments zu vermeiden.

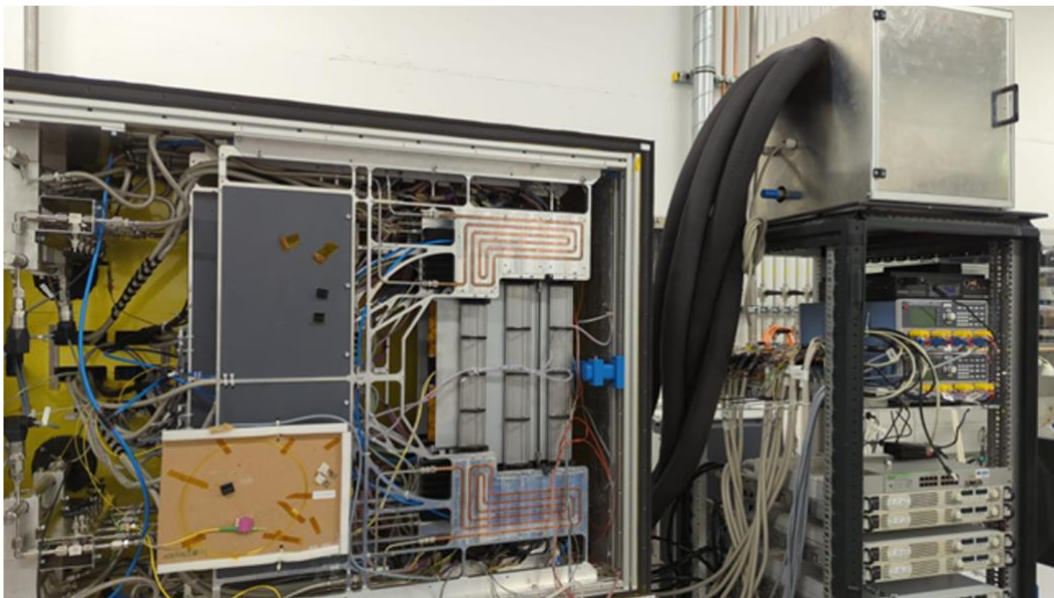


Abbildung 3: Blick auf die geöffnete Rückseite der isolierten Carbon-Sandwich-Box mit montierten aktiven und passiven C-frames

Das STS-Kühlkonzept verwendet Liquid-Assisted Air-Cooling, bei dem die Siliziumsensoren, um das Materialbudget zu minimieren, luftgekühlt werden, während die an der Peripherie befindliche Frontend-Elektronik durch Flüssigkeitskühlung gekühlt wird. Damit werden die beiden am häufigsten verwendeten Wärmemanagementkonzepte kombiniert. Die inneren Sensoren, die am höchsten strahlenbelastet sind, werden dabei mit einem kalten Luftstrom angeblasen (Abb. 4).

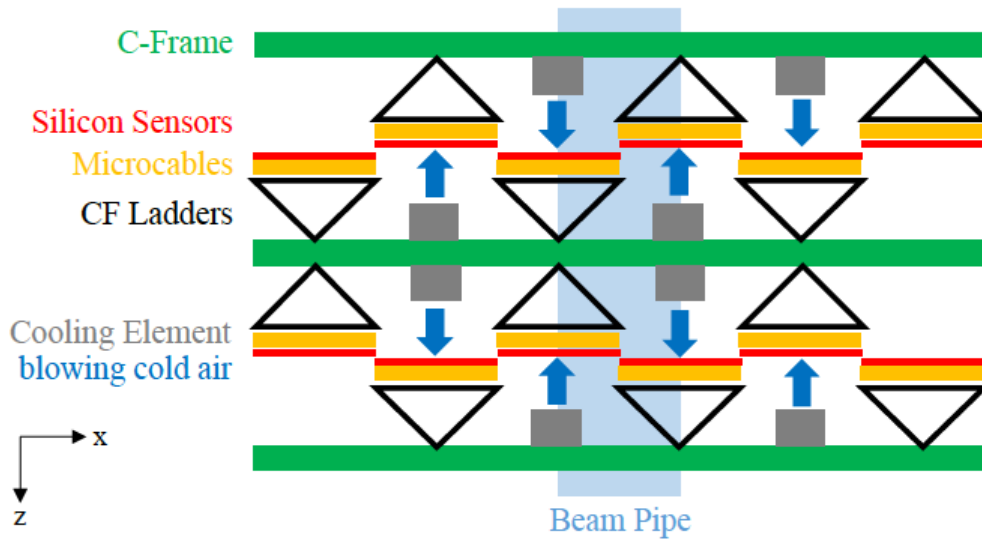


Abbildung 4: Draufsicht auf die STS, die die aktiv zu kühlenden Leitern zeigt, mit Kühlelementen, die auf benachbarten C-Frames angebracht sind, um kalte Luft auf die Sensoroberfläche zu blasen.

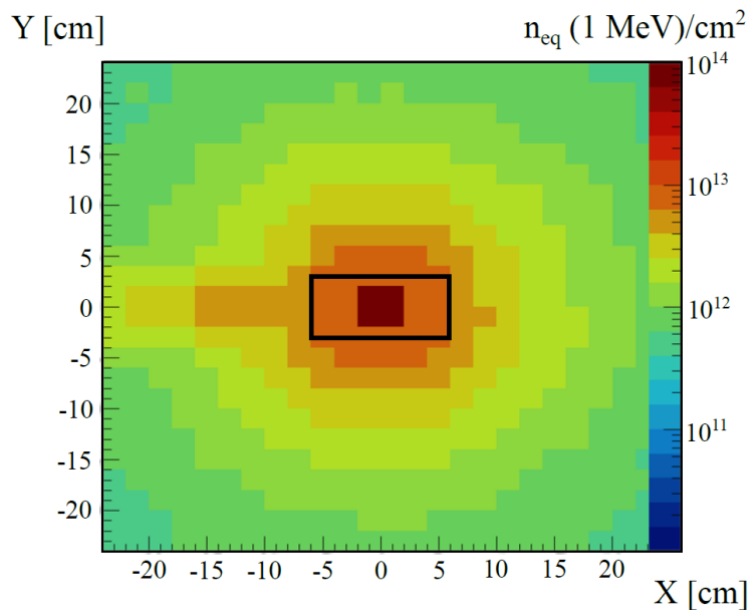


Abbildung 5: Strahlbelastung einer STS-Station über eine Betriebsdauer von 10 Jahren.

Die Kühlung des STS ist so ausgelegt, dass er während seiner Lebensdauer einer ionisierenden Fluenz (Φ_{eq}) von bis zu $10^{14} n_{eq}(1 \text{ MeV})/\text{cm}^2$ standhält, was als End-of-Lifetime-Fluenz (EOL Φ_{eq}) bezeichnet wird. Es ist erwähnenswert, dass die aktualisierten FLUKA14-Berechnungen für das vorgesehene CBM-Betriebsszenario darauf hindeuten, dass sich die akkumulierten Φ_{eq} über die erwartete Dauer des CBM-Betriebs, d. h. 10 Jahre, bei $0,24 \times 10^{14} n_{eq}(1 \text{ MeV})/\text{cm}^2$ liegt (Abb. 5).

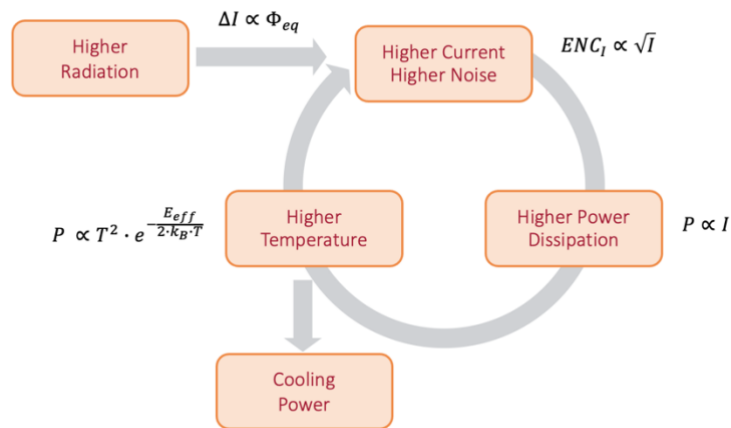


Abbildung 6: Schematische Darstellung eines „Thermal runaways“, d.h. einer positive Rückkopplung durch strahlungsinduzierter Temperaturerhöhung

Eine temperaturabhängige Beziehung führt zu einem sich selbst verstärkenden Zyklus zwischen Temperatur, $I_{Leakage}$ und Verlustleistung. Dies kann dazu führen, dass die Sensoren in eine unkontrollierte, positive Rückkopplungsschleife geraten, was zu einem Zustand führt, der als „Thermal Runaway“ bekannt ist (siehe Abb. 6). Daher muss die Verlustleistung des Sensors unbedingt durch eine wirksame Kühlung neutralisiert werden, um die Verlustleistung und damit das Rauschen (ENC) zu minimieren. Der Betrieb der Sensoren bei bis zu $0 \text{ }^\circ\text{C}$ reduziert den Leckstrom $I_{Leakage}$ und damit die Verlustleistung in der Regel auf $1/6$ des Wertes bei Raumtemperatur. Dadurch wird das Signal-Rausch-Verhältnis (S/N) des Detektors verbessert, was für die Leistung der Spurrekonstruktion entscheidend ist.

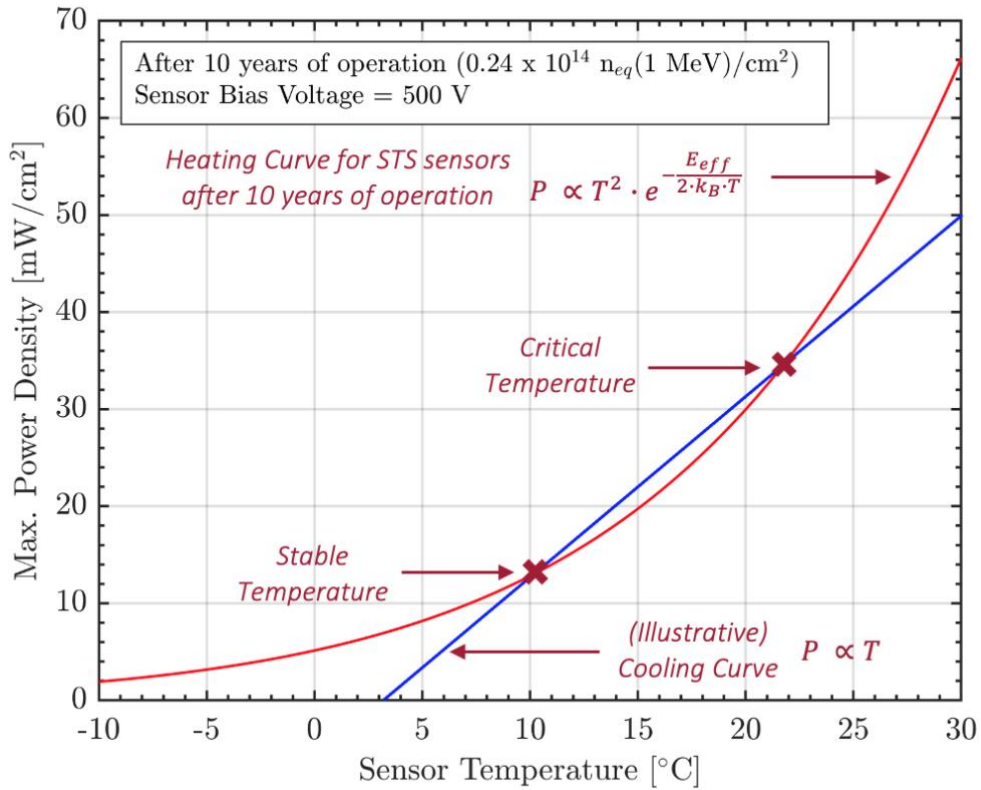


Abbildung 6: Beispieldarstellung des Wechselspiels von strahlungsinduzierter Verlustleistung P (rote Kurve) und Kühlleistung (blaue Kurve). Die Schnittpunkte markieren eine stabile bzw. kritische Sensortemperatur.

Das Hauptziel der STS-Siliziumsensorskühlung besteht darin, eine ausreichende Kühlleistung bereitzustellen, um die exponentielle Selbsterhitzung der Sensoren zu kompensieren bei gleichzeitiger Minimierung des Materialbudgets der Kühlelemente. Es soll eine stabile Betriebstemperatur von mindestens $\approx 10^\circ\text{C}$ erreicht werden. Wie in Abb. 6 veranschaulicht, sorgt eine wirksame Kühlung dafür, dass die stabile Temperatur (T_{Stable}) unter der kritischen Temperatur (T_{Critical}) liegt, bei der das System in eine unkontrollierte, positive Rückkopplung übergeht. Angesichts der strengen Anforderungen an das Materialbudget von CBM-STs ist die Luftkühlung das praktikabelste Kühlkonzept für die STS-Sensorskühlung. Die Heizleistung eines gegebenen Siliziumsensors wird auf der Grundlage der erwarteten akkumulierten Einflüsse aus FLUKA-Simulationen berechnet, während die Kühlleistung durch die Verwendung weit verbreiteter empirischer Formulierungen und Berechnungswerkzeuge wie Computational Fluid Dynamics (CFD)-Analysen berechnet wird.

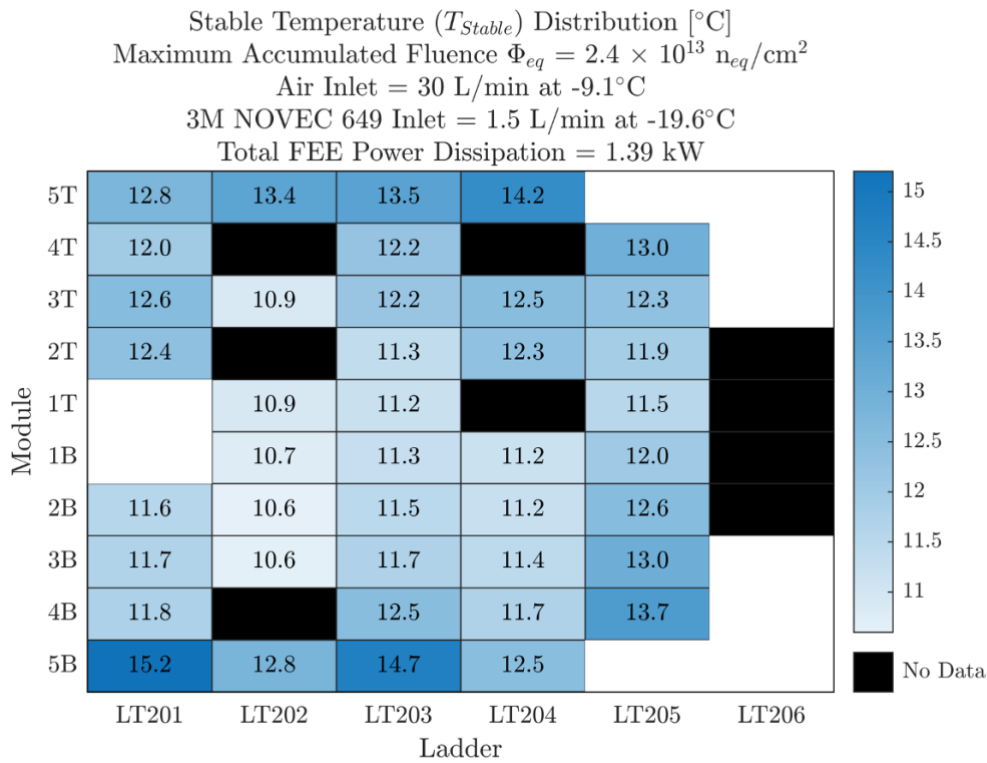


Abbildung 7: Experimentell gemessene stabile Temperaturverteilungen (T_{Stable}) über die thermisch aktive Halbstation für das Basisbetriebsszenario nach einer akkumulierten Fluenz von $0,24 \times 10^{14} \text{ n}_{eq} (1 \text{ MeV})/\text{cm}^2$ für 10 Jahre CBM-Betrieb.

Für ein Basisbetriebsszenario wurde die Kühlleistung aller Siliziumsensoren in der thermisch aktiven Halbstation des Thermodemonstrators gemessen. Dies wird in Abb. 7 veranschaulicht, das ein experimentelles Beispiel für das thermische Verhalten bei Sensoren zeigen, die durch auftreffende Luftstrahlen (innere Sensoren) bzw. natürliche Luftkonvektion (äußere Sensoren) gekühlt werden. Die Kühlleistung wurde für die grundlegenden Betriebsparameter gemessen und mit dem 10-Jahres CBM-Betrieb verglichen. Dieser Vergleich ermöglichte die experimentelle Bestimmung der stabilen Temperatur (T_{stable}) und der kritischen Temperatur $T_{critical}$, die in Abb. 7 dargestellt ist. Die T_{stable} -Verteilung für die Halbstation wurde kartiert und ergab eine mittlere Temperatur von $12,2+3,0-1,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ nach 10 Jahren.

Bericht

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Aufgabenstellung für das Vorhaben war die Erarbeitung eines Kühlkonzepts für das Silicon Tracking System (STS) des CBM-Experiments. Aufgrund der Anordnung der Sensoren und der zugehörigen Front-End Elektronik wird in unmittelbarer Nähe der Sensoren (wenigen cm) Abwärme in von ca. 50 kW freigesetzt. Die Sensoren selbst müssen jedoch auf einer stabilen, möglichst niedrigen Temperatur gehalten werden, um einem sog. „Thermalen Runaway“ zu vermeiden (siehe Abb. 6).

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Bei der Erarbeitung des CBM-Kühlkonzepts wurde an die Forschungsarbeiten der CERN Experimente ATLAS, CMS, ALICE und LHCb angeknüpft. Der Erfahrungsaustausch fand u.A. im Rahmen des „Forums for Tracking Detector Mechanics“ statt, ein jährlich stattfindender Workshop von Detektorexperten. Der Workshop 2023 wurde von der Universität Tübingen ausgerichtet.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Der Ablauf des Projekts entsprach aufgrund der Verzögerung im Bau von FAIR nicht der Planung der Vorhabenbeschreibung. Es ist jedoch sichergestellt, dass das Vorhaben bei Fertigstellung der CBM-Cave Infrastruktur entsprechend der ursprünglichen Planung ausgeführt wird.

Im Rahmen des geplanten CBM-Experiments FAIR besteht eine Kooperation i.W mit dem CBM-Department der des GSI-Helmholtzzentrums. Der Projektleiter (Prof. Schmidt) ist gleichzeitig Abteilungsleiter des CBM-Departments and der GSI und konnte im Rahmen der Zusammenarbeit mit der GSI die Unterstützung eines eigens eingestellt HVAC-Ingenieurs für das Kühlprojekt sichern.

Innerhalb des Verbundes gab es eine engere Zusammenarbeit mit der Gruppe von Prof. Stroth. Dies ist dadurch bedingt, dass der Micro-Vertex-Detektor (MVD) in die Isolationsbox des STS integriert ist. Das Vakuumfenster des MVD ist integraler Bestandteil des Carbon-Faser-Strahlrohrs durch den STS. Die Spezifikationen und die Fertigung von Prototypen des Strahlrohrs wurden in mehreren Treffen mit der MVD-Gruppe abgestimmt.

Des Weiteren kooperiert das MVD-Projekt im Bezug auf die Detektorkühlung mit der Gruppe der Uni Tübingen. Im Verbund wurden die Möglichkeiten eines gemeinsamen, NOVEC-basierten Kühlsystems erörtert und die Vor- und Nachteile abgewogen.

Mit der Gruppe von Prof. Claudia Höhne besteht im Verbund ebenfalls Austausch über die Planungen des STS und hierbei insbesondere über die Auslegung der STS-Detektorkühlung. Dies ist dadurch bedingt, dass der Untergrund im RICH-Detektors vom Materialbudget im STS beeinflusst wird, und hierbei sind die relative massiven Wärmetauscher für die STS-Front-End-Elektronik von Relevanz. Im Verbund wurde Informationsaustausch über Geometrie und Material der STS-Wärmetauscher

organisiert, so dass die entsprechenden Simulationen des Untergrunds im RICH Detektor jeweils dem aktuellen Stand der Planungen entsprachen.

mCBM ist ein Testexperiment am SIS18 der GSI, das sämtlich Detektorkomponenten des CBM Experiments enthält. In mehreren Strahlzeiten arbeiten die Gruppen des Verbundes eng zusammen, um Detektorkomponenten zu testen und die Leistung des zukünftigen CBM Experiments zu evaluieren.

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

Die Zuwendung (ohne Projektpauschalt) von 771143,97€ wurde verwendet für

- | | | |
|----|-------------------|------------|
| 1) | Gehälter | 252932,26€ |
| 2) | Reisen | 22103,34€ |
| 3) | Gegenstände <410€ | 6013,26€ |
| 4) | Gegenstände >410€ | 490383,11€ |

Die Mittel zum Bau des STS Kühlsystems wurden entsprechend der weiteren Projektplanung zu FAIR transferiert.

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

| Ziele des Arbeitspakets/ Teilpakets | Stand zum Ende der Projektlaufzeit | Erläuterungen |
|--|--|--|
| Erstellen des Pflichtenheftes für das Kühlaggregat, Ausschreibung und Bestellung | Pflichtenheft weitgehend erstellt, Ausschreibung und Bestellung im Wartestand | Ausschreibung und Bestellung auf 2025/26 verschoben |
| Ausschreibung und Bestellung der Wärmetauscherplatten | Mitte 2024 bestellt, Lieferung Anfang 2025 | Prototyp-Tests im Rahmen des Thermal Demonstrators erfolgreich abgeschlossen |
| Entwurf und Bau eines passiven Verteilsystems inkl. Transferleitungen | Entwurf erstellt, Bau im Wartestand | Auf 2026 verschoben |
| Sensorik für Kühlsystem | Prototyp Sensorik zur Überwachung des Kühlsystems entwickelt | Prototyp-Tests im Rahmen des Thermal Demonstrators erfolgreich abgeschlossen |
| STS Leitern Zusammenbau und Gaskühlung | F&E zu Leiter-zusammenbau und Gaskühlung abgeschlossen. Mit der Leiterproduktion wurde begonnen. | Produktion weitgehend im Zeitplan |
| Physikalische Fragestellungen im Zusammenhang mit dem STS | Abgeschlossene Dissertation S. Khan | Anwendung von Machine Learning Algorithmen zur Datenanalyse |

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit ist für das CBM-Experiment essenziell. Ohne angemessene Kühlung sind Siliziumzähler im vorhergesehenen experimentellen Umfeld nicht funktionsfähig. Der Umfang der geleisteten Arbeit ist angemessen, da bei CBM, anders als z.B. bei den CERN-Experimenten, ein minimales Materialbudget der Kühlkörper erforderlich ist. Dies erfordert neuartige Konzepte und macht realistische Prototypen (7.5 kW Plant, Thermal Demonstrator) unabdingbar.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Siehe 6)

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

Die Arbeitsgruppe steht im regen Austausch mit Detektorexperten des CERN. Insbesondere waren Olivier Crespo-Lopez (Section leader & Cooling Engineer at CERN) und Dr. Paolo Petanga (Project Leader and Section Leader at CERN, Cooling R&D) Reviewer bei den FAIR Cooling Engineering Design Reviews. Die Fortschritte bei den CERN-Experimenten im Bereich "Cooling" sind stets in das Vorhaben eingeflossen.

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

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

F. Matejcek and K. Agarwal

Lightweight Thermal Management Strategies for the Silicon Detectors of CBM at FAIR. Nucl.Instrum.Meth.A 1069 (2024) 169924.

M. Teklishyn, A. Rodríguez Rodríguez, K. Agarwal, M. Bajdel, L.M. Collazo Sánchez, U. Frankenfeld, J.M. Heuser, J. Lehnert, S. Mehta, D. Rodríguez Garcés, D.A. Ramírez Zaldívar, C.J. Schmidt, H.R. Schmidt, A. Toia

From 3D to 5D tracking: SMX ASIC-based double-sided micro-strip detectors for comprehensive space, time, and energy measurements. JINST 19 (2024) 07, C07002.

S. Mehta, K. Agarwal, U. Frankenfeld, J. M. Heuser, F. Nickels, C. Simons, R. Visinka, H. R. Schmidt
CBM Silicon Tracking System integration: from module production to ladder assembly. PoS FAIRness2022 (2023) 036.

M. Bajdel, K. Agarwal, U. Frankenfeld, J. M. Heuser, S. Mehta, H. R. Schmidt, P. Zumbruch
Solutions for humidity and temperature monitoring in the Silicon Tracking System of the Compressed Baryonic Matter experiment: sensors, and testing. PoS FAIRness2022 (2023) 003.

K. Agarwal, P. Koćzon, E. Lavrik, H.R. Schmidt, O. Vasylyev

Progress towards the development of cooling demonstrator for the STS detector of the CBM experiment at FAIR. Nucl.Instrum.Meth.A 936 (2019) 691-692.

K. Agarwal, for the CBM Collaboration. Status of the Compressed Baryonic Matter (CBM) Experiment at FAIR. *Acta Phys.Polon.Supp.* 16 (2023) 1-A142.

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

F. Matejcek and K. Agarwal. Lightweight Thermal Management Strategies for the Silicon Detectors of CBM at FAIR. *16th Pisa Meeting on Advanced Detectors*. Isola d'Elba (2024).

K. Agarwal, for the CBM Collaboration. Thermal Management of the CBM-FAIR's Silicon Tracking System (STS) – Concept and Demonstrators. *Forum on Tracking Detector Mechanics*. Tübingen (2023).

K. Agarwal, for the CBM Collaboration. The Cooling Concept of the CBM Silicon Tracking System. *DPG Spring Meeting*. Online (2022).

K. Agarwal, S. Mehta, P. Dahm, U. Frankenfeld, J. Heuser, F. Nickels, H.R. Schmidt, J. Thaufelder, G. Viehhauser. Silicon Sensor Air Cooling for the CBM-STS at FAIR. *Forum on Tracking Detector Mechanics*. Online (2021).

K. Agarwal. The STS Cooling Concept and Design. 37th CBM Collaboration Meeting. Online (2021).

K. Agarwal, H. R. Schmidt. Thermal Management of the CBM Silicon Tracking System (STS). *Arbeitstreffen Kernphysik*. Schleching, Germany (2020).

K. Agarwal, R.M. Kapell, M. Kis, P. Koczon, P. Kuhl, U. Möller, H.R. Schmidt, J. Thaufelder, O. Vasylyev. Development Of Cooling Demonstrator for the CBM Silicon Tracking System (STS). *Forum on Tracking Detector Mechanics*. Ithaca, USA (2019).

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

Thermal Management of the Silicon Tracking System of the CBM Experiment at FAIR
Agarwal, Kshitij (Universität Tübingen, 2024-12-16)

Investigation of Thermal and Structural Integrity of Modules and Ladders of Silicon Tracking System of the CBM Experiment
Metha, Shaifali (Universität Tübingen, 2024-12-16)

[Development of Electrical Quality Assurance Procedures and Methods for the Silicon Tracking System of the CBM Experiment](#)

Panasenko, Iaroslav (Universität Tübingen, 2023-04-17)

[CBM Performance for \$\Lambda_0\$ Hyperon Yield Measurements Using Machine Learning Techniques](#)

Khan, Shahid (Universität Tübingen, 2023-05-31)

Kurzbericht

- öffentlich -

| | |
|----------------------|---|
| Zuwendungsempfänger: | Eberhards Karls Universität, Tübingen |
| Projektleitung: | Prof. Dr. Hans Rudolf Schmidt |
| Verbund: | Verbundprojekt 05P2021 (ErUM-FSP T06) |
| Thema: | Entwicklung und Bau des Kühlsystems für den Silizium-Spurdetektorsystems des FAIR-CBM Experiments |

1. Ziel und Inhalt des Projektes

Innerhalb in der Laufzeit des Vorhabens (07/21-06/24) sollte eine komplexe 50kW Kühlanlage zur Kühlung des CBM Silicon Tracking Systems (STS) beschafft und in Betrieb genommen werden. Die Kühlanlage soll mit GWP=1 betrieben werden. Im Rahmen dessen wurde in Zusammenarbeit mit den Firmen COMPACT/Dresden und KKR/Langen ein entsprechendes Kühlkonzept entwickelt. Es basiert auf einem primären CO₂-Kühlkreislauf und NOVEC 649 als sekundärem Kühlmittel. Dieses Konzept ist noch kein Industriestandard und erfordert für Betrieb und Wartung weitere Entwicklungsarbeiten, die von uns mit übernommen wurden. Eine solche Kühlanlage ist insbesondere erforderlich, da in unmittelbarer Umgebung der Sensoren ca. 50 kW Abwärme durch die Ausleseelektronik produziert wird, die eine ordnungsgemäße Funktion der Siliziumsensoren verhindern würde. Diese Abwärme muss komplett neutralisiert werden.

2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Im Berichtszeitraum wurde bereits ein 7.5 kW Prototypkühlsystem der Firma COMPACT erfolgreich in Betrieb genommen. Es konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die in die Spezifikationen für das 50 kW System einfließen werden. Anders als ursprünglich geplant wurde das 50 kW Kühlsystem im Berichtszeitraum noch nicht ausgeschrieben, da aufgrund der Verzögerung im Bau von FAIR das CBM Cave noch nicht fertiggestellt ist und es keinen sinnvollen Installationsort gab. Sobald absehbar ist, dass das CBM Cave inklusive der technischen Gebäudeausstattung (TBA) fertiggestellt sein wird, kann der Ausschreibungs- und Bestellprozess in Gang gesetzt werden.

Des Weiteren wurde im Berichtszeitraum ein sogenannter „Thermal Demonstrator“ gebaut und in Betrieb genommen. Der „Thermal Demonstrator“ ist ein realistisches Modell von etwa 1/8 des STS. Es konnten essentielle Erkenntnisse über das thermische Verhalten des Silizium Tracking Systems gewonnen werden und Strategien erarbeitet werden, die es

erlauben werden das System über viele Jahre stabil zu betreiben und einen „thermal runaway“ durch die hohe Strahlenbelastung innerhalb der prognostizierten „Lebensdauer“ des Experiments zu vermeiden.

3. Darstellung der wesentlichen Ergebnisse und deren konkreter Nutzen sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Das Hauptziel der STS-Siliziumsensorkühlung besteht darin, eine ausreichende Kühlleistung bereitzustellen, um die exponentielle Selbsterhitzung der Sensoren zu kompensieren bei gleichzeitiger Minimierung des Materialbudgets der Kühlelemente. Es soll eine stabile Betriebstemperatur von $\approx 10^\circ\text{C}$ erreicht werden. Wie in Abb. 1 schematisch veranschaulicht, sorgt eine wirksame Kühlung dafür, dass die stabile Temperatur (T_{Stable}) unter der kritischen Temperatur (T_{Critical}) liegt, bei der das System in eine unkontrollierte positive Rückkopplung übergeht. Angesichts der strengen Anforderungen an das Materialbudget von CBM-STs ist die Luftkühlung der Sensoren das praktikabelste Kühlkonzept für die STS-Sensorkühlung. Die Heizleistung eines gegebenen Siliziumsensors wird auf der Grundlage der erwarteten akkumulierten Einflüsse aus FLUKA-Simulationen berechnet, während die Kühlleistung durch die Verwendung weit verbreiteter empirischer Formulierungen und Berechnungswerkzeuge wie Computational Fluid Dynamics (CFD)-Analysen berechnet wird.

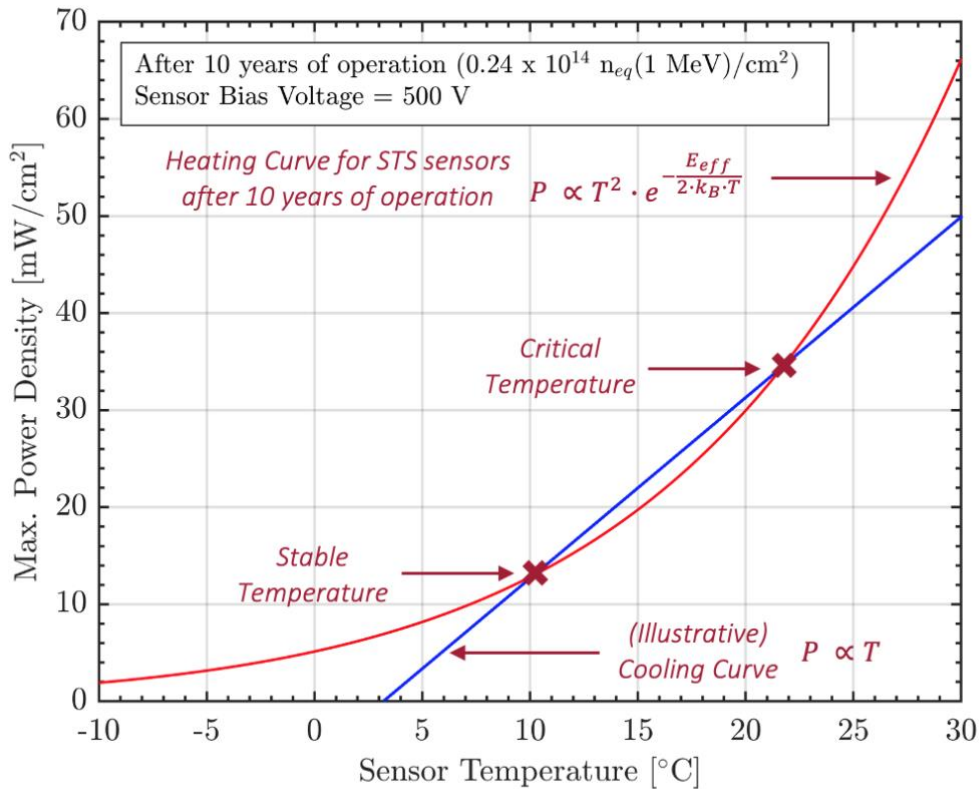


Abbildung 1: Beispieldarstellung des Wechselspiels von strahlungsinduzierter Verlustleistung P (rote Kurve) und Kühlleistung (blaue Kurve). Die Schnittpunkte markieren eine stabile bzw. kritische Sensortemperatur.

Für ein Basisbetriebsszenario wurde die Kühlleistung aller Siliziumsensoren in der thermisch aktiven Halbstation des Thermodemonstrators gemessen. Dies wird in Abb. 2 veranschaulicht, das ein Beispiele für das thermisches Verhalten bei Sensoren zeigen, die durch auftreffende Luftstrahlen (innere Sensoren) bzw. natürliche Luftkonvektion (äußere Sensoren) gekühlt werden. Die Kühlleistung wurde für die grundlegenden Betriebsparameter gemessen und mit dem 10-Jahres CBM-Betrieb verglichen. Dieser Vergleich ermöglichte die experimentelle Bestimmung der stabilen Temperatur (T_{stable}) und der kritischen Temperatur T_{critical} , die in Abb. 2 dargestellt ist. Die T_{stable} -Verteilung für die Halbstation wurde kartiert und ergab eine mittlere Temperatur von $12,2+3,0-1,6 \text{ }^\circ\text{C}$ nach 10 Jahren.

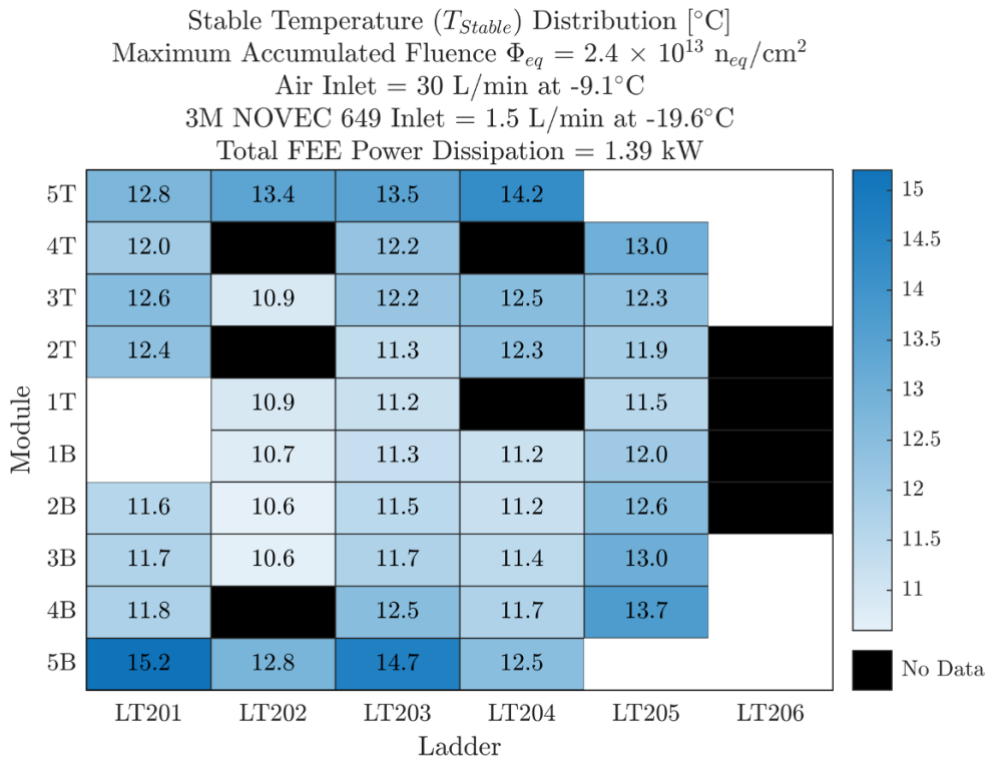


Abbildung 2: Experimentell gemessene stabile Temperaturverteilungen (T_{Stable}) über die thermisch aktive Halbstation für das Basisbetriebsszenario nach einer akkumulierten Fluenz von $0,24 \times 10^{14} \text{ n}_{eq}(1 \text{ MeV})/\text{cm}^2$ für 10 Jahre CBM-Betrieb.

Bei der Erarbeitung des CBM-Kühlkonzepts wurde an die Forschungsarbeiten der CERN Experimente ATLAS, CMS, ALICE und LHCb angeknüpft. Der Erfahrungsaustausch fand u.A. im Rahmen des „Forums for Tracking Detector Mechanics“ statt, ein jährlich stattfindender Workshop der von Detektorexperten und Ingenieuren. Der Workshop 2023 wurde von der Universität Tübingen ausgerichtet. Die Arbeitsgruppe steht im regen Austausch mit den Detektorexperten des CERN. Insbesondere waren Olivier Crespo-Lopez (Section Leader & Cooling Engineer at CERN) und Dr. Paolo Petanga (Project Leader and Section Leader at CERN, Cooling R&D) Reviewer bei den FAIR Cooling Engineering Design Reviews. Die Fortschritte bei den CERN Experimenten im Bereich “Cooling” sind stets in das Vorhaben eingeflossen.