Wärmetransportuntersuchung und Kühlung für den CBM-TRD

Patrick Schneider

Masterarbeit im Fach Physik

Institut für Kernphysik Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Münster, 3. März 2023

Erster Gutachter: Prof. Dr. Anton Andronic Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Christian Klein-Bösing

Inhaltsverzeichnis

1	Einl	leitung	1
2	Das	CBM-Experiment	3
3	Der 3.1	Übergangsstrahlungsdetektor Der CBM-TRD 3.1.1 Modultypen des CBM-TRDs 2.1.2 Fact Fact Fact Fact Fact for the Dataset of the CPM (TPD)	7 8 13
		3.1.2 Front-End Elektronik und Datenauslesekette des CBM-1RD	15
4	Gru	ndlagen des thermischen Wärmetransports	17
	4.1	Wärmeleitung	17
	4.2	Konvektion	19
	4.3	Wärmestrahlung	19
	4.4	Spezifische Wärmekapazität	20
	4.5	Wärmeleistung eines Volumenstroms	21
	4.6	Thermische Ausdehnung und Ausdehnungskoeffizient	21
5	The	rmisches Verhalten der Komponenten des CBM-TBDs unter	
0	Wäi	meeintrag	25
	5.1	Wärmetransport in einem TRD-Modul	26
	5.2	Verhalten der Komponenten des CBM-TRDs unter Wärmeeintrag	$\frac{-5}{28}$
	0.2	5.2.1 Gasverstärkung des Detektorgases	$\frac{-0}{28}$
		5.2.2 Wärmeausdehnung des Radiators	30^{-0}
		5.2.3 Wärmetransport aus dem System des CBM-TRDs	31
6	Vor	suchsaufbau	22
U	61	MWPC und Detektorgas	34
	6.2	Simulation des Wärmeeintrags	35
	0.2	6.2.1 Dämmung des Versuchsaufbaus	39
	63	Temperaturmessung	41
	0.0	6.3.1 I ² C-Sensoren	41
		6.3.2 DS18B20-Sensoren	44
		6.3.3 Auslese der Temperatursensoren	47
	6.4	Konzeption eines Kühlsystems	48
_	T		
7	Ten	peraturmessungen und Auswertung	51
	(.1	Inirarotmessungen	51
	7.2	Allgemeine Informationen zu den Temperaturmessungen	54
	1.3	Kaltmessung	55
		7.3.1 Kalibration der Temperatursensoren	56
		7.3.2 Nachkalibration der Kaltmessung	58

	7.4	Tempe	eraturmessungen des beheizten Versuchsaufbaus	61		
		7.4.1	Messungen im passiv gekühlten Versuchsaufbau	63		
			Messungen mit 143 W Gesamtleistung	64		
			Messungen mit 118 W Gesamtleistung und Vergleich mit 143 W			
			Gesamtleistung	69		
		7.4.2	Temperaturmessungen mit Kühlsystem	73		
			Messungen mit aktiver Luftkühlung	73		
			Messungen mit Luftkühlung und integriertem Diffusor	76		
			Vermessung des Wärmestroms am oberen Rahmen der MWPC .	79		
8	Zus	ammei	nfassung	81		
\mathbf{Li}	Literaturverzeichnis 8					

Akronymverzeichnis

GSI Gesellschaft für Schwerionenforschung

 ${\bf F\!AIR}\,$ Facility for Antiproton and Ion Research

CBM Compressed-Baryonic Matter-Experiment

ALICE A Large Ion Collider Experiment

CERN Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

QGP Quark Gluon Plasma

 $\mathbf{MVD}\,$ Micro-Vertex Detektor

STS Silicon Tracking System

 ${\bf MWPC}\,$ Multi Wire Proportional Chamber

UrQMD Ultra relativistic Quantum Molecule Dynamics

 ${\bf FEB}\ {\rm Front-End-Board}$

 \mathbf{ROB} Read-Out-Board

 ${\bf CRI}\,$ Common Readout Interface

IC Integrated Circuit

SPADIC Self triggered Pulse Amplification and Digitization ASIC

LDO Low-Dropout-Spannungsregler

1 Einleitung

Der Urknall gilt als der Beginn der Zeitrechnung unseres Universums. Mit ihm expandierte sämtliche Energie aus der Singularität - und schuf damit die Gesamtheit der Existenz

Der Urknall gilt als das allererste Ereignis der Zeitrechnung unseres Universums, bei dem sämtliche Energie aus der Singularität heraus plötzlich expandierte und damit begann die Gesamtheit der Existenz aufzuspannen. Doch wie entwickelte sich das Universum anschließend und wie ist es zu dem geworden, was es heute ist? Für den Zustand, in dem sich das Universum nach den Millionstel Bruchteilen einer Sekunde befand, existiert nach Modellrechnungen der starken Wechselwirkung eine Theorie, die das Universum als eine Ansammlung frei beweglicher Quarks und Gluonen, den kleinsten Bestandteilen hadronischer Materie, beschreibt. Dieser Zustand wird als Quark-Gluon Plasma (nachfolgend auch QGP) bezeichnet. Die Untersuchung des Quark-Gluon Plasmas stellt ein großes Feld der modernen Hochenergie-Physik dar, mit dem Ziel, Materie unter extremen Temperaturen und Dichten zu verstehen.

Eines der Experimente, mit dem neue Erkenntnisse in diesem Bereich erlangt werden sollen, ist das CBM-Experiment, als Teil des an der GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung) im Aufbau befindlichen Anlage FAIR (Facility for Proton and Ion Research). Durch die Komposition von acht verschiedenen Subdetektoren soll in diesem Experiment die Untersuchung des Quark-Gluon Plasmas bei hohen baryonischen Dichten ermöglicht werden. Einen dieser Detektoren stellt ein Übergangsstrahlungsdetektor dar, welcher sich unter anderem am Institut für Kernphysik der Westfälischen Wilhelms-Universität in Entwicklung befindet. Zur Akquirierung der mit diesem Teilchendetektor gesammelten Daten wird eine spezielle, an die besonderen Anforderungen des Experiments angepasste Ausleseelektronik verwendet. Durch den Betrieb dieser Elektronik wird allerdings Wärme erzeugt, welche die Leistung und Beständigkeit des Detektors und seiner Komponenten beeinflussen kann. Die Beobachtung der

1 Einleitung

Temperaturen, die aufgrund dieser Wärme entstehen, ist essenziell, um den Betrieb des Detektors im Rahmen von dessen Betriebsgrenzen sicherzustellen.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den Untersuchungen des Wärmetransports innerhalb des Übergangsstrahlungsdetektors und des Einflusses des Wärmeeintrags auf das Verhalten seiner Komponenten. Im Folgenden wird zunächst ein Einblick in das CBM-Experiment, die mit dem Experiment verfolgten Ziele und das Quark-Gluon Plasma als zentrales Beobachtungsobjekt des Experiments gegeben. Anschließend wird das Konzept eines Übergangsstrahlungsdetektors sowie im Speziellen der Übergangstrahlungsdetektor des CBM-Experiments, dessen Aufbau und Funktionsweise vorgestellt. Das darauffolgende Kapitel behandelt die physikalischen Grundlagen für die thermodynamischen Untersuchungen des Wärmetransports des CBM-TRDs. Ein Überblick über die thermisch relevanten Spezifikationen der Ausleseelektronik, des Radiators sowie des Detektorgases des CBM-TRDs wird, zusammen mit theoretischen Abschätzungen zu deren Verhalten unter Wärmeeintrag, im nächsten Kapitel präsentiert. Der Versuchsaufbau, mit dem die Messungen dieser Arbeit durchgeführt wurden, wird im folgenden Kapitel dargestellt. Im Anschluss werden die Messungen sowie die Analyse und Auswertung der gesammelten Daten veranschaulicht. Zuletzt findet eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse und ein Ausblick über die auf dieser Arbeit aufbauenden Folgemessungen statt.

2 Das CBM-Experiment

Seit 2017 befindet sich auf dem Gelände der Gesellschaft für Schwerionenforschung Darmstadt (GSI) das neue Beschleunigerzentrum *Facility for Antiproton and Ion Research* (FAIR) im Bau. Dieses soll den bisherigen Forschungskomplex um den Ringbeschleuniger SIS100 sowie mehrere Speicherringe und neue physikalische Experimente erweitern (siehe Abbildung 2.1).



Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der geplanten FAIR Einrichtung. Eingezeichnet sind die bereits existierenden Einrichtungen der GSI (linke Bildhälfte) sowie der für FAIR geplante Ringbeschleuniger SIS100, die Speicherringe und Experimente, sowie im Speziellen das CBM-Experiment [GSI23a]. Eines dieser Experimente ist das *Compressed-Baryonic Matter*-Experiment (CBM). Hierbei handelt es sich um ein fixed-target Experiment, bei dem Schwerionen- und Protonen-Kollisionen von Au + Au und C + C mit Energien von bis zu 11 AGeV untersucht werden. Die Ziele der Messung dieser Kollisionen sind die Erforschung des Phasendiagramms hadronischer Materie (siehe Abbildung 2.2) bei hoher Barionendichte und niedrigen Temperaturen, im Vergleich zu anderen Teilchenbeschleunigerexperimenten, wie beispielsweise dem ALICE-Experiment (A Large Ion Collider Experiment) am CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire). Ein Kernpunkt hierbei stellt die Untersuchung des Übergangs hadronischer Materie zum Quark-Gluon Plasma (QGP), wie es beispielsweise Sekundenbruchteile nach der Entstehung des Universums oder nach heutigem Kenntnisstand in Neutronensternen existierte, dar [Par22].



Abbildung 2.2: Phasendiagramm hadronischer Materie. Das CBM-Experiment soll, im Vergleich zu anderen bestehenden Teilchenbeschleunigerexperimenten, wie beispielsweise dem ALICE-Experiment am CERN, das Quark-Gluon Plasma bei hohen Barionendichten und niedrigen Temperaturen untersuchen [GSI23b].

Das Quark-Gluon Plasma ist ein Zustand, in welchem sich die Bestandteile hadronischer Materie, die Quarks und Gluonen, welche unter Normalbedingungen aufgrund des *Confinement* nur in gebundenen Zuständen existieren, nun quasi frei bewegen können und so die Zuordnung zu bestimmten Teilchen nicht mehr möglich ist. Ein Quark-Gluon Plasma kann durch Kollision hochenergetischer Ionen, die zuvor durch einen Teilchenbeschleuniger beschleunigt wurden, erzeugt werden. Die Temperatur des QGP nimmt nach dessen Erzeugung aufgrund seiner Expansion rapide ab, wodurch ein hadronischer Ausfrierprozess einsetzt, durch welchen sich die quasi freien Quarks und Gluonen wieder zu gebundenen Zuständen zusammenfügen. Die Kollisionsprodukte umfassen hierbei sowohl Baryonen als auch Mesonen und (Di-)Leptonen. Da der Zustand des QGP extrem kurzlebig ist, kann dieser nur über den Nachweis der so entstehenden neuen Teilchen untersucht werden [CBM18].

Um die verschiedenen Kollisionsprodukte nachweisen zu können, ist das CBM-Experiment aus mehreren Detektorsystemen aufgebaut. Diese umfassen einen *Micro-Vertex Detektor* (MVD), ein *Silicon Tracking System* (STS), einen *Ring Imaging Cherenkov Detektor* (RICH), ein *Muon Chamber System* (MUCH), einen Übergangsstrahlungsdetektor (*Transition Radiation Detector*, TRD), ein *Time-Of-Flight System* (TOF), ein elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL), sowie einen *Projectile Spectator Detektor* (PSD). Als Referenzdetektor ist zudem die Integration des bereits an der GSI eingesetzten HADES-Detektors in das Experiment vorgesehen. Die Anordnung aller Detektorsysteme sowie des HADES-Experiments ist in Abbildung 2.3 dargestellt.



Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Anordnung der Detektorsysteme des CBM-Experiments sowie des HADES-Detektors [CBM23].

Da in dieser Arbeit die Verhaltensweise des CBM-TRDs unter verschiedenen thermodynamischen Bedingungen analysiert wird, soll im folgenden Kapitel auf die Funktionsweise eines TRDs sowie den speziellen Aufbau des CBM-TRDs eingegangen werden.

3 Der Übergangsstrahlungsdetektor

Übergangsstrahlungsdetektoren (Transition-Radiation-Detectors, TRDs) nutzen die namensgebende Übergangsstrahlung, um geladene Teilchen nachweisen zu können. Übergangsstrahlung entsteht, wenn geladene Teilchen aufeinanderfolgende Materialschichten unterschiedlicher Permittivität durchqueren. Bei der Annäherung an die folgende Schicht wird in dieser eine Spiegelladung induziert, welche zusammen mit der Ladung des Teilchens einen zusammengesetzten Dipol bildet. Da sich der Ladungsteil des Dipols, der vom geladenen Teilchen stammt, nicht statisch an einem Ort befindet, sondern sich mit dem Teilchen bewegt, handelt es sich hierbei um einen Dipol mit einem zeitlich veränderlichen elektrischen Feld. Beim Übergang des Teilchens durch die Grenzschicht zwischen den beiden Materialien findet eine teilweise Annihilation der Ladung des Teilchens mit der Spiegelladung statt, wodurch das zusammengesetzte Feld des Dipols kollabiert und in Form von Photonen als Übergangsstrahlung abgestrahlt wird [KK05]. Die Energie der abgestrahlten Photonen

$$W = \frac{Z^2 \cdot \alpha}{3} \cdot \gamma \cdot \omega_p, \tag{3.1}$$

mit Z der Ordnungszahl des durchquerten Mediums und $\alpha = 1/137$ der Kopplungskonstante der elektroschwachen Wechselwirkung ist darüber hinaus von der Plasmafrequenz $\omega_{\rm p}$ des Mediums und vom Lorentz-Faktor γ abhängig. Die Plasmafrequenz ist hierbei die Frequenz der kollektiven Schwingungen aller Elektronen des durchquerten Mediums

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e \cdot e^2}{\epsilon_0 \cdot m_e}} \tag{3.2}$$

mit n_e der Elektronendichte, e der Elementarladung, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{C}{Vm}$ der elektrischen Feldkonstante und m_e = 9,109 · 10⁻³¹ kg der Elektronenmasse [Kol16]. Der Lorentz-Faktor γ ist gegeben durch

$$\gamma = \frac{E_{kin}}{m_0} \tag{3.3}$$

und stellt das Verhältnis der kinetischen Energie eines Teilchens E_{kin} zu dessen Ruhemasse m_0 dar. Darüber hinaus wird über

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}\tag{3.4}$$

eine Beziehung zwischen der Geschwindigkeit eines Teilchens und der Lichtgeschwindigkeit hergestellt.

Übergangsstrahlung ist in Flugrichtung des ursprünglichen Teilchens gerichtet und weist ,im Falle von an vielen Grenzschichten erzeugter Übergangsstrahlung, ein Maximum in deren Intensität bei Energien von 10-20 keV auf. Im hoch-relativistischen Fall ($\beta \approx 1$) ist die Produktion von Übergangsstrahlung durch Elektronen der durch Pionen bevorzugt, da Elektronen durch ihre im Vergleich zu Pionen relativ geringe Ruhemasse einen etwa 300-fach größeren Gamma-Faktor aufweisen. Da Pionen in reinen Flugzeitmessungen bei gleichem Impuls Elektronen sehr ähneln, liefern TRDs somit die Möglichkeit, zwischen diesen Teilchen zu unterscheiden. Um die Photonenausbeute der Ubergangsstrahlung zu erhöhen, werden Materialien mit vielen Übergangsschichten verwendet, die auch als Radiatoren bezeichnet werden. Der Einsatz mehrerer Grenzschichten erhöht allerdings ebenfalls die Wahrscheinlichkeit, dass ein im Radiator erzeugtes Photon vom Radiatormaterial absorbiert wird. Für Röntgenstrahlung zeichnet sich hierbei der Photoeffekt verantwortlich. Da im Bereich von 10-20 keV der Absorptionskoeffizient des Photoeffekts proportional zu $\mathbb{Z}^{3,5}$ ist, wobei Z die Ordnungszahl des verwendeten Materials ist, werden als Radiatoren vorzugsweise Materialien mit niedriger Ordnungszahl verwendet, wie zum Beispiel Schäume, Fasern oder Folien aus Polyethylen [Kol16].

3.1 Der CBM-TRD

Der TRD des CBM-Experiments dient zur Unterscheidung von Pionen und Elektronen bei Impulsen p > $1, \frac{\text{GeV}}{\text{c}}$ mit einem Pionen-Unterdrückungsfaktor von $\frac{1}{\epsilon_{\pi}} = 20$ bei einer Elektronen-Effizienz von $\epsilon_{\text{e}} = 90\%$. Dies bedeutet, dass mindestens 90% der Signale, die vom Detektor ermittelt werden, korrekt Elektronen zugeordnet werden, sofern es sich bei dem Teilchen, welches dieses Signal erzeugt hat, tatsächlich um ein



Abbildung 3.1: Querschnitt einer CBM-TRD MWPC. Längenangaben in Millimeter [CBM18].

Elektron handelt. Der Pionen-Unterdrückungsfaktor stellt wiederum die Inverse der Pionen-Effizienz dar [KB09].

Der TRD ist modular aufgebaut und besteht aus insgesamt 216 TRD-Modulen, die im Experiment in vier hintereinanderliegenden Detektorlagen mit je 54 Modulen angeordnet sind. Ein TRD-Modul besteht aus einer Vieldrahtproportionalkammer (Multi Wire Proportional Chamber, MWPC), einem Radiator sowie aus der Front-End-Elektronik.

Die MWPCs eines Moduls sind aus einem Eintrittsfenster, einem Gasvolumen sowie einem rückseitigen Backpanel aufgebaut (siehe Abbidlung 3.1). Das Eintrittsfenster der MWPC stellt eine 25 μ m Kapton-Folie dar, welche auf einen Fiberglas-Rahmen gespannt und mit diesem verklebt ist. Ein Carbon-Gitter vor der Kapton-Folie dient zu deren weiterer Stabilisierung. Auf ihrer Innenseite ist die Kapton-Folie mit einer 50 nm dicken Aluminiumschicht bedampft. Die Kapton-Folie dient sowohl als Eintrittsfenster für die Übergangsstrahlung und Gasabdichtung für den vorderen Bereich der MWPC als auch als Driftkathode. Hinter der Kapton-Folie befindet sich das Gasvolumen der MWPC mit einer Dicke von 12 mm. Als Detektorgas wird eine Mischung aus Xenon und CO₂ mit einem Volumenverhältnis von 85/15 bzw. einem Masseverhältnis von 94/6 verwendet, welches extern gemischt und mit 15 $\frac{1}{h}$ durch die MWPCs einer Detektorlage geströmt wird [CBM18][ABBFK21]. Xenon eignet sich hierbei als Zählgas, da es sowohl einen hohen Absorptionsquerschnitt für TR-Photonen besitzt als auch als Edelgas eine abgeschlossene Schalenstruktur aufweist und somit reaktionsträge für die Rekombination mit Elektronen ist.



Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des Gasvolumens mit Drift- und Verstärkungsregion [CBM18].

Die Aufgabe des $CO_{2}s$ mit seinen vergleichsweise vielen niedrigen Anregungsenergien liegt als sogenanntes Quenching-Gas wiederum darin, Photonen zu stoppen, die innerhalb des Detektors erzeugt werden und somit nicht zum Spektrum der TR-Photonen gehören. Photonen dieser Art können bei der möglichen Rekombination von Elektronen, die bei der Ionisation des Xenons entstanden sind, mit Gasunreinheiten, wie etwa O_2 entstehen. Wird CO_2 angeregt, gibt es seine Ionisierungsenergie darüber hinaus nicht über radiative Prozesse wieder ab, sodass keine weiteren Photonen entstehen.

Das Gasvolumen ist in einen Driftbereich und einen Verstärkungsbereich aufgeteilt (siehe Abbildung 3.2). Der Driftbereich besitzt eine Dicke von 5 mm und befindet sich unmittelbar hinter der Kapton-Folie. Dessen Einsatz erhöht sowohl die Wahrscheinlichkeit der Absorption von TR-Photonen als auch die Pionen-Effizienz. Die Driftregion wird hierbei bewusst klein gehalten, um sowohl die Signalerfassungszeit klein zu halten als auch potenziellen Raumladungseffekten vorzubeugen. Hinter der Driftregion bilden weitere 7 mm des Gasvolumens sowie zwei Drahtebenen den Verstärkungsbereich. Die erste dieser Drahtebenen aus Kupfer-Beryllium-Drähten ist in einem Abstand von 5 mm zum Eintrittsfenster direkt hinter der Driftregion aufgespannt. Die zweite Drahtebene aus goldbeschichteten Wolfram-Drähten ist mit Hilfe eines Drahtleistensystems aus *Vetronite* 3,5 mm hinter der ersten Drahtebene angebracht. In einem Abstand von weiteren 3 mm zur zweiten Drahtebene befindet sich das Backpanel der MWPC. Dieses besteht aus der segmentierten Kathode der Hochspannung (Padplane) sowie einer Honeycomb-Carbon-Struktur aus einer Nomex Wabenstruktur und CFK Laminat. Die Padplane stellt zum einen die Kathode und zum anderen den rückwärtigen Gasabschluss des Kammervolumens dar. Sie besteht aus einer Leiterplatine (Printed Circuit Board, PCB) aus FR4 Trägermaterial und ist in rechteckige Segmente (Pads) unterteilt. Die Honeycomb-Carbon-Struktur dient zusammen mit dem Aluminiumrahmen als mechanische Stabilisierung der gesamten MWPC und besitzt mehrere Kabeldurchführungen zu den Steckanschlüssen der Padplane. Eine schematische Darstellung im Querschnitt des Aufbaus der gesamten MWPC des CBM-TRDs ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

Übergangsstrahlung, die das Eintrittsfenster eines Moduls passiert und im Inneren der MWPC auf ein Xenon-Atom des Detektorgases trifft, kann dieses ionisieren. An die Kapton-Folie ist ein negatives Potential einer Hochspannung angelegt, welches zwischen der Folie und den Kathodendrähten ein elektrisches Feld aufspannt, das als Driftfeld bezeichnet wird. Dieses Feld führt bei einer Ionisation des Detektorgases in diesem Bereich zu einer Separation und Diffusion der Ionen und Elektronen, wodurch die Elektronen in den Bereich der Anodendrähte und die Ionen zur Kapton-Folie beschleunigt werden. An die Anodendrähte ist wiederum das positive Potential einer weiteren Hochspannung angelegt, welches zwischen diesen und jeweils der Padplane und den Kathodendrähten im Verstärkungsbereich ein zweiseitig symmetrisches elektrisches Feld erzeugt. Elektronen, die in diesen Verstärkungsbereich gelangen oder in diesem erzeugt werden (auch Primärelektronen genannt), können bei ausreichender Energie weitere Ionisationen im Detektorgas auslösen. Dieser Prozess setzt sich durch die hierdurch entstehenden Sekundärelektronen fort, welche sich in die gleiche Richtung wie die Primärelektronen bewegen. Da das elektrische Feld im Bereich der Anodendrähte am größten ist, werden die Elektronen in diesem Bereich am stärksten beschleunigt, sodass die Rate der erzeugten Sekundärelektronen ein Maximum erreicht. An den Anodendrähten entstehen somit entlang der Ionisationsachse kaskadenartige Ladungslawinen aus Primärund Sekundärelektronen, die sich auf die Anodendrähte zubewegt. Die Ladungsverstärkung, die durch den gesamten Elektronenschauer der Sekundärelektronen hervorgerufen wird, wird als Gasverstärkung des Detektorgases bezeichnet. Für Drahtkammern, wie die MWPC des CBM-TRDs liegt dieser Faktor typischerweise im Intervall $10^3 - 10^6$ [Kol16]. Die derzeitige Konzeption sieht voraus, den CBM-TRD bei einem Gasverstärkungsfaktor von 2000 zu betreiben [CBM18].

Die TRD-Module sind innerhalb einer Detektorlage an einer tragenden Struktur aus KANYA Aluminiumprofilen montiert. Ein Teilabschnitt dieser tragenden Struktur ist



Abbildung 3.3: Links: Teilabschnitt der tragenden Struktur des CBM-TRDs mit eingehängtem TRD-Modul [CBM18]. Mitte und Rechts: Einhängemechanismus zur Verbindung eines TRD-Moduls mit der tragenden Struktur [Wah20].

in Abbildung 3.3 links dargestellt. Die Module lassen sich mit Hilfe eines Einhängemechanismus (Abbildung 3.3 Mitte und rechts) an der tragenden Struktur befestigen, wodurch eine individuelle Montage und Wartung jedes Moduls unabhängig von anderen Modulen möglich ist.

Die Radiatoren, die für den CBM-TRD verwendet werden, bestehen aus einer Box aus Rohacell HF71 Platten mit einer Wanddicke von 8 mm. Innerhalb dieser Box befindet sich das Radiatormaterial, das aus mehreren aufeinandergestapelten Polyethyl-Schaumfolien (im Folgenden: PE-Folien) mit einer Dicke von jeweils 2 mm besteht. Um dem gesamten Radiator eine höhere Stabilität zu geben, ist dieser zudem mit Hilfe eines Gitters auf Polymerfasern umspannt. Je nach Modultyp besitzen die Radiatoren eine Größe von 57x57 cm² bzw. 99x99 cm² bei einer Tiefe von je 30 cm [CBM18]. Ein Prototyp eines solchen Radiators ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

Die Montage eines Radiators sieht vor, diesen unmittelbar vor dem Eintrittsfenster einer MWPC zu befestigen. Dies kann beispielsweise realisiert werden, indem der Radiator an der MWPC mit Hilfe von Klammern zwischen der Vorderseite des Radiators und der Rückseite der MWPC befestigt wird [CBM18].



Abbildung 3.4: Prototyp eines Typ-H PE-Folien Radiators [CBM18]

3.1.1 Modultypen des CBM-TRDs

Für den CBM-TRD werden vier verschiedene Modultypen verwendet, die jeweils in unterschiedlichen Bereichen einer TRD Lage zum Einsatz kommen. Die Modultypen unterscheiden sich, neben ihrer Größe, im Wesentlichen in der Dimensionierung der Kathodenpads der jeweils für diesen Modultyp eingesetzten MWPCs. Die örtliche Verteilung der Hitraten nimmt in einem Fixed-Target Experiment exponentiell mit zunehmendem radialen Abstand von der Strahlachse ab [Ber14]. Die Größe der Pads eines Modultyps ist hierbei an die zu erwartende Hitrate an dessen Einsatzbereich in einer TRD-Lage sowie an die *Pad-Response-Function* angepasst. Die zu erwartenden Hitraten wurden auf Basis von UrQMD-Software (Ultra relativistic Quantum Molecule Dynamics) Simulationen ermittelt [CBM18]. In Tabelle 3.1 sind neben den Abmessungen der einzelnen Pads auch die Anzahl der Pads eines Moduls aufgeführt.

Abb. 3.5 zeigt, dass sich die vier verschiedenen Modultypen mit Hilfe von MWPCs zweier unterschiedlicher Größen realisieren lassen. Die beiden kleineren Modultypen 1 und 3 haben jeweils eine äußere Abmessung von 57 x 57 cm² und sind für die Verwendung

Modul-Typ	# Spalten	# Zeilen	# Pads	Höhe (cm)	Breite (cm)	Fläche (cm^2)
1	80	32	2560	1,75	$0,\!68$	1,18
2	80	8	640	6,75	$0,\!68$	4,56
5	144	24	3456	4,00	$0,\!67$	2,67
7	144	8	1152	$12,\!00$	$0,\!67$	8,00

Tabelle 3.1: Maße, Fläche und Anzahl der Pads nach Modul-Typen. [CBM18]



Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der vier verschiedenen Modultypen des CBM-TRDs. [CBM18].

						ľ		
_	٦	3	3	3	3			
/	/	/	3	3	3	3	7	7
7	5	3	3	3	3	5	7	
		1	1	1	1			
5	5	1			1	5	5	
		1	1	1	1			
7	5	3	3	3	3	5	7	
7	7	3	3	3	3	7	7	
	,	3	3	3	3	/	/	

Abbildung 3.6: Anordnung der Modul-Typen in einer TRD-Lage. Die Module der Typen 1 und 3 befinden sich im inneren Bereich einer Lage, während die Module des Typs 5 und 7 an den äußeren Bereichen montiert sind. [CBM18].

im inneren Teil einer Detektorlage vorgesehen. In den äußeren Bereichen einer TRD-Lage werden hingegen die Module der Typen 5 und 7 mit einer Größe von 99 x 99 cm² eingesetzt. Abb. 3.6 zeigt die Bestückung einer Detektorlage mit den unterschiedlichen Modultypen. Jede Detektorlage besteht hierbei aus insgesamt 54 TRD-Modulen. Dabei sind jeweils 10 Module der Typen 5 und 7 an den äußeren Seiten einer Lage und 34 Module der Typen 1 und 3 im inneren Bereich angebracht (siehe Abbildung 3.6).

3.1.2 Front-End Elektronik und Datenauslesekette des CBM-TRD

Die Auslese der Pads erfolgt bei den Modulen des CBM-TRDs durch SPADICs (Self triggered Pulse Amplification and Digitization ASICs). Ein einzelner SPADIC besitzt 32 analoge Auslesekanäle und ermöglicht somit die Auslese einer Pad-Untergruppe mit 2 Reihen á 16 Pads. Um sämtliche Pads einer MWPC auslesen zu können, sind mehrere SPADICs auf sogenannten Front-End-Boards (FEBs) integriert. Wie die Padplane, bestehen diese ebenfalls aus dem Platinenmaterial FR4. Da die Padplanes der verschiedenen Modultypen des CBM-TRDs eine voneinander abweichende Padmenge und -dichte aufweisen, sind die Module mit einer unterschiedlichen Kombination und Anzahl an FEB-Typen bestückt. Hierbei sind drei verschiedene FEB-Typen vorgesehen, die je nach Anzahl der auf ihnen verbauten SPADICs mit FEB_10s (10 SPADICs), FEB_4n (4 SPADICs) oder FEB_5n (5 SPADICs) bezeichnet werden. Die jeweiligen Typen unterscheiden sich darüber hinaus in der Größe ihrer Leiterplatinen (FEE-PCB, Front-End Electronics Printed Circuit Board) voneinander. Somit weisen die FEB-Typen eine unterschiedliche Dichte an SPADICs auf. Eine Übersicht über die verschiedenen FEB-Typen ist in Abbildung 3.7 dargestellt.

feb_10s feb_4n feb_5n

Abbildung 3.7: Die FEB-Typen des CBM-TRDs: FEB_10s (links), FEB_4n (Mitte), FEB_5n (rechts). [CBM18]

Die bisherige Montage der SPADICs und FEBs erfolgt flach oberhalb des Backpanels der MWPCs. Die elektrische Verbindung eines SPADICs zur Padplane wird mit Hilfe von Flachbandkabeln realisiert, die durch die Aussparungen der Honeycomb-Carbon-Struktur zu den Steckanschlüssen der Padplane geführt werden. Ein einzelner Kanal besitzt insgesamt vier Komponenten, die jeweils zur Verstärkung, Pulsformung, Digitalisierung und Kategorisierung der ausgelesenen Ladungssignale nach der Art ihrer Erzeugung dienen. Für eine genaue Beschreibung des Ausleseverfahrens des SPADICs siehe [CBM18]. Die Signale, die durch die interne Logik der SPADICs als das tatsächliche Auftreten eines Teilchens klassifiziert werden, werden zu Datenpaketen gebündelt über einen E-Link an Read-Out-Boards (ROB3s) weitergeleitet. Diese dienen dazu, die Daten der FEBs zu bündeln, zur weiteren Verarbeitung in optische Signale umzuwandeln und an die externen Common Readout Interfaces (CRIs) weiterzuleiten. In Abbildung 3.8 ist die Auslesekette der Front-End Elektronik schematisch dargestellt.



Abbildung 3.8: Auslesekette der Front-End Elektronik. [CBM18]

Die Bestückung der verschiedenen Modultypen mit FEBs ist an deren Kanaldichte angepasst und in Abb. 3.5 sowie in Tabelle 3.2 zu sehen [CBM18]. Hierin sind ebenfalls Angaben zur Menge der jeweils verwendeten ROB3s pro Modul aufgeführt.

Entsprechend der Anzahl der FEBs pro Modul, der auf den FEB-Typen verbauten Menge an SPADICs sowie der Menge an ROBs pro Modultyp resultiert dies für die Modultypen 1 bis 7 in 80/20/108/36 SPADICs und 4/1/6/2 ROB3s je Modul.

Modul-Typ	1	3	5	7
FEB-Typ	10s	10s	04n 05n	04n 05n
ASICs/Modul	80	20	108	36
ROB3s/Modul	4	1	6	2
Aktiver Bereich (m^2)	$0,\!2916$	$0,\!2916$	0,9216	0,9216

Tabelle 3.2: Verteilung der FEBs und ROBs auf die verschiedenen Modul-Typen sowie

 deren aktiver Bereich. [CBM18]

4 Grundlagen des thermischen Wärmetransports

Wärme stellt eine Energieform dar, die bei thermodynamischen Prozessen innerhalb eines Stoffes zwischen Bereichen unterschiedlicher Energiedichte oder durch den Kontakt zweier Stoffe mit unterschiedlichen Temperaturen ausgetauscht wird. Der Energiefluss wird hierbei durch den Wärmestrom \dot{Q} charakterisiert, der die ausgetauschte Wärme pro Zeiteinheit beschreibt. Prozesse, bei denen sich ein Wärmestrom ausbildet, werden unter dem Phänomen des Wärmetransports aufgefasst. Ein Wärmetransport ist nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik mit der Änderung der inneren Energie ΔI eines Stoffes verbunden.

$$\Delta I = \Delta Q + \Delta W \tag{4.1}$$

Eine weitere Möglichkeit zur Änderung der inneren Energie stellt nach diesem Hauptsatz die Verrichtung von Arbeit ΔW an einem oder durch ein thermodynamisches System dar.

Darüber hinaus ist ein Wärmetransport nach dem zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik immer von einem Wärmedepot zu einer Wärmesenke hin gerichtet. Im Wesentlichen lässt sich zwischen drei Formen des Wärmetransports unterscheiden: Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung [Tip15]. Diese Formen sowie einige mit ihnen verbundene physikalische Größen sollen in diesem Kapitel kurz erläutert werden.

4.1 Wärmeleitung

Bei der Wärmeleitung (auch Konduktion genannt) wird Wärme innerhalb eines Stoffes zwischen benachbarten, schwingenden Atomen übertragen. In Festkörpern sind für die Wärmeleitung maßgeblich durch Wärmeeintrag angeregte Gitterschwingungen (Phononen) verantwortlich. Ein Maß für die innere Energie in den Freiheitsgraden eines Ensembles an Teilchen und somit ebenfalls für dessen mittlere Beweglichkeit stellt die Temperatur dar. In den Bereichen eines Stoffs mit hoher Temperatur sind aus diesem Grund bereits viele Phononen angeregt. Schwingende Atome in Festkörpern können aufgrund ihrer Gitterbindung ihre benachbarten Atome ebenfalls zur Schwingung anregen. Somit findet eine schrittweise Anregung weiterer Phononen statt. Der Wärmestrom innerhalb eines Stoffes ist dabei umso größer, je geordneter die Atome in der Gitterstruktur vorliegen. Ein Maß für die wärmeleitenden Eigenschaften eines Stoffes stellt dessen thermische Leitfähigkeit λ dar.

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \lambda \cdot \nabla T \tag{4.2}$$

Es handelt sich hierbei um eine stoffspezifische Größe, die eine Proportionalitätskonstante zwischen dem Wärmestrom $\dot{\mathbf{Q}}$ durch eine bestimmte Fläche A des Stoffes und des Temperaturgradienten ∇T innerhalb des Stoffes darstellt. Je höher die thermische Leitfähigkeit eines Stoffes ist, desto besser wird eine bestimmte Wärmemenge durch diesen Stoff transportiert. Eine hohe thermische Leitfähigkeit tritt beispielsweise bei Metallen auf, die relativ zu amorphen Stoffen, wie Holz oder Glas, eine hohe Gitterordnung und Packungsdichte aufweisen, sodass zwischen benachbarten Atomen eine geringe mittlere freie Weglänge besteht. In Metallen sind zudem die freien Elektronen des Stoffes an der Wärmeleitung beteiligt, die die freie Energie zusätzlich durch Stoßprozesse an weitere Elektronen transportieren können. Aus diesem Grund besitzen die meisten Metalle, im Vergleich zu Nichtmetallen, eine höhere thermische Leitfähigkeit und werden deshalb auch als Wärmeleiter bezeichnet.

Da Atome in Festkörpern einen festen Gitterplatz besitzen, stellt die Wärmeleitung keinen Wärmetransport durch einen Materiestrom dar. Eine Wärmeleitung kann außerdem an Grenzschichten zwischen benachbarten Stoffen auftreten, da hier ebenfalls eine Wechselwirkung zwischen den Atomen beider Stoffe besteht. In Gasen ist die Wärmeleitung hingegen weniger stark ausgeprägt. Dies liegt an der deutlich geringeren Teilchenzahl im Vergleich zu Festkörpern, wodurch insgesamt weniger Energie innerhalb eines Gases transportiert werden kann. Auch bei der Erhöhung des Drucks und somit auch der Teilchendichte eines Gases kann die thermische Leitfähigkeit nicht erhöht werden, da dessen mittlere freie Weglänge zwischen den Atomen und Molekülen proportional zur Dichte abnimmt. Somit steigt auch die Anzahl der Teilchenstöße pro Zeiteinheit nicht proportional zur Dichte eines Gases an, wodurch insgesamt nicht mehr Energie zwischen den Atomen und Molekülen des Gases ausgetauscht wird. Erst zu geringen Gasdichten hin nimmt die Abhängigkeit der thermischen Leitfähigkeit eines Gases wieder zu, da mit geringerer Teilchenanzahl auch die Fähigkeit, Energie zwischen Teilchen zu übertragen, abnimmt[Tip15][Sut21].

4.2 Konvektion

Wärmetransport in Form eines Materiestroms wird als Konvektion bezeichnet. Konvektion tritt überwiegend in flüssigen oder gasförmigen Stoffen auf. In diesen sind Atome, anders als in Festkörpern, nicht an festen Gitterplätzen gebunden. Sie können sich somit über ihre Schwingungs-Freiheitsgrade hinaus durch das Medium bewegen und besitzen im Gegensatz zu den Atomen in Festkörpern eine größere freie Weglänge. Bei Konvektion kann zwischen freier und erzwungener Konvektion unterschieden werden. Freie Konvektion tritt allein durch eine Temperaturdifferenz zwischen verschiedenen Bereichen eines Stoffes auf. Durch den Kontakt mit einem anderen Medium nehmen die mit diesem Medium in Kontakt stehenden Atome beziehungsweise Moleküle Wärme vom Kontaktmedium auf oder geben sie an dieses ab. In gasförmigen oder flüssigen Stoffen führt dies dazu, dass sich diese Grenzschichten bei Aufnahme von Wärme ausdehnen, wodurch sich deren Dichte senkt und diese im Medium nach oben steigen, während sich gleichzeitig kältere Schichten aufgrund der vergleichsweise größeren Dichte an die ursprüngliche Position der Grenzschicht absenken Sut21. Beim Kontakt mit einem kälteren Medium wird dem Stoff hingegen so lange Wärme entzogen, bis beide Stoffe in thermischem Gleichgewicht stehen. Auf diese Weise nimmt die Dichte von immer mehr Schichten des wärmeren Stoffes zu, wodurch sich diese nach und nach absenken. In beiden Fällen tritt ein Volumenstrom auf, bei dem die intrinsische Wärme von Atomen und Molekülen innerhalb des Mediums durch dieses hindurch transportiert wird.

Bei der erzwungenen Konvektion wird der Volumenstrom durch einen künstlich erzeugten äußeren Druck auf das flüssige oder gasförmige Medium erzeugt. In der Praxis wird eine erzwungene Konvektion etwa mit Hilfe von Lüfteranlagen oder Turbinen realisiert [Tip15].

4.3 Wärmestrahlung

Wärmestrahlung wird in jedem Körper durch die Bewegung von geladenen Teilchen bzw. deren elektrischen Feldern erzeugt. Bewegte elektrische Felder senden als direkte Folge der Maxwell Gleichungen Strahlung in Form von Photonen aus. Je größer diese Bewegung, umso höher ist die Intensität der emittierten Strahlung. Somit steigt die abgestrahlte Leistung mit der Temperatur eines Körpers an. Dieser Sachverhalt wird durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben.

$$P = \epsilon(T) \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \tag{4.3}$$

Hierbei ist P die abgestrahlte Leistung, $\epsilon(T)$ der stoff-, oberflächen- und temperaturabhängige Emissionsgrad, $\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ die Stefan-Boltzmann-Konstante, Adie Oberfläche des strahlenden Mediums und T dessen Temperatur. Der Emissionsgrad kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 0 einen perfekt reflektierenden Spiegel und 1 einen idealen schwarzen Körper darstellt.

Die Wellenlänge der emittierten Strahlung liegt für Temperaturen unterhalb von 600 °C innerhalb des Infrarotbereichs und ist somit nicht mit dem bloßen Auge sichtbar [Tip15]. Gleichermaßen nimmt ein Körper die Wärmestrahlung aus seiner Umgebung, die durch andere Körper erzeugt wurde, auf. Hierbei kann auch die Strahlung kälterer Objekte absorbiert werden. Da der Körper in diesem Fall jedoch eine höhere Temperatur als der kältere Körper besitzt, strahlt er im Vergleich mehr Energie ab, als er selbst aufnimmt. Somit ist seine Nettostrahlungsleistung in diesem Fall größer als Null [Bin14].

4.4 Spezifische Wärmekapazität

Wie bereits eingangs in diesem Kapitel erwähnt, ist die Aufnahme oder Abgabe von Wärme nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik mit der Änderung der inneren Energie verbunden. Eine solche Änderung resultiert ebenfalls in einem Temperaturanstieg oder -abfall. Die Wärmemenge Q, die einem Stoff der Masse m = 1 kg zu- oder abgeführt werden muss, um dessen Temperatur um 1 K zu ändern wird als spezifische Wärmekapazität c bezeichnet.

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}.\tag{4.4}$$

Hierbei ist ΔT die Temperaturänderung in Kelvin, die durch die Aufnahme oder Abgabe der Wärmemenge Q hervorgerufen wird. Ein Stoff mit einer großen spezifischen Wärmekapazität bildet beispielsweise nach Wärmeaufnahme aus einem thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung heraus einen geringeren Wärmestrom als ein Stoff mit kleiner spezifischer Wärmekapazität, dem die gleiche Wärmemenge zugeführt wurde. Der Grund hierfür liegt im geringeren Temperaturunterschied des ersten Stoffes zu seiner Umgebung, der sich nach der Wärmeaufnahme einstellt. Stoffe mit einer großen spezifischen Wärmekapazität werden als thermische Isolatoren bezeichnet, während kleine spezifische Wärmekapazitäten ein Kennzeichen für thermische Leiter darstellen.

4.5 Wärmeleistung eines Volumenstroms

Die pro Sekunde abgeführte Wärme, die von einem konvektiven Volumenstrom transportiert wird, der durch eine Öffnung der Fläche A strömt, lässt sich aus der Formel der spezifischen Wärmekapazität 4.4 ableiten. Die Wärmeleistung \dot{Q} ist hierbei als die pro Zeit t transportierte Wärmemenge Q definiert.

$$\dot{Q} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}.\tag{4.5}$$

Nach 4.4 gilt

$$\dot{Q} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T}{\Delta t}.$$
(4.6)

Mit

$$m = \rho \cdot V, \ \dot{V} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \text{ und } \dot{V} = A \cdot \omega$$
 (4.7)

ergibt sich

$$\dot{Q} = A \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T \cdot \omega. \tag{4.8}$$

Hierbei ist ρ die Dichte und ω die Strömungsgeschwindigkeit des konvektiven Mediums [Tip15].

4.6 Thermische Ausdehnung und Ausdehnungskoeffizient

Ein weiterer Effekt, der durch die Aufnahme von Wärme auftritt, stellt die thermische Ausdehnung von Stoffen dar. Wie in Abschnitt 4.1 erläutert, wird durch die wärmebedingte Erhöhung der inneren Energie eines Stoffes eine Eigenschwingung dessen Atome



Abbildung 4.1: Lennard-Jones Potential (mittlerer Graph) als Überlagerung der anziehenden Van-der-Waals-Kräfte (unterer Graph) und der abstoßenden Kräfte aufgrund des Pauli-Prinzips (oberer Graph) zwischen zwei Atomen [Mit09].

und Moleküle um ihre Ruhelage angeregt. Die Ursache der thermischen Ausdehnung eines Stoffes lässt sich mit Hilfe des Lennard-Jones-Potentials (Abbildung 4.1) ableiten, welches die Bindungsenergie zwischen benachbarten Atomen in Abhängigkeit des Abstandes der Atome zueinander beschreibt.

Anhand dessen Potentialkurve lässt sich erkennen, dass die potenzielle Energie zweier Atome sowohl bei deren gegenseitiger Annäherung als auch Entfernung ansteigt. Dies ist auf das gleichzeitige Wirken von anziehenden Van-der-Waals-Kräften zwischen zwei Atomen und deren Abstoßung aufgrund des Pauli-Prinzips zurückzuführen. Durch die Erhöhung der potenziellen Energie stellt sich eine rücktreibende Kraft ein, die der Schwingungsrichtung der Atome entgegengesetzt ist. Da der abstoßende Anteil des Lennard-Jones-Potentials zu kleineren Abständen hin jedoch steiler ansteigt als der anziehende Teil, nimmt die resultierende Auslenkung der Atome gegeneinander mit zunehmender Schwingungsdauer immer weiter zu. Die Anregung der Eigenschwingungen der Atome und Moleküle eines Stoffes durch einen Wärmeeintrag hat somit eine langfristige Ausdehnung des Stoffes zur Folge. Eine Abweichung von diesem Verhalten stellen Stoffe dar, die eine Dichteanomalie aufweisen. Diese dehnen sich sowohl oberals auch unterhalb einer bestimmten Temperatur aus, statt einen monoton mit ihrer Temperatur fallenden Volumen- und Dichteverlauf aufzuweisen [Erj21].

Für Festkörper und Flüssigkeiten, die von der Dichteanomalie ausgenommen sind, ist deren thermische Ausdehnung annähernd proportional zu einer bestimmten Temperaturänderung ΔT . Diese Proportionalität ist durch den jeweiligen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Stoffes α gegeben.

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T}.\tag{4.9}$$

Dabei ist l_0 die ursprüngliche Länge des Stoffes vor der Temperaturänderung und Δl die jeweilige Längenänderung. Da die Längenänderung in Festkörpern und Flüssigkeiten isotrop ist, lässt sich der Ausdehnungskoeffizient auf das Volumen von Stoffen in diesen Aggregatzuständen erweitern.

$$\alpha = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta T}.\tag{4.10}$$

Die Ausdehnung idealer Gase kann aus deren Zustandsgleichung bei konstanter Teilchenzahl abgeleitet werden.

$$\frac{p \cdot V}{T} = const. \tag{4.11}$$

Hierbei ist p der Druck, V das Volumen und T die Temperatur des idealen Gases [Tip15]. Somit gilt bei einer der Änderung des Zustands von { p_1, V_1, T_1 } nach { p_2, V_2, T_2 }

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \Rightarrow V_2 = \frac{p_1 \cdot T_2 \cdot V_1}{p_2 \cdot T_1}.$$
(4.12)

5 Thermisches Verhalten der Komponenten des CBM-TRDs unter Wärmeeintrag

Um den Wärmetransport innerhalb des CBM-TRDs untersuchen zu können, soll zunächst ein Überblick über die Leistungsaufnahme der Ausleseelektronik des CBM-TRDs gegeben werden. Hierbei werden die Daten der aktuell verwendeten Komponenten präsentiert.

Die Komponenten der Ausleseelektronik stellen die SPADICs bzw. FEBs sowie die ROB3s dar, die bereits im vorherigen Kapitel 3 erläutert wurden. Ein einzelner SPADIC besitzt eine Leistungsaufnahme von 0,84 W. Die Leistungsaufnahme eines ROB3 beträgt 6,4 W. Die Leistung der verschiedenen FEB-Typen ist jeweils vollständig durch die Gesamtleistung ihrer SPADICs gegeben. Die interne Gesamtleistung eines Moduls ergibt sich aus den Leistungsanteilen aller auf ihnen integrierten FEBs sowie ROB3s. Die vorgesehene Spannungsversorgung der Ausleseelektronik des CBM-TRDs erfolgt über *power bus bars.* Diese stellen eine Versorgungsspannung von 12 V bereit. Mit Hilfe von DC-DC-Konvertern und Low-Dropout-Spannungsregler (LDOs) wird die Versorgungsspannung auf die internen Betriebsspannungen der SPADICs und ROB3s von 1.8 V (SPADICs) und 1.5 V bzw. 2.5 V (ROB3s) heruntergeregelt. Bei diesem Prozess ist ein Leistungsverlust von etwa 30% zu erwarten, welcher ebenfalls unmittelbar in Abwärme umgesetzt wird. Dieser Leistungsverlust ist für die Untersuchung des Wärmetransports der Gesamtleistung eines Moduls hinzuzufügen. In Tabelle 5.1 und 5.2 ist die Teilleistungsaufnahme aller FEBs und ROBs je Modultyp sowie die zusammengenommene Leistungsaufnahme der Modultypen inklusive des Leistungsverlustes von 30 % an den FEAST-DC-DC Konvertern aufgeführt.

Komponente	Typische Leistungs-	Maximale Leistungs-
	aufnahme [W]	aufnahme [W]
SPADIC	0,84	0,95
ROB3	6,4	6,4

Tabelle 5.1: Typische und maximale Leistungsaufnahme der SPADICs und ROB3s. Die maximale Leistungsaufnahme entspricht dem technisch möglichen Maximum, wird allerdings im normalen Betrieb nicht erreicht [KaeRo22][Kae22].

Komponente	Typisc	he Leistungsau	ufnahme [W]	
Modultyp	1	3	5	7
FEBs	96	24	130	43
ROB3s	25	6	38	13
Modul gesamt	121	30	168	56

Tabelle 5.2: Typische Leistungsaufnahme aller FEBs und ROB3s pro Modultyp [KaeRo22][Kae22].

Bei den ASICS der FEBs und ROBs handelt es sich um Integrierte Schaltkreise (Integrated Circuits, ICs). Die Leistungsaufnahme von ICs nimmt im Allgemeinen mit einer höheren Auslastung des ICs zu, da in diesem Fall die Rate der elektronischen Datensignale, die den IC passieren, steigt. Analog zum Verhalten von Elektronen in elektrischen Stromkreisen wird hierdurch die Leistungsaufnahme des ICs erhöht. Eine Abhängigkeit der Leistungsaufnahme der ASICs des CBM-TRDs von der Menge der zu verarbeitenden Hitraten konnte in Labormessungen jedoch nicht festgestellt werden [KaeRo22]. Die Leistungsaufnahme und -abgabe der FEBs und ROB3s bleibt somit unabhängig von den Hitraten konstant.

5.1 Wärmetransport in einem TRD-Modul

Da die aufgenommene Leistung allein die elektrischen Schaltungen der Ausleseelektronik betreibt, wird diese Leistung zu 100 % in Wärme umgesetzt. Aufgrund des in Kapitel 4 dargestellten zweiten Hauptsatz der Thermodynamik geht diese Wärme bis zum Erreichen des thermischen Gleichgewichtszustands, ausgehend von der Quelle ihrer Entstehung, in die umliegenden kälteren Komponenten eines TRD-Moduls über. Im Fall des CBM-TRDs stellen die ASICs der FEBs und ROBs die Hauptwärmequellen eines Moduls dar. Beim Wärmetransport innerhalb eines Moduls treten alle der drei bereits diskutierten Formen der Wärmeübertragung auf: Ein Teil der Wärme wird konvektiv vom Luftvolumen zwischen dem Backpanel und dem Radiator (im Folgenden "strömendes Luftvolumen") der folgenden Detektorlage aufgenommen. Wiederum wird ein Teil dieser Wärme durch Wärmeleitung zu den weiteren Komponenten des CBM-TRDs transportiert. Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz 4.3 strahlen die ASICs der Ausleseelektronik zudem in Abhängigkeit von ihrer Oberflächentemperatur eine bestimmte radiative Leistung ab. Da die ASICs flach auf den jeweiligen PCBs der FEBs montiert (siehe Abbildung 5.1) und in Richtung der tragenden Struktur sowie der Radiatoren der folgenden Detektorlage ausgerichtet sind, ist auch die Wärmestrahlung der ASICs in diese Richtung orientiert. Bei Kontakt mit einer Oberfläche kann diese Strahlung somit etwa einen Radiator aufheizen.



Abbildung 5.1: Befestigung der FEBs auf dem Backpanel[CBM18].

Unter der Annahme, dass sich die Gesamtleistung eines TRD-Moduls gleichmäßig über dessen aktiven Bereich verteilt, besitzt der Modul-Typ 1 bei einer Gesamtleistungsaufnahme von 121 W mit 415 $\frac{W}{m^2}$ die größte Leistungsdichte aller CBM-TRD-Modul-Typen. Diese Leistung wird unmittelbar an die Komponenten des Moduls abgegeben. Eine übermäßige Aufheizung einiger Komponenten des CBM-TRDs kann allerdings den physischen Zustand in dem Maße verändern, dass sowohl deren eigene als auch die gesamte Funktionalität des CBM-TRDs beeinträchtigt wird. Im folgenden Abschnitt wird im Speziellen der Wärmetransport der erzeugten Wärme zu den Komponenten des Radiators und in das Detektorgas sowie potenzielle Auswirkung auf die Funktionalität dieser Komponenten diskutiert. Da der Wärmeeintrag in diese Komponenten beim Modul-Typ 1 am größten ist, wird sich die folgende Analyse des Wärmetransports an den Kenngrößen dieses Modultyps orientieren.

5.2 Verhalten der Komponenten des CBM-TRDs unter Wärmeeintrag

5.2.1 Gasverstärkung des Detektorgases

Die Konzeption des CBM-TRDs sieht eine Hochspannung an den Anodendrähten zwischen 1700 und 2200 V vor. Diese Hochspannung wird so gewählt, dass die von einer Ladungslawine deponierte Ladung proportional zur Ladung eines Primärelektrons ist. Gasdetektoren, die in diesem sogenannten Proportionalitätsbereich arbeiten, weisen Gasverstärkungen zwischen $10^3 - 10^5$ auf [Kol16]. Die Gasverstärkung des CBM-TRDs beträgt etwa 2000 [CBM18]. Ist die Feldstärke des elektrischen Feldes im Inneren der Kammer groß genug, sodass jedes erzeugte Elektron nach dessen Beschleunigung beim Auftreffen auf ein Atom des Detektorgases eine Ionisation hervorrufen kann, ist die Häufigkeit von Ionisationsprozessen (und somit auch die Gasverstärkung) nur durch die mittlere freie Weglänge der Elektronen innerhalb des Gases limitiert. Da die mittlere freie Weglänge umgekehrt proportional zum Druck eines Gases ist, sinkt ihr Wert bei dessen Wärmeaufnahme ab. Die Häufigkeit von Ionisationen nimmt jedoch zu kleineren mittleren freien Weglängen zu, sodass der Wert der Gasverstärkung mit der Erhöhung der Temperatur des Gases ansteigt. Eine zu starke Erhöhung der Gasverstärkung führt jedoch aufgrund des vermehrten Auftretens von Ladungsträgern im Bereich der Anodendrähte sowohl zu einer raumladungsbedingten Abschirmung des elektrischen Feldes als auch in Extremfällen zur Gasentladung. In Abbildung 5.2 sind die Abhängigkeit der Gasverstärkung von Ar/CO₂ von der Gastemperatur bei unterschiedlicher Spannung an den Anodendrähten dargestellt. Die Daten basieren auf einer GARFIELD Simulation. Für Xe/CO₂ wird von einer ähnlichen Abhängigkeit ausgegangen.

Die Erhöhung des Gasverstärkungsfaktors bei der Erhöhung der Temperatur um einen bestimmten Betrag ist hierbei aufgrund der logarithmischen Abhängigkeit von der Ausgangs- und Endtemperatur des Aufheizvorgangs abhängig. Für eine stabile Datennahme des CBM-TRDs sollte eine Abweichung der Gasverstärkung von maximal $\pm 10\%$ nicht überschritten werden. Dies entspricht im Falle des Gasverstärkungsfaktor des CBM-TRDs einem Faktor von 200 [CBM18].

Ein Wärmeeintrag in das Detektorgas, mit der Ausleseelektronik als Quelle der erzeugten Wärme, kann ausschließlich aufgrund des thermischen Kontaktes des Detektorgases zu den umliegenden Komponenten durch Wärmeleitung erfolgen. Eine Wärmeleitung



Abbildung 5.2: Mit GARFIELD simulierte Gasverstärkung von Ar/CO_2 in Abhängigkeit von der Gastemperatur bei verschiedenen Spannungen an den Anodendrähten für den CBM-TRD [CBM18].

kann somit entweder über die Padplane oder den Aluminiumrahmen erfolgen. Für Ersteres ist die Anwesenheit eines Wärmestroms durch das gesamte Backpanel erforderlich. Eine qualitative Abschätzung eines solchen möglichen Wärmestroms lässt sich anhand der Wärmeleitfähigkeiten der Komponenten des CBM-TRDs in Tabelle 5.3 durchführen.

Die aufgeführten Werte für die Komponenten des Backpanels weisen mit $\lambda \leq 0.3 \frac{W}{m \cdot K}$ weitestgehend isolierende Eigenschaften auf. Ein maßgeblicher Wärmeeintrag über das Backpanel wird somit nicht erwartet.

Eine weitere mögliche Quelle des Wärmeeintrags in das Detektorgas stellt der Aluminiumrahmen des Detektors dar. Dieser steht sowohl mit den Komponenten des Backpanels als auch mit dem Detektorgas in thermischem Kontakt. Mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 220 \frac{W}{m \cdot K}$ ist ein Wärmeeintrag über diese Komponente des CBM-TRDs deutlich wahrscheinlicher als durch das Backpanel. Da der Aluminium-Rahmen ebenfalls in thermischem Kontakt mit dem Backpanel steht, ist prinzipiell eine Wärmeleitung, bei der die vom Backpanel aufgenommene Wärme über den Aluminium-Rahmen

Komponente	Material	$\lambda[\frac{W}{m \cdot K}]$
Kapton		0,2
Aluminium-Rahmen	Aluminium	220
PCBs & Padplane	FR4 Glasfaser	$0,\!3$
Honeycomb		
	Nomex Faserpapier	< 0,1
	CFK Laminat	2,5
Radiator-Box	Rohacell HF71	0,03
PE-Folien	Polyethylen	0,33
Xenon		0.00569
$\rm CO_2$		0,016
Raumluft		0,026

Tabelle5.3:WärmeleitfähigkeitderKomponentendesCBM-TRD[Du22][Web23][Sch23a][Mok23][Du16][Swi23][Go23].

an das Detektorgas abgegeben wird, möglich. Die vergleichsweise kleinen Wärmeleitfähigkeiten der Komponenten des Backpanels lassen dieses Verhalten jedoch nicht erwarten. Es besteht somit nur die Möglichkeit der Wärmeaufnahme des Aluminium-Rahmens durch den konvektive Luftstrom der Raumluft, welcher zuvor durch Vorbeiströmen an der Ausleseelektronik Wärme aufgenommen hat. Da der Aluminium-Rahmen allerdings mit 333 cm² im Vergleich zum gesamten Backpanel mit 2916 cm² nur eine kleine thermische Kontaktfläche mit diesem Luftstrom besitzt, ist der zu erwartende Wärmeeintrag durch die konvektive Raumluft vernachlässigbar klein. Die Aufheizung des Detektorgases aufgrund von Wärmeleitung durch den Aluminium-Rahmen wird aus diesem Grund als vernachlässigbar klein abgeschätzt.

5.2.2 Wärmeausdehnung des Radiators

Ein Aufheizen der Komponenten des Radiators kann sowohl die mechanische Stabilität der Rohacell-Box des Radiators beeinträchtigen als auch die physikalischen Eigenschaften der produzierten Übergangsstrahlung beeinflussen. Der hierfür relevante Aspekt stellt die in Abschnitt 4.6 diskutierte Ausdehnung von Materialien bei Wärmeeintrag dar. Zum Zeitpunkt der Auslegung dieser Masterarbeit befand sich über die in Abschnitt 3.1 erläuterte Montage der Radiatoren hinaus deren Integration in die tragende Struktur der vorgehenden Detektorlage des CBM-TRDs im Gespräch. Unabhängig von der jeweiligen Anbringung ist sowohl zwischen zwei benachbarten Radiatoren als auch zwischen Radiator und der tragenden Struktur nur ein begrenzter Abstand vorhanden.
Die Ausdehnung der Radiatoren ist aus diesem Grund auf ein unkritisches Maß zu reduzieren, um deren mechanische Stabilität und Funktionalität im Betrieb des CBM-TRDs sicherzustellen.

Ein Aufheizen der Rohacell-Box ist möglich, wenn die abgegebene Wärmestrahlung der Ausleseelektronik auf die Rohacell-Box des Radiators trifft. Dies kann ebenso über den konvektiven Luftstrom der Raumluft erfolgen, da die Wand der Rohacell-Box mit 3249 cm² im Gegensatz zum Aluminiumrahmen eine deutlich größere Kontaktfläche für die Wärmeübertragung bietet[CBM18].

Ein Grund dafür warum ein Typ H Radiator mit PE-Folien gegenüber anderen Radiatortypen gewählt wurde liegt darin, dass die Parameter der Foliendicke und des Folienabstands dieses Radiatortyps den durch numerische Methoden optimalen Parametern am besten entsprechen, bei denen sich das Emissionsspektrum der TR-Photonen möglichst kongruent mit dem Spektrum der vom Detektorgas absorbierten Photonen deckt. Für eine detaillierte Betrachtung des TR-Spektrums in Abhängigkeit der Foliendicke und des Folienabstands siehe [Kol16]. Eine Abweichung von diesen Parametern, etwa aufgrund von Wärmeausdehnung, hat demnach eine Verschiebung des TR-Spektrums und eine verminderte Effizienz des CBM-TRDs zur Folge. Eine wärmebedingte Ausdehnung der PE-Folien, welche eine Änderung der Foliendicke nach sich zieht, ist ebenfalls möglich, falls eine hierfür signifikante Wärmemenge durch die Rohacell-Box zu den Folien geleitet wird.

Mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0.03 \frac{W}{m \cdot K}$ stellt Rohacell HF71 allerdings ebenfalls einen thermischen Isolator dar. Es wird aus diesem Grund vermutet, dass die Aufheizung der PE-Folien aufgrund von Wärmeleitung durch die Rohacell-Box vernachlässigbar ist. Weiterhin kann die Wärmeausdehnung von Rohacell HF71 mit Hilfe von dessen thermischen Ausdehnungskoeffizienten abgeschätzt werden. Dieser beträgt $\alpha_{\rm HF71} = 3.5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\rm K}$ [Swi23]. Bis zu einer Temperaturänderung der Rohacell HF71-Platte der Rohacell-Box eines TRD-Moduls des Typs 1 oder 3 von 10 K, beträgt deren thermische Ausdehnung nach 4.9 maximal 0,2 mm. Rohacell HF71 weist somit eine hohe Formstabilität unter Wärmeeintrag auf.

5.2.3 Wärmetransport aus dem System des CBM-TRDs

Der Wärmetransport aus dem System des CBM-TRDs heraus erfolgt ausschließlich in Form von Konvektion durch Raumluft, die an der Ausleseelektronik vorbeiströmt, sowie dem Detektorgas im Inneren der MWPCs. Durch den Abtransport dieser Wärme setzt ein Kühleffekt ein, der dem Aufheizen der Komponenten des CBM-TRDs entgegenwirkt. In beiden Fällen ist, bei Kenntnis über die spezifischen Wärmekapazitäten der strömenden Stoffe, deren mittlerer Dichte während des konvektiven Aufheizvorgangs sowie der hierbei auftretenden Temperaturänderung, nach Formel 4.8 eine Abschätzung der Strömungsgeschwindigkeit möglich.

6 Versuchsaufbau

Die im vorhergehenden Kapitel getroffenen Abschätzungen stellen die Erwartung des Wärmetransports unter realen thermodynamischen Bedingungen eines Moduls des CBM-TRDs dar. Eine genaue Abschätzung lässt sich durch eine Modellierung und Simulation des thermodynamischen Verhaltens des gesamten Systems oder durch Überwachung der Temperaturen an den in Abschnitt 5.2 diskutierten, potenziell kritischen Komponenten eines Moduls durchführen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Masterarbeit ein Versuchsaufbau konzipiert, mit dem die Untersuchung des Wärmetransports innerhalb eines Moduls des Typs 1 ermöglicht werden soll.

Für die Messungen wird eine modifizierte MWPC des Modultyps 1 verwendet, welche in der tragenden Struktur des CBM-TRDs montiert wird. Die Wärmeleistung der Ausleseelektronik dieser Kammer wird mit Hilfe von Heizwiderständen und Kupferplatinen über die gesamte Fläche des Backpanels der MWPC verteilt. Darüber hinaus ist eine in ihrem Abstand zum Backpanel variable Rohacell HF71-Platte (im Folgenden ,Radiatorplatte') zur Simulation einer Radiator-Box einer folgenden Detektorlage in die tragende Struktur integriert. Für die Temperaturmessungen sind an verschiedenen Komponenten der MWPC sowie der Radiatorplatte Temperatursensoren platziert. Ziel der Messungen ist zunächst die Kenntnis über die Temperatur des Detektorgases, der in den Versuchsaufbau ein- und ausströmenden Raumluft, der Betriebstemperatur eines SPADIC ASICs sowie der Oberflächentemperatur der Radiatorplatte zu erlangen. Anhand der ermittelten Temperaturen sollen die in Kapitel 5 durchgeführten Abschätzungen durch reale Messwerte überprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

Im folgenden Kapitel wird auf die konkreten Bestandteile des Versuchsaufbaus eingegangen und deren Positionierung und Funktion erläutert.

6.1 MWPC und Detektorgas

Im Vergleich zu den in Kapitel 3 beschriebenen MWPCs des CBM-TRDs besitzt die im Rahmen dieser Masterarbeit verwendete MWPC keine Anoden- und Kathodendrähte. Darüber hinaus ist das Gasvolumen dieser MWPC während der Messungen mit Luft gefüllt. Auf die Verwendung eines Xe/CO₂-Gasgemischs wird aufgrund dessen relativ geringer spezifischer Wärmekapazität sowie des kleinen Volumenstroms verzichtet. Diese Entscheidung ist wie folgt begründet: Da das Volumen des Detektorgases trotz dessen Volumenstroms konstant bleibt, kann hierbei die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen c_V verwendet werden. Für die Wärmekapazität eines Gasgemisches gilt

$$c_{Gemisch} = \sum_{i} w_i \cdot c_i \tag{6.1}$$

mit w_i dem Massenanteil der i-ten Komponente des Gasgemischs an deren Gesamtmasse und c_i der Wärmekapazität der i-ten Komponente.

Die Massenanteile von Xenon und CO₂ betragen $w_{Xenon} = 0.9446$ und $w_{CO_2} = 0.0554$. Deren spezifische Wärmekapazitäten bei konstantem Volumen sind gegeben durch $c_{V,Xenon} = 0.093 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ und $c_{V,CO_2} = 0.618 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ [WKW16]. Die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen von Xe/CO₂ beträgt somit nach Formel 6.1 $c_{V,Xe/CO_2} = 0.122 \frac{kJ}{kg \cdot K}$.

Mit Hilfe der Wärmekapazität des Gasgemischs kann dessen Wärmestrom bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 15 $\frac{1}{h}$ ermittelt werden [ABBFK21]. Da aufgrund des im Kapitel 5 diskutierten Wärmetransports in das Detektorgas nur mit dessen geringer Aufheizung zu rechnen ist, wird hierbei für die Temperaturdifferenz ein maximaler Wert von $\Delta T = 10$ K angenommen. Somit beträgt der Wärmestrom nach 4.7 und 4.8 $2,69 \cdot 10^{-5}$ W. Die Wärmemenge, die pro Sekunde durch den Fluss des Detektorgases aus einem TRD-Modul transportiert wird, entspricht dem $2.2 \cdot 10^{-7}$ -fachen der Wärmeleistung der Ausleseelektronik und kann aus diesem Grund vernachlässigt werden. Da durch die Verwendung eines nicht-strömenden Luftvolumens im Inneren der Kammer ebenfalls kein Wärmetransport aus einem TRD-Modul heraus zu erwarten ist, wird für die Messungen eine mit Luft gefüllte MWPC verwendet.



Abbildung 6.1: Heizsystem auf dem Backpanel der MWPC, bestehend aus 26 Drahtwiderständen auf 11 kupferbeschichteten PCBs sowie einem Single-FEB.

6.2 Simulation des Wärmeeintrags

Im finalen Aufbau des CBM-TRDs findet die Datenauslese und somit auch der Wärmeeintrag durch die FEBs und ROBs statt, die auf den Backpanels der MWPCs innerhalb der Detektorlagen montiert sind. Um über die feste Leistungsaufnahme der FEBs und ROBs hinaus auch die Untersuchung des thermischen Verhaltens der MWPC über einen breiteren Leistungsbereich untersuchen zu können, wird der Wärmeeintrag in den Versuchsaufbau mit Hilfe von Drahtwiderständen auf kupferbeschichteten PCBs in Kombination mit einem Single-FEB (im Folgenden auch "SPADIC") simuliert. Der Versuchsaufbau ermöglicht es durch Variation der an den Heizwiderständen anliegenden Spannung eine Wärmeleistung von bis zu 143 W bereitzustellen und diese auf der gesamten Fläche des Backpanels der MWPC zu verteilen. In Abbildung 6.1 ist die Anordnung der Komponenten des Heizsystems dargestellt.

Bei den eingesetzten Widerständen handelt es sich um 26 ARC HS25 18R F Drahtwiderstände aus eloxiertem Aluminium mit je 18Ω , die auf 11 kupferbeschichteten PCBs (im Folgenden ,Heizplatinen') verteilt sind. Auf den Heizplatinen sind jeweils zwei, respektive drei Drahtwiderstände angebracht. Die Spannungsversorgung der Drahtwiderstände wird von zwei HAMEG HM7044 sowie einem Voltcraft PS-2403D Labornetzteil (siehe Abbildungen 6.2 und 6.3) bereitgestellt. Diese beträgt für die beiden Messreihen



Abbildung 6.2: HAMEG HM7044 Labornetzteile mit angeschlossenen Stromverbindungskabeln zu den Heizplatinen.



Abbildung 6.3: Voltcraft PS-2403D Labornetzteil [KIT23].

9 V, respektive 10 V. Die Drahtwiderstände sind hierbei jeweils in Parallelschaltungen mit den Zuleitungen der Stromversorgung verbunden, sodass gemäß den Kirchhoffschen Gesetzen die gleiche Spannung an jedem der Widerstände anliegt [Tip15]. Aus den gegebenen Widerständen und den Betriebsspannungen ergibt sich eine Leistung von 4,5 W bzw. 5.5 W pro Widerstand. Die Gesamtleistung des Heizsystems beträgt somit zwischen 118 und 143 W.

Ein Single-FEB ist auf dem Backpanel in den Versuchsaufbau integriert, um die Oberflächentemperatur eines SPADIC-ASICs unter realen thermischen Bedingungen zu ermitteln. Um den Single-FEB nicht durch Kontakt oder übermäßigen Wärmeeintrag aus den umliegenden Komponenten des Heizsystems zu beschädigen, ist um diesen herum



Abbildung 6.4: Schematische Darstellung einer der verwendeten Heizplatinen.

ein Sicherheitsbereich von 4 cm eingerichtet. Eine Beschädigung des SPADICs kann eintreten, wenn dessen Temperatur die für integrierte Schaltkreise typische kritische Temperaturen von 90 °C für einen bestimmten Zeitraum überschreitet [Vas06]. Um die geringere Wärmedichte in der Umgebung des SPADICs zu kompensieren sind auf den Heizplatinen, die unmittelbar mit dem Single-FEB benachbart sind, drei statt zwei Drahtwiderstände platziert.

Bei den Heizplatinen handelt es sich um jeweils $14 \ge 10 \text{ cm}^2$ große PCBs aus FR4-Platinenmaterial, welche auf der vom Backpanel abgewandten Seite mit Kupfer beschichtet sind. Abbildung 6.4 zeigt eine schematische Darstellung der verwendeten Heizplatinen.

Die Kupferbeschichtung der Heizplatinen dient hierbei der besseren Verteilung der von den Drahtwiderständen ausgehenden Wärme über die gesamte Fläche des Backpanels. Die Aussparungen ermöglichen die Montage mit Hilfe von Abstandshaltern auf dem Backpanel der MWPC. Gleichzeitig wird ein elektrische Kontakt der Heizplatinen mit dem Backpanel vermieden. Da die Heizplatinen aus dem gleichen Material wie die späteren Platinen der FEBs und ROBs bestehen, weisen diese darüber hinaus ein vergleichbares Verhalten ihrer Wärmestrahlung in Richtung des Backpanels auf. Zur Vereinfachung werden die Heizplatinen mit der im folgenden Schaubild dargestellten Beschriftung bezeichnet.



Abbildung 6.5: Schematische Darstellung des Backpanels mit montierten Heizplatinen und Drahtwiderständen.

Auf den Heizplatinen sind die Drahtwiderstände mit Hilfe einer Mischung aus dem Zweikomponenten-Epoxidharz Araldite AW 106/HV 953 U und Aluminiumstaub mit einem Gewichtsverhältnis von 1:1,3 angebracht. Die Zugabe von Aluminiumspänen erhöht hierbei die thermische Leitfähigkeit zwischen den Drahtwiderständen und den Heizplatinen bei gleichzeitiger elektrischer Isolation (vergl. [Gla04]).

Die Stromversorgungsleitungen zwischen den Labornetzteilen und den Drahtwiderständen stellen Einzeladerleitungen aus Kupfer des Querschnitts 1.1 mm^2 und je $3 \pm 0.1 \text{ m}$ dar [TE11]. Da zwischen den Enden eines stromdurchflossen Leiters ein Spannungsabfall und somit ein Leistungsverlust an den Drahtwiderständen entsteht, wird die Ausgangsspannung an den Labornetzteilen um einen entsprechenden Wert nachgestellt, um den Spannungsabfall der Zuleitungen zu kompensieren. Aufgrund der variablen Länge der Verbindungsleitungen unterscheidet sich die eingestellte Kompensationsspannung an jedem Kanal. Die tatsächlichen Spannungen, die an den Heizwiderständen anliegen, sind in Tabelle 6.1 aufgeführt. Die Beschriftungen der Kanäle an den Labornetzteilen entsprichen denjenigen in Abbildung 6.5. Da während der Messungen dieser Arbeit der Ausgangskanal mit der Beschriftung 4 einen Defekt aufwies, wurde für die Spannungsversorgung des vierten Pads zeitweise das Voltcraft PS-2403D Labornetzteil genutzt.

Heizplatine	Spannung	Spannung	Spannung	ØU [V]
	Widerstand $\#1$ [V]	Widerstand $\#2$ [V]	Widerstand $\#3$ [V]	
1	10,000	10,003		10,001
2	10,003	$10,\!005$	10,003	10,002
3	10,002	10,002		10,002
4	$10,\!005$	10,010	$10,\!004$	10,006
5	10,000	10,000	10,002	10,001
6	10,002	$10,\!005$		10,004
7	$10,\!005$	$10,\!005$	10,006	$10,\!005$
8	$10,\!010$	$10,\!010$		10,010
9	$10,\!010$	$10,\!005$		10,008
10	$10,\!010$	$10,\!010$		$10,\!010$
11	10,010	10,008		10,009

Tabelle 6.1: Anliegende Spannungen an den Heizwiderständen der Heizplatinen in Volt, gemessen mit einem Multimeter. Die Ablesegenauigkeit beträgt 0,001 V. Die maximale Abweichung vom Mittelwert liegt mit 0,005 V bei 5 %

6.2.1 Dämmung des Versuchsaufbaus

Zwischen den benachbarten Detektoren einer TRD-Lage im CBM-Experiment ist davon auszugehen, dass sich ein thermisches Gleichgewicht einstellen wird, sodass die Komponenten der Module während des Betriebs eine konstante Gleichgewichtstemperatur anstreben. Zudem stellt sich im Inneren einer Detektorlage ein Kamineffekt ein, da die konvektive Raumluft nach Wärmeaufnahme lediglich horizontal aus der Detektorlage herausströmen kann. Im Versuchsaufbau dieser Masterarbeit wird sowohl ein thermisches Gleichgewicht, als auch ein Kamineffekt durch die Verkleidung mit weiteren Rohacell HF71-Platten realisiert. Für eine Beschreibung des Kamineffekts siehe [Sig22]. Da Rohacell aufgrund seiner geringen Wärmeleitfähigkeit einen thermischen Isolator darstellt, wird durch die Verkleidung ein thermischer Austausch des Versuchsaufbaus, welcher über das zu erwartende thermische Verhalten im CBM-Experiment hinausgeht, verhindert. Die Verkleidung erzeugt zwischen dem Backpanel und der Radiatorplatte einen Strömungskanal, sodass ein Wärmeaustausch nur durch die konvektive Raumluft stattfindet, welche in den Versuch ein- und ausströmt. Die Verkleidung des Versuchs ist in den folgenden Abbildungen 6.6 und 6.7 dargestellt.



Abbildung 6.6: Thermische Isolation des Versuchsaufbaus mit Rohacell HF71-Platten zu Simulation eines thermisches Gleichgewicht sowie eines Kamineffekts. Frontansicht.



Abbildung 6.7: Thermische Isolation des Versuchsaufbaus mit Rohacell HF71-Platten zur Simulation eines thermischen Gleichgewichts sowie eines Kamineffekts. Innenansicht. Die rückseitige Radiatorplatte wurde zu Demonstrationszwecken entfernt.

6.3 Temperaturmessung

Für die Temperaturmessung der verschiedenen Komponenten im Versuchsaufbau werden zwei verschiedene Typen von digitalen Temperatursensoren verwendet. Diese sind der Maxim Integrated MAX31726MTA+ I²C-Sensor (im Folgenden ,I²C-Sensor/-en^{\cdot}) und der DS18B20 1-Wire-Sensor (im Folgenden ,DS18B20 Sensor^{\cdot}). Beide Sensoren basieren auf dem Prinzip der Halbleitertemperatursensoren. Sensoren dieser Art bestehen in der Regel aus zwei Transistoren auf Halbleiterbasis, deren Emitter-Dioden eine temperaturabhängige Durchlassspannung aufweisen. Wird an beiden Transistoren deren Durchlassspannung bei jeweils anderen Stromstärken gemessen, lässt sich aus der Spannungsdifferenz ΔU_F die Temperatur T des Sensors durch

$$\Delta U_F = \frac{k_B \cdot T}{e} \cdot \ln \frac{I_1}{I_2} \tag{6.2}$$

ermitteln [Tex19]. Hierbei sind $k_B = 1,380649 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$ die Boltzmann-Konstante, e = 1,602·10⁻¹⁹J die Elementarladung und I₁ und I₂ die Emitter-Stromstärken an den beiden Transistoren. Die ermittelte Temperatur wird anschließend durch eine ADC-Einheit in ein digitales Signal umgewandelt und lässt sich über das jeweilige Interface des Sensors auslesen. In diesem Versuchsaufbau findet deren Auslese über das I²C- und 1-Wire Interface statt. Da diese Sensoren die essentiellen Bestandteile der Datenaufnahme in dieser Masterarbeit darstellen, soll in diesem Abschnitt deren Spezifikation und Anordnung im Versuchsaufbau erläutert werden.

6.3.1 I²C-Sensoren

Der Maxim Integrated MAX31726MTA+ I²C-Sensor ist ein digitaler Temperatursensor, der die Messung von Temperaturen im Bereich von -40 bis 105 °C bei einer Auflösung von 16 Bit (0.00390625°C) und einer Genauigkeit von \pm 0,5 °C ermöglicht [Max23]. Zur Kommunikation mit einem Mikrocontroller verwendet der Sensor das I²C-Interface. Dieses Interface stellt einen seriellen Bus mit einer Daten- (Serial Data SDA), einer Takt- (Serial Clock SCL) sowie einer Versorgungsleitung (V_{DD}) dar. Ein Vorteil dieses Interfaces besteht darin, dass bis zu 128 Geräte über einen einzigen Bus verwaltet werden können. Den Sensoren innerhalb eines I²C-Bussystems muss hierfür jeweils eine eigene spezifische Adresse zugeordnet sein, was durch die variable Beschaltung der Adresspins der Sensoren realisiert wird [Sco23]. Um eine individuelle Positionierung der Sensoren im Versuchsaufbau zu ermöglichen, wurden die Sensoren von der Elektronik-Werkstatt des Instituts für Kernphysik der WWU auf PCBs verlötet (siehe Abbildung 6.8). Diese PCBs bestehen aus dem gleichen FR4-Platinenmaterial, wie auch die Heizplatinen.



Abbildung 6.8: Verlöteter I²C-Sensor auf PCB mit Steckverbinder am oberen Ende (grün). Die Adressierung erfolgt durch die Verschaltung der Adresspins mit den Eingangspins im oberen Teil der PCB.

Die I²C-Sensoren werden im Versuchsaufbau auf der MWPC sowie auf der Radiatorplatte eingesetzt. Auf der MWPC überwachen jeweils drei dieser Sensoren die Temperatur der ein- und ausströmenden Raumluft. Diese sind am oberen und unteren Aluminiumrahmen der MWPC zur Überwachung der strömenden Raumluft mit Hilfe von Abstandshaltern befestigt. Die Abstandshalter dienen hierbei als thermische Isolation zwischen den Sensoren und dem Aluminiumrahmen. Weitere drei I²C-Sensoren sind auf dem Backpanel und dem Single-FEB zur Überwachung der Oberflächen- und Umgebungstemperaturen des SPADIC ASICs platziert. Abbildung 6.9 zeigt die Positionierung der I²C-Sensoren an den verschiedenen Positionen des Backpanels.



►I²C-Sensoren

Abbildung 6.9: I²C-Sensoren zur Messung der Temperatur der ausströmenden Raumluft am oberen Aluminiumrahmen. Drei weitere I²C-Sensoren befinden sich jeweils auf gleicher horizontaler Position am unteren Aluminiumrahmen.



Abbildung 6.10: I²C-Sensoren auf der Radiatorplatte.

Auf der Radiatorplatte wird ebenfalls deren Oberflächentemperatur an fünf Positionen gemessen, um eine räumliche Temperaturverteilung der abgegebenen Wärme in Richtung des Radiators ableiten zu können. Die Positionierung der I²C-Sensoren ist in Abbildung 6.10 dargestellt.

6.3.2 DS18B20-Sensoren

Um die Temperatur der Luft innerhalb des Gasvolumens messen zu können wird ein DS18B20-Sensor verwendet (siehe Abbildung 6.11).



Abbildung 6.11: DS18B20 Sensor. Der eigentliche Sensor befindet sich in der Spitze der Metallverkleidung. Eine Unterlegscheibe aus Messing, die ohne direkten Kontakt mit dem Sensor durch UHU+ 2-Komponenten Epoxidkleber verbunden und von diesem umschlossen ist, dient zur Fixierung des Sensors bei 9,3 mm im Inneren des Gasvolumens. Der Epoxidkleber fungiert zudem als thermischer Isolator zwischen der Unterlegscheibe und den umgebenen Materialien.

Mit diesem Sensor sind Temperaturmessungen in einem Bereich von -55 bis 125 °C mit einer Auflösung von bis zu 12 Bit (0,0625 °C) und einer Genauigkeit von \pm 0,5 °C über das 1-Wire Interface möglich. Neben einer 5 V Stromversorgung (V_{DD}) und der Verbindung zum Erdpotenzial (GND) erfolgt die Datenübertragung hierbei ähnlich wie bei den I²C-Sensoren über eine einzelne Datenleitung. Der Sensor ist innerhalb einer 50 mm langen Metallverkleidung mit einem Durchmesser von 6 mm platziert [DS23]. Probemessungen mit diesem Sensor haben gezeigt, dass ein Wärmeeintrag hauptsächlich an der Spitze dieser Verkleidung stattfindet. Ein Aufheizen des Sensors bei Kontakt mit einem warmen Medium am unteren Teil der Verkleidung konnte nicht festgestellt werden.



Abbildung 6.12: Zylindrische Öffnungen in der Honeycomb-Carbon-Struktur und der Padplane

Der Sensor wird für die Messungen durch das Backpanel der MWPC 9,3 mm in das Gasvolumen eingebracht, sodass sich der eigentliche Temperatursensor vollständig innerhalb des Volumens befindet. Hierzu wurde sowohl in die Honeycomb-Carbon-Struktur als auch in die Padplane der MWPC eine zylindrische Öffnung gefräst, in die der Sensor eingebracht wurde (siehe Abbildung 6.12). Anschließend wurde der Sensor mit Araldite AW 106 vergossen, sodass die Luftdichtigkeit der MWPC wiederhergestellt wurde (siehe Abbildung 6.13). Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von UHU+ und Araldite AW 106 von jeweils weniger als 0,25 $\frac{W}{m \cdot K}$ im Vergleich zu Aluminium mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca. 200 $\frac{W}{m\cdot K}$ findet bei der Temperaturmessung kein Wärmeeintrag über die beiden Klebstoffe auf die Metallhülse des Sensors statt [UHU23][Ar23]. Der maßgebliche Wärmeeintrag bei der Temperaturmessung erfolgt somit an der freiliegenden Frontseite der Metallhülse des Sensors, welche in das Gasvolumen hineinragt. Hierdurch wird gewährleistet, dass die vom Sensor gemessene Temperatur tatsächlich der des Gasvolumens entspricht. Eine schematische Darstellung des im Backpanel vergossenen Sensors ist in Abbildung 6.14 zu sehen. Ein weiterer DS18B20-Sensor dient zur Temperaturmessung der Raumluft und ist etwa 30 cm unterhalb des Moduls kontaktlos in den Versuchsaufbau integriert.



Abbildung 6.13: Vergießung des DS18B20 Sensors im Backpanel mit Araldite AW 106



Abbildung 6.14: Schematische Darstellung des im Backpanel vergossenen DS18B20 Sensors. Die Spitze des Sensors ragt 9,3 mm in das Gasvolumen hinein.

6.3.3 Auslese der Temperatursensoren

Die Auslese der Temperatursensoren erfolgt durch drei Arduino Uno. Hierbei handelt es sich um Mikrocontroller, welche die Kommunikation mit den Temperatursensoren über das I²C- und das 1-Wire-Interface ermöglichen. Jeweils ein Arduino übernimmt die Auslese je einer von drei Auslesegruppen von Sensoren. Die erste Auslesegruppe besteht aus den I²C-Sensoren, die auf dem Backpanel der MWPC positioniert sind, sowie den beiden DS18B20-Sensoren. Der Arduino, der für diese Auslesegruppe verwendet wird, kommuniziert hierbei parallel über das I²C- und das 1-Wire-Interface mit beiden Sensortypen, sodass sämtliche Sensoren dieser Gruppe gleichzeitig ausgelesen werden können (siehe Abbildung 6.15). Die zweite und dritte Auslesegruppe wird von den I²C-Sensoren auf dem Rahmen der MWPC und auf der Radiatorplatte gebildet.



Abbildung 6.15: Arduino Uno mit angeschlossenen I²C- (untere Pin-Reihe) und 1-Wire-Sensoren (obere Pin-Reihe). Die Verbindung mit dem Computer erfolgt über das graue USB-Kabel.

Sämtliche von den Arduinos aufgenommenen Messwerte werden an einen Computer weitergeleitet. Die Datenaufnahme erfolgt hierbei zentral durch ein Steuerungsprogramm, welches jede Sekunde die Messwerte aller Sensoren von den Arduinos zusammenfasst und in Textdateien abspeichert.



Abbildung 6.16: Technische Zeichnung der Aluminiumplatte für die Montage der Axiallüfter. Die eingezeichneten Aussparungen entsprechen den Positionen der Axiallüfter auf der Aluminiumplatte [Bon22].

6.4 Konzeption eines Kühlsystems

Zur Erhöhung der Fördermenge \dot{V} der pro Zeit durch das Volumen zwischen Backpanel und Radiator strömenden konvektiven Raumluft wurde ein Kühlsystem konzipiert, welches auf Luftkühlung basiert und in den Versuchsaufbau integriert werden kann. Dieses besteht aus je zwei ebm-papst 3412 N und Sanyo Denki San Ace 9S Axiallüftern mit einem Durchmesser von 9,2 beziehungsweise 11,9 cm, die auf einer Aluminiumplatte mit einer Dicke von 3 mm befestigt wurden. Die Axiallüfter sind für den Betrieb mit 12 V Gleichstrom ausgelegt und weisen eine Drehzahl von 1150 (ebm-papst) beziehungsweise 1500 $\frac{1}{s}$ (Sanyo Denki) auf [Sa23][Pa23]. Die Aluminiumplatte mit der Anordnung der Aussparungen für die Lüfter ist in Abbildung 6.16 dargestellt. Die Lüfter sind so montiert, dass im Betrieb die Raumluft unterhalb der Aluminiumplatte angesogen und anschließend in das Volumen zwischen Radiatorplatte und Backpanel befördert wird.

Die Aluminiumplatte ist mit Hilfe von Aluminiumprofilen 10 cm unterhalb des Einlasses der einströmenden Raumluft im Versuchsaufbau platziert.



Abbildung 6.17: Kühlsystem aus Diffusor (oben) und Lüfterplatte (Mitte). Die rückseitige Radiatorplatte ist zu Demonstrationszwecken entfernt. Im geschlossenen Versuchsaufbau beträgt der Abstand der Radiatorplatte zum Diffusor zwischen 0 und 2 cm.

Um den Luftstrom, der von den Axiallüftern erzeugt wird, im gesamten Querschnitt des Strömungskanals zu verteilen, kann darüber hinaus ein Diffusor in den Versuchsaufbau integriert (siehe Abbildung 6.17) werden. Dieser hat eine Abmessung von (HxBxT) 100x130x524 mm und besteht aus einem Gitter aus Aluminiumplatten mit einer Maschengröße von 8x8 mm². Der Diffusor befindet sich im Versuchsaufbau unmittelbar oberhalb des Einlasses der einströmenden Raumluft. In der folgenden Abbildung ist das gesamte Kühlsystem aus Lüfterplatte und Diffusor dargestellt.

7 Temperaturmessungen und Auswertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Temperaturmessungen präsentiert. Abschnitt 7.1 zeigt vorbereitende Messungen des Heizsystems mit einer Wärmebildkamera, in denen die Verteilung der vom Heizsystem produzierten Wärme auf dem Backpanel untersucht wurde. Im Anschluss werden in Abschnitt 7.3 eine Kaltmessung des ungeheizten Versuchsaufbaus sowie eine darauf aufbauende Kalibrationsmessung präsentiert. Abschnitt 7.4 umfasst alle Temperaturmessungen, die im beheizten Versuchsaufbau durchgeführt wurden. Diese beinhalten zwei Messreihen im passiv gekühlten Zustand des Versuchsaufbaus, bei Gesamtleistungen des Heizsystems von 143 und 118 W sowie drei weitere Messreihen mit dem anschließend integrierten Kühlsystem. Die Leistungen entsprechen jeweils einer Leistungsdichte von 440 $\frac{W}{m^2}$ beziehungsweise 363 $\frac{W}{m^2}$.

7.1 Infrarotmessungen

Die Aufgabe des Heizsystems ist es, die Wärmeleistung der Drahtwiderstände über die gesamte Fläche des Backpanels zu verteilen. Um die Distribution der Wärme auf dem Backpanel zu überprüfen wurde eine Satir Hotfind S80 Wärmebildkamera eingesetzt. Hierzu wurde das Heizsystem zunächst 30 Minuten lang bei einer Gesamtleistung von 143 W vorgeheizt. Die Abbildungen 7.1 und 7.2 zeigen die von der Kamera aufgenommene Infrarotstrahlung an verschiedenen Teilen des Backpanels.

Die angegebenen Temperaturskalen gelten für Materialien mit einer Emissivität von 0,9 bei einem Abstand der Kamera von 1 m zum jeweiligen Objekt. Die Einfärbung der dargestellten Materialien gibt somit nur dann deren tatsächliche Temperatur wieder, falls dieses Material ebenfalls eine Emissivität von 0.9 besitzt. In den Abbildungen 7.1 und 7.2 sind, mit der Carbonplatte des Backpanels, den kupferbeschichteten Heizplatinen, den kunststoffummantelten Stromversorgungsleitungen und den Heizwiderständen aus



Abbildung 7.1: Infrarotaufnahme der linken Hälfte des Backpanels mit der Wärmebildkamera. Dargestellt sind die verschiedenen Komponenten des Heizsystems, der Single-FEB sowie die beiden auf dem Backpanel platzierten I²C Sensoren.

Aluminium, Materialen unterschiedlicher Emissivität dargestellt. Die genaue Bestimmung der Emissivität dieser Materialien wurde nicht vorgenommen. Auch bei Kenntnis über die genauen Werte kann mit Hilfe der Kamera jeweils nur die Temperatur eines dieser Materialien gleichzeitig ermittelt werden, da sich jeweils nur die Sensitivität für eine bestimmte Emissivität einstellen lässt. Die Einstellungen der Emissivität wurden deshalb auf den Standardeinstellungen belassen. Die anhand der dargestellten Temperaturskalen ablesbaren Temperaturen entsprechen somit nicht den tatsächlichen Temperaturen. Darüber hinaus zeigte sich die Messung von Infrarotstrahlung mit der Wärmebildkamera stark winkelabhängig, sodass auch kleine Veränderungen der Neigungen der Kamera zu deutlich abweichenden Aufnahmen führten. Das bildgebende Verfahren und die Einfärbung der Materialien durch die Wärmebildkamera ermöglicht dennoch eine qualitative Abschätzung der Wärmeverteilung an den dargestellten Bereichen des Backpanels.

Abbildung 7.1 zeigt anhand der Einfärbung der Komponenten im unteren mittleren Bereich der Temperaturskala, dass die Wärme des Heizsetups an fast alle Bereiche des Backpanels abgegeben wird. Ausnahmen sind die kupferbeschichteten Heizplatinen, die



Abbildung 7.2: Infrarotaufnahme der rechten Hälfte des Backpanels mit der Wärmebildkamera. Dargestellt sind die verschiedenen Komponenten des Heizsystems, der Single-FEB sowie die beiden auf dem Backpanel platzierten I²C Sensoren. An der rechten Bildseite wurde die Kante des Aluminiumrahmens eingezeichnet.

beiden eingezeichneten I²C-Sensoren sowie die Stromversorgungsleitungen der Heizwiderstände (wenn in unmittelbarer Umgebung der Heizwiderstände). Da der Emissionsgrad von Kupfer im unoxidierten Zustand kleiner als 0,1 ist, wird von den kupferbeschichteten Heizplatinen und PCBs der I²C-Sensoren, im Vergleich zu den Drahtwiderständen aus eloxiertem Aluminium (Emissionsgrad $\epsilon = 0, 55$), wenig Infrarotstrahlung emittiert [Sch23c]. Sie erscheinen in den beiden Abbildungen somit dunkel.

Auch Aluminium weist im nicht eloxierten Zustand einen vergleichsweise niedrigen Emissionsgrad von weniger als 0,1 auf, weswegen der in Abbildung 7.2 eingezeichnete Aluminiumrahmen vergleichsweise dunkel erscheint [Sch23c]. Wie in der vorherigen Abbildung ist die Verteilung der Wärme über das Backpanel anhand dessen Farbgebung im mittleren unteren Bereich der Temperaturskala ebenfalls erkennbar. Die Messungen zeigen somit, dass das Heizsystem die abgegebene Wärme auf der gesamten Fläche des Backpanels verteilt.



Abbildung 7.3: Links: Farbliche Kodierung der Temperatursensoren. Die Sensoren sind jeweils durch rechteckige Kästen (I²C-Sensoren) bzw. durch einen schwarzen Kreis (DS18B20-Sensor) dargestellt. In der Darstellung entsprechen die Positionen der zweidimensionalen Projektion auf die Ebene des Backpanels. Die realen Positionen entsprechen weiterhin den in Kapitel 6.3 erläuterten Positionen. Rechts: Unterteilung der Sensoren in Sensorgruppen je nach Position im Versuchsaufbau. Jeder Sensor ist mit einem für dessen Auslesegruppe repräsentativen Symbol in dessen Farbkodierung gekennzeichnet.

7.2 Allgemeine Informationen zu den Temperaturmessungen

Um die visuelle Darstellung der aufgenommenen Temperaturverläufe zu verbessern, ist in den folgenden Grafiken jedem einzelnen Sensor eine farbliche Kodierung zugeteilt. Die Sensoren sind zudem in Sensorgruppen unterteilt, die jeweils einen bestimmten Markertyp besitzen (siehe Abbildung 7.3). In den Graphen, in denen eine optische Unterscheidung zwischen den Daten der verschiedenen Sensoren schwierig ist, wird für die Darstellung der Daten zusätzlich zur Farbkodierung der entsprechende Markertyp verwendet. In der folgenden Abbildung sind die farbliche Kodierung und die Gruppierung der Sensoren dargestellt.

Die Auswertung der erhobenen Daten erfolgt mit Hilfe des Root Frameworks.



Abbildung 7.4: Zeitlicher Temperaturverlauf aller Sensoren des Versuchsaufbaus.

7.3 Kaltmessung

Die Kaltmessung des Versuchsaufbaus dient als Probemessung, um bereits vor der Datennahme der Hauptmessreihen mögliche Anomalien in der Datennahme der Sensoren zu erkennen und gegebenenfalls eine Kalibration der Sensoren vorzunehmen. In den Messungen wurden alle Temperatursensoren im ungeheizten Zustand des Versuchsaufbaus über einen Zeitraum von 165 Stunden ausgelesen. Die zeitlichen Temperaturverläufe dieser Messung sind in der Abbildung 7.4 dargestellt.

Aufgrund des symmetrischen Versuchsaufbaus und der Positionierung der I²C-Sensoren auf vergleichbarer Höhe (im Fall der I²C-Sensoren auf dem Backpanel und dem Rahmen der MWPC) lässt sich erwarten, dass diese Sensoren innerhalb ihrer jeweiligen Sensorgruppen eine vergleichbare Temperatur aufweisen. Abbildung 7.5 zeigt die Temperaturverläufe der Sensoren des oberen und unteren Rahmens. Hierbei ist zu erkennen, dass die I²C-Sensoren am oberen Rahmen der MWPC um bis zu 0.5 °C voneinander abweichen. Diese Abweichung liegt zwar innerhalb der Unsicherheit der I²C-Sensoren, nach ersten Probemessungen im beheizten Zustand wurde bei diesen Sensoren allerdings eine Abweichung festgestellt, welche über diese Unsicherheit hinausgeht (für eine genaue Untersuchung dieses Phänomens siehe Abschnitt 7.4.2). Aus diesem Grund wurde eine Kalibrationsmessung der Sensoren des oberen Rahmens durchgeführt. Da sich die I²C-Sensoren am unteren Rahmen der MWPC in der gleichen Auslesegruppe, wie die I²C-Sensoren am oberen Rahmen befinden, wurden diese ebenfalls in die Kalibrationsmessung eingeschlossen. Die Kalibration umfasst Messungen mit den sechs



Abbildung 7.5: Zeitlicher Temperaturverlauf der I²C-Sensoren auf dem Rahmen der MWPC sowie des zweiten DS18B20 Sensors.

I²C-Sensoren, die zuvor auf dem oberen und unteren Rahmen der MWPC angebracht waren. Auf deren Durchführung und Ergebnisse soll im folgenden Abschnitt eingegangen werden.

7.3.1 Kalibration der Temperatursensoren

Die Sensoren wurden für die Kalibrationsmessung von ihrer Position im Versuchsaufbau entfernt und in kurzem Abstand zueinander auf einer Pappunterlage platziert. Mit einer Plastikverkleidung wurde anschließend über den Sensoren ein abgedichtetes Luftvolumen erzeugt. Anschließend wurde eine Messung der Temperatur des Luftvolumens unterhalb der Plastikverkleidung über eine Dauer von 141 Stunden durchgeführt. Die zeitlichen Temperaturverläufe der Sensoren sind in der Abbildung 7.6 dargestellt. Für jeden aufgenommenen Datenpunkt wurde der Mittelwert der gemessenen Temperaturen der sechs I²C-Sensoren sowie deren Temperaturabweichung von diesem ermittelt. Die Temperaturabweichungen vom Mittelwert wurden in einem Diagramm aufgetragen. An die Graphen, die aus den Datenpunkten der Temperaturabweichungen resultieren, wurden anschließend Geraden gefittet, die jeweils durch ein Polynom ersten Grades beschrieben werden. Die Graphen der Temperaturabweichungen der I²C-Sensoren sowie der Fitgeraden ist in den beiden Abbildungen 7.6 und 7.7 dargestellt. Aus den Parametern der Fitgeraden wurden die Anpassungen der Temperaturen aller Sensoren, die für die Kalibration nötigen sind, ermittelt und auf die Kalibrationsmessung angewendet.



Abbildung 7.6: Zeitlicher Temperaturverlauf der Kalibrationsmessung der I²C Sensoren.



Abbildung 7.7: Temperaturabweichungen vom Mittelwert aller I²C-Sensoren für jeden Datenpunkt der Kalibrationsmessung.



Abbildung 7.8: Temperaturabweichungen vom Mittelwert aller I²C-Sensoren nach Anwendung der Kalibration.

Abbildung 7.8 zeigt das Ergebnis der Kalibration. Durch die Kalibration der I²C-Sensoren konnte die Streuung der Durchschnittstemperaturen um die Mittelwerte an den jeweiligen Datenpunkten von maximal 0,25 °C vor der Kalibration auf maximal 0,04 °C nach der Kalibration gesenkt werden. Die Kalibration wurde für alle auf diese Kalibrationsmessung folgenden Temperaturmessungen verwendet.

7.3.2 Nachkalibration der Kaltmessung

Nach der Kalibrationsmessung wurde die Kalibration auf die Messdaten der Kaltmessung in Abschnitt 7.3 angewendet. Die angepassten Temperaturverläufe aller Sensoren sowie der kalibrierten Sensoren sind in den Abbildungen 7.9 und 7.10 dargestellt. Die kalibrierten Temperaturverläufe der Sensoren zeigen, dass die Sensoren des Rahmens, anders als in Abschnitt 7.3, innerhalb ihrer jeweiligen Sensorgruppen in der Kaltmessung, nun kaum noch voneinander abweichen. In den Temperaturverläufen ist jedoch trotz der Kalibration eine Abweichung der Temperaturen aller Sensoren voneinander erkennbar. Gründe hierfür können die bereits erzwungene Konvektion der Raumluft durch die Frischluftversorgung und die Heizkörper im Raum des Versuchsaufbaus und Zugluft sein. Da diese Einflüsse allerdings bei allen Messreihen vorhanden sind, findet keine weitere Kalibration der Sensoren statt. Auf weitere Abweichungen in den Temperaturverläufen wird in jeder der Messreihen jeweils explizit eingegangen. Die



Abbildung 7.9: Zeitlicher Temperaturverlauf aller Sensoren während der Kaltmessung nach Anwendung der Kalibration.



Abbildung 7.10: Zeitlicher Temperaturverlauf der I²C-Sensoren auf dem Rahmen des TRD-Moduls sowie des zweiten DS18B20 Sensors.



Abbildung 7.11: Relative Durchschnittstemperaturen der Kaltmessung auf die Temperatur der Raumluft.

Sensoren wurden anschließend an die Kalibrationsmessungen wieder an ihren jeweiligen Positionen im Versuchsaufbau platziert. Um mögliche lokale Umgebungseinflüsse als Quellen der Abweichung auszuschließen wurde der Versuchsaufbau mit zusätzlichen Rohacell-Elementen abgedichtet. Zudem wurden die Ausgangsspannungen der Netzteile sowie die an den Heizwiderständen anliegenden Spannungen erneut überprüft. Hierbei konnte jedoch keine Abweichung von den Spannungswerten, die in Tabelle 6.1 aufgeführt sind in Abschnitt 6.2, festgestellt werden.

Darüber hinaus konnten die Temperaturmessungen, welche nach der Kalibrationsmessung durchgeführt wurden, nicht unter den gleichen Umgebungsbedingungen (Raumtemperatur, rel. Luftfeuchtigkeit, etc.) durchgeführt werden. Um die Messungen dennoch untereinander vergleichen zu können, werden für jede Messung die gemessenen Temperaturen relativ zur jeweiligen Temperatur der Raumluft während der jeweiligen Messung betrachtet und anschließend deren Durchschnitt gebildet (im Folgenden als ,relative Durchschnittstemperaturen' (siehe beispielhaft Abbildung 7.11).

Die relativen Durchschnittstemperaturen aller Sensoren sind in Tabelle 7.1 aufgeführt. Die maximale Abweichung von der Temperatur der Raumluft beträgt $1,11 \pm 0,50$ K. Die durchschnittliche Abweichung aller Sensoren beträgt 0,53 K. Die Abweichung der nicht kalibrierten Sensoren befindet sich innerhalb ihrer jeweiligen Sensorgruppen im Bereich der angegebenen Unsicherheit. Deshalb wurde davon ausgegangen, dass diese

a			
Sensorposition	Relative Durchschnitt-		
	stemperatur [°C]		
Backpanel			
Mitte rechts unten	0.63 ± 0.50		
SPADIC	0.63 ± 0.50		
Mitte links oben	$0.83\pm0,\!50$		
MWPC-Rahmen oben			
Mitte	1.11 ± 0.50		
links	1.00 ± 0.50		
rechts	0.46 ± 0.50		
MPWC-Rahmen unten			
Mitte	$0.08\pm0,\!50$		
links	0.19 ± 0.50		
rechts	$0.01\pm0,\!50$		
Radiatorplatte			
oben rechts	$0.59\pm0{,}50$		
zentral	0.52 ± 0.50		
Mitte rechts	0.44 ± 0.50		
unten links	0.51 ± 0.50		
unten rechts	$0.46\pm0{,}50$		
Gasvolumen	0.51 ± 0.50		

Tabelle 7.1: Relative Durchschnittstemperaturen aller Sensoren während der Kaltmessung nach Sensorgruppen.

Sensoren innerhalb der angegebenen Unsicherheit die korrekte Temperatur gemessen haben. Aus diesem Grund fand keine weitere Kalibration der Sensoren statt.

7.4 Temperaturmessungen des beheizten Versuchsaufbaus

Sämtliche Messreihen wurden im thermischen Gleichgewichtszustand des Versuchsaufbaus durchgeführt, sodass die Messbedingungen möglichst genau die Bedingungen im Vollbetrieb des CBM-TRDs simulieren (vergleiche Abschnitt 6.2.1). Dieser stellte sich in Testmessungen unabhängig vom Abstand der Radiatorplatte etwa zwei Stunden nach Inbetriebnahme des Heizsystems ein (siehe Abbildungen 7.12 und 7.13). Der Beginn der Datennahme erfolgte für jede Messreihe erst nach dieser Aufheizdauer.



Abbildung 7.12: Temperaturverlauf während des Aufheizvorgangs des Heizsystems bei einem Abstand der Radiatorplatte vom Backpanel von 10 cm.



Abbildung 7.13: Temperaturverlauf während des Aufheizvorgangs des Heizsystems bei einem Abstand der Radiatorplatte vom Backpanel von 30 cm.

7.4.1 Messungen im passiv gekühlten Versuchsaufbau

Die beiden Messreihen zur Untersuchung des thermischen Verhaltens des TRD-Moduls im passiv gekühlten Zustand des Versuchsaufbaus umfassen jeweils sieben Messungen des zeitlichen Temperaturverlaufs aller Temperatursensoren. Der nicht vergossene DS18B20-Sensor wurde zur Messung der Temperatur der Raumluft eingesetzt. In jeder Messung wurde der Abstand zwischen der Radiatorplatte und dem Backpanel zwischen 10 und 29,5 cm variiert (siehe Abbildung 7.14).



Abbildung 7.14: Blick von oben in das strömende Luftvolumen des Versuchsaufbaus. Der Abstand der Radiatorplatte kann stufenlos zwischen 10 cm und 29,5 cm eingestellt werden.

Hierbei wurden die Abstände 10, 15, 20, 25 und 29,5 cm bei 118 W Gesamtleistung und zusätzlich die Abstände 12 und 14 cm bei 143 W Gesamtleistung vermessen. Die jeweiligen Abstände konnten auf etwa ± 1 cm genau eingestellt werden. Die erste Messung einer Messreihe wurde jeweils bei 15 cm durchgeführt. Die Abstände der folgenden Messungen wurden anschließend abwechselnd zum nächst größeren und nächst kleineren Abstand hin verändert. Somit ergibt sich beispielsweise für die Messungen bei 143 W die folgende Abfolge der Abstände: 15 cm, 20 cm, 14 cm, 25 cm, 12 cm, 29,5 cm, 10 cm. Auf diese Weise kann ausgeschlossen werden, dass die Änderung der gemessenen Temperaturen im Bereich der vermessenen Abstände abhängig davon sind, ob das Volumen zwischen dem Backpanel und der Radiatorplatte stetig vergrößert oder verkleinert wird. Dieses Verfahren wurde, soweit möglich, in allen Messreihen durchgeführt.



Abbildung 7.15: Zeitlicher Temperaturverlauf aller Sensoren des Versuchsaufbaus bei einer Gesamtleistung von 143 W und einem Abstand der Radiatorplatte von 10 cm.

Messungen mit 143 W Gesamtleistung

Für die Messungen bei einer Gesamtleistung des Heizsystems von 143W liegen die in Abschnitt 6.2 gezeigten Spannungen an den Heizwiderständen durchgeführt. Die Messdauer betrug bei jeder der Messungen mindestens 24 Stunden. Exemplarisch für diese Messungen sollen die Temperaturverläufe bei einem Abstand der Radiatorplatte von 10 cm angeführt werden (siehe Abbildungen 7.15 bis 7.18). Die Temperaturverläufe aller anderen Messungen werden extern bereitgestellt [Schn23].

Die Datennahme jeder Messung wurde bereits vor der Veränderung des Abstands der Radiatorplatte auf den jeweiligen Messabstand begonnen. In den Temperaturverläufen ist aus diesem Grund zu Beginn der Messung eine Signatur zu erkennen, die die Temperaturänderung des Systems aufgrund der Veränderung Messabstand der dargestellten Messung widerspiegelt.

Abbildung 7.19 zeigt die relativen Durchschnittstemperaturen aller Sensoren in Abhängigkeit des Abstandes der Radiatorplatte.



Abbildung 7.16: Zeitlicher Temperaturverlauf der I²C-Sensoren auf dem Backpanel sowie des vergossenen DS18B20-Sensors bei einer Gesamtleistung von 143 W und einem Abstand der Radiatorplatte von 10 cm.



Abbildung 7.17: Zeitlicher Temperaturverlauf der I²C-Sensoren auf dem Rahmen des TRD-Moduls sowie des zweiten DS18B20 Sensors bei einer Gesamtleistung von 143 W und einem Abstand der Radiatorplatte von 10 cm.



Abbildung 7.18: Zeitlicher Temperaturverlauf der I²C-Sensoren auf der Radiatorplatte bei einer Gesamtleistung von 143 W und einem Abstand der Radiatorplatte von 10 cm.



Abbildung 7.19: Relative Durchschnittstemperaturen aller Sensoren bei den Abständen der Radiatorplatte von 10, 12, 14, 15, 20, 25 und 29,5 cm. Die Gesamtleistung des Heizsystems beträgt während allen Messungen, die den Durchschnittstemperaturen zugrundeliegenden, 143 W.
Im Allgemeinen nehmen die Durchschnittstemperaturen in den Messungen zu größeren Abständen hin ab. Es wurde versucht, eine potenzielle Abhängigkeit der Durchschnittstemperaturen vom Abstand d der Radiatorplatte durch Anfitten verschiedener Funktionen zu ermitteln. Die Graphen wurden hierbei mit den Funktionen $\frac{1}{d}$, $\frac{1}{d^2}$, $\frac{1}{\log(d)}$, $\frac{1}{\ln(d)}$ und $\frac{1}{e^d}$ gefittet. Hierbei lieferte die Funktion

$$y(d) = a * \frac{1}{e^d} + b$$
 (7.1)

mit y der Durchschnittstemperatur und den Fitparametern a und b und einem maximalen χ^2 von 0,9846 das beste Ergebnis. Ausgenommen hiervon sind die Durchschnittstemperaturen der Sensoren auf der Radiatorplatte. Eine klare Abhängigkeit der Durchschnittstemperaturen vom Abstand d im erfassten Bereich konnte in den Messungen für diese Sensoren nicht ermittelt werden. Die Sensoren, die auf der Radiatorplatte im oberen und mittleren Bereich angebracht wurden, heizen sich bei allen Abständen tendenziell stärker auf, als die Sensoren im unteren Bereich. Der Abstand der Durchschnittstemperaturen ist hierbei jedoch nicht für alle Abstände konstant und weißt ebenfalls keine klare Abhängigkeit vom Abstand d auf.

Die Durchschnittstemperaturen zeigen, dass in allen Messungen die größten Temperaturerhöhungen bei dem I²C-Sensor auf dem SPADIC und dem rechts unter dem SPADIC platzierten Sensor auftreten. Dies stellt ein Anzeichen dafür dar, dass ein Großteil der produzierten Wärme innerhalb des Versuchsaufbaus verbleibt und der dominante Wärmetransport noch nicht der ausströmenden Luft zuzuordnen ist. Die durchschnittliche Temperaturerhöhung dieser Sensoren beträgt für alle Abstände $24,76 \pm 0,12$ °C. Der I²C-Sensor links oberhalb des SPADICs weicht hingegen im Durchschnitt $8,10 \text{ K} \pm$ 0,17 K von diesen beiden Sensoren ab. Die höchste absolute Durchschnittstemperatur auf der Oberfläche des SPADICs wurde zu 49.25 ± 0.5 °C bestimmt. Auffällig in den Temperaturen ist allerdings ein steigendes Verhältnis zwischen den relativen Durchschnittstemperaturen der Sensoren am oberen Rahmen und denen der Sensoren auf dem Backpanel sowie der Radiatorplatte. Das Verhältnis zwischen den Durchschnittstemperaturen der Sensoren des oberen Rahmen und zu denen des Backpanels steigt von 0.98 bei einem Abstand von $14 \,\mathrm{cm}$ linear auf 1.02 bei einem Abstand von $29.5 \,\mathrm{cm}$ an. Für das Verhältnis zwischen den Durchschnittstemperaturen der Sensoren des oberen Rahmens und der Radiatorplatte wurde ebenfalls ein linearer Anstieg von 2,89 zu 5,4zwischen dem Abstand 10 und 29,5 cm ermittelt. Dieses Verhalten stellt ein Indiz dafür dar, dass bereits im passiv gekühlten Zustand der Wärmetransport aus dem

Versuchsaufbau durch das strömende Luftvolumen mit zunehmendem Abstand der Radiatorplatte ebenfalls linear ansteigt. Für die weitere Betrachtung wird das Verhältnis zu den Sensoren des Backpanels mit

$$t*_1 = \frac{\text{Relative Durchschnittstemperatur der Sensoren am oberen Rahmen}}{\text{Relative Durchschnittstemperatur der Sensoren auf dem Backpanel}}$$
(7.2)

und das Verhältnis zu den Sensoren der Radiatorplatte mit

$$t*_{2} = \frac{\text{Relative Durchschnittstemperatur der Sensoren am oberen Rahmen}}{\text{Relative Durchschnittstemperatur der Sensoren auf der Radiatorplatte}}$$
(7.3)

bezeichnet. In den Abschnitten zu den verschiedenen Messungen wird jeweils separat auf die ermittelten Verhältnisse eingegangen.

Die durchschnittliche Temperaturerhöhung der Sensoren am oberen Rahmen der MWPC beträgt für alle Abstände $21,96 \pm 0,59$ K. Der höchste Durchschnitt der relativen Durchschnittstemperaturen der Sensoren am oberen Rahmen der MWPC tritt bei einem Abstand d = 10 cm mit $22,67 \pm 0,29$ °C auf. Nach Gleichung 4.8 lässt sich die minimale Strömungsgeschwindigkeit ermitteln, die benötigt würde, um die gesamte Wärmeleistung bei den gemessenen Temperaturen durch die strömende Luft aus dem Versuchsaufbau herauszutransportieren. Hierbei wurden jeweils die Mittelwerte der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität der Luft im Temperaturbereich verwendet, der von den absoluten Temperaturen der Raumluft und der absoluten Durchschnittstemperatur aller Sensoren am oberen Rahmen der Kammer aufgespannt wird. Mit den Mittelwerten $\rho = 1,1285 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, c_{Luft} = 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kG-K}}$ im Temperaturbereich zwischen 24, und $\dot{Q} = 143 \,\mathrm{W}$ ergibt sich für die Strömungsgeschwindigkeit ein Wert von $0.1 \pm 0.01 \,\mathrm{m}$. Die Strömungsgeschwindigkeiten aller Abstände sind in Tabelle 7.2 aufgeführt. Die Strömungsgeschwindigkeit fällt hierbei linear mit dem Abstand der Radiatorplatte ab. Darüber hinaus ist zwischen den Sensoren am oberen Rahmen der MWPC in allen Messungen eine Abweichung von bis zu 4,49 K festzustellen. Eine klare Abhängigkeit dieser Abweichung vom Abstand ist allerdings nicht erkennbar. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass die Luft innerhalb des Volumens zwischen Radiatorplatte und Backpanel in mehreren Luftsäulen unterschiedlicher Breite und Temperatur aufsteigt. Dies könnte darüber hinaus auch eine Erklärung für die Abweichung der Temperatur des I²C-Sensors oberhalb des SPADICs zu den anderen beiden I²C-Sensoren des

	Strömungsgeschwindigkeit $\left[\frac{m}{s}\right]$						
Abstand	10	12	14	15	20	25	29,5
[cm]							
	0,1 \pm	0,09 \pm	0,08 \pm	0,08 \pm	0,07 \pm	0,06 \pm	0,04 \pm
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	$0,\!01$

Tabelle 7.2: Minimale Strömungsgeschwindigkeiten, die benötigt werden, um die gesamte Wärmeleistung von 143 W bei den gemessenen Temperaturen durch die strömende Luft aus dem passiv gekühlten Versuchsaufbau herauszutransportieren bei den Abständen 10, 12, 14, 15, 20, 25 und 29,5 cm der Radiatorplatte.

Backpanels darstellen. Auf diese Hypothese wird in Abschnitt 7.4.2 erneut im Speziellen eingegangen. Die relative Durchschnittstemperatur der gesamten Sensorgruppe der I²C-Sensoren auf der Radiatorplatte weist hingegen bei diesem Abstand einen Wert von $7,40 \pm 0,19$ °C und im Durchschnitt aller Abstände 6,02 °C $\pm 0,53$ °C.

Aus den Temperaturverläufen ist zu erkennen, dass sich das Luftvolumen innerhalb der MWPC, entgegen der in Abschnitt 5.2.1 getroffenen Annahmen, deutlich stärker aufheizt als erwartet. Die maximal erreichte absolute Temperatur des Luftvolumens beträgt $42,33 \pm 0,5$ °C bei einem Abstand der Radiatorplatte von 10 cm. Der Gasverstärkungsfaktor, der für diese und alle weiteren Messungen aus Abbildung 5.2 bei einer Hochspannung von 1800 V bestimmt wurde, liegt bei dieser Temperatur etwa um den Wert 200 höher als bei einer Lufttemperatur von 20 °C. Dies entspricht exakt 10 % der Gasverstärkungsfaktors des CBM-TRDs von 2000. Im Betrieb des CBM-TRDs ist somit beim Auftreten entsprechender Gastemperaturen eine Reduzierung der Temperatur durch ein geeignetes Kühlsysteme zwingend notwendig, um die Abweichung des Gasverstärkungsfaktor unter den Grenzwert von 200 zu bringen. Zum Abstand von 29,5 cm fällt die absolute Temperatur des Luftvolumens um 2 K ab. Die Erhöhung des Gasverstärkungsfaktors fällt hierbei um die Hälfte auf einen Wert von 100.

Messungen mit 118 W Gesamtleistung und Vergleich mit 143 W Gesamtleistung

Die Temperaturverläufe der Messungen weisen, wie die Messungen im vorherigen Abschnitt 7.4.1 keine besonderen Auffälligkeiten auf. Die Temperaturen bleiben nach Erreichen des thermischen Gleichgewichtszustands bis zum Ende der jeweiligen Messung auf einem konstanten Niveau. Beispielhaft hierfür sei ebenfalls die Messung bei einem Abstand der Rohacellplatte von 10 cm angeführt (siehe Abbildung 7.20).



Abbildung 7.20: Zeitlicher Temperaturverlauf aller Sensoren des Versuchsaufbaus bei einer Gesamtleistung von 118W und einem Abstand der Radiatorplatte von 10 cm.



Abbildung 7.21: Relative Durchschnittstemperaturen aller Sensoren bei den Abständen der Radiatorplatte von 10, 15, 20, 25 und 29,5 cm. Die Gesamtleistung des Heizsystems beträgt bei allen Abständen 118 W.



Abbildung 7.22: Fit mit der Funktion 7.1 an die relativen Durchschnittstemperaturen der Sensoren auf dem Backpanel bei einer Gesamtheizleistung von 118 W.

Zum Vergleich mit der vorangegangenen Messreihe wurden ebenfalls für jeden Abstand die Durchschnittstemperaturen aller Sensoren gebildet und auf die jeweilige Raumtemperatur. Ein Vergleich aller Messungen der Messreihe ist in Abbildung 7.21 dargestellt.

Im Vergleich zur Messreihe im vorherigen Abschnitt ist zu erkennen, dass die Temperaturen der Sensoren auf dem Backpanel und dem oberen Rahmen der MWPC mit steigendem Abstand der Radiatorplatte deutlich stärker sinken. Die Sensoren auf der Radiatorplatte weisen im Vergleich hingegen fast exakt die gleichen Temperaturen bei allen Abständen auf. Die höchste relative Durchschnittstemperatur der gesamten Sensorgruppe der I²C-Sensoren auf der Radiatorplatte beträgt $8,45 \pm 0,19$ °C und im Durchschnitt aller Abstände $5,58 \pm 0,79$ °C. Da sowohl die konvektive als auch die radiativ abgestrahlte Wärmemenge, die zum Backpanel transportiert wird, aufgrund der niedrigeren Leistung des Heizsystems, geringer sein sollte als bei 143 W, sollten diese Sensoren jedoch ebenfalls niedrigere Temperaturen aufweisen. Am Wärmetransport zur Radiatorplatte scheinen deswegen weitere komplexere Prozesse beteiligt zu sein, als die in Kapitel 4 angeführten Formen des Wärmetransports. Die Verhältnisse t*1 und t*2 steigen zwischen den Abständen 10 und 29,5 cm von 0,89 auf 1,068 beziehungsweise von 2,43 auf 4,25 an. Die Abhängigkeit vom Abstand der Rohacellplatte ist, wie in den Messungen in Abschnitt 7.4.1, ebenfalls linear.

	Strömungsgeschwindigkeit $\left[\frac{m}{s}\right]$				
Abstand [cm]	10	15	20	25	29,5
	$0{,}09\pm0{,}01$	$0{,}07\pm0{,}01$	$0,\!05\pm0,\!01$	$0,\!04 \pm 0,\!01$	$0,03 \pm 0,01$
Verhältnis	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7

Tabelle 7.3: Minimale Strömungsgeschwindigkeiten, die benötigt werden, um die gesamte Wärmeleistung von 118 W bei den gemessenen Temperaturen durch die strömende Luft aus dem passiv gekühlten Versuchsaufbau herauszutransportieren sowie das Verhältnis zu den Strömungsgeschwindigkeiten bei einer Wärmeleistung von 143 W

Wie in Abbildung 7.22 dargestellt, lässt sich ein inverser exponentieller Abfall der Temperaturen mit steigendem Abstand der Radiatorplatte in den Messungen mit 118 W nicht mehr erkennen. Darüber hinaus konnte keine andere klar erkennbare Abhängigkeit festgestellt werden.

Die höchste Temperaturerhöhung tritt, wie in der Messreihe bei 143 W, auf dem SPADIC und dem darunter liegenden I²C-Sensoren am oberen Rahmen der MWPC auf. Die durchschnittliche Temperaturerhöhung dieser Sensoren beträgt für alle Abstände $21,10 \pm 0,17$ °C und liegt damit 3,66 K unter dem Durchschnitt bei 143 W. Die Abweichung zwischen diesen Sensoren beträgt durchschnittlich 5,81 K ± 0,15 K. Die höchste absolute Durchschnittstemperatur des SPADICs, die in dieser Messreihe ermittelt wurde, beträgt 45,16 Grad.

Die maximale Durchschnittstemperatur des Luftvolumens innerhalb der MWPC liegt mit 40,20 °C $\pm 0,50$ °C 2,1 K niedriger als in der Messung mit 143 W Gesamtleistung. Dies entspricht einer Erhöhung des Gasverstärkungsfaktors um den Wert 115, im Vergleich zum Wert bei der durchschnittlichen Raumlufttemperatur während der Messungen von $20,20 \pm 0,50$ °C. Die Erhöhung liegt somit innerhalb des Grenzwertes der maximalen Abweichung von 200.

Bei den Sensoren am oberen Rahmen der MWPC tritt eine durchschnittliche Temperaturerhöhung für alle Abstände von $18,30 \pm 0,29$ °C auf und liegt damit 3,6 K unter dem Durchschnitt bei 143 W. Die Abweichung zwischen diesen Sensoren bleibt weiterhin bestehen und beträgt durchschnittlich 3,06 K. Die Strömungsgeschwindigkeiten bei den Abständen 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm und 29,5 cm sowie das Verhältnis zu den Strömungsgeschwindigkeiten bei gleichen Abständen in Abschnitt 7.4.1 sind in Tabelle 7.3 aufgeführt. Dieses Verhältnis beträgt im Durchschnitt 0,8. Es tritt, wie in den Messungen in Abschnitt 7.4.1, eine annähernd lineare Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeiten vom Abstand der Rohacellplatte in erfassten Messbereich auf.

7.4.2 Temperaturmessungen mit Kühlsystem

Messungen mit aktiver Luftkühlung

Nach den beiden vorherigen Messreihen wurde das in Abschnitt 6.4 erläuterte Kühlsystem zunächst ohne den Diffusor in den Versuchsaufbau integriert und weitere Temperaturmessungen durchgeführt. In den beiden vorherigen Messreihen ohne Kühlsystem traten die höchsten Temperaturzunahmen aller Sensoren beim kürzesten Abstand der Radiatorplatte von 10 cm auf. Mit dem integrierten Kühlsystem wurden aus diesem Grund zwei weitere Messreihen bei diesem sowie einem Abstand von 15 cm durchgeführt. Jede der beiden Messreihen umfasst hierbei drei Einzelmessung bei Lüfterspannungen von 8, 10 und 12 V. Diese Spannungen entsprechen Drehzahlen von 600, 800 und 1080 $\frac{1}{s}$ für die beiden ebm-papst Axiallüfter und 1140, 1410 und 1560 $\frac{1}{s}$ für die beiden Sanyo Axiallüfter. Die Gesamtleistung des Heizsystems betrug während der Messungen 143 W. Mit den Messungen soll überprüft werden, in wieweit die Verwendung eines Kühlsystems die Temperaturen innerhalb des CBM-TRDs senken kann und welche Leistung in Form der erzeugten Strömungsgeschwindigkeit im strömenden Luftvolumen das Kühlsystem bereitstellen muss, um die gesamte Wärme aus dem Versuchsaufbau herauszutransportieren.

Die relativen Durchschnittstemperaturen aller Sensorgruppen sind für beide Messungen in Tabelle 7.4 aufgeführt.

Aus Tabelle 7.4 sowie den beiden Abbildungen 7.23 und 7.24 ist jeweils zu erkennen, dass die Temperaturen aller Sensoren nun ihre höchsten Durchschnittswerte bei einem Abstand der Radiatorplatte von 15 cm statt wie in den Messungen ohne Kühlsystem bei 10 cm annehmen. Die relativen Durchschnittstemperaturen aller Sensoren fallen in den Messungen bei einem Abstand von 10 cm annähernd exponentiell mit der Erhöhung der Lüfterspannung ab. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass auch der Zugewinn der Kühlleistung von 8 auf 12 V Lüfterspannung annähernd exponentiell sinkt. Diese Abhängigkeit ist in den Messungen bei 15 cm allerdings nicht mehr gegeben.

Für die Verhältnisse $t*_1$ und $t*_2$ wurden bei der Nominalspannung der Lüfter von 12 V jeweils die Werte 0,96 und 3,72 bei einem Abstand von 10 cm sowie 1,14 und 6,8 bei einem Abstand von 15 cm ermittelt. Da die beiden Verhältnisse im Vergleich zu den vorherigen Messungen deutlich stärker ansteigen, wird vermutet, dass der Anteil der Wärme, die aus dem Versuchsaufbau heraustransportiert wird, ebenfalls entsprechend dem Verhältnis der Raten des Anstiegs von $t*_1$ und $t*_2$ ansteigt.

	Relative Durchschnittstemperatur [°C]			
Lüfterspannung [V]	8	10	12	
Sensorgruppe				
Abstand [cm]				
Backpanel				
10	$10,70 \pm 0,35$	$8{,}84\pm0{,}35$	$7{,}92\pm0{,}35$	
15	$11,\!16\pm0,\!35$	$9{,}00\pm0{,}35$	$6{,}63\pm0{,}35$	
SPADIC				
10	$12{,}87\pm0{,}50$	$10{,}34\pm0{,}50$	$9{,}05\pm0{,}50$	
15	$13,\!24 \pm 0,\!50$	$10,\!36\pm0,\!50$	$7{,}59\pm0{,}50$	
Luftvolumen innerhalb MWPC				
10	$11,\!46 \pm 0,\!50$	$9{,}25\pm0{,}50$	$7{,}38\pm0{,}50$	
15	$12,\!24 \pm 0,\!50$	$10{,}08\pm0{,}50$	$7{,}48\pm0{,}50$	
Oberer Rahmen				
10	$13,\!69 \pm 0,\!29$	$10{,}3846 \pm 0{,}29$	$8{,}77\pm0{,}29$	
15	$17,\!15 \pm 0,\!29$	$14,00 \pm 0,29$	$8{,}67\pm0{,}29$	
Radiatorplatte				
10	$3{,}79\pm0{,}19$	$2{,}80\pm0{,}19$	$2{,}35\pm0{,}19$	
15	$3{,}90\pm0{,}19$	$2{,}82\pm0{,}19$	$1{,}28\pm0{,}19$	

Tabelle 7.4: Relative Durchschnittstemperaturen der Sensoren innerhalb einer Sensorgruppe der Messungen mit integriertem Kühlsystem ohne zusätzlichen Diffusor bei 8, 10 und 12 V Lüfterspannung.



Abbildung 7.23: Vergleich der relativen Durchschnittstemperaturen aller Sensoren der Messungen mit integriertem Kühlsystem ohne zusätzlichen Diffusor bei 8, 10 und 12 V Lüfterspannung und 10 cm Abstand der Radiatorplatte.



Abbildung 7.24: Vergleich der relativen Durchschnittstemperaturen aller Sensoren der Messungen mit integriertem Kühlsystem ohne zusätzlichen Diffusor bei 8, 10 und 12 V Lüfterspannung und 15 cm Abstand der Radiatorplatte.

Bei der Lüfterspannung von 12 V beträgt der Temperaturunterschied des Luftvolumens innerhalb der MWPC zur durchschnittlichen Raumtemperatur bei einem Abstand von 10 cm 8,77 K und bei 15 cm 8,67 K. Die Erhöhung des Gasverstärkungsfaktors entspricht somit bei beiden Abständen weniger als 10 gegenüber dem Wert bei Raumtemperatur. Dies entspricht einem Zuwachs des Gasverstärkungsfaktors des CBM-TRDs von 0,05% und liegt somit deutlich unterhalb des festgelegten Grenzwertes von 10\%. Dieser Grenzwert wird auch bei Lüfterspannungen von 10V und 8V mit einem Zuwachs des Gasverstärkungsfaktors von 40 bzw. 70 nicht überschritten.

Darüber hinaus treten die höchsten Temperaturzunahmen nun bei allen Abständen (ausgenommen vom SPADIC) an den Sensoren am oberen Rahmen der MWPC auf. Dies stellt einen Hinweis darauf dar, dass nun der Großteil der produzierten Wärme aus dem Versuchsaufbau heraustransportiert wird. Im Vergleich zu den Messungen in Abschnitt 7.4.1 im passiv gekühlten Aufbau konnten die Temperaturen der ausströmenden Luft mit Hilfe des Kühlsystems bei einer Lüfterspannung von 12 V und einem Abstand von 10 cm um bis zu 14,4 K und bei 15 cm um bis zu 15 K gesenkt werden. Die höchste absolute Durchschnittstemperatur des SPADICs konnte bei Nominalspannung der Lüfter auf durchschnittlich $26,05 \pm 0,5$ °C und $23,10 \pm 0,05$ °C bei den Abständen 10 beziehungsweise 15 cm gesenkt werden. Eine aktive Luftkühlung der Volumina in

	Strömungsgeschwindigkeit $\left[\frac{m}{s}\right]$			
Lüfterspannung [V]	8	10	12	
Abstand [cm]				
10	$0,\!16\pm0,\!01$	$0{,}20\pm0{,}01$	$0{,}24\pm0{,}01$	
15	$0{,}08\pm0{,}01$	$0{,}10\pm0{,}01$	$0{,}16\pm0{,}01$	
Verhältnis				
10	$1,\!6$	2,0	2,4	
15	1	$1,\!3$	2	

Tabelle 7.5: Minimale Strömungsgeschwindigkeiten, die benötigt werden, um die gesamte Wärmeleistung von 143 W bei den gemessenen Temperaturen durch die strömende Luft aus Versuchsaufbau mit Hilfe des Kühlsystems herauszutransportieren sowie das Verhältnis zu den Strömungsgeschwindigkeiten bei einer Wärmeleistung von 143 W

den TRD-Lagenzwischenräumen ist daher mit jetzigem Verständnis zu empfehlen. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind in Tabelle 7.5 gezeigt.

Eine Abweichung der Durchschnittstemperaturen der Sensoren am oberen Rahmen der MWPC besteht, wie in den vorherigen Messungen, weiterhin und beträgt maximal 5,1 K. Trotz des symmetrischen Aufbaus sowohl des Heiz- als auch des Kühlsystems besteht ein möglicher Grund hierfür darin, dass der vom Kühlsystem erzeugte Luftstrom nicht gleichmäßig in den Versuchsaufbau hineinströmt. Um diese Hypothese zu überprüfen wurde für die letzten Temperaturmessungen der in Abschnitt 6.4 gezeigte Diffusor in den Versuchsaufbau integriert und die Messungen bei einer Gesamtleistung des Heizsystems von 143 W und einer Lüfterspannung von 12 V wiederholt. Hierbei wurden die Abstände der Radiatorplatte mit 14, 15 und 16 cm gewählt, um den Bereich mit den höchsten relativen Durchschnittstemperaturen zu analysieren. Die Ergebnisse dieser Messungen werden im folgenden Unterkapitel präsentiert.

Messungen mit Luftkühlung und integriertem Diffusor

Abbildung 7.25 zeigt, dass im vermessenen Bereich die höchsten Temperaturzunahmen aller Sensoren weiterhin bei einem Abstand von 15 cm gemessen wurden. Die relativen Durchschnittstemperaturen der Sensoren am oberen Rahmen der MWPC fallen bei diesem Abstand jedoch um 4,03 K wärmer aus, als bei den Messungen in Abschnitt 7.4.2.

Die relativen Durchschnittstemperaturen aller Sensorgruppen sind für alle drei Messungen in Tabelle 7.6 aufgeführt.



Abbildung 7.25: Vergleich der relativen Durchschnittstemperaturen aller Sensoren der Messungen mit integriertem Kühlsystem inklusive Diffusor bei 12 V Lüfterspannung und Abständen der Radiatorplatte von 14 cm, 15 cm und 16 cm.

Relative Durchschnittstemperatur [°C]					
Sensorgruppe	14 cm	15 cm	16 cm		
Backpanel	$7{,}70\pm0{,}35$	$8{,}80\pm0{,}35$	$7{,}21\pm0{,}35$		
SPADIC	$9{,}60\pm0{,}50$	$10,\!31 \pm 0,\!50$	$8{,}91\pm0{,}50$		
Luftvolumen innerhalb MWPC	$8{,}71\pm0{,}50$	$9{,}83\pm0{,}50$	$8{,}64\pm0{,}50$		
Oberer Rahmen	$11,03 \pm 0,29$	$12,70 \pm 0,29$	$11,03 \pm 0,29$		
Radiatorplatte	$3{,}45\pm0{,}19$	$4{,}42\pm0{,}19$	$2{,}94\pm0{,}19$		

Tabelle 7.6: Relative Durchschnittstemperaturen der Sensoren innerhalb einer Sensorgruppe der Messungen mit integriertem Kühlsystem und zusätzlichem Diffusor bei Abständen der Radiatorplatte von 14, 15 und 16 cm

	Strömungsgeschwindigkeit $\left[\frac{m}{s}\right]$			
Abstand [cm]	14	15	16	
	$0{,}14\pm0{,}01$	$0{,}11\pm0{,}01$	$0{,}12\pm0{,}01$	
Verhältnis	1,6	1,4		

Tabelle 7.7: Minimale Strömungsgeschwindigkeiten, die benötigt werden, um die gesamte Wärmeleistung von 143 W bei den gemessenen Temperaturen durch die strömende Luft aus Versuchsaufbau mit Hilfe des Kühlsystems herauszutransportieren sowie das Verhältnis zu den Strömungsgeschwindigkeiten bei einer Wärmeleistung von 143 W, sofern diese Angabe möglich ist.

Auch die Durchschnittstemperaturen der Sensoren auf dem Backpanel und der Radiatorplatte sind, im Vergleich zu diesen Messungen, um 2,66 K bzw. 3,12 K gestiegen. Ein Grund hierfür könnte sein, dass der Diffusor dem Luftstrom einen zu hohen Strömungswiderstand entgegensetzt und somit die Strömungsgeschwindigkeit im strömenden Luftvolumen sinkt. Um dies zu überprüfen sind allerdings genaue Messungen des Strömungsverhaltens mit dem Diffusor nötig, die im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden konnten. Die Strömungsgeschwindigkeiten für die Abstände 14, 15 und 16 cm sind in Tabelle 7.7 aufgeführt. Die annähernd lineare Abhängigkeit vom Abstand der Rohacellplatte konnte hierbei nicht festgestellt werden. Das Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeit bei 15 cm zu derjenigen aus den Messungen in Abschnitt 7.4.1 bei gleichem Abstand beträgt 1,8.

Die Temperaturen aller Sensoren fallen sowohl bei der Vergrößerung als auch Verkleinerung des Abstands zu 14 cm bzw. 16 cm hin gleichermaßen ab. Da bereits in den Messungen in Abschnitt 7.4.2 bei einem Abstand der Radiatorplatte von 15 cm keine invers exponentielle Abhängigkeit der Temperaturen mehr festgestellt werden konnte, wird angenommen, dass sich diese Abhängigkeit trotz des χ^2 von 0,9846 nur augenscheinlich ergibt. Die Durchschnittstemperatur der Sensoren am oberen Rahmen sinkt jeweils um 1,7 K. Die Differenz zwischen den Durchschnittstemperaturen dieser Sensoren bleibt in den Messungen mit Diffusor weiterhin bestehen und steigt bei einem Abstand von 16 cm auf maximal 5,41 K an. Für die Abstände 14, 15 und 16 cm wurden die höchsten absoluten Durchschnittstemperaturen auf der Oberfläche des SPADICs zu 22,60 \pm 0.5 °C, 26,30 \pm 0.5 °C und 24,91 \pm 0.5 °C ermittelt.

Während das Verhältnis $t*_1$ zwischen den Abständen von 14 bis 16 cm von 1,451 auf 1,53 ebenfalls linear mit dem Abstand ansteigt, ist dies für das Verhältnis $t*_2$ nicht mehr zu beobachten. Da jedoch in allen Messungen ein linearer Anstieg von $t*_1$ festzustellen ist, kann angenommen werden, dass die Wärmemenge, die vom strömenden Luftvolumen aus dem Versuchsaufbau heraustransportiert wird, sowohl im aktiv als auch passiv gekühlten Aufbau linear mit dem Abstand der Rohacellplatte ansteigt.

Die Erhöhung des Gasverstärkungsfaktors bei der maximal gemessenen Temperaturdifferenz zur Temperatur der Raumluft von 9,83 K beträgt etwa 15. Die Grenzwerte der Gasverstärkung werden bei dieser Messung somit ebenfalls eingehalten.

Vermessung des Wärmestroms am oberen Rahmen der MWPC

Da die Temperaturdifferenz zwischen den Sensoren am oberen Rahmen der MWPC auch nach der Integration des Diffusors bestehen bleibt, wurden im Anschluss an die Messungen aus Abschnitt 7.4.2 an 17 Positionen des oberen Rahmens weitere Temperaturmessungen des aktiv gekühlten Versuchsaufbaus mit dem integrierten Diffusor durchgeführt. Hierzu wurde der DS18B20 Sensor genutzt, der in den vorherigen Messungen zur Temperaturmessung der Raumluft eingesetzt wurde. Der Sensor wurde hierzu auf einer Rohacellplatte befestigt, um einen thermischen Kontakt mit dem Aluminiumrahmen zu vermeiden. Die Position des Sensors wurde in jeder Messung so fixiert, dass sich dieser auf gleicher Höhe wie die I²C-Sensoren auf dem oberen Rahmen der MPWC befindet und etwa 3 cm über den Rand des Aluminiumrahmens in das strömende Luftvolumen hineinragt. Die Dauer jeder Messung betrug jeweils 10 Minuten.

Abbildung 7.26 zeigt die absoluten Durchschnittstemperaturen an verschiedenen Positionen des oberen Rahmens der MWPC. Die ermittelten Durchschnittstemperaturen bilden weitestgehend die gleichen Abweichungen der I²C-Sensoren (sowohl während dieser als auch allen vorangegangenen Messungen) nach.

Aus den Messungen lässt sich ermitteln, dass die Verteilung des Wärmestroms am oberen Rahmen der MWPC trotz symmetrischem Aufbau, symmetrischer Leistungsverteilung und Verwendung eines Diffusors, weiterhin nicht homogen ist. Als mögliche Erklärung für dieses Verhalten kann die Hypothese der Ausbildung von Luftsäulen unterschiedlicher Breite und Temperatur innerhalb des strömenden Luftvolumens angeführt werden. Die entstehende Wärme wird somit nicht homogen aus dem Versuchsaufbau heraustransportiert, sodass sich am oberen Rahmen der MWPC Zonen unterschiedlicher Temperatur bilden. Die ungleichmäßige Verteilung der Temperatur am oberen Rahmen der MWPC bleibt durch die Ergebnisse dieser Messung weiterhin nicht vollständig erklärbar.



Abbildung 7.26: Grafische Darstellung der absoluten Durchschnittstemperaturen bei den Abständen 5, 8,5 , 11,5 , 15 , 18 , 20 , 22,5 , 25,5 , 28,5 , 32 , 34,5 , 37 , 39 , 42,5 , 44,5 , 47 und 49 cm am oberen Rahmen der MWPC. Die Abstandsangaben sind jeweils relativ zur linken Außenkante der MWPC. Die Temperaturen in der unteren Reihe wurden mit Hilfe des nicht-vergossenen DS18B20 in jeweils 10 minütigen Messungen ermittelt. Die drei Temperatursignaturen in der oberen Reihe bilden jeweils die Durchschnittstemperatur der I²C-Sensoren an den jeweiligen Positionen ab.

8 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein Versuchsaufbau konzipiert und realisiert, durch den die Simulation und Untersuchung des Wärmetransports eines CBM-TRD-Moduls des Typ 1 ermöglicht wurde.

Die Funktionalität des Versuchsaufbaus wurde durch Infrarotmessungen sowie Kaltmessungen und einer anschließenden Sensorkalibration überprüft. Danach wurden Temperaturmessungen im aktiv und passiv gekühlten Zustand des Versuchsaufbaus bei einer Gesamtleistung des Heizsystems von bis zu 143 W und variablem Volumen der konvektiv durch den Versuchsaufbau strömenden Luft durchgeführt. Hierbei wurden die Temperaturen der in und aus dem Versuchsaufbau strömenden Raumluft, des Backpanels, des Radiators sowie des Luftvolumens innerhalb der MWPC aufgezeichnet und miteinander verglichen. Eine klare Abhängigkeit der Temperaturen von der Größe des Volumens konnte im erfassten Messbereich, trotz der invers exponentiellen Abhängigkeit einiger Sensoren in einem Teil der Messungen, nicht festgestellt werden.

Aufgrund der Symmetrie des Versuchsaufbaus sowie der symmetrischen Verteilung der Heizleistung wurde zunächst angenommen, dass die Temperatursensoren innerhalb einer Sensorgruppe bei gleicher vertikaler bzw. horizontaler Positionierung nur innerhalb der angegebenen Genauigkeit voneinander abweichen. Während der Messungen wurde jedoch eine Abweichung zwischen den Temperatursensoren am oberen Auslass des strömenden Luftvolumens festgestellt, welche über die angegebene Genauigkeit der Sensoren hinausgeht. Diese Abweichung blieb auch nach der Kalibration der betroffenen Sensoren, der Nachdichtung des Versuchsaufbaus, einer erneuten Kontrolle der an den Heizwiderständen anliegenden Spannungen sowie der Integration des Diffusors in den Versuchsaufbau bestehen. Als Ursache für die Abweichungen werden lokale Luftsäulen unterschiedlicher Ausdehnung und Temperatur innerhalb des strömenden Luftvolumens angenommen.

Hierbei zeigte sich in den Messungen ohne Kühlsystem, dass die höchsten normierten Durchschnittstemperaturen bei den beiden Sensoren auf sowie rechts unterhalb des SPADICs auftreten. Es kann vermutet werden, dass im passiv gekühlten System ein höherer Anteil der produzierten Wärme innerhalb des Versuchsaufbaus verbleibt, als durch die natürliche Konvektion aus dem Aufbau heraustransportiert wird. Die Verschiebung der maximalen normierten Durchschnittstemperaturen zu den Sensoren auf dem oberen Rahmen der MWPC in den Messungen mit integriertem Kühlsystem zeigt jedoch, dass dessen Einsatz der überwiegende Teil der produzierten Wärme aus dem Versuchsaufbau heraustransportiert werden kann.

Aus den gemessenen Temperaturen wurden die Strömungsgeschwindigkeiten des strömenden Luftvolumens ermittelt, die aufgebracht werden müssen, um die gesamte zugeheizte Wärmeleistung aus dem Versuchsaufbau zu entfernen. In den Messungen mit einer Heizleistung von 143 W im passiv gekühlten Versuchsaufbau beträgt diese, je nach Abstand der Radiatorplatte, zwischen 0,04 und 0,1 $\frac{m}{s}$. Bei einer Heizleistung von 118 W muss durchschnittlich 80 % dieser Strömungsgeschwindigkeit aufgebracht werden. Die Strömungsgeschwindigkeiten in den Messungen mit integriertem Kühlsystem liegen bei den vermessenen Abständen in einem Bereich zwischen 0,08 und 0,24 $\frac{m}{s}$ und unter der Verwendung des Diffusors zwischen 0,11 und 0,14 $\frac{m}{s}$.

Weiterhin konnte in den Messungen des beheizten, jedoch passiv gekühlten Versuchsaufbaus bei einigen Sensoren ein exponentieller Abfall der Temperaturen mit steigendem Abstand der Radiatorplatte vom Backpanel festgestellt werden. Auch in den Messungen mit Kühlsystem ist diese Abhängigkeit in einer der Messreihen zu erkennen. Da diese Abhängigkeit jedoch nicht in allen Messreihen besteht, kann im erfassten Messbereich nicht von einer generellen invers exponentiellen Abhängigkeit der Temperaturen von diesem Abstand ausgegangen werden. Eine generelle Verringerung der Temperatur mit steigendem Abstand zeigte sich lediglich in den Messungen des passiv gekühlten Systems.

Die ermittelte maximale absolute Temperatur des SPADICs liegt mit $49,25,\pm 0.5$ °C deutlich unterhalb der für integrierte Schaltkreise kritischen Temperatur von 90 °C. Eine Beschädigung des SPADICs durch einen übermäßigen Wärmeeintrag ist unter den thermischen Bedingungen des CBM-Experiments deswegen auch im Dauerbetrieb nicht zu erwarten.

In den Messungen wurde eine lineare Abhängigkeit des Verhältnisses der normierten Durchschnittstemperaturen der Sensoren an der Position der aus dem Versuchsaufbau herausströmenden Luft und den Sensoren auf dem Backpanel im erfassten Messbereich beobachtet. Es wird somit erwartet, dass die transportierte Wärmemenge durch die strömende Luft, sowohl im passiv gekühlten Zustand des Versuchsaufbaus als auch unter Einsatz eines Kühlsystems, mit steigendem Abstand der Rohacellplatte des Radiators zum Backpanel einer MWPC linear zunimmt.

In theoretischen Abschätzungen zum Verhalten der Komponenten des CBM-TRDs unter Wärmeeintrag wurde zunächst angenommen, dass für das Detektorgas des CBM-TRDs keine kritische Erhöhung der Gasverstärkung auftritt und sich die Ausdehnung des Radiators im Bereich unkritischer Maße befindet. Bei den Messungen mit einer Heizleistung von 143 W im passiv gekühlten Versuchsaufbau wurde bei einem Abstand der Radiatorplatte von 10 cm jedoch Temperaturen des Luftvolumens innerhalb der MWPC gemessen, die im Betrieb des CBM-TRDs mit einem Xe/CO₂-Gasgemisch einer Erhöhung des Gasverstärkungsfaktors um 10% gegenüber des Faktors bei einer Temperatur von 20°C entsprechen würden. Da dies der kritischen Abweichung des Gasverstärkungsfaktors des CBM-TRDs entspricht, wird der Einsatz eines Kühlsystems bei diesem Abstand der Rohacellplatte und einer Heizleistung von 143 W empfohlen. Für sämtliche anderen Messungen wurden unkritische Erhöhungen der Gasverstärkung ermittelt. Da sich zudem in allen Messungen die normierten Durchschnittstemperaturen aller Sensoren auf der Radiatorplatte im Temperaturbereich unterhalb von 10K befinden, wird die maximale Ausdehnung der Radiatorplatte auf weniger als 0,2 mm abgeschätzt.

Da nach Abschluss der Messungen alle Sensoren mit Ausnahme des vergossenen DS18B20-Sensors aus dem Versuchsaufbau entfernt werden konnten, wurde eine Nachkalibration dieser Sensoren durchgeführt. Mit den Kalibrationen kann ein potenzieller zeitlicher Drift der Genauigkeit der Sensoren ermittelt werden. Die Auswirkungen dieser Nachkalibration auf die Ergebnisse dieser Arbeit werden zurzeit analysiert und ausgewertet.

Literaturverzeichnis

- [GSI23a] GSI Webpage. https://www.gsi.de/forschungbeschleuniger/fair/die_maschine. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [Par22] Partha Pratim Bhaduri. The physics goals of the CBM experiment at FAIR. DOI:10.22323/1.400.0031. The CBM Collaboration, 2022
- [GSI23b] GSI Webpage. https://www.gsi.de/forschungbeschleuniger/fair_ alt/forschung_an_fair/kernmateriephysik. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [CBM23] CBM Webpage. https://www.cbm.gsi.de/detectors. Zuletzt aufgerufen: 27.02.2023.
- [CBM18] The CBM Collaboration. Transition Radiation Detector of the CBM Experiment at FAIR: Technical Design Report for the CBM Transition Radiation Detec- tor (TRD). Technical Design Report. Darmstadt, 2018.
- [KK05] Konrad Kleinknecht. Detektoren für Teilchenstrahlung, 4.Auflage.Wiesbaden: Vieweg & Teubner, 2005.
- [Kol16] Kolanoski, H., Wermes, N.. Teilchendetektoren.Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.
- [KB09] Melanie Klein-Bösing. Development of a Transition Radiation Detector and Reconstruction of Photon Conversions in the CBM Experiment.
 Dissertation. Münster: Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2009.
- [Wah20] Lukas Wahmes. Concept of TRD support.GSI Helmholtzzentrum f
 ür Schwerionenforschung GmbH, 2020.

- [Ber14] Cyrano S.H. Bergmann. Development, Simulation and Test of Transition Radiation Detector Prototypes for the Compressed Baryonic Matter Experiment at the Facility for Antiproton and Ion Research. Dissertation. Münster: Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2014.
- [Tip15] Paul A. Tipler, Gene Mosca. Physik für Wissenschaftler und Ingenieure,
 7. Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer Spektrum Berlin, Heidelberg,
 2015.
- [Sut21] Prof. Dr. D. Suter. Einführung in die Festkörperphysik, Vorlesungsskript. Dortmund : Technische Universität Dortmund, 2021. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [Bin14] Dr.-Ing. B. Binninger. Thermodynamik II, Vorlesungsskript. Aachen : RWTH Aachen, 2014.
- [Mit09] R. Mitdank. Das Lenard-Jones-Potential, Vorlesungsskript. Berlin : HU Berlin, 2009. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [Erj21] Erjun Liang, Qiang Sun, Huanli Yuan, et al. Negative thermal expansion: Mechanisms and materials. Front. Phys. 16(5): 53302, 2021.
- [KaeRo22] Philipp Kähler ,Florian Roether. Engineering Design Review for the TRD HV and LV systems. The TRD Group, zu veröffentlichen.
- [Kae22] Nach privater Kommunikation mit Philipp Kähler.
- [Du22] Du Pont Webpage. DuPontTMKapton[®] Nomex[®] 818 Technical Datasheet. DuPontTM, 2022.
- [Du16] Du Pont Webpage. $DuPont^{TM}Kapton^{\textcircled{B}}$ Summary of Properties. DuPont^{TM}, 2016.
- [Web23] Webelements Webpage. https://www.webelements.com/xenon/. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [Sch23a] Schweizer-fn Webpage. https://www.schweizer-fn.de/stoff/wleit_gase/wleit_gase.php. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.

- [Sch23b] Schweizer-fn Webpage. https:/www.schweizerfn.de/stoff/wleit_metall/wleit_metall.php. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [Mok23] Moko Technology Webpage. https://www.mokotechnology.com/de/pcbthermal-conductivity-and-its-importance/. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [Swi23] Swiss Composite Webpage. Rohacell Technical Datasheet https://www.swiss-composite.ch/pdf/t-Rohacell-d-f.pdf?. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [KIT23] Karlsruher Institut für Technologie Webpage. http://www.physik.kit. edu/Studium/Lehramt/Uebersicht_Netzgeraete_sortiert.pdf. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [Vas06] Arman Vassighi, Manoj Sachdev. Thermal and Power Management of Integrated Circuits. New York: Springer New York, 2006.
- [Go23] Goodfellow Webpage.https://www.goodfellow.com/uk/enus/displayitemdetails/p/et31-sh-000123/polyethylene-lowdensity-sheet. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [WKW16] Bernhard Weigand, Jürgen Köhler, Jens von Wolfersdorf. Thermodynamik kompakt Formeln und Aufgaben, 2. Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, 2016.
- [ABBFK21] Anton Andronic, Christoph Blume, Daniel Bonaventura, et al.. Conceptual Design Review for the TRD gas system. Internal review, 2021.
- [Gla04] P. Glässel, A. Marín, V. Petraček, et al. PRR of TRD Cooling System. The ALICE Collaboration, 2004
- [Sig22] Herbert Sigloch. Technische Fluidmechanik, 11. Auflage.Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, 2022.
- [TE11] TE Connectivity FlexLite ©. Dez. 2011. https://www.te.com/deu-de/product-0680693001.html.

- [Tex19] Texas Instruments. Temperature sensing fundamentals. https://www.ti.com/lit/an/snoaa25/snoaa25.pdf?ts= 1676293244946&ref_url=https%253A%252F%252F. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [Sco23] Scott Campbell. Basics of the I2C Communication Protocol. https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2ccommunication-protocol/. Online Artikel. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [Max23] Maxim Integrated MAX31726 MTA+ Datenblatt. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/MAX31725-MAX31726.pdf. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [DS23] DS18B20 Datenblatt. https://www.fuehlersysteme.de/ RequestDatasheet.php?sku=KS%2FB-1W&store=de_de. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [UHU23] UHU PLUS ENDFEST 300 Datenblatt. https://www.uhu-profi.de/content/dam/boltonadhesives/ products/import/92/de/45683/50.pdf. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [Ar23] Araldite® AW 106 / Hardener HV 953 U Datenblatt. https://www.kremerpigmente.com/elements/resources/products/ files/97940_TDB.pdf. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [Bon22] Daniel Bonaventura. ZB-Diffusor. Technische Zeichnung, 2022.
- [Sa23] Sanyo Denki San Ace 120 Datenblatt. https: /publish.sanyodenki.com/San_Ace_E/book/#target/page_no=158. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [Pa23] ebm papst 3412N/2GLLE-453 Datenblatt. https://docs.rs-online.com/be4c/0900766b80ac6d68.pdf. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.
- [Sch23c] Schweizer-fn Webpage. https://www.schweizerfn.de/stoff/strahlungswaerme/strahlungswaerme.php. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.

[Schn23] Patrick Michael Schneider. Zugrundeliegende Diagramme der Masterarbeit. https://uni-muenster.sciebo.de/s/FL3UPoijaEASKms. Onlineverzeichnis. Zuletzt aufgerufen: 26.02.2023.

Danksagung

Zuerst gebührt mein Dank Prof. Dr. Anton Andronic und Prof. Dr. Christian Klein-Bösing für die Ermöglichung sowie Begutachtung dieser Arbeit danken.

Ein besonderer Dank kommt Philipp Kähler zu, der diese Arbeit betreut hat, für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit.

Im Speziellen möchte ich der gesamten Arbeitsgruppe des Münsteraner CBM-TRDs danken. Ohne die Unterstützung jedes einzelnen von euch, besonders unter den schwierigen Umständen der letzten Jahre, wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Ebenfalls möchte ich mich bei Roland Berendes und seinem E-Werkstatt-Team bedanken. Eure Offenheit und Hilfsbereitschaft habe ich in meiner Zeit in der Arbeitsgruppe besonders zu schätzen gelernt.

Dies gilt auch Daniel Bonaventura und den Ingenieuren des IKP für die Mithilfe an der Konzeption und Produktion der diversen Komponenten des Versuchsaufbaus dieser Arbeit.

Einen wichtigen Beitrag leistete zudem das Team der feinmechanischen Werkstatt unter Leitung von Georg Bourichter bei der Anfertigung der Lüfterplatte des Kühlsystems sowie der Präparation der MWPC.

Ich bedanke mich bei allen lektorierenden Personen für die Korrektur dieser Arbeit. Eure besondere Hilfe hat mir dabei geholfen, in dieser Arbeit das auszudrücken, was oft nur schwer aus meiner Vorstellung heraus in Worte gefasst werden konnte.

Außerdem möchte ich mich bei meinen Freunden für die dauerhafte seelische und moralische Unterstützung und die Motivation, diese Arbeit fertigzustellen.

Nicht zuletzt möchte ich meinen Eltern für ihre selbstlose Aufopferung und die grenzenlose Liebe während meines gesamten Studieums bedanken. Mit eurer Hilfe habe ich die Kraft gefunden, an meinem Ziel festzuhalten.

Münster, 3. März 2023