

Thermische Charakterisierung und Inbetriebnahme einer Teststation für die 2S-Modulproduktion bei CMS

(Thermal Characterization and Commissioning
of a Test Station for the 2S Module Production
at CMS)

Bachelorarbeit
von

Fabio Trenner

am Institut für Experimentelle Teilchenphysik

Referent:	Prof. Dr. U. Husemann
Korreferent:	Dr. A. Dierlamm
Betreuende Mitarbeiterin:	M.Sc. Lea Stockmeier

Bearbeitungszeit: 24.05.2023 – 23.11.2023

Erklärung zur Selbstständigkeit

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht und die Satzung des KIT zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in der gültigen Fassung vom 24.05.2018 beachtet habe.

Karlsruhe, den 23.11.2023, _____
Fabio Trenner

Als Prüfungsexemplar genehmigt von

Karlsruhe, den 23.11.2023, _____
Prof. Dr. U. Husemann

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
2. LHC	3
2.1. CMS	3
2.2. CMS-Phase-2-Upgrade	4
2.2.1. 2S-Modul	6
3. Burn-In-Station	9
3.1. Software	11
3.1.1. Statusleiste	12
3.1.2. Tab „Slot Configuration“	13
3.1.3. Tab „Monitoring“	14
3.1.4. Tab „Measurement“	15
3.2. Thermische Charakterisierung	17
3.2.1. Messaufbau	17
3.2.2. PID-Parameter	17
3.2.3. Temperaturverteilung	22
4. Fazit und Ausblick	27
Anhang	29
A. Abbildungen	29
B. Tabellen	30
Literaturverzeichnis	33

Abbildungsverzeichnis

2.1. Skizze des CERN-Beschleunigerkomplex	4
2.2. Aufbau des CMS-Detektors	5
2.3. Skizze eines Viertels des Siliziumspurdetektors	6
2.4. Explosionszeichnung eines 2S-Moduls	7
2.5. 2S-Modulprototyp mit Carrier	8
2.6. Skizze der Klusterpaarererkennung im 2S-Modul	8
3.1. Bild der Burn-In-Station	10
3.2. Bild des Inneren der Box der Burn-In-Station	10
3.3. Derzeitiger Plan für einen Modultest in der Burn-In-Station	10
3.4. Skizzierter Aufbau der Burn-In-Station	11
3.5. Skizzierte Detaillardarstellung einer Einzelposition der Burn-In-Station	11
3.6. Bildschirmaufnahme der Startseite des Front-End der Burn-In-Station	12
3.7. Bildschirmaufnahme des Tabs „Slot Configuration“ aus dem Front-End der Burn-In-Station	13
3.8. Bildschirmaufnahme des Tabs „Monitoring“ aus dem Front-End der Burn-In-Station	14
3.9. Bildschirmaufnahme des Tabs „Measurement“ aus dem Front-End der Burn-In-Station	15
3.10. Bildschirmaufnahme des Tabs „Monitoring“ aus dem Front-End der Burn-In-Station	16
3.11. Carrier Loop 1	18
3.12. Carrier Loop 2	18
3.13. Bild der Carrier in Position 1	18
3.14. Mehrere Zyklen der Burn-In-Station	20
3.15. Mehrere Zyklen der Burn-In Station	21
3.16. Erwärmen bei angepassten Parametern	21
3.17. Erwärmen bei angepassten Parametern, Vergrößerung	21
3.18. Erwärmen bei ursprünglichen Parametern	22
3.19. Erwärmen bei ursprünglichen Parametern, Vergrößerung	22
3.20. Abkühlen bei angepassten Parametern	22
3.21. Abkühlen bei angepassten Parametern, Vergrößerung	22
3.22. Abkühlen bei ursprünglich eingestellten Parametern	23
3.23. Abkühlen bei ursprünglich eingestellten Parametern, Vergrößerung	23
3.24. Temperaturverlauf Loop 1, Position 1	24
3.25. Temperaturverlauf Loop 2, Position 1	24
3.26. Vergleichsdarstellung für Loop 1	24
3.27. Vergleichsdarstellung für Loop 2	25
A.1. Temperaturverlauf Loop 1, Position 2	29
A.2. Temperaturverlauf Loop 1, Position 3	29
A.3. Temperaturverlauf Loop 1, Position 4	29

A.4. Temperaturverlauf Loop 2, Position 2	29
A.5. Temperaturverlauf Loop 2, Position 3	30
A.6. Temperaturverlauf Loop 2, Position 4	30

Tabellenverzeichnis

3.1. Optimierte PID-Parameter des Chillers	20
B.1. Ursprünglich eingestellte PID-Parameter des Chillers.	30
B.2. Temperaturen auf dem Carrier an unterschiedlichen Positionen ohne Heizleistung.	30
B.3. Temperaturen auf dem Carrier an unterschiedlichen Positionen bei 5 W Heizleistung.	31

1. Einführung

Im Laufe der Zeit konnten immer neue und kleinere Strukturen der Materie entdeckt und erforscht werden. Damit diese übersichtlich dargestellt werden können, wurde das Standardmodell der Teilchenphysik erstellt. Daraus konnten auch Vorhersagen abgeleitet werden, die später durch experimentelle Versuche bestätigt wurden.

Um auch das letzte noch nicht nachgewiesene Teilchen des Standardmodells, das Higgs-Boson, zu vermessen, wurde der Teilchenbeschleuniger „Large Hadron Collider“ (LHC) am CERN, der europäischen Organisation für Kernforschung, in der Nähe von Genf gebaut. Dieser besteht aus einem etwa 27 Kilometer langen annähernd kreisförmigen Ring, in dem Protonen oder Bleikerne gegenläufig beschleunigt werden. Werden diese zu einer kontrollierten Kollision gebracht, entstehen zum Teil neue Teilchen mit höherer Masse. Deren Zerfallsprodukte können anschließend in einem Detektor nachgewiesen und genauer bestimmt werden.

Am LHC-Ring befinden sich vier große Experimente. Das in dieser Arbeit betrachtete System ist hierbei der „Compact-Muon-Solenoid“ (CMS)-Detektor. Dieser besteht aus mehreren zwiebelförmig angeordneten Unterdetektoren, wobei der innerste Detektor, der Spurdetektor, ein Siliziumdetektor ist. Um die Genauigkeit der Messergebnisse zu erhöhen und um nach Anzeichen von neuen Phänomenen zu suchen wird der LHC zum High-Luminosity LHC (HL-LHC) umgebaut. Um die erhöhte Luminosität ausnutzen zu können, muss der CMS-Detektor verbessert werden, auch „CMS-Phase-2-Upgrade“ genannt [CER17]. Mitunter wird das gesamte siliziumbasierte Spurrekonstruktionssystem getauscht, wobei am Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP) ein Teil der neuen Siliziumstreifendetektoren (2S-Module) gebaut werden.

Die vorliegende Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Inbetriebnahme einer thermischen Teststation, im Nachfolgenden Burn-In-Station genannt, und deren Charakterisierung für die 2S-Modulproduktion. Die Teststation hat das Ziel sicherzustellen, dass die gebauten Module den thermischen Belastungen im Betrieb des CMS-Detektors standhalten. Die thermische Belastung tritt auf, da die Module bei Raumtemperatur gebaut werden, aber bei -20°C betrieben werden und die Module im inaktiven Zustand bis zu -35°C erreichen können. Somit können diese im Vorfeld sowohl auf ihre grundlegende Funktionalität getestet werden, als auch beobachtet werden wie sich Klebeverbindungen, Kühlpfade und elektrische wie mechanische Eigenschaften verändern.

Hierzu wurde zur Steuerung des Messablaufs eine Benutzeroberfläche entwickelt, mit dem sich die Station graphisch bedienen lässt. Zudem wird die Station thermisch charakterisiert, wozu verschiedene thermische Lasten angelegt und daraufhin das Verhalten der Station untersucht wird. Auch Parameter, die die Dauer der Temperaturzyklen beeinflussen, werden bestimmt, analysiert und optimiert.

Zunächst werden in Abschnitt 2 allgemeine Grundlagen über den LHC und das CMS-Experiment behandelt, anschließend wird die Burn-In-Station in Abschnitt 3 genau eingeführt, wobei sich dies nach einer allgemeinen Beschreibung in die Bereiche der Softwareentwicklung, beschrieben in Abschnitt 3.1, sowie der Charakterisierung aufteilt. Diese wird in Abschnitt 3.2 behandelt. Abschließend werden die gewonnenen Beobachtungen und Ergebnisse in Abschnitt 4 zusammengefasst.

2. LHC

Der Large Hadron Collider (LHC) ist weltweit der derzeit größte Teilchenbeschleuniger und ging erstmals 2008 in Betrieb. Er befindet sich am CERN, der Europäischen Organisation für Kernforschung, wobei die Abkürzung CERN auf das französische „Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire“ zurückzuführen ist.

Der LHC besteht aus einem unterirdischen 27 Kilometer langen Ring. In diesem Ring befinden sich zwei Strahlrohre, in denen unter einem hohen Vakuum die Teilchenstrahlen gegenläufig verlaufen. Dabei sorgen Dipolmagnete dafür, dass die Teilchen auf einer Kreisbahn bleiben. Zusätzlich fokussieren Magnete höherer Ordnung, im Speziellen Quadropol-, Sextupol-, Oktupol-, und Dekapolmagnete, den Strahl.

Im Beschleunigerring werden supraleitende Magneten verwendet, die mittels flüssigem Helium auf $-271,3^{\circ}\text{C}$ gekühlt werden. Jeder Strahl erreicht eine Energie von 6,8 TeV [LHCb]. Haben die Teilchen die Kollisionsenergie erreicht, fokussiert ein System aus Quadropolmagneten den Strahl direkt vor der Kollision nochmals, auf einen Durchmesser von 16 μm .

Nun werden die Teilchen in einem der vier Experimente zur Kollision gebracht, welche in Abbildung 2.1 dargestellt sind. Namentlich sind diese CMS (Compact Muon Solenoid), LHCb (LHC beauty), ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) und ALICE (A Large Ion Collider Experiment). Zudem sind die Vorbeschleuniger sichtbar, die die Teilchen vorbebeschleunigen, bevor sie in den LHC geleitet werden.

So konnte erstmalig mit CMS und ATLAS im Jahr 2012 das Higgs-Boson nachgewiesen werden [GIO⁺17]. Die weiteren Forschungen am LHC konzentrieren sich nun auf die genauere Untersuchung des Higgs-Bosons wie etwa dessen Masse. Aber auch in anderen Bereichen wird mit Hilfe des LHCs geforscht, so etwa der Materie-Antimaterie-Asymmetrie, der weiteren Erforschung von dunkler Materie oder aber auch der Suche nach zusätzlichen Dimensionen, dem Graviton und mikroskopisch kleinen schwarzen Löchern [LHCa].

2.1. CMS

Der CMS-Detektor ist zylinderförmig um den Kollisionspunkt aufgebaut. Dabei erstreckt er sich über eine Länge von 21 Metern und kommt auf einen Durchmesser von 15 Metern, wobei der Detektor 14.000 Tonnen wiegt. Die zylindrische Form hat den Vorteil, dass der Detektor einen möglichst großen Bereich der Kollision abdecken kann, da die Teilchen aufgrund der Kollision der gegenläufigen Strahlen in alle Richtungen emittiert werden können.

Die verschiedenen Subdetektorsysteme sind schalenförmig um den Kollisionspunkt angeordnet, wie es in Abbildung 2.2 dargestellt ist. Ein supraleitender Solenoid sorgt dafür, dass die von ihm eingeschlossenen Detektoren von einem Magnetfeld der Stärke 3,8 T durchsetzt sind.

Der innerste, siliziumbasierte Spurdetektor ist in einen inneren und äußeren Teil aufgebaut. Der innere Spurdetektor rekonstruiert die Bahn der Teilchen mit Pixeldetektoren, der äußere mit Streifendetektoren. Das Ziel der Spurdetektoren ist hierbei so genau wie möglich den

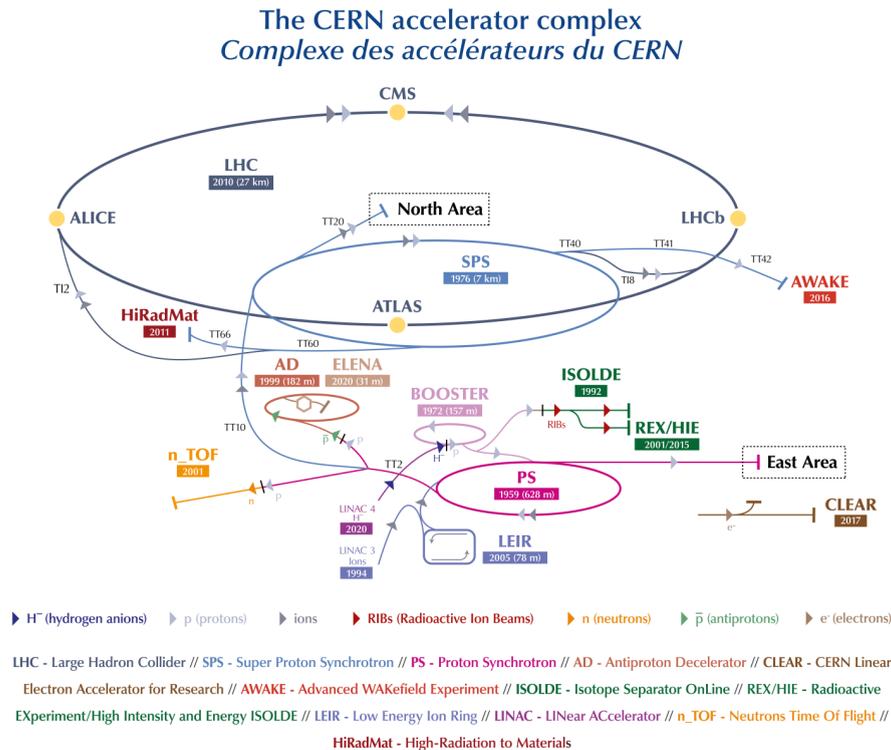


Abbildung 2.1.: Skizze des CERN-Beschleunigerkomplex. Skizze des Aufbaus der Experimente und Beschleuniger am CERN, [Mob19].

zurückgelegten Weg der geladenen Teilchen zu bestimmen. Durch das CMS-Magnetfeld folgen die Spuren von geladenen Teilchen einer gekrümmten Bahn. Aus dem Radius jeder Bahn kann, bedingt durch die Lorentzkraft, der Impuls bestimmt werden, was für die genauere Identifizierung der Teilchen essenziell ist.

An den Spurdetektor fügen sich zwei Kalorimeter an: Das weiter innen gelegene elektromagnetische Kalorimeter, sowie das hadronische Kalorimeter. Durch Schauerbildung kann hier die Energie von Teilchen bestimmt werden, welche elektromagnetisch oder hadronisch wechselwirken.

Der äußerste Subdetektor ist das Myonensystem. Da Myonen nicht durch die Kalorimeter gestoppt werden, gelangen sie durch diese hindurch, bis sie im Myonensystem eindeutig identifiziert werden. Das System besteht aus vielen Myonenkammern, die in das Eisenjoch eingebettet sind. Das Eisenjoch dient dazu das Magnetfeld wieder zurückzuführen [CMS08].

2.2. CMS-Phase-2-Upgrade

Um die Leistungsfähigkeit des LHC zu steigern, wird maßgeblich die Luminosität erhöht, also der Ausbau zum High-Luminosity LHC. Die ausschließliche Erhöhung der Luminosität würde an den Experimenten, wie auch bei CMS, zu Problemen führen. Deshalb geht mit dem Ausbau zum HL-LHC auch ein Ausbau des CMS-Detektors einher, das sogenannte CMS-Phase-2-Upgrade.

Nun kann die instantane Luminosität, häufig nur Luminosität genannt, und die integrierte Luminosität betrachtet werden.

Die instantane Luminosität L ist hierbei ein Maß für die Leistungsfähigkeit eines Teilchenbeschleunigers. Sie lässt sich aus der Rate der Streueignisse pro Zeiteinheit $\frac{dN}{dt}$ und dem Wirkungsquerschnitt σ mit dem Zusammenhang

$$L = \frac{dN}{dt} \cdot \frac{1}{\sigma}$$

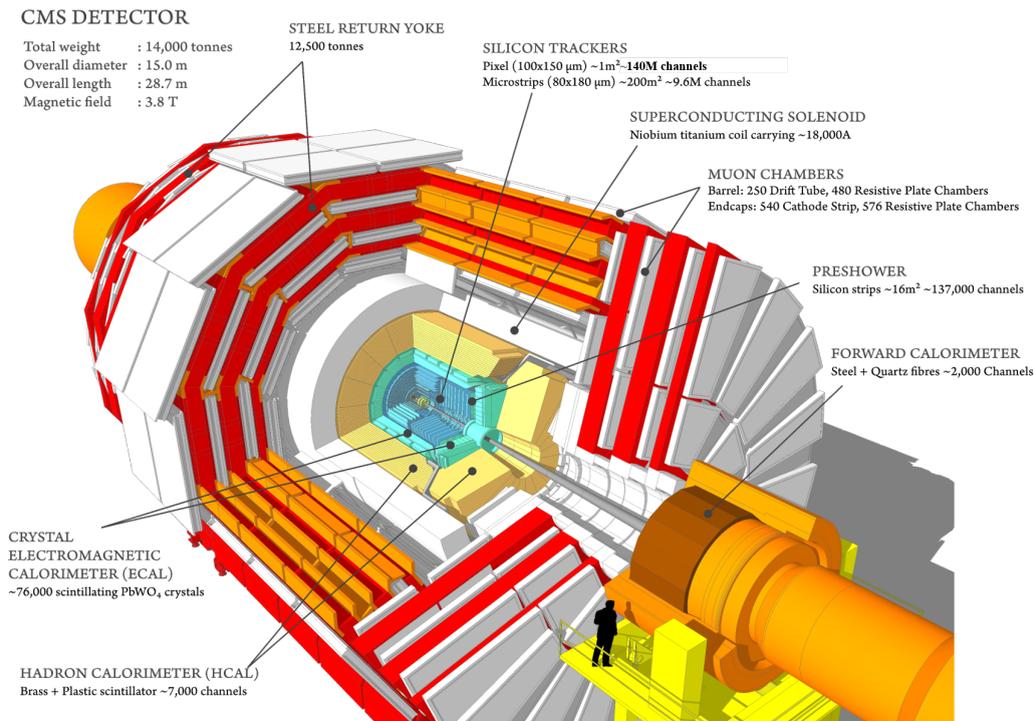


Abbildung 2.2.: Aufbau des CMS-Detektors. Von innen nach außen: Siliziumbasierte Spurdetektor, elektromagnetisches Kalorimeter, hadronisches Kalorimeter, supraleitender Magnet und Myonensystem, [CMS].

berechnen.

Die integrierte Luminosität gibt die Anzahl an Teilchenkollisionen im gegebenen Integrationszeitraum an und wird dabei als das Integral über der instantanen Luminosität, $\int L dt$, dargestellt [Dem17], [Klu23]. Da sich der Wirkungsquerschnitt der Teilchenreaktion nicht ändert, kann die Luminosität durch eine Steigerung der Teilchenrate erhöht werden.

Der LHC wurde für eine instantane Luminosität von $1,0 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ausgelegt, sowie eine integrierte Luminosität von 300 fb^{-1} . Die instantane Luminosität wurde bereits 2016 um 50 % überschritten.

Das Ziel des Ausbaus zum HL-LHC ist hierbei die Steigerung der instantanen Luminosität auf bis zu $7,5 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, sowie eine integrierte Luminosität von mindestens 3000 fb^{-1} über einen Zeitraum von zehn Jahren [Mar23].

Durch die höhere Luminosität und somit auch einer höheren Strahlenbelastung müssen viele Teile des Detektors erneuert werden, da sie entweder dafür nicht ausgelegt waren oder die höhere Rate an Teilchenkollisionen nicht ausschöpfen können. So auch der innere und äußere Siliziumspurdetektor. Diese werden komplett ersetzt. Der äußere Spurdetektor setzt sich in Zukunft aus 2S- und PS-Modulen zusammen. Die 2S-Module bestehen aus vorder- und rückseitig angebrachten Streifensensoren, während die PS-Module aus einem Makropixelsensor und einem Streifensensor bestehen. Im Gegensatz dazu besteht der innere Spurdetektor nur aus Modulen mit Pixelsensoren.

Die skizzierte Anordnung der Module im Spurdetektor ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Hierbei sind die Module radial um den Kollisionspunkt angeordnet. Die grünen und orangen Linien stehen hierbei für Pixelmodule, während die blauen Linien PS-Module repräsentieren und die roten Linien 2S-Module markieren.

Während des Betriebs im CMS-Detektor werden die Siliziumsensoren der Module auf eine Temperatur von -20°C gekühlt. Dies geschieht durch Kühlung mit zweiphasigem CO_2 mit einer Temperatur von -35°C . Um präoperative Defekte ausschließen zu können werden die Module vor dem Einbau in den CMS-Instituten, die für den Bau der Module verantwortlich

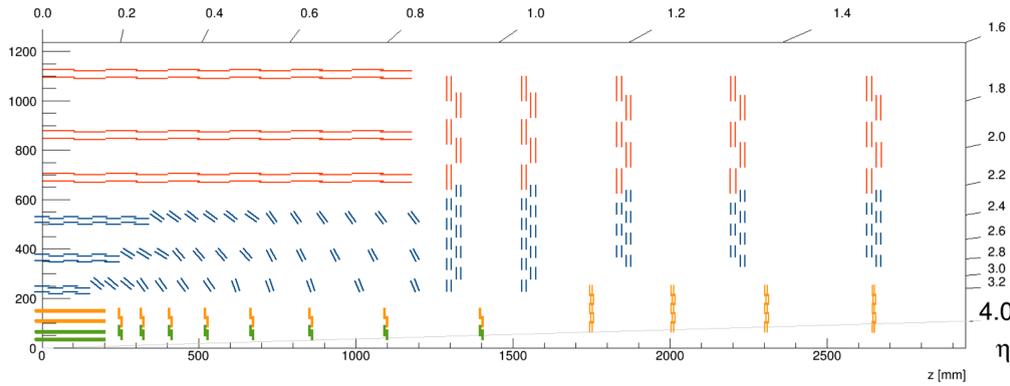


Abbildung 2.3.: Skizze eines Viertels des Siliziumspurdetektors. Dargestellt in $r - z$ Sicht stehen gelbe und grüne Linien für Pixelmodule des inneren Spurdetektors, blaue Linien für PS-Module und rote Linien für 2S-Module, die beide für den äußeren Spurdetektor bestimmt sind, [LR21].

sind, getestet. Hierbei wird ein sogenannter *Carrier*, eine Trägerstruktur auf der das Modul montiert ist, mehrmals auf eine Temperatur von mindestens -30°C gebracht, so dass die Temperatur des Sensors maximal -20°C beträgt, und auf ihre Funktionalität getestet. Dadurch werden Ausfälle vermieden, die durch thermischen Stress im frühen Stadium des Lebenszyklus des Moduls auftreten können.

2.2.1. 2S-Modul

Im äußeren Teil des CMS-Spurdetektors werden 2S-Module verbaut, die in diesem Abschnitt genauer eingeführt werden. Ein solches ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Ein 2S-Modul besteht aus zwei nah aneinanderliegenden Siliziumsensoren, deren Streifen parallel zueinander ausgerichtet sind. Die Signale beider Sensoren werden von derselben Ausleseelektronik ausgelesen. Dadurch wird der so genannte transversale Impuls p_T geladener Teilchen bestimmt. Der transversale Impuls beschreibt den Anteil des Impulsvektors am Gesamtimpulsvektor eines Teilchens senkrecht zur Strahlachse.

Die Siliziumsensoren sind einseitig mit Streifen bestückt und werden Rückseite an Rückseite eingebaut. Diese Sensoren haben je eine aktive Fläche von ungefähr $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ und bieten damit zwei Reihen von je 1016 Streifen. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Streifen, genannt *pitch*, beträgt $90\ \mu\text{m}$.

Wie bereits in Abschnitt 2.1 erwähnt, erfahren geladene Teilchen bedingt durch die Lorentzkraft im Magnetfeld eine Ablenkung. Dadurch erfahren Teilchen mit hohem p_T eine kleinere Ablenkung, wodurch ihre Radien im Detektor größer sind, wohingegen Teilchen mit geringem p_T eine größere Ablenkung erfahren. Als Konsequenz daraus unterscheidet sich die Distanz der Streifen die bei einer Detektion auslösen.

Wenn ein Teilchen den Sensor durchquert löst manchmal nicht nur ein Streifen aus, sondern mehrere nebeneinanderliegende Streifen, mit unterschiedlicher Signalstärke. Die Streifen die dabei für ein Teilchen auslösen werden ein *Kluster* genannt. Die Ausleseelektronik sucht nach Clusterpaaren in den beiden Sensorslagen, genannt *stubs*. Das Prinzip ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Die näher am Kollisionspunkt liegende Sensorlage definiert, nach einer Detektion, die Primärposition eines Suchfensters. Mit diesem Suchfenster wird nun in der weiter vom Kollisionspunkt entfernten Sensorlage erneut nach einem Cluster gesucht. Befindet sich ein jenes dort, so stellen diese beiden Cluster ein valides Clusterpaar dar. Im Betrieb wird nur unterschieden, ob p_T eines Teilchens größer oder kleiner als etwa $2 \frac{\text{GeV}}{c}$ ist.

Diese Erkennung auf Modulebene stellt eine Neuerung im Spurdetektor dar, die mit dem CMS-Phase-2-Upgrade eingeführt wird. Ein solches Clusterpaar wird nun dem sogenannten

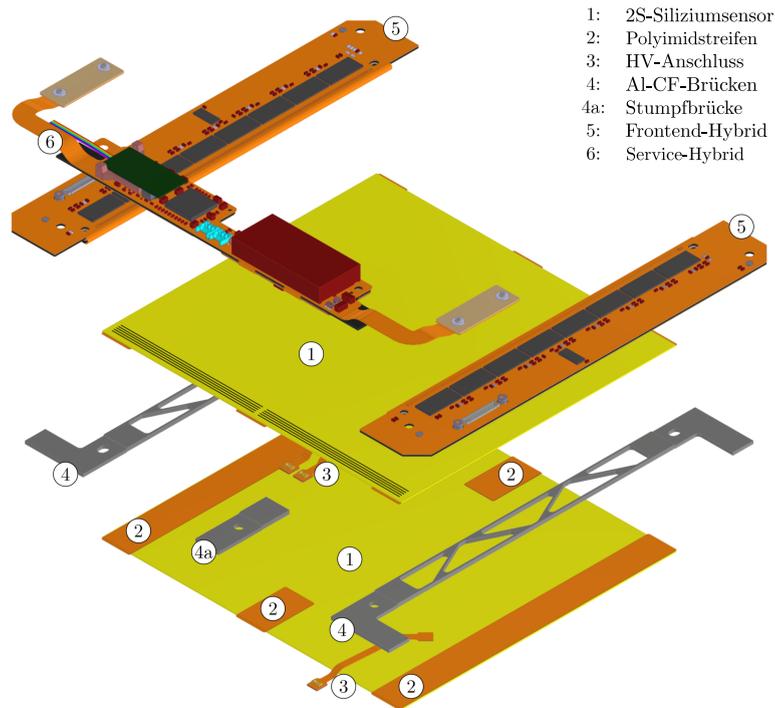


Abbildung 2.4.: Explosionszeichnung eines 2S-Moduls. Die Siliziumstreifensensoren sind in gelb dargestellt. Die ersten Reihen der 1016 Streifen sind beispielhaft in schwarz eingezeichnet. Die kohlefaserverstärkten Aluminiumbrücken sind in grau dargestellt. Die Polyimidschicht dient zur elektrischen Isolierung. Die zwei FrontEnd-Hybride und der Service-Hybrid sind auf Erweiterungen der Brücken geklebt und enthalten die Ausleseelektronik, [Kop22].

TrackFinder übergeben. Dieser bildet die Spur des Teilchens für das gefundene Clusterpaar. Durch das frühe Erkennen und Herausfiltern der Teilchen, die näher analysiert werden sollen, können unnötige Datenmengen stark reduziert werden.

Für den Abstand der beiden Sensorlagen sind Abstandshalter aus kohlefaserverstärktem Aluminium (Al-CF), genannt *Brücken*, eingebaut. Durch Löcher in den Brücken ist es möglich die Module zu montieren, beispielsweise auf einer bereits in Abschnitt 2.2 Trägerstruktur, im Folgenden *Carrier* genannt. Ein solcher Aufbau ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

Alle elektronischen Komponenten eines 2S-Moduls befinden sich auf sogenannten *Hybriden*. Diese Hybride werden auf die Brücken geklebt. Die Brücken sind gute Wärmeleiter, wodurch die Wärme der Ausleseelektronik und des Sensors über die Brücken direkt in das Kühlsystem des CMS-Detektors abgegeben wird.

In der in Abschnitt 3 näher beschriebenen Burn-In-Station befinden sich die 2S-Module auf Carriern. Die durch den Betrieb der Module produzierte Wärme, etwa 10 W pro Modul, wird somit durch die Brücken auf den Carrier und folglich an die Burn-In-Station abgegeben [Kop22].

Um die Funktionalität der 2S-Module über die gesamte HL-LHC-Datennahme zu gewährleisten, durchlaufen diese eine mehrstufige Qualitätskontrolle, so werden nach jedem Arbeitsschritt die Module getestet. Die Burn-In-Station stellt hierbei den letzten Funktionalitätstest eines komplett zusammengebauten 2S-Moduls dar. Dabei wird der Leckstrom (IV-Kurve), sowie das Rauschen des Moduls gemessen. Besteht das Modul diesen Test, wird es anschließend an ein sogenanntes *Integrationszentrum* versendet und dort auf Trägerstrukturen montiert [Mai19].

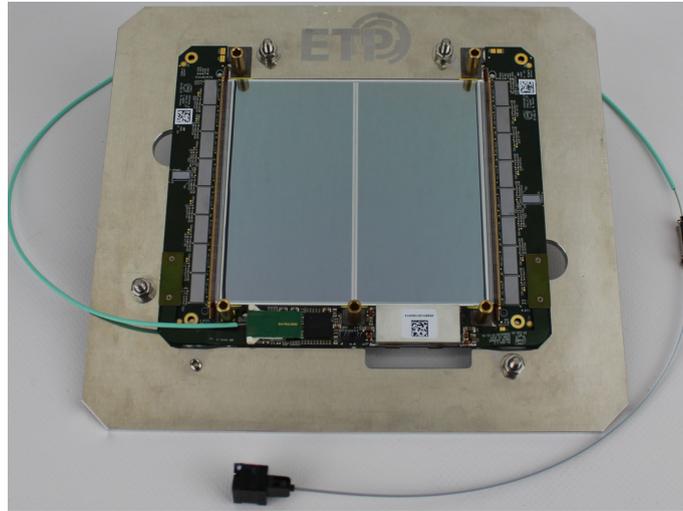


Abbildung 2.5.: 2S-Modulprototyp mit Carrier. Dieses 2S-Modul ist auf einer Carrier fixiert, wie es auch später in der Burn-In-Station verwendet wird, [Kop22].

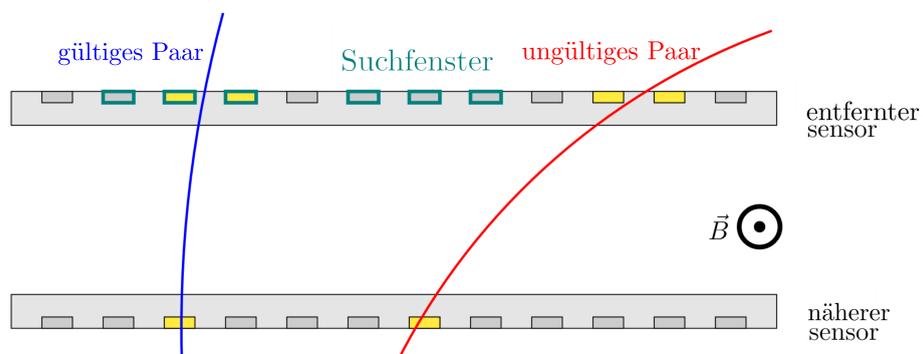


Abbildung 2.6.: Skizze der Clusterpaarererkennung im 2S-Modul. Links, in blau, ist ein gültiges Clusterpaar dargestellt, beide Cluster liegen im Suchfenster. Rechts, in rot, ist ein ungültiges Clusterpaar dargestellt, das Cluster des entfernteren Sensors liegt außerhalb des Suchfensters, [Kop22].

3. Burn-In-Station

Am ETP werden bis zu 2000 Siliziumsensormodule im Rahmen des CMS Phase-2-Upgrades hergestellt. Nach ihrem Einbau im CMS-Experiment werden diese durch -33 bis -35 °C kaltes CO₂ gekühlt. Der Siliziumsensor hat dann eine Temperatur von circa -20 °C. Um sich vor dem Einbau vergewissern zu können, dass diese Module den thermischen Anforderungen gewachsen sind, wurde die Burn-In-Station entwickelt. Deren Aufgabe ist es, acht 2S-Module gleichzeitig thermischem Stress auszusetzen und dabei deren Funktionalität zu überprüfen. Ein Bild der Station ist in Abbildung 3.1 dargestellt und ein Bild des Inneren der Box in Abbildung 3.2.

Das Aussetzen von thermischem Stress geschieht dadurch, dass maximal acht Module auf jeweils einem Carrier in die Station eingespannt werden und die Station die Carrier auf mindestens -30 °C abkühlt. Dies entspricht dann der Temperatur der Kühlung im CMS-Experiment.

Sind die Module kalt, können verschiedene Funktionalitätstests durchgeführt werden. Nach diesen Tests werden die Module auf Raumtemperatur gebracht und es können erneut Funktionalitätstests durchgeführt werden. Dieser Vorgang ist ein Zyklus in der Station.

Im späteren Betrieb der Station werden alle 48 Stunden die Module getauscht. Der Zeitplan der Funktionalitätstests ist dabei in Abbildung 3.3 schematisch dargestellt. Somit werden die Module erst bei Raumtemperatur getestet, anschließend im Kalten. Im späteren Betrieb der Station gestaltet sich dies, indem die Module bei Raumtemperatur getestet werden, anschließend im Kalten. Nun werden zehn Zyklen ohne Tests gefahren. Dann werden die Module im Kalten auf ihre Funktion getestet. Anschließend werden in 22 Stunden acht bis neun Zyklen ohne Tests gefahren, wobei im letzten Zyklus im Warmen und Kalten getestet wird.

Der innere Aufbau der Station ist anhand Abbildung 3.4 skizziert, sowie in Abbildung 3.5 detaillierter beschrieben. Die Burn-In-Station besteht aus mehreren Komponenten. Dazu gehören Labornetzteile, die die Stromversorgung der Module ermöglichen. Die Niederspannung der Module kommt von zwei sogenannten LV (Low-Voltage) - Netzteilen und die Hochspannung von einem HV (High-Voltage) - Netzteil. An dieses HV-Netzteil ist die sogenannte *Switch Box* angeschlossen. Diese verteilt die Hochspannung auf acht Module. Für die Messung der Leckströme der Sensoren ist ein Multimeter des Typs *Keithley DAQ 6510* vorhanden. Für die Kühlung ist ein Prozessthermostat des Typs *Julabo Presto A80*, im Nachfolgenden Chiller genannt, angeschlossen. Dieses ist an zwei Kreisläufe, die sich innerhalb einer thermisch isolierten Box befinden, angeschlossen. Zur Verriegelung und Sicherung der Box ist an dieser ein Magnetschloss angebracht. Die beiden sich in der Box befindenden Kühlkreisläufe haben jeweils vier einzelne Plätze für Carrier mit Modulen. Im nachfolgenden werden diese zur besseren Unterscheidung als Loop 1 und Loop 2 bezeichnet, wobei Loop 1 den oberen Kreislauf bezeichnet und Loop 2 den unteren Kreislauf.

Jeder Platz besteht aus zwei Kühlkontakten aus Kupfer, genannt *Jigs*, die die Auflagefläche für den Carrier bilden. Dabei befindet sich immer ein Kühlkontakt am Zulauf und einer am Ablauf des Kreislaufs. Fixiert wird der Carrier über einen Rahmen, der an vier Punkten mit jeweils einer Feder auf den Carrier drückt. Dies ermöglicht einen gleichmäßigen

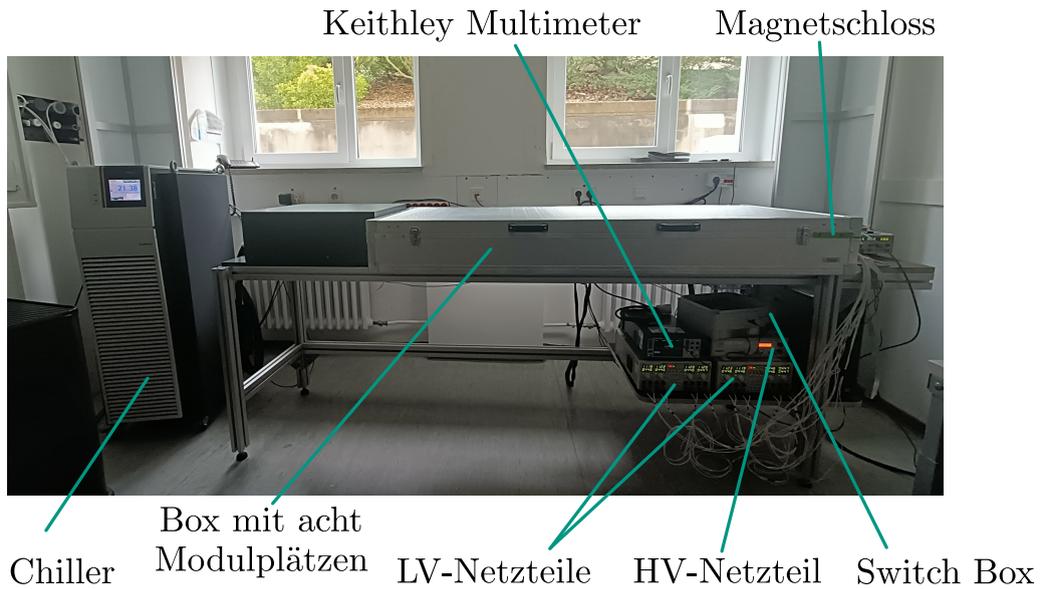


Abbildung 3.1.: Bild der Burn-In-Station. Dargestellt ist die gesamte Burn-In-Station mit den zugehörigen Geräten.



Abbildung 3.2.: Bild des Inneren der Box der Burn-In-Station. Zu sehen sind die Kühlkreisläufe, sowie acht eingelegte Carrier, die mit Heizwiderständen bestückt sind.

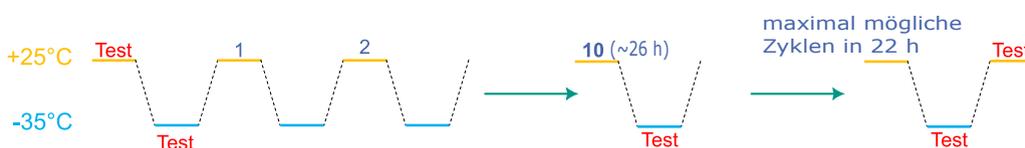


Abbildung 3.3.: Derzeitiger Plan für einen Modultest in der Burn-In-Station. Die verschiedenen Zyklen sind in orange, blau, sowie mit gestrichelten Linien dargestellt. Die Zeichnung geht dabei von einer Laufzeit von 48 Stunden der Burn-In-Station für einen Moduldurchgang aus.

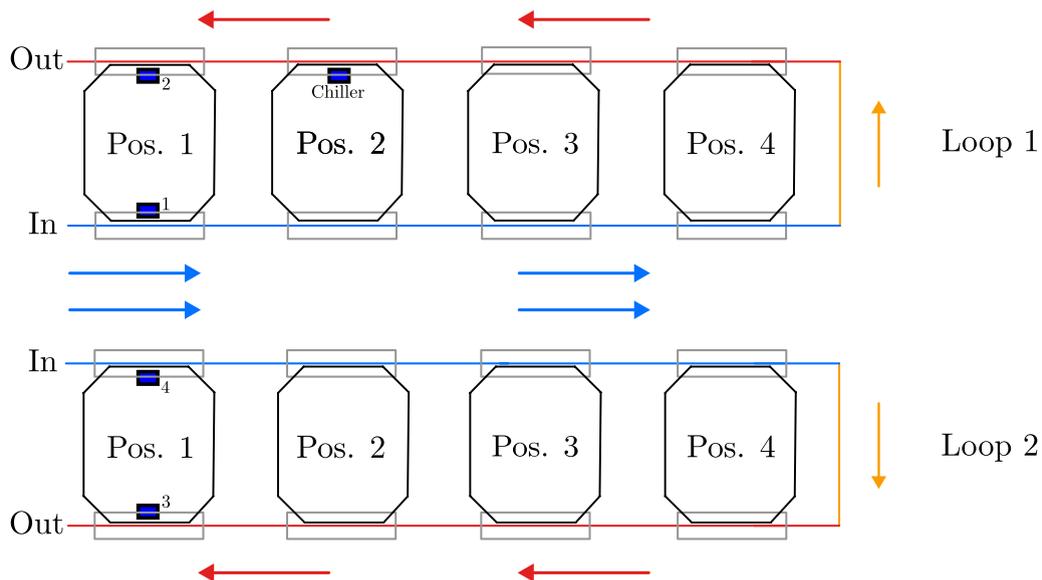


Abbildung 3.4.: Skizzierter Aufbau der Burn-In-Station. Der Kreislauf des Silikonöls ist in blau, orange und rot dargestellt, als Veranschaulichung der Erwärmung des Silikonöls in Pfeilrichtung. Darauf sind die Carrier-Positionen in Loop 1 und Loop 2 dargestellt, mit den Positionen der Temperatursensoren für die Box und den Chiller in blauem Kasten.

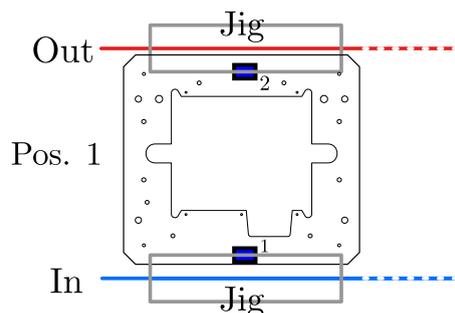


Abbildung 3.5.: Skizzierte Detaildarstellung einer Einzelposition der Burn-In-Station. Dargestellt ist die Ausrichtung des später mit einem Modul bestückten Carrier, der auf zwei Kühlkontakten aufliegt. Außerdem erkennbar sind die Positionen zweier Temperatursensoren.

Anpressdruck um einen guten Kühlkontakt zu gewährleisten.

Am ersten und letzten Kühlkontakt sind Temperatursensoren des Typs Pt-1000 angeklebt um die Ein- und Ausgangstemperatur des Silikonöls der beiden Kreisläufe zu überwachen. Ein Temperatursensor des Typs Pt-100 am vorletzten Kühlkontakt dient als Referenz für den eingestellten Sollwert am Prozessthermostat.

In der Box befinden sich zusätzlich Sensoren zur Überwachung der Luftfeuchtigkeit und des Taupunkts. Um die Luftfeuchtigkeit möglichst gering zu halten strömt konstant Trockenluft in die Box. Falls unerwartet die Luftfeuchtigkeit zu hoch ist, etwa durch ein manuelles Öffnen der Box, kann durch ein zusätzliches Ventil der Luftstrom signifikant erhöht werden.

3.1. Software

Um die Burn-In-Station für automatisierte Messungen verwenden zu können, wird diese mit der Software „BurninControl“ betrieben. Diese ist aufgebaut aus dem Back-End, der am ETP häufig benutzten Software „MeasurementControl“ und dem im Rahmen dieser

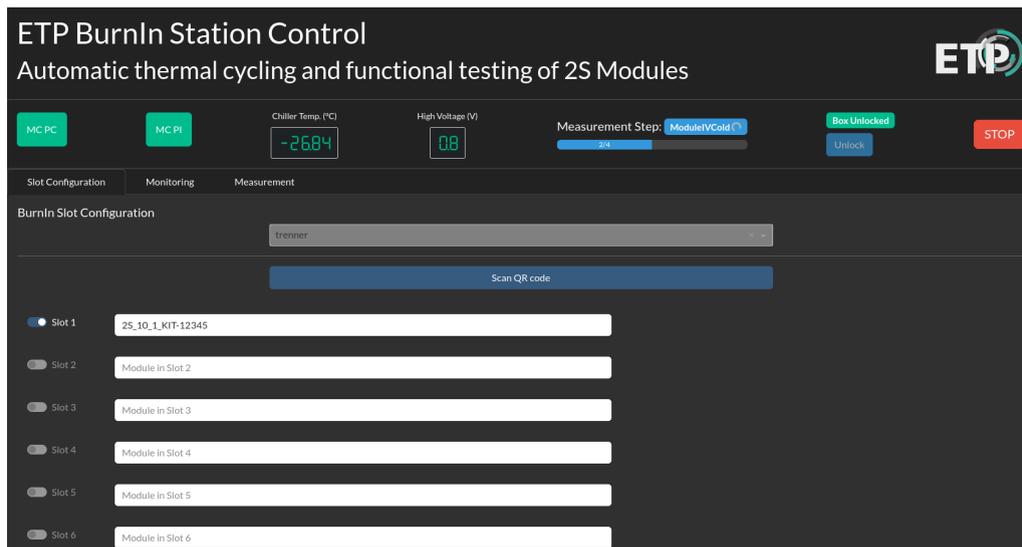


Abbildung 3.6.: Bildschirmaufnahme der Startseite des Front-End der Burn-In-Station. Sichtbar ist der Titel der Seite, die Statusleiste, sowie der erste Tab „Slot Configuration“.

Arbeit entwickelten Front-End. Die Station beinhaltet zwei Rechner, die sowohl mit den Komponenten der Station, als auch untereinander kommunizieren. Ein Desktop-PC sowie ein Raspberry Pi 4. Auf beiden wird die Software „MeasurementControl“ ausgeführt. Es ist erst möglich mit der Station zu arbeiten, sobald auf beiden Geräten die Software ordnungsgemäß funktioniert. Dies hat den Vorteil, dass im Falle eines Rechnerabsturzes der übrigbleibende Rechner dazu in der Lage ist den Betrieb der Station sicher zu beenden. Der Desktop-PC ist hierbei für die Steuerung von Chiller, HV-Netzteil, LV-Netzteil und der Messung der Temperaturen verantwortlich. Der Raspberry Pi übernimmt die Steuerung der Trockenluft für den Taupunkt und des Magnetschlusses der Box.

Die Programmierung des Front-End erfolgt in Python, wobei für die graphische Oberfläche das Framework 'Plotly Dash' verwendet wird.

Plotly Dash existiert hierbei in zwei unterschiedlichen Varianten: Dash Open Source Framework und Dash Enterprise. Das Dash Open Source Framework stellt den kostenlosen Teil von Plotly Dash dar, das für die graphische Benutzeroberfläche verwendet wird [Plo]. Das Front-End wird hierbei als Web-App gestaltet, sodass der Zugriff über den Browser erfolgen kann. Die Webseite ist aus einer Statusleiste und vom Benutzer auswählbaren Tabs aufgebaut.

3.1.1. Statusleiste

Die Statusleiste gibt einen Überblick über wichtige Parameter und Funktionen der Station die aufgrund ihrer Relevanz unabhängig vom jeweils ausgewählten Tab immer sichtbar sind, sie ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

Die ersten zwei Boxen von links in der Statusleiste geben Aufschluss über den Status der Software „MeasurementControl“ auf dem PC und Raspberry Pi. Im optimalen Zustand sind diese grün gefärbt, bei etwaigen Problemen orange. Rechts daneben existieren zwei Anzeigen, die wichtige Parameter der Station wiedergeben: Die aktuelle Ist-Temperatur gemessen am externen Fühler des Chillers und der Wert der Hochspannung.

Rechts daneben befindet sich eine Fortschrittsanzeige über den Gesamtfortschritt der Messreihe. Diese Anzeige aktualisiert sich nach jeder abgeschlossenen Einzelmessung.

Die nächsten Elemente sind ein Banner, das den aktuellen Status des Magnetschlusses an der Box anzeigt, sowie ein Knopf, mit dem sich die Box manuell entriegeln lässt. Dieser lässt sich nur betätigen, falls die Box verriegelt ist. Das Magnetschloss, somit die Box, wird

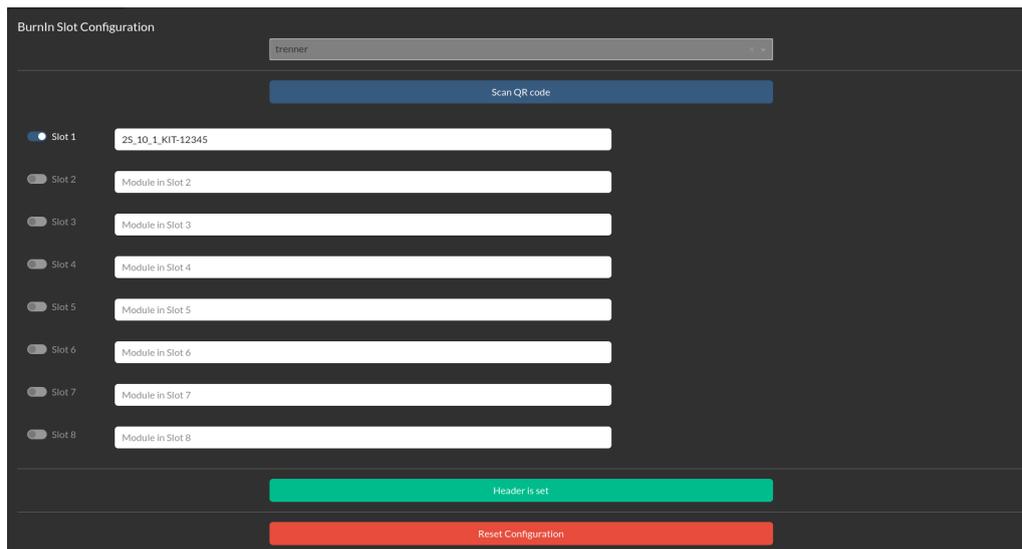


Abbildung 3.7.: Bildschirmaufnahme des Tabs „Slot Configuration“ aus dem Front-End der Burn-In-Station. Dargestellt ist der komplette Tab mit allen Interaktionsmöglichkeiten.

von der Software automatisch bei einer laufenden Messung verriegelt. Das letzte Element der Statusleiste stellt ein roter Knopf mit der Aufschrift „STOP“ dar. Dieser Knopf sorgt dafür, dass alle aktuell laufenden Messungen gestoppt werden. Es wird auch die Stromversorgung für die Module, die Hochspannung, sowie der Chiller abgeschaltet. Die Hochspannung wird hierbei für die Module langsam und linear abgeschaltet, damit es zu keiner Beschädigung kommt. Danach wird die Box entriegelt.

3.1.2. Tab „Slot Configuration“

Der Tab „Slot Configuration“ ist der beim Zugriff auf die Seite standardmäßig ausgewählte Tab, welcher in Abbildung 3.7 dargestellt ist. Dieser dient dazu die physische Konfiguration der Station in die Software zu übertragen. Dies umfasst den derzeitigen Bediener der Station, die verwendeten Module und deren Namen.

Zuallerst befindet sich in diesem Tab ein Dropdown-Menü, in dem alle am Institut befindlichen Bediener auswählbar sind.

Darauffolgend gibt es acht Textfelder, wobei jedes dieser Felder für einen Slot in der Station steht. In jedes dieser Textfelder wird der Name des jeweils eingebauten Moduls eingetragen. Um diesen Vorgang einfacher zu gestalten, ist es möglich über die Schaltfläche „Scan QR-Code“ den QR-Code des Moduls sowie den QR-Code der Position in der Burn-In Station zu scannen, dies wird dann von der Software automatisch eingetragen.

Sobald ein gültiger Modulname, der Form „2S_[0-9]{2}_[0-9]_KIT-[0-9]{5}“, in einem dieser Slots eingetragen wird, setzt sich dieser einmalig selbstständig auf den Status *aktiv*. Slots, die einen gültigen Modulnamen eingetragen haben, können dabei vom Benutzer jederzeit von *aktiv* in *inaktiv* und von *inaktiv* in *aktiv* gesetzt werden. Ein inaktiver Slot wird dabei bei einer späteren Messung ausgelassen.

Ist die Eingabe der Daten abgeschlossen, so kann dies mit dem Knopf „Set Header“ bestätigt werden. Dieser überträgt die vorgenommene Einstellung in das Back-End der Software. Sobald die eingetragenen Daten mit denen im Back-End übereinstimmen, also nach einem erfolgreichen Übertragen, ändert der Knopf seine Farbe von Orange zu Grün.

Am unteren Ende dieses Tabs befindet sich der Knopf „Reset Configuration“ dar. Dieser sorgt dafür, dass sich alle Eingabefelder zurücksetzen und diese auch aus dem Back-End gelöscht werden. Dies hat somit den gleichen Effekt, als wenn keine Eingaben vorgenommen wurden.

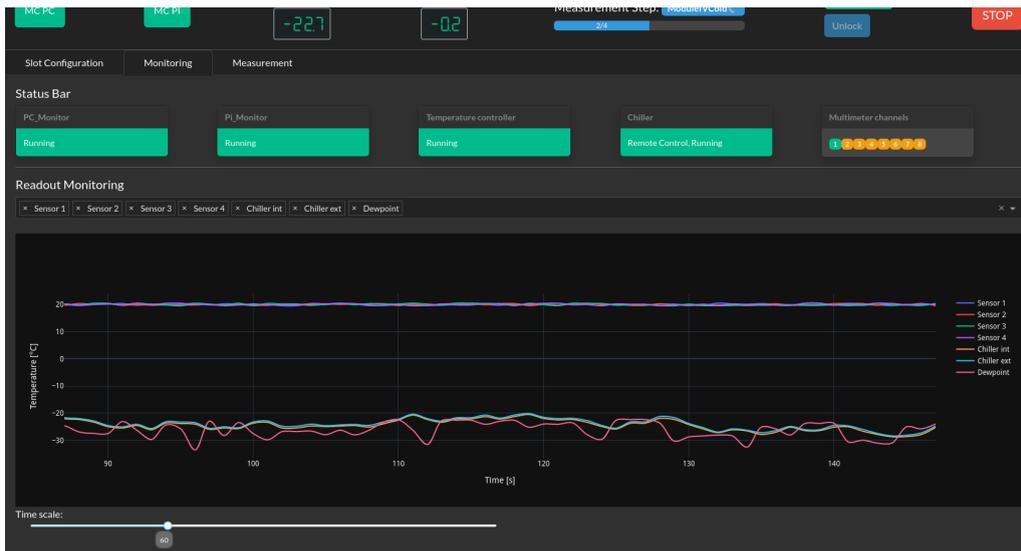


Abbildung 3.8.: Bildschirmaufnahme des Tabs „Monitoring“ aus dem Front-End der Burn-In-Station. Dargestellt ist eine Statusleiste und ein Graph, der die Messwerte der Station anzeigt.

3.1.3. Tab „Monitoring“

Der Tab „Monitoring“, dargestellt in Abbildung 3.8, bietet eine Übersicht über relevante Parameter der Station. Ganz oben befindet sich eine „Status Bar“ genannte Statusleiste. Diese ist dabei nochmals in fünf Bereiche unterteilt. Zuerst befindet sich eine Anzeige über den Status des Softwaremoduls „PC_Monitor“. Dieses Softwaremodul ist für die Auslese der Daten, die dem PC zugeteilt wurden, verantwortlich. Es hat drei verschiedene Status-einstellungen. Wurde der Monitor nicht gestartet, so ist diese Box orange gefärbt. In der Box befindet sich ein Knopf der diesen startet. Wenn das Softwaremodul ordnungsgemäß läuft, dann ist die Box grün gefärbt und zeigt den Text „Running“ an. Falls das Front-End keine gültige Antwort über den Zustand des Monitors erhält, so ist diese Box rot gefärbt und zeigt den Text „Warning“ an.

Direkt rechts daneben befindet sich eine Box über den Status des Softwaremoduls „Pi_Monitor“. Dieses Softwaremodul ist für die Auslese der Daten, die dem Raspberry Pi zugeteilt wurden, verantwortlich. Für die verschiedenen Status-einstellungen gelten die gleichen Regeln wie für das vorherige Softwaremodul: Es ist orange, und falls es nicht gestartet ist, mit einem Startknopf versehen, grün, wenn es ordnungsgemäß läuft, und rot falls ein Fehler aufgetreten ist.

Die nächste Box beinhaltet den Status der Temperatusteuerung, genannt „Temperature controller“. Dieser hat zwei verschiedene Betriebsmodi: An und Aus. So ist die zugehörige Box grün und zeigt den Text „Running“, falls dieser läuft, beziehungsweise „Stopped“ mit einer roten Box, wenn dieser es nicht tut.

Die nächste Box beinhaltet Informationen über den Prozessthermostat. Hier wird angezeigt, ob der Prozessthermostat eingeschaltet ist und sich im fernsteuerbaren oder manuellen Modus befindet. So ergeben sich aus der Kombination dieser Parameter vier mögliche Betriebszustände.

Der optimale Zustand stellt hierbei der eingeschaltete Fernsteuermodus dar. In diesem ist die Box grün mit dem Text „Remote Control, Running“. Lässt sich der Prozessthermostat nicht mehr fernsteuern, läuft aber weiter oder er lässt sich weiterhin fernsteuern, läuft aber nicht mehr weiter, so ist die Box orange gefärbt und erhält den Text „Manual Control, Running“ beziehungsweise „Remote Control, Stopped“. Nun verbleibt die Möglichkeit, dass der Chiller nicht fernsteuerbar ist und auch ausgeschaltet ist. Dies ist der schlechtmög-

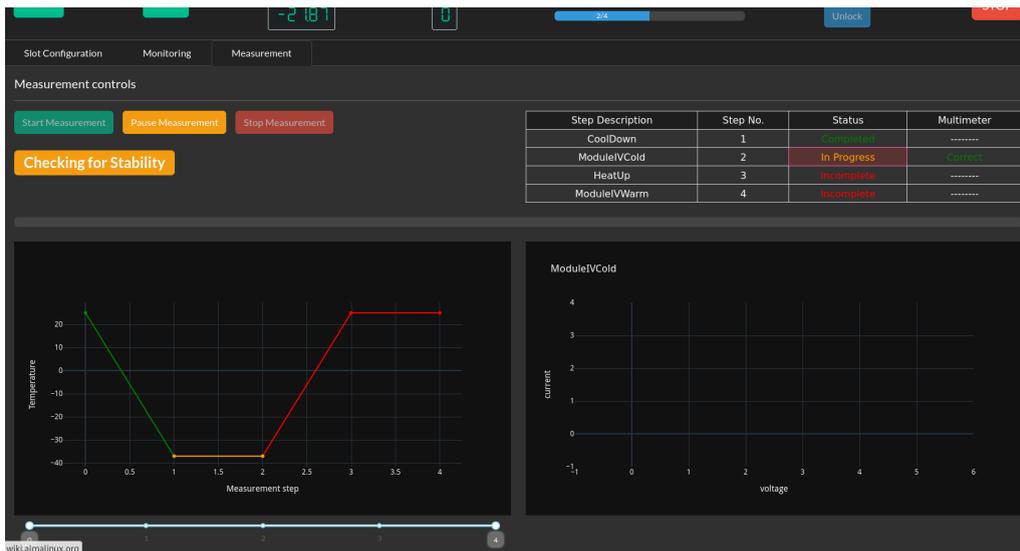


Abbildung 3.9.: Bildschirmaufnahme des Tabs „Measurement“ aus dem Front-End der Burn-In-Station. Dargestellt ist dieser während einer Messung des Typs „ModuleIVCold“.

lichste Zustand, weswegen die Box rot gefärbt ist und den Text „Manual Control, Stopped“ enthält.

Die letzte Box gibt Aufschluss über den Zustand den Status der Hochspannung der Module, genannt „Multimeter channels“. Die acht Kanäle der Hochspannung sind jeweils über einen Kasten mit der zugehörigen Zahl repräsentiert. Ist ein Modul der Station mit der Hochspannung angeschaltet wechselt dieser Kasten seine Farbe zu grün, ist er ausgeschaltet so zeigt er dies durch die orangene Färbung an. Er wechselt seine Farbe zu rot, wenn dieser angeschaltet sein soll, der Leckstrom des Sensors aber zu hoch war und er somit automatisch von der Software ausgeschaltet wurde.

Unter dieser Statusleiste befindet sich eine Übersicht über aktuelle Messwerte der Station, genannt „Readout Monitoring“. Dabei ist das größte Element der Graph, in dem die Werte der Station graphisch dargestellt werden. Direkt über diesem Graph befindet sich ein Dropdown-Menü. In diesem befinden sich alle für die Station verfügbaren Werte. Standardmäßig sind alle vorausgewählt, können jedoch jederzeit vom Benutzer ausgeblendet und wieder eingeblendet werden. Unter diesem Graphen befindet sich ein Schieberegler, mit dem die Zeitachse des Graphen verändert werden kann, um einen kleineren oder größeren Ausschnitt betrachten zu können.

3.1.4. Tab „Measurement“

Der letzte Tab beschäftigt sich mit den Messungen, die mit der Station durchgeführt werden. Er ist in Abbildung 3.9 und 3.10 zu sehen. Zu bedienen sind hierbei die drei verschiedenen Knöpfe „Start Measurement“, „Pause Measurement“ und „Stop Measurement“. Eine Messung kann erst gestartet werden, wenn im Tab „Slot Configuration“ alle Einstellungen vorgenommen wurden. Wird die Messung über den zugehörigen Knopf pausiert, wechselt der Knopf zu „Resume Measurement“ womit sich die Messung am gleichen Punkt wieder fortsetzen lässt. Dadurch wird die ganze Station pausiert und alle Parameter bleiben erhalten.

Soll die Messung gestoppt werden, öffnet nach Klicken des zugehörigen Knopfes ein weiteres Fenster mit zwei Optionen: Es kann eine einzelne Messung aus der Liste gestoppt werden. Hierzu dient der Knopf „Stop current“ und die Software bricht die aktuelle Messung ab und pausiert die Messreihe, bis sie vom Benutzer manuell fortgesetzt wird.

Es kann aber auch die aktuelle Messung und alle folgenden gestoppt werden. Dazu muss

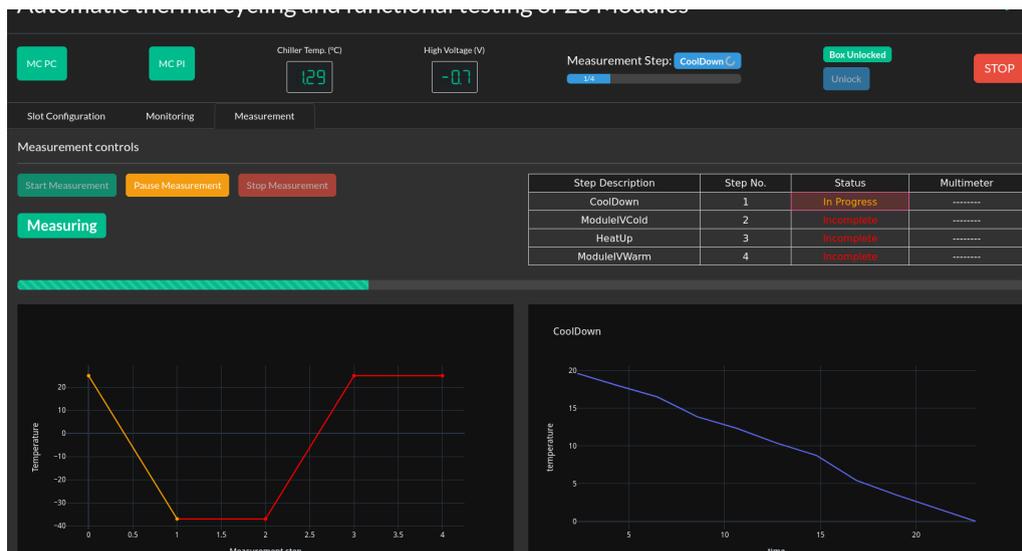


Abbildung 3.10.: Bildschirmaufnahme des Tabs „Monitoring“ aus dem Front-End der Burn-In-Station. Dargestellt ist dieser während eines Abkühlvorgangs der Station.

der Knopf „Stop list“ geklickt werden. So wird die komplette Messreihe abgebrochen. Eine Übersicht über die geplanten Messungen bietet die Tabelle auf der rechten Seite. Für die geplanten Messungen existiert eine Konfigurationsdatei mit dem Namen „measurement_list.yml“. In ihr befinden sich alle vorgesehenen Messungen, soll die Reihenfolge oder Art der Messungen verändert werden, so muss dies in der Konfigurationsdatei geschehen. Die Tabelle listet die Messungen aus der Datei auf und nummeriert diese durch. Zudem zeigt sie den Status der jeweiligen Messung an. Zu Beginn sind natürlich alle noch nicht gestartet und dementsprechend rot gefärbt mit dem Text „Incomplete“. Ist der jeweilige Messschritt im Gange, wechselt die Farbe auf Orange und die Anzeige wechselt zu „In Progress“. Nachdem die Messung abgeschlossen ist, wechselt der Text zu einem grün gefärbten „Complete“.

Die letzte Spalte in der Tabelle unter dem Namen „Multimeter“ überprüft während der Messung des Typs IV-Kurve, ob alle Kanäle des Multimeters für die komplette Dauer der Messung aktiv sind und kein Fehler auftritt. Kam es während der Messung zu keiner Unregelmäßigkeit oder etwa einem Herunterfahren der Hochspannung erscheint in der zugehörigen Zelle der Schriftzug „Correct“ in grün, falls nicht, erscheint „Incomplete“ in rot und die Messreihe wird nach dieser Einzelmessung pausiert.

Der aktuelle Betriebszustand der Station kann durch den Banner direkt unterhalb der anfangs erwähnten Knöpfe gesehen werden. Diese umfassen Ruhend („Idle“), Messend („Measuring“), Vorbereitend („Preparing“), Pausiert („Paused“) und Warten auf stabile Temperaturen („Checking for Stability“). Dabei wechselt auch die Farbe des Banners, wobei sie bei der Anzeige von Messend („Measuring“) Grün ist und sonst Orange.

Unterhalb dieses Banners und der Tabelle findet sich eine Fortschrittsanzeige für die aktuelle Messung. Unter dieser Fortschrittsanzeige finden sich zwei Graphen:

Der linke Graph visualisiert die gesamte Messreihe. Diagonale Linien stehen dabei für Abkühlen oder Erwärmen der Station, während waagrechte Linien für die Messung einer IV-Kurve oder des Rauschens von 2S-Modulen stehen. Zu Beginn sind alle Linien rot gefärbt. Findet nun die zugehörige Messung statt, wechselt die Farbe in ein Orange, ist sie abgeschlossen so ist die Linie grün.

Der Graph auf der rechten Seite zeigt standardmäßig Ergebnisse der gegenwärtig laufenden Messung an. Es können jedoch auch Daten vergangener Messungen angezeigt werden. Hierzu muss auf die zugehörige Messung in der Tabelle geklickt werden. Wird nun wieder

auf die neueste Messung in der Tabelle geklickt, wird nun wieder die entsprechende Messung angezeigt.

3.2. Thermische Charakterisierung

Das Ziel der thermischen Charakterisierung ist es, einen Überblick zu bekommen, wie die Temperaturverteilung auf dem Carrier und somit auch auf den Modulen sein wird, wenn sie in der Burn-In-Station getestet werden. Zusätzlich ist es wichtig sicherzustellen, dass die Station die Wärme der Module abführen kann, dies wird in Abschnitt 3.2.3 behandelt. Außerdem wird in Abschnitt 3.2.2 bestimmt, wie sich Parameter der Burn-In-Station anpassen lassen und infolgedessen wird die Dauer eines vollständigen Zyklus, also ein Abkühlen, Stabilisieren und ein erneutes Aufheizen mit anschließendem Stabilisieren, bestimmt.

Zu diesem Zweck existieren acht Carrier, die mit je fünf Heizwiderständen bestückt sind, weiter erläutert in Abschnitt 3.2.1. Dadurch kann die spätere Last eines sich im Betrieb befindenden 2S-Moduls simuliert werden.

3.2.1. Messaufbau

Für die nachfolgenden Messungen existieren insgesamt acht Carrier, die mit Heizwiderständen bestückt sind, dargestellt in den Abbildungen 3.11, 3.12 und 3.13. Drei Heizwiderstände sind dabei auf der Seite des Zuflusses, zwei auf der Seite des Abflusses des Kühlkreislaufes angebracht. Diese werden benutzt um die thermische Last eines sich im Betrieb befindenden Moduls zu simulieren.

Zwei Carrier sind zusätzlich mit vier Temperatursensoren des Typs Pt-1000 ausgestattet. Anhand dieser gemessenen Temperaturen lassen sich Rückschlüsse auf die spätere Temperaturverteilung eines 2S-Moduls ziehen.

Dabei sind die Sensoren T1, T3 und T4 in der Nähe der Heizwiderstände und der thermischen Lasten der späteren Module angeordnet. Der Sensor T2 stellt hierbei eine Ausnahme dar. Er befindet sich an der Stelle, an der sich später der Temperatursensor des mit einem 2S-Modul bestückten Carriers befindet. Somit kann der mit Heizwiderständen bestückte Carrier mit im Betrieb befindlichen Siliziumsensormodulen verglichen werden. Im Betrieb ist das Modul mit einer Spannung von 10,5 V versorgt und benötigt je nach Betriebsmodus einen Strom von 300 bis 500 mA, sodass eine Leistung von 5 W für jeweils ein Carrier mit Heizwiderständen als ausreichend betrachtet wird. Bei den Funktionstests in der Burn-In-Station werden die Module die ganze Zeit aktiviert sein und somit Wärme abgeben, deswegen sind die Heizwiderstände bei der Messung der Zyklen, in Abschnitt 3.2.2 dauerhaft aktiv.

3.2.2. PID-Parameter

Die Temperaturregelung der Burn-In-Station erfolgt über den Chiller. Dieser regelt die Temperatur des Silikonöls über ein internes Wärmebad. Um ein optimales Steuerverhalten der Temperatur zu gewährleisten verfügt der Chiller über einen PID-Regler (englisch: proportional-integral-derivative controller). Dieser verwendet drei verschiedene Glieder um sein Regelverhalten zu steuern. Im Nachfolgenden beschreibt s eine Regeldifferenz und y die daraus resultierende Stellgröße. [MSFW19]

Der Proportionalanteil kann sich als Verstärkungsfaktor verstehen lassen. Hierbei ist die Stellgröße s proportional zur Regeldifferenz, womit mit dem P-Beiwert des Reglers X_P der Zusammenhang

$$y = X_P \cdot s$$

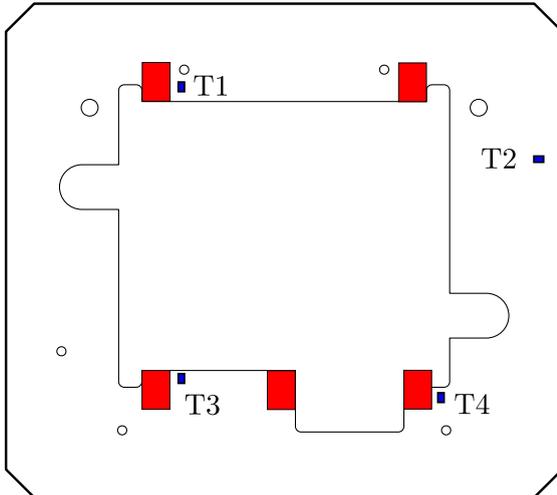


Abbildung 3.11.: Carrier Loop 1. Die Heizwiderstände sind in Rot, die Temperatursensoren in Blau dargestellt.

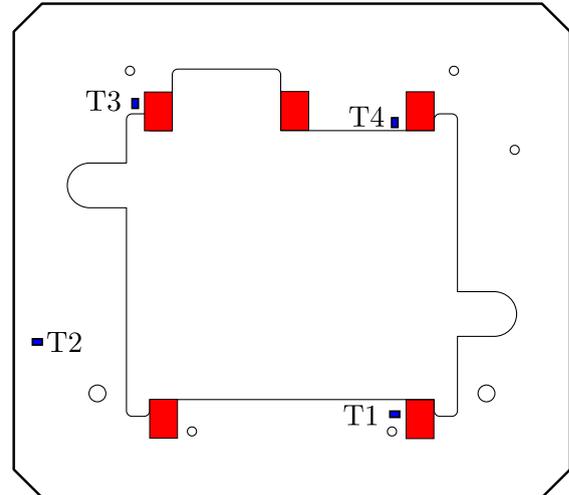


Abbildung 3.12.: Carrier Loop 2. Die Heizwiderstände sind in Rot, die Temperatursensoren in Blau dargestellt.

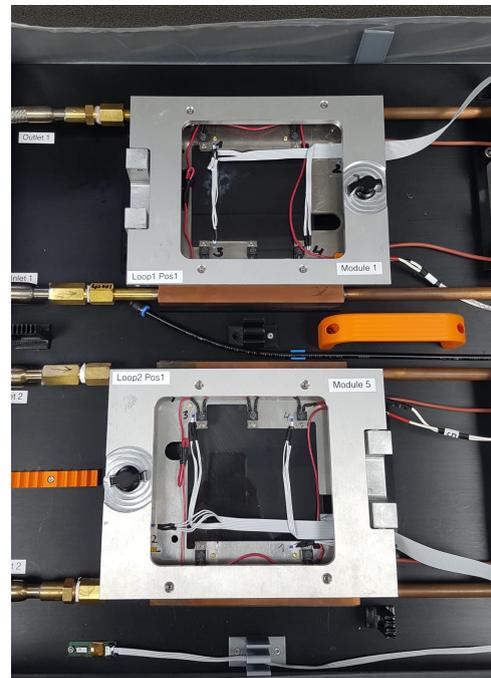
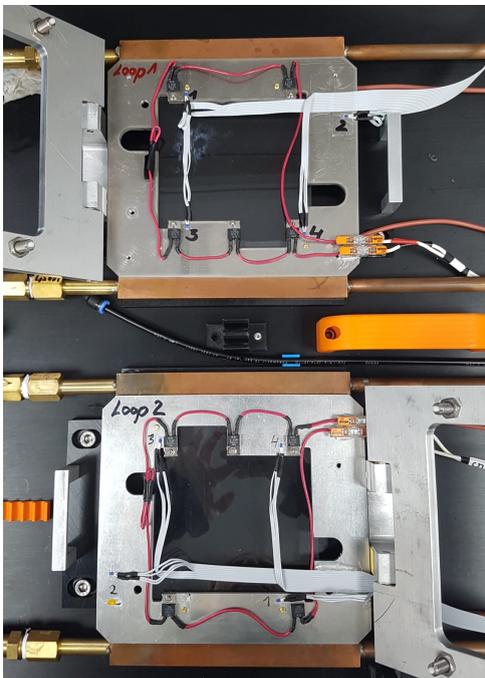


Abbildung 3.13.: Bild der Carrier in Position 1. Dargestellt sind die mit Temperatursensoren und Heizwiderständen bestückte Carrier. Links der geöffnete Zustand, rechts eingespannt. Beide Carrier befinden sich an Position 1 der Station.

gilt.

Der Integralanteil beschreibt die noch zurückzulegende Regelstrecke. Hierbei ist die Stellgröße proportional zum Integral der Regeldifferenz s . Somit gilt für den Integralanteil die Gleichung

$$y = \frac{X_P}{T_N} \int s \, dt$$

mit der Nachstellzeit T_N .

Der Differentialanteil beschreibt die Veränderung der Regeldifferenz. Ein Differenzialregler kann aber nie alleine eine Regelung vornehmen, da zum Beginn der Regelstrecke immer $\dot{s} = 0$ gilt. Als Beispiel wird nun ein PD-Regler gezeigt. Somit gilt für den Differentialanteil, mit der Vorhaltezeit T_V

$$y = X_P(s + T_V \cdot \dot{s})$$

die Summe aus Proportional- und Differentialanteil.

Kombiniert man nun alle diese Anteile als PID-Regler, so erhält man folgende Gleichung:

$$y = X_P(s + T_N \int s \, dt + T_V \cdot \dot{s})$$

Zyklen

Anhand dieser drei Parameter, also Proportionalitätsfaktor X_P , Nachstellzeit T_N und Vorhaltezeit T_V , kann die Regelung des Chillers beeinflusst werden. Die ursprünglich eingestellten Werte sind Tabelle B.1 zu entnehmen. Für diese Werte wurde ein Temperaturverlauf aufgenommen um bewerten zu können, ob diese einer effizienten Betriebsweise entsprechen. Dieser Verlauf ist in Abbildung 3.14 dargestellt. Hierzu wurden mehrere Zyklen gefahren, wobei sich ein Zyklus wie folgt beschreibt: Der Chiller wird auf die kalte Zieltemperatur, in diesem Fall -37°C , gestellt und bei erstmaligem Unterschreiten dieser Temperatur wird 33 min lang auf ein Stabilisieren gewartet. Anschließend wird die warme Zieltemperatur, hier 25°C , eingestellt und wieder bei erstmaligem Überschreiten dieser, 33 min gewartet bis der Zyklus als beendet gilt. Die Wartezeit von 33 min ergibt sich als grober Richtwert für die Messdauer der Module in der Burn-In-Station. Während der Messung wurde eine Heizleistung von 5 W pro Modul eingestellt. Dies entspricht der Leistung, die die Siliziumsensormodule im Betrieb maximal erreichen.

Die ursprünglichen PID-Parameter resultieren darin, dass ein deutliches Überschreiten im Warmen, sowie ein leichtes Unterschreiten im Kalten der gewünschten Zieltemperatur erzielt wird. So muss in beiden Bereichen viel Zeit damit verbracht werden, dies auszugleichen, bevor überhaupt eine stabile Temperatur im Zielbereich erreicht wird. Die mittlere Zyklusdauer, dargestellt anhand der roten Linien in Abbildung 3.14, beträgt hierbei circa 2,3 h.

Bei der Option *Selftune* führt das System bei jedem Sollwertsprung eine selbständige Identifikation der Regelstrecke durch und speichert diese Parameter anschließend. Diese Funktion wird nun aktiviert und auf *Dauer* gesetzt [JUL21]. Die hierbei gespeicherten PID-Parameter sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Auch bei den aktualisierten Parametern wurden acht Zyklen gemessen, das Ergebnis hiervon ist in Abbildung 3.15 dargestellt. Bei diesen PID-Parametern ergibt sich eine Zykluszeit von circa 2,25 h.

Dies entspricht zwar nur einer geringfügigen Verkürzung von 3,8 %, was aber angesichts der eingesetzten Messmethodik zu erwarten war. Dies resultiert aus der Wartezeit von 33 min zwischen den Sollwertsprüngen der Station. Wichtig ist deswegen zu betrachten, wie lange das jeweilige System benötigt um in dem für die späteren Messungen relevanten stabilen Temperaturbereich zu verweilen. Hierzu wird nun im Folgenden das Abkühlen und Erwärmen getrennt betrachtet. Für die späteren Messungen genügt es, wenn sich das

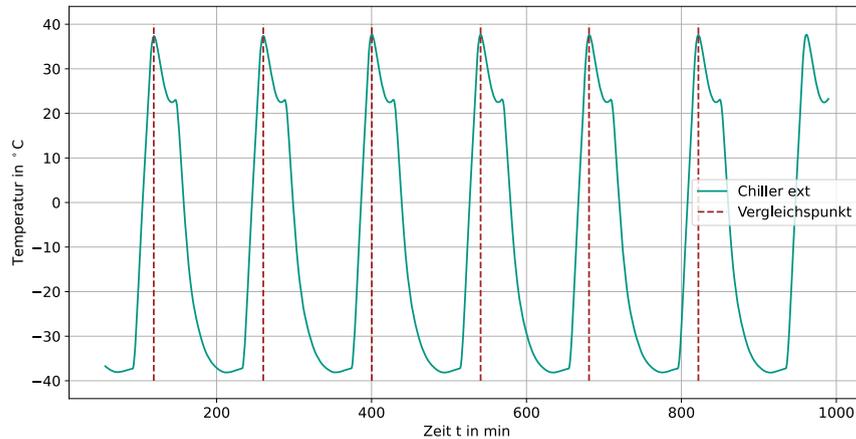


Abbildung 3.14.: Mehrere Zyklen der Burn-In-Station. Bei diesem Zyklieren sind die ursprünglichen PID-Parameter eingestellt. Die Heizwiderstände sind konstant bei 5 W pro Carrier eingestellt.

Tabelle 3.1.: Optimierte PID-Parameter des Chillers

Parameter	Wert
X_P	35 K
T_N	50 s
T_V	45 s

System in einem Bereich von $\pm 0,5$ °C zum Zielwert befindet, solange es in diesem Bereich stabil verweilt, es also diesen nicht mehr verlässt.

Erwärmen

Um den Aufwärmvorgang isoliert zu betrachten, werden Unterabschnitte des Zyklierens betrachtet. Ein Unterabschnitt beginnt bei einem Sollwertsprung zu 25 °C und zählt als beendet, sobald sich das System final in einem Bereich von $\pm 0,5$ °C zum gesetzten Zielwert, also $25 \pm 0,5$ °C befindet und diesen Bereich nicht mehr verlässt. Hierzu stehen exemplarisch die Abbildungen 3.16 bis Abbildungen 3.19, um die Methodik zu erläutern. Dieser Vorgang wurde bei allen Phasen des Temperaturzyklus durchgeführt.

Anhand der Abbildungen 3.16 und 3.17 lässt sich gut erkennen, dass ein leichtes Übertreffen des Zielwerts mit einer anschließenden Korrektur auftritt. Dies stellt nur eine kleine Abweichung vom Optimalfall nach [MSFW19] dar, wenn die Randbedingungen es erlauben den Zielwert leicht zu überschreiten. Dies liegt daran, dass die Zeit für kleine Überschreitungen, die für die Korrektur benötigt wird, kürzer ist als die zusätzliche Zeit, die für ein langsames Herantasten an den Zielwert benötigt wird.

In den Abbildungen 3.18 und 3.19 lässt sich hingegen erkennen, dass der stabile Bereich in den vorgegebenen 33 min nie durchgehend erreicht wird. Zudem wird der Zielwert um einen viel zu großen Betrag überschritten, was zu einer aufwendigen Korrektur führt, bei der der Zielwert erneut verfehlt wird. Somit wird zeitaufwändiges Einpendeln benötigt, was es zu vermeiden gilt. Da das System bei diesen PID-Parametern nie in den stabilen Bereich gelangt, wird hier der zeitlich letzte Temperaturwert vor dem erneuten Abkühlen genommen.

Für den Aufwärmvorgang bei aktiviertem Seltune ergibt sich gemittelt über alle Aufwärmvorgänge eine Zeit von 45,76 min mit einer statistischen Unsicherheit von 2,6 min. Für die ursprünglich eingestellten Parameter ergibt sich hingegen eine gemittelte Zeit von

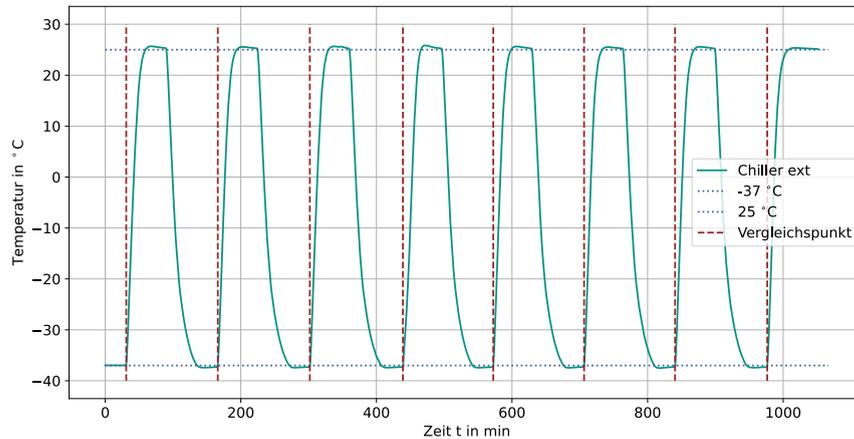


Abbildung 3.15.: Mehrere Zyklen der Burn-In Station. Bei diesem Zyklieren ist die Option Selftune aktiviert, die Heizwiderstände sind konstant bei 5 W pro Carrier.

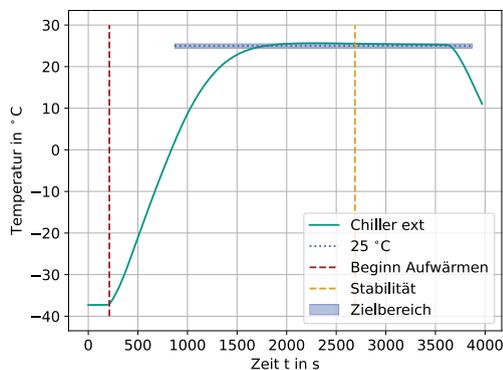


Abbildung 3.16.: Erwärmen bei angepassten Parametern. Der Zielbereich wird leicht überschritten, anschließend stabil im Bereich von $\pm 0,5$ °C gehalten.

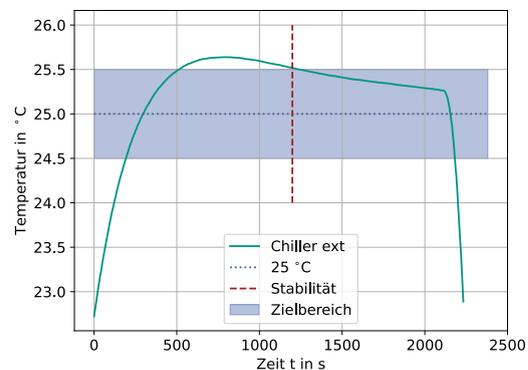


Abbildung 3.17.: Erwärmen bei angepassten Parametern, Vergrößerung. Gut zu sehen, dass das Überschreiten des Zielbereichs relativ klein ausfällt.

mindestens 54,2 min mit einer statistischen Unsicherheit von 0,25 min. Der Grund für die geringe statistische Unsicherheit bei unangepassten Parametern liegt darin, dass der stabile Bereich nicht in der vorgegeben Zeit gehalten werden kann und somit der Aufwärmvorgang durch das zeitliche Limit beendet wird.

Somit benötigt das System bei unangepassten Parametern mindestens 18,5 % länger, dessen Zeit ist aber konstanter. Im späteren Betrieb spielt eine statistische Unsicherheit von 2,6 min eine untergeordnete Rolle, da eine Verkürzung der Aufwärmzeit überwiegt.

Abkühlen

Analog zum Erwärmen wird der Abkühlvorgang nun isoliert betrachtet. Es wird nun ebenso gewartet, bis sich das System in einem Bereich von $\pm 0,5$ °C zum gesetzten Zielwert, also in diesem Fall $-37,0 \pm 0,5$ °C, befindet und diesen Bereich nicht wieder verlässt. Hierzu stehen exemplarisch die Abbildungen 3.20 bis Abbildungen 3.23, um die Methodik zu erläutern. Dieser Vorgang wird erneut bei allen Phasen des Temperaturzyklus durchgeführt.

Anhand der Abbildung 3.21 sieht man, dass mit optimierten Parametern nur ein leichtes Überschreiten des Zielwertes erfolgt und dieser direkt im Zielbereich liegt, was hier den Op-

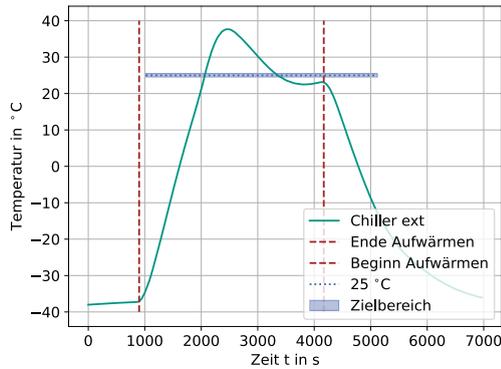


Abbildung 3.18.: Erwärmen bei ursprünglichen Parametern. Es tritt ein großes Überschreiten des Zielbereichs und anschließendem Einpendeln um die Zieltemperatur herum auf.

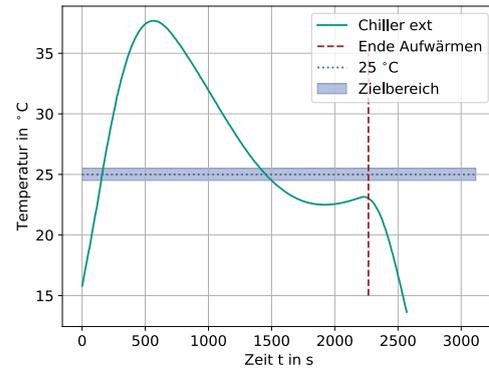


Abbildung 3.19.: Erwärmen bei ursprünglichen Parametern, Vergrößerung. Gut zu sehen, dass hier die Temperatur jeweils über und unter den Zielbereich hinwegpendelt.

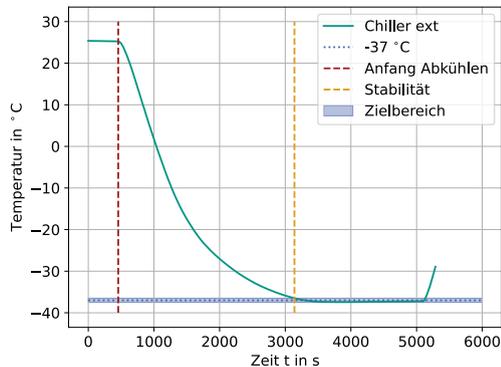


Abbildung 3.20.: Abkühlen bei angepassten Parametern. Der Zielbereich wird direkt erreicht.

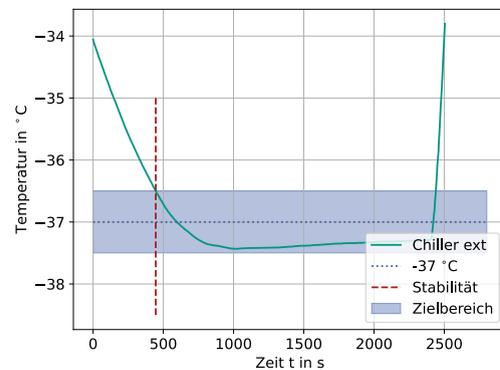


Abbildung 3.21.: Abkühlen bei angepassten Parametern, Vergrößerung. Es findet kein Unterschreiten des Zielbereichs statt.

timalfall darstellt, da der komplette Zielbereich ausgenutzt wird um Stabilität zu erlangen. Mit unoptimierten Parametern hingegen wird erneut ein relativ starkes Übertreffen des Zielbereichs beobachtet, wodurch ein zeitlich aufwändiges Gegensteuern erfolgt.

Somit reduziert sich die mittlere Abkühlzeit bei unoptimierten Parametern von 80,6 min mit einer statistischen Unsicherheit von 0,2 min, auf 44,3 min mit einer statistischen Unsicherheit von 0,3 min, bei optimierten Parametern. Dies entspricht einer Verkürzung auf 55 % der Ursprungsdauer. Die statistische Unsicherheit auf die Abkühlzeit ist bei beiden Parametersets relativ klein und spielt eine untergeordnete Rolle.

Mit dieser Optimierung und einhergehenden Verkürzungen der thermischen Phasen wird es im späteren Betrieb möglich sein, die Module in gleicher Zeit mehr thermischem Stress auszusetzen. Die Anzahl der Zyklen pro Zeit kann erhöht werden.

3.2.3. Temperaturverteilung

Für die Messung der Temperaturverteilung wird nun immer eine Position der beiden Kreisläufe mit einem Carrier mit Temperatursensoren bestückt, wobei diese nach der Messung auf die nächste Position gewechselt werden. So besteht diese Messreihe aus vier Einzelmessungen.

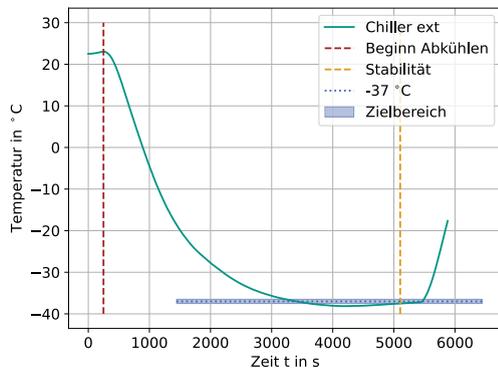


Abbildung 3.22.: Abkühlen bei ursprünglich eingestellten Parametern. Der Zielbereich kann nicht direkt gehalten werden.

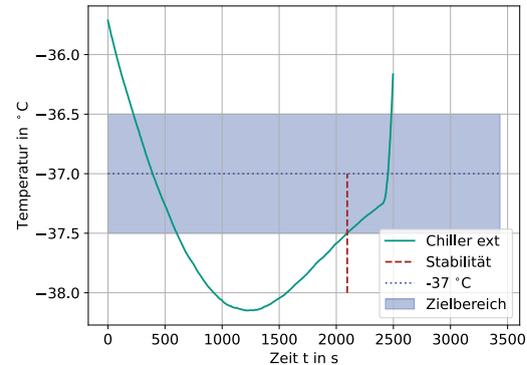


Abbildung 3.23.: Abkühlen bei ursprünglich eingestellten Parametern, Vergrößerung. Hier ist ein Unterschreiten des Zielbereichs vorhanden, welches anschließend ausgeglichen werden muss.

Der Chiller wird hierzu nun auf -37°C eingestellt. Sobald sich das System im Gleichgewicht befindet, werden die Heizwiderstände mit Spannung versorgt und solange gewartet, bis ein erneutes Gleichgewicht auftritt.

Tabelle B.2 enthält die Temperaturen zu Beginn, ohne Heizleistung auf den Carriern. Nach Erreichen des Gleichgewichts im Kalten, wird nun eine Heizleistung von 5 W über den gesamten Carrier angelegt, also 1 W pro Heizwiderstand. Der Verlauf dieses Erwärmens ist in den Abbildungen 3.24 und 3.25, sowie A.1 bis A.6 dargestellt, wobei exemplarisch zwei Verläufe zu sehen sind, während sich die verbleibenden im Anhang befinden. Die gemessenen Werte, nachdem sich die Temperaturen erneut stabilisiert haben, sind anhand Tabelle B.3 im Anhang dargestellt.

Um die Temperaturen nun besser miteinander vergleichen zu können, werden in Abbildung 3.26 und 3.27 die Temperaturen aus den beiden Tabellen B.2 und B.3 nach der Position der Temperatursensoren aufgetragen. Daran lässt sich erkennen, dass es insbesondere bei Loop 1 ein wiederkehrendes Muster gibt. Bis auf Position eins ist Temperatur T4 kälter als die anderen, dieser befindet sich am Ende des Kühlkontakts. Zudem ist Temperatur T3 im Leistungszustand immer die Wärmste, welche sich am Anfang des Kühlkontakts, somit vor T4 befindet.

Bei Loop 2 kann, außer bei Position 1, auch gesehen werden, dass Temperatur T2 am kältesten ist. Bei Position zwei bis vier bildet Temperatur T2 einen Ausreißer ins Kalte. Das ist erwartbar, denn der Sensor T2 befindet sich nicht neben einem Heizwiderstand.

Es wäre erwartbar, dass Loop 1 und Loop 2 vergleichbare Werte zeigen. Allerdings ist die Anordnung der Temperatursensoren auf den Carriern zwischen den Kreisläufen unterschiedlich. Bei Loop 1 befindet sich der Sensor T1 am Anfang des Kühlkontakts während T1 bei Loop 2 sich am Ende dessen befindet. Für die Sensoren T3 und T4 gilt zwar, dass diese beide an der gleichen Stelle des Kühlkontakts sitzen, die Geometrie des Carriers zwischen diesen aber nicht dieselbe ist. Dadurch ergeben sich auch unterschiedliche Temperaturverläufe zwischen den Kreisläufen.

Es ist auch anzumerken, dass jeder Temperatursensor eine relativ konstante Temperaturdifferenz zwischen Leistungsbetrieb und ohne Leistung zeigt. Dieser Umstand lässt darauf schließen, dass die Leistung der Heizwiderstände und somit auch die der späteren Module, effektiv über die Kühlung der Station abgeführt werden kann.

Anhand der Zeitskalen der verschiedenen Messungen, in den Abbildungen 3.24 und 3.25, sowie A.1 bis A.6, ist auch zu erkennen, dass die Station relativ lange benötigt (ungefähr

45 min) die Carrier in ein thermisches Gleichgewicht zu bringen. Der Grund dafür kann etwa in einem suboptimalen Kontakt zwischen Kühlkontakt und Carrier liegen. Hier liegt Kupfer auf Aluminium ohne ein Füllmaterial wie etwa Wärmeleitpaste.

Anhand der Temperaturverläufe ist aber erkennbar, dass die Temperaturen trotzdem unter dem gewünschten Mindestwert von -30°C liegen, auch wenn sich die Carrier nicht im thermischen Gleichgewicht befinden. Diese Temperatur ist auf dem Carrier notwendig um für die im Betrieb befindlichen Module eine Temperatur von -20°C auf dem Sensor zu erreichen. Ein Verbessern des Kontakts zur besseren Wärmeübertragung könnte zu zeitlichen Verbesserungen bei den thermischen Phasen führen.

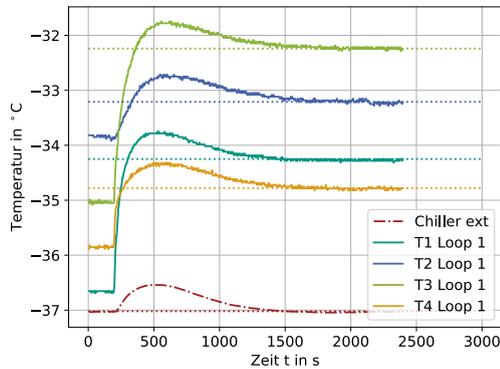


Abbildung 3.24.: Temperaturverlauf Loop 1, Position 1. Verhalten der Temperaturen nach Einschalten der Heizwiderstände.

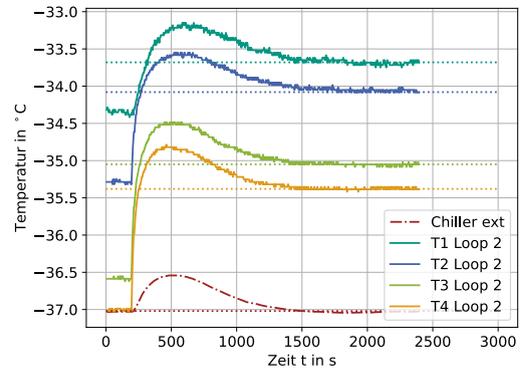


Abbildung 3.25.: Temperaturverlauf Loop 2, Position 1. Verhalten der Temperaturen nach Einschalten der Heizwiderstände.

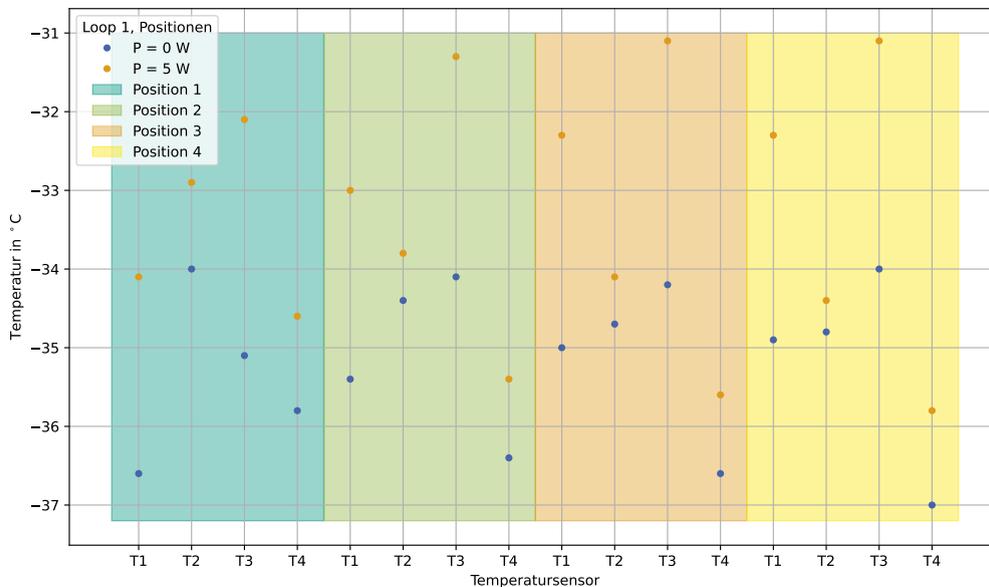


Abbildung 3.26.: Vergleichsdarstellung für Loop 1. Die Temperatursensoren der einzelnen Positionen sind nacheinander aufgetragen. Die Temperaturen der beiden Leistungszustände wurden gemessen nachdem sich die Temperaturen in der Station stabilisiert haben.

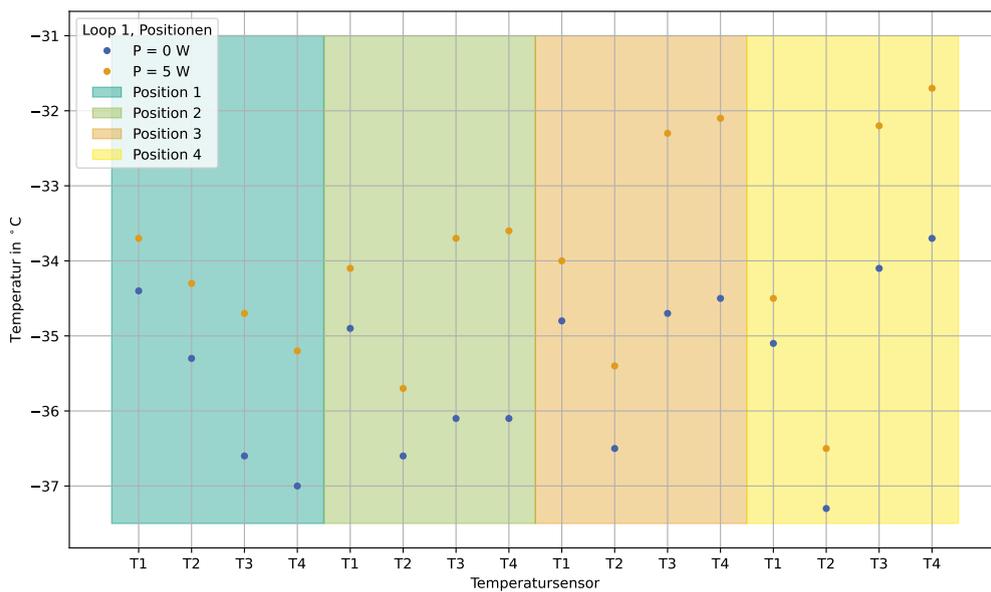


Abbildung 3.27.: Vergleichsdarstellung für Loop 2. Die Temperatursensoren der einzelnen Positionen sind nacheinander aufgetragen. Die Temperaturen der beiden Leistungszustände wurden gemessen nachdem sich die Temperaturen in der Station stabilisiert haben.

4. Fazit und Ausblick

Für die Realisierung des CMS-Phase-2-Upgrades und der daher eingehenden Ausschöpfung des HL-LHC leistet die Burn-In-Station einen großen Beitrag. Die Burn-In-Station, die in dieser Arbeit charakterisiert und in Betrieb genommen wurde, sorgt dafür, die Qualität der am ETP produzierten Siliziumsensormodule für das CMS-Phase-2-Upgrade zu sichern. Das in dieser Arbeit entwickelte Front-End stellt eine erhebliche Vereinfachung in der Bedienung dieser Station dar. Zudem sorgt die Automatisierung verschiedener Prozesse durch Software sowie deren Sicherheitsmechanismen zur Vermeidung von Fehlern, die im Laufe der Qualitätssicherung auftreten können.

Durch das Testen und Anpassen der Software an der Station konnten direkt Einstellungen vorgenommen und Fehler behoben werden, so dass einem späteren Betrieb mit Siliziumsensormodulen nichts mehr im Wege steht. Zusätzlich konnte durch die Anpassung der PID-Parameter des Prozessthermostats die Dauer der thermischen Zyklen deutlich verkürzt werden. Durch diese Verbesserung wird es im späteren Betrieb möglich sein, die Module in gleicher Zeit mehr Temperaturzyklen auszusetzen.

Durch die Messung der Temperaturverteilung kann sichergestellt werden, dass die Temperatur aller Carrier unter dem gewünschten Wert von -30°C liegen. Dabei ist die Temperatur der Kühlkontakte, -37°C , gleich der CO_2 -Kühlung im CMS-Experiment.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme und umfassender Konfiguration ist die Station nun vollständig betriebsbereit und optimal auf den Einsatz in der Modulproduktion vorbereitet. Alle erforderlichen Maßnahmen wurden getroffen, um eine reibungslose Funktionalität zu gewährleisten und eine effiziente Produktion sicherzustellen. Zusätzlich kann als weitere Optimierung vorgeschlagen werden, den Kontakt zwischen zwei Metalloberflächen, der des Kühlkontakts mit dem Carrier, zur besseren Wärmeleitung zu verbessern. Dadurch könnten kürzere Temperaturzyklen erzielt werden.

Anhang

A. Abbildungen

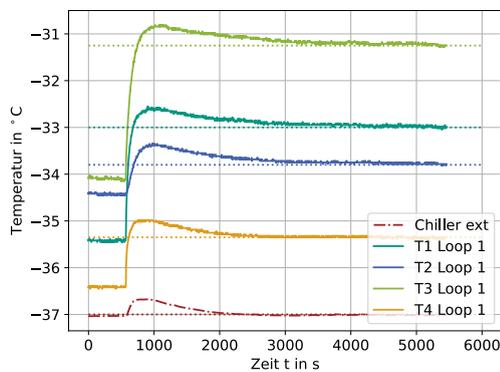


Abbildung A.1.: Temperaturverlauf Loop 1, Position 2. Verhalten der Temperaturen nach Einschalten der Heizwiderstände.

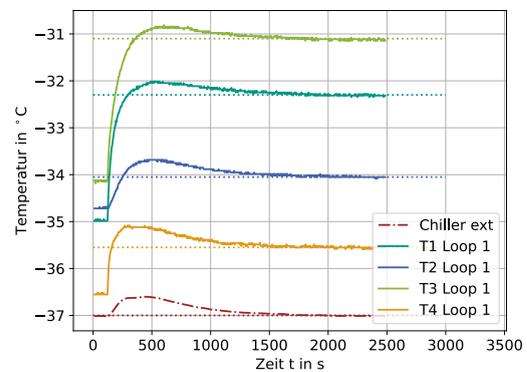


Abbildung A.2.: Temperaturverlauf Loop 1, Position 3. Verhalten der Temperaturen nach Einschalten der Heizwiderstände.

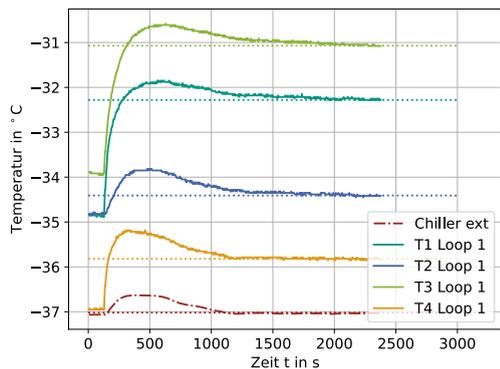


Abbildung A.3.: Temperaturverlauf Loop 1, Position 4. Verhalten der Temperaturen nach Einschalten der Heizwiderstände.

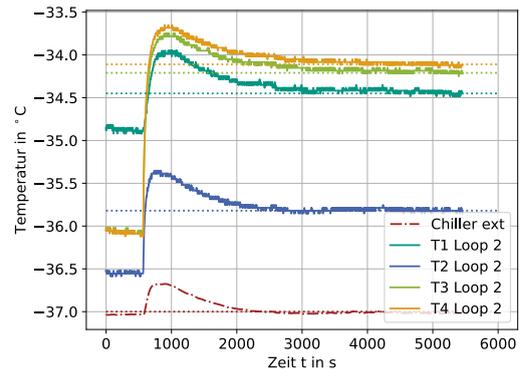


Abbildung A.4.: Temperaturverlauf Loop 2, Position 2. Verhalten der Temperaturen nach Einschalten der Heizwiderstände.

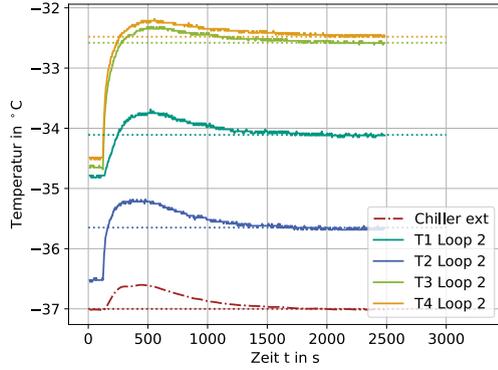


Abbildung A.5.: Temperaturverlauf Loop 2, Position 3. Verhalten der Temperaturen nach Einschalten der Heizwiderstände.

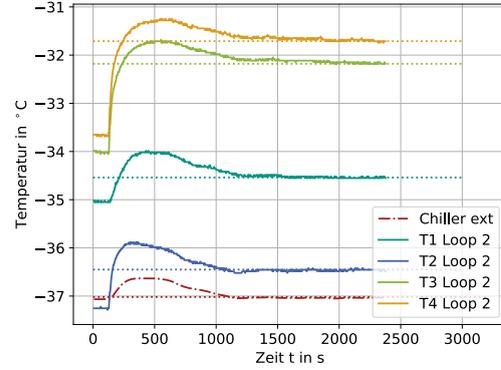


Abbildung A.6.: Temperaturverlauf Loop 2, Position 4. Verhalten der Temperaturen nach Einschalten der Heizwiderstände.

B. Tabellen

Tabelle B.1.: Ursprünglich eingestellte PID-Parameter des Chillers.

Parameter	Wert
X_P	24 K
T_N	10 s
T_V	55 s

Tabelle B.2.: Temperaturen auf dem Carrier an unterschiedlichen Positionen ohne Heizleistung.

Loop 1	T1 in °C	T2 in °C	T3 in °C	T4 in °C
Pos. 1	-36,7	-33,9	-35,1	-35,9
Pos. 2	-35,4	-34,4	-34,1	-36,4
Pos. 3	-35,0	-34,7	-34,1	-36,6
Pos. 4	-34,9	-34,8	-33,9	-37,0
Loop 2	T1 in °C	T2 in °C	T3 in °C	T4 in °C
Pos. 1	-34,4	-35,3	-36,6	-37,0
Pos. 2	-34,9	-36,6	-36,1	-36,1
Pos. 3	-34,8	-36,5	-34,7	-34,5
Pos. 4	-35,1	-37,3	-34,1	-33,7

Tabelle B.3.: Temperaturen auf dem Carrier an unterschiedlichen Positionen bei 5 W Heizleistung.

Loop 1	T1 in °C	T2 in °C	T3 in °C	T4 in °C
Pos. 1	-34,3	-33,2	-32,2	-34,8
Pos. 2	-33,0	-33,8	-31,3	-35,4
Pos. 3	-32,3	-34,1	-31,1	-35,6
Pos. 4	-32,3	-34,4	-31,1	-35,8
Loop 2	T1 in °C	T2 in °C	T3 in °C	T4 in °C
Pos. 1	-33,7	-34,1	-35,1	-35,4
Pos. 2	-34,5	-35,8	-34,2	-34,1
Pos. 3	-34,1	-35,7	-32,6	-32,5
Pos. 4	-34,5	-36,5	-32,2	-31,7

Literaturverzeichnis

- [CER17] *The Phase-2 Upgrade of the CMS Tracker*. Technischer Bericht, CERN, Geneva, 2017. <https://cds.cern.ch/record/2272264>.
- [CMS] *Detector | CMS Experiment*. <https://cms.cern/detector>, besucht: 3.11.2023.
- [CMS08] CMS Collaboration: *The CMS experiment at the CERN LHC. The Compact Muon Solenoid experiment*. JINST, 2008. <https://cds.cern.ch/record/1129810>.
- [Dem17] Demtröder, Wolfgang: *Experimentalphysik 4 : Kern-, Teilchen- und Astrophysik*. Springer-LehrbuchSpringerLink. Springer Spektrum, Berlin, 5. Auflage, 2017, ISBN 9783662528846. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52884-6>.
- [GIO⁺17] G., Apollinari, Béjar Alonso I., Brüning O., Fessia P., Lamont M., Rossi L. und Taviani L.: *High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC): Technical Design Report V. 0.1*. CERN Yellow Reports: Monographs. CERN, Geneva, 2017. <http://cds.cern.ch/record/2284929>.
- [JUL21] JULABO GmbH, Seelbach, Deutschland: *Original-Bedienungsanleitung PRE-STO™ User Interface*, Mai 2021.
- [Klu23] Klute, Markus: *Moderne Experimentalphysik III - Teilchen und Hadronen, Vorlesung 7*, 2023. https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=file_2121942_download&client_id=produktiv.
- [Kop22] Koppenhöfer, Roland: *Noise and Detection Efficiency Studies on Full- Size 2S Module Prototypes for the Phase-2 Upgrade of the CMS Experiment*. Dissertation, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 2022.
- [LHCa] *Extra dimensions, gravitons, and tiny black holes | CERN*. <https://home.cern/science/physics/extra-dimensions-gravitons-and-tiny-black-holes>, besucht: 3.11.2023.
- [LHCb] *Run 3: an opportunity to expand the LHC physics programme | CERN*. <https://home.cern/press/2022/run-3>, besucht: 13.11.2023.
- [LR21] La Rosa, Alessandro: *The upgrade of the CMS Tracker at HL-LHC*. Technischer Bericht, CERN, Geneva, 2021. <https://cds.cern.ch/record/2776511>.
- [Mai19] Maier, Stefan: *Assembly and qualification procedures of 2S modules and high rate tests of the CMS Binary Chip for the Phase 2 Upgrade of the CMS Outer Tracker*. Dissertation, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 2019.
- [Mar23] Marton, Krisztina: *The Phase-2 Upgrade of the CMS Outer Tracker*. Technischer Bericht, CERN, Geneva, 2023. <https://cds.cern.ch/record/2871585>.
- [Mob19] Mobs, Esma: *The CERN accelerator complex in 2019. Complexe des accélérateurs du CERN en 2019*. 2019. <https://cds.cern.ch/record/2684277>, General Photo.

- [MSFW19] Mann, Heinz, Horst Schiffelgen, Rainer Froriep und Klaus Webers: *Einführung in die Regelungstechnik : analoge und digitale Regelung, Fuzzy-Regler, Regler-Realisierung, Software*, Kapitel 4. Hanser, München, 12. Auflage, 2019, ISBN 9783446456945. <https://doi.org/10.3139/9783446456945>.
- [Plo] *Plotly: The front end for ML and data science models*. <https://plotly.com/dash/>, besucht: 26.09.2023.